

# Protocoles d'accès multiple orientés qualité de service en constellation de satellite à orbite basse

Abbas Ibrahim

▶ **To cite this version:**

Abbas Ibrahim. Protocoles d'accès multiple orientés qualité de service en constellation de satellite à orbite basse. Traitement du signal et de l'image [eess.SP]. Télécom ParisTech, 2002. Français. NNT : . tel-00005647

**HAL Id: tel-00005647**

**https://pastel.hal.science/tel-00005647**

Submitted on 5 Apr 2004

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

# Table des matières

Table des matières ..... 1
Table des figures ..... 4
1 Chapitre I ..... 7
Introduction ..... 7
1.1 Introduction ..... 7
1.2 Le réseau d'étude ..... 8
1.2.1 Généralités sur les satellites ..... 8
1.2.2 Projet de constellation de satellites pour le multimédia ..... 9
1.3 Les principaux axes d'étude ..... 9
1.3.1 La fonction CAC ..... 9
1.3.2 La couche MAC ..... 9
1.3.3 La qualité de service ..... 10
1.4 Objectifs de la thèse ..... 10
1.5 Description du contenu ..... 11
2 Chapitre II ..... 13
Aspects Technologiques et Protocolaires dans la Constellation de satellites ..... 13
2.1 Introduction ..... 13
2.2 Architecture du réseau LEOS ..... 14
2.3 Algorithmes CAC ..... 15
2.3.1 Etude générale ..... 15
2.3.2 Etude en LEOS ..... 16
2.4 Techniques MAC ..... 17
2.4.1 FDMA ..... 17
2.4.2 TDMA ..... 17
2.4.3 CDMA ..... 18
2.4.4 Aloha et ses variants ..... 23
2.4.5 Comparaison des techniques d'accès ..... 24
2.5 Efficacité des protocoles MAC dans les systèmes LEO ..... 24
2.5.1 TDMA dans LEOS ..... 24
2.5.2 CDMA dans LEOS ..... 25
2.5.3 CDMA/TDMA hybride dans LEOS ..... 27
2.6 Qualité de service ..... 28
2.6.1 QoS dans IP et ATM ..... 28
2.6.2 QoS dans l'UMTS ..... 29
2.6.3 QoS dans les satellites: ..... 30
2.7 Intégration dans le réseau terrestre ..... 32
2.7.1 Réseau d'accès en UMTS (UTRAN) ..... 32
2.7.2 Intégration du satellite dans l'UMTS ..... 35
2.8 Conclusion ..... 36
3 Chapitre III ..... 38
S-PRMA (Satellite-Packet Reservation Multiple Access) ..... 38

3.1 Introduction....38
3.2 PRMA....39
3.2.1 Sous-système de voix....40
3.2.2 Sous-système de donnée....41
3.3 Les services....42
3.4 La fonction CAC....43
3.5 Modélisation mathématique....43
3.5.1 Modèle du PRMA....44
3.5.2 Modèle du S-PRMA....45
3.6 Discussion analytique et par simulation....51
3.6.1 Service RTC (utilisateurs voix)....51
3.6.2 Service STC (sources data)....53
3.6.3 Multiplexage de services (utilisateurs voix et data)....54
3.7 Conclusion....55
4 Chapitre IV....57
S-CDMA (Satellite-Code Division Multiple Access)....57
4.1 Introduction....57
4.2 La technique CDMA....58
4.3 Le protocole S-CDMA....59
4.3.1 Sous-système voix....60
4.3.2 Sous-système de donnée....61
4.4 Les services....62
4.5 La fonction CAC....63
4.6 Le contrôle de trafic....64
4.7 Modélisation mathématique....65
4.7.1 Sous-système voix....65
4.7.2 Sous-système de data....69
4.8 Discussions analytiques et par simulation....71
4.8.1 Le RTC (utilisateurs voix)....71
4.8.2 Le STC (utilisateurs data)....75
4.8.3 Multiplexage de services (utilisateurs voix et data)....80
4.9 Conclusion....83
5 Chapitre V....84
S-CDMA/PRMA (Satellite-Code Division Multiple Access/ Packet Reservation Multiple Access)....84
5.1 Introduction....84
5.2 La technique TD-CDMA....85
5.3 Le protocole S-CDMA/PRMA....87
5.3.1 Sous-système voix....88
5.3.2 Sous-système data....89
5.4 Les services....90
5.5 La fonction CAC....91
5.6 Le contrôle de trafic....91
5.7 Modélisation mathématique....92
5.7.1 Sous-système de voix....93

5.7.2 Sous-système data ..... 97
5.8 Discussions analytiques et par simulation ..... 99
5.8.1 RTC (utilisateurs voix) ..... 99
5.8.2 STC (utilisateurs data) ..... 103
5.8.3 ITC (utilisateurs web) ..... 105
5.8.4 Multiplexage de services RTC, ITC et STC (voix, web et data) ..... 107
5.9 Conclusion ..... 110
6 Chapitre VI ..... 111
Comparaison des protocoles d'accès et des stratégies d'allocation de ressources ..... 111
6.1 Introduction ..... 111
6.2 Comparaison des protocoles ..... 112
6.2.1 Utilisateurs voix ..... 112
6.2.2 Utilisateurs data ..... 113
6.2.3 Multiplexage de services ..... 114
6.3 Allocation de ressources ..... 115
6.3.1 Allocation de ressources dans la littérature ..... 115
6.3.2 Allocation de ressources en S-CDMA ..... 118
6.3.3 Allocation de ressources en S-CDMA/PRMA ..... 125
6.4 Conclusion ..... 135
7 Chapitre VII ..... 136
Conclusion ..... 136
Ouvertures : ..... 137
8 Références : ..... 139
9 Publications ..... 144
10 Appendice A : Modèle de simulation ..... 145

# Table des figures

Figure 1.1 Constellation des satellites IRIDIUM ....8
Figure 2.1 Architecture de la constellation des satellites....14
Figure 2.2 Effet de hand-off sur la fonction CAC ....16
Figure 2.3 Technique d'accès FDMA ....17
Figure 2.4 Technique d'accès TDMA ....18
Figure 2.5 Technique d'accès CDMA....18
Figure 2.6 Description du CDMA ....19
Figure 2.7 Définition du processus d'étalement....20
Figure 2.8 Définition du processus de détalement....20
Figure 2. 9 Résumé de la technique CDMA ....21
Figure 2. 10 Génération des codes orthogonaux....21
Figure 2.11 Allocation de la bande passante en WCDMA dans l'espace Temps-Fréq.-Code..23
Figure 2.12 Relation entre l'étalement et le srambling ....23
Figure 2.13 Canal d'accès dans IRIDIUM ....25
Figure 2.14 Canal CDMA/TDMA hybride....27
Figure 2. 15 Architecture de la QoS dans UMTS....29
Figure 2.16 IP sur ATM dans la communication par satellite ....31
Figure 2.17 Couverture en UMTS ....32
Figure 2.18 Réseau d'accès UTRAN ....33
Figure 2.19 Vue en couche de l'interface radio de l'UTRAN ....34
Figure 2.20 Encapsulation des paquets arrivant du réseau coeur ....34
Figure 2.21 Handover en UMTS et S-UMTS....36
Figure 3.1 Modèle de source voix ....40
Figure 3.2 Modèle de source data....41
Figure 3.3 Modèle de PRMA terrestre....44
Figure 3.4 Modèle de PRMA satellite (utilisateurs voix)....45
Figure 3.5 Stabilité de PRMA terrestre et satellite ....47
Figure 3.6 Modèle de PRMA satellite (utilisateurs data) ....50
Figure 3.7 Probabilité de perte vs. nombre d'utilisateurs ....51
Figure 3.8 Probabilité de non perte vs. nombre d'utilisateurs ....51
Figure 3.9 Comparaison de S-PRMA et T-PRMA ....52
Figure 3.10 Délai de paquet vs. nombre d'utilisateurs ....53
Figure 3.11 Probabilité de perte voix et délai d'attente data (utilisateurs voix et data)....54
Figure 4.1 Graphe représentatif du CDMA ....59
Figure 4.2 Source de trafic Email ....61
Figure 4.3 Fonction de permission pour data ....64
Figure 4.4 Modèle des utilisateurs voix....66
Figure 4.5 Modèle des utilisateurs data ....69
Figure 4.6 Distribution des utilisateurs voix en cas de f1(x) analytique ....73
Figure 4.7 Distribution des utilisateurs voix en cas de f2(x) analytique ....73
Figure 4.8 Distribution des utilisateurs voix en cas de f1(x) , simulation ....74
Figure 4.9 Distribution des utilisateurs voix en cas de f2(x), simulation ....74
Figure 4.10 Probabilité de perte, analyse et simulation....75
Figure 4.11 Fonctions de permission pour data....76

Figure 4.12 Distribution des utilisateurs data en cas de f1(x), analyse .....77
Figure 4.13 Distribution des utilisateurs data en cas de f2(x), analyse .....77
Figure 4.14 Distribution des utilisateurs data en cas de f1(x) et f2(x), simulation.....78
Figure 4.15 Probabilité de perte (transfert des fichiers), analyse et simulation.....79
Figure 4.16 Délai d'attente (transfert des fichiers), analyse et simulation.....79
Figure 4.17 Probabilité de perte (Email), simulation.....80
Figure 4.18 Délai d'attente (Email), simulation.....80
Figure 4.19 Perte des paquets voix en fonction de nombre d'utilisateurs data.....82
Figure 4.20 Perte des paquets data en fonction de nombre d'utilisateurs data.....82
Figure 4.21 Délai des paquets data en fonction de nombre d'utilisateurs data.....82
Figure 5.1 Technique CDMA/TDMA .....85
Figure 5.2 La probabilité de perte pour différents spreading factor .....87
Figure 5.3 Le protocole S-CDMA/PRMA.....87
Figure 5.4 Source de trafic web .....89
Figure 5.5 Fonctions de permission.....92
Figure 5.6 Modèle de canal (utilisateurs voix) .....94
Figure 5.7 Processus d'accès.....95
Figure 5.8 Modèle de canal (utilisateurs data).....98
Figure 5.9 Fonctions de permissions et spreading factors.....101
Figure 5.10 Les fonctions de permissions étudiées .....101
Figure 5.11 La distribution des utilisateurs .....102
Figure 5.12 La probabilité de perte pour les utilisateurs voix .....102
Figure 5.13 Fonctions de permission (utilisateurs data).....103
Figure 5.14 Distribution des utilisateurs (utilisateurs data).....104
Figure 5.15 Probabilité de perte (utilisateurs data).....104
Figure 5.16 délai d'attente (utilisateurs data).....105
Figure 5.17 Fonctions de permission (sources web).....106
Figure 5.18 Probabilité de perte (sources web) .....106
Figure 5.19 délai d'attente (sources web).....107
Figure 5.20 Fonctions de permission en multiplexage de service .....108
Figure 5.21 Probabilité de perte en multiplexage de service (voix, web et data).....108
Figure 5.22 Délai d'attente en multiplexage des service (web et data).....109
Figure 5.23 Distribution des utilisateurs en multiplexage de service .....109
Figure 6.1 Délai d'attente des paquets data pour les différents protocoles d'accès.....114
Figure 6.2 Allocation de ressources en TDMA avec frontières variables .....116
Figure 6.3 Stratégie d'allocation de ressources en CDMA et TD-CDMA.....117
Figure 6.4 Allocation de ressources en TDMA/CDMA entre les paquets synch. et asynch. .118
Figure 6.5 Allocation de ressources en S-CDMA .....119
Figure 6.6 Frontières fixes en S-CDMA.....119
Figure 6.7 Fonctions de permission pour l'allocation de ressources fixe .....120
Figure 6.8 Allocation dynamique en S-CDMA .....121
Figure 6.9 Fonctions d'accès en allocation fixe et en allocation dynamique à haute charge..122
Figure 6.10 Fonctions de permission en allocation dynamique à basse charge.....123
Figure 6.11 Délai d'attente des paquets data et web en fonction des sources data .....124
Figure 6.12 Perte des paquets voix et data en fonction de nombre des sources data.....125
Figure 6.13 Allocation de ressources en S-CDMA/PRMA.....125

Figure 6.14 Cas de séparation des utilisateurs voix et web .....127
Figure 6.15 Cas de multiplexage des voix et web .....128
Figure 6.16 quatre slots pour les utilisateurs data.....129
Figure 6.17 Multiplexage des sources voix et data.....130
Figure 6.18 Multiplexage de data et de web.....131
Figure 6.19 Allocation de ressources en S-CDMA/PRMA.....132
Figure 6.20 Stratégie d'allocation sans frontière.....133
Figure 6.21 Stratégie d'allocation avec frontière……134

# 1 Chapitre I
# Introduction

## *1.1 Introduction*

Pendant les dernières années, le réseau cellulaire est devenu accessible presque partout. Pour compléter ce réseau cellulaire terrestre, plusieurs systèmes basés sur des satellites à basse orbite (LEO Low Earth Orbit) et moyenne orbite (MEO Medium Earth Orbit) ont été développés pour offrir une couverture globale. Les services multimédias sont largement demandés sur une échelle globale.

Le réseau de télécommunication mobile international (UMTS Universal Mobile Telecommunication System) est devenu récemment le sujet de nombreuses études. Le but de l'UMTS est de permettre l'intégration de services (voix et donnée) dans la région couverte. Un des besoins est de concevoir un schéma de contrôle du réseau afin d'accommoder les différents débits et qualités de services (QoS). En particulier, la voix, qui est une application temps réel, nécessite une limite en délai et en probabilité de perte. Par contre, les applications données peuvent supporter un délai élevé.

Un des objectifs majeurs de ETSI (European Telecommunications Standards Istitute) est l'intégration de l'UMTS avec le composant satellitaire. Ceci pour réaliser plusieurs buts :

- Permettre un roaming global des utilisateurs UMTS.
- Produire une qualité de service globale à un prix acceptable.
- Accélérer le développement de l'UMTS sur plusieurs régions, surtout dans les pays en voie de développement.

Le projet constellation des satellites pour le multimédia [3] consiste à offrir différents services aux abonnés fixes ou mobiles par le biais des réseaux de satellites LEO ou MEO. Cependant, les caractéristiques de tels réseaux satellitaires posent des problèmes particuliers du fait de la mobilité des satellites. Ainsi, le problème du mouvement de satellite n'a pas les mêmes contraintes que celles du monde des radio-mobiles. Le délai de transmission est plus élevé, ce qui nécessite d'étudier et de valider des nouveaux mécanismes d'accès et de contrôle. Dans notre thèse, on va étudier le contrôle d'admission, le problème d'accès au canal et la qualité de service dans le cas de LEO. Cet étude est dans le contexte du projet constellation de satellites pour le multimédia ainsi que la partie satellitaire de l'UMTS (S-UMTS).

## *1.2 Le réseau d'étude*

### 1.2.1 Généralités sur les satellites

Depuis les années 80 les satellites GEO ont démontré leur efficacité pou les télécommunications. C'était avec le lancement de la première génération des systèmes satellitaires de télécommunications mobiles (INMARSAT) en 1982. Malgré l'intérêt des systèmes GEO pour les communications maritimes, ils ne sont pas adaptés aux systèmes de communications personnels qui nécessitent des terminaux légers et petits. D'où la nécessité des systèmes à orbites basses comme les satellites LEO. Deux types de satellites LEO ont été proposés « petit-LEO » pour les applications à faible débit et « grand-LEO » pour les applications à haut débit. Plusieurs systèmes sont proposés, par exemple IRIDIUM, GLOBALSTAR, SKYBRIDGE……

La constellation IRIDIUM est présentée dans la figure 1.1. Dans cette constellation, on a 66 satellites qui sont liés entre eux pour former un réseau spatial complet. On définit plusieurs termes pour décrire une constellation :

**Les orbites** :

C'est le chemin parcouru par un satellite qui tourne autour de la terre. Une orbite contient plusieurs satellites qui tournent sur la même boucle. La hauteur d'une orbite est en relation avec la zone couverte par le satellite qui y appartient.



**Figure 1.1 Constellation de satellites IRIDIUM**

**Les liens inter-satellites :**

Les ISL (Inter Satellite Link) peuvent relier les différents satellites afin de réaliser un réseau spatial. Ces liaisons ne sont pas obligatoires ; IRIDIUM utilise ces liens pour relier chaque satellite avec deux satellites de son orbite et deux satellites des orbites voisines.

**Spot beams :**

La zone couverte par un satellite est le foot-print. Cette zone peut être décomposée en plusieurs surfaces, appelées cellules, par des antennes multi-faisceaux. Ces antennes sont appelées antennes à spot beam multiple.

**Le Hand-off :**

Quand un utilisateur passe d'une cellule à une autre, un processus de hand-off est lancé. Dans les systèmes terrestres, les stations de base sont fixes et c'est l'utilisateur qui se déplace d'une cellule à une autre. En LEOS, les satellites et les utilisateurs se déplacent, mais puisqu'un satellite a une vitesse beaucoup plus grande que la vitesse d'un utilisateur, on peut considérer que les terminaux sont fixes et on peut donc prévoir les hand-off causés par le déplacement des satellites. En fait, il y a deux types de hand-off ; inter-satellite (entre deux satellites différents) et intra-satellite (entre deux spots du même satellite). Du point de vue du déplacement des cellules, on définit deux types de constellations :

1. Cellules fixées aux satellites, et donc se déplaçant par rapport à la terre.
2. Cellules fixées à la terre, et donc se déplaçant par rapport aux satellites.

**Effet Doppler :**

C'est le décalage entre les fréquences émise et reçue dû à la vitesse relative de l'émetteur et du récepteur. Si un satellite se déplace à une vitesse donnée, et envoie sur une fréquence *f*, un utilisateur en arrière du satellite reçoit une fréquence $f - df$ et un autre utilisateur en avant reçoit une fréquence $f + df$. Le décalage fréquentiel est en relation avec l'élévation de l'orbite, la distance entre émetteur et récepteur, la vitesse du champ magnétique du signal….

### 1.2.2 Projet de constellation de satellites pour le multimédia

La constellation est composée de 72 satellites en orbite LEO, répartis sur 9 plans et avec un terme de phase de 1 (72/9/1). L'altitude des satellites est 1603km et leur période 118.5 minutes. L'inclinaison des orbites est de 50° [3]. L'élévation minimale est d'environ 17.5°, la zone couverte par un satellite à cette élévation ayant un diamètre d'environ 5100km.

Le système s'appuie du coté du segment sol sur trois types de terminaux utilisateurs : les terminaux piétons, véhicules et TGV pour faible, grande et très grande vitesse, respectivement. Outre les terminaux utilisateur, le système est constitué au minimum d'environ 20 stations de connexion au réseau (G/W) en bande Ka qui permettent de relier le réseau satellite aux infrastructures terrestres mais également prennent en charge une partie des fonctions du réseau comme le routage et l'allocation de ressources.

Les satellites sont reliés entre eux par des ISL à 60 Ghz. Ces ISL au nombre de 4, permettent à un satellite d'être relié aux deux satellites adjacents de son plan et aux deux satellites des plans voisins à un débit de 2×155 Mb/s bi-directionnel.

## *1.3 Les principaux axes d'étude*

Dans cette section, on va introduire les principaux axes qu'on va élaborer tout au long de cette thèse. Ces sujets sont traités pour être utilisés d'une façon efficace dans le contexte des satellites LEO.

### 1.3.1 La fonction CAC

La fonction de contrôle d'admission CAC (Connection Admission Control) a pour objet de rejeter ou d'accepter une demande de connexion en fonction du comportement futur de la connexion et de la qualité de service demandée. Si le centre de gestion estime qu'il ne pourra pas garantir la qualité demandée ou si cette nouvelle connexion risque de perturber les connexions courantes, la demande est rejetée. Si la demande est acceptée et si une QoS stricte est à garantir, les ressources sont alors réservées sur toutes les entités constituant le chemin de la connexion. Pour le faire, le CAC aura accès aux paramètres de la qualité de service contenus dans le contrat liant l'utilisateur au réseau.

### 1.3.2 La couche MAC

Le rôle de la sous-couche MAC (Medium Access Control) est principalement de gérer le problème du conflit d'accès lorsqu'un même médium de communication est partagé par de multiples systèmes. La stratégie communément adoptée consiste tout d'abord à simplifier ce problème en faisant en sorte que les conflits ne se produisent pas à l'échelle d'un bit de donnée mais plutôt à l'échelle d'un ensemble de bits. Pour cela, le MAC impose à chaque

système expéditeur de regrouper les données qu'il transmet en paquet de bits. De plus, les systèmes de transmission n'étant que rarement suffisamment synchrones, ces paquets doivent généralement être délimités par des séquences de bits de contrôle aisément reconnaissables. L'ensemble résultant est appelé une *trame*. Outre le data reçu de la couche supérieure, cette trame incorpore un certain nombre de bits de contrôle et de gestion : description de l'expéditeur et du ou des destinataires de la trame, sommes de contrôle, etc.
Parallèlement à cette structuration en trames, le MAC doit aussi gérer le problème du conflit proprement dit. Ce problème est généralement résolu en deux étapes. La première consiste à choisir une technique de base afin d'isoler le trafic généré par différentes stations. Cette technique de base est généralement appelée technique d'accès. Comme ces techniques ne sont généralement pas suffisantes, il convient ensuite d'établir la politique d'accès aux ressources de communication. Cette politique est généralement appelée schéma d'accès. L'ensemble de ces deux aspects est le protocole d'accès.

### 1.3.3 La qualité de service

La QoS est l'effet global produit par les caractéristiques d'un service fourni à un usager qui déterminent le degré de satisfaction que cet usager retire du service. La qualité d'un service est caractérisée par l'effet conjugué des notions suivantes : logistique, facilité d'utilisation, faisabilité, intégrité et d'autres facteurs propres à chaque service. L'expression « qualité de service » ne désigne pas un degré d'excellence dans un sens comparatif, pas plus qu'elle n'est à prendre dans un sens quantitatif aux fins d'évaluation techniques. La notion QoS utilise plusieurs paramètres qui sont communs dans tout contexte. Les principaux paramètres sont :

- Taux d'erreur.
- Taux de perte.
- Délai de transfert.
- Gigue (variation du délai de transfert).

Au niveau de la couche MAC, on parle de la notion des MTC (MAC Transfer Capabilities) qui sont les classes de services au niveau MAC. Ces MTCs doivent supporter les différents services définis sur les couches supérieures comme la couche réseau [16].

## *1.4 Objectifs de la thèse*

Notre but est de développer une couche d'accès MAC au canal satellitaire tout en respectant les contraintes de la constellation LEO. Un grand nombre d'utilisateurs de différents types vont essayer d'accéder au canal satellite (sens montant) afin d'envoyer leurs paquets. Il faut distribuer les ressources disponibles entre les différents utilisateurs de façon à respecter la QoS de chaque utilisateur et à minimiser le gaspillage. Nous avons traité dans cette thèse les ponts suivants :

- Nous avons adopté les techniques CDMA (Code Division Multiple Access) et TDMA (Time Division Multiple Access) pour définir les protocoles d'accès proposés en système LEOS. Ces techniques sont adaptées afin d'être utilisées d'une manière efficace dans le cas spécifique de satellites LEO (long RTD (Round Trip Delay), Handover, …).
- Nous avons utilisé un contrôle d'admission pour les différents types de services qui agit au niveau d'appel afin d'accepter un maximum d'utilisateurs de différents types

tout en respectant la QoS de chacun. Ce contrôle utilise une fonction à capacité équivalente adaptée aux différents contextes de nos études.

- Nous avons défini des services au niveau MAC d'une façon générique. Les services sont supportés au niveau MAC par des MTCs (MAC Transfer Capabilities) afin de garantir la QoS demandée par chaque service. Nous avons proposé des MTCs qui supportent tous les services et applications possibles.
- Nous avons étudié le système pour des utilisateurs hétérogènes ce qui rend l'intégration de services nécessaire. La comparaison dépend de l'intégration et de la QoS de chaque utilisateur. Le but est toujours de maximiser la capacité totale du système.
- Nous avons étudié le multiplexage de services et l'allocation de ressources pour les différents protocoles d'accès. Des techniques d'ordonnancement et de partage de ressources sont proposées afin d'atteindre pour un protocole d'accès donné la performance maximale.

## *1.5 Description du contenu*

Dans cette thèse, on va étudier la fonction CAC et la couche MAC pour une constellation de satellites LEO (Low Earth Orbit). La thèse comporte 7 chapitres.

Dans le deuxième chapitre, on introduit les aspects technologiques et protocolaires qu'on va utiliser tout au long de la thèse. L'architecture de constellation est prise d'un projet national français. La fonction CAC dans le contexte satellite est introduite ainsi que les différentes techniques d'accès au canal. La technique CDMA (Code Division Multiple Access) est expliquée en détail puisqu'on va développer cette technique pour proposer nos différents protocoles. Des propositions dans la littérature utilisant les différentes techniques sont ensuite présentées avec leurs spécificités. Le problème de la QoS est ensuite présenté puisque les protocoles qu'on va proposer sont orientés qualité de service. Le problème d'intégration du réseau spatial dans le réseau international mobile est introduit, où plusieurs stratégies d'intégration sont étudiées dans la littérature. Après cette présentation générale des problèmes liés à notre étude, on passe au cœur de notre recherche.

Dans le 3ème chapitre, on propose une amélioration du protocole PRMA (Packet Reservation Multiple Access) et le nouveau protocole est appelé S-PRMA (Satellite-PRMA). On définit les services au niveau MAC utilisés dans ce chapitre et la fonction de contrôle d'admission correspondante. La QoS est traitée au niveau des MTCs qui assurent une qualité demandée par les différents services. Le système est divisé en deux sous-système ; voix et data. Un modèle mathématique est développé pour le protocole S-PRMA afin de déterminer les paramètres essentiels de la QoS pour les sources voix et data. Des calculs mathématiques et par simulation sont ensuite réalisés afin d'optimiser les différents paramètres du protocole.

Dans le 4ème chapitre, on propose un protocole utilisant la technique d'accès CDMA. Ce protocole adapté au contexte satellite est nommé S-CDMA. Les services supportés au niveau MAC sont ensuite expliqués ainsi qu'une fonction de contrôle d'admission. Le système est divisé en deux sous-système ; voix et data. Un modèle mathématique pour les deux sous-systèmes voix et data est développé, ce qui permet de trouver les différents paramètres de la QoS. Le calcul et la simulation déterminent les valeurs optimales de ces paramètres dans les différents cas du système. Ces résultats servent aussi à valider notre modèle mathématique développé.

Dans le 5ème chapitre, on étudie le protocole CDMA/PRMA dans le contexte de satellite. Pour l'adapter à ce contexte, ce protocole a besoin des changements dans la conception d'accès et de réservation ainsi que dans les paramètres d'accès. Le nouveau protocole est nommé S-CDMA/PRMA. Trois MTCs sont intégrés dans la couche MAC ce qui nécessite une fonction de contrôle d'admission plus compliquée ainsi qu'un protocole d'accès avancé. Le système est divisé en deux sous-système ; voix et data. Le développement mathématique du protocole dans les deux sous-systèmes nécessite la mélange des deux théories utilisées dans les deux chapitres précédents. Les paramètres à optimiser ne sont pas que les paramètres du protocole dans ce cas. Les paramètres du canal jouent un rôle crucial. Le calcul mathématique et la simulation déterminent les valeurs optimales des différents paramètres pour les différents types de service. Les résultats obtenus valident aussi notre étude mathématique et les simplifications faites pour pouvoir analyser le protocole.
Le 6ème chapitre compare les différents protocoles introduits dans le cas le plus général du système. On étudie dans ce chapitre le problème d'allocation de ressources pour les protocoles S-CDMA et S-CDMA/PRMA. Des stratégies statiques et dynamiques sont visées afin de profiter de la flexibilité de la capacité en CDMA.
Le 7ème chapitre donne les principaux conclusions de cette étude ainsi que des ouvertures à des sujets de recherche futurs.

# 2 Chapitre II
# Aspects Technologiques et Protocolaires dans la Constellation de satellites LEO

## *2.1 Introduction*

Plusieurs organisations ont proposé les communications personnelles basées satellite pour fournir une couverture globale pour la voix et les données en réalisant une liaison directe entre le terminal et le satellite. Un tel système offre des communications personnelles presque partout dans le monde, même dans les zones désertiques et océaniques. Les GEOS (Geostationary Earth Orbit Satellites 35784km d'altitude) étaient utilisés pour réaliser des communications très longues distances. Malgré les avantages des GEOS en couverture et facilité, ce n'est pas la bonne approche pour les communications personnelles ou mobiles. Les LEOS (Low Earth Orbit Satellites 500-2000 km d'altitude) ou MEOS (Medium Earth Orbit Satellites 10000-12000 km d'altitude) [1] paraissent mieux adaptés à cette situation, essentiellement pour deux raisons :

- L'atténuation due à la propagation est faible, ce qui permet d'utiliser des terminaux à faible puissance.
- Le délai de transmission est de l'ordre de 10ms pour les LEOS et 250ms pour les GEOS, ce qui permet l'utilisation des applications temps réel en LEOS avec une meilleure performance.

Mais il faut noter que la durée de vie d'un satellite LEO est inférieure à celle d'un GEO, et que la complexité due au fait qu'un LEOS se déplace par rapport à un utilisateur terrestre augmente l'effet doppler et nécessite l'intégration des techniques de compensation et de hand-off [1].

Le problème d'accès au canal est crucial et plusieurs techniques ont été proposés pour les LEOS. La technique CDMA (Code Division Multiple Access) est utilisée par plusieurs système (Skybridge, Globalstar) alors qu'une technique FDMA/TDMA (Frequency Division Multiple Access / Time Division Multiple Access) hybride soit utilisée par le système IRIDIUM. La raison pour laquelle le CDMA est utilisé pour les LEOS va être traitée tout au long de cette thèse.

Dans le paragraphe suivant, on présente l'architecture de constellation utilisée dans cette thèse. Le paragraphe trois introduit la fonction de contrôle d'admission CAC. Le paragraphe quatre décrit les différentes techniques d'accès. Les applications de ces techniques dans le satellite LEO sont présentées dans les paragraphes 5, 6 et 7. Le paragraphe huit introduit le

problème de la QoS. Le paragraphe 9 décrit l'intégration du satellite dans le système UMTS. Enfin, le dixième paragraphe conclut le chapitre.

## *2.2 Architecture du réseau LEOS*

Le réseau est constitué d'un ensemble des satellites en orbite basse qui constituent avec quelques stations de base un système de communication global et accessible de tout point sur la terre. Les satellites peuvent être reliés entre eux à travers des ISL. Ces ISL, au nombre de 4, permettent à un satellite d'être relié aux deux satellites adjacents de son plan et aux 2 satellites des plans voisins (1 satellite sur chaque plan adjacent droite et gauche). Ceci est le cas du système IRIDIUM ainsi que la proposition faite par la CNES pour le projet RNRT [3]. Pour des autres systèmes comme Skybridge, on n'utilise pas des ISL. Notons que des stations terrestres nommés GateWay G/W peuvent servir à plusieurs fonctions comme relier le réseau satellitaire à d'autres réseaux terrestres [2]. L'architecture générale du système est représentée dans la figure 2.1.

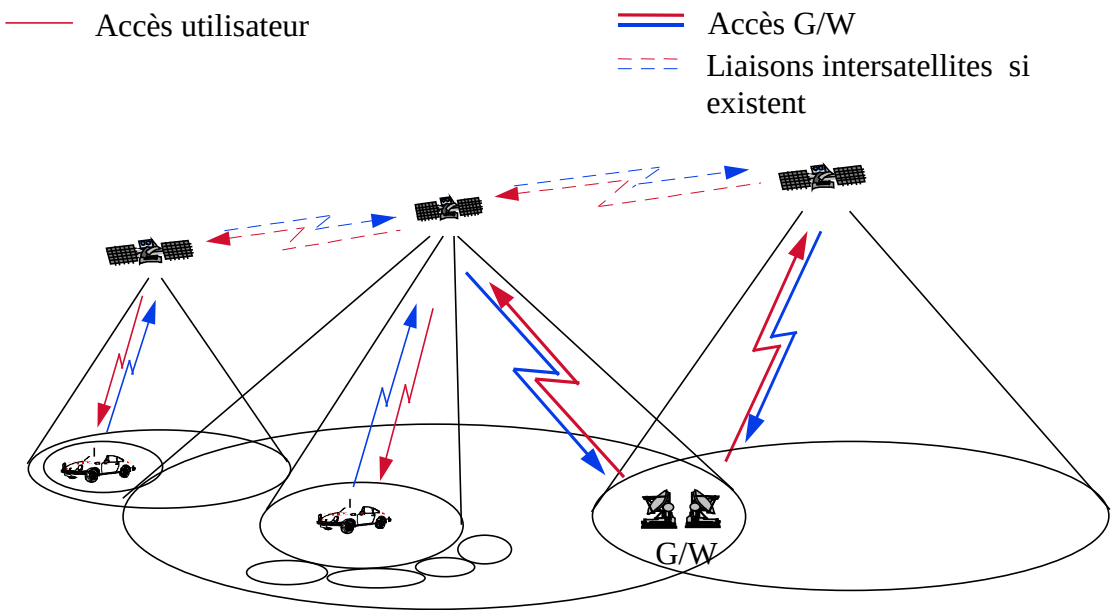



**Figure 2.1 Architecture de la constellation de satellites**

Plusieurs paramètres d'architecture peuvent être étudiés pour une constellation. L'étude de ces paramètres ne constitue pas un objet de notre thèse. On va se contenter de les citer brièvement :

1 Nombre de satellites.
2 Nombre de plans orbitaux.
3 Inclinaison de plans orbitaux.
4 Espacement relatif de plans orbitaux.
5 Nombre de satellites dans chaque plan orbital.
6 Déphasage relatif de satellites dans le même plan orbital.
7 Déphasage relatif de satellites dans deux plans orbitaux voisins.
8 Altitude de plans orbitaux.

Pour réaliser un maximum de capacité et de couverture, plusieurs satellites sont utilisés. D'autre part pour maximiser l'utilisation de la bande passante une technique de « spot-beams » est réalisée par les antennes satellitaires. L'unité de couverture sur terre est le « spot » similaire à une cellule pour le réseau cellulaire terrestre [3]. A la différence que le spot se déplace par rapport à la terre s'il est fixé au satellite et par rapport au satellite s'il est fixé à la terre.
Dans le cas d'utilisateurs multiples, le problème d'accès est essentiel. Les techniques principales d'accès au canal sont :

1. FDMA (Frequency Division Multiple Access) ou accès multiple à répartition de fréquence.
2. TDMA (Time Division Multiple Access) ou accès multiple à répartition de temps.
3. CDMA (code Division Multiple Access) ou accès multiple à répartition de code.
4. Les techniques d'accès aléatoire surtout Aloha et Aloha en tranches.

Ces techniques traitent la partage de ressources entre les différents utilisateurs acceptés dans le système, ce qui représente le contrôle au niveau des paquets. L'acceptation des utilisateurs est effectuée par la fonction de contrôle d'admission CAC (Connexion Admission Control), c'est le contrôle au niveau de l'appel.

## *2.3 Algorithmes CAC*

### 2.3.1 Etude générale

Le CAC est plus ou moins compliqué suivant le type de service supporté. Dans le cas où ce CAC serait seulement pour de services à débit maximal garanti, comme le service téléphonique, la fonction CAC est très simple. Il suffit d'accepter un utilisateur dans le cas où la bande passante libre dans le réseau serait supérieure à la bande passante demandée par ce service et de le refuser dans le cas contraire. On définit à ce stade une probabilité de blocage qui est la probabilité qu'une demande de connexion soit refusée.
Dans le cas où on accepterait une probabilité de perte et un délai d'attente pour les paquets, un multiplexage statistique peut se faire pour augmenter l'efficacité du réseau et pour mieux utiliser la bande passante. A ce stade, on définit une probabilité de perte maximale à respecter. On peut démontrer dans ce cas que le nombre d'utilisateurs acceptés est beaucoup plus élevé que dans le cas classique qui ne prend en compte qu'un débit maximal garanti [6].
Dans le cas où plusieurs services partageraient la bande passante, la fonction CAC doit prendre en compte la qualité de service demandée par chaque service. Et une fonction CAC peut être définie pour chaque type de service. En particulier, les différents services sont séparés à l'intérieur d'une trame par des frontières qui peuvent être dynamiques et les limites acceptées pour les différents services varient dans le temps. On définit la notion de période de contrôle qui est la période pendant laquelle les frontières ne bougent pas.
En fait, plusieurs algorithmes CAC sont proposés pour le contrôle d'admission. Chaque algorithme est adapté à un type de trafic. Ainsi, on utilise un algorithme suivant le type de service.
Il est évident que les services qui demandent un débit maximal sont associés un algorithme CAC simple. Le problème se pose dans le cas de services à débit variable. On peut trouver plusieurs algorithmes. Soit :

1. Capacité équivalente. C'est un débit associé à une source de telle façon que, si on suppose que cette source émet à ce débit, la probabilité de perte reste inférieure à une valeur ε. Ce débit peut être inférieur ou égal au débit crête.
2. Approximation trafic fort. Dans ce cas, on accepte un tel utilisateur si la probabilité que le délai d'attente d'un message envoyé par cet utilisateur soit supérieur à une valeur, est petite.

Beaucoup d'autres algorithmes sont présentés dans [8]. On remarque que ces algorithmes dépendent, toujours, du modèle de trafic source et de la QoS demandée.

### 2.3.2 Etude en LEOS

En satellite LEO, le hand-off est un facteur qui influence la fonction CAC. En effet, un utilisateur accepté par le système exige une qualité de service qui doit être garantie dans les différentes cellules. Quand l'utilisateur passe d'une cellule à une autre à cause de hand-off, le service fourni par le système doit continuer avec la même qualité. Ceci exige de ressources disponibles à la fois dans la cellule courante et dans les cellules futures. Quand le service demandé est temps réel, l'exigence est plus stricte et une réservation est nécessaire dans plusieurs cellules voisines. Ceci a pour effet de gaspiller les ressources puisqu'elles sont réservées pour des utilisations futures. Plusieurs études sont effectuées pour définir une stratégie qui garantit la QoS sans gaspillage de ressources.

Dans [31] on prend en compte le problème de hand-off en définissant des services avec hand-off garanti appelés GH (Garanteed Handover). Pour ces services, le contrôle d'admission doit prendre en compte cet aspect. Dans cet article, on simplifie le problème en supposant que toutes les cellules sont pareilles et ont une forme rectangulaire et que les handover sont dus seulement au mouvement des satellites.

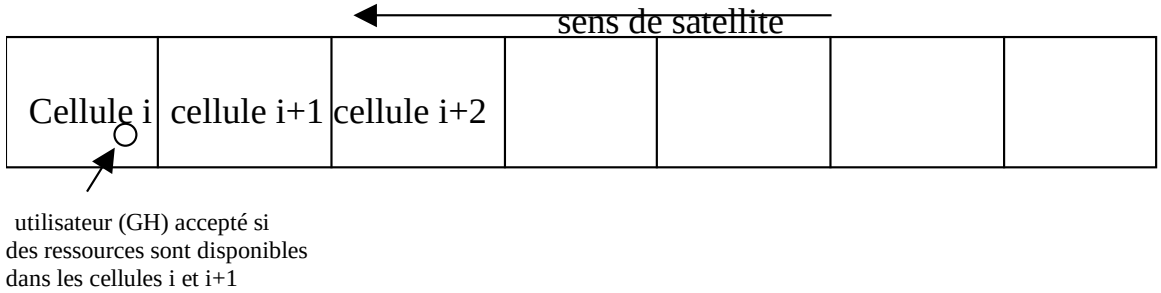



**Figure 2.2 Effet de hand-off sur la fonction CAC**

Dans ce cas simplifié, il suffit que le contrôle d'admission se fasse sur la cellule en cours et la prochaine cellule. Si on a des ressources dans ces deux cellules on accepte la demande. Par la suite, on réserve dans la cellule i+2 au moment d'entrer de la cellule i+1. Ceci permet un service GH. La démonstration de cette garantie est dans [31]. Un tel service coûte cher en terme de ressources utilisées. Sa tarification doit être élevée. Dans [32], on trouve un algorithme plus général pour garantir le handover avec un contrôle d'admission associé.

On remarque à ce stade que la résolution de problème de handover est faite pour un seul type de service qui est totalement garanti. Les services non-temps réel n'acceptent pas de payer une telle tarification. Une fonction CAC plus souple est nécessaire.

## *2.4 Techniques MAC*

Dans cette section, on va parler brièvement des techniques principales d'accès au canal. Ces techniques de base peuvent servir pour définir ensuite les protocoles d'accès qu'on va proposer dans cette thèse.

### 2.4.1 FDMA

La bande passante est divisée en sous bandes ; chaque sous bande est associée à une fréquence porteuse utilisée par un émetteur. Cet émetteur doit envoyer continûment sur une fréquence particulière et le canal est l'ensemble des différentes fréquences porteuses venant des différents émetteurs. Le récepteur choisit la porteuse appropriée pour ainsi lire les données qui leur sont destinées. Le FDMA n'est pas essentiellement utilisé dans LEOS mais il représente une partie d'accès puisque dans toute technique d'accès, la bande passante est partagée en des sous-bandes où on utilise une répartition de temps ou de code [4]. La figure 2.3 montre clairement cette technique.

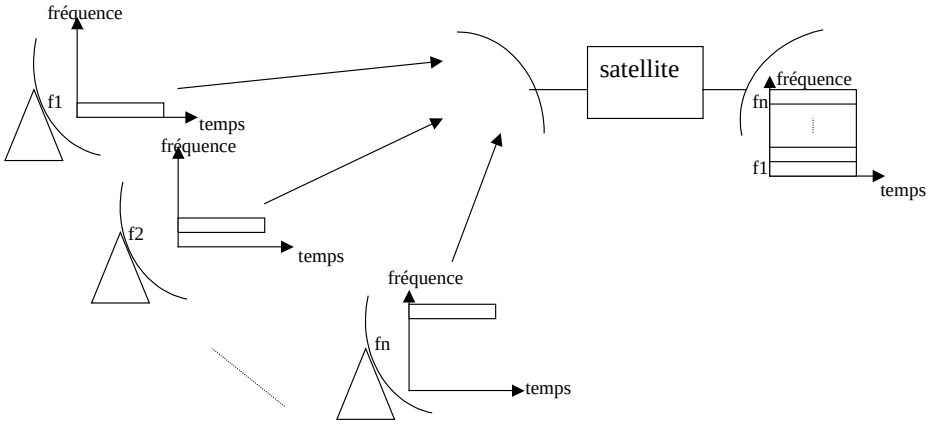



**Figure 2.3 Technique d'accès FDMA**

### 2.4.2 TDMA

Dans cette technique, la bande passante est utilisée par tous les utilisateurs mais la division se fait sur l'axe de temps. Chaque utilisateur envoie sur un intervalle de temps et en utilisant toute la bande passante. Les données envoyées par chaque utilisateur sont groupées en rafales pour être envoyés sur des intervalles de temps appelés slots. Le canal se comporte donc comme la succession des slots remplis par des rafales venant des différents utilisateurs. Si la durée d'un slot est $T_s$ le canal peut contenir $n$ slots ; on appelle trame l'ensemble des $n$ slots du canal. La durée d'une trame est alors de $T_f = n \times T_s$. La figure 2.4 représente la technique d'accès TDMA. Le récepteur doit identifier chaque paquet dans un slot afin de lire les informations qui lui sont destinées [4]. Ceci nécessite des informations d'identification du début d'un paquet ainsi qu'une synchronisation.

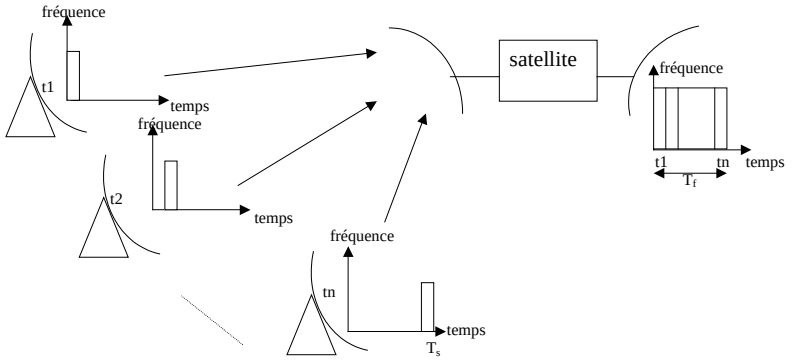



**Figure 2.4 Technique d'accès TDMA**

### 2.4.3 CDMA

Dans cette technique, chaque utilisateur transmet ses informations sur le canal continûment et en utilisant toute la bande passante. Ceci veut dire qu'il y a interférence entre les différents utilisateurs, mais chaque utilisateur envoie sa propre signature avec ses informations. Cette signature est appelée code (désigné par $p_i$ ) et elle est combinée avec les informations utiles avant de tout transmettre. Un émetteur choisit son propre code d'un ensemble des codes caractérisés par les propriétés suivantes :

- Chaque code doit être facilement distingué de sa répétition dans le temps.
- Chaque code doit être facilement distingué des autres codes utilisés dans le réseau.
- Les différents codes sont pseudo-orthogonaux et donc $p_i \times p_j \approx 0 \ \forall i \neq j$.

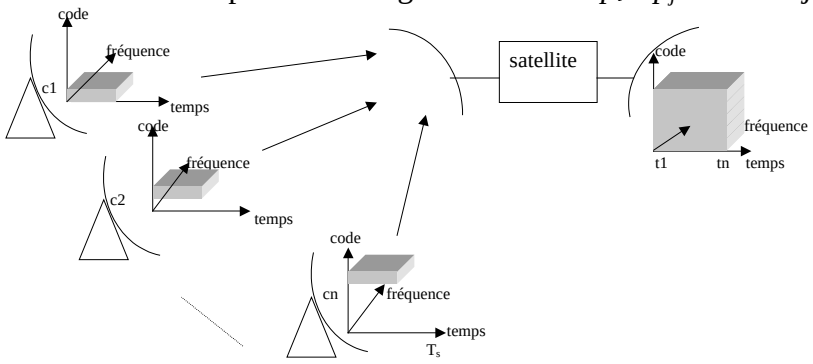



**Figure 2.5 Technique d'accès CDMA**

Un récepteur doit pouvoir décoder les informations utiles qui lui sont destinés et les séparer des interférences produites par les autres utilisateurs [4]. On distingue deux types de CDMA :

- Séquence directe (DS Direct Sequence).
- Saut de fréquence (FH Frequency Hopping).

Dans cette thèse, on traite seulement la technique de séquence directe DS-CDMA. Si le message binaire $m(t)$ a un débit binaire $R_b$ codé en NRZ (Non Return to Zero), alors $m(t) = \pm 1$. Le code $p(t)$ doit être codé en NRZ aussi et constitue une séquence de chips avec un débit $R_c >> R_b$. Le mot chip est utilisé pour représenter les bits du code par opposition aux bits binaires dans le message. Le message et le code sont multipliés et on obtient une séquence NRZ à envoyer sur une fréquence porteuse $\omega_c$ qui est la fréquence des chips (figure 2.5), ce

qui donne le signal $c(t) = m(t)p(t)\cos(\omega_c t)$. Tous les autres utilisateurs envoient leurs messages $m_i(t)$ sur cette fréquence mais en utilisant des autres codes $p_i(t)$, soit $c_i(t) = m_i(t)\, p_i(t)\cos(\omega_c t)$. Un tel récepteur recueille la somme de tous ces signaux soit :

$$r(t) = m(t)p(t)\cos(\omega_c t) + \sum_i m_i(t)p_i(t)\cos(\omega_c t) \qquad (2.1)$$

En multipliant cette somme par $2\cos(\omega_c t)$, on obtient :

$$x(t) = m(t)p(t)\cos(\omega_c t)2\cos(\omega_c t) + \sum_i m_i(t)p_i(t)\cos(\omega_c t)2\cos(\omega_c t) = m(t)p(t) + m(t)p(t)\cos(2\omega_c t) + \sum_i m_i(t)p_i(t) + \sum_i m_i(t)p_i(t)\cos(2\omega_c t) \qquad (2.2)$$

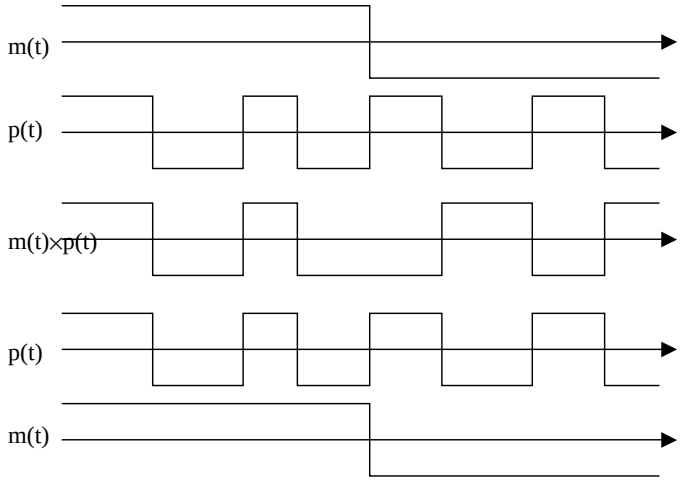



**Figure 2.6 Description du CDMA**

En filtrant les hautes fréquences puis en multipliant par le code $p(t)$ le récepteur récupère le message qui lui est destiné (figure 2.6).

$$m(t)p(t)p(t) + \sum_i m_i(t)p_i(t)p(t) \approx m(t) \qquad (2.3)$$

Puisque les codes sont pseudo-orthogonaux, le message est reçu avec de l'interférence venant des autres utilisateurs, mais de très faible énergie. En effet, la multiplication des autres messages par deux différents codes avec faible corrélation étale ces messages deux fois et affaiblit leurs énergies énormément autour de la bande passante du message m(t).

En résumé, le CDMA, qui est actuellement employé dans de nombreux systèmes de communication, permet à un grand nombre d'utilisateurs d'utiliser la même onde porteuse sans interférer les uns les autres. Il consiste à répartir l'information radioélectrique émise sur une bande de fréquences plus large que celle réellement nécessaire à la transmission du signal utile. Ce dernier apparaît alors comme un bruit et sa densité spectrale est constante sur l'intégralité de la bande occupée.

Il s'agit de multiplier au sens mathématique du terme (OU exclusif) chaque bit à transmettre par un code pseudo-aléatoire PN (Pseudo random Noise code) propre à chaque utilisateur. La séquence du code (constituée de *sf* éléments appelés "chips") est unique pour un utilisateur donné, et constitue la clef de codage ; elle est conservée si le symbole de donnée valait 1, inversée sinon. On appelle facteur d'étalement SF (Spreading Factor) la longueur *sf* du code.

Si chaque symbole a une durée *Tb*, on a 1 chip toutes les *Tb*/*sf* secondes. Le nouveau signal modulé a un débit *sf* fois plus grand que le signal initialement envoyé par l'usager et utilisera donc une bande de fréquences *sf* fois plus étendue. La relation entre les débits initial et final est donc :

Débit Chip = Débit Bit * SF

Ainsi plus SF est grand, plus le débit chip (de l'ordre de 3.84 Mcp/s pour le WCDMA utilisé en UMTS) est grand, et plus le débit de données du canal sera élevé. Cela permet de dégager des canaux à débits variables selon les besoins des utilisateurs (bandwidth on demand).
La figure 2.7 résume le processus de transmission en CDMA.

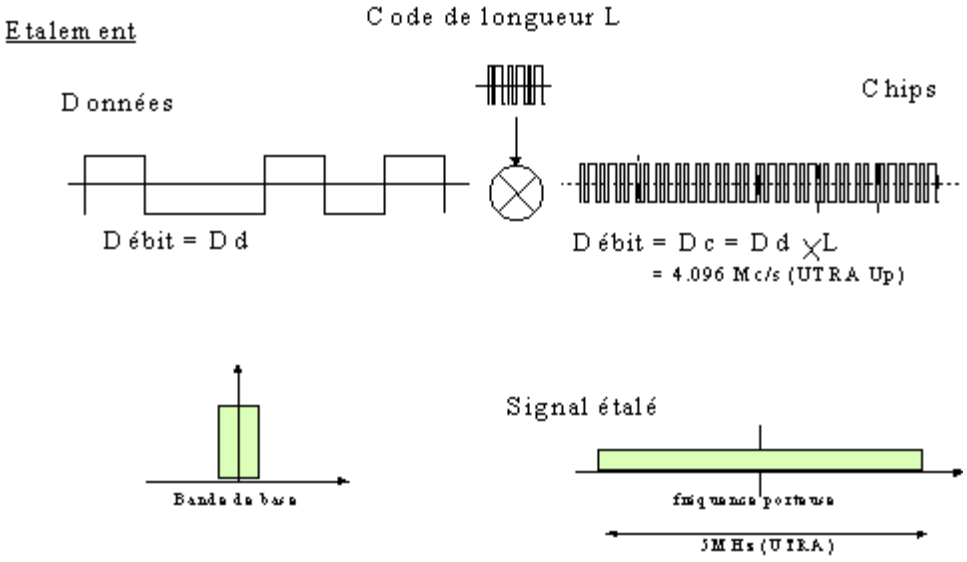



**Figure 2.7 Définition du processus d'étalement**

Pour récupérer l'information, le récepteur doit effectuer la même opération : il génère la même séquence d'étalement et la multiplie par le signal reçu ; les données codées par cette séquence sont restaurées (puissance spectrale augmentée) alors que les données des autres utilisateurs restent étalés et les brouilleurs dus au canal sont étalés, non corrélés au signal utile. Ceci permet de diminuer le niveau de bruit pour le signal en bande de base : plus l'étalement est important, plus les interférences sont éliminées (figure 2.8).

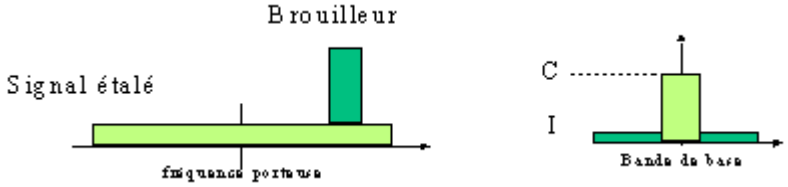



**Figure 2.8 Définition du processus de d'étalement**

Comme on le voit, lors du décodage, la synchronisation est très importante ; elle s'effectue en deux étapes. Tout d'abord, on réalise la fonction de corrélation entre les deux signaux ; elle présente un maximum (pic de corrélation) lorsque les deux signaux se ressemblent, donc sont en synchronisme. Ensuite, on maintient cette synchronisation par une boucle de verrouillage

de retard. Lorsque le calage est réalisé, on peut démoduler le signal par l'intermédiaire d'un démodulateur différentiel. La figure 2.9 résume la technique CDMA.

**Les codes d'étalement**

Pour éviter toute interférence avec les codes des différents utilisateurs et différencier des canaux distincts, on se sert de code orthogonaux appelés codes CDMA OVSF (Orthogonal Variable Spreading Factor Code). L'utilisation de ces codes permet de modifier le facteur d'étalement et de maintenir l'orthogonalité des différents codes d'étalement même si ces derniers sont de longueur différente.

Ils viennent d'une famille de codes orthogonaux au sens de la corrélation. Ils peuvent être définis par un arbre générateur tel qu'une racine engendre 2 branches. Les codes portés par ces deux branches sont issus du code de la racine. En effet, le code d'une branche est composé par le code de la racine et de son complémentaire. Ce principe permet ainsi de générer l'arbre des codes OVSF utilisés pour UMTS, aussi regroupés sous la forme de la matrice de Hadamard (figure 2.10) [51, 52, 53].

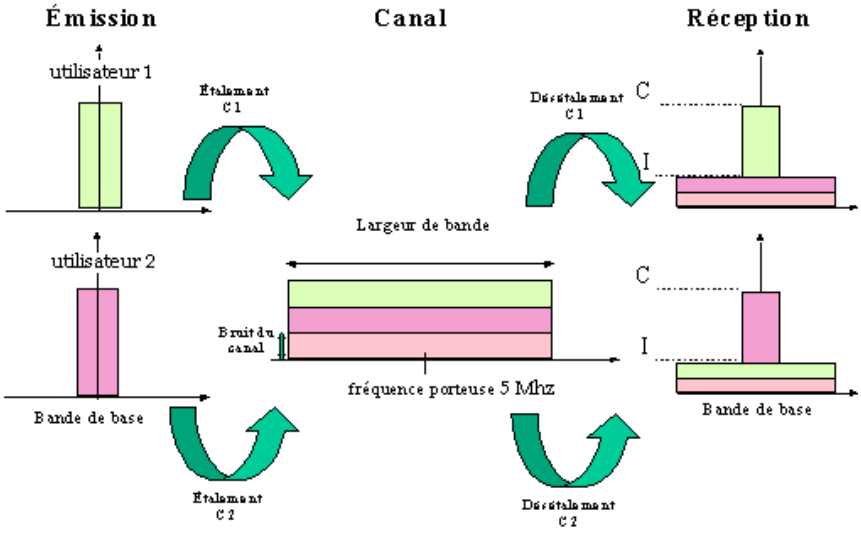



**Figure 2. 9 Résumé de la technique CDMA**

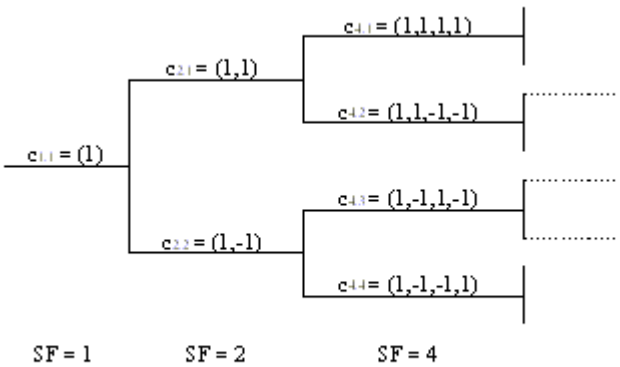



**Figure 2. 10 Génération des codes orthogonaux**

De plus, le facteur k, qui détermine le nombre de bits dans les trames des canaux dédiés au transfert de données, vérifie la relation suivante :

$$SF = 256/ 2^k \quad \text{(avec k de 0 à 6 )}$$

Cela signifie que SF peut prendre les valeurs : 4, 8, 16, 32, 64, 128, 256. Cet arbre montre la relation directe entre nombre de codes disponibles pour un étalement donné et le facteur d'étalement. En effet, le facteur SF détermine simultanément la longueur du code mais également le nombre de codes disponibles pour un étalement SF.

L'utilisation de codes orthogonaux limite la flexibilité de la technique CDMA et nécessite un assignement précis des codes aux différents utilisateurs. Pour cette raison, des codes PN (Pseudo-noise) qui sont presque orthogonaux (quasi-orthogonaux) peuvent être utilisés. Le nombre de codes disponibles est illimité et la flexibilité par rapport au débit variable est élevée. Les besoins de synchronisation sont dans ce cas moins exigeants.

Une des variantes importantes du CDMA, utilisée en UMTS, est le WCDMA. Cette technique d'accès augmente l'efficacité du CDMA comme on va le démontrer dans le paragraphe suivant.

#### *2.4.3.1 WCDMA*

Le WCDMA se base largement sur le CDMA, utilisant une bande passante plus large, ce qui permet d'accroître le débit total de transmission. Pour optimiser les ressources radio, il propose deux modes de fonctionnement, selon le type de multiplexage. De plus, outre l'étalement (channelisation), le WCDMA applique une autre opération essentielle, le brouillage (scrambling), que nous verrons par la suite. Enfin, de nouvelles solutions utilisant le domaine spatial (antennes adaptatives) sont à l'étude pour améliorer la réception des signaux.

**Les multiplexages**

Deux modes de multiplexage sont utilisés :

- Le FDD-WCDMA (Frequency Division Duplex) qui utilise en UMTS deux bandes passantes de 5 Mhz, l'une pour le sens montant (uplink), l'autre pour le sens descendant (downlink). Le débit maximal supporté par un seul code est de 384 kbit/s. Pour les services à haut débit, plusieurs codes sont nécessaires pour supporter un débit de 2 Mbit/s.
- Le TDD-WCDMA (*Time Division Duplex*) n'utilise qu'une bande passante de 5 Mhz divisée en intervalles (*time slot*) ; elle est utilisée pour les deux sens. Elle comprend donc une composante AMRT (Accès Multiple à Répartition dans le Temps) fondée sur la trame GSM (qui fait appel au TDMA) en plus de la séparation par code. Ce concept offre une large gamme de débits de service en allouant plusieurs codes ou plusieurs intervalles de temps à un utilisateur (figure 2.11). Le débit de 2 Mbit/s peut également être obtenu, mais des raisons techniques et complexes (dues par exemple au déplacement ou au déphasage) limitent le bon fonctionnement de ce système aux bâtiments ou aux petites cellules.

Dans un premier temps, ces deux modes ont été développés sans souci d'harmonisation, mais suite à la décision de l'ETSI, ils devront cohabiter dans un même terminal et dans un même service afin de couvrir l'ensemble des services prévus par l'UMTS.

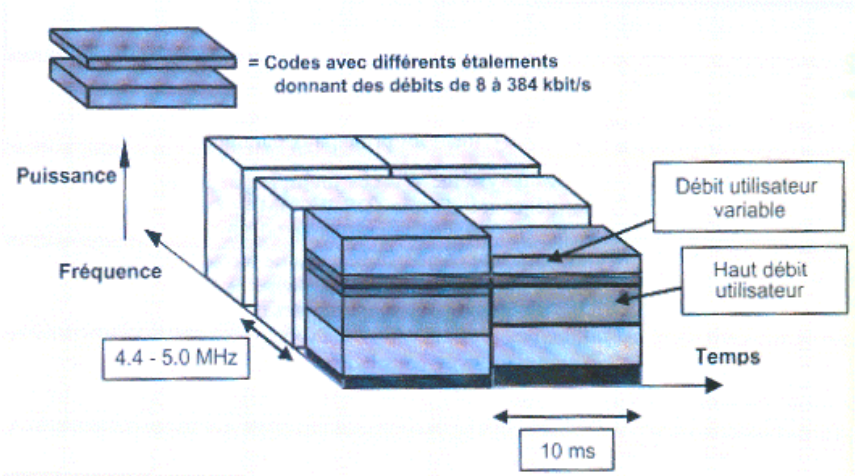



**Figure 2.11 Allocation de la bande passante en WCDMA dans l'espace Temps-Fréquence-Code**

**Le scrambling**

Cette opération effectuée par l'émetteur permet de séparer les différents signaux d'un même terminal ou d'une même station de base. Réalisée juste après l'étalement, elle ne modifie pas la bande passante ni le débit ; elle se limite à séparer les différents signaux les uns des autres. Ainsi, l'étalement peut-être effectué par plusieurs émetteurs avec le même code de channelisation sans compromettre la détection des signaux par le récepteur. Le scrambling fait appel aux codes de Gold qui sont une combinaison linéaire de plusieurs m-séquences. Notons qu'il existe un arbre de codes de channelisation pour chaque code de scrambling. Cela signifie que différents émetteurs peuvent utiliser leurs arbres de codes indépendamment.

