



HAL
open science

Analyse et Optimisation du Partage de Spectre dans les Systèmes Mobiles Intégrés Satellite et Terrestre

Vincent Deslandes

► **To cite this version:**

Vincent Deslandes. Analyse et Optimisation du Partage de Spectre dans les Systèmes Mobiles Intégrés Satellite et Terrestre. Réseaux et télécommunications [cs.NI]. Institut National Polytechnique de Toulouse - INPT, 2012. Français. NNT: 2012INPT0045 . tel-04241348

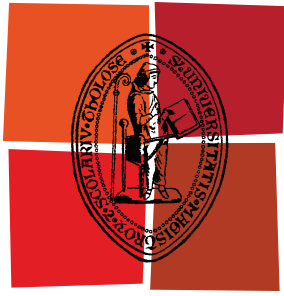
HAL Id: tel-04241348

<https://theses.hal.science/tel-04241348v1>

Submitted on 13 Oct 2023

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.



Université
de Toulouse

THÈSE

En vue de l'obtention du
DOCTORAT DE L'UNIVERSITÉ DE TOULOUSE

Délivré par :
Institut National Polytechnique de Toulouse (INP Toulouse)

Discipline ou spécialité :
Réseaux, Télécommunications, Systèmes et Architecture

Présentée et soutenue par :
Vincent Deslandes

le : mercredi 27 juin 2012

Titre :
Analyse et optimisation du partage de spectre dans les systèmes mobiles
intégrés satellite et terrestre

Ecole doctorale :
Mathématiques Informatique Télécommunications (MITT)

Unité de recherche :
Institut de Recherche en Informatique de Toulouse

Directeur(s) de Thèse :

André-Luc Beylot

Rapporteurs :
Xavier Lagrange
Khaldoun Al Agha

Membre(s) du jury :
Michel Bousquet
Philippe Godlewski
Jérôme Tronc

Thèse

En vue de l'obtention du doctorat de l'Université de Toulouse
Délivrée par l'Institut National Polytechnique de Toulouse

Discipline : Réseaux, Télécommunications, Systèmes et Architecture

Présentée et soutenue le mercredi 27 juin 2012 par

Vincent Deslandes

Titre

**Analyse et Optimisation du Partage de Spectre
dans les Systèmes Intégrés Satellite-Terrestres**

Président du jury	Michel Bousquet – ISAE
Directeur de thèse	André-Luc Beylot – IRIT/ENSEEIH
Co-encadrant	Jérôme Tronc – EADS Astrium
Rapporteurs	Xavier Lagrange – ENST Bretagne Khaldoun Al Agha – Université Paris Sud
Examineurs	Michel Bousquet – ISAE Philippe Godlewski – Télécom ParisTech

Remerciements

En premier lieu, mes remerciements vont à l'ensemble des membres du jury pour le temps passé à l'analyse de cette thèse et pour avoir accepté d'être présents à ma soutenance. La qualité et la pertinence de leurs remarques et questions ont démontré leur intérêt pour ce travail et y ont apporté un éclairage fort enrichissant. Rien ne pouvait me faire plus plaisir. En particulier, merci à Xavier Lagrange pour son analyse étendue et approfondie dont la justesse fut parfois troublante. Merci à Khaldoun Al Agha pour m'avoir suggéré des pistes d'investigations sur la convergence des solutions proposées qui seront très utiles par la suite. Merci à Philippe Godlewski pour avoir apporté un éclairage élargi sur le sujet permettant de l'ouvrir à un contexte plus vaste que le satellite. Merci enfin à Michel Bousquet, pour avoir présidé mon jury et pour nous avoir fait bénéficier de son immense expertise des systèmes satellite.