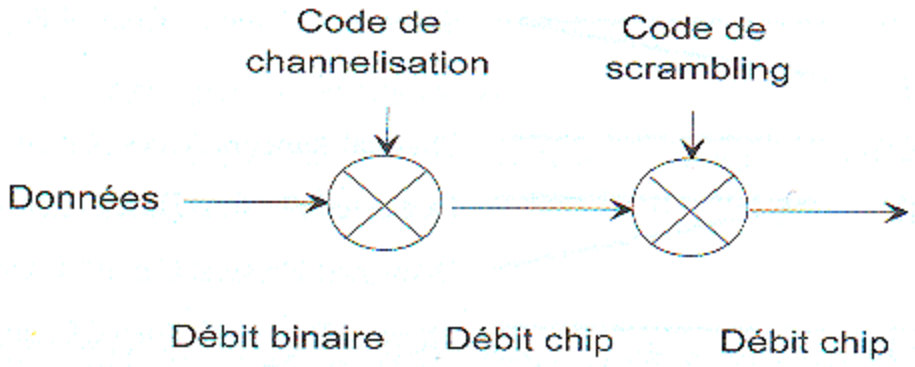



**Figure 2.12 Relation entre l'étalement et le srambling**

### 2.4.4 Aloha et ses variantes

L'Aloha est une méthode d'accès aléatoire pour l'accès au canal de transmission. Une méthode d'accès est vue sur un autre niveau qu'une technique d'accès (FDMA, TDMA, CDMA) mais on va la présenter au même niveau pour insister sur son intérêt dans l'amélioration de performance. Une source utilise le canal seulement en cas de besoin, donc quand elle a des informations à envoyer. La source attend ensuite la réponse du destinataire pour signaler une mauvaise ou bonne réception. Cette technique est adaptée au cas d'un grand nombre d'utilisateurs qui sont souvent inactifs. Dans le cas où plusieurs sources tenteraient d'envoyer en même temps, une collision est provoquée et les paquets en collision sont perdus,

ce qui nécessite une retransmission. Dans les réseaux satellitaires, cette technique peut être utilisée pour la demande de ressources, et donc au niveau du plan de control. Les inconvénients majeurs de cette technique sont l'instabilité et le bas débit utile (18%) [5]. L'aloha en tranches donne une meilleure performance, puisque les transmetteurs sont synchronisés par une discrétisation du temps. Dans le cas du réseau terrestre la durée d'un slot est le temps aller-retour RTD (Round Trip Delay) maximal entre deux points du réseau. Les stations sont synchronisées et connaissent le début d'un slot. Une station ne peut émettre qu'au début d'un slot. On atteint par cette technique un débit de 36%. Plusieurs variantes d'Aloha ont été étudiées :

- Aloha avec résolution de contention.
- Aloha avec écoute de porteuse.
- Aloha avec détection de collisions.
- Aloha avec résolution de collisions.

### 2.4.5 Comparaison des techniques d'accès

Une première comparaison des différentes techniques présente des avantages du CDMA par rapport aux autres techniques, surtout dans le contexte satellitaire :

- CDMA présente plus de robustesse aux phénomènes d'atténuations par des multichemins et interférence.
- CDMA permet un gain de multiplexage statistique par rapport aux TDMA et FDMA où le nombre d'utilisateurs est limité en avance soit par des contraintes temporelles ou fréquentielles. Par contre, en CDMA, une augmentation d'utilisateurs génère une plus grande interférence et par suite une légère dégradation de la QoS. C'est la notion de « graceful degradation ».
- CDMA permet une meilleure utilisation spatiale, car l'atténuation des signaux d'un faisceau voisin doit être 2 à 3dB pour CDMA, comparé à 18dB pour TDMA ou FDMA.
- On peut transmettre plus d'information avec la même énergie en utilisant le fait qu'au cours d'une partie du temps, certains sources restent silencieuses. En effet, le débit que chaque source peut transmettre à une puissance donnée est une fonction du rapport signal sur bruit, où la transmission d'autres sources est prise en compte dans le bruit. Une source peut donc profiter du silence des autres sources [5].

## *2.5 Efficacité des protocoles MAC dans les systèmes LEO*

### 2.5.1 TDMA dans LEOS

Comme application du TDMA dans LEOS, on va décrire brièvement l'exemple de la constellation IRIDIUM [9] qui utilise cette technique. La bande passante disponible est 1616.0-1626.5 MHz qui est divisée en sous bandes de 31.5KHz séparées par des bandes de garde. Dans chaque sous bande, des trames TDMA de 90ms sont transmises avec un débit de 50Kb/s pour former 4 liens montants et 4 liens descendants. Le multiplexage est donc temporel TDM (Time Division Multiplexing). Le canal est présenté dans la figure 2.13.
La réutilisation de fréquence nécessite une décomposition cellulaire par des antennes multi-faisceaux, le facteur de réutilisation de fréquence en IRIDIUM est de sept comme dans le cas de GSM [10].

Le taux d'utilisation en TDMA peut être facilement évalué par :

$$\eta = 1 - \sum_i t_i / T_f \qquad (2.4)$$

où $t_i$ est la somme des portions de temps non utilisés comme les temps de gardes ou les entêtes.

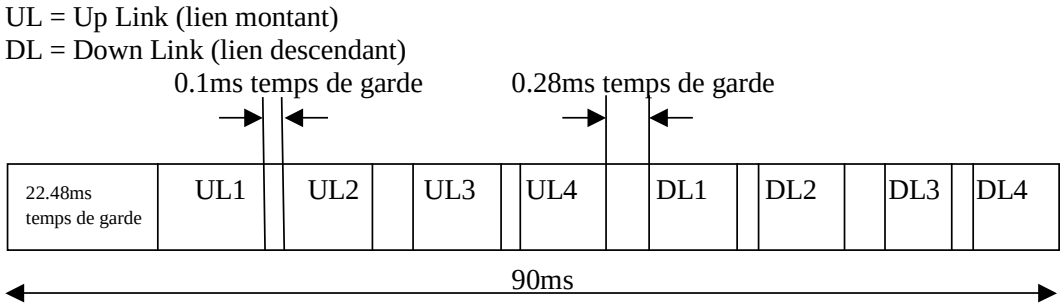



**Figure 2.13 Canal d'accès dans IRIDIUM**

### 2.5.2 CDMA dans LEOS

L'utilisation de la technique CDMA dans les systèmes LEOS présente des avantages majeurs ; la raison principale est que la bande passante, plus large à cause d'étalement du spectre, permet une diversité fréquentielle qui atténue l'interférence due au multi-chemin. En plus, en CDMA la même fréquence est utilisée dans les cellules voisines et donc un utilisateur n'a pas besoin de changer de fréquence chaque fois qu'il passe à une nouvelle cellule, ce qui est très fréquent en constellation LEO. En plus, en CDMA, l'intégration des deux modes circuit et paquet ne nécessite pas un protocole spécial puisque les deux modes se ressemblent en terme d'accès et de transmission. Ceci permet d'intégrer de services voix et données facilement. De la même façon, l'accès aléatoire en CDMA est facile à intégrer d'une manière non corrélée. En effet, le nombre total de codes est toujours supérieur au nombre maximal de codes utilisés simultanément et on peut à la limite assigner un code à chaque utilisateur accepté par la fonction de contrôle d'admission. Ce code est utilisé par l'utilisateur uniquement quand il a des paquets à envoyer. Ce principe est très important et va être largement utilisé dans notre thèse. D'autre part, la notion de collision est différente en CDMA, puisque plusieurs utilisateurs peuvent envoyer en même temps sur des codes différents. Les informations ne sont pas perdues dans ce cas mais le niveau d'interférence s'élève et la probabilité de perte augmente. L'accès aléatoire en CDMA est appelé Aloha étalé ou CDMA Aloha [6].

Dans [7], Viterbi a calculé l'efficacité spectrale du CDMA comme fonction du rapport signal sur bruit. On va résumer les résultats de ces études puis les appliquer au satellite LEO afin de montrer l'intérêt du CDMA dans la constellation de satellites à orbites basses.

Dans un système à accès multiple où $M$ utilisateurs envoient sur un canal, la puissance totale reçue est :

$C = ME_bR_b$ avec $E_b$ est l'énergie par bit d'information et $R_b$ est le débit de l'utilisateur.

Si on divise l'ensemble par $N_0W_s$ où $N_0$ est la densité spectrale du bruit thermique $W_s$ est la bande passante totale du système :

$$\frac{C}{N_0 W_s} = M \frac{E_b}{N_0} \frac{R_b}{W_s} \tag{2.5}$$

$R_b/W_s$ est nommé le facteur d'étalement du CDMA (spreading factor) et représente dans beaucoup des cas le nombre maximal d'utilisateurs qui peuvent envoyer simultanément (nombre maximal des codes simultanés).

La performance du lien est mesurée par l'efficacité spectrale

$$\eta = M \frac{R_b}{W_s} = \frac{\frac{C}{N_0 W_s}}{\frac{E_b}{N_0}} \tag{2.6}$$

en fait en CDMA le bruit total est la somme du bruit thermique et du bruit dû à l'accès multiple :

$$N_0 + I_0 = N_0 + (M-1)E_c \tag{2.7}$$

$E_c$ est l'énergie par chip et calculée par $E_c = E_b R_b / W_s$ on obtient donc

$$\frac{E_b}{N_0 + I_0} = \frac{E_b / N_0}{1 + \frac{M-1}{M} \frac{C}{N_0 W_s}} \tag{2.8}$$

et pour un grand nombre d'utilisateurs $(M-1)/M \approx 1$ on obtient :

$$\eta = \frac{\frac{C}{N_0 W_s}}{\frac{E_b}{N_0 + I_0}(1 + \frac{C}{N_0 W_s})} \tag{2.9}$$

Les trois facteurs principaux qui améliorent l'utilisation du CDMA sont :

- L'activité de la source de trafic comme la voix, avec un facteur d'activité V.
- La discrimination spatiale due aux antennes multi-faisceaux de nombre 1/a (surtout en satellite).
- La réutilisation des fréquences orthogonales, avec un facteur d'isolation ρ.

En tenant en compte ces facteurs on obtient :

$$N_0 + I_0 = N_0 + a\rho V (M-1) \frac{E_b R_b}{W_s} \tag{2.10}$$

d'où

$$\eta = \frac{\frac{C}{N_0 W_s}}{V \frac{E_b}{N_0 + I_0}(1 + a\rho \frac{C}{N_0 W_s})} \tag{2.11}$$

Le facteur en dénominateur est diminué par rapport à 2.9 et la performance du canal est augmentée considérablement. L'efficacité spectrale représente également le taux d'utilisation du canal et peut être comparé à ce taux calculé pour TDMA.

En CDMA, l'utilisation d'une fréquence unique permet à l'utilisateur d'émettre et de recevoir le même signal pour différents satellites de la constellation ; c'est le soft-hand-off. Dans le sens descendant, les deux signaux reçus par plusieurs satellites peuvent être combinés pour

améliorer la performance. Pour le sens montant, les signaux reçus par différents satellites sont décodés séparément et c'est le centre de commutation qui doit gérer la situation. En général, le signal le plus puissant est pris en compte. L'avantage de cette caractéristique est une simplicité de hand-off qui est très fréquent dans le système LEO. On peut démontrer que ce soft-hand-off peut doubler la capacité du système si un algorithme adapté au contexte est utilisé [7].
D'autre part, l'utilisation d'une fréquence commune dans les cellules voisines nécessite un contrôle de puissance pour chaque utilisateur et dans les deux directions. Le but du contrôle de puissance est d'adapter la puissance émise à la position du terminal afin que les signaux reçus soient presque identiques. Ceci diminue l'interférence due à l'accès multiple et augmente la capacité. Le contrôle de puissance à boucle fermée est très utilisé en CDMA [7], en LEOS le long délai aller-retour dégrade la performance de cet algorithme et ne permet q'un seul contrôle par RTD.

### 2.5.3 CDMA/TDMA hybride dans LEOS

L'inconvénient majeur du CDMA pur est la difficulté de la détection multi-utilsateur à cause du grand nombre de codes. Pour faciliter cette tâche, un composant temporel est introduit et on parle du CDMA/TDMA hybride. Puisque la composante FDMA existe dans toute technique, on se trouve dans une technique où les trois modes d'accès sont présents FDMA, TDMA et CDMA. En résumé, sur chaque bande de fréquence (FDMA), le temps est décomposé en trames qui contiennent plusieurs slots (TDMA) et sur chaque slot plusieurs codes peuvent envoyer simultanément (CDMA). Un contrôle de puissance est facilement réalisé dans ce cas en insérant les informations de contrôle au début d'une trame. On se contente pour l'instant de ces quelques remarques et on laisse la comparaison détaillée pour les autres chapitres.
Une proposition est faite dans [38] en utilisant un schéma CDMA/TDMA hybride. Dans ce schéma, pour servir deux types de trafics, on définit deux types de trames ; les trames synchrones et les trames asynchrones. Dans les trames asynchrones, on envoie des rafales aléatoires, alors que dans les trames synchrones, on envoie des données synchronisées.

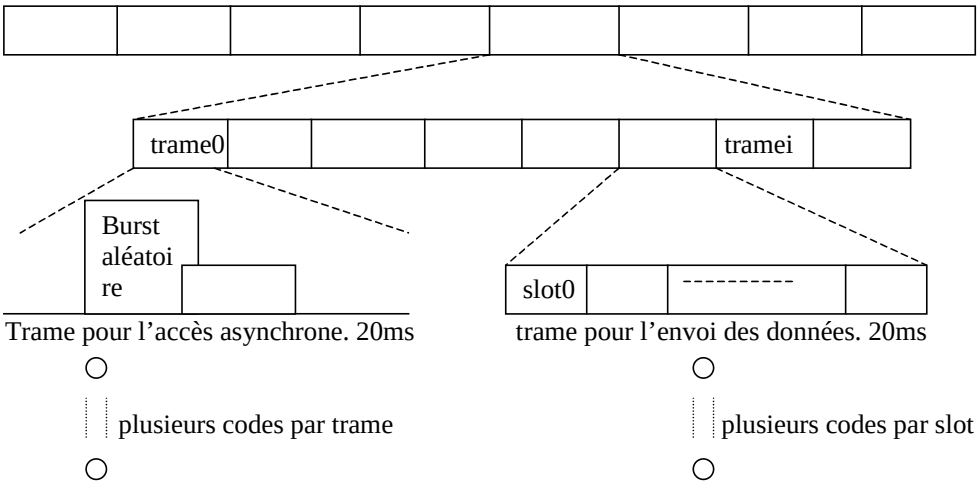



**Figure 2.14 Canal CDMA/TDMA hybride**

La trame « 0 » est utilisé pour accéder au réseau aléatoirement. Des bursts d'accès aléatoires sont alors envoyés d'une manière asynchrone tout en demandant une partie de la bande passante associée à ce service. L'accès sur cette trame se fait en CDMA Aloha. Pour les autres services, une demande de connexion est nécessaire. Cette demande se fait d'une façon aléatoire et la trame « 0 » peut être utilisée dans ce but. Si la demande est acceptée l'utilisateur commence à envoyer ses données en utilisant un nombre de slots réservés. Il envoie ses données en mode quasi-synchrone sur les trames synchrones en utilisant CDMA/TDMA hybride.
Notons à ce stade que, contrairement au CDMA, où le nombre maximal de codes est lié à la bande passante totale, en CDMA/TDMA, le nombre maximal de codes qu'on peut utiliser sur chaque slot est une fonction de nombre de slots et de la bande passante totale du système. Pour mieux comprendre cette différence, on donne quelques chiffres.
Si la sous bande décomposée en FDMA est de 256Kb/s et les utilisateurs ont un débit constant de 8Kb/s, en CDMA pur, le facteur d'étalement (spreading factor) est de 256/8 = 32. En CDMA/TDMA ce chiffre est ensuite divisé par le nombre de slots pour obtenir le facteur d'étalement qui est de l'ordre de 8 dans ce cas. On peut donc considérer le CDMA pur comme un cas particulier du CDMA/TDMA où le nombre de slots par trame est 1. Cette remarque est importante et va être utilisée dans la suite.

## *2.6 Qualité de service*

Comme on a déjà mentionné, la constellation de satellites LEO est une composante essentielle dans tout réseau international comme l'UMTS. Ce réseau doit offrir plusieurs types de services avec différentes qualités de service accessible de n'importe quelle région de la terre.
IP et ATM sont les deux protocoles qui peuvent être utilisés dans le cœur du réseau. Ces deux protocoles offrent plusieurs services qui ont différentes qualités. En définissant les services du réseau d'accès, il faut prendre en compte ces deux protocoles puisqu'un mapping de services est ensuite nécessaire.
En plus du mapping de service réalisé par la couche MAC en utilisant la notion de MTCs (MAC Transfer Capabilities) [16], la couche MAC doit réaliser trois buts :

- Prévision de la QoS ; c-à-d, la couche MAC doit garantir la QoS négociée par l'utilisateur accepté dans le système.
- Efficacité ; c-à-d, en réalisant la qualité de service pour chaque utilisateur, l'utilisation de ressources radios doit être maximisée.
- Interopérabilité ; c-à-d, la couche doit supporter des services analogues aux services définis pour IP, ATM ou UMTS.

Dans ce paragraphe, on va présenter brièvement les services dans un réseau IP et ATM parce que les services dans le réseau d'accès sont en inspirés. Les services dans le réseau UMTS sont ensuite présentés. Des propositions dans le contexte de satellite sont ensuite signalées.

### 2.6.1 QoS dans IP et ATM

#### *2.6.1.1 IP*

L'IETF (Internet Engineering Task Force ) a proposé plusieurs services et mécanismes pour réaliser une certaine QoS [11]. On signale deux grandes tendances ;

- Le modèle de services intégrés avec le protocole de réservation RSVP (Ressource reSerVation Protocol) est caractérisé par une réservation de ressources. Pour les

applications temps réel, l'application doit établir un chemin et réserver des ressources. Trois classes de services sont proposées pour ce modèle :

1. Service garanti pour les applications temps réels.
2. Service à débit contrôlé pour les applications qui demandent une garantie mais non-temps réel.
3. Service best effort.

- Le modèle de services différenciés où les paquets sont marqués pour les différencier au sein du réseau. Aucune réservation n'est demandée. Trois classes de service sont proposées par ce modèle :
  1. Le service premium pour les applications demandant un délai et une gigue basse.
  2. Le service assuré pour les applications demandant une meilleure fiabilité que le best effort.
  3. Le service olympic qui contient trois niveaux de priorité où le best effort a la priorité la plus basse.

#### *2.6.1.2 ATM*

Dans ATM, cinq classes de services sont définies. Ces classes varient du temps réel au best effort [12].

- CBR (Constant Bit Rate) pour les applications temps réel et à débit constant.
- VBRrt (Variable Bit Rate real time) pour les applications temps réel mais à débit variable.
- VBRnrt (Variable Bit Rate non real time) pour les applications qui demandent une réservation garantie de ressources mais non temps réel.
- ABR (Available Bit Rate) pour les applications qui demandent une réservation souple de ressources.
- UBR (Unsustainable Bit Rate) pour les applications best effort.

### 2.6.2 QoS dans l'UMTS

Dans les spécifications 3GPP, plusieurs services supports (bearer services) sont définis pour L'UMTS. Ils sont décomposés en plusieurs niveaux. La figure 2.15 représente l'architecture de la qualité de service QoS dans l'UMTS [13].

Dans son chemin d'un terminal (TE : Terminal Equipment) à un autre, le trafic utilise les différents services supports intégrés dans le réseau. Un TE est connecté au réseau UMTS par le MT (Mobile Termination). Le service de bout en bout au niveau application utilise les services supports du réseau sous jacent. A son tour, ce service utilise les services du réseau UMTS ainsi que ceux des réseaux qu'il traverse.

Les services de support UMTS déterminent la QoS du réseau UMTS. Ils sont constitués de deux parties, les services supports du réseau radio d'accès et celles du cœur du réseau.

Les services supports du réseau radio d'accès produisent un transport confidentiel des informations entre MT et CN.

Dans l'UMTS, quatre classes de services sont considérées. Ces classes sont génériques et peuvent supporter une multitude d'applications. Il faut prendre en compte la complexité de l'interface radio et éviter de définir des mécanismes complexes comme dans le réseau fixe. Ces classes sont :

- Conversational class,
- Streaming class,

- Interactive class,
- Background class.

Le caractère distinctif de ces quatre classes est la sensibilité au délai. Les classes conversational et streaming sont à temps réel, donc très sensibles au délai ; des applications comme vidéo et voix utilisent ces classes. Les classes Interactive et Background sont insensibles au délai et sont destinées aux applications Internet.

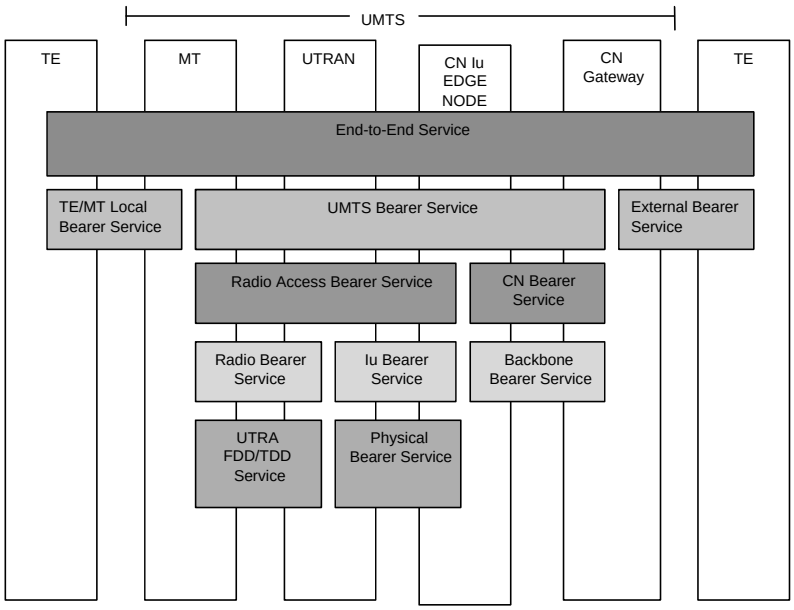



**Figure 2. 15 Architecture de la QoS dans UMTS**

La classe conversational est utilisée surtout pour les applications de parole. Cette classe exige une contrainte temps réel et doit respecter un délai et une gigue très faibles.
La classe streaming est utilisée pour des flux temps réel unidirectionnels.
La classe interactive est utilisés par des applications interactives sans contrainte temps réel (Web Browsing par exemple).
La classe Background est utilisée pour des applications sans exigences de délai ni de débit (Emails par exemple).

### 2.6.3 QoS dans les satellites:

En passant de la couche réseau à la couche MAC, un protocole d'accès doit accomplir la QoS demandée ; on parle des différentes capacités de la couche MAC. En réalité, le protocole d'accès peut varier d'un service à un autre. Pour des applications temps réel par exemple, un accès avec délai garanti est nécessaire et un protocole rigide avec réservation est préféré. Par contre, pour les applications non-temps réel où le délai n'est pas garanti mais la perte des paquets est cruciale, un protocole avec accès aléatoire est préféré. Mais il faut signaler que les applications à débit variable et avec délai garanti peuvent poser des problèmes de gaspillage de ressources quand un protocole avec réservation est utilisé. Un compromis entre qualité de service et utilisation de ressources est nécessaire.
Sur ce stade des problèmes de multiplexage de services et d'allocation de ressources sont essentiels. En effet, le multiplexage de services mélange plusieurs types de services avec

différentes QoS. L'impact d'un tel service sur les autres peut perturber leurs qualités demandées. La séparation de services nécessite une allocation de ressources pour chaque service une telle allocation peut diminuer l'utilisation de ces ressources et par suite l'efficacité de la couche MAC [15].
Dans la communication personnelle par satellite, la plupart des sources de trafics sont individuelles ; le trafic généré est donc non agrégé et très variable. Un accès direct au canal radio est nécessaire, ce qui complique la tâche de la couche MAC. D'autre part la constellation de satellites présente plusieurs contraintes en délai, gigue et perte. Ceci est dû au temps de propagation élevé et au hand-off et impose l'utilisation des protocoles d'accès avancés ainsi qu'une infrastructure très rapide et avancée comme l'ATM.
Les principaux caractères de l'ATM qui en font l'infrastructure préférée pour les réseaux satellites sont résumés dans le tableau 2.1.
La couche MAC doit réaliser un contrôle de trafic et de congestion pour atteindre la qualité demandée en terme de perte des cellules, délai des cellules et variation de délai. Une demande de connexion est refusée si la capacité et la qualité de service demandées ne sont pas disponibles. Mais pour les satellites, il n'est pas toujours possible de connaître la capacité et la qualité de service disponible, ce qui rend l'étude plus compliquée.

**Tableau 2.1 Avantage de l'ATM**

| Caractéristiques de l'ATM | Avantages d'utilisation |
|---|---|
| Allocation de bande sur demande et dynamique | Efficacité et meilleure utilisation de ressources |
| Haut débit | Bas délai |
| Non-propriétaire | Interopérabilité et bas prix. |
| Support pour le multimédia | Efficace, pratique. |
| Support de multicast | Efficacité par non-répétition |
| File d'attente prioritaire | Support des plusieurs qualités de services |

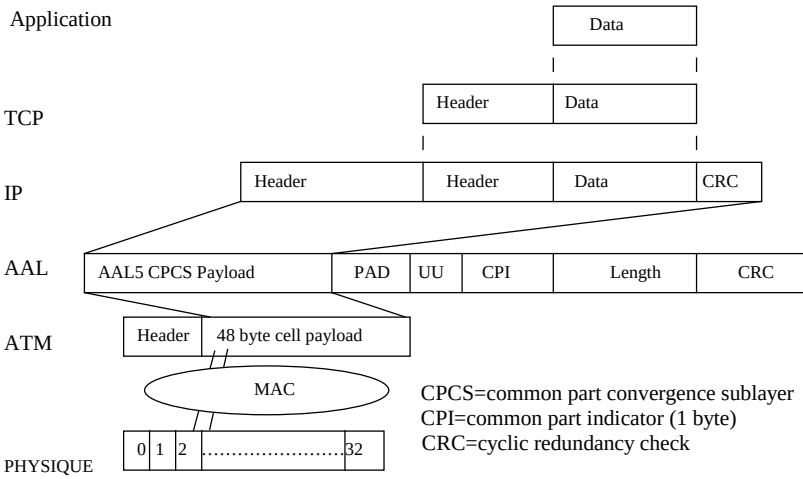



**Figure 2.16 IP sur ATM dans la communication par satellite**

Dans [14], les cellules ATM sont considérées comme des paquets, et la performance est évaluée par application de la théorie des files d'attente. Délai, variation de délai, taux d'erreur et longueur de la file d'attente sont les facteurs essentiels pour déterminer le taux de perte.

La couche MAC accomplit la liaison entre couches supérieures et couche physique. En satellite, cette liaison est nécessaire sur le lien montant et descendant. Si on utilise la technique IP sur ATM la pile des protocoles est comme présentée dans la figure 2.16.

## *2.7 Intégration dans le réseau terrestre*

Pour élaborer l'intégration du satellite dans le réseau terrestre, on présente la figure 2.17 qui montre les différents niveaux de couverture dans le réseau UMTS.
La couverture se fera dans un premier temps par « taches de léopard », c'est à dire que seul les villes et les centres d'affaires seront équipés en UMTS. Ce phénomène est dû à plusieurs raisons. En effet, le territoire est globalement couvert par les systèmes de deuxième génération, ceci par l'intermédiaire de trois types de cellules, les macro-cellules, (couverture sur 15Km de rayon), les micro-cellules (500m) et les pico-cellules (100m). Du fait d'un débit et d'une fréquence d'utilisation plus élevés pour l'UMTS, les cellules utilisées seront plus petites. L'UMTS se développera donc dans un premier temps dans des îlots de couverture : en milieux urbains, centres d'affaires… et se déploiera de façon progressive [54].
Dans ce paragraphe, on présente en premier lieu le réseau d'accès en UMTS pour ensuite discuter l'intégration du satellite dans l'UMTS.

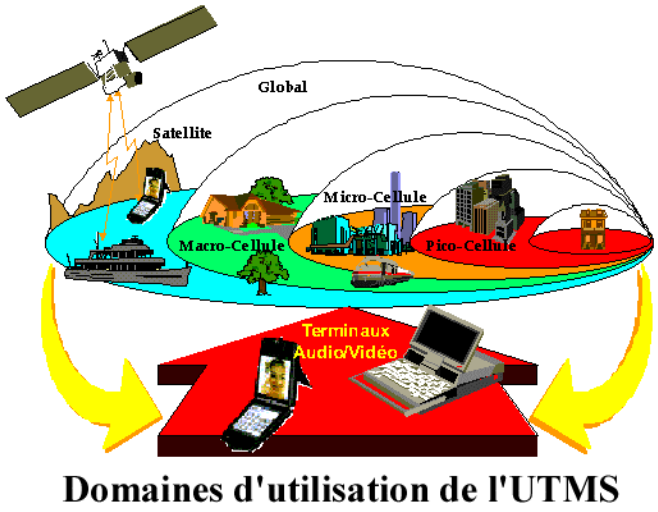



**Figure 2.17 Couverture en UMTS**

### 2.7.1 Réseau d'accès en UMTS (UTRAN)

La figure 2.18 présente de réseau d'accès qui comporte les nodes B et les RNCs.
Le **NodeB** : son rôle principal est d'assurer les fonctions de réception et de transmission radio pour une ou plusieurs cellules de l'UTRAN (UMTS Terrestrial Radio Access Network).
Le **RNC (***Radio Network Controller***) :** son rôle principal est le routage des communications entre le NodeB et le réseau coeur.
Le réseau UMTS repose donc sur un réseau coeur et un réseau d'accès. Voyons maintenant le moyen de communication en couches entre le mobile et le réseau d'accès.
Les protocoles de l'interface radio s'appliquent aux 3 premières couches du modèle OSI (Open Systems Interconnections), qui sont la couche physique, la couche liaison de données, et la couche réseau (routage).

Le **niveau 1 (PHY)** représente la couche physique de l'interface radio. Elle réalise entre autres les fonctions de codage de canal, d'entrelacement et de modulation.
Le **niveau 2** comprend les couches PDCP, RLC, MAC et BMC. Le transport fiable des données entre 2 équipements est assuré par la couche ***RLC*** (Radio Link Control). La couche **MAC (**Medium Access Control**)** remplit la fonction de multiplexage des données sur les canaux de transport radio. La couche **PDCP (**Packet Data Convergence Protocol**)** a deux fonctions principales. Tout d'abord, elle permet d'assurer l'indépendance des protocoles radio de l'UTRAN (couches MAC et RLC) par rapport aux couches de transport réseau. Cette indépendance permettra de faire évoluer les protocoles réseau (par exemple de passer de l'IPv4 à l'IPv6) sans modification des protocoles radio de l'UTRAN. D'autre part, la couche PDCP offre les algorithmes de compression de données ou d'en tête de paquets de données, permettant un usage plus efficace de ressources radio. En effet, plusieurs études sur les caractéristiques du trafic sur les réseaux internet public ont montré que 40 % des paquets IP étaient des paquets de taille très réduite (40 octets). Ces paquets sont composés de 20 octets d'en-tête IP suivis de 20 octets d'en-tête TCP. Ce sont des paquets de contrôle ne contenant aucune donnée utilisateur. La couche PDCP utilise le mécanisme de compression des en-têtes TCP/IP décrit dans les RFC 1144 [55] et RFC 2507 [56]. Enfin, la couche **BMC (**Broadcast/Multicast Control**)** assure les fonctions de diffusion de messages sur l'interface radio.

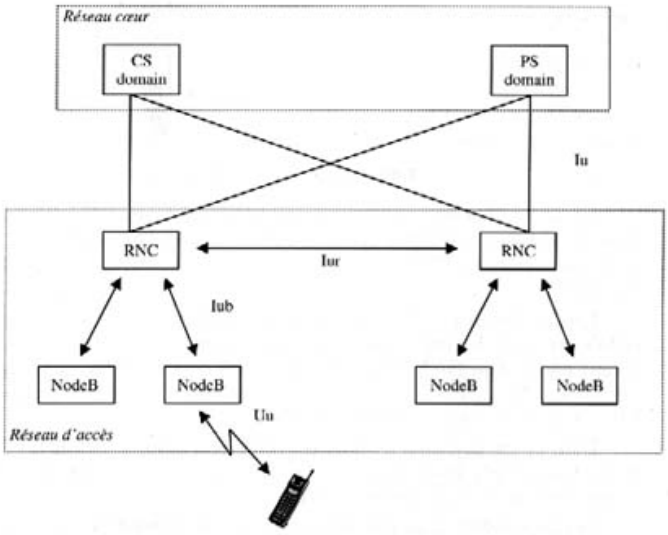



**Figure 2.18 Réseau d'accès UTRAN**

Le **niveau 3** de l'interface radio contient la couche ***RRC (****Radio Resource Control****)***. La fonction principale de cette couche est la gestion de la connexion de signalisation établie entre l'UTRAN et le mobile. Cette connexion est utilisée lors des échanges de signalisation entre le mobile et l'UTRAN, par exemple, à l'établissement et à la libération de la communication.
La figure 2.19 montre les différentes couches et fonctionnalités dans l'UTRAN. Pour mieux comprendre cette fonctionnalité, on donne deux exemples pratiques qui représentent deux cas différents du système ; la voix et le data.

**Utilisateurs data (cas d'un paquet IP)**

Le paquet d'information reçu par l'UTRAN et provenant du réseau coeur est la N-PDU (*Network PDU*). Dans le cas d'un paquet IP, l'en-tête de la N-PDU est compressé par la

couche PDCP, c'est à dire remplacé par un en-tête PDCP de taille plus réduite. Cette nouvelle PDU est ensuite segmentée par la couche RLC, qui ajoute à chaque segment son propre en-tête. La RLC-PDU est alors traitée par la couche MAC, qui ajoute un en-tête lorsqu'un multiplexage est effectué.

**Utilisateurs voix**

Pour la voix, le fonctionnement est beaucoup plus simple. Les couches RLC et MAC sont utilisées en mode transparent (ni segmentation, ni multiplexage des trames de phonie) ; la couche PDCP est dans ce cas inutile.

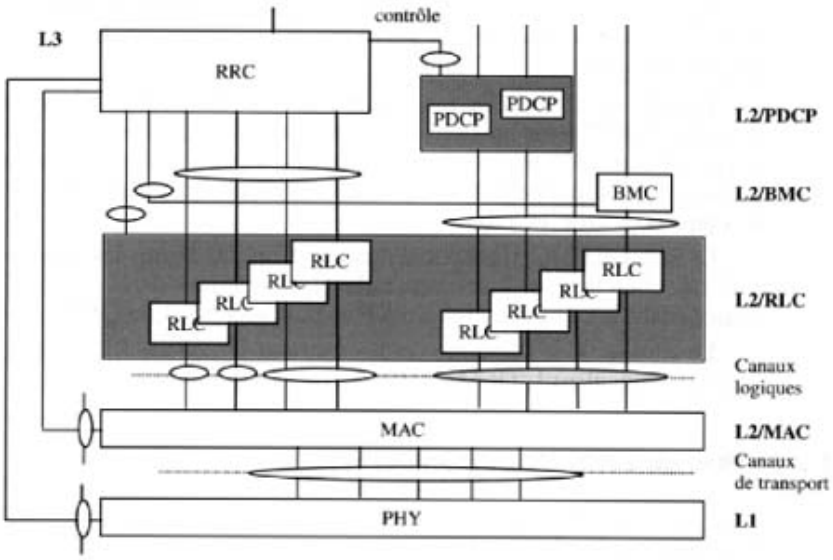



**Figure 2.19 Vue en couche de l'interface radio de l'UTRAN**

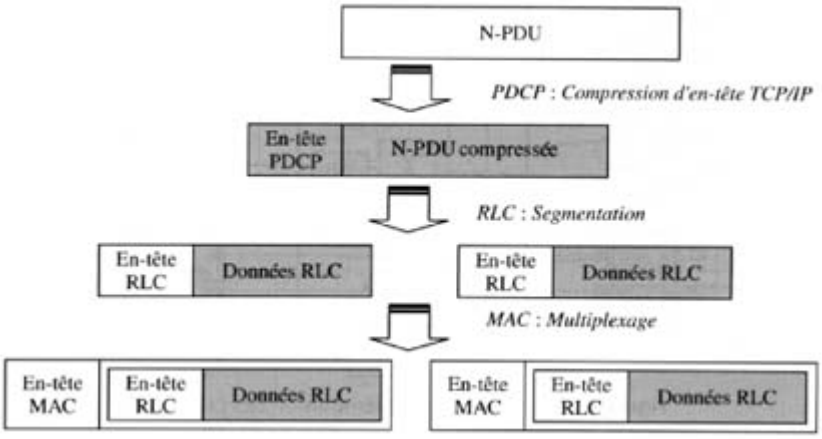



**Figure 2.20 Encapsulation des paquets arrivant du réseau coeur**

### 2.7.2 Intégration du satellite dans l'UMTS

Plusieurs projets étudient l'intégration des satellites LEO dans les réseaux terrestres surtout l'UMTS. L'intégration est orientée qualité de service puisqu'un utilisateur n'accepte pas une dégradation de sa QoS en passant au réseau satellitaire. L'intégration utilise une unité d'interconnexion au cœur du réseau UMTS où l'infrastructure est probablement l'ATM. On définit plusieurs niveaux d'intégration [17] :

- Niveau géographique ; dans ce cas, le système satellitaire complète le réseau terrestre en couvrant des zones non couvertes par le réseau terrestre. Les deux réseaux sont technologiquement indépendants.
- Niveau service ; dans ce cas les deux réseaux doivent offrir les même services malgré qu'ils restent technologiquement indépendants.
- Niveau réseau ; dans ce cas, les deux réseaux d'accès sont différents et indépendants mais le cœur du réseau est le même. Des fonctions d'adaptation sont nécessaires pour les terminaux.
- Niveau technique ; dans ce cas, les deux techniques d'accès doivent être proches puisque le passage d'un réseau à un autre doit être transparent. Des terminaux duaux qui réalisent des handover en passant d'un réseau à un autre sont nécessaires.
- Niveau système ; dans ce cas, les deux systèmes d'accès doivent être pareils puisque le réseau satellitaire constitue une partie de tout le réseau. Les hand-offs sont possibles entre réseau satellitaire et terrestre quand c'est nécessaire ; débordement ou panne du réseau terrestre par exemple. Les terminaux duaux doivent passer d'un système à un autre avec facilité.

Une tâche importante pour accomplir l'intégration est la définition de la couche MAC satellitaire. Puisque l'intégration est au niveau système, les deux techniques terrestre et satellitaire doivent concorder [20]. Les principaux projets d'intégration du satellite avec l'UMTS sont :

- **INSURED** (Integrated Satellite UMTS Real Environment Demonstrator) ; l'objectif principal de ce projet est l'intégration de la constellation de satellites LEO dans l'UMTS afin de réaliser un système global de communication personnelle. Les concepts essentiels à traiter sont les handovers entre les deux segments, les réseaux d'accès et la gestion de mobilité [18].
- **SINUS** (Satellite Integration into Network for UMTS Systems) ; dans ce projet, on étudie essentiellement des nouveaux protocoles d'accès et de codages qui sont performants pour les deux types de réseaux terrestre et satellitaire. La technique d'accès choisie est le WCDMA utilisé par la voix ainsi que par des sources de données à haut débit [19].

L'intégration du satellite est supposée au niveau système et le satellite représente une partie de l'UMTS. Le terminal pourra se connecter aux deux systèmes (satellite et terrestre) et effectuer un handover entre les deux. Un terminal doit avoir la possibilité de supporter plusieurs interfaces radios. L'approche GRAN suivie par ITU et ETSI sépare le terminal en deux parties. Une partie dépendante de la technologie radio et une deuxième indépendante. La partie dépendante est implémentée de façon à supporter plusieurs interfaces radio [57].

Deux techniques d'intégrations sont proposées dans la littérature [58] : la première considère le satellite comme Node B et la deuxième comme RNS (mélange de RNC et node B). On définit à ce niveau le USRAN (UMTS Satellite Radio Access Network).

- Node B : cette technique est utilisée quand une couverture terrestre n'est pas accessible. Le satellite représente donc un lien entre le terminal et le RNC qui y est géographiquement inaccessible. Le satellite doit supporter toutes les fonctionnalités d'une station de base ainsi que du node B.
- RNS : dans ce cas le satellite peut accomplir les deux rôles. Un parapluie pour les cellules terrestres et un lien entre le terminal et le cœur du réseau UMTS. Les fonctionnalités de Node B et RNC sont implémentées dans le satellite. Le satellite doit accomplir des fonctions de contrôle ainsi que de transmission. Le satellite doit avoir la possibilité d'interconnecter directement avec les RNC terrestres ainsi qu'avec des autres satellites, ce qui impose l'existence des liens inter-satellites.

En résumé, l'intégration complète du réseau satellite dans le réseau cellulaire terrestre est un problème de réseau qui nécessite des solutions sur le niveau de transmission et de réseau. L'intégration du satellite dans l'UMTS est au niveau système et le satellite n'est pas considéré comme un chemin alternatif de routage capable de servir des utilisateurs non couverts par le réseau terrestre mais comme partie d'un système unique. Le handover d'une station de base vers le Satellite est possible chaque fois que le lien terrestre est chargé, en panne ou autre raison. Un tel système nécessite une seule technique d'accès multiple pour les deux réseaux terrestre et satellite. La couche MAC doit utiliser cette technique pour accéder au système d'une façon efficace et économique. La figure 2.21 montre les différents hand-off dans un tel système.

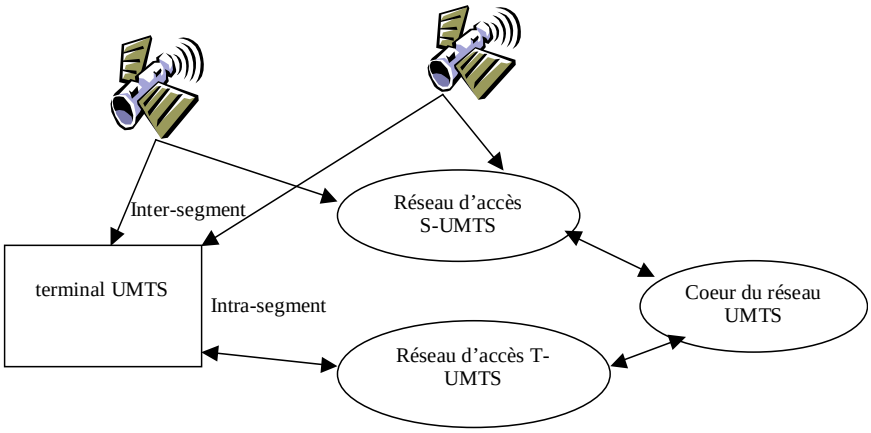



**Figure 2.21 Handover en UMTS et S-UMTS**

## *2.8 Conclusion*

Dans ce chapitre, on a présenté les architectures et techniques qui vont être utilisés tout au long de cette thèse. L'architecture d'une constellation LEO est prise d'un projet français national [3]. Les techniques d'accès sont présentées pour être utilisés dans les chapitres suivants dans le cadre de nos propositions des protocoles d'accès et de fonctions de contrôle d'admission. Plusieurs techniques utilisées dans des autres projets sont présentées brièvement pour les comparer avec nos méthodes. La technique d'accès CDMA est détaillée puisqu'elle représente une grande partie de notre thèse. Le problème de la qualité de service est ensuite élaboré sur différents réseaux comme l'IP, l'ATM et l'UMTS. Plusieurs projets d'intégration du satellite dans l'UMTS sont cités et une intégration au niveau système est utilisée dans cette thèse. Le réseau satellitaire est vu comme une partie du système global de communication, ce

qui nécessite des méthodes comparables d'accès, des classes de service souples ainsi qu'une simplicité de hand-off.
On remarque d'après cette étude que l'application des techniques d'accès TDMA et CDMA n'utilisent pas le multiplexage statistique pour augmenter la capacité du canal. Le multiplexage de services n'est pas traité en détail afin de définir des protocoles qui résolvent les problèmes dus aux différents comportements de trafic et des différentes QoS demandées. Dans la technique hybride CDMA/TDMA qui sépare les données synchrones des données asynchrones, on remarque que des sources à faible débit sont prises en compte pour représenter le trafic IP. Des sources de transfert des fichiers et de WWW ne sont pas étudiées. En plus, cette technique n'utilise pas efficacement les périodes d'inactivités des sources vocales qui peuvent augmenter la capacité du canal comme on a démontré dans le paragraphe 2.6.
Notre thèse consiste à résoudre ces différents problèmes. Les études vont prendre en considération les différentes remarques présentées dans ce chapitre. Ainsi, la QoS doit être convenable avec les systèmes existants, l'intégration avec le réseau terrestre impose des choix précises... Les questions essentielles à discuter et résoudre sont :

- Quels services doit-on définir au niveau MAC pour supporter les différentes sources de trafic et pour réaliser leurs QoS demandées ?
- Quelle fonction de contrôle d'admission est adaptée aux protocoles d'accès et qui peut accepter le nombre maximal de demandes ?
- Quel protocole d'accès peut utiliser une technique d'accès donnée en profitant du multiplexage statistique et en intégrant plusieurs services sur le même canal ?

Dans les quatre chapitres suivants, on va étudier trois protocoles d'accès différents. Ces protocoles utilisent la technique TDMA et CDMA. Le but essentiel est de maximiser la capacité du canal en utilisant le multiplexage statistique. Plusieurs services sont à définir pour supporter plusieurs sources de trafic (voix, transfert des fichiers, email, web). On va ensuite comparer ces protocoles pour déduire les différents critères qui déterminent le choix des différents paramètres d'accès et de contrôle en cas du réseau LEOS.

# 3 Chapitre III
# S-PRMA (Satellite-Packet Reservation Multiple Access)

## *3.1 Introduction*

Dans ce chapitre, on va étudier le protocole d'accès multiple PRMA dans la constellation de satellites à basse orbite LEO. Ce protocole, qui utilise la technique TDMA, est une union du TDMA et du Aloha en tranches afin de permettre un multiplexage statistique de sources à trafics variables. Ce protocole, développé pour les utilisateurs vocaux et dans les réseaux terrestres, peut être utilisé dans des systèmes LEOS et pour plusieurs types de services.
L'intégration de services est l'un des objectifs majeurs du réseau international de télécommunications. Ce réseau global va être capable de supporter plusieurs types de services avec simplicité et performance. La simplicité implique des techniques et protocoles simples et capables de traiter plusieurs types de trafics. La performance consiste à respecter une QoS demandée tout en maximisant l'utilisation de ressources. Les questions majeures à résoudre sont :

- Comment intégrer sur le même canal radio plusieurs services différents par le comportement de leurs trafics et par leurs QoS demandées, ?
- Comment unifier divers modes d'accès pour les réseaux terrestres et satellitaires afin de réaliser une intégration au niveau du système entre les satellites LEO et L'UMTS ?
- Comment utiliser les ressources radio avec efficacité et sans gaspillages tout en respectant la QoS ?

L'utilisation de PRMA en satellite est nommée S-PRMA. Le protocole original doit être changé pour s'adapter au nouveau contexte. Le protocole T-PRMA (Terrestre) est inutilisable en contexte de satellite à cause de long délai d'attente en LEO. Ceci est la raison essentielle d'introduire le S-PRMA. Une comparaison est ensuite faite entre le T-PRMA et S-PRMA pour démontrer que les changements introduits pour adapter PRMA au satellite rend la performance de ce protocole comparable à celle de T-PRMA en contexte terrestre. Le modèle mathématique proposé pour analyser la performance du protocole détermine les paramètres majeurs qui influencent sa performance. Ce modèle appliqué sur les sources data peut donner des résultats approximatifs sur leur comportement.
Une deuxième raison qui rend ce chapitre nécessaire est le fait que S-PRMA soit adapté de façon à multiplexer plusieurs services avec une efficacité acceptable. On va démontrer que dans ce cas la performance de S-PRMA est équivalent avec celle de T-PRMA en contexte terrestre. Rappelons enfin que les comparaisons faites entre S-PRMA et T-PRMA sont en

contexte satellite et terrestre, respectivement. Le but sera d'aborder la performance de T-PRMA en utilisant S-PRMA en LEOS.
Dans la première section, on présente le protocole PRMA terrestre utilisé pour la voix et les données ainsi que l'application de ce protocole au système LEO. Dans la deuxième section, les services intégrés sont présentés afin de définir des QoS pour les différents utilisateurs. La fonction de contrôle d'admission CAC est discutée dans la section 4. La modélisation mathématique de S-PRMA est développée dans la section 5 afin de pouvoir calculer les différents paramètres de performance et de stabilité pour les utilisateurs voix et donnée. La discussion analytique et par simulation est présentée dans la sixième section où on détermine les paramètres qui maximisent l'efficacité de S-PRMA. On peut alors comparer notre protocole avec des autres protocoles utilisant PRMA. Enfin le paragraphe 7 donne les conclusions et introduit le prochain chapitre.

## *3.2 PRMA*

En technique TDMA, le temps est divisé en des slots dans des trames. Un slot est dans un des deux états ; « réservé » ou « disponible ». L'état de chaque slot est diffusé aux utilisateurs par la station de base. Quand une rafale arrive au terminal (début du talkspurt pour un utilisateur voix par exemple), il utilise le protocole Aloha pour accéder à un slot disponible afin d'envoyer le premier paquet de la rafale. Si la transmission est réussie, le slot est réservé pour l'utilisateur tout au long de la rafale (talkspurt). Pour éviter les contentions sur ce slot, son état devient « réservé » et aucun utilisateur n'a le droit d'y accéder. A la fin de la rafale, le slot est libéré, son état redevient « disponible ».
Un terminal accède sur un slot disponible en utilisant le protocole Aloha. Il tente de transmettre sur un slot disponible avec le risque que d'autres utilisateurs peuvent essayer d'émettre sur ce même slot. Si plusieurs utilisateurs réussissent à accéder au même slot, une contention se produit. Le terminal doit tenter d'émettre sur le prochain slot disponible avec une probabilité $p$. La probabilité $p$ est un paramètre de conception. Quand un terminal réussit à envoyer un paquet dans un slot, la station de base (satellite pour notre cas) diffuse aux différents utilisateurs le nouvel état du slot. Les utilisateurs doivent savoir l'état d'un tel slot avant sa répétition dans la prochaine trame. Si *RTD* (Round Trip Delay) est le temps aller retour d'un paquet vers la station de base, $T_f$ la durée d'une trame et $T_s$ la durée d'un slot, on doit avoir ;

$$RTD \leq T_f - T_s \qquad (3.1)$$

Cette condition limite l'utilisation du PRMA pour quelques services temps réel suivant le temps aller-retour. Si le service impose un temps de trame maximal et le *RTD* est trop grand pour respecter l'inéquation 3.1, le service est non compatible PRMA. Dans [22] on distingue entre service compatible PRMA et non compatible PRMA et on considère la voix comme non compatible PRMA pour les satellites géostationnaire à cause du délai élevé et compatible PRMA pour les satellites à orbite basse. On va démontrer ce résultat dans ce chapitre.
Un paquet envoyé par l'utilisateur est copié dans le tampon en attendant la réponse du récepteur (ou de la station de base). Si ce paquet est positivement acquitté, l'utilisateur voit le slot réservé tout au long de la rafale. Dans le cas contraire, le terminal renvoie le paquet sur un autre slot. Un paquet peut attendre un délai maximum $D_{max}$ dans le tampon. Si le temps d'attente dépasse ce délai, le paquet est rejeté et ceci représente la cause essentielle de perte des paquets. Pour les utilisateurs voix, par exemple, ce délai est de 40 ms dans les meilleurs

des cas, et 20 ms si on compte les retards dus aux calculs et à la propagation. Par contre, pour les utilisateurs de donnée, ce temps peut être beaucoup plus grand [26].
Dans une constellation de satellites LEO, le temps aller-retour est de 15-20ms, ce qui impose un temps de trame supérieur pour pouvoir recevoir la réponse dans la trame même. Puisque la réponse à une tentative prend un temps aussi élevé, un terminal vocal ne pourra pas essayer d'envoyer un tel paquet sur plus qu'une trame. Si les tentatives sur les slots d'une trame échouent, le paquet sera rejeté et on passe au deuxième paquet dans le talkspurt. Ce problème ne se pose pas pour des utilisateurs qui acceptent un délai. Ces remarques sont cruciales pour la mesure de performance du système ainsi que pour le choix des paramètres. De ce point de vue, le système peut être divisé en deux sous-systèmes ; le sous-système de voix et le sous-système de donnée.

### 3.2.1 Sous-système de voix

Un paquet vocal est formé par des bits produits par une source voix pendant $T_f$ avec une entête de $H_v$ bits. Si le nombre de slots par trame est $N_s$ et la durée d'un slot est $T_s$, on a

$$N_s = \left\lfloor \frac{R_c T_f}{R_s T_f + H_v} \right\rfloor \quad slots\ /\ frame \tag{3.2}$$

$$T_s = \frac{T_f}{N_s} \quad ms \tag{3.3}$$

où $R_c$ est le débit du canal et $R_s$ est le débit de la source (voix et data).
En utilisant un détecteur d'activité lent (S-VAD Slow Voice Activity Detector) étudié dans [23] par ETSI, la source vocale est considérée comme une source ON-OFF. Une source voix crée des durées de paroles et de silences suivant que l'utilisateur dans une conversation parle, attend ou écoute. La source peut être considérée comme un processus de Markov à deux états (figure 3.1). La probabilité qu'une durée de parole de moyenne $t_{on}$ se termine dans un temps $\tau$ est :

$$\sigma_v = 1-exp(-\tau/t_{on}) \tag{3.4}$$

C'est la probabilité de passage de l'état de parole à l'état de silence. D'autre part, la probabilité qu'une durée de silence de moyenne $t_{off}$ se termine dans un temps $\tau$ est :

$$\gamma_v = 1-exp(-\tau/t_{off}) \tag{3.5}$$

On définit la probabilité d'être dans l'état *ON* (parole), qui est aussi le facteur d'activité, par :

$$\delta_v = \pi_{on} = t_{on} /( t_{on} + t_{off} ) \tag{3.6}$$

et la probabilité d'être dans l'état *OFF* (silence) par :

$$\pi_{off} = t_{off} /( t_{on} + t_{off} ) \tag{3.7}$$

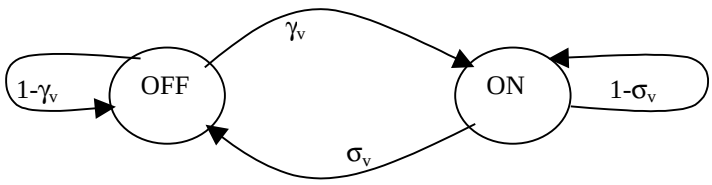



**Figure 3.1 Modèle de source voix**

Notons que le choix du S-VAD qui impose un tel comportement des sources de trafic est adapté aux systèmes LEO puisque la durée moyenne de l'état *on* est de 1s et celle de l'état *off*

est 1.35s. Par contre, un détecteur rapide d'activité implique des sources plus compliquées avec des durées moyennes de séjour dans les états comparables au *RTD*.
Quand la source de trafic passe de l'état *OFF* à l'état *ON*, l'utilisateur passe à l'état de contention et tente d'envoyer son premier paquet sur un slot disponible en effectuant un tirage de Bernoulli de probabilité $p_v$ (il accède au slot avec une probabilité $p_v$ et n'accède pas avec une probabilité 1-$p_v$ ). Quand il accède à un tel slot, il passe à un état d'attente puisque la réponse du satellite va prendre un certain délai *RTD* (c'est spécifique pour le système LEOS). Si la réponse est positive, l'utilisateur passe à l'état réservation, dans le cas contraire il revient à l'état de contention. Puisque l'utilisateur ne reçoit la réponse qu'après un $RTD \approx T_f$, si cette réponse est négative, il ne pourra plus tenter d'accéder pour le même paquet car le délai d'attente maximal $D_{max}$ est écoulé. Le paquet est donc rejeté et on essaye d'envoyer le paquet suivant. L'autre cause de rejet est le fait qu'un utilisateur ne réussisse aucun tirage de Bernoulli sur tous les slots disponibles d'une trame ; le délai maximal est encore écoulé dans ce cas et le paquet est rejeté.

### 3.2.2 Sous-système de donnée

Pour les données, on s'intéresse dans ce chapitre au trafic ABR qui représente des trafics de transfert des fichiers. Le sous-système de donnée est constitué d'un nombre d'utilisateurs qui génèrent des rafales suivant un processus de poisson indépendant de moyenne $\lambda$. Une rafale est de longueur distribuée géométriquement de moyen en bits $L_b$. Une rafale est donc constituée d'un nombre de paquets distribués géométriquement et de nombre moyen :

$$L_s = \frac{L_b}{R_s T_f} \qquad paquets / msg \tag{3.8}$$

où $R_s$ est le débit de la source de trafic.
Une source de donnée peut être modélisée comme un processus de Markov à deux étapes. « Attente *A*», attente d'un fichier, et « Fichier *F*», avoir un fichier à transmettre. Le passage d'attente à la transmission est Poissonien de paramètre $\lambda$ alors que le passage inverse est géométrique. La probabilité de passage de *A* à *F* pendant une durée $\tau$ est donc exponentielle de valeur

$$\sigma_d = 1 - exp(-\lambda\tau) \tag{3.9}$$

Par contre, la probabilité de passage de *F* à *A* pendant $\tau$ est de valeur égale à $\tau$ divisé par le temps total moyen pour émettre un message qui est égal à $L_b / R_s$. d'où :

$$\gamma_d = \tau / (L_b / R_s) \tag{3.10}$$

Notons ici qu'une distribution géométrique peut être modélisée par une distribution exponentielle quand le temps $\tau$ est très petit par rapport au temps total de transmission d'un message [28, 29].

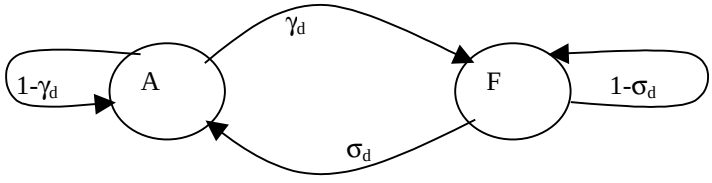



**Figure 3.2 Modèle de source data**

Quand une source de donnée passe à l'état *F*, l'utilisateur passe à l'état de contention et tente d'envoyer son premier paquet sur un slot disponible en effectuant un tirage de Bernoulli de probabilité $p_d$ (il accède sur le slot avec une probabilité $p_d$ et n'accède pas avec une probabilité 1-$p_d$ ). Quand il accède à un tel slot, il passe à un état d'attente puisque la réponse du satellite va prendre un certain délai *RTD* (c'est spécifique pour le système LEOS). Si la réponse est positive l'utilisateur passe à l'état réservation, dans le cas contraire il revient à l'état de contention. Contrairement aux utilisateurs vocaux, un paquet de donnée peut attendre un long délai dans le tampon (beaucoup plus grand que *RTD*) avant d'être envoyé correctement. Le paquet reste dans le tampon jusqu'à son acquittement positif. Dans ce cas l'utilisateur passe à l'état réservation et envoie le reste du fichier.
Puisque l'utilisateur de donnée accepte un délai, sa probabilité de permission $p_d$ doit être inférieure à la probabilité de permission des utilisateurs voix $p_v$. Une priorité est associée aux utilisateurs vocaux. Le choix de ces deux paramètres ainsi que la durée d'une trame vont être discutés dans la suite.

## *3.3 Les services*

Les classes de services sont supportées au niveau MAC par les MTCs [21] (Mac Transfer Capabilities) qui garantissent une qualité de service à chaque classe de service. Un mapping est donc nécessaire entre service et MTC. Dans ce paragraphe, on va définir les MTCs qui vont supporter les différents services demandés par les utilisateurs.
On définit deux MTCs au niveau MAC. La différence principale entre ces deux MTCs est le délai d'attente et la probabilité de perte d'un paquet. Le premier est nommé RTC (Rapid Transfer Capability) et le deuxième est nommé STC (Slow Transfer Capability).

- Le RTC doit garantir une transmission rapide de paquets générés par la source, ce qui est souhaitable pour les services temps réels. La réalisation de cette rapidité se fait sur deux niveaux ;
    - Au niveau d'appel par la fonction CAC, qui doit refuser une telle demande si elle estime que la couche MAC est incapable de garantir un temps réel.
    - Au niveau de paquet par un contrôle de trafic accompli par la couche MAC par l'intermédiaire des probabilités de permission.

  Un mapping est possible entre RTC et les services variables à temps réel qui représentent le trafic vocal. Comme exemple on note le VBRrt de l'ATM, service garanti ou service premium de l'IP et service conversationnel de l'UMTS.
- Le STC peut supporter un délai avant de transmettre un paquet mais doit garantir une probabilité de perte d'un paquet très petite. Pour garantir cette qualité de service, un nombre limité d'utilisateurs doit être accepté (fonction CAC). Le choix de la probabilité de permission est aussi un facteur important comme on va le démontrer dans la suite. Un mapping entre STC et les services variables non-temps réel est convenable. Comme exemple on note le ABR de l'ATM, service assuré ou à débit contrôlé de l'IP et le service de base de l'UMTS.

La différence entre ces deux MTCs est vue dans ce chapitre sous deux aspects ;

1. Une probabilité de permission supérieure pour les utilisateurs vocaux (RTC) et donc une priorité souple des utilisateurs vocaux par rapport aux utilisateurs data (STC). Ceci diminue l'influence des utilisateurs data sur les utilisateurs voix.

2 Un tampon pour les utilisateurs data pour stocker les paquets data en attendant une transmission réussie. Ceci est inexistant pour les utilisateurs voix. Cette technique diminue la probabilité de perte d'un paquet data.

## *3.4 La fonction CAC*

Dans ce chapitre, la fonction d'admission CAC utilisée est simple. Le rôle de cette fonction est de limiter le nombre d'utilisateurs acceptés par le système afin de garantir une qualité de service pour chaque utilisateur. Comme décrit dans le paragraphe précédent, on a deux types d'utilisateurs, RTC et STC. Le RTC est considéré comme étant temps réel et le STC comme étant non-temps réel. On suppose que tous les utilisateurs sont multiplexés ensemble sur le même canal d'accès et c'est la couche MAC qui doit partager les ressources disponibles entre les différents utilisateurs.
Au début on considère un seul type de trafic, soit la voix supportée par le RTC. Puisque les sources de trafics voix sont à débit variable, un multiplexage statistique est possible. Un slot peut être utilisé par plus qu'un utilisateur. Si le nombre de slots est de *n* et si un nombre *M* d'utilisateurs peut être accepté par la fonction CAC, le rapport *n/M* détermine le pourcentage de slots consommé par un utilisateur. Ce rapport est la base de décision de la fonction CAC. En effet, si un utilisateur demande une connexion il suffit de regarder si les ressources disponibles sont supérieures ou inférieures à *n/M*. Dans le premier cas, la demande est acceptée et dans le deuxième, la demande est refusée.
Une même fonction peut être appliquée pour les utilisateurs data supporté par le STC. Puisque ces utilisateurs sont non-temps réel, un nombre plus élevé peut être admis. Le pourcentage de slot utilisé par une source data est alors déterminé.
D'après ces pourcentages pour chaque type de trafic on peut définir la fonction CAC utilisée dans ce chapitre. Chaque fois qu'un utilisateur demande une connexion, on regarde les ressources disponibles. Si cet utilisateur est data, on compare avec le pourcentage pour les utilisateurs STC, si l'utilisateur est accepté, les ressources seront diminuées de ce pourcentage. Si cet utilisateur est voix, on compare avec le pourcentage pour les utilisateurs RTC, si l'utilisateur est accepté, les ressources seront diminuées de ce pourcentage.
Notons enfin que les pourcentages de consommation sont déterminés dans la suite du chapitre. Ainsi, il faut signaler que l'effet du handoff n'est pas pris en compte dans cette fonction. On peut toujours supposer que cette fonction est une première étape d'admission effectuée au niveau du satellite. Une deuxième étape est toujours nécessaire au niveau du centre de gestion NCC (Network Control Center) où le handoff est pris en considération.

## *3.5 Modélisation mathématique*

Dans ce paragraphe, on va modéliser le protocole S-PRMA afin d'étudier sa performance ainsi que les paramètres essentiels qui déterminent cette performance. Cette étude est basée sur le modèle développé par Nanda et Goodman dans [24] pour le PRMA terrestre. L'étude utilise la méthode d'analyse des points d'équilibre EPA (Equilibrium Point Analysis) définie par Tasaka dans [25]. Cette méthode est utilisée pour faciliter le calcul puisqu'un calcul Markovien est très complexe comme on va le démontrer. Notons qu'il n'y a pas de preuves mathématiques sur l'efficacité de l'EPA, la seule preuve étant la validation par des simulations. Répétons que la différence principale entre notre protocole S-PRMA et le PRMA classique est l'état d'attente pour un utilisateur S-PRMA dû au délai *RTD* et le fait qu'un utilisateur ne puisse tenter d'envoyer un paquet que pendant une seule trame. On présente

brièvement le modèle PRMA dans le cas des utilisateurs voix pour ensuite développer notre propre modèle de S-PRMA pour les utilisateurs voix et data.

### 3.5.1 Modèle du PRMA

Ce modèle est développé pour les utilisateurs voix et expliqué dans [24]. Un utilisateur voix de protocole PRMA est dans un des états suivants :
(Silence « Sil »), (Contention « Cont »), (Réservation du slot 1 «$Res_1$ »), (Réservation du slot 2 « $Res_2$ »),…….(Réservation du slot n « $Res_n$ »).
L'état du système Ω est donc la configuration de $n + 2$ variables :

$$\Omega = \{ S, C, R_0, R_1, \ldots\ldots, R_{n-1} \} \quad (3.11)$$

Chaque variable désigne le nombre d'utilisateurs dans l'état correspondant. Puisque le nombre d'utilisateurs en réservation du slot i est 0 ou 1 et le nombre d'états de $S$ et $C$ est $M$ (nombre total d'utilisateurs), le nombre d'états de Ω est de $2^nM^2$. Pour étudier le système avec des chaînes de Markov, il faut une chaîne à $2^nM^2$ états et de dimension n+2 qui est trop compliquée à analyser. Pour cette raison, on utilise la méthode EPA et on étudie l'état du système en équilibre ;

$$\omega = \{ s, c, r_0, r_1, \ldots\ldots, r_{n-1} \} \quad (3.12)$$

Cet ensemble représente les points d'équilibre du système. Un point d'équilibre « $x$ » dans $\omega$ représente une valeur de la variable « $X$ » dans $\Omega$ pour lequel l'état qui représente « $X$ » est en équilibre et donc le nombre d'utilisateurs qui entrent dans cet état est égal au nombre d'utilisateurs qui en sortent. « s » est par exemple, le nombre d'utilisateurs en état de silence dans le cas d'équilibre. La représentation de ce modèle est comme suit :

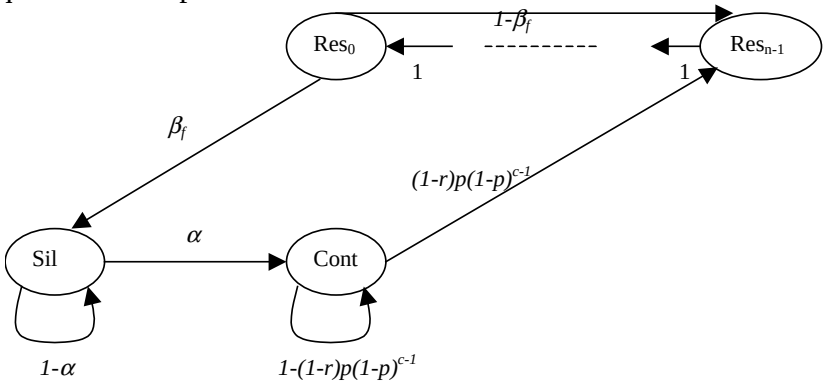



**Figure 3.3 Modèle de PRMA terrestre**

Les états de cette chaîne représentent les états d'équilibre et la technique simplifie la chaîne de n+2 dimensions en sautant directement à un état spécial de cette chaîne nommé l'état d'équilibre.
Les valeurs $\alpha$ et $\beta_f$ représentent les paramètres de la source ON-OFF (figure 3.1) dans le cas où $\tau$ est la durée de slot et de trame, respectivement. $p$ est la probabilité de permission pour les utilisateurs voix. En utilisant la propriété de l'état d'équilibre qui est ; « le nombre des entrants à un état est égal au nombre des sortants de cet état » on déduit le système d'équations pour calculer les valeurs des points d'équilibre qui sont les valeurs des variables x en équilibre. On peut donc déduire l'état stationnaire sans passer par le calcul de la matrice de transition. Les détails de calcul sont dans [24], on passe maintenant à l'étude du S-PRMA qui a ses spécificités rendants le modèle plus complexe. Le protocole S-PRMA et les études

mathématique et par simulation effectuées pour l'optimiser représentent notre contribution essentielle pour ce chapitre.

### 3.5.2 Modèle du S-PRMA

En S-PRMA un utilisateur qui passe du silence à la contention tente d'envoyer sur un tel slot puis attend le résultat de cette tentative pendant un $RTD \approx T_f$. L'utilisateur se trouve donc dans un état d'attente d'une réponse qui peut être positive ou négative. Si la réponse est positive, l'état d'attente est nommé positif, dans le cas contraire il est négatif. Un utilisateur voix de S-PRMA est alors dans un des états suivants :
(silence « Sil »), (Contention « Cont »), (réservation du slot 1 « $Res_1$ »), ……(Réservation du slot n « $Res_n$ »), (Attente positive pour le slot 1 « $Ap_1$ »,…….., (Attente positive pour le slot n « $Ap_n$»), (Attente négative pour le slot 1 « $An_1$ »),……, (Attente négative pour le slot n « $An_n$ »). L'état du système $\Omega$ est la configuration de $3n + 2$ variables

$$\Omega = \{ S, C, R_0, \ldots\ldots, R_{n-1}, A_0, \ldots\ldots; A_{n-1}, A'_0, \ldots\ldots; A'_{n-1}\} \quad (3.13)$$

« $A$ » est utilisé pour designer l'attente positive et « $A'$ » pour désigner l'attente négative.
Chaque variable désigne le nombre d'utilisateurs dans l'état correspondant. Puisque le nombre d'utilisateurs en réservation du slot i est 0 ou 1 et le nombre d'utilisateurs dans un autre état varie entre 0 et $M$ (nombre total d'utilisateurs), le nombre des états de $\Omega$ est de $2^n M^{2n+2}$. Pour étudier le système avec des chaînes de Markov, il faut une chaîne à $2^n M^{2n+2}$ états et de dimension 3n + 2 qui est trop compliqué à analyser. Pour cette raison on utilise la méthode EPA et on étudie l'ensemble d'état du système en équilibre ;

$$\omega = \{ s, c, r_0, r_1, \ldots\ldots, r_{n-1}, a_0, \ldots\ldots, a_{n-1}, a'_0, \ldots\ldots, a'_{n-1}\} \quad (3.14)$$

Cet ensemble représente les points d'équilibre du système. Un point d'équilibre dans $\omega$ « $x$ » représente une valeur de la variable dans $\Omega$ « $X$ » pour laquelle l'état qui représente « $X$ » est en équilibre et donc le nombre d'utilisateurs qui entrent dans cet état est égal au nombre d'utilisateurs qui en sortent. La représentation de ce modèle est comme suit :

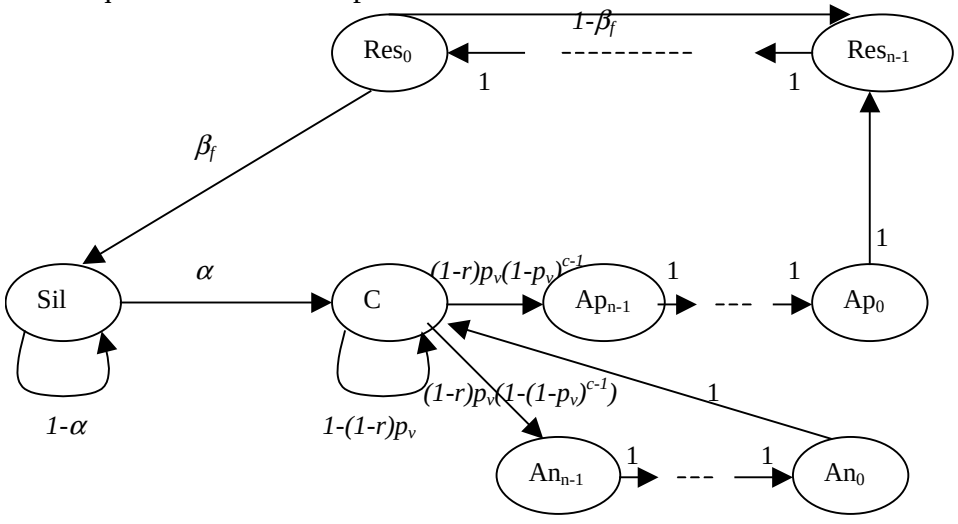



**Figure 3.4 Modèle de PRMA satellite (utilisateurs voix)**

soit $\alpha$ et $\beta$ les paramètres du modèle ON-OFF dans le cas où $\tau$ est le temps d'un slot alors:

$$\beta = 1 - \exp(-T_s / t_{on}) \quad (3.15)$$

$$\alpha = 1 - \exp(-T_s / t_{off}) \quad (3.16)$$

$\beta_f$ est la probabilité qu'un utilisateur finit un talspurt après $n$ slots ;

$\beta_f = 1 - (1 - \beta)^n \approx n\beta.$ (3.17)

Les valeurs des points d'équilibres sont calculées en utilisant la figure 3.4 et en admettant que le nombre d'utilisateurs entrants dans un état est égal au nombre d'utilisateurs sortant de cet état ;

$r_0 = r_1 = \ldots\ldots\ldots = r_{n-1} = r.$ (3.18)

$a_0 = a_1 = \ldots\ldots\ldots = a_{n-1} = a.$ (3.19)

$a'_0 = a'_1 = \ldots\ldots\ldots = a'_{n-1} = a'.$ (3.20)

$r\,\beta_f = s\,\alpha.$ (3.21)

$r\,(1 - \beta_f) + a = r.$ (3.22)

$c\,(1 - r)\,p_v\,(1-u) = a'.$ (3.23)

$c\,(1-r)\,p_v\,u = a.$ (3.24)

$s + c + n\,a + n\,a' + n\,r = M.$ (3.25)

Avec $u = (1-p_v)^{c-1}$.

Dans ce système d'équations (3.18-3.25) les variables sont les éléments de l'ensemble $\omega$ et les autres termes sont les paramètres du système.

La solution de ce système d'équations donne les valeurs des points d'équilibre. Il se peut que le système ait plusieurs solutions, ceci est en fonction de $M$ et lié à la stabilité du système. Dans [24] on prouve que PRMA terrestre peut avoir plusieurs points d'équilibre qui peuvent être stables ou non. Les points stables, qui sont en général au nombre de deux, représentent l'état normal et l'état de congestion du système. Quand le système est congestif, il faut utiliser des techniques spéciales pour retourner à l'état normal du système [30]. Dans S-PRMA ce problème ne se pose pas puisque le système ne peut pas avoir plus qu'une solution comme on va démontrer dans le paragraphe suivant.

#### *3.5.2.1 Stabilité de S-PRMA*

Le nombre d'utilisateurs en contention en équilibre $c$ est donnée par l'équation 3.26 qui résume le système (3.18-1.25) :

$f(c)\,[\beta_f / \alpha + n\,\beta_f + n] + c\,[1 + n\,p_v\,(1-u)] - n\,p_v\,(1-u)\,c\,f(c) = M.$ (3.26)

Où $f(c) = c\,p_v\,u\,/\,(\beta_f + c\,p_v\,u)$ (3.27)

D'après cette équation on détermine la valeur de $c$. Dans la figure 3.5 on trace la valeur de $c$ en fonction de $M$ pour deux valeurs de probabilité de permission ($p_v$=0.3 et $p_v$=0.5) et pour PRMA terrestre et satellitaire. Il est clair que pour le PRMA terrestre et pour quelques valeurs de $M$ on peut avoir trois solutions pour $c$, dont deux sont stable (graphe croissant [24]). Ces deux solutions représentent les deux cas efficace et congestif. Une congestion peut se produire dans PRMA terrestre et des mécanismes de résolution sont nécessaire. Pour S-PRMA ce problème ne se pose pas puisque pour les différents valeurs de la probabilité de permission, le système d'équations admet une seule solution de $c$ qui est stable (fonction croissante). La raison de cette stabilité est le fait qu'un utilisateur en S-PRMA ne puisse pas tenter d'envoyer sur plus qu'un slot dans une trame. S'il réussit à accéder à un tel slot, il doit attendre une trame pour savoir le résultat de cette tentative. Ce temps d'attente fait que le nombre de tentatives se réduit et évite des congestions possibles. C'est un des avantages de notre protocole mais qui a l'effet de diminuer l'efficacité du protocole dans le cas normal (non congestif) [27] comme on va le démonter.

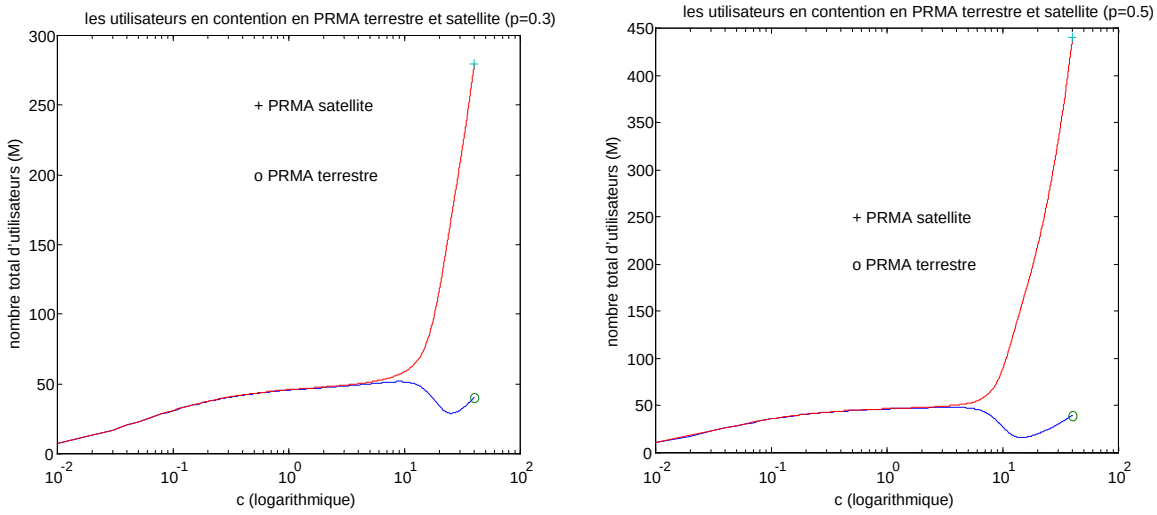



**Figure 3.5 Stabilité de PRMA terrestre et satellite**

Dans [27] les auteurs proposent un nouveau protocole pour adapter le PRMA au satellite afin d'atteindre des meilleures performances. Ce protocole appelé PRMA-HSs (Hindiring States) est basé sur le principe q'un tel utilisateur continue à faire des tentatives pendant qu'il attend la réponse du satellite. Avec ce protocole on atteint des meilleures performances mais avec le prix d'un gaspillage de ressources. On remarque que ce protocole est rapidement congestif quand le nombre d'utilisateurs augmente. Une comparaison de notre protocole et de PRMA-HS va être faite dans la suite.

### *3.5.2.2 Calcul de performance de S-PRMA (utilisateurs voix)*

On va calculer le temps qu'un paquet attend dans le tampon avant d'être envoyé ou rejeté à cause de l'expiration du temps d'attente. Ceci nous permet en deuxième lieu de calculer les paramètres de performances du protocole.

**Calcul du temps d'attente :**

si $R$ représente le nombre d'utilisateurs en réservation et $C$ représente le nombre d'utilisateurs en contention on a :

la probabilité qu'un terminal en contention obtient une réservation dans le slot en cours est :

$$\nu = ( 1 - R/n ) p_v ( 1 - p_v )^C \quad (3.28)$$

la probabilité qu'il ne tente pas sur le slot en cours est :

$$\mu = 1 - ( 1 - R / n ) p_v \quad (3.29)$$

la probabilité qu'il tente mais qu'une collision se produise est :

$$\theta = ( 1 - R / n ) p_v ( 1 - ( 1 - p_v )^C ) \quad (3.30)$$

Un nouveau paquet attend dans le tampon jusqu'à que l'utilisateur l'envoie sur un tel slot. Le temps d'attente est plus difficile à calculer en S-PRMA qu'en PRMA terrestre. Un utilisateur en contention peut passer à l'attente positive (équivalent à une réservation), à l'attente négative ou rester en contention. Quand un utilisateur passe à l'attente négative, il doit attendre $n$ slots avant de retourner à l'état de contention. Ceci augment le temps d'attente considérablement. Pour calculer la probabilité d'attente, on fait les remarques suivantes :

La probabilité d'attendre un seul slot est $\nu$ (l'utilisateur passe directement à l'état d'attente positive).

La probabilité d'attendre deux slots est $\nu\ \mu$ (l'utilisateur reste en contention pour un slot puis passe à l'attente positive).

La probabilité d'attendre *n* slots est $\nu \mu^{n-1}$ (l'utilisateur reste *n-1* slots en contention puis passe à l'attente positive).
La probabilité d'attendre *n+1* slots est $\nu \mu^{n} + \nu \theta$ (l'utilisateur reste *n* slots en contention puis passe à l'attente positive ou il fait une tentative non réussite et passe à l'attente négative, attend *n* slots dans cet état puis fait une tentative réussite).
La probabilité d'attendre *n+2* slots est $\nu \mu^{n+1} + 2 \mu \nu \theta$ (l'utilisateur reste *n+1* slots en contention puis envoie positivement ou tente négativement et reste *n* slots dans l'attente négative et un slot en contention pour enfin émettre positivement. Le facteur de 2 représente la permutation de deux faits (rester en contention) et (tenter négativement).
La probabilité d'attendre *2n + 2* slots est $\nu \mu^{2\,n+1} + f_a(n+1,2)\, \mu^{n+1}\, \nu \theta + f_a(1,3)\, \mu\, \nu\, \theta^2$. (l'utilisateur reste *2n +1* slots en contention puis envoie positivement ou reste *n+1* slots en contention et fait une tentative négative puis envoie positivement ou fait deux tentatives négatives et une contention puis transmet positivement).
La fonction $f_a(x,y)$ représente le nombre de permutations possibles des événements (y-1 tentatives négatives) et (x slots en contentions). D'où :

$$f_a(x,y) = C^{x}_{x+y-1} = (x+y-1)!/(x!\times(y-1)!).$$

La probabilité d'attendre $kn + j$ ($k \geq 0$ et $j > 0$) est alors :

$$P_w(kn+j) = \upsilon \sum_{i=0}^{k} C^{(k-i)n+j-1}_{(k-i)n+j+i-1} \mu^{(k-i)n+j-1} \theta^{i} \qquad (3.31)$$

Cette probabilité est utilisée dans la suite pour déterminer la performance du S-PRMA. On remarque que la tentative négative est la raison principale qui augmente cette probabilité et qui va diminuer la performance du système.

**Calcul des paramètres de la performance :**

Dans notre protocole, le temps maximal d'attente est une trame puisque ce temps est proche de *RTD* qui est de l'ordre de 15-20ms. Notons par *D* ce délai d'attente.
Le nombre de paquets perdus est alors une fonction du temps d'attente. Si *L* est la longueur d'un talkspurt en nombre de paquets, le nombre de paquets perdus est :

$$\begin{aligned} &n_{drop}(j) = 0 \Leftrightarrow 1 \leq j \leq D \\ &n_{drop}(j) = k \Leftrightarrow D + (k-1)n + 1 \leq j \leq D + k \\ &n_{drop}(j) = L \Leftrightarrow D + (L-1)n + 1 \leq j \end{aligned} \qquad (3.32)$$

La probabilité que dans un talkspurt de *L* paquets, *k* paquets sont perdus est :

$$\Pr(n_{drop} = k \mid L) = \begin{cases} \sum_{x=D+(L-1)\times n+1}^{\infty} p_w(x), & k = L \\ \sum_{x=D+(k-1)\times n+1}^{D+k\times n} p_w(x), & k \neq 0, L \\ \sum_{x=1}^{D} p_w(x), & k = 0 \end{cases} \qquad (3.33)$$

En utilisant l'équation : $Pr\ (talksurt = L) = \beta_f\ (1-\beta_f)^{L-1}$ (3.34)
La probabilité de perte due à un temps d'attente inacceptable et pour un *R* et *C* donnés est donc :

$$p_{drop}(\upsilon,\theta,\mu) = \beta_f \times E(n_{drop}) \tag{3.35}$$

$$\text{où } E(n_{drop}) = \sum_{L=0}^{\infty} \Pr(L) \times E(n_{drop}|L) \tag{3.36}$$

$$\text{et } E(n_{drop}|L) = \sum_{k=0}^{L} k \times \Pr(n_{drop} = k|L) \tag{3.37}$$

D'autre part, puisque dans l'état d'équilibre la probabilité qu'un slot soit réservé est *r*, la distribution des utilisateurs en réservation est :

$$\theta_R(R) = C_n^R r^R (1-r)^{n-R} \tag{3.38}$$

La distribution conditionnelle des utilisateurs en contention est basée sur la remarque que les utilisateurs entrant en contention sont indépendants des utilisateurs en sortants et sont distribués géométriquement.

$$\theta_C(C|R) = \begin{cases} p_0(1-p_0)^C, & C < m-R \\ (1-p_0)^{m-R}, & C = m-R \\ 0, & \textit{autrement} \end{cases} \quad , \quad p_0 = \frac{1}{c+1} \tag{3.39}$$

Enfin la probabilité de perte est :

$$P_{loss} = \sum_{R=0}^{n-1} \sum_{C=0}^{m-R} \theta_R(R)\theta_C(C|R) P_{drop}(\upsilon,\theta,\mu). \tag{3.40}$$

La probabilité de perte est le paramètre essentiel de la qualité de service pour les utilisateurs vocaux. Cette probabilité est une fonction des plusieurs paramètres, soit la probabilité de permission, le temps d'une trame…

Le temps d'une trame est fixé à 20ms qui est proche de $RTD+T_s$. Dans notre protocole, on va agir sur le choix de la probabilité de permission pour obtenir la performance maximale. Avant de faire cette étude, on va appliquer notre modèle mathématique conçu pour la voix sur les utilisateurs de données où l'attente est plus longue et le délai moyen dans le tampon décrit la performance du protocole.

#### *3.5.2.3 Calcul de performance de S-PRMA (utilisateurs data)*

Pour les utilisateurs data, on utilise les sources de données définies dans la figure 3.2. Dans cette figure, on a modélisé une source donnée par une source vocale dans le cas où la longueur du message à envoyer serait très grande par rapport au temps d'une trame. Les paramètres de cette source approximative sont donnés dans les équations 3.9 et 3.10. En utilisant ces paramètres on peut appliquer la méthode EPA pour les utilisateurs data. Le modèle de représentation est alors :

Avec $\alpha$' et $\beta'_f$ sont la probabilité de passer de l'attente *A* au fichier *F* pendant un temps de slot et la probabilité de passer de *F* à *A* pendant un temps de trame, respectivement. D'où :

$$\alpha' = 1-exp(-\lambda T_s) \tag{3.41}$$

$$\beta_f' = T_f / (L_b / R_s) = 1 / L_s. \tag{3.42}$$

La probabilité de permission est $p_d$, on peut alors faire le même calcul que pour les utilisateurs voix. On se contente dans ce cas de calculer la probabilité d'attente avant la réservation d'un tel slot. Cette probabilité représente la probabilité qu'un paquet attende dans le tampon un

temps donné. La valeur moyenne de ce temps peut être donc estimée. D'après l'équation 3.31, on a :

$$P_w(kn+j) = \upsilon \sum_{i=0}^{k} C_{(k-i)n+j+i-1}^{(k-i)n+j-1} \mu^{(k-i)n+j-1} \theta^i \tag{3.43}$$

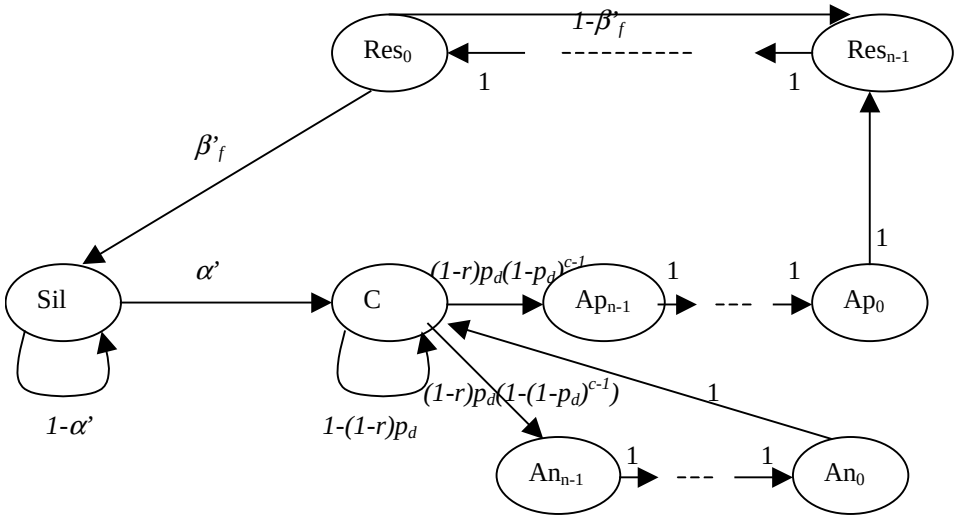



**Figure 3.6 Modèle de PRMA satellite (utilisateurs data)**

$\nu$ est la probabilité qu'un terminal en contention obtient une réservation dans le slot en cours

$$\nu = (1 - R/n)\, p_d (1 - p_d)^C \tag{3.44}$$

$\mu$ est la probabilité qu'il ne tente pas sur le slot en cours

$$\mu = 1 - (1 - R/n)\, p_d \tag{3.45}$$

$\theta$ est la probabilité qu'il tente mais qu'une collision se produise

$$\theta = (1 - R/n)\, p_d \left(1 - (1 - p_d)^C\right) \tag{3.46}$$

Dans l'état d'équilibre, la probabilité qu'un slot soit réservé est *r*, la distribution des utilisateurs en réservation est :

$$\theta_R(R) = C_n^R r^R (1-r)^{n-R} \tag{3.47}$$

La distribution conditionnelle des utilisateurs en contention est basée sur la remarque que les utilisateurs entrant en contention sont indépendants des utilisateurs en sortant et sont distribués géométriquement.

$$\theta_C(C|R) = \begin{cases} p_0 (1-p_0)^C, & C < m - R \\ (1-p_0)^{m-R}, & C = m - R \\ 0, & \textit{autrement} \end{cases} \quad , \quad p_0 = \frac{1}{c+1} \tag{3.48}$$

La probabilité d'attendre $kn + j$ slots avant de réussir une réservation est la probabilité qu'un paquet data attende $kn + j$ slots dans le tampon. Pour calculer le temps moyen d'attente pour un nombre d'utilisateurs en contention *C* et en réservation *R* on a :

$$d(R,C) = \sum_{k=0}^{\infty} \sum_{j=0}^{n-1} p_w(kn+j) \times (kn+j) \tag{3.49}$$

Et le délai moyen de séjour d'un paquet dans le tampon est :

$$d = \sum_{R=0}^{n-1} \sum_{C=0}^{m-R} \theta_R(R)\theta_C(C|R)d(R,C) \qquad (3.50)$$

Ce délai est le paramètre essentiel de QoS pour les utilisateurs data, puisque le temps que le fichier aille séjourner dans le tampon en est simplement déduit car les paquets suivants sont envoyés consécutivement sur le slot réservé avec un rythme d'un paquet par trame.

## *3.6 Discussion analytique et par simulation*

### 3.6.1 Service RTC (utilisateurs voix)

On va d'abord choisir la probabilité de permission pour les utilisateurs voix. Pour cette raison on suppose que le système ne contient que des sources vocales. Ces utilisateurs acceptés par la fonction CAC émettent leurs paquets sur le canal radio en utilisant le protocole S-PRMA. Une trame de durée 20ms contient 16 slots pour l'envoi des paquets. La bande passante sur chaque fréquence porteuse est de 155Kb/s pour permettre l'envoi d'un paquet voix sur un slot de la trame. Le débit de la source voix est supposé de 8Kb/s qui augmente à 9.6Kb/s au niveau MAC à cause des différents entêtes. Les paramètres de la source ON-OFF sont : $t_{on}$ = *1s* et $t_{off}$ = *1.35s* . Ces valeurs sont utilisées dans le calcul mathématique et la simulation.
Dans la figure 3.7 la probabilité de perte d'un paquet est tracée en fonction du nombre d'utilisateurs voix dans le système et ceci pour différentes valeurs de probabilité de permission $p_v$. On remarque que pour des valeurs basses de probabilité de permission, la perte est élevée contrairement au cas du PRMA terrestre. Ceci est dû au fait que le nombre de tentatives est limité dans PRMA satellite à cause du RTD élevé. D'autre part, lorsque cette probabilité est proche de 1, la perte augmente à cause d'un grand nombre de contentions. Un compromis est $p_v$. = 0.7 où la probabilité de perte est minimale. On remarque aussi que le choix de la probabilité de permission devient de plus en plus critique quand le nombre d'utilisateurs augmente et le canal est surchargé. Dans le cas d'une probabilité de permission de 0.7 on peut accepter jusqu'à 32 utilisateurs voix avec une QoS acceptable (perte inférieure à 1% [31]).

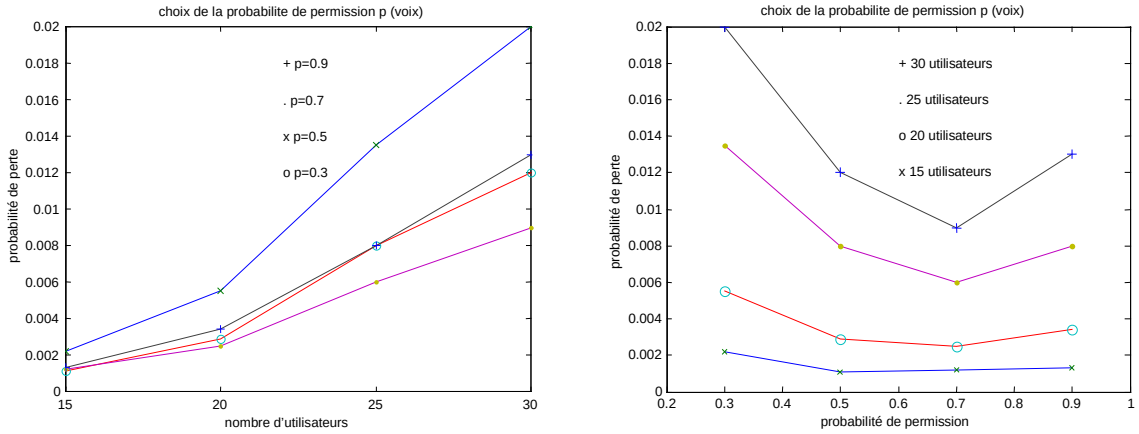



**Figure 3.7 Probabilité de perte, nombre d'utilisateurs et probabilité de permission**

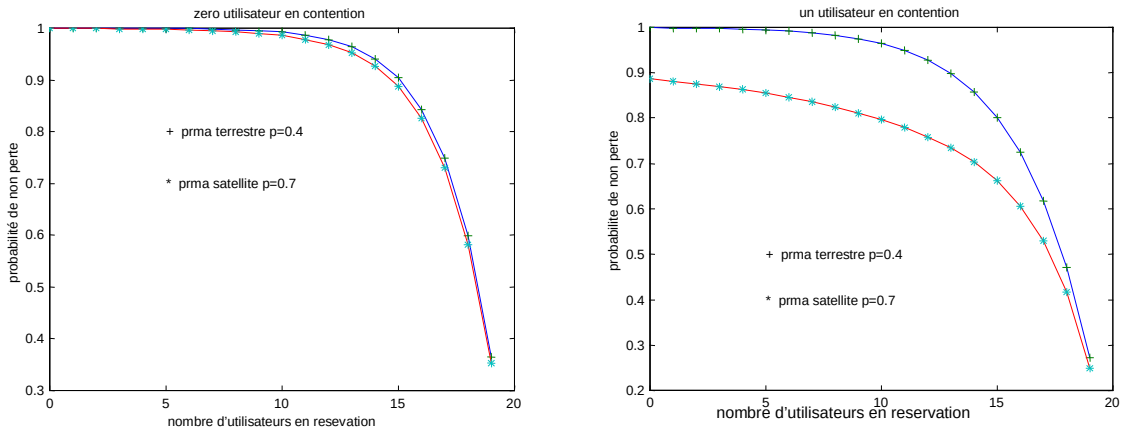



**Figure 3.8 Probabilité de non perte vs. nombre d'utilisateurs**

Dans la figure 3.8, on compare notre protocole S-PRMA avec le protocole PRMA terrestre. Le choix des probabilités de pertes est tiré de [24] pour PRMA terrestre et des discussions précédentes pour S-PRMA satellitaire. Les valeurs choisies sont 0.4 et 0.7 pour PRMA terrestre et satellite, respectivement. On remarque dans la figure 3.8 que la probabilité qu'il n'y a aucune perte des paquets est toujours inférieure en S-PRMA qu'en T-PRMA. Les deux probabilités sont presque pareilles lorsque le nombre d'utilisateurs en contention est de zéro, alors qu'elle est considérablement inférieure lorsque le nombre d'utilisateurs en contention est de un. La figure 3.9 prouve concrètement l'efficacité de T-PRMA par rapport à S-PRMA. Le nombre maximal d'utilisateurs qu'on peut accepter en système terrestre est de 36 utilisateurs, tandis qu'on ne peut accepter que 32 utilisateurs pour le système LEO. La capacité du système est donc augmentée grâce à l'utilisation de S-PRMA..
Dans cette figure on trace également des résultats de simulation qui utilisent NS (Network Simulator) comme outil de simulation, le modèle de simulation ainsi que les intervalles de confiances sont discutés dans l'appendice A. On remarque que les deux résultas (calcul et simulation) sont très proches. Ceci démontre la validité de notre étude analytique.

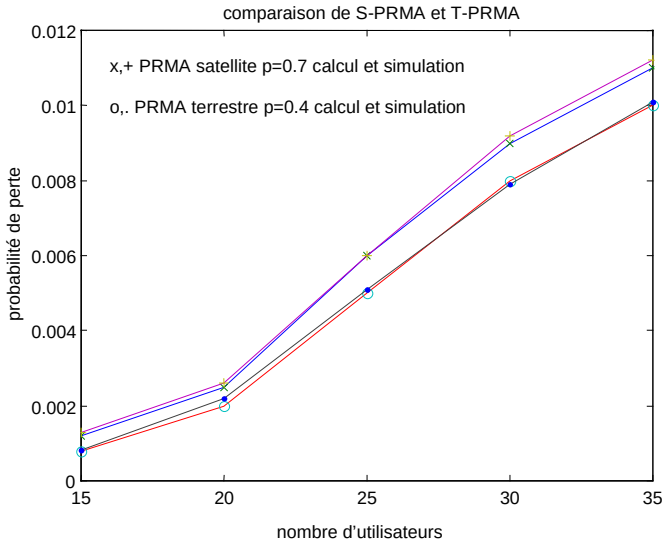



**Figure 3.9 Comparaison de S-PRMA et T-PRMA**

Calculons maintenant ce qu'on appelait le facteur de consommation par un utilisateur voix. Ce facteur est le rapport de nombre total de ressources (16 slots) sur le nombre total d'utilisateurs (32 utilisateurs). Il est donc de 0.5 slot. Ce facteur peut être utilisé par la fonction CAC.
Calculons maintenant le facteur d'efficacité de multiplexage statistique pour les utilisateurs voix. Ce facteur est le rapport entre le nombre d'utilisateurs voix acceptés par le système et ce nombre en cas de multiplexage parfait. Ce dernier est égal au nombre de slots alloués aux utilisateurs voix, divisé par le rapport d'activité des utilisateurs voix. Si $M_v$ est le nombre maximum des utilisateurs voix acceptés (32 dans notre exemple de simulation) $r_v$ est le nombre de ressources allouées aux utilisateurs voix et $\delta_v$ est le facteur d'activité (0.42 dans notre exemple de simulation).
$r_v$ représente le nombre de ressources dédiées aux utilisateurs voix. C'est le nombre d'utilisateurs voix qu'on peut accepter en mode circuit et sans l'utilisation d'une couche MAC particulière. La fonction CAC accepte dans ce cas un utilisateur si son débit maximal est disponible. Ce nombre, qui ne tient compte que de la bande passante du canal et le débit maximal de la source, est calculé par :
$r_v = BW/R = 155/8 = 19.3$.
D'où:
$\mu = M_v \times \delta_v / r_v = 0.7$
Ceci veut dire qu'un slot est utilisé 70% du temps. Ce facteur est de 0.8 pour T-PRMA.
Notons que dans [27] les auteurs ont amélioré légèrement la performance de S-PRMA en utilisant un protocole PRMA-HSs pour atteindre un facteur de multiplexage statistique de 0.73 mais avec le coût d'un risque d'instabilité comme on a démontré dans le paragraphe 3.5.2.1.

### 3.6.2 Service STC (sources data)

Passons maintenant aux utilisateurs data (sources de transfert de fichiers). Ces utilisateurs peuvent attendre une durée très longue avant d'être servi. Les paramètres de ces utilisateurs sont ( $\lambda$ = 0.5 et $L_s$ = 100 paquets), l'arrivée des messages est fréquente et la longueur d'un message est de moyen 100 paquets équivalent à 1.6secondes. Le paramètre de performance est le délai d'attente dans le tampon. La figure 3.10 présente ce délai pour différentes valeurs de probabilité de permission $p_d$. On remarque que la probabilité de permission est inférieure à celle des utilisateurs voix. Ainsi, lorsque cette probabilité est de 0.4, l'attente est élevée à cause des contentions. Par contre, lorsque cette probabilité est de 0.2, une permission au canal est rare et l'attente augmente. Un bon choix est lorsque $p_d$.= 0.3. On remarque que le choix devient de plus en plus crucial quand le nombre d'utilisateurs augmente et le canal est chargé. Ceci est dû au fait que le contrôle n'est important que lorsque la charge soit élevée.
Notons que dans cette figure, on suppose que tous les utilisateurs sont des data et que la taille de buffer est infinie. Pour cette raison, la probabilité de perte est constamment nulle. Ce résultat n'est pas très pratique puisqu'une limite de tampon est toujours nécessaire. L'intérêt de cette figure est le choix de la meilleure probabilité de permission.

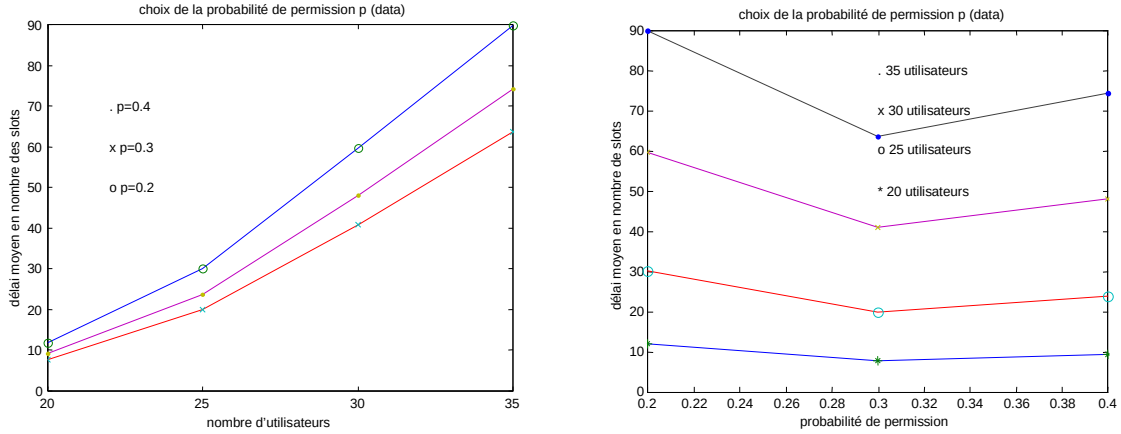



**Figure 3.10 Délai de paquet vs. nombre d'utilisateurs**

### 3.6.3 Multiplexage de services (utilisateurs voix et data)

On peut à ce stade étudier la performance du système dans le cas où les deux types de services data et voix seraient multiplexés sur le même canal. Les critères de performance sont la probabilité d'erreur qui doit être inférieur à 1% pour la voix et le délai d'attente d'un paquet data qui doit avoir une valeur raisonnable. L'étude faite dans ce paragraphe est basée sur des simulations. Le simulateur NS est utilisé pour simuler un système LEOS comme décrit dans le deuxième chapitre. Une technologie multi-faisceaux est utilisée. Dans chaque faisceau, on a 24 fréquences porteuses. Chaque fréquence a une bande passante montante égale à la bande passante descendante égale à 155Kb/s. Le G/W a une bande de 155Mb/s ainsi que la liaison inter-satellite. Les cellules utilisées au niveau MAC sont insérées dans des slots de durée 20/16 = 1.25ms. La longueur d'un paquet (cellule) peut être calculée par :155 × 1.25 = 194 soit 194 bits avec les entêtes et 160 bits sans les entêtes (qui donne aux voix le débit de 8Kb/s au niveau application et 9.6Kb/s au niveau MAC). Le modèle de simulation est présenté dans l'appendice A. Les paramètres choisis sont les paramètres d'optimisation déterminés par les calculs précédents.

Voix : $t_{on}$ = 1s, $t_{off}$ =1.35s et $p_v$ = 0.7.

Data ; $L_s$ = 100paquets, $\lambda$ =0.5 et $p_d$ = 0.3.

On va calculer la performance du protocole quand on a 20 utilisateurs voix acceptés par la fonction CAC. On détermine le nombre maximal d'utilisateurs data qu'on peut accepter avec une qualité de service acceptée pour les utilisateurs voix et pour les utilisateurs data. On compare ensuite les résultats avec le PRMA terrestre.

Dans la figure 3.11, pour 20 utilisateurs voix dans le système, on trace la probabilité de perte des paquets voix et le délai d'attente de paquets data pour différents nombres d'utilisateurs data. Ces graphes sont pour les protocoles PRMA terrestre et satellite. On remarque que la performance de PRMA en contexte satellitaire est légèrement dégradée. On peut accepter jusqu'à 13 utilisateurs data en S-PRMA et 16 en T-PRMA. Le délai d'attente d'un paquet data n'est influencé que par un supplément de *RTD*. En baissant la valeur de probabilité d'attente des utilisateurs data, on peut accepter plus des utilisateurs avec un délai d'attente plus élevé. En effet, l'influence des utilisateurs data sur les utilisateurs voix diminue et la probabilité de perte des paquets voix diminue. Une séparation totale entre les deux types de service peut être

également effectuée pour annuler l'influence d'un service sur l'autre. On a dans ce cas deux files d'attente au lieu d'une seule et le multiplexage de service est diminué. Des études plus avancées sur le multiplexage de services et l'allocation de ressources pour S-PRMA ainsi que pour des autres protocoles sont laissées pour le chapitre six.

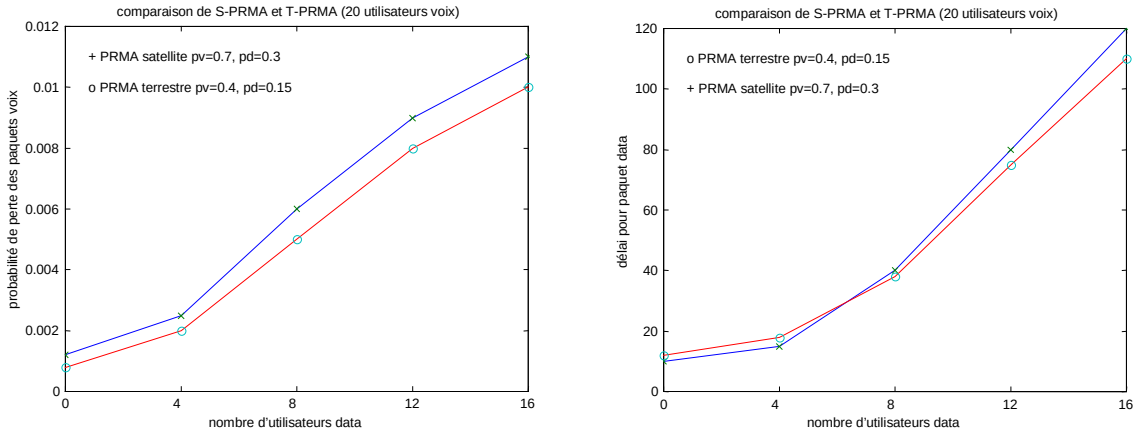



**Figure 3.11 Probabilité de perte voix et délai d'attente data (utilisateurs voix et data)**

## *3.7 Conclusion*

Dans ce chapitre, on a étudié le protocole PRMA dans le contexte de satellites LEO. L'étude nous a mené à changer le protocole original pour définir une nouvelle version appelée S-PRMA. Ce nouveau protocole est utilisé par des utilisateurs voix et donnée. Pour différencier les deux types d'utilisateurs, on a défini deux services au niveau MAC. Le RTC pour supporter les utilisateurs voix qui sont considéré comme VBRrt et le STC pour supporter les utilisateurs data qui sont considérés comme ABR. La différenciation entre ces deux services se fait sur plusieurs niveaux. Au niveau d'appel, une fonction CAC est définie pour limiter le nombre total d'utilisateurs dans le système afin de respecter la QoS de chaque service. Au niveau de paquet, la séparation se fait par une priorité donnée aux utilisateurs voix. Cette priorité est réalisée par le choix des probabilités de permission d'accès au canal pour chaque type de service. Une étude mathématique pour calculer la performance est accomplie pour le sous-système voix et pour le sous-système data. Cette étude permet le choix des probabilités de permission pour les différents utilisateurs. Une probabilité de permission de 0.7 pour les utilisateurs voix et 0.3 pour les utilisateurs data donnent des valeurs de performance optimales. Ces valeurs sont calculées dans le cas où les utilisateurs seraient homogènes. Dans le cas où les utilisateurs seraient multiplexés ensemble, l'étude mathématique devient complexe et une étude par simulation est accomplie. D'après cette étude, on calcule les valeurs de performance du système qui sont la probabilité d'erreur des paquets voix et le délai d'attente des paquets data. Le fait que la probabilité de permission des utilisateurs voix est supérieure à celle des utilisateurs data, diminue l'influence des utilisateurs data sur les utilisateurs voix mais augmente le délai de séjour d'un paquet data dans le tampon. La priorité donnée aux utilisateurs voix est souple puisque les deux probabilités de permission sont générées indépendamment. L'influence de sous-système de donnée sur celui de voix existe toujours.

La contribution essentielle de ce chapitre se résume en trois points :

1. L’adaptation du protocole PRMA au contexte satellite avec la définition de S-PRMA.
2. La modélisation mathématique de ce nouveau protocole S-PRMA.
3. L’optimisation des paramètres du protocole par calcul mathématique et simulation.
4. S-PRMA montre une performance proche de celle de T-PRMA en cas des utilisateurs voix et data. En cas de multiplexage de services, les deux systèmes sont presque identiques en terme d’efficacité ceci représente un important résultat pour les systèmes LEO.

# 4 Chapitre IV
# S-CDMA (Satellite-Code Division Multiple Access)

## *4.1 Introduction*

Dans ce chapitre, un protocole utilisant la technique d'accès CDMA est proposé dans le contexte de constellation de satellites LEO (Low Earth Orbit). Le protocole est orienté QoS et peut multiplexer plusieurs types de services sur le même canal. Les services utilisés sont la voix et le data. La voix est toujours représentées par les sources ON-OFF par contre le data est représenté par des sources de transfert des fichiers comme dans le chapitre 3 mais aussi par des sources plus complexes, représentants des sources de messages électroniques (emails). Les services multimédias mobiles vont être demandés de plus en plus par les utilisateurs mobiles. La seconde génération de réseau cellulaire est incapable de supporter des applications à haut débit. La troisième génération doit résoudre ce problème en augmentant la bande passante et en utilisant des techniques qui facilitent l'utilisation du canal. W-CDMA (Wideband CDMA) est la technique d'accès utilisé dans l'UMTS qui a pour objectifs principaux :

- L'intégration de services résidentiels, bureautiques et cellulaires dans un seul système.
- La capacité de servir plus que 50% de populations du globe.
- L'intégration avec le secteur spatial (satellite).

Le composant S-UMTS doit réaliser une couverture globale avec une QoS comparable à celle du réseau terrestre. Le réseau d'accès de S-UMTS doit se connecter avec le cœur du réseau UMTS par des interfaces spéciales. Ceci impose l'utilisation des techniques d'accès comparables en UMTS et en S-UMTS.

Il est intéressant de noter que l'utilisation du CDMA facilite l'intégration de services orientés circuits et de services orientés paquets puisque les deux techniques sont transparentes du point de vue de CDMA et on n'a pas besoin d'un protocole spécial pour les intégrer.

Ce chapitre est organisé comme suit : dans le deuxième paragraphe on présente la technique CDMA utilisée en définissant ses paramètres de performance. Le protocole S-CDMA est proposé dans le paragraphe 3 pour les deux sous-systèmes voix et data, les sources vocales sont des sources ON-OFF alors que les sources data sont soit des sources de transfert des fichiers soit des sources Emails introduites dans ce paragraphe. Les services du niveau MAC nommés MTCs (MAC Transfer Capabilities) sont élaborés dans le quatrième paragraphe. La fonction de contrôle d'admission CAC est ensuite définie dans le paragraphe 5. Le sixième paragraphe présente le contrôle général du trafic. En utilisant ces définitions on peut

développer notre contribution analytique dans le septième paragraphe et pour le sous-système voix et pour le sous-système data. Des résultats de calcul et de simulation sont présentés dans le paragraphe 8 pour définir les paramètres de performance de protocole et choisir leurs valeurs optimales qui maximisent l'efficacité du S-CDMA dans les différents cas des utilisateurs. Enfin les conclusions sont introduites dans le neuvième paragraphe.

## *4.2 La technique CDMA*

Dans [33] et [34] on suppose que la performance de CDMA est dominée par la probabilité d'erreur d'un bit BER (Bit Error Ratio). Les problèmes liés à l'acquisition des paquets sont négligés. Une approximation pour calculer l'erreur en CDMA est l'approximation standard Gaussienne (SGA Standard Gaussian Approximation) [35]. Assumons que l'interférence due à l'accès multiple (MAI Multiple Access Interference) est Gaussienne et en utilisant des récepteurs à simple corrélation, le BER ou la probabilité d'erreur d'un bit est donnée par :

$$P_e = Q(\overline{SNR}) \tag{4.1}$$

avec $$Q(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_x^{\infty} e^{-u^2/2} du \tag{4.2}$$

SNR est le rapport signal sur bruit. Si on considère la technique de séquence directe en CDMA (CDMA/DS Direct Sequence) ($\Pr\{x_j = 1\} = \Pr\{x_j = -1\} = 0.5$) où $x_j$ est un chip dans la séquence avec un longueur de code ou spreading factor *sf*, la valeur moyenne du rapport signal sur bruit (SNR) pour le paquet *i* dans le cas des puissances reçues inégales est donnée par :

$$\overline{SNR} = \sqrt{\frac{P_i}{(3sf)^{-1} \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^{K} P_k + \frac{N_0}{2T}}} \tag{4.3}$$

On considère un système avec *K* utilisateurs simultanés chacun ayant une puissance reçue $P_j$ (j=1..K). La durée d'un bit est *T* et un bruit blanc additionnel $N_0/2$. On considère un système cellulaire de *R*+1 cellules de *K* utilisateurs actifs dans chacune. Supposons qu'un contrôle de puissance parfait est utilisé de façon que dans une cellule, les puissances reçues par la station de base (satellite) sont identiques de valeur $P_0$. Dans ce cas, dans la cellule 0 on a :

$$\overline{SNR} = \sqrt{\frac{3sfP_0}{(K-1)P_0 + \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^{K} \sum_{i=1}^{R} P_{(k,i)0}}} \tag{4.4}$$

On néglige le bruit blanc et on suppose que le signal de l'utilisateur *k* dans la cellule *i* est reçu par la station de base 0 avec une puissance de $P_{(k,i)0}$. prenons maintenant le cas où l'interférence reçue par les autres cellules est proportionnelle à l'interférence totale dans la cellule considérée avec un facteur de *f*.

$$\overline{SNR} = \sqrt{\frac{3sfP_0}{(K-1)P_0 + (K-1)fP_0}} = \sqrt{\frac{3sf}{(K-1)(1+f)}} \tag{4.5}$$

Dans [7] on calcule ce rapport pour plusieurs cas de système. Dans cette thèse, on suppose que l'atténuation du signal est d'ordre 4 et donc proportionnel à la 4$^{ème}$ puissance de la

distance parcourue. D'autre part, on considère le cas de handoff souple (soft-handoff) et le rapport *f* varie entre 0.44 et 0.75 pour des déviations standards entre 0 et 10.
Si la longueur d'un paquet est de L et en utilisant un code correcteur d'erreur qui peut corriger jusqu'à *t* erreurs et si $Q_e = 1 - P_e$ est la probabilité qu'un bit est bien reçu, la probabilité de succès d'un tel paquet est :

$$Q_E(K) = \sum_{i=0}^{t} C_L^i (1-Q_e)^i (Q_e)^{L-i} \qquad (4.6)$$

et la probabilité d'erreur d'un paquet due à l'interférence est :

$$P_{error}(K) = 1 - Q_E(K) \qquad (4.7)$$

Cette probabilité détermine un facteur essentiel dans le calcul de la QoS pour une telle application. Pour expliquer le comportement de cette probabilité on prend l'exemple avec *sf* =16, *f* = 0.5, *L* = 160bits, *t* = 10, d'où la figure 4.1 qui détermine la probabilité qu'un paquet soit correctement reçu par la station de base pour différents cas de codes simultanés.

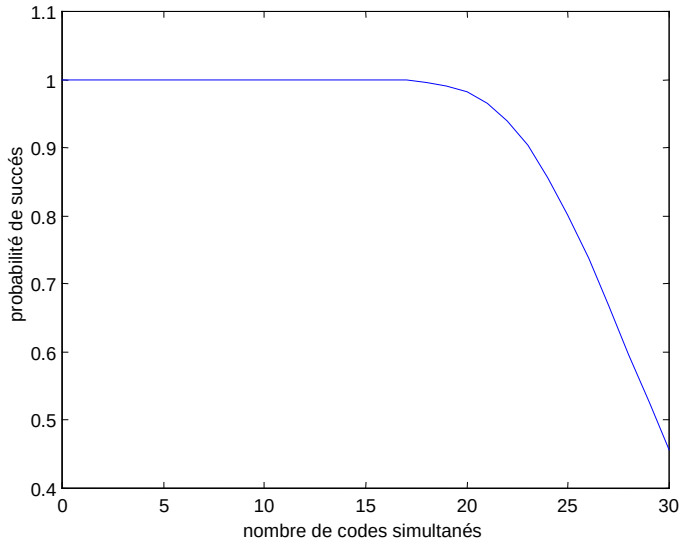



**Figure 4.1 Graphe représentatif du CDMA**

L'utilisation de cette technique par les différents services doit garantir une qualité de service bien précise pour chaque utilisateur. Ceci impose différents paramètres pour chaque type de service. Le système peut être divisé en sous-système de voix et de donnée.
Par exemple, d'après la figure 4.1 on remarque que l'erreur augmente considérablement après une limite donnée. On peut déterminer le seuil pour une qualité de service acceptable pour les utilisateurs voix et data. Une erreur inférieure à 1% est nécessaire pour les utilisateurs voix et 0.1% pour les utilisateurs data [39]. Ceci donne des seuils de 20 et 18 pour les utilisateurs voix et data, simultanément.

## *4.3 Le protocole S-CDMA*

Dans le protocole S-CDMA, le temps est divisé en trames où plusieurs utilisateurs peuvent envoyer en même temps mais sur différents codes. Un utilisateur qui voit une rafale, doit choisir un code puis envoyer ses paquets dessus. Le code peut être choisi aléatoirement ou associé à l'utilisateur lors de son entrée dans le système après avoir été accepté par la fonction CAC. Un utilisateur envoie sur ce code quand il a des paquets à transmettre. Si le nombre de

codes utilisés simultanément est très élevé, la probabilité d'erreur augmente considérablement. Il faut limiter le nombre maximal de codes utilisés simultanément. Pour cette raison, au début de chaque trame, une probabilité de permission est diffusée aux différents utilisateurs pour limiter l'accès des utilisateurs aux codes. Cette probabilité est une fonction de nombre de codes utilisés dans la trame précédente. La fonction de permission dépend de la qualité de service demandé par l'utilisateur et doit être différente pour le sous-système voix et le sous-système data. Dans le contexte de satellite, il est nécessaire de définir la fonction de permission convenable pour chacun des sous-systèmes afin d'obtenir la meilleure performance.
Notons qu'en CDMA, la collision n'est pas définie comme en TDMA. Plusieurs utilisateurs peuvent envoyer en même temps mais sur plusieurs codes sans risque de perdre les paquets envoyés. On observe plutôt une augmentation de l'interférence qui, sous une limite donnée, augmente légèrement la probabilité de perdre un paquet. Cette interférence proportionnelle au nombre d'utilisateurs simultanés augmente rapidement après un seuil donné où la probabilité de perdre de paquet devient considérable. C'est là où on parle d'une collision CDMA. On définit alors la collision comme étant le fait que le nombre d'utilisateurs simultanés dépasse la limite de la QoS pour un type de service.

### 4.3.1 Sous-système voix

Un paquet vocal est formé par des bits produits par une source voix pendant $T_f$ avec une entête de $H_v$ bits. Le canal est représenté dans ce cas par un code qui supporte un débit égal au débit de la source de voix. La notion des slots ne se pose pas dans ce cas puisqu'une trame représente un slot.
Les sources de trafic voix sont modélisées par une chaîne de Markov ON-OFF comme décrit dans le chapitre 3. A l'entrée d'un utilisateur dans le système après être accepté par la fonction de contrôle d'admission CAC, on lui associe un code CDMA qui peut être utilisé chaque fois qu'un talkspurt arrive. Ceci est possible puisque le nombre de codes dans le système est supérieur au nombre maximal de codes qui garantit une QoS acceptée et aussi au nombre d'utilisateurs acceptés (des codes PN Pseudo-Noise de nombre illimité sont utilisés [78]).
Quand la source de trafic passe de l'état OFF à l'état ON, l'utilisateur doit employer son code pour transmettre les paquets. Il se peut que le nombre total de codes utilisés soit élevé et qu'un nouveau code perturbe la qualité du canal et influence tous les autres utilisateurs. Pour cette raison, on introduit la fonction de permission $p_v(x)$ où $x$ est le nombre de codes utilisés simultanément. Un utilisateur doit faire un tirage de Bernoulli de paramètre $p_v(x)$ (il transmet avec une probabilité $p_v(x)$ et ne transmet pas avec une probabilité 1- $p_v(x)$). S'il réussit ce tirage, il transmet son paquet sur son code et attend la réponse de la station de base (satellite). Si la réponse est positive, il commence à envoyer ses paquets sur son propre code. Dans le cas contraire il doit refaire le tirage de Bernoulli.
Un paquet vocal ne peut pas attendre plus que $D_{max}$ avant d'être envoyé. Ce paramètre est comparable au temps aller-retour (*RTD*) en LEOS. Puisque l'utilisateur ne reçoit la réponse qu'après un $RTD \approx T_f$, si cette réponse est négative il ne pourra plus tenter pour le même paquet car le délai d'attente maximal $D_{max}$ est écoulé. Le paquet est donc rejeté et on essaye d'envoyer le paquet suivant, c'est la probabilité de rejet « drop » $P_{drop}$. L'autre raison de perte est l'erreur due à l'interférence des autres utilisateurs en CDMA et c'est la probabilité

d'erreur $P_{error}$. Ces deux probabilités contribuent dans la probabilité de perte d'un paquet qui est donc :

$$P_{loss} = P_{error} + P_{drop} \quad (4.8)$$

Remarquons à ce stade que ces deux probabilités sont inversement dépendantes, puisque si la fonction de permission est restrictive, les tirages de Bernoulli échouent plus souvent et le rejet des paquets augmente. Par contre, si cette fonction est généreuse, le nombre de codes utilisés simultanément augmente et la probabilité d'erreur augmente. Un cas particulier est lorsque la fonction de permission est constamment égale à « 1 », la probabilité de rejet est zéro et la probabilité de perte est similaire à la probabilité d'erreur.

Notons enfin qu'on n'a pas besoin d'un tampon pour les utilisateurs vocaux puisqu'un paquet généré est soit transmis directement soit perdu, ce qui n'est pas le cas pour le sous-système de donnée.

### 4.3.2 Sous-système de donnée

Le sous-système de donnée contient un trafic de type ABR. Les sources de data utilisés dans ce chapitre représentent les sources de fichiers et les sources de messages électroniques emails. Le modèle de fichiers est présenté dans le chapitre précédent et va être étudié analytiquement et par simulation en cas de CDMA. On s'intéresse maintenant aux sources emails qui sont beaucoup plus complexes et vont être étudiées par simulation.

Dans le générateur de trafic Email, on considère que l'utilisateur commence à envoyer plusieurs Emails, puis s'arrête pour une longue période et ainsi de suite [36, 37]. On appelle session la série des Emails envoyés pendant une période relativement courte. Dans une session, il y a plusieurs messages envoyés séparés par des intervalles de temps correspondant au temps de rédaction d'un message. Chaque message est constitué des plusieurs rafales séparées par des intervalles distribués géométriquement et la taille d'une rafale suit la distribution de Pareto tronquée.

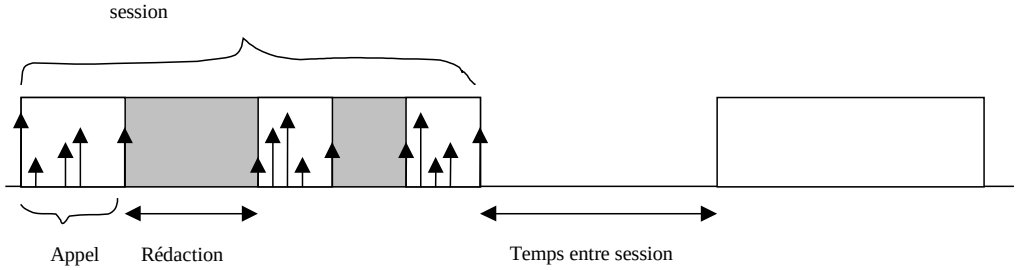



**Figure 4.2 Source de trafic Email**

Le temps entre deux sessions est exponentiel de paramètre $\lambda$, le nombre d'appel dans une session est géométrique de moyenne $N_p$, le temps de rédaction est géométrique de moyenne $T_R$ , le nombre de rafales dans un appel est géométrique de moyenne $N_b$, le temps séparant deux rafales consécutives est géométrique de moyenne $T_{sep}$. Enfin, les paramètres de distribution de Pareto sont $\alpha$ et $k$ et la longueur moyenne d'une rafale est $L_w$ paquets.

A l'arrivée d'une rafale, l'utilisateur doit envoyer les paquets sur un code donné. Il se peut que le nombre total de codes utilisés soit élevé et qu'un nouveau code perturbe la qualité du canal et influence tous les autres utilisateurs. Pour cette raison, on introduit la fonction de permission $p_d(x)$ où $x$ est le nombre de codes utilisés simultanément dans la trame précédente. Un utilisateur doit faire un tirage de Bernoulli de paramètre $p_d(x)$ (il transmet avec une

probabilité $p_d(x)$ et ne transmet pas avec une probabilité 1- $p_d(x)$). S'il réussit ce tirage, il transmet son paquet sur son code et attend la réponse de la station de base (satellite). Si la réponse est positive il commence à envoyer ses paquets sur le code. Dans le cas contraire il doit refaire le tirage de Bernoulli.
Un paquet data peut attendre longtemps avant d'être envoyé. Ce temps d'attente est beaucoup plus grand que le temps aller-retour (*RTD*) en LEOS. Un utilisateur reçoit la réponse de son paquet après *RTD* et décide de continuer la transmission ou d'attendre que le système soit moins chargé. On ne jette jamais un paquet pour échec du tirage de Bernoulli puisqu'un paquet peut attendre longtemps dans le tampon qui est supposé infini. La seule raison de perte est donc l'erreur due à l'interférence des autres utilisateurs en CDMA, c'est la probabilité d'erreur $P_{error}$. La probabilité de perte d'un paquet est donc :

$$P_{loss} = P_{error} \quad (4.9)$$

Remarquons à ce stade que le temps d'attente d'un paquet dans le tampon et la probabilité de perte sont inversement dépendantes, puisque si la fonction de permission est restrictive les tirages de Bernoulli échouent plus souvent et le séjour des paquets dans le tampon augmente. Par contre si cette fonction est généreuse le nombre de codes utilisés simultanément augmente et la probabilité d'erreur augmente.
On suppose qu'aucun retransmission est possible au niveau MAC et par suite un paquet perdu à cause d'interférence d'accès multiple CDMA est perdu. La retransmission peut se faire sur le niveau lien avec la fonction RLC (Retransmission Link Control). Pour cette raison, et puisque la probabilité de perte acceptable par le service ABR est très petite, la fonction de permission doit être très restrictive pour limiter le nombre de codes simultanés et donc la probabilité de perte. Ceci a l'inconvénient d'augmenter le temps de séjour d'un paquet data dans le tampon.