Je remercie sincèrement André-Luc Beylot pour m'avoir encadré de main de maître tout au long de ces années. Après avoir assisté à mes débuts en école d'ingénieur, il m'a orienté vers le doctorat alors que j'errais sur mon vélo dans une direction incertaine. Sa compétence et son expérience d'enseignant chercheur et d'encadrant de doctorant autant que ses qualités humaines ont contribué fortement à la réussite de ce travail. La bienveillance et la confiance qu'il m'a accordées m'ont encouragé à poursuivre jusqu'au bout cette thèse ; son humour et sa mémoire infailible pour les petites histoires de la vie ont su mettre de la bonne humeur même dans les moments les plus tendus. J'ai largement bénéficié de ses conseils qui ont tous eu leur importance, des plus généraux sur l'orientation de la thèse, jusqu'au plus fins sur la mise en forme du travail.

Je remercie chaleureusement Jérôme Tronc qui est l'instigateur de ce sujet et a eu très tôt l'intuition du potentiel des systèmes intégrés. Avec lui, pas une question sur les systèmes de télécom satellite qui ne reste sans réponse. Le problème étant qu'on repart souvent avec plus de questions qu'au départ ! Il a toujours été disponible lorsque j'en avais besoin me faisant alors profiter de sa large expérience dans le domaine satellite. J'ai apprécié son caractère amical et sa confiance qui ont rendu ses années de thèse bien plus agréables. Je retiendrai son esprit toujours à l'affût de la nouveauté dans un domaine complexe, le système de télécom satellite, où l'innovation requiert beaucoup de connaissances et d'imagination.

Un grand merci à ceux qui ont partagé mon quotidien de thésard. Je pense en particulier aux personnes du département « Système Télécom » d'Astrium, qui contribuent toutes à leur manière à créer une ambiance de travail des plus conviviales. Je garderai aussi un souvenir très chaleureux des moments passés dans l'équipe IRT à l'ENSEEIHT où la bonne humeur règne en maître grâce à ses membres qui cultivent chacun leur originalité.

Mes plus tendres sentiments vont à Séverine ma compagne, qui m'a supporté dans tous les sens du terme au long de cette thèse. Elle a su me remonter le moral dans les moments les plus difficiles et m'encourager lorsque ma motivation s'effritait. Merci. Je remercie enfin ma famille, pour son soutien discret mais sensible qui a beaucoup compté pour moi.

Résumé

Les technologies mobiles terrestre et satellite sont naturellement complémentaires. Les réseaux cellulaires terrestres sont adaptés aux villes où la densité d'utilisateurs est maximale mais perdent leur rentabilité dans les zones peu peuplées. A l'inverse, les systèmes mobile satellite permettent de couvrir de vastes zones à moindre coût mais n'assurent pas la couverture dans les zones urbaines car le signal est bloqué par les constructions. En les combinant pour assurer la couverture en ville par le réseau terrestre et dans les zones moins denses avec le satellite, on obtient un système à la couverture totale pour un coût optimal. Nous appelons un tel système intégrant une composante satellite et une composante terrestres un « système intégré » satellite/terrestre.

Nul doute que d'ici quelques années, le rêve de la communauté satellite de rendre tous les terminaux mobiles capables de se connecter à un satellite sera accessible. Le satellite pourra ainsi être vu par les utilisateurs de terminaux portables comme une énième technologie d'accès à un système « intégré », aux côtés du Bluetooth, du Wifi et des technologies cellulaires (GSM, UMTS, LTE). La réutilisation du spectre satellite par les systèmes terrestres est un facteur déterminant dans le succès de cette intégration car elle permet de justifier les investissements dans le système satellite qui ne peut être rentabilisé par les abonnements seuls. Toutefois sa mise en œuvre pose de nombreux problèmes : réglementaires, commerciaux et bien entendu techniques. Cette thèse apporte des solutions sur ce dernier point et j'espère qu'elle contribuera ainsi à rendre possible ce rêve d'intégration.