## *4.4 Les services*

Dans ce chapitre, les services définis sont analogues à ceux utilisés dans le chapitre précédant mais avec quelques améliorations. On définit deux MTCs au niveau MAC. La différence principale entre ces deux MTCs est le délai d'attente et la probabilité de perte d'un paquet. Le premier est nommé RTC (Rapid Transfer Capability) et le deuxième est nommé STC (Slow Transfer Capability).

- RTC doit garantir une transmission rapide des paquets générés par la source ; ceci est souhaitable par les services temps réels. La réalisation de cette rapidité se fait sur deux niveaux. Niveau d'appel, par la fonction CAC, qui doit refuser une telle demande si elle estime que la couche MAC est incapable de garantir un temps réel et niveau de paquet par un contrôle de trafic accompli par la couche MAC par l'intermédiaire des probabilités de permission.
  Un mapping est possible entre RTC et les services variables à temps réel qui représentent le trafic vocal. Ainsi, on cite le VBRrt de l'ATM, service garanti ou service premium de l'IP et service conversationnel de l'UMTS.
- STC peut supporter un délai avant de transmettre un paquet mais doit garantir une probabilité de perte d'un paquet très petite. Pour garantir cette qualité de service, on limite le nombre d'utilisateurs par la fonction CAC. Le choix de la probabilité de permission est aussi un facteur important comme on va le démontrer dans la suite. Un mapping entre STC et les services variables non temps réel est approprié. Ainsi, on

cite le ABR de l'ATM, service assuré ou à débit contrôlé de l'IP et le service de base de l'UMTS.

La différence entre ces deux MTCs est vue dans ce chapitre sous deux aspects ;

1 Une fonction de permission supérieure pour les utilisateurs vocaux (RTC) et donc une priorité souple des utilisateurs vocaux par rapport aux utilisateurs data (STC). Ceci diminue l'influence des utilisateurs data sur les utilisateurs voix dans le cas où les deux services seraient multiplexés.
2 Un tampon pour les utilisateurs data pour stocker les paquets data en attendant une transmission réussie. Ceci est inexistant pour les utilisateurs voix. Cette technique diminue la probabilité de perte d'un paquet data. Mais notons à ce stade qu'on n'a pas une possibilité de retransmission des paquets erronés comme dans le chapitre précédent. Ceci introduit une probabilité d'erreur pour les utilisateurs STC supérieure au cas du S-PRMA où on n'étudiait que le temps de séjour des paquets data où un nombre illimité des retransmissions garantit une probabilité de perte minime.

## *4.5 La fonction CAC*

On définit les indices de la couche MAC $K_v$ et $K_d$ comme étant les limites du nombre d'utilisateurs voix et data qui peuvent être envoyés simultanément avec une probabilité acceptable d'erreur due à l'accès multiple. Soit :

$P_{error}(k) \leq Pe_v$ $\quad \forall k \leq K_v$ pour les utilisateurs voix.

$P_{error}(k) \leq Pe_d$ $\quad \forall k \leq K_d$ pour les utilisateurs data.

$Pe_v$ et $Pe_d$ sont les valeurs maximales de probabilité d'erreur acceptée par les utilisateurs voix et data, respectivement. $P_{error}(k)$ est la probabilité d'erreur donnée par l'équation 4.7 où $k$ représente les utilisateurs voix et data. En pratique $Pe_v > Pe_d$ et donc $K_v > K_d$. Si le nombre total d'utilisateurs simultanés est $k \leq K_d$, tous les utilisateurs voix et data sont reçus avec une qualité acceptable. Si $K_d. \leq k \leq K_v$ donc parmi les $k$ paquets, les paquets vocaux ont une qualité acceptable au contraire des paquets data. Enfin, si $K_v. \leq k$ tous les utilisateurs ont une qualité de service inacceptable [38].

Par exemple, dans la figure 4.1 et avec $Pe_v = 1\%$ et $Pe_d = 0.1\%$ les indices de la couche MAC sont $K_v = 20$ et $K_d = 18$. En fait, ces deux limites peuvent être dépassées de temps en temps sans le risque d'une dégradation catastrophique de la qualité : c'est le principe de « graceful degradation ». D'après ce principe il y a toujours une probabilité de réception correcte d'un paquet pour tout nombre d'utilisateurs simultanés. Ce principe change le principe de collision en CDMA et le rend plus souple [40,44,45].

Ces indices ne sont pas les seuls facteurs qui déterminent les limites pour la fonction CAC mais ils sont essentiels pour déterminer les seuils de contrôle de trafic de la fonction de permission. Pour la fonction CAC, l'activité des différents utilisateurs, leurs qualités de service ainsi que la probabilité de drop jouent des rôles fondamentaux [45,46]. D'autre part en CDMA, les différents utilisateurs s'influencent entre eux et pour cette raison, on doit minimiser cette influence afin de respecter la qualité de service de chaque utilisateur.

La fonction CAC utilisée dans ce chapitre est orientée QoS. On accepte un utilisateur si on estime qu'il ne va pas dégrader la QoS des autres utilisateurs et si on peut respecter sa qualité demandée. Les deux services voix et data sont représentés au niveau MAC par le RTC et STC, respectivement.

Un utilisateur RTC qui demande une connexion est accepté si la partie de ressource qu'il consomme est disponible. Dans le cas positif, on accepte l'utilisateur et l'ensemble de

ressources est diminué de cette quantité. La détermination de cette quantité va être évaluée par le calcul et la simulation.
De même, un utilisateur STC qui demande une connexion, est accepté si la partie de ressource qu'il consomme est disponible. Dans le cas positif, l'ensemble de ressources est diminué de cette quantité. La détermination de cette quantité va être évaluée par simulation pour les modèles des Emails qui sont très complexes à étudier analytiquement. L'étude analytique est possible pour les modèles de transfert de fichier.

## *4.6 Le contrôle de trafic*

Le contrôle de trafic est réalisé en CDMA par la fonction de permission afin d'ajuster le nombre total d'utilisateurs simultanés. Le contrôle doit prendre en compte la qualité de service demandée [43]. Donc, une fonction de permission est associée à chaque type de service. Pour les utilisateurs voix, la fonction doit respecter une perte maximale générée par des erreurs et des rejets. Le but est d'obtenir une capacité maximale tout en respectant la QoS. D'autre part, pour les utilisateurs data, il faut respecter une probabilité d'erreur limite ainsi qu'un délai moyen raisonnable. Notons que lorsque tous les utilisateurs sont multiplexés ensemble, les fonctions de permission pour chaque service doivent garantir une priorité pour un type de service qui est le RTC (voix) par rapport à STC (data).
Pour les utilisateurs voix, un nouveau talkspurt perd un paquet chaque fois qu'il échoue son tirage de Bernoulli. Pour cette raison, la permission doit être élevée. La fonction choisie doit être très généreuse quand le nombre d'utilisateurs qui transmettent simultanément est bas. Cette fonction a le rôle de limiter le nombre total d'utilisateurs sur le canal par une limite de contrôle $S_v$ après laquelle aucun accès n'est permis. La fonction généralisée peut être écrite comme suit :

$$P_v(x) = \begin{matrix} 1 & x < S_v \\ 0 & x \geq S_v \end{matrix} \quad \text{(CDMA avec limite)}$$

La limite $S_v$ est à déterminer afin d'obtenir l'efficacité maximale du protocole. Notons que si cette limite est infinie, un utilisateur peut toujours envoyer sur un code pour transmettre ses paquets, c'est le CDMA classique.

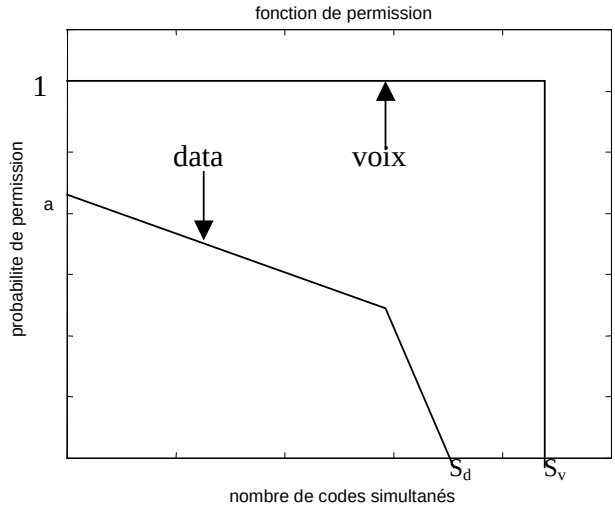



**Figure 4.3 Fonction de permission pour voix et data**

Pour les utilisateurs data, une nouvelle rafale qui échoue son titage de Bernoulli pose ses paquets dans le tampon en attendant une réservation de code. Ces paquets ne sont pas perdus mais leur délai d'attente augmente. Par contre, au niveau MAC, un paquet envoyé ne peut pas être retransmis s'il est perdu à cause d'une interférence. Pour cette raison, la fonction de permission doit être très restrictive pour les utilisateurs data. On représente cette fonction dans la figure 4.3. Cette figure est très générale et utilisée pour introduire l'idée de contrôle des utilisateurs data et voix.
La fonction de contrôle pour le data utilise plusieurs paramètres ; la permission à zéro (a), l'angle d'inclinaison, le point de déviation et le point de zéro qui est la limite de contrôle pour les utilisateurs data ($S_d$). Ces paramètres doivent être choisis pour obtenir la meilleure performance.

## *4.7 Modélisation mathématique*

Dans ce paragraphe on va modéliser le protocole S-CDMA mathématiquement afin de pouvoir déterminer les paramètres essentiels qui déterminent sa performance. L'étude est basée sur le processus de Markov et consiste à déterminer l'état stationnaire du système en passant par sa transition d'un état à un autre. Après avoir calculé son comportement en équilibre, on peut mesurer les différents paramètres de performance. Cette étude faite pour les utilisateurs voix et data nécessite plusieurs simplifications pour pouvoir effectuer le calcul. Notons que les simplifications sont ensuite justifiées à l'aide d'une simulation complète du système en utilisant le simulateur NS (Network Simulator voir Appendice A). Enfin l'étude mathématique est faite pour chaque type de service à part, puisqu'il est trop compliqué de l'effectuer pour le multiplexage de service.

### 4.7.1 Sous-système voix

Le sous-système voix est constitué des sources ON-OFF qui essayent d'envoyer sur un code chaque fois qu'un talkspurt arrive. L'accès au canal se fait par le tirage de Bernoulli de paramètre $p_v(x)$. Un utilisateur qui réussit ce tirage réserve le code utilisé si le nombre de codes utilisés simultanément est inférieur à $S_v$. Dans le cas contraire l'utilisateur doit retenter. La figure 4.4 représente ce protocole.
Dans cette figure $M_v$ utilisateurs voix sont acceptés par la fonction CAC, ces utilisateurs sont présents et passent de la parole au silence avec les paramètres suivants.

$$\sigma_v = 1-exp(-T_f/t_{on}) \quad (4.10)$$

$$\gamma_v = 1-exp(-T_f/t_{off}) \quad (4.11)$$

Supposons que $Y_n$ est le nombre de codes utilisés pendant la trame $n$. Si les utilisateurs entrants et sortants sont les utilisateurs qui utilisent et libèrent un code simultanément, on a :
$Y_{n+1} = Y_n$ + (utilisateurs entrants de $M_v$- $Y_n$ *OFF* sources) - (utilisateurs sortants de $Y_n$ *ON* sources).
Le nombre d'utilisateurs entrants est indépendant de nombre de codes avant $n$ et de même le nombre d'utilisateurs sortants. Ceci est dû au fait que les sources ON-OFF sont sans mémoire. $Y_n$ est donc une chaîne de Markov supposée homogène [29].
La matrice de transition est définie par la probabilité de transition de l'état $x$ vers l'état $y$. C'est la probabilité que le nombre de codes utilisés simultanément passe de $x$ codes dans la trame $n$ à $y$ codes dans la trame $n$+1.

$$P_{xy} = \Pr\{Y_{n+1} = y | Y_n = x\} = \Pr\{Y_n + NI_e - NI_s = y | Y_n = x\} = \Pr\{x + NI_e - NI_s = y | Y_n = x\}$$
$$= \sum_a \Pr\{(NI_e = a | Y_n = x) \cap (NI_s = a - y + x | Y_n = x)\} \quad (4.11)$$

$NI_e$ et $NI_s$ représentent le nombre d'utilisateurs entrants et sortants pendant la trame $n$, respectivement.

$$x \geq y \qquad P_{xy} = \sum_{a=0}^{y} \Pr\{NI_e = a | Y_n = x\} \times \Pr\{NI_s = a - y + x | Y_n = x\}$$
$$x < y \qquad P_{xy} = \sum_{a=y-x}^{y} \Pr\{NI_e = a | Y_n = x\} \times \Pr\{NI_s = a - y + x | Y_n = x\} \quad (4.12)$$

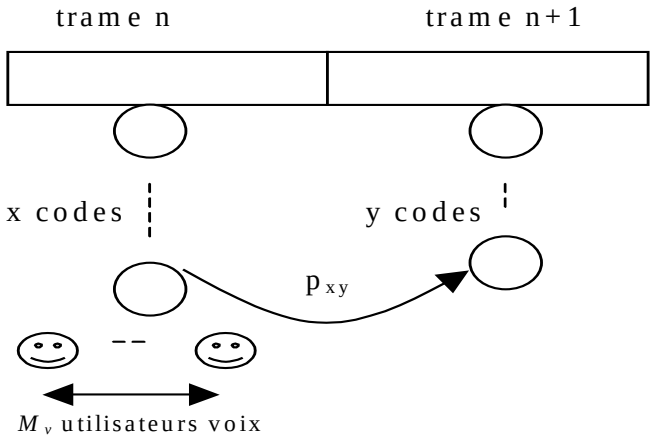



**Figure 4.4 Modèle des utilisateurs voix**

Les utilisateurs entrent dans le canal en provenance de deux ensembles. Le premier est l'ensemble des utilisateurs qui passent de l'état OFF à l'état ON pendant la trame précédente et le deuxième contient les utilisateurs qui passaient à l'état ON dans les trames antérieures mais qui échouaient leurs tirages de Bernoulli jusqu'à l'instant présent. Calculons le nombre moyen d'utilisateurs dans le second ensemble pour approcher l'effet de cet ensemble sur le comportement du canal. Ceci est une première simplification.

Prenons la ième trame qui précède notre trame en considération. Si $h$ représente le nombre d'utilisateurs sur cette trame, le nombre moyen d'utilisateurs arrivants sur cette trame est $\gamma_v(M_v - h)$.

Un utilisateur tente d'accéder sur le canal avec une probabilité $P_v(h)$, donc le nombre d'utilisateurs qui échouent leur tirage est :

$$W_i(h) = \gamma_v(M_v - h)[1 - p_v(h)]^i \quad (4.13)$$

Pour un nombre donné d'utilisateurs ON, la population de cet ensemble est :

$$W(h) = \sum_{i=1}^{\infty} W_i(h) = \sum_{i=1}^{\infty} \gamma_v(M_v - h)[1 - p_v(h)]^i = \frac{\gamma_v(M_v - h)[1 - p_v(h)]}{p_v(h)} \quad (4.14)$$

En utilisant la probabilité qu'il y a $h$ utilisateurs dans les trames précédentes comme étant :

$$\Pr(Y = h) = C_{M_v}^h \pi_{on}^h \pi_{off}^{M_v - h} \quad (4.15)$$

le nombre moyen d'éléments de cet ensemble est :

$$\overline{W} = E(W(h)) = \sum_{h=0}^{M_v} \Pr(Y = h) W(h). \tag{4.16}$$

En utilisant ce résultat, on peut calculer la probabilité d'avoir *a* utilisateurs entrants dans le canal comme suit :

$$\Pr(NI_e = a | Y_n = x) = \sum_{t=a-\overline{W}}^{M_v - x} \Pr\{(NI_e = a | NT_e = t) \cap (NT_e = t | Y_n = x)\} = \sum_{t=a-\overline{W}}^{M_v - x} \Pr(NI_e = a | NT_e = t) \times \Pr(NT_e = t | Y_n = x) \tag{4.17}$$

Avec $NT_e$ est le nombre total d'utilisateurs qui passent à l'état ON pendant la trame et qui vont faire des tirages de Bernoulli :

$$\Pr(NT_e = t | Y_n = x) = C^t_{M_v - x - \overline{W}} \gamma_v^t (1 - \gamma_v)^{M_v - x - \overline{W} - t} \tag{4.18}$$

$NI_e$ sera le nombre d'utilisateurs qui réussissent leur tirage, venants de $(t + E(w))$ utilisateurs :

$$\Pr(NI_e = a | NT_e = t) = C^a_{t+\overline{W}} [p_v(x)]^a [1 - p_v(x)]^{t+\overline{w}-a} \tag{4.19}$$

Calculons maintenant la probabilité pour les utilisateurs sortants du canal. Ce sont les utilisateurs qui quittent la trame *n* soit parce que l'utilisateur passe à l'état OFF, soit parce que le nombre de codes dépassent la limite de contrôle $S_v$ qui peut être égale à l'indice de la couche MAC pour les utilisateurs voix. Suivant la valeur de *x* on a trois cas :

$$\begin{aligned}
&si \quad x \le S_v \qquad \Pr\{NI_s = a - y + x | Y_n = x\} = C_x^{a-y+x} \times \sigma_v^{a-y+x} \times (1-\sigma_v)^{y-a} \\
&si \quad (x > S_v) \& (y \le S_v) \Rightarrow a = 0, \quad \Pr\{NI_s = x - y | Y_n = x\} = C_{S_v}^{S_v - y} \times \sigma_v^{S_v - y} \times (1-\sigma_v)^y \\
&si \quad (x > S_v) \& (y > S_v) \Rightarrow a = 0, \quad \Pr\{NI_s = x - y | Y_n = x\} = 0.
\end{aligned} \tag{4.20}$$

D'après ces résultats, on peut déterminer la probabilité de transition de l'état *x* vers l'état *y*, et alors la matrice de transition de cette chaîne de Markov à $M_v$ états (le symbole $\lfloor\ \rfloor$ représente une matrice) :

$$\lfloor P \rfloor = \lfloor P_{xy} \rfloor_{\substack{0 \le x \le M_v \\ 0 \le y \le M_v}} \tag{4.21}$$

d'après cette matrice on peut calculer les probabilités d'état stationnaire du canal en utilisant le système d'équations :

$$\begin{aligned}
&\lfloor \pi \rfloor \times \lfloor P \rfloor = \lfloor \pi \rfloor \\
&\sum_k \pi_k = 1
\end{aligned} \tag{4.22}$$

$\pi_k$ est la probabilité qu'il y a *k* utilisateurs sur le canal en état stationnaire. Cette probabilité détermine la distribution des utilisateurs sur le canal et permet de calculer la probabilité de perte due à l'erreur d'interférence CDMA ainsi que le drop à cause des expériences de Bernoulli échoués.

La probabilité d'erreur due à l'interférence en CDMA quand *k* codes simultanés utilisent le canal est $(1-Q_E(k))$. La probabilité d'erreur en état stationnaire est donc :

$$P_{error} = \sum_{k=0}^{M_v} \pi_k \times (1 - Q_E(k)) \tag{4.23}$$

D'autres paquets sont perdus à cause de rejet chaque fois qu'un tirage de Bernoulli est échoué. Si *k* utilisateurs envoient simultanément sur le canal, un nouvel utilisateur échoue son tirage avec une probabilité *( 1 – $p_v$(k) )* d'où :

$$\upsilon = \upsilon(k) = 1 - p_v(k) \tag{4.24}$$

La probabilité qu'un utilisateur attende *j* trames avant d'être servi est alors :

$$P_w(j) = (1-\upsilon)\upsilon^{j-1} \tag{4.25}$$

Dans notre protocole, le temps maximal d'attente est une seule trame qui est proche de *RTD*. Notons par *D* (*D* =1 dans notre étude) ce délai d'attente en nombre de trames.

Le nombre de paquets perdus est alors une fonction du temps d'attente. Si *L* est la longueur d'un talkspurt en nombre de paquets, le nombre de paquets perdus est :

$$n_{drop}(j) = \begin{cases} 0 & si \quad 1 \le j \le D \\ k & si \quad D + (k-1)n + 1 \le j \le D + k \\ L & si \quad D + (L-1)n + 1 \le j \end{cases} \tag{4.26}$$

La probabilité que *k* paquets sont perdus dans un talkspurt de *L* paquets est :

$$\Pr(n_{drop} = k \mid L) = \begin{cases} \sum_{x=D+(L-1)\times n+1}^{\infty} p_w(x), & k = L \\ \sum_{x=D+(k-1)\times n+1}^{D+k\times n} p_w(x), & k \neq 0, L \\ \sum_{x=1}^{D} p_w(x), & k = 0 \end{cases} \tag{4.27}$$

La probabilité de perte due à un temps d'attente inacceptable et pour un nombre de codes simultanés *k* est :

$$E(n_{drop} \mid L) = \sum_{k=0}^{L} k \times \Pr(n_{drop} = k \mid L) = \upsilon^D \frac{1-\upsilon^L}{1-\upsilon} \tag{4.28}$$

En utilisant l'équation : *Pr (talksurt = L ) =* $\sigma_v$ *( 1-* $\sigma_v$ *)*$^{L-1}$ (4.29)

$$E(n_{drop}) = \sum_{L=0}^{\infty} \Pr(L) \times E(n_{drop} \mid L) = \frac{\upsilon^D}{1-(1-\sigma_v)\upsilon} \tag{4.30}$$

Enfin la probabilité de drop pour un nombre donné de codes sur le canal *k* est:

$$P_{drop}(k) = \sigma_v \frac{\upsilon^D}{1-(1-\sigma_v)\upsilon} \tag{4.31}$$

et la probabilité de drop totale sera donnée par :

$$P_{drop} = \sum_{k=0}^{M_v} \pi_k P_{drop}(k) \tag{4.32}$$

La probabilité de perte d'un paquet est :

$$P_{loss} = P_{error} + P_{drop} \tag{4.33}$$

Cette probabilité est le paramètre significatif qui décrit la QoS offerte pour les utilisateurs voix. Cette QoS est définie dans les normes ainsi que dans le contrat du service voix. Une perte inférieure à 1% est exigée. En utilisant cette valeur, on déterminera dans la suite les

différents facteurs qui influencent cette perte pour déterminer leurs valeurs optimales qui maximisent la capacité du canal. Avant de passer au calcul, étudions la performance du protocole pour les utilisateurs data représentés dans le modèle analytique par des sources de transfert de fichiers.

### 4.7.2 Sous-système de data

Le sous-système de data étudié analytiquement contient des sources de trafic qui ont une arrivée Poissonienne de paramètre $\lambda$ et des rafales de longueur géométrique de moyenne $L_s$ paquets. Dans le chapitre 3 on a démontré que ce système peut être modélisé par un système ON-OFF de paramètre

$\gamma_d = 1-exp(-\lambda T_f)$ (4.34)

$\sigma_d = T_f / (L_b / R_s) = 1 / L_s$. (4.35)

$R_s$ est le débit de la source de trafic dans l'état d'émission et est égal à la bande passante d'un code en CDMA. $L_s$ est donc le nombre moyen de paquets dans une rafale. En utilisant ces valeurs, on peut déterminer le comportement du canal en état stationnaire. Si $M_d$ utilisateurs data sont accepté par la fonction CAC, le sous-système data est modélisé par :

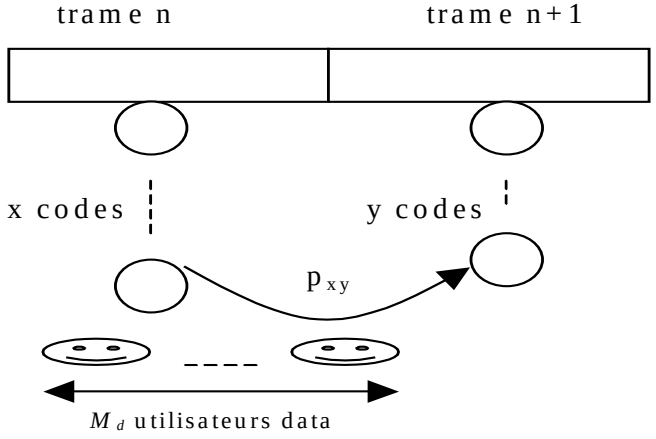



**Figure 4.5 Modèle des utilisateurs data**

A la différence des utilisateurs voix, un utilisateur data qui reçoit une nouvelle rafale doit effectuer un tirage avec la fonction de permission $p_d(x)$, et le paquet doit attendre un tirage réussi pour être envoyé. Aucun paquet n'est alors rejeté et la seul cause de perte est l'erreur due à l'interférence. Pour calculer la distribution des utilisateurs dans l'état stationnaire, on procède de la même façon que les utilisateurs voix mais avec les nouveaux paramètres. On obtient :

$$W_i(h) = \gamma_d (M_d - h)[1 - p_d(h)]^i \Rightarrow \quad (4.36)$$

$$W(h) = \sum_{i=1}^{\infty} W_i(h) = \sum_{i=1}^{\infty} \gamma_d (M_d - h)[1 - p_d(h)]^i = \frac{\gamma_d (M_d - h)[1 - p_d(h)]}{p_d(h)} \quad (4.37)$$

Avec

$$\Pr(Y = h) = C_{M_d}^h \pi_{on}^h \pi_{off}^{M_d - h} \Rightarrow \quad (4.38)$$

$$\overline{W} = E(W(h)) = \sum_{h=0}^{M_d} \Pr(Y = h) W(h) \quad (4.39)$$

en utilisant ce résultat on peut calculer la probabilité que *a* utilisateurs entrent dans le canal comme suit :

$$\Pr(NI_e = a \mid Y_n = x) = \sum_{t=a-\overline{W}}^{M_d - x} \Pr\left\{(NI_e = a \mid NT_e = t) \cap (NT_e = t \mid Y_n = x)\right\} = \sum_{t=a-\overline{W}}^{M_d - x} \Pr(NI_e = a \mid NT_e = t) \times \Pr(NT_e = t \mid Y_n = x) \quad (4.40)$$

avec

$$\Pr(NT_e = t \mid Y_n = x) = C^{t}_{M_d - x - \overline{W}} \gamma_d^t (1-\gamma_d)^{M_d - x - \overline{W} - t} \quad (4.41)$$

$$\Pr(NI_e = a \mid NT_e = t) = C^{a}_{t+\overline{W}} [p_d(x)]^a [1 - p_d(x)]^{t+\overline{w}-a} \quad (4.42)$$

Calculons maintenant la probabilité des utilisateurs sortants du canal. C'est les utilisateurs qui quittent la trame *n* soit parce que l'utilisateur passe à l'état OFF, soit parce que le nombre de codes dépasse la limite de contrôle $S_d$ qui peut être égale à l'indice de la couche MAC pour les utilisateurs data. D'où :

$$\begin{aligned} &si \quad x \le S_d \qquad \Pr\{NI_s = a - y + x \mid Y_n = x\} = C_x^{a-y+x} \times \sigma_d^{a-y+x} \times (1-\sigma_d)^{y-a} \\ &si \quad (x > S_d) \& (y \le S_d) \Rightarrow a = 0, \quad \Pr\{NI_s = x - y \mid Y_n = x\} = C_{S_v}^{S_v - y} \times \sigma_d^{S_v - y} \times (1-\sigma_d)^{y} \\ &si \quad (x > S_d) \& (y > S_d) \Rightarrow a = 0, \quad \Pr\{NI_s = x - y \mid Y_n = x\} = 0. \end{aligned} \quad (4.43)$$

D'après ces résultats, on peut déterminer la probabilité de transition de l'état *x* vers l'état *y*, et alors la matrice de transition de cette chaîne de Markov à $M_d$ états :

$$\lfloor P \rfloor = \lfloor P_{xy} \rfloor_{\substack{0 \le x \le M_d \\ 0 \le y \le M_d}} \quad (4.44)$$

d'après cette matrice on peut calculer les probabilités d'état stationnaire du canal en utilisant le système d'équation :

$$\begin{aligned} &\lfloor \pi \rfloor \times \lfloor P \rfloor = \lfloor \pi \rfloor \\ &\sum_k \pi_k = 1 \end{aligned} \quad (4.45)$$

La probabilité d'erreur due à l'interférence en CDMA quand *k* codes simultanés utilisent le canal est $(1\text{-}Q_E(k))$. La probabilité d'erreur en état d'équilibre est donc :

$$P_{error} = \sum_{k=0}^{M_d} \pi_k \times (1 - Q_E(k)) \quad (4.46)$$

Cette probabilité est égale à la probabilité de perte puisqu'on considère que la probabilité de drop est zéro.

$$P_{loss} = P_{error} \quad (4.47)$$

D'autre part, un paquet doit attendre dans le tampon avant d'être servi, le temps d'attente est défini comme étant le temps entre l'arrivé du paquet et sa transmission via un code CDMA. La valeur moyenne de ce temps est un facteur important pour décrire la QoS des utilisateurs data.

En état stationnaire la probabilité qu'un paquet attende *m* trames est donnée par :

$$\Pr(d=m)=\left[\sum_{i=0}^{M_d}\pi_i\times(1-p_d(i))\right]^{m-1}\times\left[\sum_{i=0}^{M_d}\pi_i\times p_d(i)\right]=\nu^{m-1}\times\omega. \quad (4.48)$$

Le premier facteur représente la probabilité d'échec d'un tirage de Bernoulli dans les différents cas de nombre de codes simultanés. Le deuxième est la probabilité de succès.
La valeur moyenne de ce délai est donc :

$$d=\sum_{m=0}^{\infty}\Pr(d=m)\times m=\sum_{m=0}^{\infty}\nu^{m-1}\times\omega\times m=\frac{\omega}{(1-\nu)^2} \quad (4.49)$$

Ce délai est une fonction de la probabilité de permission pour les utilisateurs data. Si cette permission augmente, le délai diminue mais la probabilité de perte augmente. L'essentiel est de trouver un compromis entre le délai d'attente et la probabilité d'erreur tout en maximisant la capacité du système [42,43].
Notons que cette étude, faite pour les sources de transfert de fichiers, va être validée par des simulations qui justifient les simplifications faites sur le modèle. Les autres sources d'Email ne sont étudiées que par des simulations ainsi que le multiplexage des utilisateurs voix et data.

## *4.8 Discussions analytiques et par simulation*

Dans ce paragraphe, on va étudier la performance du protocole S-CDMA pour différents types d'utilisateurs. On étudie en première étape chaque service à part pour déterminer les paramètres optimaux dans le cas des utilisateurs identiques (que des voix ou que des data). En seconde étape, on mélange les différents utilisateurs dans le même sceau et on calcule la performance du système. On remarque que les sources de trafic sont hétérogènes dans ce dernier cas, ainsi que la qualité de service demandée. La capacité totale du système est mesurée et maximisée. La fonction de permission joue un rôle essentiel dans cette capacité et doit être choisie pour avoir une capacité maximale tout en respectant la QoS demandée par les différentes applications représentées dans la couche MAC par deux MTCs ; le RTC (Rapid Transfer Capability) et le STC (Slow Transfer Capability).
Le simulateur NS est utilisé pour simuler un système LEOS comme décrit dans le deuxième chapitre. Une technologie multi-faisceaux est utilisée. Dans chaque faisceau on a 24 fréquences porteuses. Chaque fréquence a une bande passante montante égale à la bande passante descendante égale à 155Kb/s. Le G/W a une bande de 155Mb/s ainsi que la liaison inter-satellite. Les cellules utilisées au niveau MAC sont insérées dans des trames de durée 20ms. la longueur d'un paquet (cellule) peut être calculée par :$(155 \times 20)$ /$sf$ = 194 soit 194 bits avec les entêtes et 160 bits sans les entêtes (qui donne aux voix le débit de 8Kb/s au niveau application et 9.6Kb/s au niveau MAC).

### 4.8.1 Le RTC (utilisateurs voix)

Pour les utilisateurs voix, le problème essentiel à résoudre est le choix de la fonction de permission qui permet l'acceptation d'un maximum d'utilisateurs avec une qualité de service représenté essentiellement par une probabilité de perte inférieure à 1% et un temps réel de transmission réalisé par un temps d'attente maximal d'une seule trame 20ms.
Les paramètres utilisés pour les sources ON-OFF sont décris dans [41] et résumés par :
Le temps moyen de parole est de $t_{on}$ = 1 seconde.
Le temps moyen de silence est de $t_{off}$ = 1.35 secondes
La limite de QoS est alors : $K_v = \max(k \mid P_{error}(k) \le 1\%) = 20$

Les deux fonctions à comparer sont une fonction sans limite et qui représente le CDMA classique et une deuxième qui a l'indice de la couche MAC comme limite.

$p_v(x) = f1(x) = 1 \quad \forall x$ (CDMA classique)

$$p_v(x) = f2(x) = \begin{matrix} 1 & x < K_v \\ 0 & x \geq K_v \end{matrix}$$ (CDMA avec limite $S_v = K_v$).

Les autres possibilités des fonctions sont exclues puisqu'on remarque que la perte devient rapidement inacceptable dès que la fonction diminue. D'autre part, les comparaisons faites dans cette section donnent des résultats pour le cas d'utilisateurs identiques et ne peuvent pas être généralisés dans le cas de multiplexage de services où des simulations sont utilisées pour décrire le système.

Pour le CDMA classique, il n'y a pas de limite sur l'accès au canal et un utilisateur qui a besoin d'envoyer des paquets utilise un code immédiatement. Ceci est représenté par la première fonction de permission (*f1*) et a l'effet d'augmenter le nombre d'utilisateurs simultanés et donc le nombre de codes actifs. L'interférence CDMA augmente et aussi la probabilité d'erreur, mais la probabilité de drop est absolument zéro. Dans la figure 4.6, on représente la distribution des utilisateurs en calculant les codes actifs sur le canal. Quand le nombre d'utilisateurs passe de 25 à 40, les probabilités qu'il y a un plus grand nombre de codes actifs augmentent. La limite du nombre d'utilisateurs est calculée dans la suite.

Passons maintenant au cas de la deuxième fonction de permission. Dans ce cas, on essaye de limiter le nombre de codes actifs à l'indice de la couche MAC pour les utilisateurs voix ($K_v$). Quand les codes simultanés dépassent cette limite, aucune permission au canal n'est autorisée. On remarque dans la figure 4.7 que lorsque le nombre d'utilisateurs augmente, la probabilité que les codes actifs soit dans la proximité de cette limite augmente. L'approche de nombre de codes actifs vers la limite est régulière de 25 jusqu'à 35 utilisateurs. Quand ce nombre devient 40, le graphe devient anormal. Ceci est dû à la congestion. En effet, la plupart de temps les utilisateurs actifs dépassent la limite et la probabilité de permission devient zéro, tous les utilisateurs quittent le canal et la permission redevient 1. Le comportement du système est alors instable. La démonstration de cette remarque est le fait que quand le nombre de codes actifs est supérieur à $K_v$ la probabilité de permission devient 0 et tous les nouveaux utilisateurs doivent quitter le canal. Dans ce cas le nombre de codes actifs devient inférieur à cette limite et la permission prend la valeur 1. Notons que dans la zone stable, les probabilités que les codes simultanés dépassent la limite de QoS est petite et ainsi la probabilité d'erreur. Mais la probabilité de drop est considérable ce qui augmente la perte comme on peut voir dans la figure 4.10.

Avant de passer à la comparaison des deux fonctions de permission, on présente des graphes de simulation dans les figures 4.8 et 4.9. On remarque statistiquement les même valeurs de distribution des utilisateurs. Le nombre de codes actifs représente le nombre total d'utilisateurs sur le canal. Ce nombre augmente lorsque le nombre total d'utilisateurs acceptés par la fonction CAC augmente pour les deux cas de CDMA. Ce nombre est centralisé autour de la limite de contrôle dans le cas de *f2*($x$). On remarque aussi que lorsque le nombre d'utilisateurs est 40 dans le second cas, les utilisateurs oscillent autour de la limite d'une façon instable et le nombre de codes actifs varie d'une façon rapide entre des valeurs très élevées par rapport à la limite de contrôle et des autres inférieurs à cette limite. Ceci est l'effet

du fait que la probabilité de permission oscille entre 1 et 0. Calculons maintenant la capacité du système dans chaque cas de contrôle.

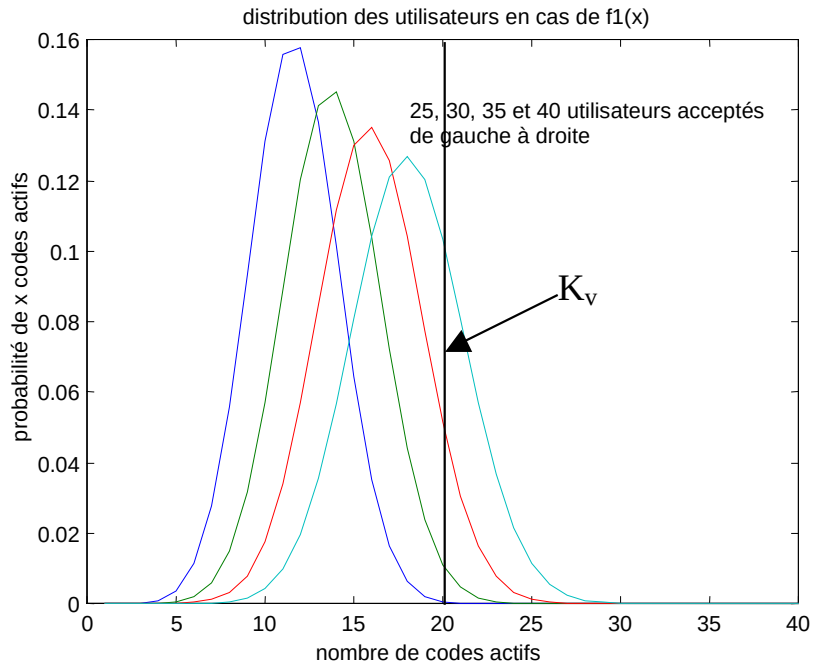



**Figure 4.6 Distribution des utilisateurs voix en CDMA classique (analytique)**

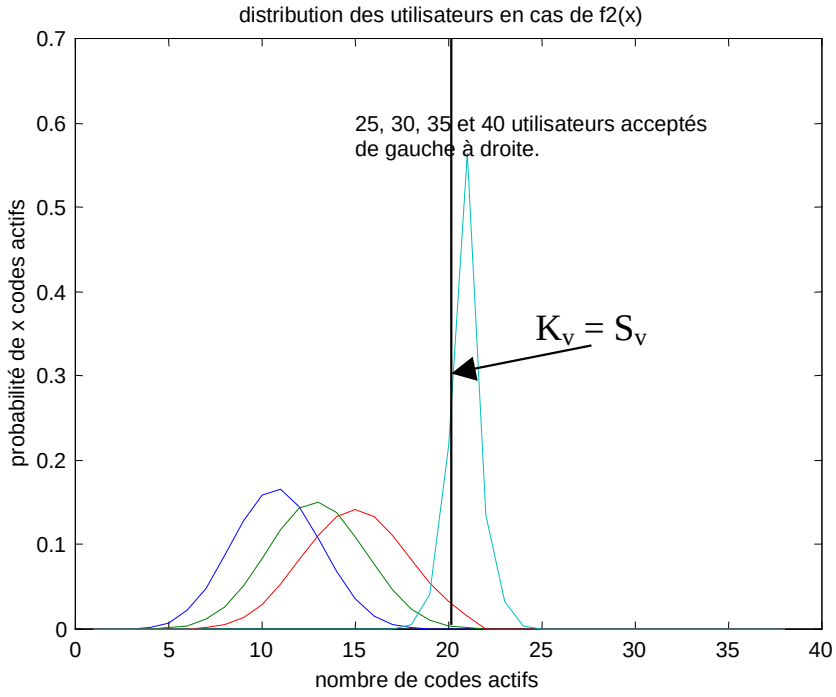



**Figure 4.7 Distribution des utilisateurs voix en CDMA avec limite (analytique)**

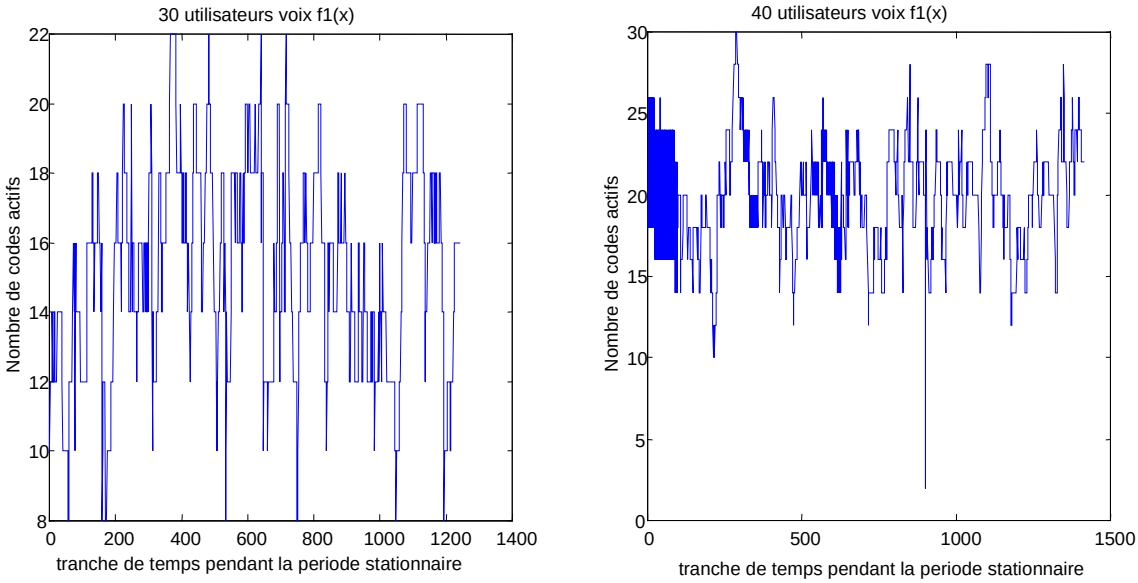



**Figure 4.8 Distribution des utilisateurs voix**

**en cas de f1(x) , simulation**

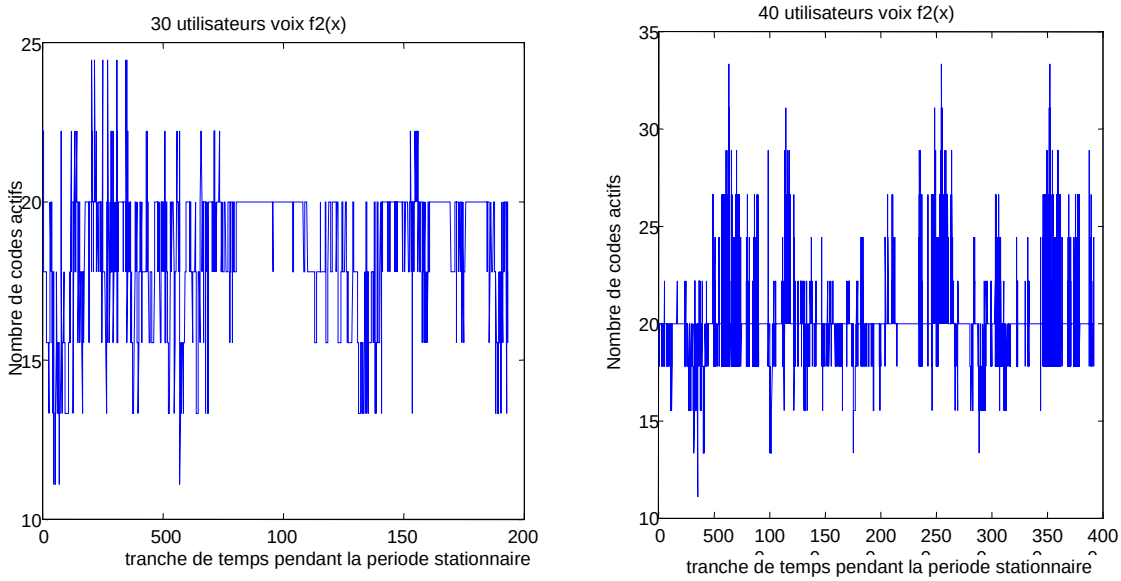



**Figure 4.9 Distribution des utilisateurs voix**

**en cas de f2(x), simulation**

La figure 4.10 compare les deux fonctions de permission en calculant la probabilité de perte en fonction de nombre d'utilisateurs acceptés par la fonction CAC. On remarque que le nombre maximal accepté par la première fonction est de 38 utilisateurs alors que 32 utilisateurs peuvent être acceptés avec une perte<1% quand la seconde fonction est utilisée. Ceci est spécialement dû à la probabilité de perte très élevée dans le deuxième cas causé principalement par un pourcentage des paquets rejetés (probabilité de drop) élevé. Notons que, pour *f2*(*x*), la probabilité de perte est proche de 1 (la plupart des paquets sont perdus) quand le nombre d'utilisateurs est égal à 40. Ceci est causé par la congestion et l'instabilité du

système démontrée précédemment. Enfin, le calcul et la simulation sont très proches ce qui montre la validité de notre modèle analytique simplifié.

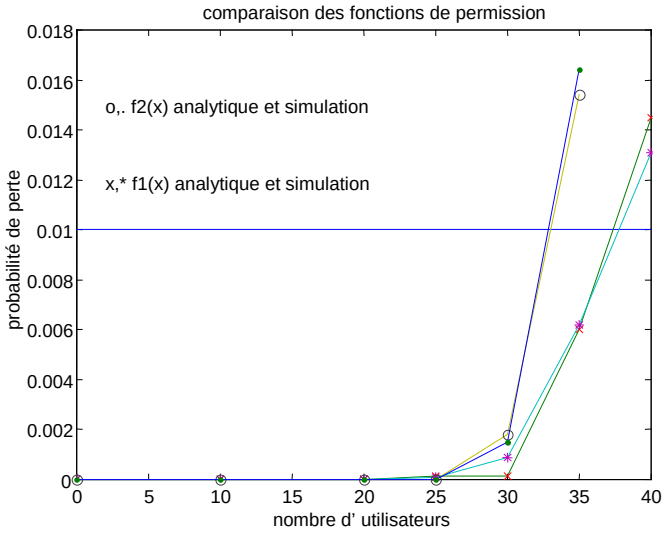



**Figure 4.10 Probabilité de perte, analyse et simulation**

Pour calculer le paramètre de décision de la fonction CAC, qui est le pourcentage de code consommé par un utilisateur, on prend le CDMA classique en considération. Dans ce cas, 38 utilisateurs sont acceptés sur 16 codes (le spreading factor), le pourcentage de code consommé est alors 16/38 = 0.42. Ce pourcentage est à la base de décision de la fonction CAC comme expliqué dans le paragraphe 4.3. On remarque d'autre part que la consommation est inférieure en S-CDMA qu'en S-PRMA (c'était 0.5) et la capacité de système est supérieure. La comparaison détaillée des différents protocoles est étudié dans le chapitre 6.

### 4.8.2 Le STC (utilisateurs data)

Dans cette section, on va étudier le comportement du canal pour des utilisateurs data. On considère en premier lieu des utilisateurs de transfert de fichiers avec les paramètres suivants :
Taux d'arrivée par seconde est $\lambda = 0.5$.
Longueur moyen d'une rafale est $L_s = 100$ paquets.
Ces utilisateurs sont étudiés analytiquement et par simulation afin de déterminer les paramètres de la fonction de permission qui donnent les meilleurs résultats.
On considère deux fonctions de permission *f1*(x) et *f2*(x). Ces deux fonctions diffèrent par la limite de contrôle $S_d$ qui est de 18 (légèrement supérieure à l'indice de la couche MAC pour les utilisateurs data) et 17 (légèrement inférieure à l'indice de la couche MAC pour les utilisateurs data). La permission à zéro est toujours de 0.3 et le point de déviation est égal au spreading factor 16. Ces fonctions sont présentées dans la figure 4.11.

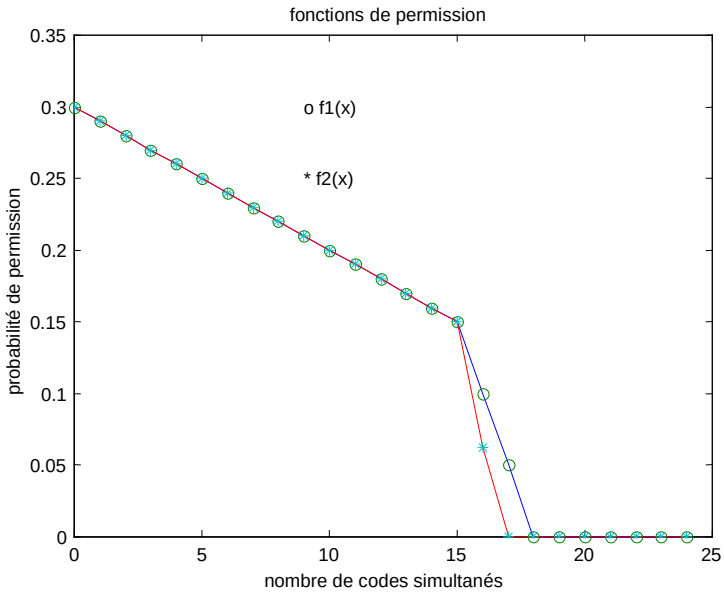



**Figure 4.11 Fonctions de permission pour data**

Dans les figures 4.12 et 4.13, on trace la distribution des codes en fonction du nombre d'utilisateurs acceptés par la fonction CAC et pour les deux fonctions de distribution. Dans 4.12 les codes actifs sont calculés pour 30, 35, 40 et 45 utilisateurs acceptés. Lorsque le nombre d'utilisateurs augmente, la probabilité que le nombre de codes actifs soit égal à la limite de contrôle augmente. Quand le nombre d'utilisateurs est de 40 et 45, une probabilité de dépasser cette limite est forte et la probabilité de perte est considérable.
Dans la figure 4.13, on essaye de résoudre ce problème en diminuant le seuil de contrôle. Dans ce cas, on remarque que le nombre de codes actifs reste la plupart de temps dans la limite de la QoS nécessaire pour le data qui est présenté par l'indice de la couche MAC. La probabilité de perte est diminuée dans ce cas mais le temps d'attente est censé augmenter.
Les résultats de simulation sont présentés dans la figure 4.14. On observe dans cette figure le nombre de codes actifs qui est proportionnel au nombre d'utilisateurs acceptés. Dans ce graphe, on remarque que la plupart du temps le nombre de codes actifs est autour de la limite de contrôle. Quand le nombre total dépasse la limite, la fonction doit interdire l'accès aux autres utilisateurs et l'excès quitte le canal immédiatement. Notons que le nombre de codes qui garantit une QoS acceptée pour les utilisateurs data (perte<0.1%) est entre 17 et 18.
Une remarque importante dans ces figures est le fait que la probabilité de dépasser la limite de contrôle n'est pas négligeable dans le cas où plusieurs utilisateurs sont acceptés dans le système. En effet, quand 45 utilisateurs sont acceptés dans le cas de la première fonction, cette probabilité est de 0.2. Ceci est dû au fait qu'en S-CDMA, les utilisateurs data attendent dans un tampon la libération d'un code pour accéder au canal. Quand le nombre d'utilisateurs en attente est élevé et lorsqu'un code se libère, plusieurs utilisateurs accèdent au canal pour utiliser ce code, ce qui provoque une collision CDMA (dépassement de la limite de QoS). Pour cette raison, la limite est baissée dans la fonction *f2*(x), et le problème est atténué. La différence majeure entre 4.12 et 4.13 est la probabilité d'avoir plus que 18 codes actifs qui est inférieure pour la fonction *f2* ce qui diminue la probabilité de perte considérablement comme on voit dans la figure 4.15.

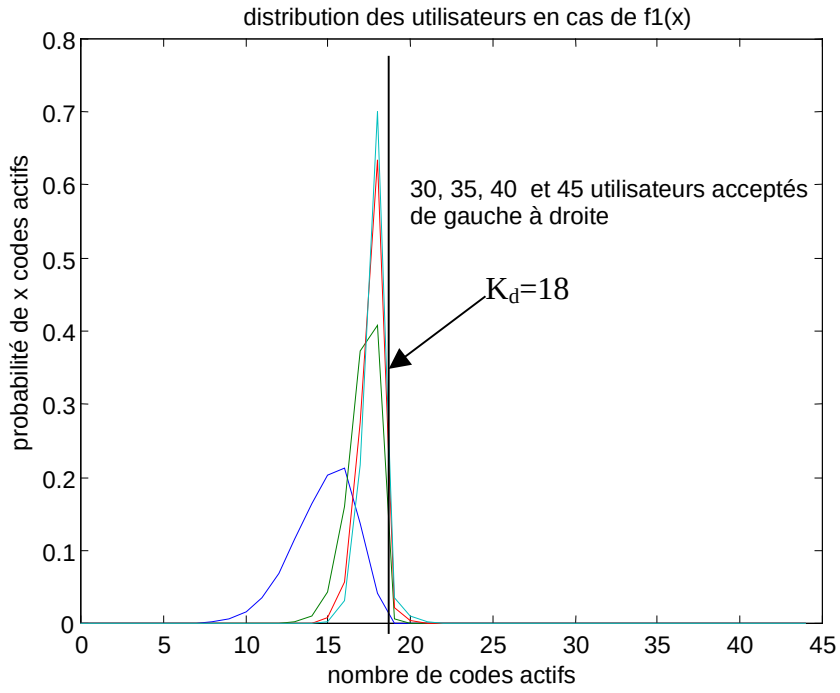



**Figure 4.12 Distribution des utilisateurs data en cas de f1(x), analyse**

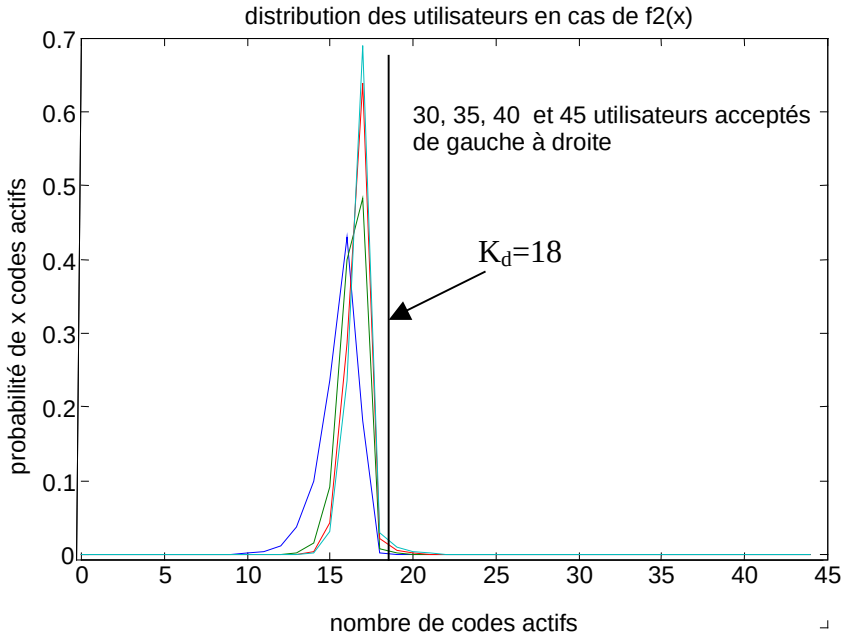



**Figure 4.13 Distribution des utilisateurs data en cas de f2(x), analyse**

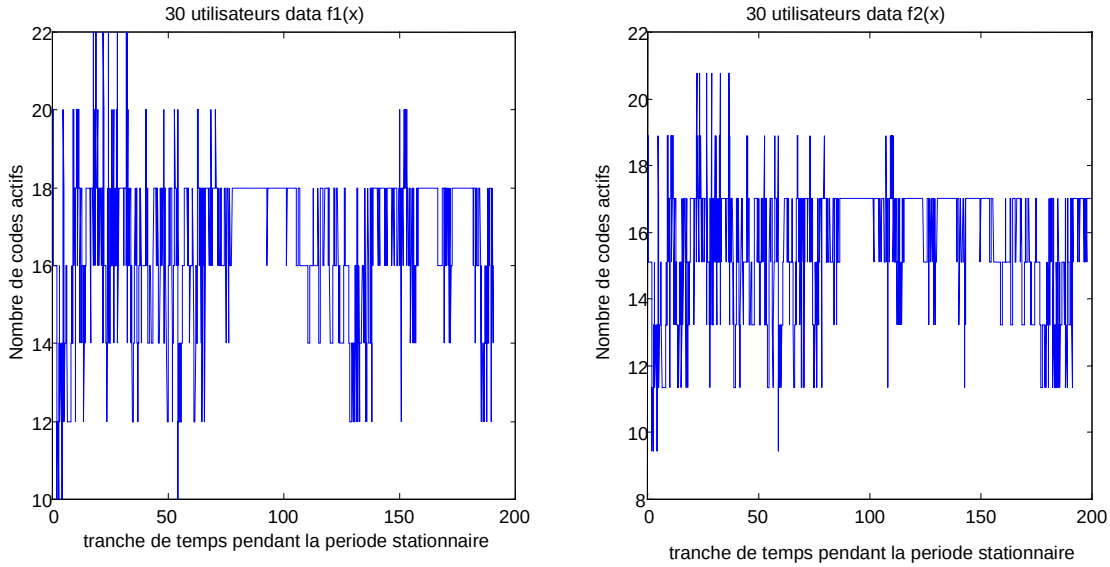



**Figure 4.14 Distribution des utilisateurs data en cas de f1(x) et f2(x), simulation**

Dans la figure 4.15 on présente la probabilité de perte des paquets par calcul mathématique en utilisant notre modèle déjà décrit et par simulation en utilisant NS. Les graphes presque confondus valident notre étude. D'autre part, on remarque que la deuxième fonction de permission diminue considérablement la perte. On peut accepter jusqu'à 40 utilisateurs data avec une perte de 0.1%. Cette fonction augmente considérablement la capacité du système mais augmente aussi le délai d'attente dans le tampon comme on peut le constater dans la figure 4.16. La remarque importante est le fait que la petite différence entre les fonctions *f1* et *f2* qui se traduit dans les figures 4.12 et 4.13 par une probabilité d'atteindre la limite de QoS légèrement inférieure pour *f2* que pour *f1*, engendre une différence très importante en terme de la capacité du système.

Dans 4.16 et pour 40 utilisateurs, le temps moyen d'attente d'un paquet est de 1400ms pour la fonction *f2*(*x*) et 1000ms pour la fonction *f1*(*x*). Ceci n'est pas dramatique puisque les utilisateurs data peuvent attendre longtemps dans un tampon considéré illimité. D'autre part, on a pris une longueur moyenne des rafales de 100 paquets, ceci nécessite 2s pour être envoyé, et le temps moyen d'émettre une rafale sera de 3.4s. D'autre part, l'arrivée d'une rafale est Poissonien de taux 0.5 et le temps moyen d'attente d'une arrivée est de 2s qui est inférieur au temps moyen d'attente d'un paquet dans le tampon. Ceci rend le système stable. Cette discussion a orienté notre choix de la fonction de permission puisqu'il faut savoir qu'une fonction de permission plus restrictive augmente toujours la capacité du système mais aussi le temps d'attente.

Passons maintenant aux utilisateurs Emails. Les paramètres de ce système sont pris des normes ETSI décrit dans [36] :

Le temps entre session est exponentiel de paramètre $\lambda = 1/(60mn) = 0.00027$.

Le nombre d'appel dans une session est géométrique de moyen $N_p = 5$.

Le temps de rédaction est géométrique de moyen $T_R = 180s$.

Le nombre de rafales dans un appel est géométrique de moyen $N_b = 10$.

Le temps séparant deux rafales consécutives est géométrique de moyen $T_{sep} = 0.0625s$.

Enfin les paramètres de distribution de Pareto sont $\alpha = 1.1$, $k = 81.5$ et le moyen d'une rafale est $L_w = 24$paquets.

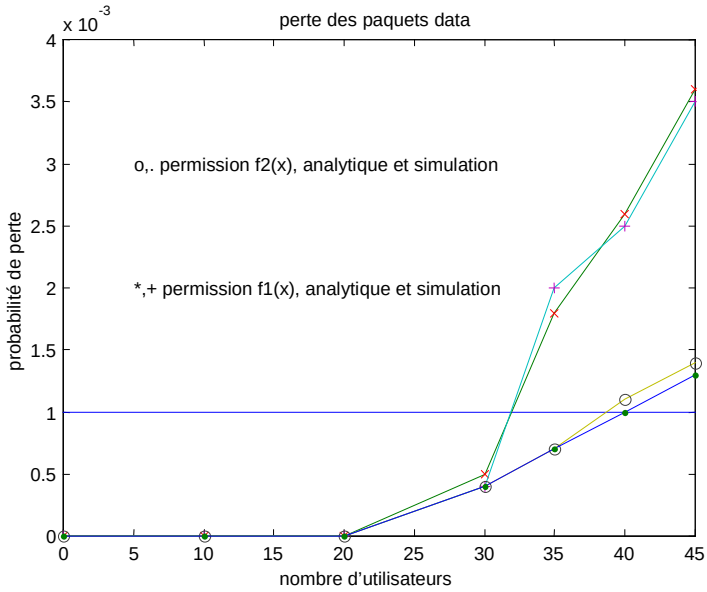



**Figure 4.15 Probabilité de perte (transfert des fichiers), analyse et simulation**

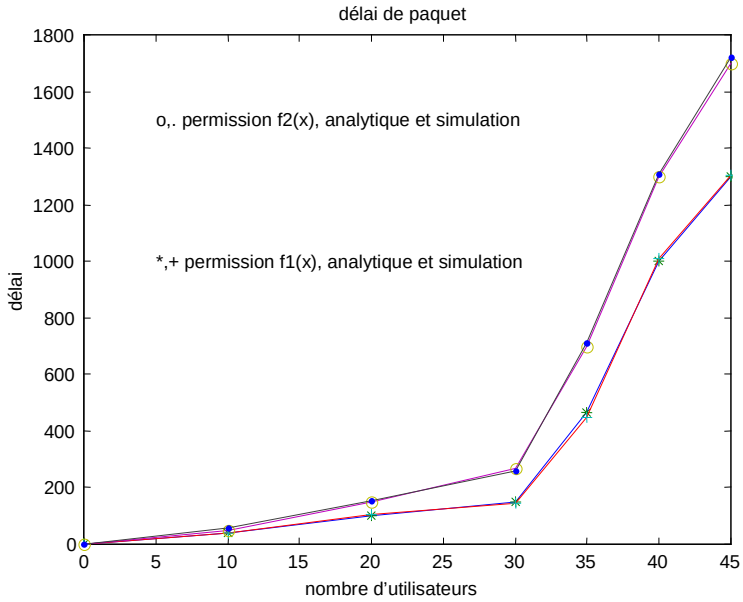



**Figure 4.16 Délai d'attente (transfert des fichiers), analyse et simulation**

Dans les figures 4.17 et 4.18, la probabilité de perte ainsi que le délai d'attente sont présentés pour les utilisateurs Emails et dans les deux cas des fonctions de permission. On remarque toujours que la deuxième fonction augmente considérablement la capacité du système qui atteint 700 utilisateurs Emails alors qu'avec la première fonction, on ne peut accepter que 500 utilisateurs. D'autre part, le délai d'attente augmente dans le cas de la deuxième fonction et atteint 4000ms à la limite de la fonction CAC (qui est 700 utilisateurs dans ce cas). Notons que le simulateur NS est utilisé dans le calcul de ces résultats et que le tampon est considéré illimité et aucun paquet n'est perdu à cause du remplissage du tampon.

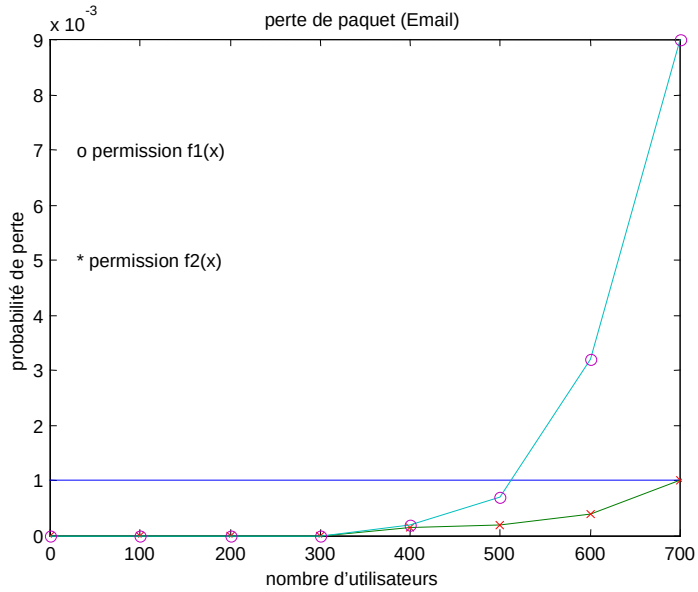



**Figure 4.17 Probabilité de perte (Email), simulation**

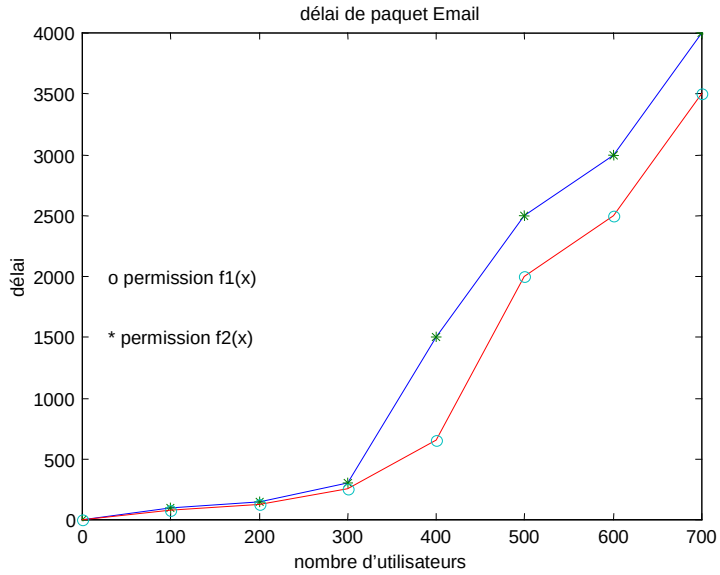



**Figure 4.18 Délai d'attente (Email), simulation**

### 4.8.3 Multiplexage de services (utilisateurs voix et data)

Dans cette section, on étudie brièvement le multiplexage des utilisateurs voix et data dans le même canal. Les utilisateurs voix sont toujours considérés comme RTC et les utilisateurs data comme STC. Les utilisateurs voix sont toujours des sources ON-OFF tandis que les sources Emails représentent les utilisateurs data. Le multiplexage réalisé doit garantir la QoS demandée par chaque utilisateur. Un utilisateur voix n'accepte pas une attente supérieure au temps d'une trame et une perte supérieure à 1%, alors qu'un utilisateur data peut attendre longtemps avant d'être servi mais n'accepte pas une perte supérieure à 0.1%. Puisqu'en CDMA un utilisateur peut influencer tous les autres à cause d'interférence, des techniques

spéciales sont nécessaires pour diminuer l'effet d'un tel type de service sur l'autre. Par exemple les utilisateurs voix acceptent une perte supérieure aux utilisateurs data donc leur indice de la couche MAC est plus grand que celui des utilisateurs data et de même leur limite de contrôle. D'autre part, un utilisateur voix a besoin d'accéder rapidement au canal et donc il faut lui donner une fonction de permission généreuse, ce qui n'est pas du tout le cas pour les utilisateurs data.
Cette différence de QoS de chaque type de service n'est pas la seule à déterminer la technique de multiplexage et de contrôle. La différence dans le comportement des sources de trafic influence aussi ce choix. L'essentiel sera de donner une priorité aux utilisateurs voix mais sans que leur nombre sur le canal dépasse considérablement l'indice MAC des utilisateurs data ce qui risque de dégrader la QoS de ces derniers. On compare par simulation sur NS, cinq stratégies de contrôle afin de choisir celle qui donne la capacité maximale tout en respectant la QoS de chaque type d'utilisateurs. Ces stratégies sont réalisées par cinq choix des fonctions de permission :

- Une fonction trop généreuse pour la voix donc sans limite de contrôle (CDMA classique) et restrictive pour le data avec une limite de contrôle de 17 $S_d = 17$.
- Fonctions restrictives pour la voix et le data ; Les limites de contrôle sont fixées sur 17 pour les deux types soit $S_v = S_d = 17$.
- Fonctions généreuses pour la voix et le data ; Les limites de contrôle sont fixées sur 20 pour les deux types soit $S_v = S_d = 20$.
- Une fonction restrictive pour le data et généreuse pour la voix ; la limite de contrôle est de 20 pour les utilisateurs voix $S_v = 20$ et de 17 pour les utilisateurs data $S_d = 17$.
- Une fonction très restrictive pour le data et généreuse pour la voix. La limite de contrôle pour la voix est toujours de 20 mais celle de data est réduite à 16, $S_d = 16$.

Les figures 4.19, 4.20 et 4.21 donnent les résultats de simulation de ces différentes stratégies. On trace la probabilité de perte pour les utilisateurs voix dans 4.19, la probabilité de perte pour les utilisateurs data dans 4.20 et le délai d'attente pour les utilisateurs data dans 4.21. Ces trois graphes servent à déterminer la meilleure stratégie de contrôle ainsi que la capacité totale du système. On fixe le nombre d'utilisateurs voix à 15 utilisateurs et on trace les différents paramètres de QoS pour différentes valeurs de nombre d'utilisateurs data.
On remarque d'après les figures que lorsque les fonctions de contrôle sont très restrictives la probabilité de perte des utilisateurs voix est très élevée. Ceci est dû à un pourcentage considérable des paquets rejetés car la limite de contrôle est trop basse pour les utilisateurs voix. Au contraire, quand la fonction de contrôle des utilisateurs data est très généreuse la probabilité de perte des paquets voix est basse mais celle des utilisateurs data est trop élevée puisqu'on autorise un grand nombre de codes actifs, ce qui augmente l'interférence.
Quand on utilise une fonction restrictive pour le data et généreuse pour la voix, la probabilité de perte pour les utilisateurs data reste considérable. Il faut alors diminuer les codes actifs totaux (utilisés par les voix et les data) sans contrôler la voix d'une façon restrictive. On propose alors une fonction très restrictive pour le data et généreuse pour la voix. La limite de contrôle est fixée sur 16 (égal au spreading factor) pour le data et 20 pour la voix. Dans ce cas on obtient une perte très petite pour la voix et acceptable pour le data. Dans ce cas, on peut accepter jusqu'à 350 utilisateurs data avec une perte pour la voix dans l'ordre de 0.004, une perte pour le data de 0.001 et un délai d'attente de 2200ms.

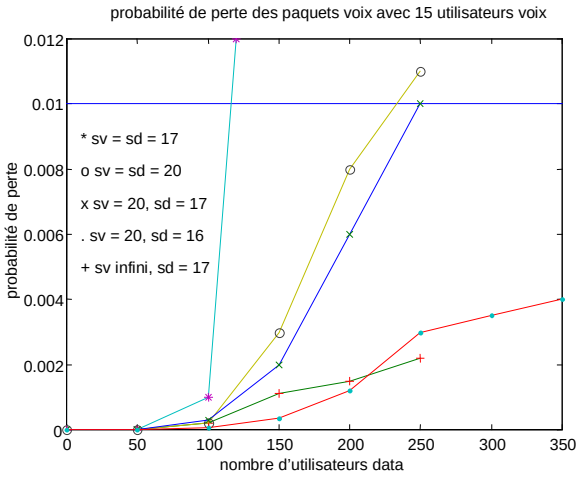



**Figure 4.19 Perte des paquets voix en fonction de nombre d'utilisateurs data**

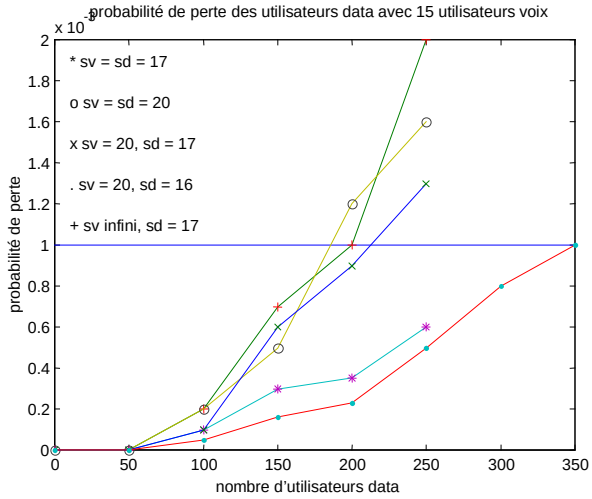



**Figure 4.20 Perte des paquets data en fonction de nombre d'utilisateurs data**

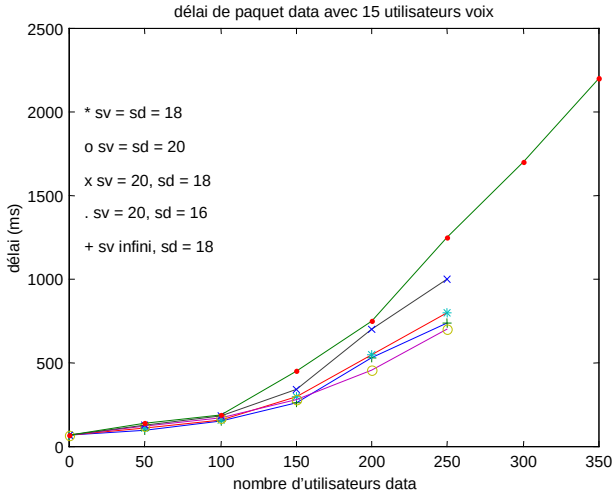



**Figure 4.21 Délai des paquets data en fonction de nombre d'utilisateurs data**

Notons enfin que cette technique de multiplexage total de services ne nécessite pas une allocation de ressources spécifique. Des méthodes d'allocation sont étudiées et comparées dans le sixième chapitre.

## *4.9 Conclusion*

Dans ce chapitre, on a étudié un protocole utilisant CDMA dans le cas de satellite à basse orbite LEO. Ce protocole, appelé S-CDMA, est conçu pour supporter plusieurs services avec différentes QoS. Ceci nécessite de définir plusieurs classes au niveau MAC pour supporter les différents services. Ces classes appelés MTCs (MAC Transfer Capabilities) sont le STC (Slow Transfer Capability) pour supporter les utilisateurs data et le RTC (Rapid Transfer Capability) pour les utilisateurs voix. Les utilisateurs data sont présenté par des sources de trafic de transfert de fichier puis d'Email tandis que les utilisateurs voix sont représentés par des sources ON-OFF. Pour garantir une qualité de service pour les différents utilisateurs, on introduit une fonction de contrôle d'admission CAC ainsi qu'une fonction de contrôle de trafic. La fonction CAC agit au niveau d'appel pour limiter le nombre total d'utilisateurs dans le système tandis que la fonction de contrôle de trafic agit au niveau de paquet pour limiter la perte totale des paquets. Ces fonctions ne sont pas les mêmes pour les différents services puisque les QoSs demandées sont différents. Une étude mathématique par des chaînes de Markov est élaborée pour les sous-systèmes voix et data. On détermine d'après l'analyse les paramètres de QoS de chaque sous-système. Les discussions analytiques peuvent alors être accomplies afin de déterminer les valeurs optimales du système. Quand le système contient des utilisateurs voix seulement, le calcul mathématique est utilisé avec des simulations en NS. Deux fonctions de permission sont comparées et on distingue que la fonction sans limite qui représente le CDMA classique donne la meilleure performance. Quand cette fonction est utilisée le pourcentage de consommation atteint 0.42. Cette valeur représente l'efficacité du système puisque la capacité totale est inversement proportionnelle à cette valeur. La simulation valide notre étude. En passant au sous-système data, on calcule la capacité du système en cas des sources de transfert de fichiers par analyse et simulation et pour deux fonctions de permission. La fonction la plus restrictive donne la meilleure performance en augmentant la capacité totale du système. Le même résultat est obtenu quand des utilisateurs Email sont simulés. On remarque que la capacité du système augmente mais au prix d'un délai d'attente élevé.

Enfin des sources voix et Email sont multiplexés ensemble et étudiés par simulation. Dans ce cas, la fonction de permission sans limite cesse d'être acceptable pour les utilisateurs voix et une fonction très restrictive pour les utilisateurs data est la meilleure. Une priorité souple est donnée aux utilisateurs voix dans ce cas mais le risque d'influence de la part des utilisateurs data reste considérable. En effet, si un utilisateur data a une grande quantité des données à envoyer un utilisateur voix ne peut pas l'interrompre et il risque d'attendre longtemps avant d'être servi par un code. Pendant ce temps, plusieurs paquets voix sont perdus. Les utilisateurs étudiés dans ce chapitre qui sont les sources de transfert de fichiers courts et d'Email ne posent pas ce problème puisque leurs durées de transmission ne sont pas élevées. Des utilisateurs data qui nécessitent un temps de service élevé peuvent dégrader la performance. Une séparation temporelle entre ce genre des utilisateurs data et les utilisateurs voix est probablement nécessaire. Ce résultat est démontré dans le sixième chapitre. D'où l'introduction du CDMA/PRMA hybride étudié dans le prochain chapitre.

# 5 Chapitre V
# S-CDMA/PRMA (Satellite-Code Division Multiple Access/ Packet Reservation Multiple Access)

## *5.1 Introduction*

Dans ce chapitre on va étudier un protocole d'accès multiple hybride qui unit la division de code et de temps pour concevoir le canal. Ce protocole, développé pour le canal terrestre du réseau UMTS (Universal Mobile Telecommunication System) dans le sens montant est étudié et adapté au cas satellitaire. Le nouveau protocole est appelé S-CDMA/PRMA (Satellite Code Division Multiple Access/ Packet Reservation Multiple Access) et peut être utilisé dans la partie satellite de l'UMTS (S-UMTS).
L'un des objectifs majeurs de ETSI (European Telecommunications Standard Institute) [47] et ITU (International Telecommunications Union) [48] est l'intégration du composant terrestre avec le réseau spatial pour réaliser une couverture globale des communications mobiles. Le S-UMTS permettra de réaliser une portabilité de services et une compatibilité des terminaux. Plus spécifiquement, il faut réaliser :

- Un roaming global pour les utilisateurs UMTS.
- Une QoS pour les liaisons par satellite comparable à celle réalisée par le réseau UMTS terrestre et avec un prix minimal.
- Un développement rapide des réseaux mobiles dans les pays envoie de développement ainsi que dans les zones rurales.

L'UMTS et le S-UMTS se basent sur deux modes de multiplexage. Le mode duplex à division de fréquence FDD (Frequency Division Duplex) et le mode duplex à division de temps TDD (Time Division Duplex). Les encouragements consistent à utiliser le WCDMA pour FDD mode et le TD-CDMA (Time Division-CDMA) pour le TDD mode. Ce dernier mode est pris en compte dans ce chapitre et un protocole qui améliore l'efficacité de TD-CDMA est proposé pour intégrer sur le même canal plusieurs types de service voix/data qui nécessitent différentes QoS requise par des applications (téléphonie, Email, Web, Transfert des fichiers…). Puisque cette technique est généralement utilisée en mode TDD, où les voies montante et descendante sont séparées temporellement, l'intégration de la composante temporelle ne pose pas des problèmes additionnels au système d'accès. Une architecture de commutation des paquets est utilisée pour les différents utilisateurs de façon à optimiser les ressources et maximiser la capacité.

La suite du chapitre est organisée comme suit ; dans la deuxième section, on décrit la technique hybride TD-CDMA pour introduire le protocole CDMA/PRMA amélioré pour le satellite et appelé S-CDMA/PRMA. Les services supportés par la couche MAC sont présentés dans la section 4, la fonction de contrôle d'admission dans la section 5 et le contrôle de trafic dans la 6ème section. Une analyse mathématique pour les deux sous-systèmes voix et data est développée dans la septième section. Les discussions mathématiques et par simulation sont étudiés dans la huitième section pour les différents types d'utilisateurs (voix, web, data) ainsi que pour le multiplexage de services. Enfin, la section 9 donne la conclusion.

## *5.2 La technique TD-CDMA*

Cette technique combine les techniques TDMA et CDMA pour définir le canal radio. La bande passante est divisée en slots temporelles sur lesquelles plusieurs codes sont disponibles pour supporter les informations à transmettre. La figure 5.1 représente cette technique.

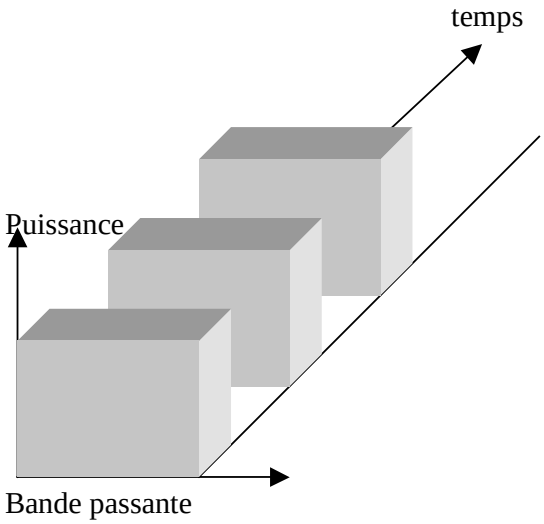



**Figure 5.1 Technique CDMA/TDMA**

On remarque que sur chacun des slots temporels, une certaine puissance et bande passante peuvent être utilisés pour servir plusieurs utilisateurs. La puissance est partagée sous forme de codes entre les différents utilisateurs. Un nombre limité de codes peuvent être utilisés sur chaque slot puisque la puissance maximale est bornée par l'interférence limite acceptée par un utilisateur [49]. Elle dépend donc de la QoS demandée.

Supposons que l'interférence due à l'accès multiple (MAI Multiple Access Interference) est Gaussienne. En utilisant des récepteurs à simple corrélation, le BER ou la probabilité d'erreur d'un bit donnée par :

$$P_e = Q(\overline{SNR}) \tag{5.1}$$

avec $$Q(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_x^{\infty} e^{-u^2/2} du \tag{5.2}$$

où SNR est le rapport signal sur bruit. Si on considère la technique de séquence directe en CDMA (CDMA/DS Direct Sequence) ($\Pr\{x_j = 1\} = \Pr\{x_j = -1\} = 0.5$), où $x_j$ est un chip dans la séquence avec une longueur de code ou spreading factor *sf*, la valeur moyenne du rapport

signal sur bruit (SNR) pour le paquet *i* dans le cas des puissances reçues inégales est donnée par

$$\overline{SNR} = \sqrt{\frac{P_i}{(3sf)^{-1}\sum_{\substack{k=1 \\ k\neq i}}^{K} P_k + \frac{N_0}{2T}}} \tag{5.3}$$

Ce rapport décrit la QoS reçue par la station de base ; il est une fonction de la puissance totale sur le slot considéré. Pour faciliter l'étude, on considère le cas d'un contrôle parfait de la puissance sur chaque slot et on suppose que la puissance totale reçue sur un tel slot par les utilisateurs des cellules voisines est proportionnelle à celle de la cellule analysée avec un rapport *f*. On obtient :

$$\overline{SNR} = \sqrt{\frac{3sfP_0}{(K-1)P_0 + (K-1)fP_0}} = \sqrt{\frac{3sf}{(K-1)(1+f)}} \tag{5.4}$$

On en déduit alors la probabilité de perte d'un paquet en supposant que la longueur d'un paquet est de *L* et en utilisant un code correcteur d'erreur qui peut corriger jusqu'à *t* erreurs. Si $Q_e = 1 - P_e$ est la probabilité qu'un bit est bien reçu, la probabilité de succès d'un tel paquet est :

$$Q_E(K) = \sum_{i=0}^{t} C_L^i (1-Q_e)^i (Q_e)^{L-i} \tag{5.5}$$

et la probabilité d'erreur d'un paquet due à l'interférence est :

$$P_{error}(K) = 1 - Q_E(K) \tag{5.6}$$

En TD-CDMA, la bande passante est divisée sur deux plans, le plan temporel et le plan de code. Une partie des ressources radios est assignée à chaque plan. La partie donnée au plan temporel est représentée par le nombre de slots dans une trame *n* tandis que la partie donnée au plan de code est représentée par le spreading factor *sf*. Ces deux facteurs, qui représentent la décomposition de la bande passante totale, sont inversement proportionnels. En effet, quand *n* augmente, la bande passante assignée à chaque slot diminue et le nombre total d'utilisateurs qui peuvent envoyer sur ce slot diminue. Dans l'équation 5.4 et pour le même rapport signal sur bruit, le facteur d'étalement *sf* diminue. Si la bande passante totale est *BW*, *BW/n* est assigné pour chaque slot. Si $R_s$ est le débit d'un utilisateur, un slot peut supporter $BW/(n \times R_s)$ utilisateurs qui peuvent envoyer sur le slot sans erreur. C'est donc le spreading factor *sf*.

$$sf = BW/(n \times R_s) \tag{5.7}$$

La figure 5.2 représente la probabilité de succès d'un paquet sur un slot pour plusieurs choix du nombre de slots dans une trame ou de spreading factor avec $f = 0.5$, $L = 160$ bits, $t = 10$ et pour plusieurs spreading factors ou nombre de slots. On remarque que quand le *sf* augmente le nombre total de codes acceptés sur un slot augmente, mais le nombre total de slots dans la trame diminue de façon à garder la même capacité du système. La valeur $sf \times n$ reste invariable et représente le nombre total de codes dans le système sans aucune interférence. On remarque à ce stade que lorsque n est égal à 1, *sf* sera le nombre total de codes dans le système avec probabilité d'erreur zéro. On se retrouve donc dans le cas du CDMA pur du chapitre précédent. Notons que puisqu'une certaine erreur est acceptée par les utilisateurs de différents services, le nombre total de codes actifs peut dépasser $sf \times n$ sans le risque d'une dégradation catastrophique de la qualité (graceful degradation).

La figure 5.2 montre que pour les différentes valeurs de spreading factor, la probabilité de succès commence à diminuer quelques codes plus tard. Ceci augmente la capacité du système comme on va le démontrer dans la suite.

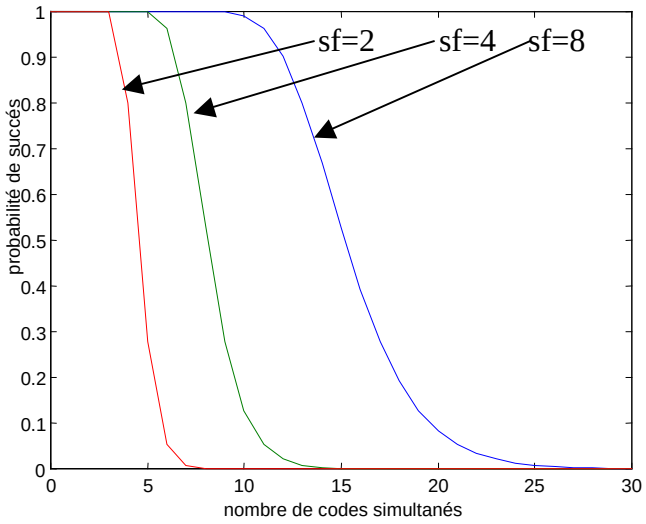



**Figure 5.2 La probabilité de succès pour différents spreading factor**

## *5.3 Le protocole S-CDMA/PRMA*

Le temps est divisé en trames qui contiennent un nombre fixe de slots. Le rythme des trames est égal au débit des sources vocales. Les utilisateurs transmettent leurs paquets de façon à les placer dans un slot. Les slots ne sont pas considérés comme « réservé »ou « disponible » comme dans PRMA puisque le composant CDMA permet l'envoi de plusieurs paquets dans le même slot. Le contrôle d'accès au canal se fait d'une façon plus souple en définissant une fonction de permission qui donne la probabilité d'accéder à un slot.

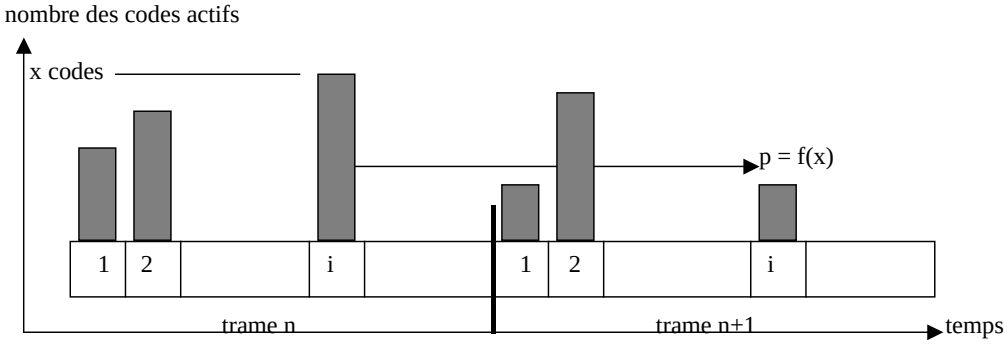



**Figure 5.3 Le protocole S-CDMA/PRMA**

En S-CDMA/PRMA, un utilisateur passe à l'état de contention quand il a des paquets à envoyer. Il essaye d'accéder à un slot du canal en faisant un tirage de Bernoulli avec une probabilité calculée par la fonction de permission. Contrairement au CDMA/PRMA classique [50] où un utilisateur passe de contention au réservation quand il reçoit un acquittement positif, il change de l'état de contention à celui de réservation quand il découvre que le slot accédé pendant la trame précédente n'est pas très chargée. La définition de « pas très chargé » dépend de la QoS demandée par l'utilisateur et va être précisée dans la suite. Un utilisateur

reste dans l'état de réservation tant qu'il a des paquets à envoyer. Plusieurs utilisateurs transmettent alors sur le même slot mais sur plusieurs codes. Le nombre de codes sur chaque slot est détecté par la station de base (satellite) et diffusé aux différents utilisateurs qui en déduisent les probabilités de permission sur ce slot. Cette fonction doit être inversement dépendant par rapport au nombre de codes actifs afin de limiter le nombre total d'utilisateurs sur un slot et donc l'interférence.
La notion de collision ne se pose pas comme dans le cas de PRMA puisque plusieurs utilisateurs peuvent envoyer en même temps sur différents codes. La probabilité d'erreur d'un paquet augmente avec le nombre total d'utilisateurs simultanés et peut causer la perte du paquet. Cette erreur est une raison de perte des paquets qui doit être limitée par le seuil de la QoS demandée. La figure 5.3 représente ce protocole dans son aspect général. Une différenciation doit être introduite entre les deux sous-systèmes voix et data.

### 5.3.1 Sous-système voix

Le sous-système voix contient des utilisateurs vocaux représentés toujours par des sources de trafic ON-OFF comme décrit dans le troisième chapitre. Le comportement d'un utilisateur voix suit une chaîne de Markov à deux états ON qui représente la parole et OFF qui représente le silence.
Un utilisateur voix qui voit un talkspurt arrivant passe de l'état de silence à l'état de contention. Sur chaque slot, il fait un tirage de Bernoulli de paramètre $p_v(x)$ où $x$ représente le nombre de codes sur ce même slot dans la trame précédente. La fonction $p_v(x)$ représente la permission d'accéder au canal pour les utilisateurs voix. Si l'utilisateur échoue son tirage, il essaye sur le slot suivant de la même façon. Dans le cas où l'utilisateur arriverait à accéder au slot, il envoie son paquet sur un code dans le slot et attend la réponse du satellite concernant le nombre total de codes actifs sur le slot. Si ce nombre est inférieur à un seuil $S_v$ l'utilisateur passe à l'état de réservation et utilise son code sur le slot choisi tout au long du talkspurt. Dans le cas contraire, il revient à l'état de contention.
La réponse du satellite sur l'état d'un slot n'arrive que dans un temps égal à RTD qui est proche de la durée d'une trame. Ce temps est aussi le séjour maximal d'un paquet voix avant d'être envoyé $D_{max}$. Pour cette raison, un utilisateur peut essayer d'envoyer un paquet pendant une trame et donc sur $n$ slots. S'il ne réussit pas tout au long de cette durée, le paquet sera jeté et il passe au paquet suivant. Ceci représente la première raison de perte des paquets représentée par la probabilité de drop $P_{drop}$. D'autre part, s'il envoie un paquet sur un slot, il ne pourra pas retransmettre ce paquet dans le cas où il serait perdu à cause d'interférence CDMA puisque le séjour maximal est aussi écoulé. C'est la deuxième raison de perte représentée par la probabilité d'erreur $P_{error}$. La probabilité de perdre un paquet sera :
$P_{loss} = P_{error}. + P_{drop}$.
Ces deux termes qui constituent la probabilité de perte sont inversement dépendants. En effet, quand la fonction de permission est restrictive, le temps nécessaire pour accéder à un slot augmente et aussi la probabilité de rejet d'un paquet tandis que le nombre total de codes actifs sur un slot diminue et aussi la probabilité d'erreur. Par contre, quand la fonction de permission est généreuse, le temps nécessaire pour accéder à un slot diminue et aussi la probabilité de rejet d'un paquet tandis que le nombre total de codes actifs sur un slot augmente et aussi la probabilité d'erreur. Un compromis entre les deux est réalisé par le choix des paramètres du système comme la fonction de permission, le nombre total de slots dans une trame et le spreading factor.

Notons qu'aucun tampon n'est nécessaire pour les utilisateurs voix puisque le séjour maximal est supposé égal à la durée d'une trame. Ceci simplifie la conception des terminaux voix.

### 5.3.2 Sous-système data

Le sous-système data contient des sources de transfert des fichiers, d'Email et de trafic Web. Le transfert des fichiers et l'Email sont décrit dans le chapitre précédent et on s'intéresse ici au trafic web qui représente une bonne partie du trafic de data dans l'UMTS et de S-UMTS et modélisé par des sources décrites dans [36,37].
Le modèle consiste en des appels séparés par des périodes de silence qui sont les temps de lecture. Le nombre d'appels dans une session est distribué géométriquement. Le nombre de rafales dans un appel ainsi que l'intervalle de temps entre deux rafales consécutives sont distribués géométriquement. La taille des paquets suit une loi de Pareto avec cut-off pour limiter la taille des paquets qui est la taille maximale d'un datagrame IP (1502octets). La figure 5.4 présente une partie d'une session de ce modèle.

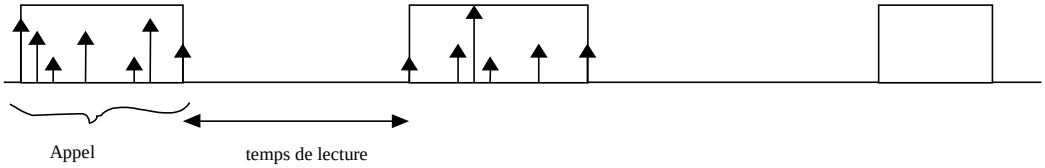



**Figure 5.4 Source de trafic web**

Ce trafic, qui est interactif, est considéré dans le sous-système data mais présente des exigences plus strictes que le transfert des fichiers et l'Email en terme de temps d'attente. En effet, un utilisateur web préfère ne pas attendre très longtemps pour une demande des informations web, ce qui exige un accès rapide de la source web sur le canal satellite afin de délivrer les informations demandées. Pour cette raison, la probabilité d'accès au canal des utilisateurs web est notée $p_w$ pour les différencier des autres utilisateurs data qui possèdent $p_d$ comme probabilité d'accès.
Un utilisateur data qui voit une rafale doit accéder au canal radio par contention. Il essaye d'accéder à un slot de la trame en faisant un tirage de Bernoulli de paramètre $p_d(x)$ ou $p_w(x)$ où $x$ est le nombre d'utilisateurs sur ce slot dans la trame précédente. Si l'utilisateur échoue son tirage, il essaye sur le slot suivant de la même façon. Dans le cas où l'utilisateur arriverait à accéder au slot, il envoie son paquet sur un code dans le slot et attend la réponse du satellite concernant le nombre total de codes actifs sur le slot. Si ce nombre est inférieur à un seuil $S_d$, l'utilisateur passe à l'état de réservation et utilise son code sur le slot choisi tout au long de la rafale. Dans le cas contraire, il revient à l'état de contention. Un paquet data peut attendre longtemps avant d'être envoyé ; pour cette raison le paquet est mis dans un tampon en attendant l'accès au canal. Par contre, on suppose qu'un paquet envoyé et perdu à cause d'interférence CDMA ne peut pas être retransmis au niveau MAC. C'est au niveau de RLC qu'on accomplit la retransmission. Ceci représente la seule raison de perdre un paquet qui est la probabilité d'erreur :
$P_{loss} = P_{error}$
D'autre part, le temps d'attente d'un paquet dans le tampon dépend de la permission d'accès sur le canal et il est inversement dépendant par rapport à la probabilité de perte. En effet, quand la fonction de permission est restrictive, le temps nécessaire pour accéder à un slot augmente et aussi le séjour d'un paquet dans le tampon tandis que le nombre total de codes

actifs sur un slot diminue et aussi la probabilité d'erreur. Par contre, quand la fonction de permission est généreuse, le temps nécessaire pour accéder à un slot diminue et aussi le séjour d'un paquet dans le tampon tandis que le nombre total de codes actifs sur un slot augmente et aussi la probabilité d'erreur. Un compromis entre les deux est réalisé par le choix des paramètres du système comme la fonction de permission, le nombre total de slots dans une trame et le spreading factor.
Notons enfin qu'on suppose que les tampons utilisés sont de taille infinie et aucune perte n'est causée par le remplissage des tampons. Mais le temps de séjour moyen est un facteur de QoS à respecter suivant l'utilisateur en question (Email, web…).

## *5.4 Les services*

Dans ce chapitre, plusieurs types d'applications qui demandent différentes qualités de service vont pouvoir accéder au canal radio. Pour cette raison, plusieurs services sont fournis aux utilisateurs. Du point de vue du temps d'attente, on peut diviser les utilisateurs en trois groupes : les utilisateurs qui demandent un temps réel comme la voix, les utilisateurs qui ne demandent pas un temps réel mais qui sont interactifs et donc n'acceptent pas un long délai d'attente comme le web, et enfin les utilisateurs qui peuvent attendre indéfiniment comme le transfert des fichiers et l'Email. Ces différents types de services sont supportés au niveau MAC par trois MTCs (MAC Transfer Capabilities) afin de garantir leur QoS requise. Ces MTCs sont le RTC (Rapid Transfer Capability), le ITC (Intermediary Transfer Capability) et le STC (Slow Transfer Capability). Ces services sont définis au niveau MAC comme suit :

- RTC doit garantir une transmission rapide des paquets générés par la source, ce qui est souhaitable pour les services temps réels. La réalisation de cette rapidité se fait sur deux niveaux ; au niveau d'appel par la fonction CAC, qui doit refuser une telle demande si elle estime que la couche MAC est incapable de garantir un temps réel, et au niveau de paquet par un contrôle de trafic accompli par la couche MAC par l'intermédiaire des probabilités de permission.
  Un mapping est possible entre RTC et les services variables à temps réel qui représentent le trafic vocal. Ainsi le VBRrt de l'ATM, service garanti ou service premium de l'IP et service conversationnel de l'UMTS.
- ITC doit garantir une transmission modérée des paquets et par suite un séjour raisonnable d'un tel paquet dans le tampon. Ceci est souhaitable par des services interactifs comme le web. La probabilité de perte de ce genre des paquets doit être très faible. Pour garantir cette qualité, il faut limiter le nombre d'utilisateurs ITCs acceptés par la fonction CAC ainsi que contrôler leur trafic par la fonction de permission. Un mapping est possible entre ITC et le VBRnrt de l'ATM, service assuré de l'IP ou classe interactive de l'UMTS.
- STC peut supporter un long délai avant de transmettre un paquet mais doit garantir une probabilité de perte d'un paquet très petite. Pour garantir cette qualité de service, un nombre limité d'utilisateurs doit être accepté (fonction CAC). Le choix de la probabilité de permission est aussi un facteur important comme on va le démontrer dans la suite. Un mapping est possible entre STC et le ABR de l'ATM, service olympic de l'IP et le service de base de l'UMTS.

La différence entre ces MTCs est réalisée d'une façon souple en donnant différentes priorités aux différents MTCs. Ainsi, la classe STC a la priorité la plus haute puis la classe ITC et enfin la classe STC. La priorité est donnée d'une façon souple par l'intermédiaire de la fonction de

permission associée à chaque classe. Ceci donne des garanties statistiques aux différents utilisateurs en diminuant l'influence d'une classe sur l'autre. Une garantie stricte nécessite la séparation des différents utilisateurs d'une façon temporelle ou fréquentielle comme on va analyser dans le chapitre suivant. Dans ce chapitre, tous les utilisateurs ont accès à un même canal. D'autre part, le fait que les utilisateurs ITC et STC acceptent un certain délai nécessite l'intégration des tampons dans leurs terminaux, ce qui n'est pas le cas pour les utilisateurs RTC.

## *5.5 La fonction CAC*

En CDMA/PRMA, les ressources sont partagées sur deux niveaux ; le niveau de temps à l'aide des différents slots et le niveau des codes. Une ressource radio élémentaire est alors un code sur un slot. Le nombre *n* de slots dans une trame représente le premier indice de la couche MAC qui influence la fonction CAC. Les autres indices sont liés au nombre maximal de codes sur un slot pour un tel service. Ces indices sont désignés par $K_v$ et $K_d$ définis par :

$P_{error}(k) \leq Pe_v \qquad \forall k \leq K_v$ pour les utilisateurs voix.

$P_{error}(k) \leq Pe_d \qquad \forall k \leq K_d$ pour les utilisateurs data.

où $Pe_v$ et $Pe_d$ sont les valeurs maximales de probabilité d'erreur acceptée par les utilisateurs voix et data, respectivement. $P_{error}(k)$ est la probabilité d'erreur donnée par l'équation 5.5 où $k$ représente les utilisateurs voix et data sur un slot. En pratique $Pe_v > Pe_d$ et donc $K_v > K_d$. Si le nombre total d'utilisateurs simultanés sur un slot est $k \leq K_d$, tous les utilisateurs voix et data reçoivent une qualité acceptable. Si $K_d \leq k \leq K_v$, parmi les $k$ paquets, les paquets vocaux ont une qualité acceptable tandis que les paquets data ne l'ont pas. Enfin, si $K_v. \leq k$ tous les utilisateurs ont une qualité de service inacceptable.

$n$, $K_v$ et $K_d$ contribuent à la détermination de la capacité du système et à la définition de la fonction CAC. Des autres paramètres liés aux utilisateurs sont aussi essentiels dans la définition de la fonction de contrôle d'admission [59, 60].

La fonction de permission associée à chaque type de services joue un rôle fondamental dans la capacité total du système et donc la fonction CAC. Cette fonction utilisée dans ce chapitre est à capacité équivalente et se base sur un seul paramètre qu'il faut déterminer dans notre étude. Ce paramètre est le pourcentage de consommation d'un code par un utilisateur. Ce paramètre n'est pas le même pour les différents services et doit être déterminé pour chaque MTC. Pour le RTC, ce paramètre peut être déterminé puisqu'une QoS précise est considéré avec $Pe_v$ = 1% et une contrainte de temps réel. Pour ITC et STC, la probabilité de perte maximale considérée est de 0.1% mais le temps d'attente moyen n'est pas préconisé dans notre étude. Ce délai contribue donc à la détermination du pourcentage de consommation qui n'est pas le même pour le ITC et le STC. La fonction CAC générale peut être décrite comme suit.

Un nouvel utilisateur qui demande une connexion est acceptée par la fonction CAC si le pourcentage moyen de ressource consommé par cet utilisateur est disponible. On garantit dans ce cas une QoS statistique pour l'utilisateur qui a généralement un débit variable. Les ressources disponibles sont ensuite diminuées de cette valeur.

## *5.6 Le contrôle de trafic*

Le contrôle de trafic est réalisé au niveau MAC par la fonction de permission. Différentes fonctions sont associées aux différents services de façon à réaliser la qualité de service de chaque MTC. Ces fonctions sont définies par plusieurs paramètres et ont le rôle de distribuer

les utilisateurs de la façon le plus homogène possible et aussi de minimiser l'influence d'une telle classe de service sur l'autre. Pour cette raison, trois fonctions différentes sont définies pour les différents MTCs comme dans la figure 5.5.

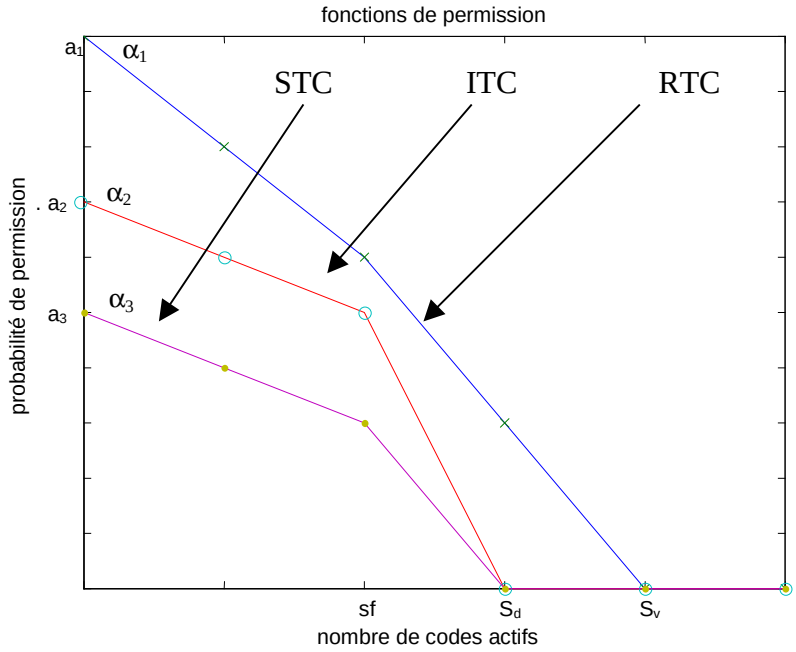



**Figure 5.5 Fonctions de permission**

Dans cette figure, on remarque que la générosité de la fonction diminue à partir des utilisateurs RTC (voix) aux utilisateurs ITC (web) et enfin vers les utilisateurs STC (data qui comprennent le transfert des fichiers et l'Email). Ceci donne une priorité maximale aux utilisateurs RTC puis ITC et enfin STC. Les fonctions possèdent plusieurs paramètres qui sont le point de départ, l'angle d'inclinaison, le point de déviation et le point de zéro.
Le point de déviation est toujours choisi égal au spreading factor. Les points de départs sont $a_1$, $a_2$ et $a_3$, les angles d'inclinaisons sont $\alpha_1$, $\alpha_2$ et $\alpha_3$. les points de zéros sont égaux à $S_d$ pour les utilisateurs web et data puisqu'on a la même limite d'erreur tandis qu'il est égal à $S_v$ pour les utilisateurs vocaux [61, 62]. Ce nombre correspond au nombre maximal de codes actifs acceptés avec une QoS convenable.
Les différents paramètres vont être choisis par la suite afin de respecter la qualité de service demandée par chaque utilisateur tout en maximisant la capacité totale du système. L'étude mathématique est faite pour les utilisateurs voix et transfert des fichiers seulement. Une simulation est ensuite effectuée pour les utilisateurs web ainsi que le multiplexage de services.

## *5.7 Modélisation mathématique*

Dans ce paragraphe, on présente notre modèle mathématique développé pour le protocole S-CDMA/PRMA pour le sous-système voix et data. Le sous-système voix contient des sources ON-OFF tandis qu'on considère que le sous-système data contient des sources de transfert de fichiers. Le modèle est basé sur les chaînes de Markov et présente l'intérêt de décrire le comportement du protocole en fonction des différents paramètres. On utilise la méthode de calcul de la matrice de transition pour ensuite déduire l'état stationnaire du canal. Des simplifications sont introduites pour faciliter le calcul et sont ensuite justifiés par des

simulations utilisant NS (Network Simulator). Notons enfin que le calcul est fait pour les cas particuliers des utilisateurs voix seuls puis des utilisateurs fichiers seuls. Les cas plus compliqués de multiplexage de service sont étudiés par simulation.

### 5.7.1 Sous-système de voix

Les utilisateurs voix sont des sources ON-OFF qui transitent entre le silence et la parole. Quand un utilisateur passe de l'état OFF à l'état ON, il essaye de réserver un slot par contention suivant le protocole S-CDMA/PRMA. Le système se comporte donc comme un ensemble des sources ON-OFF de nombre $M_v$ qui est le nombre accepté par la fonction CAC. Ces utilisateurs essayent de réserver un code dans un slot quand ils ont des paquets à envoyer. Les paramètres d'une telle source sont :

La probabilité de passer de ON (qui a une durée moyenne de $t_{on}$ ) à OFF pendant $T_f$ :

$$\sigma_v = 1-exp(-T_f/t_{on}) \quad (5.8)$$

La probabilité de passer de OFF (qui a une durée moyenne de $t_{off}$ ) à ON pendant $T_f$ :

$$\gamma_v = 1-exp(-T_f/t_{off}) \quad (5.9)$$

La probabilité d'être dans l'état ON :

$$\pi_{on} = t_{on} /( t_{on} + t_{off} ) \quad (5.10)$$

La probabilité d'être dans l'état OFF :

$$\pi_{off} = t_{off} /( t_{on} + t_{off} ) \quad (5.11)$$

Si un utilisateur passe du silence à la parole, il fait sur le slot suivant un tirage de Bernoulli de paramètre $p_v(x)$ où $x$ est le nombre de codes sur le même slot dans la trame précédente. Si l'utilisateur ne réussit pas ce tirage, il doit réessayer sur le slot suivant. Dans le cas positif, le paquet est envoyé sur le slot qui sera réservé si le nombre total de codes actifs sur le slot est inférieur à $S_v$ qui est aussi le seuil de contrôle nommé « le point de zéro » dans le paragraphe précédent. Remarquons que $Y_m$ est le nombre de codes sur le slot mentionné dans la trame $m$, et $T_m$ est le nombre de codes actifs sur les différents slots dans la trame $m$. on a :

$Y_{m+1} = Y_m$ +(utilisateurs entrants de $M_v - T_m$ sources OFF) – (utilisateurs sortants de $Y_m$ sources ON). On remarque que $T_m$ dépend de $Y_m$.

Le nombre d'utilisateurs entrants est indépendant de nombre d'utilisateurs avant $Y_m$ et de même pour le nombre d'utilisateurs sortants. Ceci est dû au caractère sans mémoire des sources exponentielles ON-OFF. $Y_m$ est alors une chaîne de Markov supposée homogène [29]. La figure 5.6 décrit ce modèle.

Soit $P_{xy}$ la probabilité de passage de l'état $x$ à l'état $y$ d'un tel slot où $x$ et $y$ sont arbitraires et représentent le nombre de codes sur le slot. Pour pouvoir calculer cette probabilité, on suppose que les autres slots de nombre ($n$-1) possèdent le même nombre de codes. Si on suppose que $t$ est le nombre de codes actifs dans la trame $n$, $(t-x)/(n-1)$ codes sont présents sur chacun des ($n$-1) slots autre que notre slot étudié qui a $x$ codes. Dans la trame suivante, le nombre total de codes actifs devient $t'$ et celui de codes sur le slot mentionné devient $y$.

La probabilité de transition est :

$$P_{xy} = \Pr\{Y_{m+1} = y | Y_m = x\} = \Pr\{Y_m + NI_e - NI_s = y | Y_m = x\} =$$

$$\Pr\{x + NI_e - NI_s = y | Y_m = x\} = \sum_a \Pr\{(NI_e = a | Y_m = x) \cap (NI_s = a - y + x | Y_m = x)\} \Rightarrow$$

$NI_e$ est le nombre d'utilisateurs entrants sur le slots et $NI_s$ est le nombre d'utilisateurs sortants.

$$x \geq y \qquad P_{xy} = \sum_{a=0}^{y} \Pr\{NI_i = a | Y_m = x\} \times \Pr\{NI_o = a - y + x | Y_m = x\}$$
$$x < y \qquad P_{xy} = \sum_{a=y-x}^{y} \Pr\{NI_i = a | Y_m = x\} \times \Pr\{NI_o = a - y + x | Y_m = x\} \tag{5.12}$$

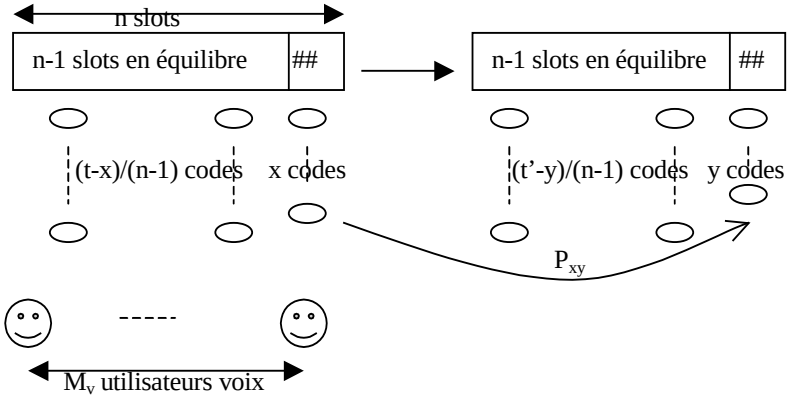



**Figure 5.6 Modèle de canal (utilisateurs voix)**

$NI_s$ est le nombre d'utilisateurs qui quittent le slot. Il y a deux raisons pour quitter un slot. La première est le passage de l'état ON à l'état OFF. La deuxième est quand un utilisateur réussit son tirage de Bernoulli mais découvre ensuite que le nombre de codes actifs sur le slot est supérieur à la limite de réservation $S_v$ (qui est aussi le seuil de contrôle). Il doit donc quitter le slot et recommencer la contention. D'où :

$$\begin{aligned}
&si \quad x \leq S_v \qquad \Pr\{NI_o = a - y + x | Y_m = x\} = C_x^{a-y+x} \times \sigma_v^{a-y+x} \times (1-\sigma_v)^{y-a} \\
&si \quad (x > S_v) \& (y \leq S_v) \Rightarrow a = 0, \quad \Pr\{NI_o = x - y | Y_m = x\} = C_{S_v}^{S_v - y} \times \sigma_v^{S_v - y} \times (1-\sigma_v)^{y} \\
&si \quad (x > S_v) \& (y > S_v) \Rightarrow a = 0, \quad \Pr\{NI_o = x - y | Y_m = x\} = 0.
\end{aligned} \tag{5.13}$$

$NI_e$ est le nombre d'utilisateurs entrants le slot mentionné. Ce nombre provient de deux ensembles. Le premier contient les utilisateurs qui passent à l'état ON pendant la trame en question. Le second ensemble est formé des utilisateurs qui passaient à l'état ON pendant les trames précédentes mais qui n'ont pas pu accéder au canal jusqu'à l'instant. Cet ensemble sera approché par le nombre moyen de ses populations qui est calculé comme suit.

Pour un nombre $t$ des utilisateurs ON sur une trame, le nombre moyen d'utilisateurs arrivants à cette trame est $\gamma_v(M_v - t)$. Si chaque slot contient $t/n$ codes, la probabilité d'accéder au slot est $p_v(t/n)$. Si on considère la ième trame avant la trame courante $m$, le nombre d'utilisateurs en provenance de cette trame qui échouent leurs tirages de Bernoulli et atteint la trame $m$ sera :

$$W_i(t) = \gamma_v \times (M_v - t) \times [1 - p_v(t/n)]^{i \times n} \tag{5.14}$$

le nombre total d'utilisateurs de cet ensemble et pour un nombre donné d'utilisateurs ON $t$ est :

$$W(t) = \sum_{i=1}^{\infty} W_i(t) = \sum_{i=1}^{\infty} \gamma_v \times (M_v - t) \times [1 - p_v(t/n)]^{i \times n} = \frac{\gamma_v \times (M_v - t) \times [1 - p_v(t/n)]^n}{1 - [1 - p_v(t/n)]^n} \tag{5.15}$$

et le nombre moyen des utilisateurs de cet ensemble est :

$$\overline{W} = E(W(t)) = \sum_{t=0}^{M_v} \Pr(T_m = t) \times W(t) \qquad (5.16)$$

La probabilité d'entré au slot mentionné sera :

$$\Pr\{NI_e = a | Y_m = x\} = \sum_{t=x}^{M_v - a} \Pr\{(NI_e = a | T_m = t) \cap (T_m = t | Y_m = x)\} =$$

$$\sum_{t=x}^{M_v - a} \sum_{h=a-\overline{W}}^{M_v - t} \Pr\{(NT_e = h | T_m = t) \cap (NI_e = a | NT_e = h) \cap (T_m = t | Y_m = x)\} = \qquad (5.17)$$

$$\sum_{t=x}^{M_v - a} \sum_{h=a-\overline{W}}^{M_v - t} \Pr\{NT_e = h | T_m = t\} \times \Pr\{NI_e = a | NT_e = h\} \times \Pr\{T_m = t | Y_m = x\}$$

$NT_e$ est le nombre d'utilisateurs qui transitent de l'état OFF vers l'état ON pendant la trame *m*. Le nombre total d'utilisateurs entrants pendants la trame *m* est donc $NT_e + E(W)$, avec :

$$\Pr\{T_m = t | Y_m = x\} = C_{M_v - \overline{W} - x}^{t-x} \times \pi_{on}^{t-x} \times \pi_{off}^{M_v - \overline{W} - t} \qquad (5.18)$$

$$\Pr\{NT_e = h | T_m = t\} = C_{M_v - \overline{W} - t}^{h} \times \gamma_v^h \times (1 - \gamma_v)^{M_v - \overline{W} - t - h} \qquad (5.19)$$

$$\Pr\{NI_e = a | NT_e = h\} = C_{h+\overline{W}}^{a} \times p_v^a \times (1 - p_v)^{h + \overline{W} - a} \qquad (5.20)$$

$p_v$ est la probabilité qu'un utilisateur entrant dans la trame tente d'accéder au slot mentionné. Pour calculer $p_v$ on suppose que les codes sont distribués d'une façon homogène sur les slots autre que celui étudié. Si on suppose que *t* utilisateurs sont ON, il y a $(t - x)$ codes sur les autres slots, Soit $(t-x)/(n-1)$ codes sur chacun. La probabilité de permission d'accès sur un tel slot est de $p_v[(t-x)/(n-1)]$ sauf pour le slot étudié qui possède une probabilité de permission de $p_v(x)$. Un utilisateur arrive sur un slot aléatoirement et commence ses tentatives. La figure 5.7 présente le processus d'accès d'un tel utilisateur.

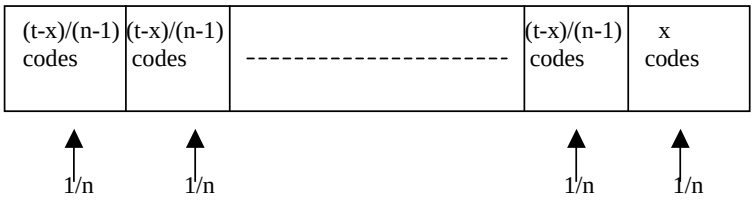



**Figure 5.7 Processus d'accès**

Notons qu'en LEOS, le RTD est considéré égal au temps aller retour et donc un utilisateur qui accède au canal, envoie son paquet et attend la réponse, qui viendra dans une durée de trame, il ne pourra pas retransmettre le paquet en cas de perte à cause d'erreur d'interférence. En considérant ce fait, on calcule la probabilité de contention sur un slot :

$$p_v = (1/n) \times p_v(x) + (1/n) \times \{1 - p_v[(t-x)/(n-1)]\} \times p_v(x) +$$

$$(1/n) \times \{1 - p_v[(t-x)/(n-1)]\}^2 \times p_v(x) +$$

$$\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots + (1/n) \times \{1 - p_v[(t-x)/(n-1)]\}^{n-1} \times p_v(x) =$$

$$(1/n) \times p_v(x) \times \left\{ \begin{array}{l} 1 + \{1 - p[(t-x)/(n-1)]\} + \\ \{1 - p_v[(t-x)/(n-1)]\}^2 + \ldots\ldots\ldots + \{1 - p_v[(t-x)/(n-1)]\}^{n-1} \end{array} \right\} \Rightarrow$$

$$p_v = (1/n) \times p_v(x) \times \frac{1 - \{1 - p_v[(t-x)/(n-1)]\}^n}{\{p_v[(t-x)/(n-1)]\}} \quad (5.21)$$

En utilisant ces résultats, on obtient la matrice de transition à $M_v$ états comme suit :

$$P = \left\lfloor P_{xy} \right\rfloor_{\substack{0 \le x \le M_v \\ 0 \le y \le M_v}} \quad (5.22)$$

et on peut calculer l'état stationnaire $\pi = [\pi_k]_{0 \le k \le M_v}$ par le système d'équations :

$$\begin{aligned} &\pi \times P = \pi \\ &\sum_k \pi_k = 1 \end{aligned} \quad (5.23)$$

où $\pi_k$ est la probabilité d'avoir $k$ utilisateurs sur un tel slot dans l'état stationnaire. Cette probabilité décrit l'état stationnaire du système et sert à calculer les différents paramètres de QoS. Pour calculer la probabilité de perte totale, on doit calculer la probabilité de perte due à l'interférence CDMA et celle de drop due au rejet d'un paquet à cause d'une attente inacceptable.

La probabilité d'erreur sur un slot qui possède $k$ codes actifs est $( 1 - Q_E ( k ) )$. La probabilité d'erreur dans l'état stationnaire est donc calculée par la formule :

$$P_{error} = \sum_{k=0}^{M_v} \pi_k \times (1 - Q_E(k)) \quad (5.24)$$

La probabilité de drop est plus complexe à déterminer. Un paquet est rejeté au début d'un talkspurt s'il attend plus que $D$ slots avant d'être envoyé ($D=n$ dans notre calcul). Or, un utilisateur échoue son tirage de Bernoulli sur un slot qui possède $k_i$ codes avec une probabilité $( 1 - p_v(k_i) )$. Il n'envoie pas sur les différents slots d'une trame qui ont $(k_j)_{1 \le j \le n}$ avec une probabilité de $\Pi ( 1 - p ( k_j ) )_{1 \le j \le n}$. La moyenne géométrique de cette valeur est la probabilité moyenne dans l'état stationnaire qu'un utilisateur ne choisisse pas un tel slot. On note cette probabilité par $\upsilon = \upsilon ( k_1 , k_2 , \ldots, k_n )$ d'où :

$$\upsilon = \sqrt[n]{\prod_{i=1}^{n} (1 - p(k_i))} \quad (5.25)$$

la probabilité qu'un paquet attend $j$ slots est :

$$P_w(j) = (1 - \upsilon) \times \upsilon^{j-1} \quad (5.26)$$

En utilisant le calcul fait dans le chapitre 3 pour déterminer la probabilité de drop on obtient :

$$P_{drop}(k_1, k_2, ....., k_n) = \sigma_v \times \frac{\upsilon^D}{1 - (1 - \sigma_v) \times \upsilon^n} \quad (5.27)$$

La distribution des codes dans les différents slots d'une trame dans l'état stationnaire est donnée par l'équation :

$$\theta(k_1, k_2, ....., k_n) = \prod_{i=1}^{n} \pi_{k_i} \quad (5.28)$$

La probabilité de drop dans l'état stationnaire est :

$$P_{drop} = \sum_{k_1=0}^{m} \sum_{k_2=0}^{m} ..... \sum_{k_n=0}^{m} \theta(k_1, k_2, ....., k_n) \times P_{drop}(k_1, k_2, ....., k_n) \quad (5.29)$$

d'après les équations 5.24 et 5.29 on obtient la probabilité de perte qui est le paramètre décisif de la QoS des utilisateurs voix :

$$P_{loss} = P_{error} + P_{drop} \quad (5.30)$$

Cette probabilité dépend de plusieurs facteurs, la fonction de permission le nombre de slots dans une trame, la durée d'une trame.. Ces facteurs sont donc essentiels pour déterminer la capacité du système. Des applications de calcul sont présentées dans la suite.

### 5.7.2 Sous-système data

Le sous-système de data étudié dans cette section et modélisé mathématiquement est constitué des sources de transfert des fichiers. Ces sources décrites dans le chapitre 3 ont une arrivée Poissonienne de paramètre $\lambda$ et des fichiers de longueur géométrique de moyen $L_s$ paquets. On a démontré dans le chapitre 3 que ces sources peuvent être approchées par des sources ON-OFF notées A-F (pour Attente et Fichier) avec les paramètres suivants :

La probabilité d'arrivée d'une rafale :

$$\sigma_d = 1 - exp(-\lambda T_f) \quad (5.31)$$

la probabilité de finir la transmission de la rafale :

$$\gamma_d = 1 / L_s \quad (5.32)$$

On définit la probabilité d'être dans l'état F=ON par :

$$\pi_F = \frac{L_s T_f}{1/\lambda + L_s T_f} \quad (5.33)$$

Et celle d'être dans l'état OFF=A par :

$$\pi_A = \frac{1/\lambda}{1/\lambda + L_s T_f} \quad (5.34)$$

En utilisant ce résultat, on peut modéliser le système de la même façon que le sous-système voix. Mais pour les utilisateurs data, un paquet peut attendre longtemps avant d'être transmis. Un utilisateur stocke ses paquets dans un tampon en attendant la réservation d'un slot pour commencer à transmettre sur un code de ce slot. Supposons que la taille du tampon est infinie et qu'aucun paquet n'est perdu à cause du remplissage du tampon. La seule raison de perte est l'interférence due à l'accès multiple CDMA puisqu'on suppose qu'un utilisateur qui réussit son tirage de Bernoulli de paramètre $p_d(x)$ ($x$ est le nombre de codes actifs sur le slot dans la trame précédente) transmet son paquet qui peut être perdu à cause d'interférence. Si ce paquet est perdu, on ne pourra pas le retransmettre au niveau MAC. Notons que le slot est réservé si le nombre de codes actifs sur le slot est inférieur à la limite de réservation $S_d$ qui est aussi la limite de contrôle. Il n'y a plus qu'une probabilité de perte causée par les erreurs, mais un deuxième paramètre de QoS s'impose ; c'est le temps moyen de séjour d'un paquet dans le tampon. En supposant que le nombre d'utilisateurs data est $M_d$ et avec les paramètres des sources data, on obtient la figure 5.8.