Nous avons adopté une approche descendante du problème du partage de spectre dans les systèmes mobiles satellite-terrestre. Nous avons tout d'abord établi une synthèse sur les aspects recouverts par l'intégration des systèmes mobiles satellite et terrestre. Nous avons ensuite dressé l'état de l'art sur la problématique de la réutilisation du spectre satellite par les systèmes terrestres, que nous avons complété par nos analyses. Nous avons décidé dans cette thèse de nous focaliser sur un des problèmes majeurs soulevés par cette réutilisation : les interférences co-fréquence du système terrestre sur le lien montant satellite. A partir de l'analyse d'une solution de partage statique de spectre par coordination des plans de fréquence (principe de zone d'exclusion), nous avons élaboré puis analysé les performances de mécanismes innovants d'allocation de ressources dans le système terrestre qui permettent de réduire de façon importante les interférences. De plus, nous proposons une méthode pour garantir au système satellite que les interférences subies sur son lien montant soient inférieures à une valeur limite. Enfin, nous définissons une architecture et les mécanismes associés qui permettent l'implantation des solutions proposées dans un système satellite-terrestre fondé sur la technologie LTE.

L'étude du sujet de partage de spectre dans les systèmes mobiles satellite-terrestre est relativement nouvelle et cette thèse constitue donc un travail novateur important qui pourra être utilisé comme base à de futurs travaux.

Abstract

Terrestrial and satellite mobile technologies are naturally complementary. Terrestrial cellular systems are adapted to urban areas where the user density is maximal but their cost-effectiveness is much lower in sparsely populated areas. On the contrary, mobile satellite systems cover large zones at a relatively low cost but they cannot ensure coverage in urban areas because of signal blockage due to buildings. By combining both systems for ensuring coverage in cities with terrestrial networks and in less dense areas with the satellite, we obtain a system with complete coverage for an optimal cost. Such a system is called mobile terrestrial and satellite “integrated system”.

It is likely that in a few years, the dream of enabling satellite connectivity on all mobile terminals will be within reach. The satellite will then be perceived for mobile terminal users as an additional access technology to an “integrated network” comparable to Wifi, Bluetooth or cellular technologies (GSM, UMTS, LTE). The spectrum reuse by terrestrial systems is a key for the success of this integration because it justifies part of the investments in the satellite systems that cannot be supported by user subscriptions only. However, implementation of spectrum sharing generates many issues: regulatory, commercial and obviously technical. This thesis brings answers on the latter and I hope it will contribute to make this dream of integration become reality.

We used a descending approach of the issue of spectrum sharing in terrestrial and satellite mobile systems. First, we establish a synthesis of all the aspects covered by the integration of mobile satellite and terrestrial systems. Then, we made the state of the art on the issue of satellite spectrum reuse by terrestrial systems and we completed it with our analysis. We decided to focus our work on one of the major issues raised by this reuse: co-frequency interference generated by the terrestrial system on the satellite uplink. From the analysis of a solution proposing a static spectrum sharing by coordination of frequency plans (the exclusion zone principle), we elaborated and analyzed performances of innovative mechanisms of resources allocation in the terrestrial system that allows to reduce significantly the interferences. Moreover, we proposed a method for guaranteeing to the satellite system that interferences from the terrestrial system will not exceed a given threshold. At last, we define an architecture and the associated mechanism that allow the implementation of our solution in an integrated terrestrial-satellite systems based on LTE technology.

The study of spectrum sharing in terrestrial-satellite mobile systems is rather new and this thesis represents an innovative work that may serve as a basis for future studies on this issue.

Sommaire

Remerciements	iii
Résumé	iv
Abstract	v
Sommaire	vi
Liste des Figures.....	ix
Liste des Tables.....	xi
Liste des Abréviations	xii
Introduction	1
Le mobile par satellite, un rêve de grandeur ressuscité.....	1
Objectifs de la thèse	3
Réalizations et contributions	3
Structure du document.....	5
1. Les systèmes mobiles intégrés satellite-terrestre.....	6
1.1. L'intégration des systèmes satellite et terrestre.....	6
1.1.1. Les systèmes mobiles	6
1.1.2. De l'intégration des systèmes aux systèmes intégrés	10
1.1.3. Les bénéfices de l'intégration.....	12
1.1.4. Typologie des aspects de l'intégration	15
1.1.5. Architecture des Systèmes Intégrés.....	21
1.2. Système de référence étudié	23
1.3. Le partage de fréquence dans les systèmes intégrés.....	25
1.3.1. La raison du partage	25
1.3.2. Les types de partage	27
1.4. La réutilisation des fréquences des origines à nos jours.....	32
1.4.1. L'origine du principe, de 1993 à 2005	32
1.4.2. La bataille de la FCC et la remise en question	34
1.4.3. La possible résurgence	35
1.5. Problématique de la réutilisation des fréquences	37
2. Analyse et Gestion des Interférences Inter-Composantes (ICoI)	38
2.1. Définition des cas d'interférences	38
2.1.1. Mode FDD direct.....	40
2.1.2. Mode FDD inversé	41