C'est exactement la même modélisation du canal qu'avec changement des paramètres. Le calcul de l'état stationnaire est comme pour le sous-système voix. On obtient :

$$\begin{aligned}
&si \quad x \le S_d \qquad \Pr\{NI_o = a - y + x \,|\, Y_m = x\} = C_x^{a-y+x} \times \sigma_d^{a-y+x} \times (1-\sigma_d)^{y-a} \\
&si \quad (x > S_d) \,\&\, (y \le S_d) \Rightarrow a = 0, \quad \Pr\{NI_o = x - y \,|\, Y_m = x\} = C_{S_d}^{S_d - y} \times \sigma_d^{S_v - y} \times (1-\sigma_d)^{y} \\
&si \quad (x > S_d) \,\&\, (y > S_d) \Rightarrow a = 0, \quad \Pr\{NI_o = x - y \,|\, Y_m = x\} = 0.
\end{aligned} \quad (5.35)$$

D'autre part :

$$\overline{W} = \sum_{t=0}^{M_d} \Pr(T_m = t) \times W(t) = \sum_{t=0}^{M_d} \Pr(T_m = t) \frac{\gamma_d \times (M_d - t) \times [1 - p_d(t/n)]^n}{1 - [1 - p_d(t/n)]^n} \quad (5.36)$$

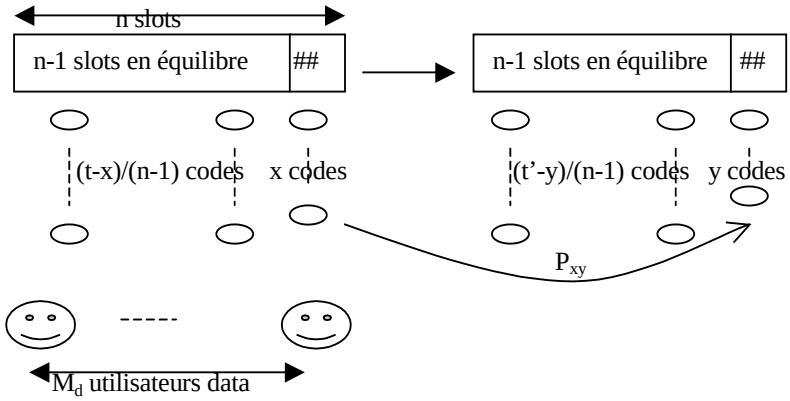



**Figure 5.8 Modèle de canal (utilisateurs data)**

$$\Pr(NI_e = a | Y_m = x) = \sum_{t=x}^{M_d - a} \sum_{h=a-\overline{W}}^{M_d - t} \Pr\{NT_e = h | T_m = t\} \times \Pr\{NI_e = a | NT_e = h\} \times \Pr\{T_m = t | Y_m = x\} \quad (5.36)$$

Avec :

$$\Pr\{T_m = t | Y_m = x\} = C_{M_d - \overline{W} - x}^{t-x} \times \pi_F^{t-x} \times \pi_A^{M_d - \overline{W} - t} \quad (5.37)$$

$$\Pr\{NT_e = h | T_m = t\} = C_{M_d - \overline{W} - t}^{h} \times \gamma_d^h \times (1 - \gamma_d)^{M_d - \overline{W} - t - h} \quad (5.38)$$

$$\Pr\{NI_e = a | NT_e = h\} = C_{h+\overline{W}}^{a} \times p_d^a \times (1 - p_d)^{h + \overline{W} - a} \quad (5.39)$$

$$p_d = (1/n) \times p_d(x) \times \frac{1 - \{1 - p_d[(t-x)/(n-1)]\}^n}{\{p_d[(t-x)/(n-1)]\}} \quad (5.40)$$

En utilisant ces résultats, on obtient la matrice de transition à $M_d$ états comme suit :

$$P = \left\lfloor P_{xy} \right\rfloor_{\substack{0 \le x \le M_d \\ 0 \le y \le M_d}} \quad (5.41)$$

et on peut calculer l'état stationnaire $\pi = [\pi_k]_{0 \le k \le M_d}$ par le système d'équations :

$$\begin{aligned} &\pi \times P = \pi \\ &\sum_k \pi_k = 1 \end{aligned} \quad (5.42)$$

où $\pi_k$ est la probabilité d'avoir $k$ utilisateurs sur un slot dans l'état stationnaire. Cette probabilité décrit l'état stationnaire du système et sert à calculer les différents paramètres de QoS.

La probabilité de perte, qui est aussi la probabilité d'erreur dans l'état stationnaire, est donc calculée par la formule :

$$P_{error} = \sum_{k=0}^{M_v} \pi_k \times (1 - Q_E(k)). \quad (5.43)$$

Passons maintenant au calcul du délai moyen d'attente d'un paquet. On calcule d'abord la probabilité d'attente pour en déduire le délai.

La probabilité d'attendre *j* slots avant de réussir un tirage de Bernoulli dans l'état stationnaire est celle d'échouer sur *j-1* slots pour réussir sur le j$^{ème}$. Cette probabilité est calculée par :

$$P(w=j)=\left[\sum_{i=0}^{M_d}\pi_i\times(1-p_d(i))\right]^{j-1}\times\left[\sum_{i=0}^{M_d}\pi_i\times p_d(i)\right]=\nu^{j-1}\times\omega \qquad (5.44)$$

Le délai moyen en nombre de slots est alors la somme des probabilités d'attente multipliées par les temps d'attente correspondants :

$$d=\sum_{j=0}^{\infty}P(w=j)\times j=\sum_{j=0}^{\infty}\nu^{j-1}\times\omega\times j=\frac{\omega}{(1-\nu)^2} \qquad (5.45)$$

Ce délai détermine la qualité de service fournie pour les utilisateurs data. Un temps maximal d'attente peut être imposé par un tel service. Cette limite, avec celle sur la probabilité de perte vont servir pour déterminer la capacité totale du système. Cette capacité dépend de plusieurs paramètres comme le nombre de slots dans une trame, la fonction de permission, le délai d'une trame….

## *5.8 Discussions analytiques et par simulation*

Dans ce paragraphe, on étudie analytiquement et par simulation la performance du protocole S-CDMA/PRMA. Les utilisateurs voix ainsi que les utilisateurs de transfert des fichiers sont étudiés analytiquement et par simulation tandis que les autres cas du système ne sont étudiés que par simulation. On va étudier chaque cas des MTCs (RTC, ITC et STC) à part afin de choisir les paramètres du système. Puis, en utilisant ces paramètres, on étudie le cas de tous les services multiplexés.

Le simulateur NS est utilisé pour simuler un système LEOS comme décrit dans le deuxième chapitre. Une technologie multi-faisceaux est utilisée. Dans chaque faisceau, on a 24 de fréquences porteuses. Chaque fréquence a une bande passante montante égale à la bande passante descendante de 155Kb/s. Le G/W a une bande de 155Mb/s ainsi que la liaison inter-satellite. Les cellules utilisées au niveau MAC sont insérées dans des slots de durée (20/*n*)ms. La longueur d'un paquet (cellule) peut être calculée par $(155\times(20/n))/sf = 194$ car $sf*n = 16$ soit 194 bits avec les entêtes et 160 bits sans les entêtes (qui donne aux voix le débit de 8Kb/s au niveau application et 9.6Kb/s au niveau MAC).

### 5.8.1 RTC (utilisateurs voix)

Dans cette section, on va déterminer le choix des paramètres du canal et de protocole qui réalisent la meilleure performance pour les utilisateurs voix représentés par des sources ON-OFF. Les paramètres utilisés pour les sources ON-OFF sont comme décrit dans [41] et résumés par :

Le temps moyen de parole est de $t_{on}$ = 1 seconde.

Le temps moyen de silence est de $t_{off}$ = 1.35 secondes

Pour trois cas de spreading factor (*sf* = 8, 4, 2), on étudie trois cas de fonctions de permission (généreuse, moyenne et restrictive). La différence entre ces fonctions est dans l'angle d'inclinaison puisqu'on suppose que le point de départ est 0.5, le point de déviation est *sf* et le point de zéro est la limite $S_v$. La figure 5.9 présente ces fonctions. Pour chacun des cas, on calcule la capacité du système qui est le nombre d'utilisateurs qu'on peut accepter par la fonction CAC avec une QoS acceptable (perte<1%). Le tableau 5.1 présente les résultats.

**Tableau 5.1 Capacité du système**

| Sf \ fonction | généreuse | Moyenne | Restrictive |
|---|---|---|---|
| *sf*=8 | 30 | 33 | 29 |
| *sf*=4 | 35 | 37 | 33 |
| *sf*=2 | 40 | 42 | 38 |

D'après ce tableau, on remarque q'une fonction moyenne donne toujours des résultats meilleurs. Ceci est dû au fait que grâce à une fonction modérée, un compromis est fait entre la probabilité de drop et celle d'erreur. En effet, une fonction généreuse augmente le nombre de codes actifs sur le slot et la probabilité d'erreur tandis qu'une fonction restrictive augmente le refus d'accès au canal et la probabilité de drop.
Les fonctions choisies sont présentées dans la figure 5.10 pour les différents *sf*. Pour chacun des cas, on trace la distribution des utilisateurs sur les différents slots dans la figure 5.11. On remarque dans cette figure que la distribution des utilisateurs tend vers la limite de contrôle (qui est aussi la limite de QoS) quand le nombre d'utilisateurs augmente. Cette distribution reste acceptable pour le cas de 40 utilisateurs quand le $sf = 2$ tandis qu'elle dévient concentrée sur la limite de contrôle dans les autres cas. Ce résultat diminue la probabilité de perte dans le cas où $sf = 2$ comme on verrait dans la figure 5.12.
Dans la figure 5.12 on trace la probabilité de perte pour les différents cas de *sf*. On remarque que quand le spreading factor est égal à 2, la probabilité de perte atteint sa limite à 42 utilisateurs. La capacité de système est de 42 utilisateurs dans ce cas. Elle est de 33 et 36 dans le cas de $sf = 4$ et $sf = 8$ respectivement. La raison essentielle de ce résultat est la probabilité de drop qui devient dominante quand le spreading factor augmente. En effet, quand *sf* augmente, avec la même bande passante le nombre de slots dans une trame *n* diminue. Le nombre total de tentatives qui est égal à *n* diminue. La probabilité de réussite diminue aussi, ce qui augmente l'attente d'un utilisateur pour accéder au canal et aussi la probabilité de drop. Une deuxième raison imprévisible joue un rôle important dans ce résultat. Le fait que la limite de QoS est de 3, 5 et 10 pour $sf = 2$ ($n = 8$), $sf = 4$ ($n = 4$) et $sf = 8$ ($n = 2$) fait que le nombre d'utilisateurs qui peuvent être actifs sur le canal avec une QoS acceptée est de $3 \times 8 = 24$ quand $sf = 2$, $5 \times 4 = 20$ quand $sf = 4$ et $10 \times 2 = 20$ quand $sf = 8$. Le cas de $sf = 2$ et $n = 8$ va être choisi pour le canal dans la suite, ainsi que dans l'étude de cas des utilisateurs STC et ITC.
On mentionne à ce stade que même si la fonction de contrôle d'admission CAC agit d'une façon souple et peut accepter un nombre élevé d'utilisateurs avec une garantie statistique, le protocole d'accès contrôle l'accès au canal et gère la QoS des utilisateurs d'une façon très acceptable. On remarque que la QoS est garantie la plupart de temps même dans un cas critique de temps réel. Par la suite, on va démontrer que ce protocole peut gérer aussi la QoS pour les utilisateurs data en garantissant une perte minime pour ces utilisateurs. Une différenciation de services est même faisable avec une bonne efficacité.

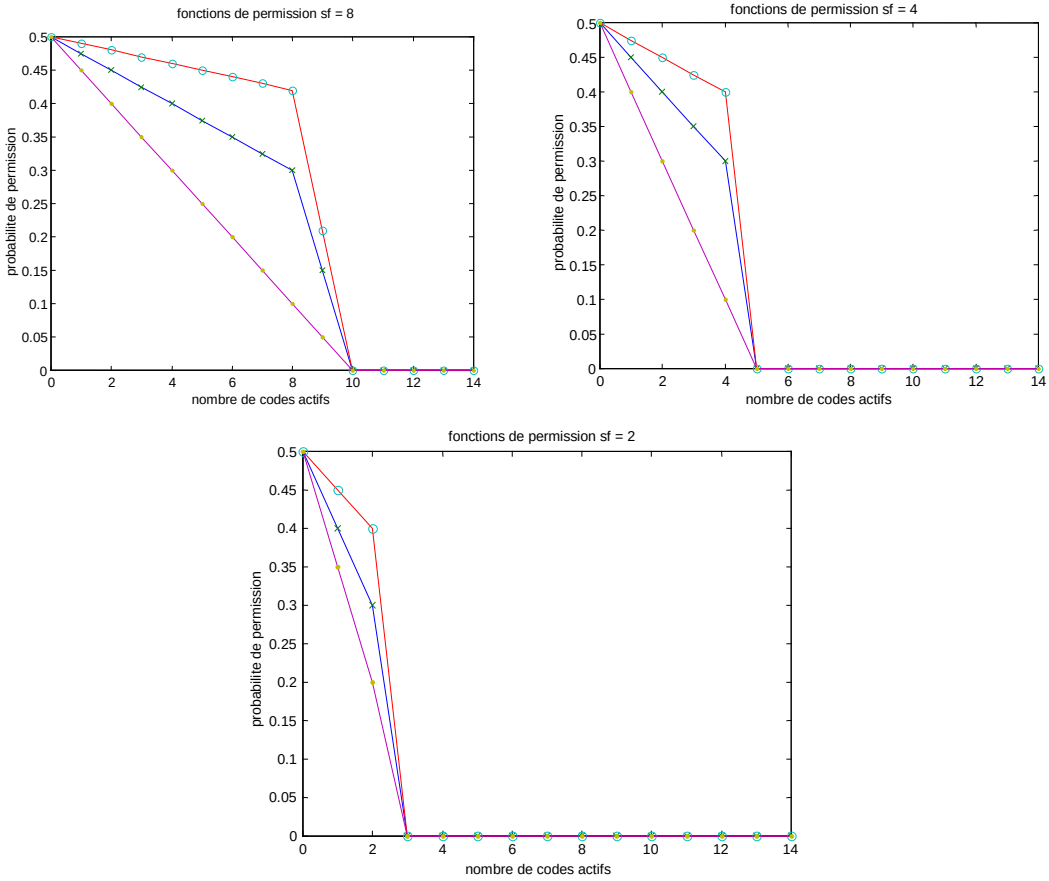



**Figure 5.9 Fonctions de permissions et spreading factors**

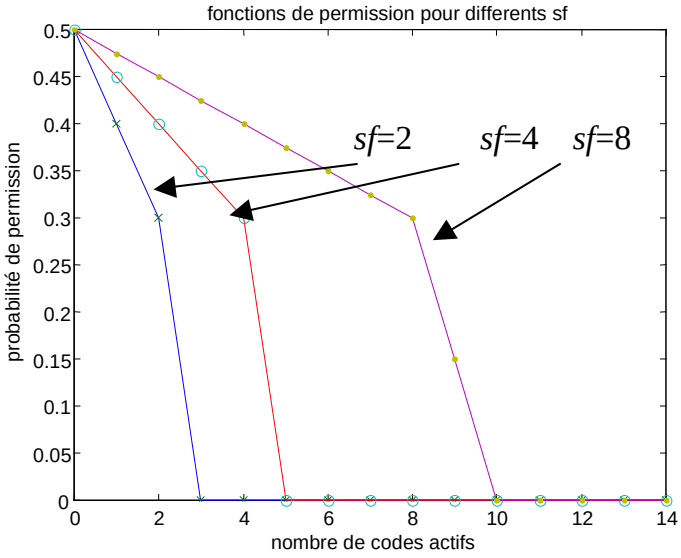



**Figure 5.10 Les fonctions de permissions étudiées**

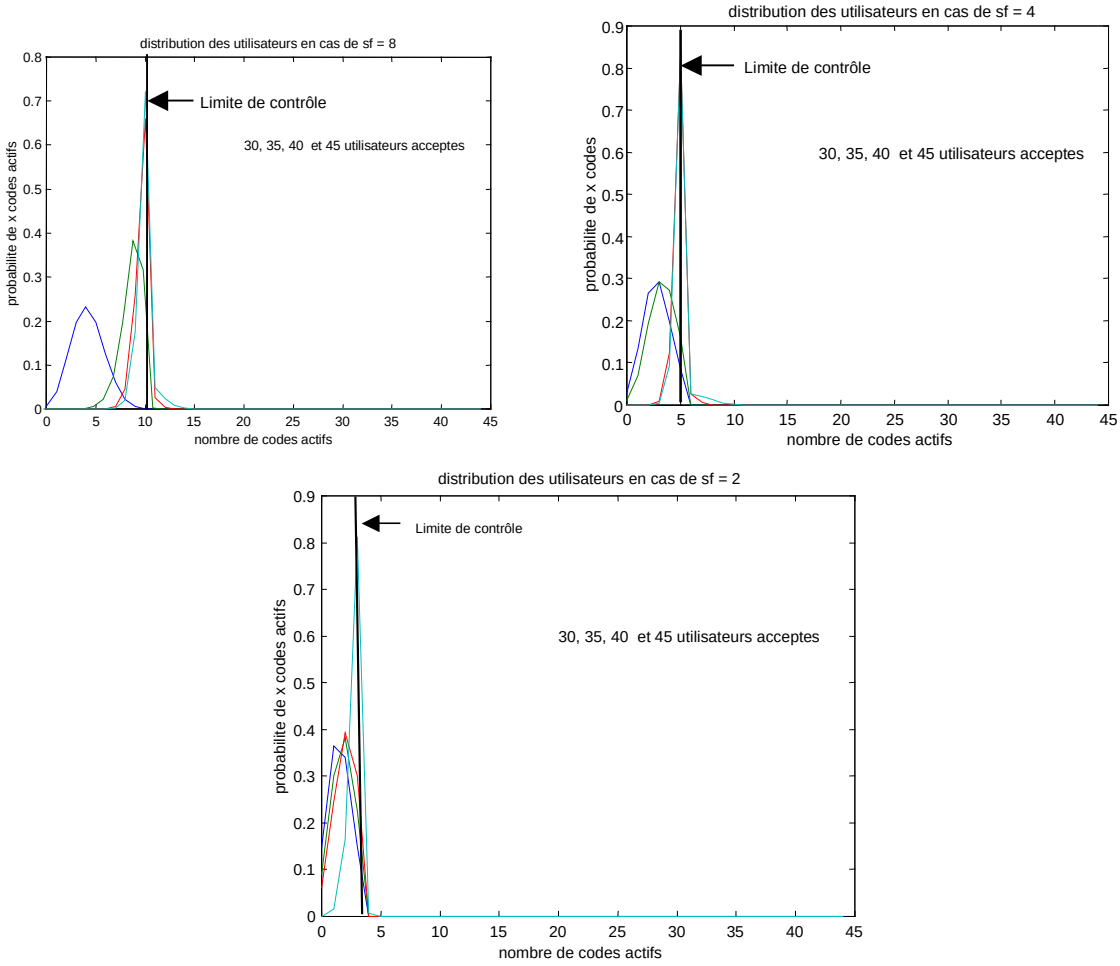



**Figure 5.11 La distribution des utilisateurs**

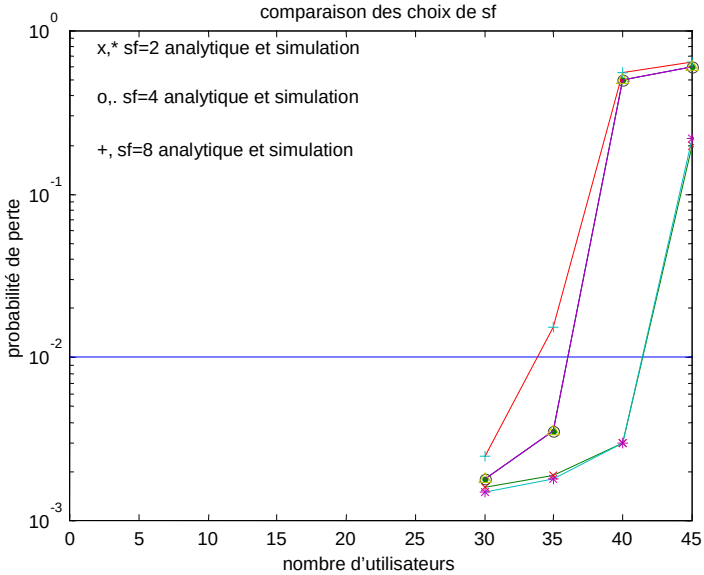



**Figure 5.12 La probabilité de perte pour les utilisateurs voix**

### 5.8.2 STC (utilisateurs data)

Dans cette section, on étudie analytiquement et par simulation le comportement de notre protocole S-CDMA/PRMA dans le cas des utilisateurs data. Ces utilisateurs sont représentés dans cette section par des sources de transfert de fichier avec les paramètres suivants :
Taux d'arrivée par seconde est $\lambda = 0.5$.
Longueur moyen d'une rafale est $L_s = 100$ paquets.
Le nombre de slots est supposé égal à 8 tandis que le spreading factor est de 2. Ceci donne une limite de réservation égale à la limite de QoS de :

$$S_d = \max(k \mid P_{error}(k) \le 0.1\%)$$

C'est aussi le seuil de contrôle optimal comme on va démontrer dans la suite, il est de 3 codes dans notre cas.
Dans la figure 5.13, trois fonctions de permission sont proposées. La première est généreuse et permet l'accès au canal avec une probabilité relativement élevée. La deuxième est une fonction modérée, elle descend avec une seule pente vers la limite de contrôle qui est de 3. La troisième suppose que le seuil de contrôle est 2 et inférieur à la limite de réservation. Cette fonction est très restrictive afin de limiter le nombre total d'utilisateurs sur le slot.
Dans la figure 5.14, on trace la distribution des utilisateurs pour les trois fonctions de permission et pour plusieurs cas des utilisateurs acceptés par la fonction CAC. On remarque que pour la deuxième fonction de permission, qui est la fonction modérée, la distribution des utilisateurs est le plus homogène, surtout lorsque plusieurs utilisateurs sont acceptés. En effet, quand 40 utilisateurs sont acceptés, 3 codes actifs sont présents la plupart de temps dans le cas de *f1* et *f3* avec une probabilité non négligeable de dépasser cette limite contrairement au cas de *f2*. Ce résultat est prévisible pour la fonction *f1* mais pour la fonction *f3* un processus d'instabilité produit cet effet. Le fait qu'on ne permette pas aux utilisateurs d'accéder au système augmente le nombre d'utilisateurs qui attendent un slot libre. Dès qu'un slot se libère plusieurs utilisateurs y accèdent et le nombre total de codes actifs sur ce slot dépasse la limite de réservation. Les utilisateurs doivent quitter le slot et ainsi de suite. Cet effet augmente la probabilité de perte et diminue la capacité du système. Ce résultat est démontré dans la figure 5.15. Dans cette figure, la probabilité de perte d'un paquet data est calculée en fonction de nombre d'utilisateurs dans le système. Cette probabilité est limite pour 35, 40 et 37 utilisateurs pour la fonction *f1*, *f2* et *f3*, respectivement. La capacité du système est donc maximisée pour *f2* grâce à une distribution homogène des utilisateurs sur le canal.

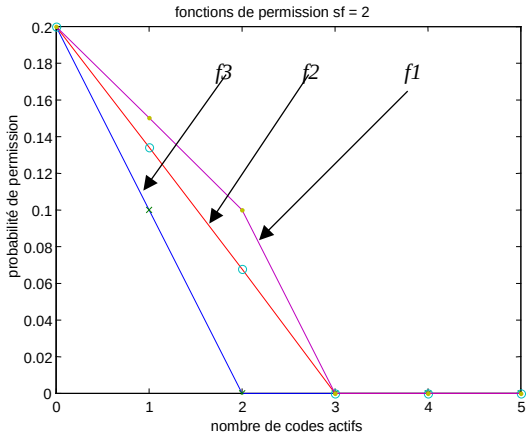



**Figure 5.13 Fonctions de permission (utilisateurs data)**

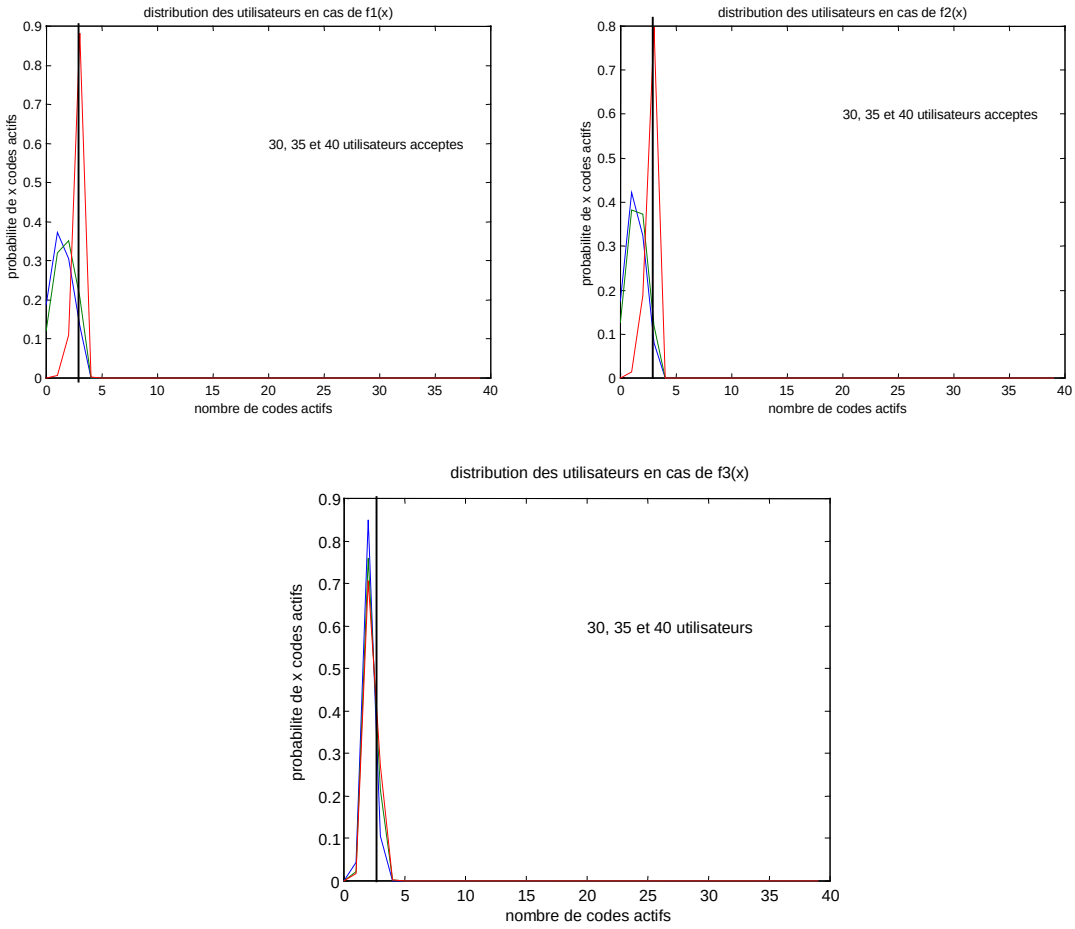



**Figure 5.14 Distribution des utilisateurs (utilisateurs data)**

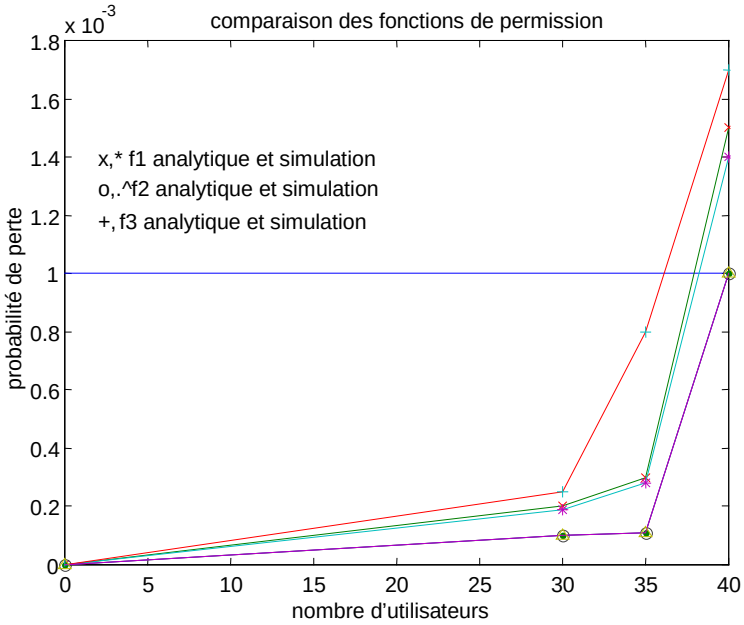



**Figure 5.15 Probabilité de perte (utilisateurs data)**

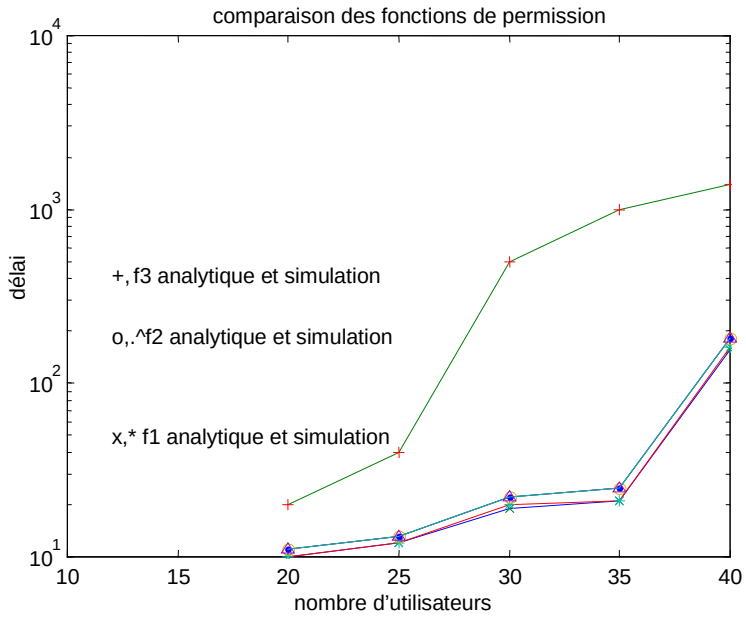



**Figure 5.16 délai d'attente (utilisateurs data)**

Enfin la figure 5.16 montre le délai d'un paquet pour les différentes fonctions de permission. Ce délai est minimisé quand la fonction est généreuse. Elle augmente légèrement pour la fonction modérée, mais dramatiquement quand la fonction devient très restrictive. Ceci démontre notre discussion sur l'instabilité du système en cas d'une fonction restrictive. Notons enfin que les résultats analytiques sont aussi validés par des simulations utilisant NS (Network Simulator) ce qui prouve notre étude mathématique.

### 5.8.3 ITC (utilisateurs web)

Dans cette section, on va étudier le système dans le cas des utilisateurs ITC. Ces utilisateurs sont représentés par des sources de trafic web décries dans le paragraphe 5.3. Les paramètres proposés sont ceux utilisés dans le système UMTS et proposés par ETSI dans [36] :
Le débit utilisé est de 8Kb/s.
Le nombre d'appels dans une session est géométrique de moyenne $N_p$= 5.
Le temps de lecture est géométrique de moyenne $T_R$ = 412s.
Le nombre de rafales dans un appel est géométrique de moyenne $N_b$ = 25.
Le temps séparant deux rafales consécutives est géométrique de moyenne $T_{sep}$.= 0.5s.
Enfin les paramètres de distribution de Pareto sont $\alpha$ = 1.1, $k$ = 81.5 et la moyenne d'une rafale est $L_w$ = 24paquets.
Ce trafic est envoyé par une source web vers un utilisateur via le canal satellite. Ces sources doivent accéder au canal satellite dans le sens montant qu'on va étudier son comportement dans cette section.
La priorité des sources est intermédiaire entre la voix et le data. Pour cette raison, le point de départ est supposé de 0.3 tandis que la limite de contrôle est toujours égale à la limite de QoS qui est égal à 3. Les trois fonctions de permission comparées dans ce cas sont présentées dans la figure 5.17.

La première fonction est généreuse pour diminuer le temps d'accès et donc le temps d'attente d'un paquet web. La deuxième est modéré tandis que la troisième est restrictive et possède une limite de contrôle inférieure à celle de QoS.

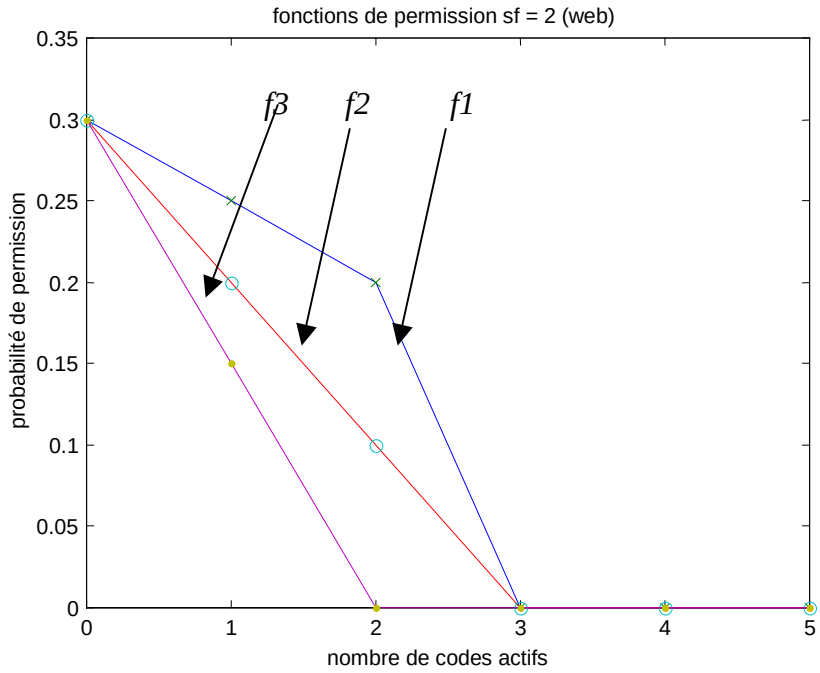



**Figure 5.17 Fonctions de permission (sources web)**

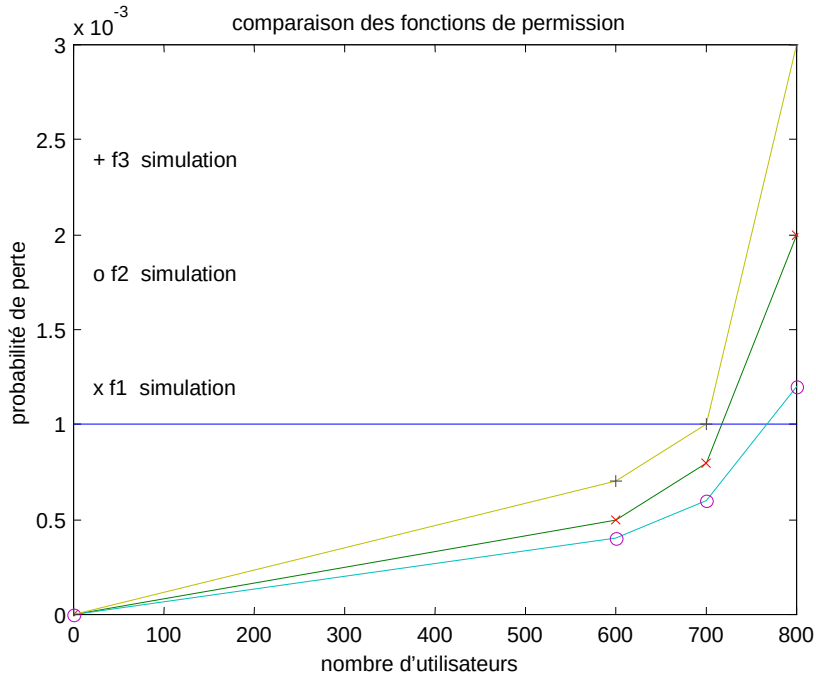



**Figure 5.18 Probabilité de perte (sources web)**

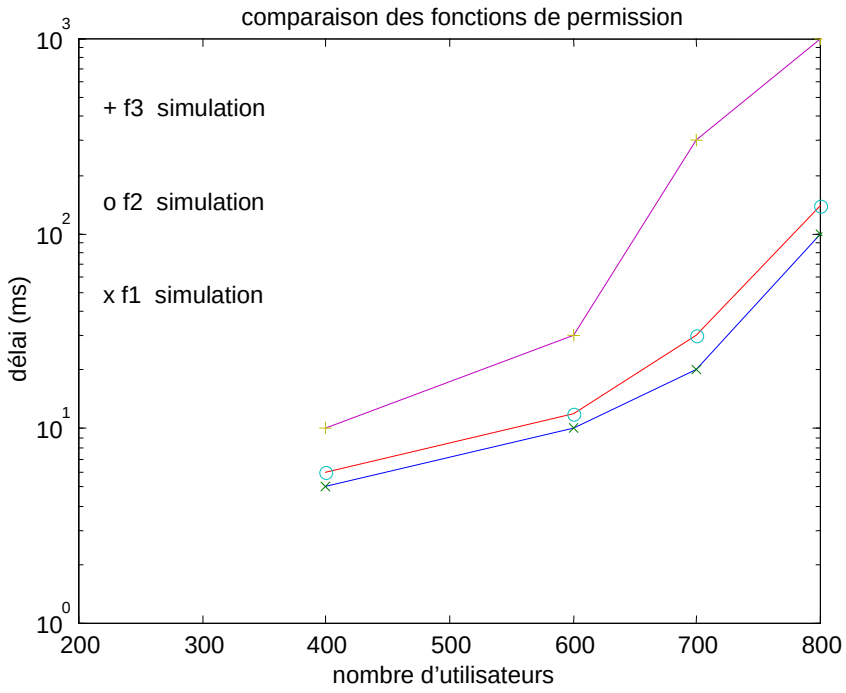



**Figure 5.19 délai d'attente (sources web)**

Dans les figures 5.18 et 5.19 on trace la probabilité de perte et le délai d'attente pour les trois cas de fonctions de permission. Quand le nombre de sources augmente, la probabilité de perte et le délai d'attente augmentent. On remarque que le délai est minimisé quand la fonction de permission est généreuse mais la perte est augmentée dans ce cas. Comme on a déjà mentionné, un délai moyen est à respecter pour les sources web. Ceci représente une deuxième contrainte pour les utilisateurs web autre que la limite de perte. Ces deux contraintes de QoS contribuent à déterminer la capacité du système. Par exemple, si on suppose que 200ms [62, 63] est le délai moyen accepté par un paquet web et la probabilité de perte maximale est toujours de 0.1%, la capacité du système dans le cas de la fonction modérée est de 750 sources. Cette capacité est déterminée par la probabilité de perte qui atteint sa limite à ce point. Le délai d'attente est de 80ms qui est inférieur au délai maximal. Cette étude détermine la capacité du système dans le cas des sources web seulement. Dans la section suivante, ainsi que dans le dernier chapitre, on étudie le multiplexage de service. La notion des différentes priorités d'accès est alors appliquée.

### 5.8.4 Multiplexage de services RTC, ITC et STC (voix, web et data)

Pour le multiplexage de services, on considère les fonctions de permission optimales pour les utilisateurs voix et web trouvées dans les sections précédentes. Ces utilisateurs ont une contrainte de délai très petit pour la voix et à moyenne raisonnable pour le web. Les utilisateurs data sont considérés comme best effort et peuvent accepter un délai relativement élevé. Pour cette raison, on compare deux fonctions de permission pour le data ; la fonction optimale trouvée en cas des utilisateurs data homogène *f1* et une deuxième fonction très restrictive *f2*. (figure 5.20)

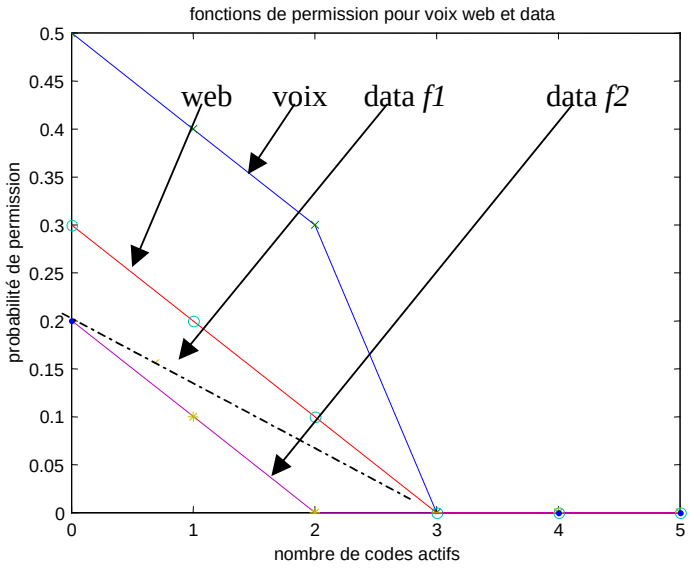



**Figure 5.20 Fonctions de permission en multiplexage de service**

Le but de ce paragraphe est de comparer le comportement général du système en cas de *f1* et *f2*. Dans la figure 5.21, on remarque que la capacité du système augmente quand la fonction *f2* est utilisée pour les utilisateurs data. En effet, la capacité totale du système doit être calculée à la limite des QoS pour les différents utilisateurs. Quand la fonction *f1* est utilisée, la limite de QoS pour les utilisateurs voix est atteinte à 14 utilisateurs data tandis qu'elle est atteinte à 15 utilisateurs data pour les utilisateurs web et data. La capacité est donc de 14 utilisateurs data avec les 10 utilisateurs voix et les 100 utilisateurs web. D'autre part, la limite est atteinte à 18 utilisateurs data quand *f2* est utilisée pour les différents types d'utilisateurs. La capacité est donc de 18 utilisateurs data, 10 utilisateurs voix et 100 utilisateurs web dans ce dernier cas.

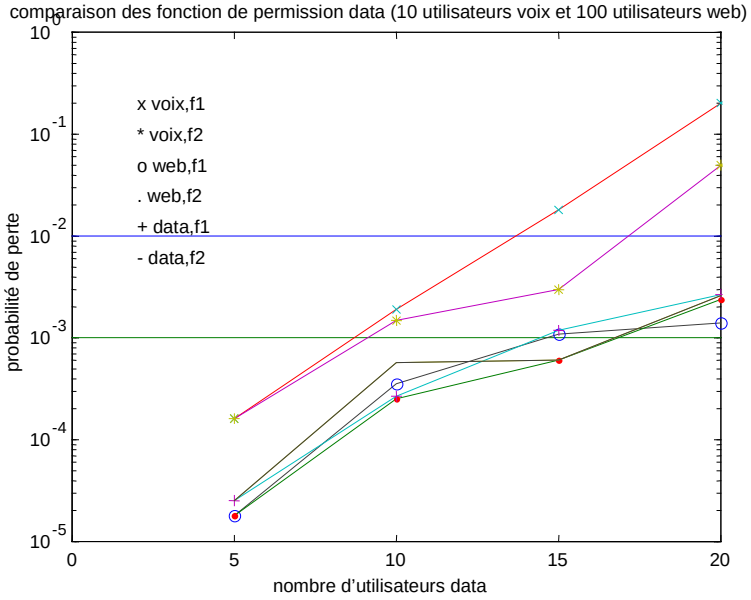



**Figure 5.21 Probabilité de perte en multiplexage de service (voix, web et data)**

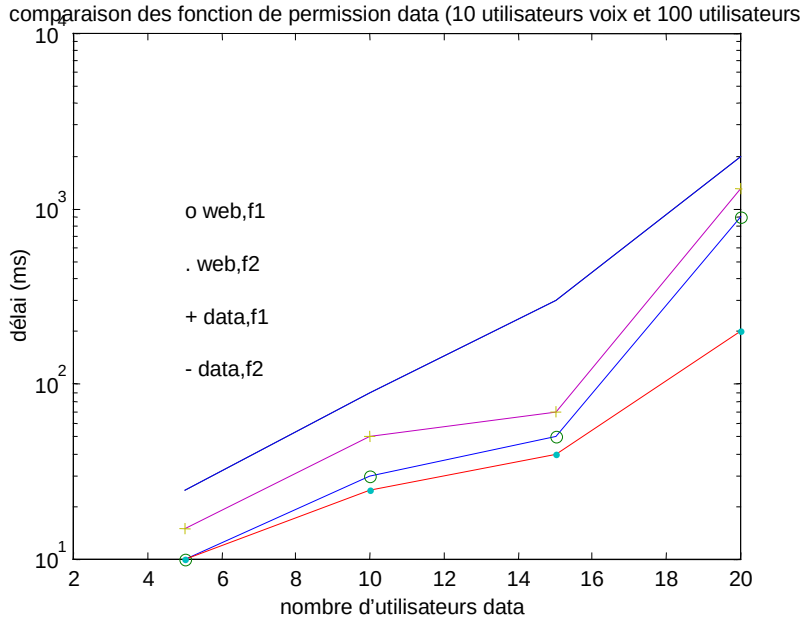



**Figure 5.22 Délai d'attente en multiplexage des service (web et data)**

Le délai d'attente pour les utilisateurs data est généralement plus élevé quand la fonction *f2* est utilisée et il est moins élevé pour les utilisateurs web. Ceci est dû au fait que l'influence des utilisateurs best effort est minimisée quand la fonction *f2* est utilisée. A 18 utilisateurs data, le délai atteint 200ms pour les utilisateurs web et 1000ms pour les utilisateurs data. La limite est respectée pour les utilisateurs web tandis que le délai des utilisateurs data n'est pas catastrophique.

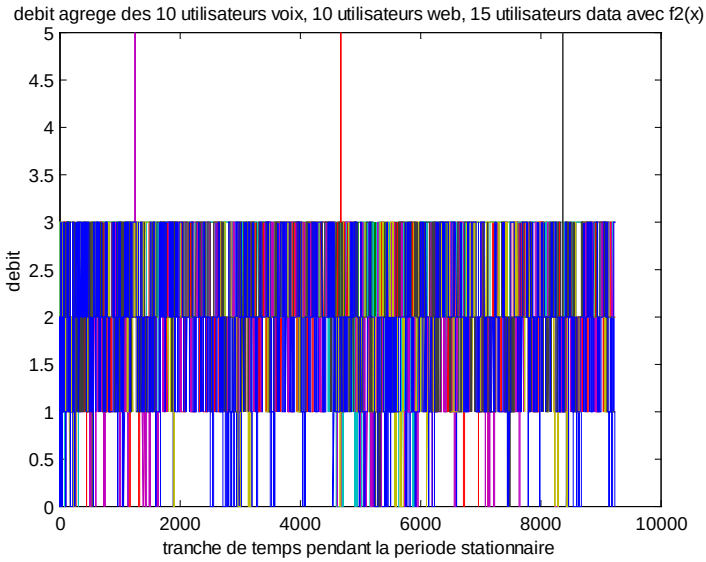



**Figure 5.23 Distribution des utilisateurs en multiplexage de service**

La distribution des utilisateurs montre que la probabilité de dépasser la limite de QoS de 3 est minimisée dans le cas où *f2* serait utilisée avec un nombre d'utilisateurs proche de la capacité du système (figure 5.23).

## *5.9 Conclusion*

Dans ce chapitre, on a étudié un protocole hybride TDMA-CDMA dans le cas des satellites LEO. Ce protocole S-CDMA/PRMA combine les deux protocoles étudiés dans les deux chapitres précédents. Une étude mathématique est faite afin de déterminer les paramètres essentiels qui influencent l'efficacité du protocole. On a proposé une fonction CAC à capacité équivalente afin d'accepter les utilisateurs à temps réel considérés au niveau MAC comme service RTC. Deux autres classes, ITC et STC, sont proposées pour supporter des utilisateurs interactifs (web) et best efforts, respectivement. La différenciation entre les services est basée sur des différentes fonctions de permission qui donnent la priorité maximale aux utilisateurs RTC puis aux utilisateurs ITC et enfin aux utilisateurs STC. L'étude mathématique basée sur des modèles de chaîne de Markov est possible dans le cas des utilisateurs voix et des utilisateurs de transfert des fichiers. Quant aux utilisateurs web ou au multiplexage de services, des simulations utilisant NS sont réalisés. La discussion mathématique et par simulation montre qu'une fonction de permission modérée donne toujours des meilleurs résultats quand un seul type d'utilisateurs occupe le canal. D'autre part, grâce à des calculs mathématiques on démontre qu'un facteur d'étalement (*sf*) de 2 maximise la capacité du système. Enfin, dans le cas de multiplexage de service, on remarque que lorsque la fonction de permission pour les utilisateurs STC (data) décroît, la capacité totale du système augmente. Les utilisateurs data influencent moins les autres usagers qui ont une certaine contrainte de délai. On peut dire que ces utilisateurs sont traités comme best effort.

Un résultat majeur de ce chapitre est le fait que le protocole S-CDMA/PRMA réussisse à garantir une QoS aux différents utilisateurs d'une façon souple et avec le moindre gaspillage de ressources. Ce protocole peut, en effet, garantir un temps réel et une perte de 1% pour les utilisateurs voix même dans le cas où des autres types de sources partageraient le canal. Une différentiation de service est réalisée par ce protocole en appliquant une stratégie de priorité avec des bons choix de niveaux afin de garantir toujours la QoS demandée par chaque utilisateur. Ce protocole montre que même dans des cas très exigeants en terme de QoS et dans des contextes difficiles comme en LEO, on peut toujours utiliser des protocoles souples pour garantir, avec une probabilité acceptable, la QoS avec une bonne utilisation de ressources.

Notons enfin que la séparation des différents utilisateurs temporellement nécessite des mécanismes d'allocation de ressources qu'on va étudier dans le chapitre suivant. Dans ce chapitre on va aussi comparer les différents protocoles proposés dans cette thèse ainsi que d'autres protocoles étudiés dans la littérature dans le cas des satellites.

# 6 Chapitre VI
# Comparaison des protocoles d'accès et des stratégies d'allocation de ressources

## *6.1 Introduction*

Dans ce chapitre, les différents protocoles étudiés dans le cas de satellites LEO sont comparés du point de vue de la performance mais aussi de la simplicité d'implémentation surtout dans le cas de l'intégration de plusieurs services. La performance est déduite de la capacité totale du système en terme du nombre d'utilisateurs de différents types et des différentes qualités de service en terme de probabilité de perte et de délai d'attente.

L'allocation de ressources pour les différents services est un problème essentiel quand le canal est utilisé par différents types d'utilisateurs qui possèdent différentes sources de trafic et différentes QoS. La question de séparer les différents types d'utilisateurs ou de les mélanger tous ensemble est posée dans ce chapitre en considérant trois types de service supportés par les trois MTCs définis dans le chapitre précédent. Le RTC supporte les utilisateurs voix, le ITC les utilisateurs web et le STC les utilisateurs data. Des techniques hybrides d'allocation de ressources sont ensuite proposées pour maximiser l'efficacité du système. La fonction CAC et la stratégie d'allocation de ressources sont liées par le fait que la fonction CAC doit connaître à tout instant les ressources disponibles pour chaque type de service. La fonction CAC utilise toujours la méthode de capacité équivalente discutée dans les chapitres précédents (paragraphes 3.4, 4.5 et 5.5).

Avant de passer au problème d'allocation de ressources on va comparer les protocoles d'accès étudiés dans cette thèse : S-PRMA, le S-CDMA et le S-CDMA/PRMA. Ces protocoles proposés et étudiés dans cette thèse ont été optimisés pour être utilisée dans le contexte des satellites. L'optimisation faite par des études mathématiques et par simulation détermine les différents paramètres qui influencent l'utilisation de ces protocoles afin de maximiser la capacité du canal radio.

Dans la section 2, on compare les différents protocoles d'accès proposés dans cette thèse pour déterminer les protocoles qui maximisent la performance pour les sous-système voix et data. Dans la troisième section le problème d'allocation de ressources est posé. On introduit l'état de l'art de ce problème dans le contexte satellitaire et des systèmes utilisant CDMA pour ensuite comparer des stratégies d'allocation en S-CDMA et S-CDMA/PRMA. Enfin la section quatre donne les conclusions essentielles du chapitre.

## *6.2 Comparaison des protocoles*

Dans cette section, on compare les trois protocoles d'accès, S-PRMA, S-CDMA et S-CDMA/PRMA dans le cas des utilisateurs voix homogènes représentés par des sources ON-OFF et dans le cas des utilisateurs data représentés par des sources F-A géométriques décrites dans le chapitre 3. Les comparaisons sont faites par calcul mathématique et par simulation afin de déterminer les protocoles qui maximisent la capacité du système.

Les trois protocoles peuvent être déduits d'un seul protocole qui est le S-CDMA/PRMA. En effet, le S-CDMA/PRMA contient un nombre $n_{S\text{-}CDMA/PRMA}$ de slots et un nombre de codes sur chaque slot représentés par $sf_{\text{S-CDMA/PRMA}}$.Un code dans un slot représente l'unité de transmission dans ce protocole. Une fonction de permission contrôle l'accès sur ces codes de façon à maximiser l'utilisation de chacun. Les deux autres protocoles S-PRMA et S-CDMA peuvent être considérés comme des cas particuliers du S-CDMA/PRMA.

En S-CDMA, le nombre de slots est 1 ( $n_{S\text{-}CDMA} = 1$ ) et le nombre de codes est représentés par le facteur d'étalement qui est déduit du précédent par la multiplication du facteur d'étalement et du nombre de codes ($sf_{\text{S-CDMA}} = sf_{\text{S-CDMA/PRMA}} \times n_{\text{S-CDMA/PRMA}}$). La fonction de permission joue dans ce cas le même rôle que pour le S-CDMA/PRMA et dépend du nombre de codes sur la trame précédente.

En S-PRMA, le nombre de codes par slot est de 1 ( $sf_{S\text{-}PRMA} = 1$) tandis que le nombre de slots par trame est déduit du S-CDMA/PRMA par l'équation ($n_{\text{S-PRMA}} = sf_{\text{S-CDMA/PRMA}} \times n_{S\text{-}CDMA/PRMA}$ ). La fonction de permission prend deux valeurs dans ce cas, une valeur non nulle si le slot dans la trame précédente était disponible et une valeur nulle si ce slot était réservé. La notion de « disponible » et « réservé » peut être vue de cette façon ce qui rend le protocole S-PRMA un cas particulier du protocole S-CDMA/PRMA.

De ce point de vue, on peut comparer les différents protocoles d'accès comme étant une comparaison entre plusieurs choix des paramètres du protocole S-CDMA/PRMA, le changement du facteur d'étalement réalisent le passage d'un protocole à l'autre.

### 6.2.1 Utilisateurs voix

Les utilisateurs voix utilisés sont des sources ON-OFF de paramètres $t_{on} = 1s$ et $t_{off} = 1.35s$. Le débit d'un utilisateur voix est 8Kb/s qui devient 9.6Kb/s au niveau MAC. La bande passante est de 155Kb/s par chaque fréquence porteuse. Ceci permet l'utilisation de 16 slots en cas de S-PRMA ou 8 slots avec $sf = 2$ en cas de S-CDMA/PRMA ou enfin un facteur d'étalement de 16 dans le cas de S-CDMA.

En utilisant les différents paramètres d'optimisation trouvés pour les protocoles d'accès dans les chapitres précédents et représentés par les fonctions de permission, on obtient le tableau 6.1 des capacités du système en terme des utilisateurs voix.

**Tableau 6.1 Comparaison des capacités des protocoles d'accès**

| Capacité\protocole | S-PRMA | S-CDMA | S-CDMA/PRMA |
|---|---|---|---|
| Nombre d'utilisateurs | 32 | 38 | 42 |

Dans le cas de S-PRMA, une valeur de probabilité de permission de 0.7 est considérée. Une fonction de permission qui est la fonction unité ($f(x) = 1$) est utilisée en S-CDMA, et une permission généreuse (voir chapitre 5) est considérée dans le cas de S-CDMA/PRMA.

Calculons maintenant le facteur d'efficacité de multiplexage statistique pour les utilisateurs voix. Ce facteur est le rapport entre le nombre d'utilisateurs voix acceptés par le système et ce

nombre en cas de multiplexage parfait. Ce dernier est égal au nombre de ressources allouées aux utilisateurs voix, divisé par le rapport d'activité des utilisateurs voix. Si $M_v$ est le nombre maximum d'utilisateurs voix acceptés, $r_v$ est le nombre de ressources allouées aux utilisateurs voix et $\delta_v$ est le facteur d'activité (0.42 dans notre cas), on a :

$\mu = M_v \times \delta_v / r_v$

où $r_v$ représente le nombre de ressources dédiées aux utilisateurs voix. C'est le nombre d'utilisateurs voix qu'on peut accepter en cas du mode circuit et sans l'utilisation d'une couche MAC particulière. La fonction CAC accepte dans ce cas un utilisateur si son débit maximal est disponible. Ce nombre qui ne tient compte que de la bande passante du canal et le débit maximal de la source est calculé par :

$r_v = BW/R = 155/8 = 19$.

En utilisant ces valeurs on obtient le tableau 6.2.

**Tableau 6.2 Comparaison des capacités des protocoles d'accès**

| Efficacité\protocole | S-PRMA | S-CDMA | S-CDMA/PRMA |
|---|---|---|---|
| $\mu$ | 0.7 | 0.84 | 0.92 |

Il est clair que le protocole S-CDMA/PRMA a un facteur de multiplexage très élevé et supérieur aux différents résultats trouvés dans la littérature pour le système LEO et qui ne dépassent pas 0.8 [27], [50] et [55]. En plus, le cas de S-CDMA est aussi intéressant du point de vue du multiplexage statistique.

En considérant le fait que le S-PRMA et S-CDMA sont des cas particuliers de S-CDMA/PRMA on peut analyser les résultats comme suit ; en S-CDMA, une permission d'accès est toujours égale 1 et la probabilité de drop d'un paquet est nulle tandis que la probabilité d'erreur est élevée. En S-PRMA, la fonction d'accès passe directement de 0.7 à zéro et en état stationnaire, un nombre limité de slots peuvent être accédés ce qui augmente la probabilité de drop. Un compromis entre la probabilité d'erreur et celle de drop est réalisé en cas de S-CDMA/PRMA avec un facteur d'étalement de 2.

Une autre raison essentielle de la meilleure performance de S-CDMA/PRMA est l'excès de ressources en cas de S-CDMA/PRMA avec facteur d'étalement de 2. En effet, les ressources disponibles en S-PRMA sont 16 slots, elles deviennent 19 codes en S-CDMA et 24 codes en S-CDMA/PRMA (équation 5.6 et 5.7). Ceci augmente l'efficacité du système considérablement.

### 6.2.2 Utilisateurs data

Les utilisateurs data sont considérés comme des sources de transfert des fichiers F-A qui peuvent être représentées par des sources ON-OFF de paramètres :

$\lambda = 0.5$ et $L_s = 100$ paquets

Dans le cas de S-PRMA, on suppose qu'une retransmission est nécessaire au niveau MAC pour les utilisateurs data pour garantir une probabilité de perte acceptable. Ceci n'est pas nécessaire en cas de S-CDMA/PRMA et S-CDMA puisqu'on peut agir sur la fonction de permission pour diminuer la probabilité de perte au-dessous du seuil de la QoS. Ceci représente un avantage pour les protocoles S-CDMA/PRMA et S-CDMA.

Dans cette section, on va comparer le délai d'attente d'un paquet data dans le tampon de l'utilisateur selon différents protocoles.

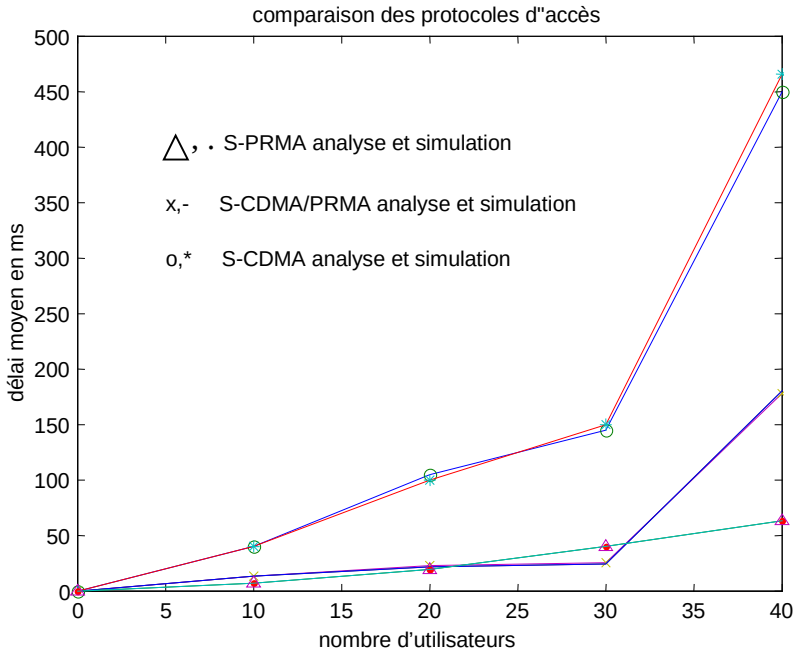



**Figure 6.1 Délai d'attente des paquets data pour les différents protocoles d'accès**

Dans la figure 6.1, on remarque que le délai d'attente est minimal dans le cas de S-PRMA et maximal dans le cas de S-CDMA. Ceci est dû essentiellement au temps séparant deux tentatives successives qui est le temps d'un slot. En CDMA pur, ce temps est 16 fois plus grand qu'en PRMA. Une deuxième raison est la possibilité de retransmission en S-PRMA, qui permet l'utilisation d'une probabilité de permission de 0.3 tandis que cette permission est moins élevée dans les fonctions de permission de S-CDMA et S-CDMA/PRMA. Une fonction qui débute par une probabilité de permission de 0.3 est utilisée en S-CDMA tandis qu'une fonction qui débute par 0.2 est utilisée en S-CDMA/PRMA (chapitres 4 et 5). Remarquons que le délai d'attente en S-CDMA/PRMA est inférieur à celui du S-CDMA puisque la trame contient 8 slots en S-CDMA/PRMA et un slot en S-CDMA. L'attente en S-CDMA/PRMA est acceptable par rapport à celle de S-PRMA. En tenant en compte l'avantage du protocole S-CDMA/PRMA pour les utilisateurs voix, on considère ce protocole comme étant le meilleur du point de vue de l'efficacité du système.

### 6.2.3 Multiplexage de services

En cas de multiplexage de services, plusieurs problèmes sont posés et différentes techniques peuvent êtres utilisées pour améliorer la capacité totale du canal. Dans les chapitres précédents, on a étudié le multiplexage des utilisateurs voix et transfert des fichiers en cas de S-PRMA, des utilisateurs voix avec des Emails en cas de S-CDMA et trois types d'utilisateurs qui sont la voix, le transfert des fichiers et le web en cas de S-CDMA/PRMA. On remarque qu'en S-CDMA et S-CDMA/PRMA, on peut toujours agir sur les fonctions de permission pour augmenter la capacité du système. Dans ce qui suit, on va étudier le multiplexage des trois types des utilisateurs ; voix, web et transfert des fichiers en cas de deux protocoles S-CDMA et S-CDMA/PRMA. Le transfert des fichiers peut représenter des sources d'envoi des emails courts de longueur moyenne comparable au talkspurt (2Ko). Ceci nécessite des stratégies d'allocation de ressources pour les différents services supportés au

niveau MAC par les trois MTCs définis dans les chapitres précédents : RTC (Rapid Transfer Capability), ITC (Intermediate Transfer Capability) et STC (Slow Transfer Capability).

## *6.3 Allocation de ressources*

La signification de l'allocation de ressources est très importante en canal satellite. Ceci est dû au prix élevé de ressources qui sont rares dans ce contexte. La bande passante doit être utilisée d'une manière efficace afin de ne pas gaspiller les ressources. L'intégration des différents services sur le même canal complique le problème et nécessite des techniques avancées. Le long RTD (temps aller-retour) rend les techniques dynamiques d'allocation plus difficile à réaliser. On parle de deux niveaux d'allocation de ressources :

- Niveau de l'utilisateur ; en assignant à un utilisateur les ressources nécessaires pour garantir sa QoS.
- Niveau du service ; en prévoyant un ensemble de ressources pour un tel type de service. Cet ensemble peut être fixe ou dynamique. Si l'ensemble est fixe, on risque de gaspiller les ressources. Les frontières séparant les différents ensembles de ressources sont fixes ou mobiles.

Dans cette section, on introduit l'état de l'art des stratégies d'allocation de ressources en satellite ainsi qu'en système CDMA et TD-CDMA. On compare ensuite quelques stratégies utilisées par les protocoles S-CDMA et S-CDMA/PRMA pour étudier leur comportement en cas de multiplexage de services.

### 6.3.1 Allocation de ressources dans la littérature

Dans cette section, on va présenter brièvement différentes stratégies d'allocation de ressources dans les deux contextes TDMA et CDMA. Des propositions faites pour le TD-CDMA sont aussi décrites de façon à introduire notre travail dans ce domaine.

**TDMA**

Dans le contexte TDMA, plusieurs stratégies sont proposées dans le contexte de satellite GEO [67, 68, 69]. Le lien montant est structuré en des trames divisées en slots qui représentent les canaux ou les ressources radios. Ces ressources sont partagées entre les différents types de service d'une manière fixe ou variable.

Quand la division est fixe, un type de service est assigné un nombre de canaux en permanence et les autres services n'ont pas le droit d'utiliser ces canaux. Cette technique rigide est généralement inefficace. En effet, un ensemble de ressources peut être sous-utilisé si une service génère peu de trafic généré par un tel service tandis qu'un autre ensemble peut souffrir de congestion à cause d'un trafic élevé du service associé.

Les frontières mobiles peuvent remédier à ce problème en permettant à un service d'utiliser les ressources associées à d'autres services en cas de congestion. La difficulté est due dans ce cas aux différents QoS associés aux différents services. Quand on intègre la voix avec le data, de ressources dédiées à la voix et qui sont utilisées par le data peuvent bloquer la transmission des paquets vocaux qui sont temps réel et qui n'acceptent aucun délai. La préemption des utilisateurs data peut résoudre ce problème mais au prix de perdre les paquets data envoyés. On remarque que des techniques à frontière mobile peuvent garantir la QoS des différents services et diminuer le temps d'attente des utilisateurs data [70, 71, 72].

En général, les services sont groupés en deux catégories ; synchrone et asynchrone. La première représente des services qui nécessitent une réservation de ressources pour des longues durées tandis que la deuxième représente des sources qui envoient des rafales pendant

des basses durées et d'une façon asynchrone. La priorité est donnée aux utilisateurs synchrones mais leurs ressources peuvent être utilisées par les autres types des sources.
Dans [16], les auteurs proposent un schéma d'allocation de ressources à deux frontières afin d'intégrer trois types de services. Un service CBR qui a un débit maximal garanti, un service bursty qui est traité comme un VBRnrt et enfin un service best effort. Le schéma d'allocation de ressources est le suivant :

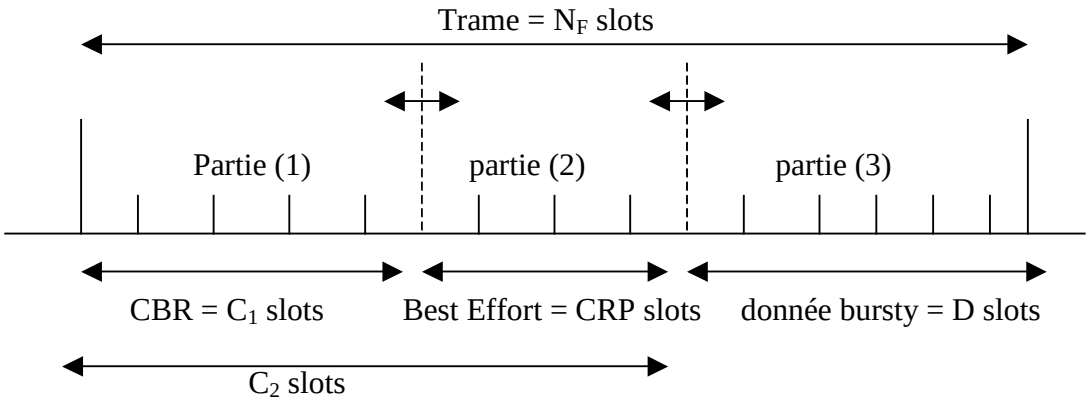



**Figure 6.2 Allocation de ressources en TDMA avec frontières variables.**

La trame est composée de trois parties ;

- Partie (1) où les utilisateurs CBR ont la priorité maximale puis les utilisateurs bursty et enfin les utilisateurs best effort.
- Partie (3) où les utilisateurs bursty ont la priorité maximale puis les utilisateurs best effort. Les utilisateurs CBR n'ont pas le droit d'accéder à cette sous-trame.
- Partie (2) est gérée suivant un algorithme décrit dans [16].

Pour décrire la stratégie d'allocation de ressources, on décrit le comportement de la fonction de contrôle d'admission. Le CAC agit toujours sur les demandes CBR qui ont une priorité d'accès sur la partie 1, mais pas sur la partie (2). Supposons, pour simplifier le problème, qu'un utilisateur CBR utilise un seul slot dans chaque trame.
Si on a une requête de demande de connexion et le nombre de slots réservés pour les utilisateurs en cours (qui est dans notre cas, le nombre d'utilisateurs CBR) est inférieur à $C_1$ , on accepte cette requête. Si ce nombre est égal à $C_1$ et on a toujours des requêtes de demande, on teste les utilisateurs données bursty. Si le nombre des requêtes pour ces utilisateurs est supérieur à un certain seuil $L_{thrld}$, le CAC refuse la demande. Sinon, il accepte la demande CBR et réserve un slot de la parie (2) à cet utilisateur. Si le nombre de slots, de la partie (2), associés aux utilisateurs CBRs, dépasse une valeur égale $\alpha*(N_F - C_1 - D)$, le CAC refuse la demande CBR.
Les valeurs $L_{thrld}$ et $\alpha$ sont déterminées par une simulation afin de diminuer le délai d'attente des utilisateurs data sans avoir une grande probabilité de blocage pour les utilisateurs CBRs.
Dans [16], on propose un seuil dynamique qui dépend de nombre de slots de la partie (2) utilisé par les utilisateurs CBRs. Si $(L_{thrld})_i$ est le seuil initial, N est le nombre de slots de la partie (2) associés aux utilisateurs CBRs, le nouveau seuil $(L_{thrld})_d$ devient :

$$(L_{thrld})_d = \frac{(L_{thrld})_i \times C_1}{C_1 + N}.$$

**CDMA et TD-CDMA**

Dans [64, 65, 66], quelques stratégies d'allocation de ressources sont présentées dans le cas de système CDMA et TD-CDMA. Le but de ces études est de réaliser une allocation de ressources pour supporter plusieurs QoSs, minimiser la probabilité de perte et avoir une utilisation acceptable des ressources.

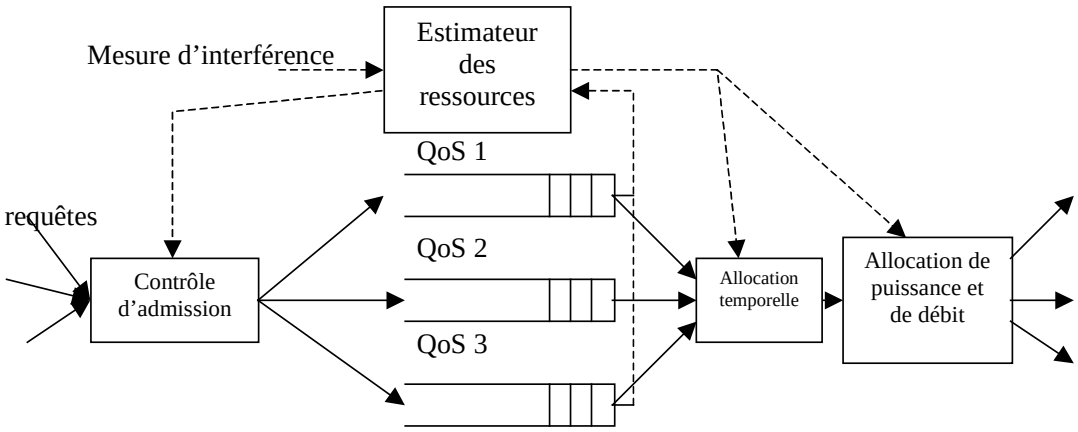



**Figure 6.3 Stratégie d'allocation de ressources en CDMA et TD-CDMA**

Un estimateur contrôle l'allocation de ressources en se basant sur les mesures d'interférence et sur la situation de trafic des différents services. Ceci est représenté par deux entrés sur cet estimateur dans la figure. Cet estimateur agit sur le planificateur de temps pour distribuer les ressources temporelles entre les différents services tandis que le planificateur de puissance distribue les ressources code entre les services. Ce modèle nécessite un trafic de contrôle important afin d'utiliser la flexibilité du système CDMA pour allouer les ressources. En se basant sur les informations reçues par l'estimateur, la fonction de contrôle d'admission peut décider d'accepter ou de refuser une requête. Ce système va être utilisé d'une façon souple et dynamique dans notre modèle d'allocation pour les deux protocoles S-CDMA et S-CDMA/PRMA. Notons que dans notre modèle, les sources de trafic représentent des serveurs d'envoi des fichiers et de web. Les paquets data générés par les utilisateurs sont considérés de très bas débit et peut être servis d'une façon asynchrone comme décrit dans [36]. Dans ce schéma, pour servir deux types de trafics, on définit deux types de trames ; les trames synchrones et les trames asynchrones. Dans les trames asynchrones, on envoie des rafales aléatoires, alors que dans les trames synchrones on envoie des données synchronisées.

La trame 0 est utilisé pour accéder au réseau aléatoirement. Des bursts d'accès aléatoires sont alors envoyés d'une manière asynchrone tout en demandant une partie de la bande passante associée à ce service. L'accès sur cette trame se fait en CDMA Aloha. Pour les autres services, une demande de connexion est nécessaire. Cette demande se fait d'une façon aléatoire et la trame 0 peut être utilisée dans ce but. Si la demande est acceptée, l'utilisateur commence à envoyer ses données en utilisant un nombre de slots réservés. Il envoie ses données en mode quasi-synchrone sur les trames synchrones en utilisant CDMA/TDMA hybride.

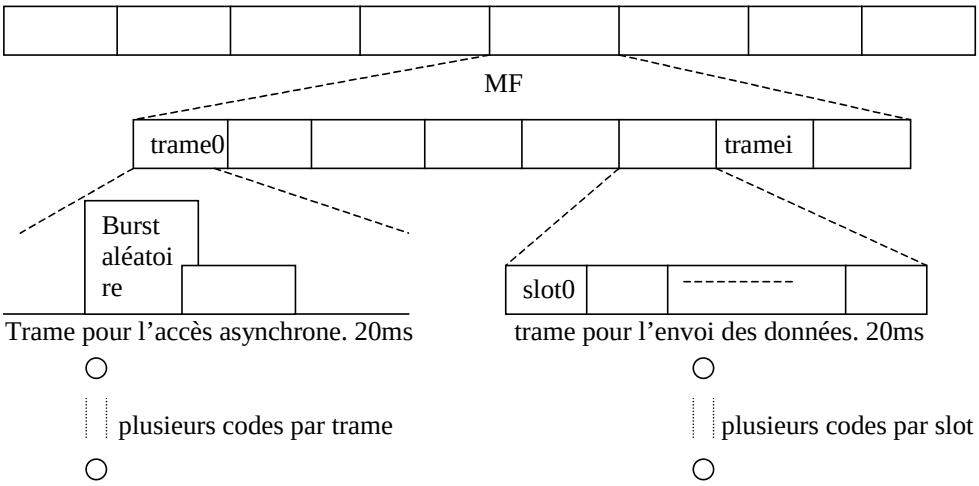



**Figure 6.4 Allocation de ressources en TDMA/CDMA entre les paquets synchrones et asynchrones**

Dans ce qui suit, on va étudier l'allocation de ressources sur les trames synchrones entre trois types de sources utilisateurs du canal : les utilisateurs voix qui se comportent comme des sources ON-OFF, le serveur web qui après la réception d'une requête commence à envoyer des informations comme décrit dans 5.3.2 et la troisième représente des sources d'envoi des fichiers comme décrit dans 3.2.2 qui peuvent représenter des sources d'envoi des emails courts. Ces sources doivent envoyer leurs paquets d'une façon synchrone avec différentes QoSs. La source voix est considérée comme un service STC, la source web comme ITC et enfin la source de transfert des fichiers comme STC.

### 6.3.2 Allocation de ressources en S-CDMA

La notion de slot est inexistante en S-CDMA. Les ressources sont divisées sur les deux plans fréquentiels et de code. L'unité d'allocation temporelle dans la figure 6.3 n'existe pas dans ce cas. D'autre part, le débit est supposé fixe pour les différentes sources, grâce à la possibilité d'utiliser plusieurs codes dans le cas où le débit dépasserait le débit unité (bande passante d'un seul code). Une telle source est vue dans ce cas comme l'agrégation des plusieurs sources unités.
La figure 6.3 est donc simplifiée dans ce cas et peut être représentée par la figure 6.5. L'estimateur de ressources peut agir sur l'allocation de puissance d'une façon directe en allouant des codes pour chaque classe de service suivant la charge du service correspondant. Cette charge est mesurée par la file d'attente des requêtes. Dans cette section, on va comparer deux stratégies d'allocation. La première consiste à isoler l'effet de l'estimateur de ressources sur l'allocation de codes en utilisant une technique d'allocation souple afin de réaliser une certaine flexibilité du canal : c'est la méthode d'allocation fixe. La deuxième permet à l'estimateur d'agir sur l'unité d'allocation de ressources pour changer la partage de ressources entre les différentes classes de service : c'est la méthode d'allocation dynamique.

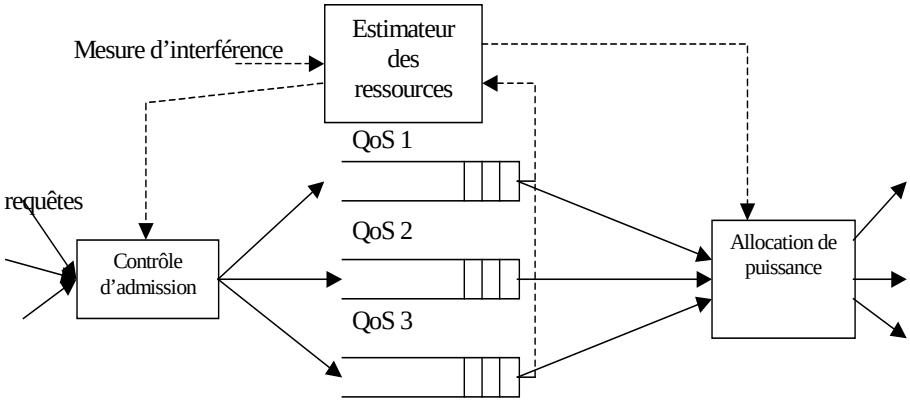



**Figure 6.5 Allocation de ressources en S-CDMA**

### *6.3.2.1 Allocation fixe*

Le protocole S-CDMA est toujours utilisé avec différentes fonctions de permission pour les différents services. La notion de permission permet une allocation souple de ressources même si l'estimateur n'influence pas l'allocation des codes. Les codes sont divisés en trois ensemble : le premier est accessible par tous les utilisateurs suivant des fonctions de permission qui donnent une priorité maximale aux utilisateurs voix puis aux utilisateurs web et enfin aux utilisateurs data. Le deuxième est accessible par les utilisateurs voix et web seulement avec une priorité pour les utilisateurs voix. Et enfin, le troisième est utilisé seulement par les utilisateurs voix. La figure 6.6 montre cette stratégie.

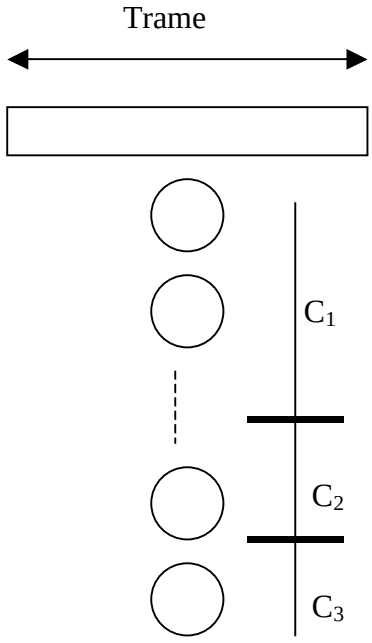



**Figure 6.6 Frontières fixes en S-CDMA**

Dans la figure 6.6, l'ensemble $C_1$ est accessible par les trois types de service, l'ensemble $C_2$ est accessible par la voix et le web tandis que l'ensemble $C_3$ est accessible par la voix seulement. Les frontières qui séparent les différents ensembles sont fixes mais l'allocation reste souple puisque les fonctions de permissions dépendent toujours de la charge sur la trame comme on a expliqué dans le chapitre 4 de S-CDMA. Pour réaliser une telle stratégie, les

fonctions de permission pour les différents utilisateurs doivent avoir des seuils de permission convenables comme dans la figure 6.7.

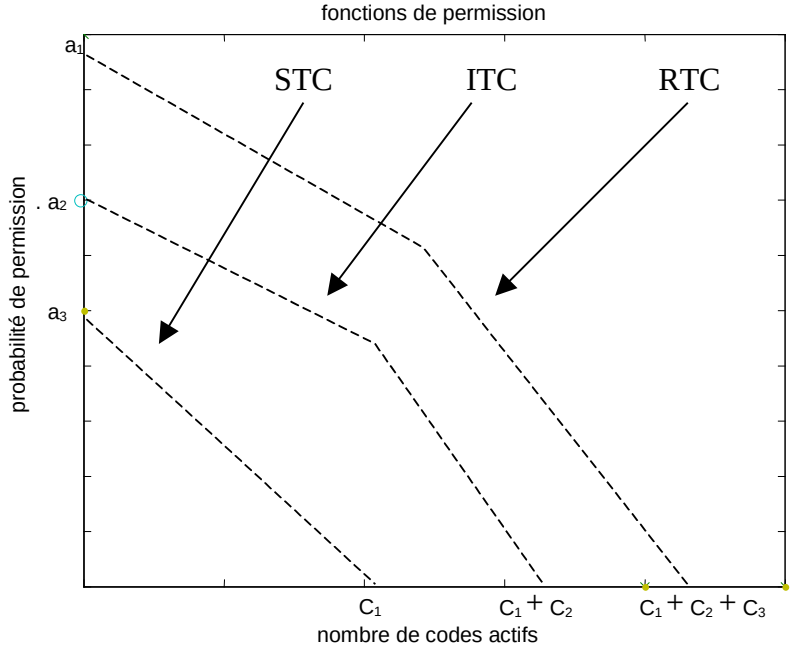



**Figure 6.7 Fonctions de permission pour l'allocation de ressources fixe**

Les fonctions de permission décrites dans la figure 6.7 limitent l'accès aux codes du canal suivant la frontière allouée au service. Pour le service STC, la limite est $C_1$, elle est de $C_1 + C_2$ pour le service ITC et $C_1 + C_2 + C_3$ pour le service RTC.
Remarquons que ces limites sont aussi les limites de réservation. Un utilisateur STC réserve le code choisi par contention si le nombre de codes utilisés par les différents types de service est inférieur à $C_1$, Un utilisateur ITC réserve le code accédé si le nombre de codes utilisés par les différents types de service est inférieur à $C_1 + C_2$ et un utilisateur RTC réserve le code choisi si le nombre de codes utilisés par les différents types de service est inférieur à $C_1 + C_2 + C_3$.

### *6.3.2.2 Méthode d'allocation dynamique*

Cette méthode suppose que dans la figure 6.6 la frontière qui sépare l'ensemble $C_1$ de l'ensemble $C_2$ est dynamique. Le but de cette stratégie est de diminuer le délai d'attente des utilisateurs STC quand le système n'est pas très chargé. Quand la charge voix et web est inférieure à un seuil $L_1$, la frontière est déplacée de $C_2$ codes afin de diminuer le délai d'attente de ces utilisateurs. Quand cette charge dépasse une deuxième limite $L_2$, la frontière revient à sa place initiale. Les valeurs de $L_1$ et $L_2$ sont choisis de façon à garantir toujours la QoS des utilisateurs voix et web et que la différence $L_2$-$L_1$ réalise une gamme d'hystérésis pour assurer la stabilité du système.
En pratique, le système démarre avec une fonction de permission pour le data qui a $C_1 + C_2$ comme seuil de contrôle. Lorsque la charge des utilisateurs acceptés par la fonction CAC dépasse une limite de $L_2$, cette fonction de probabilité est réduite et la limite de permission devient $C_1$. Le système doit garantir dans ce cas la QoS des utilisateurs voix et web. Quand un nombre d'utilisateurs quittent le canal et la charge des utilisateurs voix et web dans le canal devient inférieur à $L_1$ la fonction de permission pour les utilisateurs STC prend la valeur

initiale de $C_1$ + $C_2$ comme limite. La figure 6.8 présente cette stratégie d'allocation sous forme graphique.

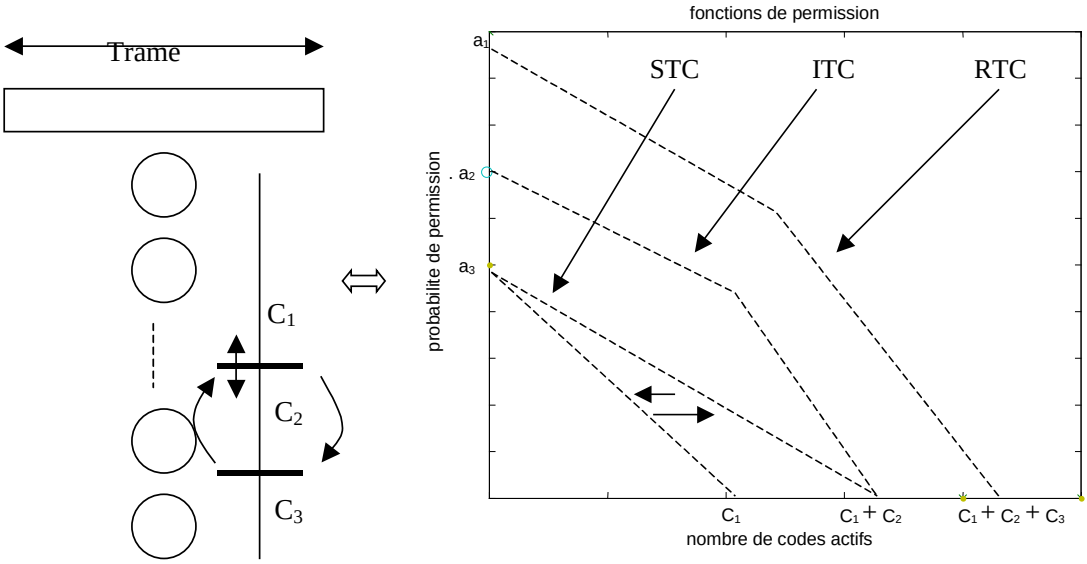



**Figure 6.8 Allocation dynamique en S-CDMA**

Dans la figure 6.8, on remarque que la frontière de l'ensemble $C_1$ oscille entre deux limites en fonction de la charge totale des utilisateur voix et web. La fonction de permission des utilisateurs data reste toujours la moins prioritaire afin de respecter la QoS des utilisateurs voix et web. La frontière séparant $C_2$ et $C_3$ est fixe puisque cette frontière représente la différence de la probabilité de perte acceptée par un utilisateur voix et un utilisateur web. Un utilisateur voix accepte 1% de perte des paquets ce qui lui permet d'utiliser $C_1$ + $C_2$ + $C_3$ codes avec une perte acceptable tandis qu'un utilisateur web (et data) n'accepte que 0.1% de perte, ce qui lui permet un nombre maximal de $C_1$ + $C_2$ codes actifs. Notons que la différence entre les QoSs peut être résolue en choisissant des fonctions de permission convenable comme on a démontré dans le paragraphe 4.8.3.

Notons enfin que la décision de déplacement de frontière est prise localement au sein du satellite. Les utilisateurs acceptés par la fonction CAC sont donc les utilisateurs acceptés dans une cellule précise. Le nombre total d'utilisateurs acceptés par le NCC (Network Control Center) n'agit pas sur cette stratégie d'allocation.

#### *6.3.2.3 Comparaison des deux stratégies d'allocation*

La comparaison des stratégies d'allocation est basée sur des simulations. Le simulateur NS est utilisé pour simuler un système LEOS comme décrit dans le deuxième chapitre. Une technologie multi-faisceaux est utilisée. Dans chaque faisceau on a 24 fréquences porteuses. avec une bande passante montante égale à la bande passante descendante de 155Kb/s. Le G/W a une bande de 155Mb/s ainsi que la liaison inter-satellite. Plusieurs utilisateurs de différents types peuvent envoyer en même temps en utilisant différents codes. Les utilisateurs sont de types voix, web et data.

Une source voix se comporte comme une source ON-OFF avec les paramètres ($t_{on}$ *= 1s* et $t_{off}$ *= 1.35s* ).

Une source web se comporte comme décrit dans le paragraphe 5.3.2 avec les paramètres :

Le débit utilisé est de 8Kb/s.

Le nombre d'appels dans une session est géométrique de moyenne $N_p$= 5.

Le temps de lecture est géométrique de moyenne $T_R$ = 412s.
Le nombre de rafales dans un appel est géométrique de moyenne $N_b$ = 25.
Le temps séparant deux rafales consécutives est géométrique de moyenne $T_{sep}$.= 0.5s.
Enfin les paramètres de distribution de Pareto sont $\alpha$ = 1.1, $k$ = 81.5 et la moyenne d'une rafale est $L_w$ = 24paquets.
Une source data se comporte comme décrit dans 3.2.2 avec les paramètres $\lambda$ = 0.25 et $L_s$ = 100 paquets. C'est une source d'envoi des courts messages.
Les frontières d'allocation de ressource sont : ($C_1$ = 16, $C_1$ + $C_2$ = 18 et $C_1$ + $C_2$+ $C_3$ =20).
Dans le cas de la fonction dynamique, on définit la charge généré par un tel service par la valeur $\gamma M$ où $\gamma$ est le facteur d'activité tandis que M est le nombre d'utilisateurs appartenant à cette classe de service acceptés par la fonction CAC. Dans notre exemple, la charge des utilisateurs voix et web est de ($\gamma_v M_v + \gamma_w M_w$). Le facteur d'activité est le rapport entre le temps moyen d'activité sur le temps moyen d'un cycle (activité + inactivité). Il est calculé comme suit :

$$\gamma_v = \frac{t_{on}}{t_{on} + t_{off}} = 0.42.$$

$$\gamma_w = \frac{N_p N_b L_w T_f}{N_p N_b L_w T_f + N_p N_b T_{sep} + T_R N_p} = 0.027.$$

La charge en voix et web est déterminée par ($0.42M_v + 0.027M_w$) Erlangs. On sait que le système peut supporter jusqu'à 17 Erlang, les seuils d'allocation sont $L_1$ = 10 et $L_2$ = 12 dans cet exemple.
Les fonctions de permission sont tracées dans la figure 6.9 et 6.10, et sont inspirés des discussions faites en 4.8.3. Dans le cas où l'allocation est statique, les fonctions de la figure 6.10 sont utilisée tout le temps tandis que dans le cas où l'allocation est dynamique, les permissions oscillent entre la figure 6.9 et 6.10 suivant la charge du système. La limite d'accès qui est aussi celle de réservation se déplace entre 16 et 18 comme déjà décrit.

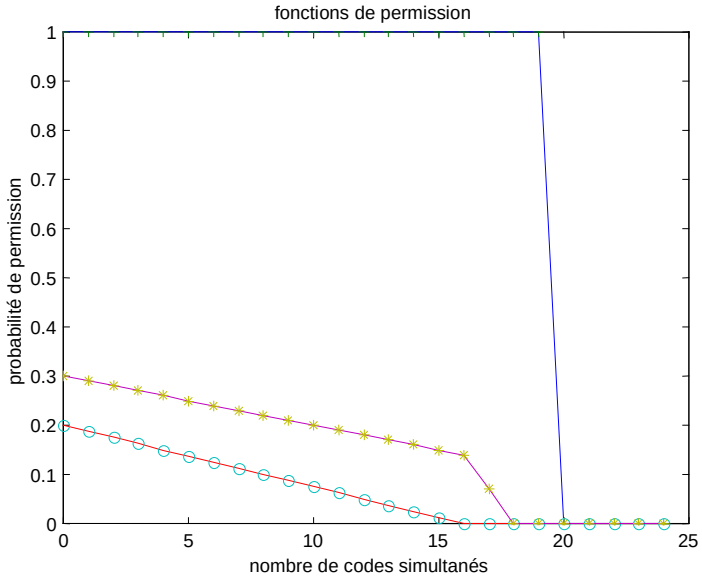



**Figure 6.9 Fonctions d'accès en allocation fixe et en allocation dynamique à haute charge**

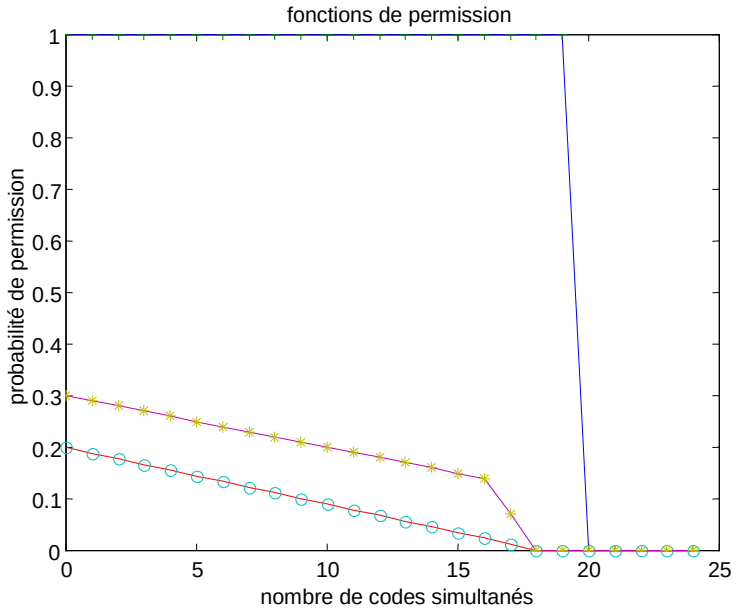



**Figure 6.10 Fonctions de permission en allocation dynamique à basse charge**

Remarquons qu'en cas de charge élevée, les deux stratégies se comportent de la même façon. On va démontrer par les simulations que le délai d'attente pour les paquets data diminue considérablement dans le cas d'allocation dynamique lorsque la charge voix et web est basse. Supposons que cette charge est de 10 Erlangs ; elle est inférieure au seuil $L_1$ et dans la stratégie d'allocation dynamique, la figure 6.10 est utilisées pour les fonctions de permission tandis que la figure 6.9 est toujours utilisée dans la technique d'allocation fixe.

On remarque dans la figure 6.11 que le délai d'attente des paquets data est considérablement diminué en cas de stratégie d'allocation dynamique. Lorsque le nombre de sources data est élevé, on remarque un facteur de 3 entre le délai d'attente en état statique et celui en dynamique. En plus, on remarque que le délai des paquets web est aussi réduit dans le cas d'allocation dynamique. Ce résultat est imprévisible puisque l'effet des utilisateurs data sur les utilisateurs web est sensé diminuer en cas d'allocation statique où la fonction de permission est inférieure. En fait, dans le cas où la probabilité de permission est très basse, le nombre de sources data qui attendent une permission d'accès augmente, ce qui augmente leurs effets sur les utilisateurs web. Ce même effet est remarqué aussi dans la mesure de la perte des paquets des utilisateurs voix dans la figure 6.12. L'effet des sources data sur les utilisateurs voix augmente quand la stratégie d'allocation fixe est utilisée. Le même effet est remarqué tout au long de cette thèse pour les protocoles S-PRMA, S-CDMA et S-CDMA/PRMA ce qui nous a mené à faire des compromis dans le choix des paramètres.

Notons enfin que cette comparaison montre que l'utilisation d'une stratégie d'allocation dynamique augmente la flexibilité du système, mais aussi améliore la QoS et la capacité totale. Des stratégies d'allocation dynamique plus avancées peuvent être utilisées pour améliorer encore plus l'efficacité du système.

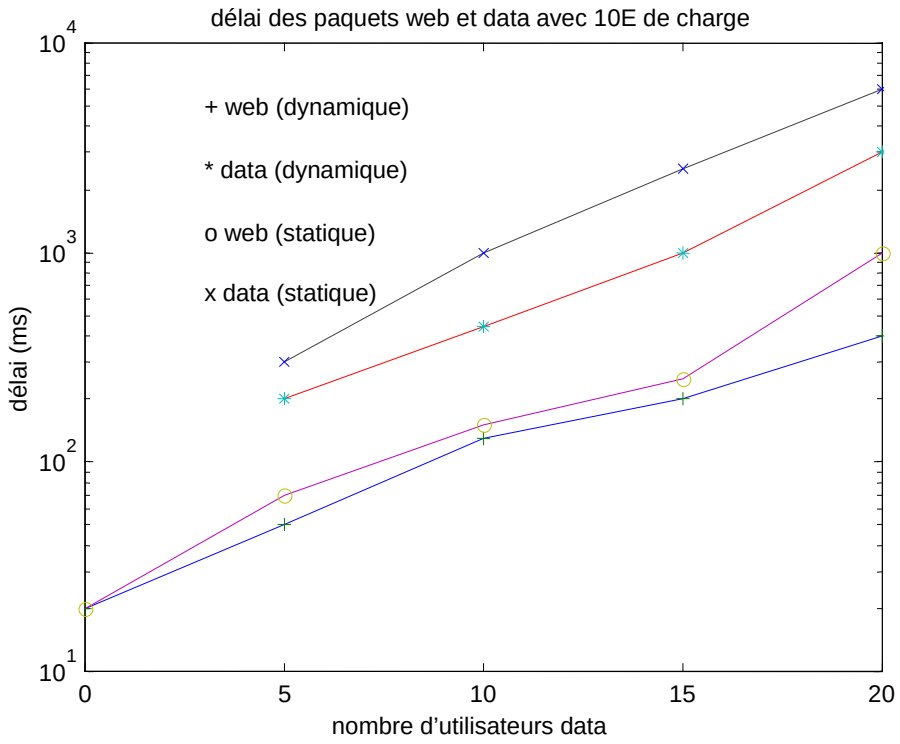



**Figure 6.11 Délai d'attente des paquets data et web en fonction des sources data**

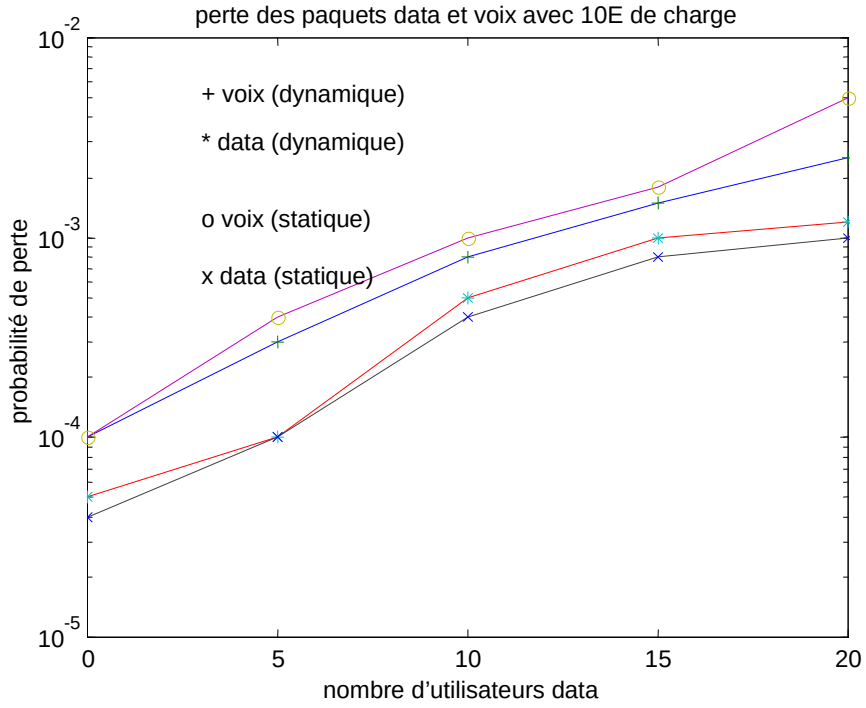



**Figure 6.12 Perte des paquets voix et data en fonction de nombre de sources data**

### 6.3.3 Allocation de ressources en S-CDMA/PRMA

En S-CDMA/PRMA, les ressources sont partagées sur trois plans ; le plan fréquentiel, le plan temporel et le plan de code. Comme dans le cas de S-CDMA, le partage de ressources entre les différents services n'utilise pas le plan fréquentiel. Dans [73, 74], on démontre que tout partage fréquentiel diminue le gain de multiplexage et rend le système rigide et inflexible. Les deux plans utilisés pour le partage de ressources sont le plan de code et le plan temporel. Le nombre de codes est très limité en S-CDMA/PRMA et une division de ressources au niveau de code est difficile à réaliser. La division au niveau temporel paraît plus logique et efficace. Le schéma d'allocation devient :

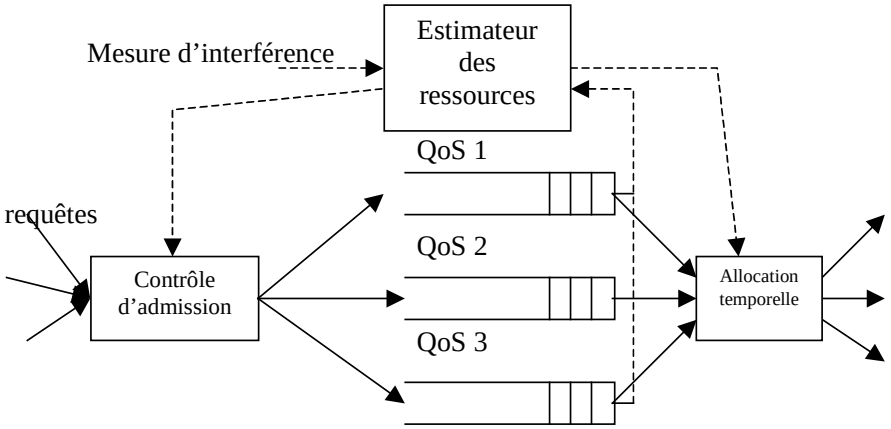



**Figure 6.13 Allocation de ressources en S-CDMA/PRMA**

L'allocation temporelle est estimée suivant les ressources disponibles qui influencent aussi la décision de la fonction de contrôle d'admission. Les trois classes de services sont le RTC (utilisateurs voix), le ITC (utilisateurs web) et le STC (utilisateurs data). L'allocation de ressources n'a pas une dimension de code dans la figure 6.13 puisque les codes sont distribués entre les utilisateurs suivant le protocole d'accès S-CDMA/PRMA expliqué dans le chapitre précédent de façon à donner les utilisateurs RTC la priorité maximale, puis les utilisateurs ITC et enfin STC.

Dans ce qui suit, on va étudier le multiplexage de services dans le même canal. L'essentiel est de comparer la capacité totale du système en cas de multiplexage des différents services sur le même canal et en cas de séparation temporelle de services.

La comparaison est basée sur des simulations. Le simulateur NS est utilisé pour simuler un système LEOS comme décrit dans le deuxième chapitre. Une technologie multi-faisceaux est utilisée. Dans chaque faisceau on a 24 fréquences porteuses. Chaque fréquence a une bande passante montante égale à la bande passante descendante égale à 155Kb/s. Le G/W a une bande de 155Mb/s ainsi que la liaison inter-satellite.

Une source voix se comporte comme une source ON-OFF avec les paramètres $t_{on} = 1s$ et $t_{off} = 1.35s$

Une source web se comporte comme décrit dans le paragraphe 5.3.2 avec les paramètres :

Le débit utilisé est de 8Kb/s.

Le nombre d'appels dans une session est géométrique de moyenne $N_p$= 5.

Le temps de lecture est géométrique de moyenne $T_R$ = 412s.

Le nombre de rafales dans un appel est géométrique de moyenne $N_b$ = 25.

Le temps séparant deux rafales consécutives est géométrique de moyenne $T_{sep}$.= 0.5s.

Enfin les paramètres de distribution de Pareto sont $\alpha$ = 1.1, $k$ = 81.5 et la moyenne d'une rafale est $L_w$ = 24paquets.
Une source data se comporte comme décrit dans 3.2.2 avec les paramètres $\lambda$ = 0.25 et $L_s$ = 100 paquets.

#### *6.3.3.1 Services RTC (voix) et ITC (web)*

On va comparer le comportement du système en deux cas qui sont la séparation et le multiplexage des deux services. Les deux cas sont représentés par deux stratégies d'allocation de ressources :

- Division ; on divise les ressources entre les utilisateurs voix et les sources web en donnant 4 slots temporels pour les utilisateurs voix et les 4 restants dans une trame pour les sources web. La fonction de permission d'un tel service prend une valeur de zéro sur les slots qui ne lui sont pas alloués.
- Multiplexage ; on assigne tous les slots aux deux types des utilisateurs. Les utilisateurs accèdent à n'importe quel slot en appliquant le protocole S-CDMA/PRMA expliqué dans le chapitre précédent.

Pour les utilisateurs voix, on peut faire des calculs mathématiques et des simulations tandis que seule une simulation est faisable en cas des sources web et en cas de multiplexage.
Dans la figure 6.14, on trace la probabilité de perte des paquets voix ainsi que le délai subi par un paquet web. Le graphe montre que la capacité de système est de 18 utilisateurs voix et 200 sources web avec un délai maximal de 200ms. La figure 6.15 montre la probabilité de perte des utilisateurs voix et le délai d'attente des paquets web pour différents nombres de sources vocales et webs. Le terme VUT (Voice User Terminal) représente un utilisateur voix. On remarque que pour 15 utilisateurs voix, on peut accepter 180 sources webs avec un délai de 80ms. Le délai est donc diminué et la QoS offerte au trafic web est améliorée mais la capacité totale du canal est dégradée. Ceci est dû au fait que le comportement de deux trafics voix et web sont très différents ainsi que leurs QoSs. Le long délai pris par une session web pour être transmise (de l'ordre de 20s dans le cas de 8Kb de débit) par rapport au talkspurt d'une source voix (1s) dégrade la qualité offerte aux utilisateurs voix même dans le cas où on leur donne une priorité plus élevée. En effet, la priorité donnée dans le protocole S-CDMA/PRMA est souple et le système est non préemptif. Quand une source web réserve une ressource, elle ne peut pas être arrêtée par un utilisateur voix qui veut envoyer son talkspurt. Les paquets vocaux sont perdus dans ce cas à cause d'une longue attente de la fin d'un appel web et la probabilité de perte des paquets voix augmente considérablement. La séparation de web et de voix est préférable.
La conclusion essentielle de cette comparaison est que le facteur principal qui décide la séparation des deux types de trafic est la grande différence entre le comportement des deux sources de trafic. La différence des QoS demandées par les deux sources n'est pas cruciale comme on a démontré dans le chapitre précédent. Les limites de contrôle et de réservation pour les deux services sont proches et la différence entre les deux techniques d'accès appliquées sur le sous-système voix et sur le sous-système data peut résoudre le problème de la QoS. Un système préemptif peut résoudre le problème en permettant l'utilisateur voix d'interrompre la source web pour envoyer ses paquets. Un tel système perd une partie des paquets webs envoyés et risque de gaspiller les ressources.

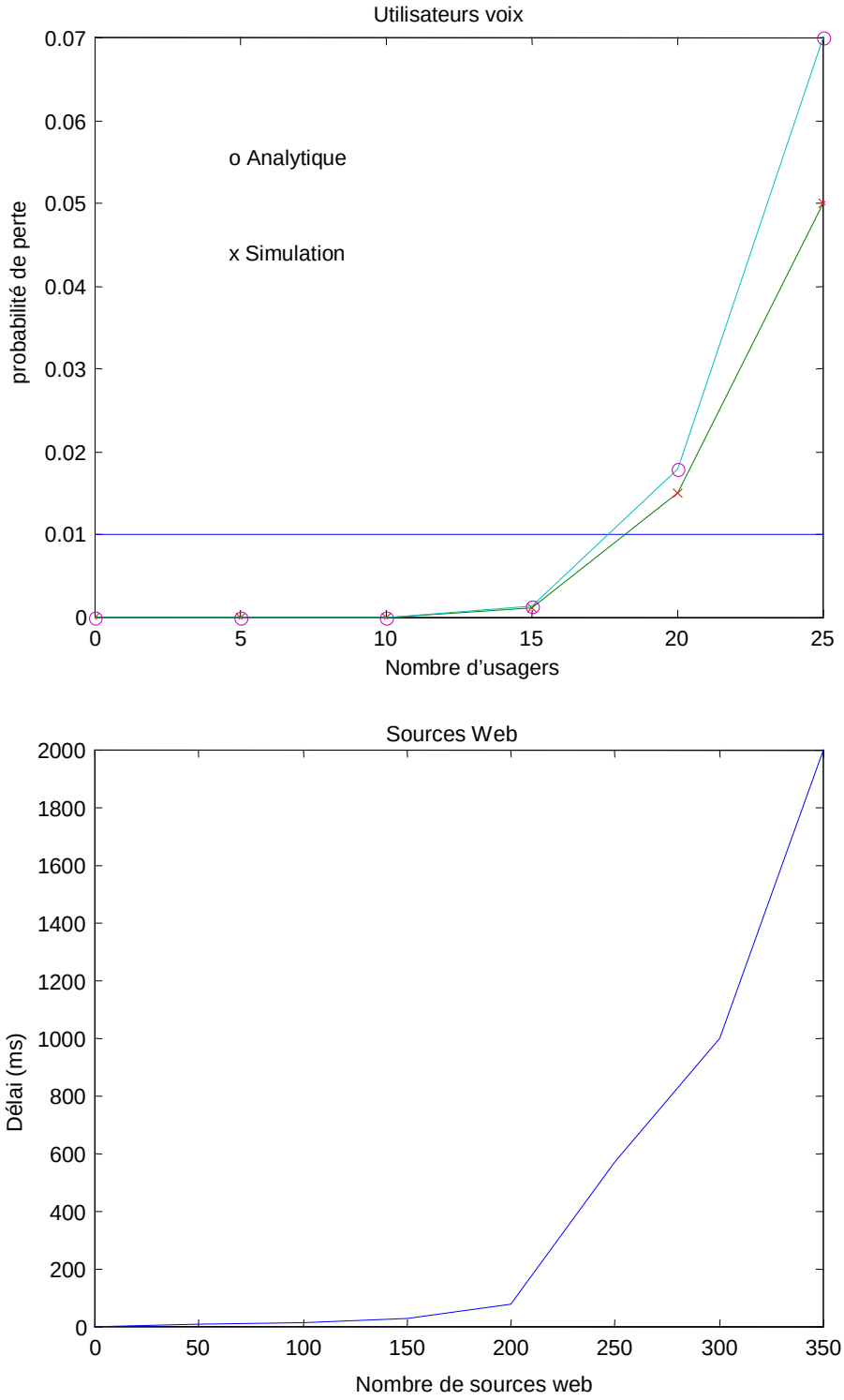



**Figure 6.14 Cas de séparation des utilisateurs voix et web**

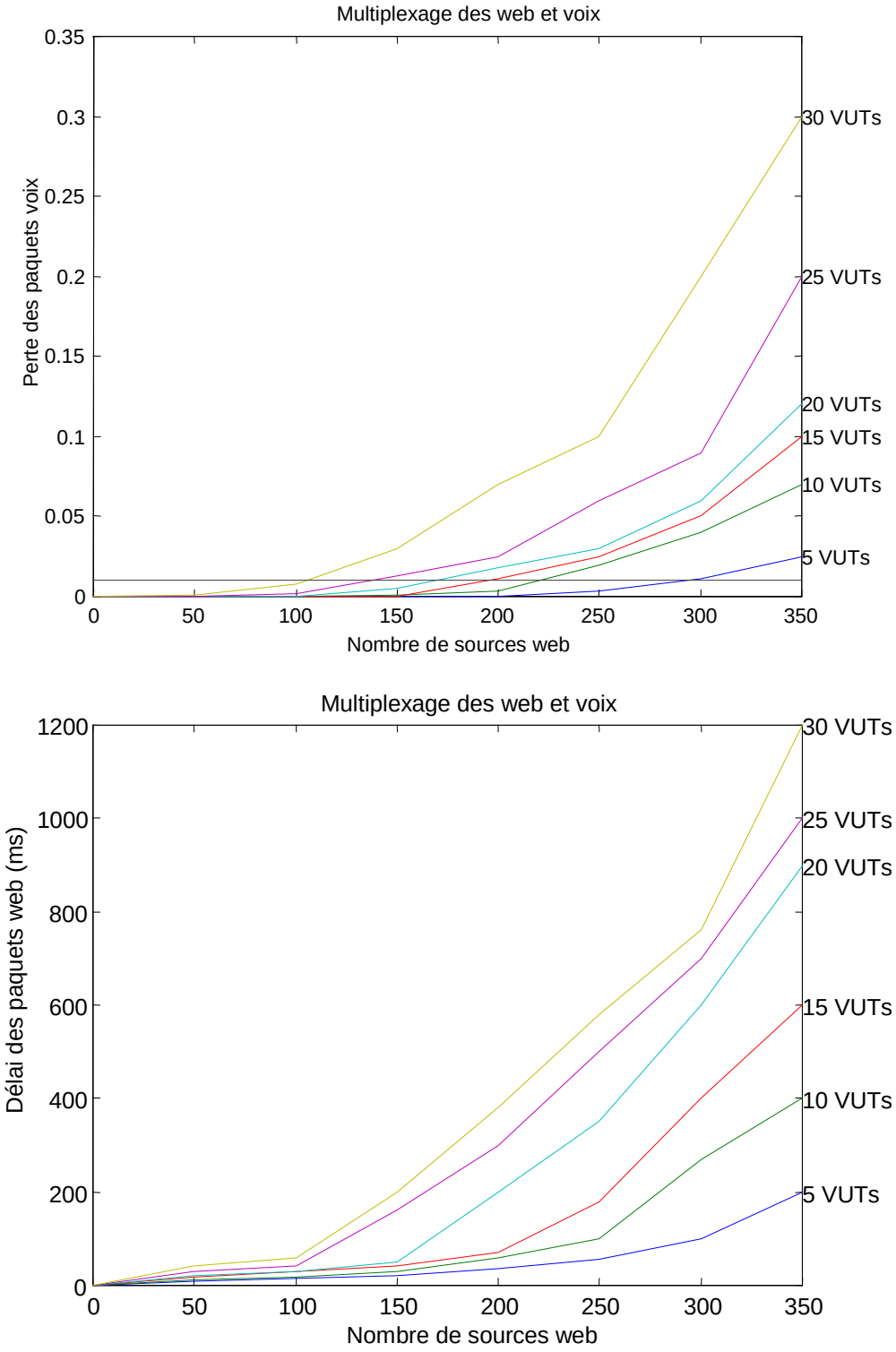



**Figure 6.15 Cas de multiplexage des voix et web**

### *6.3.3.2 Services RTC (voix) et STC (data)*

Les services voix et data ont des qualités de service très différentes mais possèdent des sources de trafic comparables où la longueur moyenne de fichier est de l'ordre de talkspurt (un fichier est considéré comme un court message). Le multiplexage des deux services considère des fonctions de permission choisies dans le paragraphe 5.8.3 afin de minimiser l'influence des sources data sur les utilisateurs voix. Les deux stratégies à comparer sont toujours celles introduite dans la section précédente ; la séparation et le multiplexage de services.

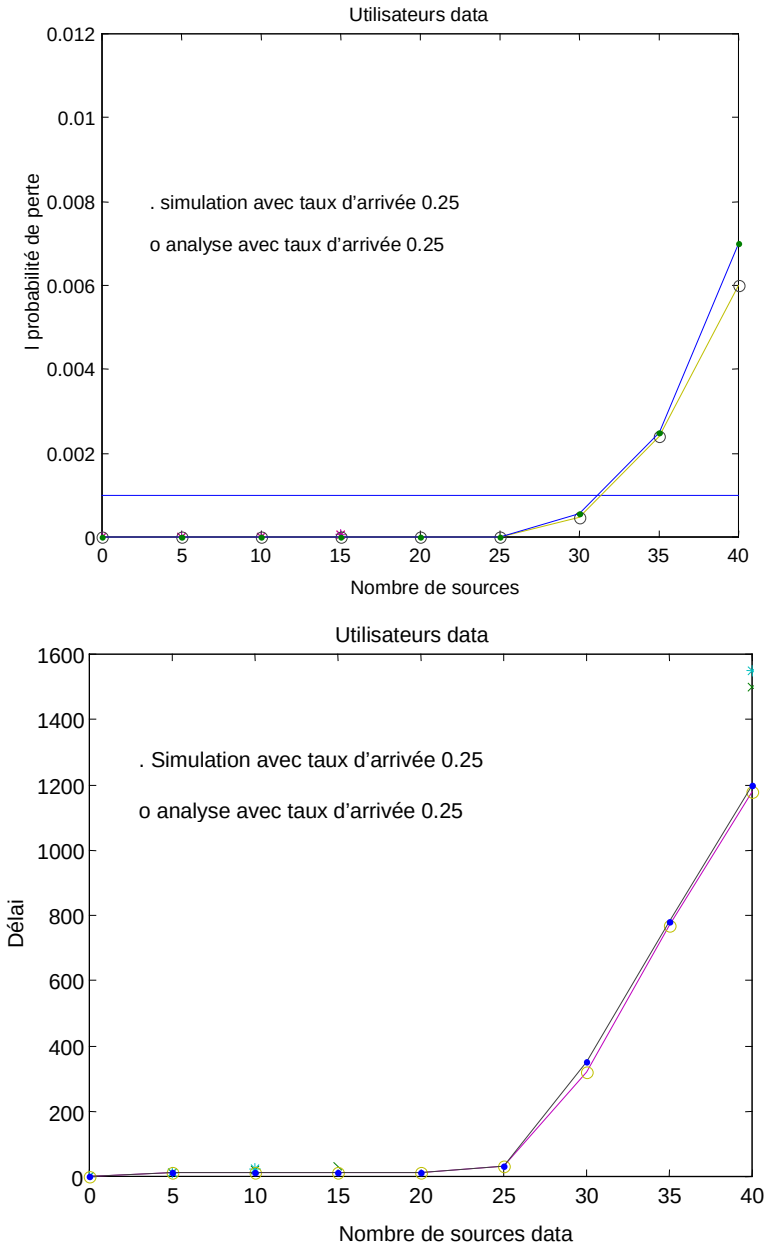



**Figure 6.16 quatre slots pour les utilisateurs data**

Dans la figure 6.16 on remarque que la limite des utilisateurs data acceptés sur les 4 slots d'une trame atteint 32 utilisateurs avec une probabilité de perte inférieure à 0.1%. Le délai

d’attente dans ce cas est de 600ms qui est un délai acceptable par un paquet data de qualité supposée best effort. Les quatre autres slots sont affectés aux utilisateurs voix et peuvent accueillir jusqu’à 18 utilisateurs voix avec une QoS acceptée (figure 6.14).
On passe maintenant à la deuxième stratégie qui mélange les deux types de sources voix et data dans les même slots. On remarque dans la figure 6.17 qu’avec 20 utilisateurs voix on peut accepter 32 utilisateurs data avec un délai d’attente de 150ms. Le nombre d’utilisateurs voix est augmenté avec une meilleure qualité pour les utilisateurs data.

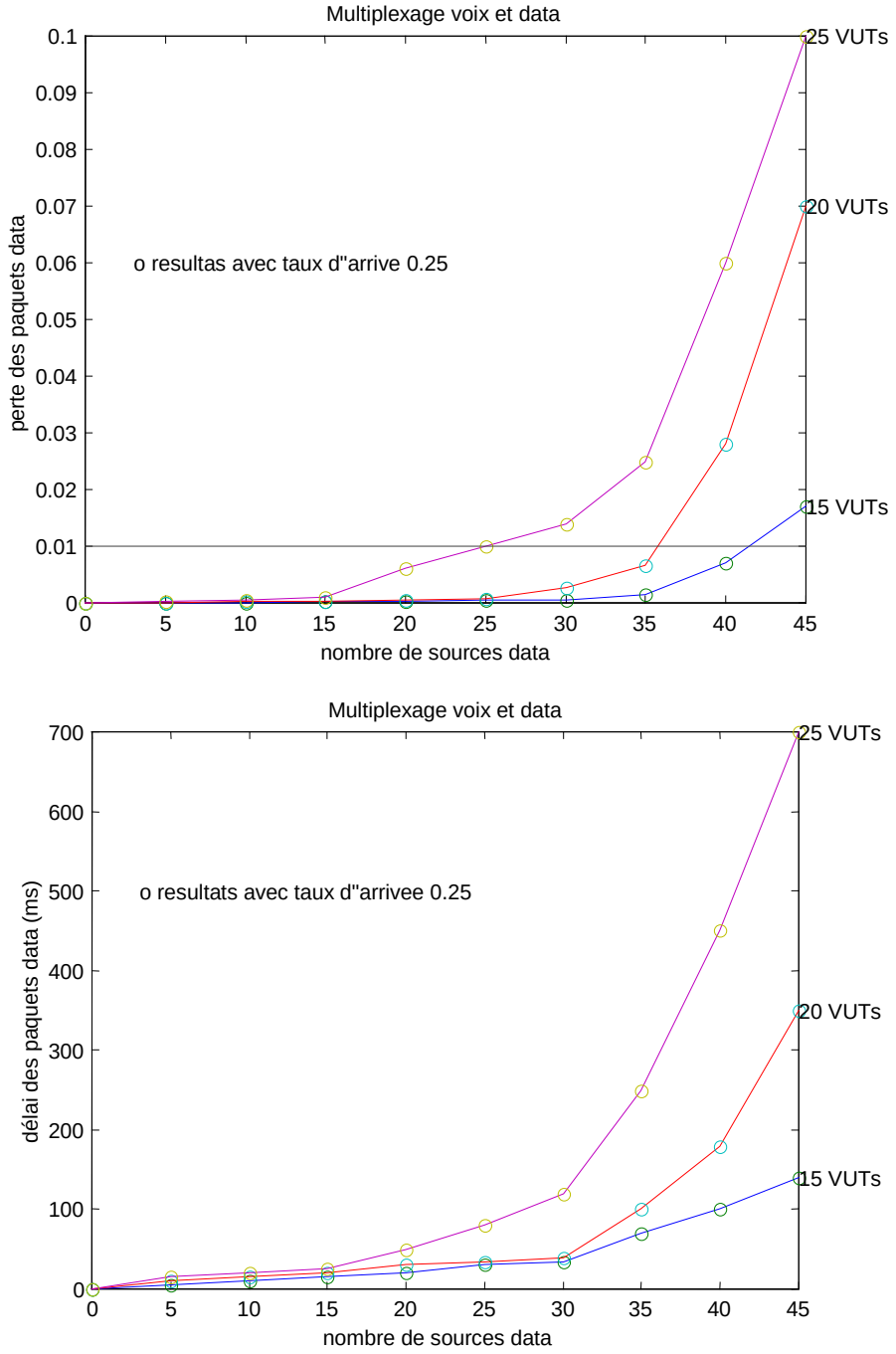



**Figure 6.17 Multiplexage des sources voix et data**

D’après cette étude on conclut que le fait de mélanger les utilisateurs data avec les utilisateurs voix est préférable même si les deux types de service ont deux QoSs très différentes. Le fait de multiplexer les usagers a le résultat de diminuer le délai d’attente des paquets data.

#### *6.3.3.3 Services ITC (web) et STC (data)*

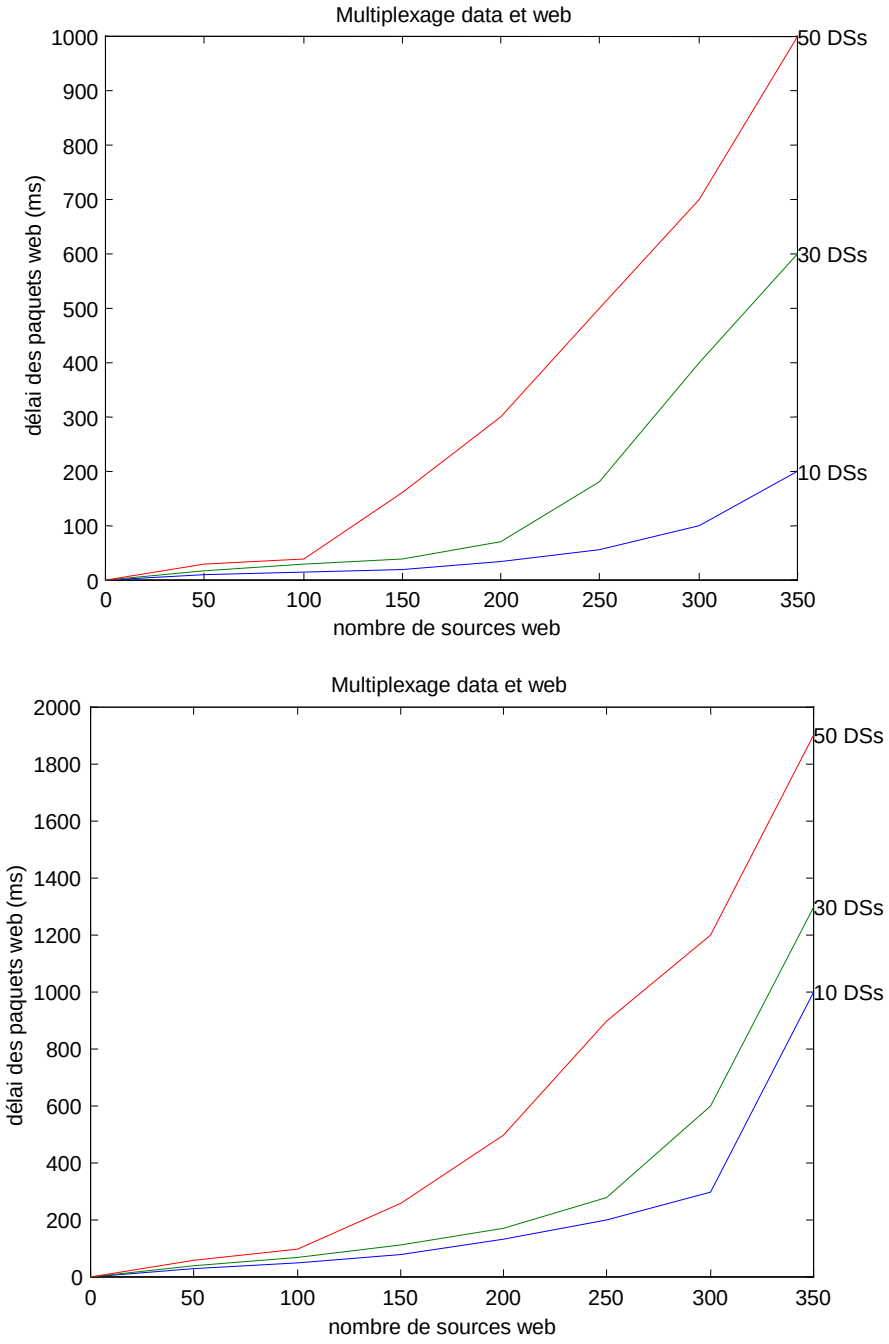



**Figure 6.18 Multiplexage de data et de web**

Les sources web et data utilisées dans cette thèse ont des comportements de trafic très différents mais des qualités de service comparables. Le fait que les deux types de source appartiennent au sous-système data (chapitre 5) permet l’utilisation du même protocole

d'accès pour les deux types de ressource avec deux différentes fonctions de permission afin de donner une priorité au trafic web qui ne supporte pas un très long délai comme le trafic data (best effort). La figure 6.18 montre qu'on peut accepter jusqu'à 250 utilisateurs web avec un délai d'attente inférieur à 200ms quand 30 DSs (Data Sources) sont présentes dans le système. La capacité totale du système est améliorée. D'autre part le délai d'attente des paquets data est de 300ms dans ce cas et de 500ms dans le cas de séparation des deux types de trafic. Le multiplexage des sources web et data est donc préférable.