2.1.3.	Modes TDD	42
2.2.	Analyse des interférences	43
2.2.1.	Interférence du CGC sur le satellite - uplink	44
2.2.2.	Interférence du CGC sur le satellite - downlink	52
2.2.3.	Interférence du satellite sur le CGC – uplink	55
2.2.4.	Interférence du satellite sur le CGC – downlink	56
2.2.5.	Cas particulier : les pico-BS	56
2.2.6.	Conclusion sur les interférences	57
2.3.	Stratégies de gestion de l'ICoI	57
2.3.1.	Annulation de l'ICoI - Formation de faisceau adaptative	57
2.3.2.	Etalement de l'ICoI	58
2.3.3.	Coordination de l'ICoI	58
3.	Coordination Statique de l'ICoI - Concept de Zone d'Exclusion	62
3.1.	Problématique.....	62
3.2.	Scénario et outil.....	64
3.3.	Dimensionnement de la zone d'exclusion.....	66
3.4.	Evaluation des interférences inter-composantes du CGC sur le satellite	70
3.4.1.	Les interférences co-fréquence dans les systèmes satellite	70
3.4.2.	Influence du nombre d'utilisateurs terrestres	71
3.4.3.	Influence de la zone d'exclusion	73
3.5.	Etude des sources d'interférences	74
3.5.1.	Définition des Sources Majeures d'Interférence	74
3.5.2.	Gravité des interférences et nombre de Sources Majeures.....	74
3.5.3.	Caractérisation des MSI	76
3.6.	Conclusion.....	77
4.	Coordination Avancée de l'ICoI – Application aux Schémas d'Allocation Terrestres.....	79
4.1.	Problématique.....	79
4.2.	Stratégies d'allocation	80
4.2.1.	Interférences unitaires	80
4.2.2.	Facteurs de réduction d'interférence	80
4.2.3.	Principes d'allocation de fréquence coordonnée avec le système satellite.....	81
4.2.4.	Application au schéma d'allocations terrestres	83
4.2.5.	Exemple d'application.....	84
4.3.	Scénario et outil.....	86
4.3.1.	Système	86
4.3.2.	Gestion des ressources spectrales.....	87

4.3.3.	Logiciel utilisé.....	88
4.4.	Analyse des performances.....	88
4.4.1.	Analyse des Interférences inter-composantes.....	88
4.4.2.	Performances du système terrestre.....	93
4.5.	Conclusion.....	95
5.	Coordination dynamique d'ICoI dans un système LTE intégré.....	97
5.1.	Problématique.....	97
5.1.1.	Limitation de l'ICoI.....	97
5.1.2.	Adaptation dynamique.....	98
5.1.3.	Implantation dans un système LTE intégré.....	98
5.2.	Définition d'un système LTE intégré.....	99
5.2.1.	Architecture d'un réseau LTE intégré.....	99
5.2.2.	Adaptation nécessaire des couches d'accès LTE.....	101
5.3.	Schéma d'ICoIC avec coopération inter-composante.....	101
5.3.1.	Vers la garantie d'un seuil d'ICoI.....	102
5.3.2.	Potentiel Maximal d'Interférence (IPP_{max}).....	106
5.3.3.	Schéma d'allocation et respect de l' IPP_{max}	110
5.3.4.	Principes d'ICoIC temporelle.....	111
5.4.	Conclusion.....	112
Conclusion et Ouverture.....		113
Conclusion.....		113
Ouverture du sujet.....		115
Références.....		117
Liste des Publications.....		123
Conférences Internationales.....		123
Documents de standardisation.....		123
Brevet.....		123