#### *6.3.3.4 Services RTC (voix) ITC (web) et STC (data)*

D'après les discussions précédentes, on peut proposer une stratégie d'allocation de ressources pour les différents types de trafic utilisé dans ce chapitre. On sait que le multiplexage de sources web avec les utilisateurs voix est inacceptable tandis que le multiplexage de sources data et d'utilisateurs voix ainsi que les sources data et les sources web améliore l'efficacité du système. Pour cette raison, on utilise la stratégie suivante d'allocation et on la compare au multiplexage des trois services présenté dans 5.8.4.

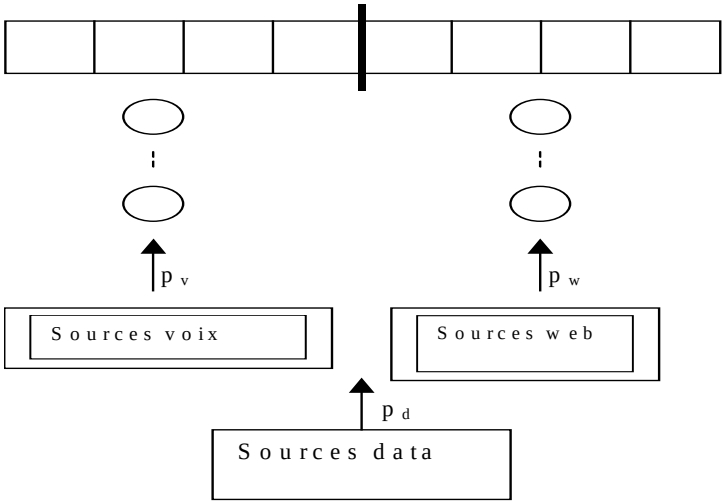



**Figure 6.19 Allocation de ressources en S-CDMA/PRMA**

Dans la stratégie d'allocation utilisée dans la figure 6.19, les slots sont séparés par une frontière fixe pour séparer les sources web et les utilisateurs voix. Les utilisateurs voix ont le droit d'accéder aux quatre slots en utilisant la probabilité de permission $p_v(x)$ alors que les sources web ont le droit d'accéder sur les quatre slots restants avec une permission $p_w(x)$. Enfin, les sources data peuvent envoyer sur tous les slots mais en utilisant une fonction restrictive de permission introduite dans 5.8.4 $p_d(x) = f2(x)$.

La comparaison entre cette technique et celle présentée dans le paragraphe 5.8.4, où tous les services sont mélangés sur les même slots, est tracée dans les figures 6.20 et 6.21. On remarque que le nombre maximal d'utilisateurs data qu'on peut accepter dans le cas sans frontière est de 16 sources tandis que ce numéro passe à 18 sources dans le cas où une frontière séparerait les deux services web et voix. La capacité du système est améliorée et le délai d'attente d'un paquet data est diminué. En effet, ce délai passe de 700ms en cas de la stratégie sans frontière à 400ms en cas de la stratégie avec frontière. On remarque aussi que l'influence des sources web sur les utilisateurs voix n'existe pas dans cette dernière stratégie d'allocation.

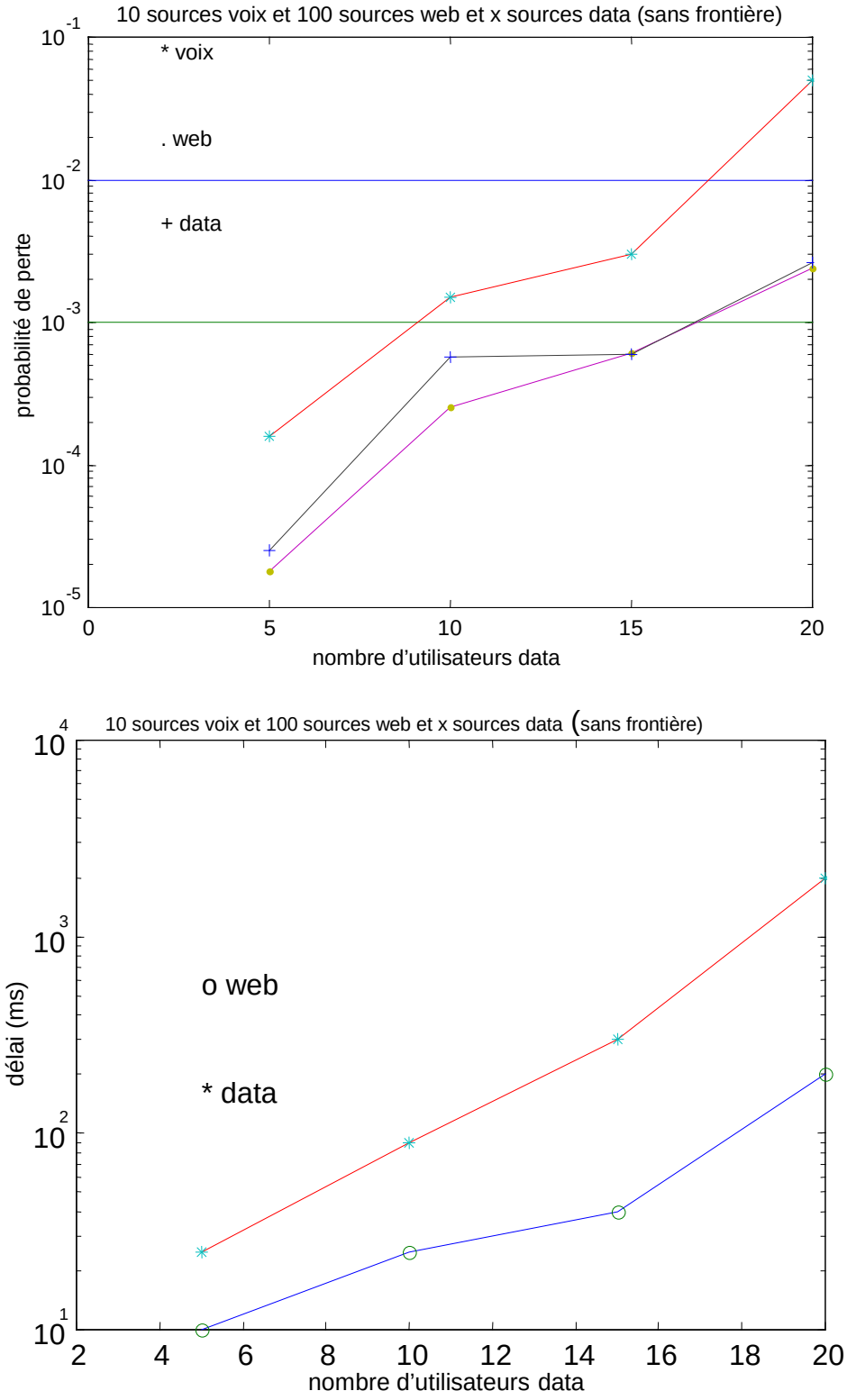



**Figure 6.20 Stratégie d'allocation sans frontière**

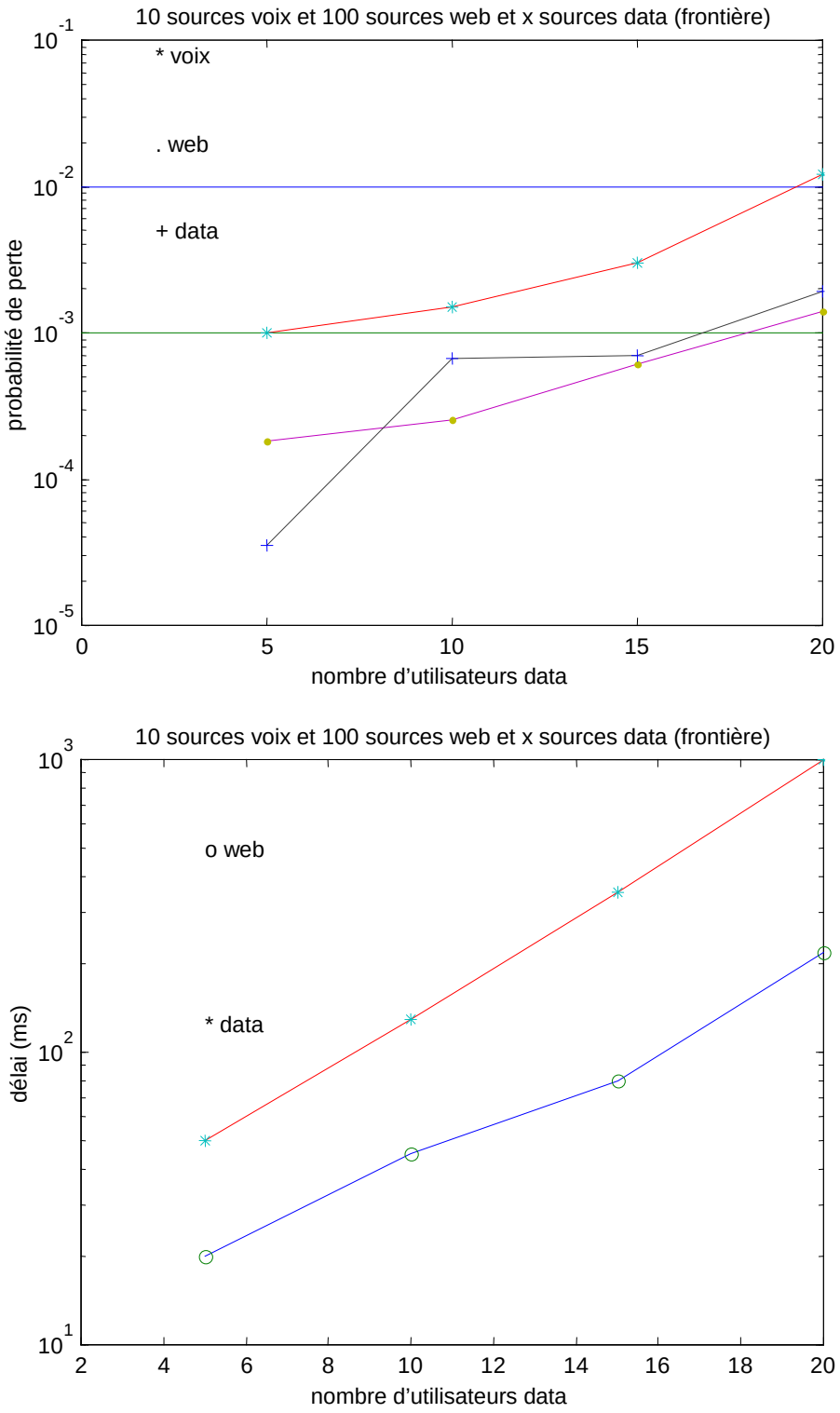



**Figure 6.21 Stratégie d'allocation avec frontière**

On note que la stratégie avec frontière rend le système plus rigide. Il faut avoir une prévision du nombre d'utilisateurs voix qui demandent une connexion. Pour résoudre ce problème on peut utiliser une stratégie avec frontière mobile.

## *6.4 Conclusion*

Dans ce chapitre, on a comparé les différents protocoles d'accès étudiés dans cette thèse. On a déduit que malgré l'amélioration faite au protocole PRMA pour l'adapter au contexte des satellites LEO, soit par notre proposition ou par la proposition de Hindering States, le protocole S-PRMA possède une performance inférieure au protocole S-CDMA ou S-CDMA/PRMA. Ces deux derniers possèdent une bonne performance surtout quand on a un seul type des sources. Dans le cas des plusieurs types des sources de trafic, des stratégies d'allocation de ressources sont nécessaires. Un multiplexage simple de services dégrade l'efficacité des protocoles. Une nouvelle stratégie à frontière dynamique est proposée en S-CDMA et une comparaison avec une stratégie statique montre que notre proposition améliore la performance de système considérablement.
En S-CDMA/PRMA, on a démontré que le multiplexage de deux services améliore l'efficacité en augmentant la capacité en excluant le cas où on mélangerait les sources web avec les utilisateurs voix. Dans ce cas, la capacité du système est diminuée. Ceci est dû principalement au fait que les deux types de source sont très différents ainsi que leurs QoS. Pour cette raison, on a séparé les utilisateurs voix des sources web tandis que les sources data peuvent accéder aux deux parties de ressources. Cette stratégie montre une amélioration de la QoS des différents services par rapport au cas où tous les sources seraient mélangées dans les même slots. Cette technique est inflexible mais une stratégie avec frontière dynamique pourrait résoudre ce problème.

# 7 Chapitre VII
# Conclusion

Dans ce chapitre, on va décrire les conclusions essentielles de notre thèse ainsi que des ouvertures à des recherches futures découlant de nos études. Ce chapitre présente aussi notre point de vue sur le développent des réseaux mobiles personnels et le rôle du satellite LEO dans ce développement.

Dans cette thèse, on a étudié la couche d'accès MAC et la fonction de contrôle d'admission CAC dans le contexte satellitaire. Le but principal était de développer une couche MAC basée sur l'intégration des plusieurs services qui sont multiplexés à l'aide d'un protocole d'accès spécifique. Ce protocole d'accès doit réaliser une qualité de service demandée par les différents services tout en maximisant l'utilisation de ressources radios. La fonction CAC est définie sous ce point de vue pour chacun de services.

L'intégration de satellite avec l'UMTS et l'utilisation de l'ATM au sein du réseau de cœur sont deux facteurs essentiels qui dirigent nos propositions sur la couche MAC. Les services vus par cette couche sont appelés les MTCs (MAC Transfer Capabilities) et doivent se coordonner avec les services de l'UMTS et l'ATM. Le choix est basé aussi sur les sources de trafics utilisées dans les différents chapitres. La définition complète des MTCs est accomplie dans le chapitre 5 où trois MTCs sont proposés pour supporter trois types de services ; le temps réel, l'interactif et le best effort.

Nous avons proposé un protocole S-PRMA, qui est une version satellite de PRMA, et qui démontre une efficacité moyenne quand ses paramètres sont optimisés. L'étude est basée sur un modèle mathématique et une simulation. On démontre que le fait d'avoir un long RTD impose l'accroissement de la probabilité de permission pour les utilisateurs voix. Une permission restrictive est donnée aux utilisateurs data qui ont une priorité inférieure. Ceci diminue l'influence des utilisateurs data sur les utilisateurs voix. Malgré les changements faits, l'efficacité reste limitée ce qui nécessite l'introduction d'une composante CDMA dans la couche MAC.

On propose ensuite un protocole d'accès S-CDMA utilisant le CDMA et la notion de permission d'accès au canal. On démontre que quand des utilisateurs voix utilisent seuls le canal, le CDMA classique donne une performance maximale. Quand on mélange plusieurs sources de trafic, un protocole qui utilise deux fonctions de permission pour les utilisateurs voix et data donne des résultats intéressant quand ces deux fonctions sont choisies de façon à donner aux services temps réel une priorité élevée. Une fonction restrictive pour les data et généreuse pour les voix donne une performance importante. Le problème reste toujours l'influence d'un type de service sur l'autre via l'interférence et la difficulté de séparer les différents services. Ce problème se pose quand des services non temps réel mais qui ont des

contraintes temporelles sont introduits. L'utilisation des services interactifs comme le web paraît difficile. Pour cette raison on a introduit une composante temporelle dans le canal, d'où le S-CDMA/PRMA.
Nous avons développé une version satellite du protocole CDMA/PRMA. Dans ce protocole, les notions de contention et de réservation sont modifiées afin d'adapter le protocole au canal satellite. La fonction de permission est utilisée pour contrôler le trafic afin de maximiser l'utilisation de ressources. Trois MTCs sont utilisés à ce stade avec trois niveaux de priorité. Le choix des paramètres du canal et des fonctions de permission est effectué par modélisation mathématique et simulation. On remarque à ce stade que le multiplexage de différents services peut causer des problèmes, ce qui nécessite des stratégies de multiplexage de services avancées.
Dans le dernier chapitre, on compare les différents protocoles d'accès et on déduit que S-CDMA et S-CDMA/PRMA ont une performance supérieure au S-PRMA. Des techniques d'allocation dynamique de ressources en S-CDMA améliorent l'efficacité du système considérablement. Quant au protocole S-CDMA/PRMA, on remarque que le multiplexage de deux services ensemble n'est pas toujours souhaitable surtout quand ils sont très différents par la qualité de service et le comportement de trafic. Il est préférable de séparer les services web et voix d'une façon temporelle alors que les utilisateurs data peuvent utiliser le canal de voix ou de web avec une basse priorité. Ceci nécessite une allocation de ressources qui divise le canal en deux sous canaux ; voix et web. Les sources data peuvent accéder tout le canal en utilisant une permission très basse. La séparation peut être statique ou dynamique. Une séparation dynamique nécessite un seuil mobile et rend le système plus flexible.
Une remarque importante est que la communication mobile sans fil doit toujours respecter un des principes fondamentaux de Shanon qui paraît en contradiction avec les tendances en conception des réseaux d'accès. Ce principe est le fait que le « meilleur » signal et la « pire » interférence sont vue par un observateur extérieur comme un bruit Gaussien uniforme. La pire « perturbation » est vue comme un bruit uniforme. Puisque l'interférence ne peut pas être éliminée, la solution est de profiter de cette interférence en utilisant le signal comme bruit. Pour un utilisateur, l'interférence est vue comme bruit à éliminer. Le CDMA est l'application directe de cette philosophie.
En satellite, l'interférence est encore plus importante, ce qui augmente l'efficacité du CDMA dans ce contexte. Dans cette thèse, on a démontré que l'utilisation du CDMA augmente la capacité du système et améliore la qualité de service des différents utilisateurs et aussi permet des méthodes de multiplexage qui augmente le gain statistique.
D'autre part, le fait que la plupart des systèmes mobiles terrestres utilisent des autres techniques comme le TDMA ou le FDMA impose le choix du protocole d'accès multiple puisque l'intégration du satellite dans le réseau terrestre est une nécessité.
Pour cette raison, on a amélioré une technique hybride d'accès qui est le S-CDMA/PRMA pour être utilisée dans la constellation de satellites. Cette technique démontre une efficacité considérable qui peut dans certains cas dépasser celle du S-CDMA.

## *Ouvertures :*

Le problème de multiplexage de services est d'allocation de ressources peut être élaboré et développé pour mieux gérer les ressources radio qui sont très chères dans les systèmes satellites. D'autre part, la remarque qui considère que les protocoles S-CDMA et S-PRMA sont des cas particuliers du S-CDMA/PRMA peut être développée pour définir une technique

qui passe d'un protocole d'accès à un autre suivant les conditions du système. L'étude de performance et l'optimisation de cette technique représente un sujet de recherche important. L'utilisation de nos protocoles sur les systèmes MEO n'est pas discutée dans cette thèse ainsi que la possibilité d'utiliser le PRMA dans ce contexte.

# 8 Références :


[1] Raymond L. Pickholtz. Communications by Means of Low Earth Orbiting Satellites. The George Washington University. Report 1995.

[2] Gérard Maral, Jean Jacques DERIDER. Basic Concepts of Low Earth Satellite Systems for Communications. ENST Toulouse. Report 1991.

[3] Projet : Constellation des satellites pour le multimédia. http://constellation.prism.uvsq.fr.

[4] G. Maral, M. Bousquet. Satellite Communications Systems. Third Edition. WILEY. 1998.

[5] Eitan Altman, Afonso Feriera, Jérom Galtier. Les réseaux satellites de télécommunication. Edition DUNOD. Paris 1999.

[6] Abbas Jamalipour. Low Earth Orbital Satellites for Personal Communications Networks. Artech House publishers. Boston, London 1998.

[7] V. Andrew J. CDMA Principles of Spread Spectrum Communication. Addison-Welsey 1995.

[8] Harry G. Perros, Khaled M. Elsayed. Call Admission Control Schemes: A Review. Department of Computer Science, North Carolina State University. Report 1996.

[9] IRIDIUM Project. www.iridium.com.

[10] Xavier Lagrange, Philippe Godlewski, Sami Tabbane. Réseaux GSM-DCS. HERMES. 1996.

[11] Adami, D. Marchese, M. Ronga, L. S. TCP/IP-based multimedia applications and services over satellite links: experience from an ASI/CNIT project. IEEE Personal Communications. Volume 8 Issue: 3, June 2001.

[12] Clark P. Hammond, C. Jaenho Oh; Wen Wang; Hadynski G. QoS-based provisioning of ATM services over DAMA-controlled SATCOM networks**.** Military Communications Conference Proceedings, 1999. MILCOM 1999. Volume: 2, 1999.

[13] 3GPP TSG RAN. Quality of Service (QoS) concept and architecture. 3G TS 23.107 V3.0.0 (1999-10).

[14] Jhon Fareserotu and Ramjee Prasad. Broad band wide Area Networking via IP/ATM over SATCOM. IEEE Journal on Selected Areas in Communications. Volume 17, No 2, February 1999.

[15] Dennis P. Connors, Bo Ryu and Son Dao. Modeling and Simulation of Broadband Satellite Networks. Part I: Medium Access Control for QoS Provisionning. IEEE Communications Magazine. Volume 27. March 1999.

[16] Heba Koraitim, Samir Tohmé. Resource Allocation And Connection Admission Control in Satellite Networks. IEEE Journal On Selected Areas In Communications. February 1999.

[17] Enrico Del Re. A Coordinated European Effort for the Definition of a Satellite Integrated Environment for Future Mobile Communications. IEEE Communications Magazine. Volume 34. February 1996.

[18] INSURED Project. http://www.nh.gr/INSURED/.

[19] SINUS Project. http://manuel.brad.ac.uk/Research/SINUS/index1.html.

[20] Alexander Guntsch, Mohamed Ibnkahla, Giacinto Losquadro, Michel Mazella, Daniel Rovira and Andreas Timm. EU's R&D Activities on Third Generation Mobile

Satellite Systems (S-UMTS). IEEE Communications Magazine. Volume: 36, February 1998

[21] Heba Koraitim. Protocoles D'accès multiple et allocation de ressources sur un canal satellite. Thèse à l'ENST. September 1998.

[22] Fulvio Ananasso and Francesco Delli Priscoli. The Role of Satellite in Personal Communication Services. IEEE Journal On Selected Areas In Communications. Volume 13 February 1995.

[23] Radio Equipment and Systems (RES); Trans-European Trucked Radio (TETRA); Voice + Data; Part I. ETSI ETS 300 392. Edition 1. 1996.

[24] Sanjiv Nanda, David J. Goodman, Uzi Timor. Performance of PRMA: A Packet Voice Protocol for Cellular Systems. IEEE Transactions On Vehicular Technology, Volume 40. August 1991.

[25] S. Tasaka. Stability and Performance of the R-ALOHA packet Broadcast System. IEEE transaction on Computer. August 1983.

[26] Enrico Del Re, Romano Fantacci and Giovani Giambene. Performance Evaluation of the PRMA protocol for Voice and Data Transmission in Low Earth Orbit Mobile Satellite Systems. PIMRC 1998.

[27] Enrico Del Re, Romano Fantacci and Giovani Giambene. Performance Analysis of an Improved PRMA Protocol for Low Earth Orbit-Mobile Satellite Systems. IEEE Transactions On Vehicular Technology. Volume 48. May 1999.

[28] Stochastic Process in Queuing Theory. A. A. Borovkov. Spriger-Verlag. 1976.

[29] S. Tohmé and L. Decresefond. Evaluation de performance. ENST, Janvier 1998.

[30] David J. Goodman and Sherry X. Wei. Efficiency of Packet Reservation Multiple Access. IEEE Transactions On Vehicular Technology. Volume 40. February 1991.

[31] Gérard Maral, Joaquin Restrepo, Enrico Del Re, Romano Fantaci and Giovanni Giambene. Performance Analysis For a Garanteed Handover Service in an LEO Constellation with a « satellite-Fixed Cell » System. IEEE Transactions On Vehicular Technology. Volume 47. November 1998.

[32] Gérard Maral et Restrepo Joaquin. Transfert d'une communication dans une constellation de satellite non GEO. Demande de brevet français N° 97-02392.

[33] N. D. Wilson, R. Ganesh, K. Joseph and D. Raychaudhuri. Packet CDMA versus Dynamic TDMA for Multiple Access on an Integrated Voice/Data PCN. IEEE J. on Selected Areas in Communications. Volume 11. August 1993.

[34] N. D. Wilson, R. Ganesh, K. Joseph and D. Raychaudhuri. Performance of cellular Packet CDMA in an Integrated Voice/Data Network. Int. Journal Wireless Information Networks. Volume 1. 1994.

[35] M. B. Pursley. Performance Evaluation of Phase-coded Spread Spectrum Multiple Access Network-Part I: System Analysis. IEEE Trans. Commun. Volume 10. August 1977.

[36] Selection procedure for the choice of radio transmission technologies of the UMTS. UMTS technical report ETSI TR 101 112 V3.2.0 (1998).

[37] A. Erik and J. Zender. A Traffic Model for Non-real-time Data Users in a Wireless Radio Network. IEEE Communication Letters. Volume 1. March 1997.

[38] Mohsen S. and Evaggelos G. Multi-Access Strategies for an Integrated Voice/Data CDMA Packet Radio Network. IEEE Transaction On Communications. Volume 43. February/Mars/April 1995.

[39] E. Miltiades A. Multiuser Descriptive Traffic Model. IEEE Transaction On Communications. Volume 44. October 1996.
[40] M. Hu J. Chang. Collision Resolution Algorithms for CDMA Systems. IEEE J. on Selected Areas in Communications. Volume 8. May 1990.
[41] Payam Taaghol, Enrico Burachini, Riccardo De Gaudenzi, Gennaro Gallinaro, Joon Ho Lee, Chung Gu Kang. Satellite UMTS/IMT2000 W-CDMA Air Interfaces. IEEE Communications Magazine. Volume 10. September 1999.
[42] Heba Koraitim, Gunter Schafer, Samir Tohme. Quality of Service Aspects of Transport Technologies for UMTS Radio Access Network. PWC2000 Gdansk, Poland.
[43] T. Liu and J. A. Silvister. Joint Admission Congestion Control for Wireless CDMA Systems Supporting Integrated Services. IEEE J. on Selected Areas on Telecommunications. Volume 16. August 1998.
[44] K. Gilhoussen, A. J. Viterbi. On the Capacity of Cellular System. IEEE Transaction On Vehicular Technology. Volume 40. May 1991.
[45] I. F. Akyildiz and D. A. Levine. A Slotted CDMA Protocol with BER Scheduling for Wireless Multimedia Networks. IEEE/ACM Transactions On Networking. Volume 7 April 1999.
[46] Alfred Baier, U. Fiebig, G. W. Koch, P. Teder and J. Thieleke. Design Study for A CDMA-Based Third Generation Mobile Radio System. IEEE J. on Selected Areas on Telecommunications. Volume 12. May 1994.
[47] ETSI Standards available at http://www.etsi.org/getastandard/home.htm.
[48] ITU publications available at http://www.itu.int/publications.
[49] Martin Haadart, Anja Klein, Reinhard Loehn, Stefan Oeisterch, Markus Purat, Volker Sommer and Thomas Ulrich. The TD-CDMA Based UTRA TDD Mode. IEEE J. on Selected Areas on Telecommunications. Volume 18. August 2000.
[50] Alex E. Brand and A. Hamid Aghvami. Performance of a Joint CDMA/PRMA Protocol for Mixed Voice/Data Transmission for Third Generation Mobile Communication. IEEE Journal on Selected Areas in Communications. Volume 14. December 1996.
[51] Shibutani A.; Suda H.; Adachi F. Multistage recursive interleaver for turbo codes in DS-CDMA mobile radio Vehicular Technology. IEEE Transactions on communications. Volume: 51. Issue 1. Jan. 2002.
[52] Otal B.; Alonso L.; Agusti. Design and analysis of cellular mobile communications system based on DQRAP/CDMA MAC protocol. R. Electronics Letters. Volume: 38 Issue 3. 31 January 2002.
[53] Vollmer M.; Haardt M.; Gotze. Comparative study of joint-detection techniques for TD-CDMA based mobile radio systems. J. Selected Areas in Communications. Volume: 19. Issue 8. August 2001.
[54] Gessner C.; Kohn R.; Schniedenharn J. Sitte. Layer 2 and layer 3 of UTRA-TDD. Vehicular Technology Conference Proceedings VTC 2000-Spring Tokyo. Volume: 2. 2000.
[55] V. Jackobson. Compressing TCP/IP Headers for Low-Speed Serial Links. Available at http://www.faqs.org/rfcs/rfc1144.html.
[56] Lulea University of Technology/SICS February 1999. IP Header Compression. Available at. http://www.faqs.org/rfcs/rfc2507.html.

[57] Efthymiou N. Yim Fun Hu. Sheriff R.E. Performance of intersegment handover protocols in an integrated space/terrestrial-UMTS environment. IEEE Transactions on Vehicular Technology. Volume: 47. Issue: 4. November 1998.
[58] Koodli R. Puuskari M. Supporting packet-data QoS in next generation cellular networks. IEEE Communications Magazine . Volume: 39 Issue: 2. Feb. 2001.
[59] Abbas Jamalipour, Masaaki Katayama, Takaya yamazato and Akira Ogawa. Performance of an Integrated Voice/Data System in Nonuniform Traffic Low Earth-Orbit Satellite Communication Systems. IEEE Journal on Selected Areas in Communications. Volume 13. February. 1995.
[60] Alex E. Brand and Hamid Aghvami. Multidimensional PRMA with Prioritized Bayesian Broadcast – A MAC strategy for Multiservice traffic over UMTS. IEEE Transaction On Vehicular Technologies. November 1998.
[61] Lin Wang, Jianjun Wu, Aghvami A. H. Performance of CDMA/PRMA with adaptive permission probability control in packet radio networks. IEEE Vehicular Technology Conference. Volume: 3. 1999.
[62] Hoefel R.P.F. de Almeida C. Performance of CDMA/PRMA TDD protocol with decorrelating multiuser detector and adaptive permission access scheme. IEEE Electronics Letters. Volume 37. Issue: 15. July 2001.
[63] A.E. Aghvami, A.H Brand. Joint CDMA/PRMA: a candidate for a third generation radio access protocol Mobile Communications. Towards the Next Millenium and Beyond. IEE Colloquium. 1996.
[64] Calin D. and Areny M. Impact of radio resource allocation policies on the TD-CDMA system performance: evaluation of major critical parameters. IEEE Journal on Selected Areas in Communications. Volume 19. Issue: 10. October 2001.
[65] Jorguseski L. Fledderus E. Farserotu J. Prasal R. Radio resource allocation in third generation mobile communication systems. IEEE Communications Magazine. Volume 39. Issue 2. February 2001.
[66] Young Dae Lee, Sung Lark Kwon, Jin Sung Choi, Jin Young Park, Seung June Yi. Performance evaluation of start of message indicator mechanism for uplink common packet channel in UMTS W-CDMA. IEEE Vehicular Technology Conference. VTC 2001 Spring.
[67] J. Wieselthier and A. Ephermides. Fixed and Movable Boundary Scheme for Integrated Voice/Data Wireless Networks. IEEE Transactions On Communications. Volume 43. January 1995.
[68] Kikalapudi Sriram, Pramod K. Varshney, and J. George Shanthikumar. Discrete-Time Analysis of Integrated Voice/Data Multiplexers with and without speech activity detectors. IEEE Journal on Selected Areas in Communications. Volume SAC-1. December 1983.
[69] S. Bohm, A. K. Alhakeem, K. M. S. Murthy, M. Hachicha and M. Kadoch. Analysis of a Movable Boundary Access Technique for a Multiservice Multibeams Satellite System. Int. Journal of Satellite Communication. Volume 12. 1994.
[70] El-Kadi, M. Olariu, S. Todorova. Predictive resource allocation in multimedia satellite networks. IEEE Global Telecommunications Conference. GLOBECOM '01. Volume 4. 2001.
[71] Boukhatem L., Beylot A.L., Gaiti D., Pujolle G. Performance analysis of dynamic and fixed channel allocation techniques in a LEO constellation with an "Earth-fixed cell"

system. IEEE Global Telecommunications Conference. GLOBECOM '00. Volume 2. 2000.
[72] Teledesic Corporation. Application of Teledesic corporation for a Low Earth Orbit (LEO) satellite system in the Fixed Satellite Service (FSS). 1996.
[73] Klein S. Gilhossen, IRWIN M. Jacob, Roberto Padovani and Lindsay A. Weaver. Increased Capacity Using CDMA for Mobile Satellite Communication. IEEE Journal on Selected Areas in Communications. Volume 8. May 1990.
[74] Klein S. Gilhossen, IRWIN M. Jacob, Roberto Padovani, Lindsay A. Weaver and Andrew J. Viterbi. On the Capacity of Cellular CDMA System. IEEE Transaction on vehicular technology. Volume 40. May 1991.
[75] Y. Fun Hu, Gérard Maral, Erina Ferro. Service Efficient Network Interconnection via Satellite. EU Cost Action 253. WILEY 2002.
[76] NS2. Network Simulator version 2. http://www.isi.edu/nsnam/ns/.
[77] NS manual : ns Notes and Documentation. http://www.isi.edu/nsnam/ns/ns-documentation.html.
[78] Averill M. Law and W. David Kelton. Simulation Modeling and Analysis. Mc-Graw-Hill Book Company. 1982.

# 9 Publications


[1] Ibrahim and Tohmé, " A Modified CDMA/PRMA Medium Access Control Protocol for Integrated Services in LEO Satellite Systems" Mobicom2000 August 6-11, 2000 Boston, Massachusetts USA.

[2] Ibrahim and Tohmé, "A Modified CDMA/PRMA Medium Access Control Protocol for Voice Users in LEO Systems," PWC2000 Gdansk Poland.

[3] Ibrahim and Tohmé. CDMA and PRMA Analytical models for Voice users in Satellite-UMTS Systems. PWC2001 Lappenranta Finland.

[4] Ibrahim and Tohmé. CDMA, PRMA and CDMA/PRMA for Voice users in Satellite UMTS Systems. WATM'2001. Paris. France.

[5] Ibrahim and Tohmé. CDMA/PRMA Analytical models for Voice users in Satellite-UMTS Systems. ICC'2002 New York. USA.

[6] Ibrahim and Tohmé**.** Service Multiplexing and Resource Allocation in S-CDMA/PRMA LEO Systems. ISCC'2002. Toaramina. Italia.

[7] Ibrahim and Tohmé. Service Multiplexing and Resource Allocation in S-CDMA LEO Systems. PIMRC'2002. Lisboa. Portugal.

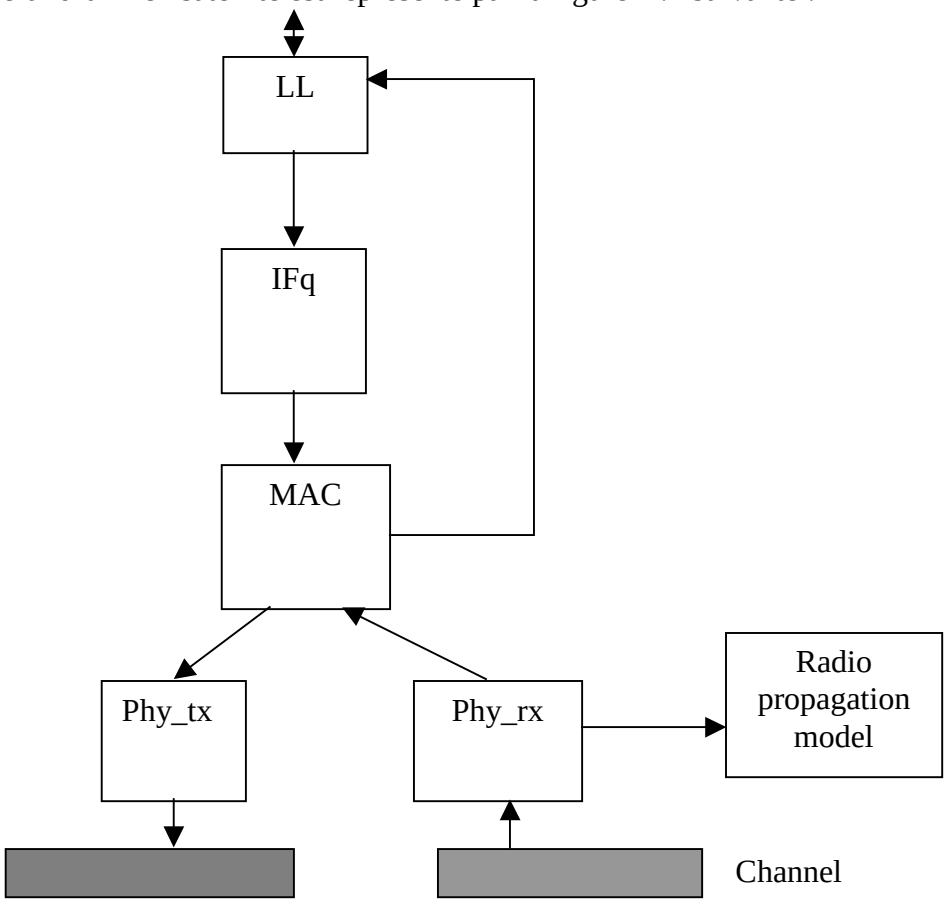
# 10 Appendice A : Modèle de simulation

Dans cet appendice, on va présenter brièvement le modèle de simulation de la couche MAC dans le contexte de satellite ainsi que le calcul des intervalles de confiance utilisées dans la simulation.

**Modèle de simulation**

La simulation est faite en utilisant ns2 (Network Simulator 2) ce qui nécessite des programmations sur deux nivaux : C++ et Tcl.

Le schéma général d'un lien satellite est représenté par la figure A.1 suivante :




Les différentes parties de ce modèle représentent les couches implémentées dans la pile protocolaire des liens satellites. Ces couches servent à transmettre et recevoir les paquets en

utilisant des entités physiques pour accomplir ces tâches. Les différents entités implémentés sont :

LL : c'est la couche liaison implémentée en C++. On définit la classe (LL/Sat) pour les satellites.

IFq : c'est la file d'attente implémentée, par exemple la classe (Queue/DropTail). On a programmé une classe pour définir une file d'attente FIFO infinie implémentée dans les terminaux data.

MAC : c'est la couche MAC qui fait la liaison entre la couche physique et les couches supérieures. La classe implémentée est (MAC/Sat). C'est une couche MAC basique qui ne fait que l'insertion d'un entête MAC et l'envoie vers la couche physique qui utilise le canal satellite pour transmettre le paquet. A ce niveau, on a implémenté les différents protocoles d'accès que nous avons proposés. On a défini les différents classes (MAC/Sat/PRMA) et (MAC/Sat/CDMA) et (MAC/Sat/CDMAPRMA). La définition de ces protocoles nécessite le changement de plusieurs paramètres et fonctions en NS, ce qui donne un nouveau simulateur propre à notre étude.

Phy : deux classes sont définies pour cette couche dans les satellites (Phy/Sat) et (Phy/Repeater). La classe (Phy/Sat) contient deux entités et un modèle de propagation. Cette classe transmet les paquets sur le canal satellite et reçoit les paquets pour les passer aux couches supérieures. La classe (Phy/Repeater) constitue un miroir pour retransmettre directement les paquets reçus. La classe (Phy/Sat) est utilisée dans notre modèle.

Notons enfin, qu'on a implémenté les différentes sources de trafic (voix, transfert de fichiers, Email, Web) utilisées dans cette thèse afin d'être utilisées dans la définition du réseau de simulation.

Après la définition des différents protocoles et paramètres au niveau C++, on passe au niveau de programmation Tcl pour lancer les différentes simulations. Sur ce niveau, on utilise les différents protocoles et sources de trafic définis pour étudier le comportement d'une telle situation.

**Intervalles de confiance**

En pratique, le problème est de calculer un intervalle raisonnable pouvant contenir la valeur *p* qu'on veut déterminer par simulation. On utilise le théorème de Moivre-Laplace pour calculer un intervalle de confiance pour *p*. Dans le cas des sondages, un intervalle de confiance est appelé une *fourchette*. Si *f* est la fréquence observée sur un sondage de taille *n*, alors l'intervalle de confiance (fourchette) de niveau 0,95 pour *p* sera :

$$[\, f + 1{,}96\,(f(1-f)/n)^{(1/2)} \;;\; f - 1{,}96\,(f(1-f)/n)^{(1/2)} \,] \qquad \text{(A.1)}$$

Concrètement, si on calcule l'intervalle de confiance ci-dessus pour 100 sondages indépendants de taille *n*, on peut s'attendre à ce qu'environ 95 contiennent la vraie valeur de *p*, et environ 5 ne la contiennent pas.

Pour nos simulations, on mesure la probabilité de perte pour les utilisateurs voix, qui est dans l'ordre de 1% et celle des utilisateurs data, qui est dans l'ordre de 0.1%. En utilisant l'équation A.1 on remarque que 40 milles tests ($n$ = 40000) pour les utilisateurs voix produisent une erreur de ±0.001 sur la probabilité de perte des utilisateurs voix. Si un paquet est envoyé tous les 20ms en cas d'activité et que le temps d'activité est de 50% près, un test est accompli en un temps moyen de 40ms. Les 40 milles de tests nécessitent un temps de simulation de 1600secondes près pour chaque utilisateur. Si on fait des tests pour 40 utilisateurs sur le même canal et on mesure la probabilité de perte pour tous les paquets en provenance de tous les utilisateurs, un temps de simulation de 40secondes suffira. Enfin, on

lance la simulation plusieurs fois (événements indépendants) et on fait la moyenne pour avoir une probabilité que le résultat obtenu appartient à l'intervalle de confiance proche de l'unité. Toutes ces mesures sont faites en état stationnaire. Cet état est détecté quand le système devient en équilibre et les entrants au canal seraient statistiquement égaux aux sortants.
La même discussion est faite pour les autres utilisateurs data pour calculer des intervalles de confiance acceptables et en déduire le temps de simulation nécessaire. Remarquons que pour les sources data, la probabilité de perte est dans l'ordre de 0.1% ce qui nécessite un intervalle de confiance de marge 0.01% (erreur = ±0.0001) et alors 400 milles tests. Puisque le nombre de tests est déduit de nombre total de paquets envoyés par les différents utilisateurs, un temps de simulation de 400secondes suffira (en moyenne 1 test est effectué par 1ms). La simulation est encore répétée plusieurs fois pour augmenter la fiabilité du modèle. Les mesures sont toujours faites en état stationnaire.
Dans le cas où plusieurs types d'utilisateurs seraient multiplexés, le temps de simulation doit être calculé sur les utilisateurs les plus exigeants qui sont les utilisateurs data. Par exemple, quand 20 sources de transfert de fichiers et 20 sources voix sont multiplexés, un temps de simulation de 800secondes est nécessaire (1 test data est accompli en 2ms dans ce cas).
Tous ces résultats sont valables pour le calcul de la probabilité de perte. Pour le délai on a calculé la valeur moyenne des délais moyens pour les différents utilisateurs. Puisque les générateurs aléatoires implémentés dans les différentes sources de trafic sont indépendants, on peut calculer un intervalle de confiance en utilisant la formule déduite du théorème central limite :

$$\Pr(d \in \left[ \overline{D(n)} - t_{n-1,0.975}\sqrt{\frac{S^2(n)}{n}}, \overline{D(n)} + t_{n-1,0.975}\sqrt{\frac{S^2(n)}{n}} \right] = 0.95$$

$\overline{D(n)}$ est la valeur moyenne des $D_i$ qui représentent les délais moyens des différents utilisateurs (de nombre n) tandis que $S^2(n)$ est sa variance. t est le point critique calculée d'après le tableau présenté dans [78] pour une distribution normale.
Pour démontrer la précision de nos résultats de simulation, on prend un exemple critique qui est la figure 6.11 où on compare les délais d'attente des paquets data ou web suivant deux stratégies d'allocation de ressources. Dans le cas de 10 utilisateurs data, pour les utilisateurs web la différence entre les deux stratégies est minime. Le délai est de 100ms pour la stratégie dynamique et 130ms pour la stratégie statique. Le problème qui se pose est si cette différence est significative vue la précision des mesures. Avec 100 utilisateurs web, la moyenne obtenue dans le premier cas est de 100 et la variance est de 150, l'intervalle de confiance est donc (±1.83×1.2=±2.24ms). Il est proche à ce résultat dans le deuxième cas. L'intervalle de confiance est beaucoup plus petit que la différence mesurée. Notons que cette discussion est applicable aux probabilités de perte et donne une autre preuve de la précision des valeurs déduites par simulation de cette perte.
Ce raisonnement est fait sur les différents cas de simulation pour montrer que l'intervalle de confiance est toujours acceptable. Notre stratégie de simulation est la suivante : puisque le nombre de sondages indépendants est égal au nombre d'utilisateurs (minimum de 5 dans toutes nos simulations) la longueur d'un sondage augmente quand le nombre de sondage diminue de façon à avoir une valeur minime de l'intervalle de confiance. Cet approche est équivalente au procédure de (Batch means) [78].

Cette discussion est utilisée pour déterminer des intervalles de simulation acceptable. On va donner une preuve additionnelle de l'exactitude de nos résultas en répétant la simulation 5 fois et en calculant l'intervalle de confiance correspondante. On prend toujours l'exemple de la figure 6.11 et 6.12 et on obtient en cas de 10 utilisateurs data avec allocation statique, le tableau :

| | Probabilité de perte | Délai |
|---|---|---|
| Première simulation | 0.0004 | 1000ms |
| Deuxième simulation | 0.0004 | 980ms |
| Troisième simulation | 000042 | 1030ms |
| Quatrième simulation | 0.00041 | 1020ms |
| Cinquième simulation | 0.00043 | 960ms |
| Intervalle de confiance | 0.000016 | 35ms |

Ceci démontre que l'intervalle de confiance est inférieur à 1% de la probabilité de perte et négligeable devant le délai d'attente et à la différence mesurée entre les cas de data statique et dynamique. Notons que cette valeur est inférieure pour les utilisateurs web puisqu'on a plus des utilisateurs web dans ce cas.
On va finir cet appendice par deux exemples qui représentent le protocole S-CDMA implémenté en C++. et un multiplexage de services écrit en Tcl.

Le programme C++ est l'implémentation du CDMA pour les terminaux Voix :

```
* THIS SOFTWARE IS PROVIDED BY THE REGENTS AND CONTRIBUTORS ‘‘AS IS’’ AND
 * ANY EXPRESS OR IMPLIED WARRANTIES, INCLUDING, BUT NOT LIMITED TO, THE
 * IMPLIED WARRANTIES OF MERCHANTABILITY AND FITNESS FOR A PARTICULAR
PURPOSE
 * ARE DISCLAIMED.  IN NO EVENT SHALL THE REGENTS OR CONTRIBUTORS BE LIABLE
 * FOR ANY DIRECT, INDIRECT, INCIDENTAL, SPECIAL, EXEMPLARY, OR
CONSEQUENTIAL
 * DAMAGES (INCLUDING, BUT NOT LIMITED TO, PROCUREMENT OF SUBSTITUTE GOODS
 * OR SERVICES; LOSS OF USE, DATA, OR PROFITS; OR BUSINESS INTERRUPTION)
 * HOWEVER CAUSED AND ON ANY THEORY OF LIABILITY, WHETHER IN CONTRACT,
STRICT
 * LIABILITY, OR TORT (INCLUDING NEGLIGENCE OR OTHERWISE) ARISING IN ANY
WAY
 * OUT OF THE USE OF THIS SOFTWARE, EVEN IF ADVISED OF THE POSSIBILITY OF
 * SUCH DAMAGE.
 *
 * Contributed by abbas IBRAHIM,
 */

#ifndef lint
static const char rcsid[] =
    "@(#) $Header: /usr/src/mash/repository/vint/ns-2/satcdma.cc,v 1.5
1999/07/22 19:14:50 tomh Exp $";
#endif


#include "satcdma.h"
#include "satlink.h"
#include "sattrace.h"
#include "satposition.h"
#include "satnode.h"
#include "satgeometry.h"
```

```
#include "errmodel.h"
#include "math.h"
#include "stdio.h"

static class PrmacdmaClass : public TclClass {
public:
      PrmacdmaClass() : TclClass("Mac/Sat/Prmacdma") {}
      TclObject* create(int, const char*const*) {
            return (new PrmacdmaMac());
      }
} sat_class_prmacdmamac;

/*=============================================================================
=*/
/* _PrmacdmaMac
 */
double PrmacdmaMac::lastone=0;
//int PrmacdmaMac::tab_slot_[20]={0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0};
PrmacdmaMac::PrmacdmaMac() : SatMac(), tx_state_(MAC_CONT),
    rx_state_(MAC_IDLE),
    slot_(1),z_time(0), prev_time(0), r(0), time(0)
{

      out1.open("slot1.tr");
      bind_time("tslot_", &tslot_);
      bind_time("frame_",&frame_);
      bind("T_",&T_);
      bind("L_",&L_);
      bind("n_slot_",&n_slot_);
      bind("n_code_",&n_code_);
      bind("s_factor_",&s_factor_);
            bind("users_",&users_);

}

void PrmacdmaMac::send_timer()
{
      int i,j;
      switch (tx_state_) {

      case MAC_RES:
            if (arr) {
                  HDR_MAC(snd_pkt_)->sstime()=tab_slot_[slot_];
                    downtarget_->recv(snd_pkt_, this);
                        arr=0;
                        send_timer_.resched(frame_);
                    }
              else {
                  tx_state_=MAC_CONT;
                  tab_slot_[slot_]=tab_slot_[slot_]-1;
                     }

            Scheduler::instance().schedule(&hRes_,&intr_,0);
            break;
      case MAC_BER:
            tab_slot_[slot_] = tab_slot_[slot_] + 1;
```

```
            HDR_MAC(snd_pkt_)->sstime()=tab_slot_[slot_];
            downtarget_->recv(snd_pkt_,this);
            if (tab_slot_[slot_] <= n_code_) {
            tx_state_ = MAC_RES;
            prev_time=NOW;
                     }
            else {
                  tx_state_=MAC_CONT;
                  tab_slot_[slot_]=tab_slot_[slot_]-1;
                 }
            Scheduler::instance().schedule(&hRes_,&intr_,0);
                break;
      case MAC_CONT:
            j = fqo(NOW-fqo(NOW,frame_)*frame_,tslot_)+2;
            i=1; r=j-1;
            if (j>n_slot_) { j=1; }
            z_time=NOW-fqo(NOW,frame_)*frame_;
            while (i <= n_slot_) {
            if (Random::uniform( prob(tab_slot_[j])-1, prob(tab_slot_[j]))
> 0) {
            tx_state_=MAC_BER;
            slot_ = j;
            i = n_slot_ + 3;
            sendDown(snd_pkt_); }
            else { i = i + 1; r=r+1;
                   if (j==n_slot_) { j=1; }
                   else { j=j+1; } }
            }
            if (i != n_slot_+3) { drop(snd_pkt_);
            Scheduler::instance().schedule(&hRes_,&intr_,0); }
            break;
      default:
            printf("Error: wrong tx_state in prmacdma: %d\n",
                tx_state_);
            break;
      }
}

void PrmacdmaMac::recv_timer()
{
      switch (rx_state_) {

      case MAC_RECV:
            Scheduler::instance().schedule(uptarget_,rcv_pkt_,delay_);
            break;
      default:
            printf("Error: wrong rx_state in prmacdma: %d\n",
                rx_state_);
            break;
      }

}

void PrmacdmaMac::sendUp(Packet* p)
{
      int i;
```

```
      hdr_mac* mh = HDR_MAC(p);
      int dst = this->hdr_dst((char*)mh);
      int src = this->hdr_src((char*)mh);
      if (((u_int32_t)dst != MAC_BROADCAST) && (dst != index_))
             { drop(p); }
      else {
            i=(int)mh->sstime();
            if (resp(i)) {
                  rcv_pkt_ = p;
                  rx_state_ = MAC_RECV;
                  recv_timer_.resched(mh->txtime()); }
            else {
                  drop(p); }
      }
}
void PrmacdmaMac::sendDown(Packet* p)
{
      double txt;
      // compute transmission delay:
      int packetsize_ = HDR_CMN(p)->size() + LINK_HDRSIZE;
      if (bandwidth_ != 0)
            txt = tslot_;
        HDR_MAC(p)->txtime() = txt;
      if (NOW > lastone) {
            out1<<NOW<<"  "<<tab_slot_[1]<<"  "<<tab_slot_[2]<<"
"<<tab_slot_[3]<<"  "<<tab_slot_[4]<<"  "<<tab_slot_[5]<<"
"<<tab_slot_[6]<<"  "<<tab_slot_[7]<<"  "<<tab_slot_[8]<<"
"<<tab_slot_[9]<<"  "<<tab_slot_[10]<<"  "<<tab_slot_[11]<<"
"<<tab_slot_[12]<<"  "<<tab_slot_[13]<<"  "<<tab_slot_[14]<<"
"<<tab_slot_[15]<<"  "<<tab_slot_[16]<<"\n";
      lastone = NOW;
      if (NOW>100)
      { out1.close();
       lastone = 300;
            }
            }
      snd_pkt_=p;
      if (tx_state_ == MAC_CONT) {
      send_timer_.resched(0);   }
      else if (tx_state_ == MAC_BER) {
                  time=(r*tslot_ - z_time + txt);
            send_timer_.resched(time); }
      else if (tx_state_ == MAC_RES) {
             arr=1;
             send_timer_.force_cancel();
             if (((slot_-1)*tslot_-NOW+fqo(NOW,frame_)*frame_+txt)>0) {
                   time=((slot_-1)*tslot_-NOW+fqo(NOW,frame_)*frame_+txt);
                    }
             else {  time=((slot_-1)*tslot_-
NOW+fqo(NOW,frame_)*frame_+txt+frame_);
                     }

      send_timer_.resched(time);
       }
}
```

```
double PrmacdmaMac::prob(int j)
{
      int s = 0;
      int n;
        double U=2;

      //return 1;

      //if ((s_factor_-j) >= 0) {
      //return (0.3-0.05*j); }
      //else
      //{ return ((0.3 - 0.09*j)>0)? (0.3-0.09*j): 0; }

      if ((s_factor_ -  j) > 0) {
      return  1; }
      else if ((n_code_-j) > 0) {
      return s_factor_/(j*U); }
      else { return 0; }
}

int PrmacdmaMac::resp(int i)
{
      static double s=1;
      int j;
      double q=0;
      if (i<=1) { return 1; }
        else {
            double h = erfc(sqrt(3.0*s_factor_/(i - 1)))/2;

      for (j=0; j<=T_; j++) { q = q + comb(L_,j)*pow(h,j)*pow(1 - h,L_ -
j); }
      if (q < s) { s = q;
              printf("tab1: %d\n",tab_slot_[1]);
              printf("tab2: %d\n",tab_slot_[2]);
            printf("tab3: %d\n",tab_slot_[3]);
            printf("tab4: %d\n",tab_slot_[4]);
            printf("tab5: %d\n",tab_slot_[5]);
              printf("tab6: %d\n",tab_slot_[6]);
            printf("tab7: %d\n",tab_slot_[7]);
            printf("tab8: %d\n",tab_slot_[8]);
                printf("tab9: %d\n",tab_slot_[9]);
              printf("tab10: %d\n",tab_slot_[10]);
            printf("tab11: %d\n",tab_slot_[11]);
            printf("tab12: %d\n",tab_slot_[12]);
            printf("tab13: %d\n",tab_slot_[13]);
              printf("tab14: %d\n",tab_slot_[14]);
            printf("tab15: %d\n",tab_slot_[15]);
            printf("tab16: %d\n",tab_slot_[16]);
              printf("h: %f\n",h);
            printf("i: %d\n",i);
            printf("qmin: %f\n",s); }
      return (Random::uniform(q-1, q)>=0) ? 1: 0; }
}


double PrmacdmaMac::comb(int i, int j)
```

```
{
      double s=1;
      int k;
      for (k=1; k<=j; k++) {
            s=s*(i-j+k)/k;
      }
      return s;
}
double PrmacdmaMac::fact(int i)
{
      double s=1;
      int k;
      for (k=1; k<=i; k++) {
            s = s*k; }
      return s;
}

int PrmacdmaMac::fqo(double i, double j)
{
             int s;
            double l;
            s=1; l=j;
            while (l<=i) {
                  s = s + 1;
                  l = l + j; }
return s-1;}
```

le programme TCL est un multiplexage de services qui comprend des sources de transfert de fichiers et de voix sur le canal satellite CDMA :

```
global ns
set ns [new Simulator]
$ns rtproto Dummy; # Using C++ routing agents and objects
HandoffManager/Term set elevation_mask_ 8.2
HandoffManager/Term set term_handoff_int_ 10
HandoffManager/Sat set sat_handoff_int_ 10
HandoffManager/Sat set latitude_threshold_ 60
HandoffManager/Sat set longitude_threshold_ 10
HandoffManager set handoff_randomization_ "true"
SatRouteObject set metric_delay_ "true"
SatRouteObject set data_driven_computation_ "true"
ns-random 1
Agent set ttl_ 32;
set users 100;
set band 128;
set n_s 8;
set p_l 20;
set s_f [expr $band/(8*$n_s)]
set t_s [expr ($p_l*8*$s_f*1.0)/($band*1000)]
set t_f [expr $n_s*$t_s]
set n_c 3
Mac/Sat/Prmacdma set users_ [expr $users/2]
Mac/Sat/Prmacdma set s_factor_ $s_f
Mac/Sat/Prmacdma set tslot_ $t_s
Mac/Sat/Prmacdma set n_slot_ $n_s
Mac/Sat/Prmacdma set n_code_ $n_c
```

```
Mac/Sat/Prmacdma set frame_ $t_f
Mac/Sat/Prmacdma set T_ 10
Mac/Sat/Prmacdma set L_ 384

Mac/Sat/Prmacdmadta set users_ [expr $users/2]
Mac/Sat/Prmacdmadta set s_factor_ $s_f
Mac/Sat/Prmacdmadta set tslot_ $t_s
Mac/Sat/Prmacdmadta set n_slot_ $n_s
Mac/Sat/Prmacdmadta set n_code_ $n_c
Mac/Sat/Prmacdmadta set frame_ $t_f
Mac/Sat/Prmacdmadta set T_ 10
Mac/Sat/Prmacdmadta set L_ 384

global opt
set opt(chan)           Channel/Sat
set opt(bw_up)         128Kb;
set opt(bw_down)        128Kb;
set opt(bw_isl)         25Mb;
set opt(phy)            Phy/Sat
set opt(mactv)          Mac/Sat/Prmacdma
set opt(mactd)          Mac/Sat/Prmacdmadta
set opt(mac)            Mac/Sat
set opt(ifqt)           Queue/DropTail
set opt(qlimt)         100
set opt(ifq)            Queue/NODropTail
set opt(qlim)           5
set opt(ll)             LL/Sat
set opt(alt)            780;
set opt(inc)            86.4;

# XXX This tracing enabling must precede link and node creation
#set f [open out.tr w]
#set f0 [open sim.tr w]
#$ns trace-all $f

# Set up satellite and terrestrial nodes

set linkargs "$opt(ll) $opt(ifq) $opt(qlim) $opt(mac) $opt(bw_down)
$opt(phy)"
set alt $opt(alt)
set inc $opt(inc)
set chan $opt(chan)

source sat-iridium-nodes.tcl
source sat-iridium-links.tcl

set a 100
for {set c 30} {$c < 40} {incr c} {
    for {set b 30} {$b < [expr 30+0.5*$users/10] } {incr b} {
      set n($a) [$ns satnode-terminal [expr  $b ] [expr $c ] ]
      incr a } }

for {set c 40} {$c < 50} {incr c} {
    for {set b 30} {$b < [expr 30+0.5*$users/10] } {incr b} {
      set n($a) [$ns satnode-terminal [expr  $b ] [expr $c ] ]
      incr a } }
```

```
for {set a 100} {$a < [expr 100+$users/4]} {incr a} {
      $n($a) add-gsl polar $opt(ll) $opt(ifqt) $opt(qlimt) $opt(mactv)
$opt(bw_up) $opt(phy) [$n0 set downlink_] [$n0 set uplink_]
}
for {set a [expr 100+$users/4] } {$a < [expr 100+$users/2]} {incr a} {
      $n($a) add-gsl polar $opt(ll) $opt(ifqt) $opt(qlimt) $opt(mactd)
$opt(bw_up) $opt(phy) [$n0 set downlink_] [$n0 set uplink_]
}
for {set a [expr 100+$users/2] } {$a < [expr 100+0.75*$users]} {incr a} {
      $n($a) add-gsl polar $opt(ll) $opt(ifqt) $opt(qlimt) $opt(mactv)
$opt(bw_up) $opt(phy) [$n0 set downlink_] [$n0 set uplink_]
}
for {set a [expr 100+3*$users/4] } {$a < [expr 100+$users]} {incr a} {
      $n($a) add-gsl polar $opt(ll) $opt(ifqt) $opt(qlimt) $opt(mactd)
$opt(bw_up) $opt(phy) [$n0 set downlink_] [$n0 set uplink_]
}

#$ns trace-all-satlinks $f

for {set a 100} {$a < [expr 100 + $users/4]} {incr a} {
        set a1 [expr int($a + $users/4)]

        set b [expr int($a + $users/2)]
        set b1 [expr int($a +3*$users/4)]

      set udp($a) [new Agent/UDP]
        set udp($a1) [new Agent/UDP]

      $ns attach-agent $n($a) $udp($a)
      set exp($a) [new Application/Traffic/Exponential]
      $exp($a) attach-agent $udp($a)
      $exp($a) set rate_ 8Kb
        $exp($a) set packetSize_ 20
        $exp($a) set burst_time_ 1s
        $exp($a) set idle_time_ 1.35s

        $ns attach-agent $n($a1) $udp($a1)
        set ge($a1) [new Application/Traffic/Geometrical]
      $ge($a1) attach-agent $udp($a1)
        $ge($a1) set packetSize_ 20
        $ge($a1) set rate_ 8Kb
        $ge($a1) set p_ 0.99
        $ge($a1) set idle_time_ 4s

      set null($a) [new Agent/LossMonitor]
        set null($a1) [new Agent/LossMonitor]

      $ns attach-agent $n($b) $null($a)
        $ns attach-agent $n($b1) $null($a1)

      $ns connect $udp($a) $null($a)
        $ns connect $udp($a1) $null($a1)

       $ns at 1.0 "$exp($a) start"
       $ns at 1.0 "$ge($a1) start"
```

```
}
proc record {} {
global null f0
set ns [Simulator instance]
set now [$ns now]
set lo00 [$null(100) set nlost_]
set eo00 [$null(100) set expected_]
set lo01 [$null(101) set nlost_]
set eo01 [$null(101) set expected_]
set lo02 [$null(102) set nlost_]
set eo02 [$null(102) set expected_]
set lo03 [$null(103) set nlost_]
set eo03 [$null(103) set expected_]
set lo04 [$null(104) set nlost_]
set eo04 [$null(104) set expected_]
set lo05 [$null(105) set nlost_]
set eo05 [$null(105) set expected_]

set lo10 [$null(125) set nlost_]
set eo10 [$null(125) set expected_]
set lo11 [$null(126) set nlost_]
set eo11 [$null(126) set expected_]
set lo12 [$null(127) set nlost_]
set eo12 [$null(127) set expected_]
set lo13 [$null(128) set nlost_]
set eo13 [$null(128) set expected_]
set lo14 [$null(129) set nlost_]
set eo14 [$null(129) set expected_]
set lo15 [$null(130) set nlost_]
set eo15 [$null(130) set expected_]

puts stdout "$now $eo00 $lo00 $eo01 $lo01 $eo02 $lo02 $eo03 $lo03 $eo04
$lo04 $eo05 $lo05       $eo10 $lo10 $eo11 $lo11 $eo12 $lo12 $eo13 $lo13
$eo14 $lo14 $eo15 $lo15"
$ns at [expr $now + 0.5] "record"
}
# We use centralized routing
set satrouteobject_ [new SatRouteObject]
$satrouteobject_ compute_routes

$ns at 800.0 "finish"

proc finish {} {
      global ns f f0
      $ns flush-trace
#     close $f
#        close $f0
      exit 0
}
$ns at 2.0 "record"
$ns run
```