Liste des Figures

Figure 0-1 : Système mobile intégré satellite-terrestre.....	2
Figure 1-1 : Exemples des principales orbites de satellite de télécommunication mobile	7
Figure 1-2 : Gain antenne station (et satellite) plus pertes de propagation en fonction de la distance relative à la taille des cellules (et faisceau).	8
Figure 1-3: Historique de l'évolution du standard GMR-1 (source [5.6]).....	9
Figure 1-4: Système de référence "non-intégré"	12
Figure 1-5: Système de référence "totalement-intégré".....	12
Figure 1-7 : Comparaison de terminaux mobile satellite	22
Figure 1-8 : Possibilités de répartition de fréquence entre systèmes satellite et terrestre (bande S).	27
Figure 1-9 : Plan de fréquence de Sirius-XM (source [1.20])......	28
Figure 1-10 : Exemple de réallocation de fréquence.....	31
Figure 2-1 : Représentation des cas d'ICoI en mode FDD direct	40
Figure 2-2 : Représentation des cas d'ICoI en mode FDD inversé.....	41
Figure 2-3 : Représentation des cas d'ICoI en mode TDD uplink	42
Figure 2-4 : Représentation des cas d'ICoI en mode TDD downlink	43
Figure 2-5 : Représentation d'un système intégré à l'échelle d'un faisceau satellite.....	44
Figure 2-6 : Interférence de la composante terrestre sur l'uplink satellite	45
Figure 2-7 : Fonction de répartition de la puissance de l'interférence générée par un UE _{CGC} placé à différentes distances du centre du faisceau interféré.....	47
Figure 2-8: Puissance agrégée des interférences en fonction de la densité des UE _{CGC} (zone considérée circulaire de 1800 km de rayon autour du centre du faisceau).....	48
Figure 2-9 : Isolation par rapport au gain antenne au centre du faisceau	50
Figure 2-11 : Puissance reçue par un UE du signal satellite ou de la BS en fonction de sa distance à la BS (le gain antenne satellite est supposé constant)	53
Figure 3-1 : Exemple d'une zone d'exclusion à 10 dB.....	63
Figure 3-2 : Zones d'exclusion pour la fréquence F7	63
Figure 3-3 : Exemple des fréquences disponibles pour une station terrestre	64
Figure 3-4 : Nombre moyen d'utilisateurs satellite par faisceau sur l'ensemble de la couverture	65
Figure 3-5 : Densité moyenne des utilisateurs terrestres (100 000 terminaux actifs)	66
Figure 3-6: Proportion de spectre disponible pour le système terrestre en fonction du nombre de couleurs	67
Figure 3-7 : Nombre de fréquences disponibles en terrestre pour différentes zones d'exclusion (motif satellite à 7 couleurs).....	68
Figure 3-8 : Moyennes de la proportion de la fréquence disponible pour le système terrestre en fonction de la zone d'exclusion et du motif de réutilisation satellite (Reuse Pattern) à 4, 7, 9 et 12 couleurs	69
Figure 3-9: Rapport Interférence sur Bruit en fonction du nombre de terminaux terrestres actifs.....	72
Figure 3-10: Rapport d'interférences terrestres sur bruit en fonction de la taille de la zone d'exclusion pour différents SFRP (4, 7, 9 et 12). 100 000 ut. terrestres.....	73
Figure 3-11 : Définition des sources majeures d'interférence	74
Figure 3-12: CDF de la moyenne du rapport du nombre de sources majeures sur le nombre total de sources ($ MSI / TSI $).....	75
Figure 3-13: CDF de la puissance de transmission des MSI.....	76

Figure 3-14: CDF de la moyenne d'isolation de gain antenne par rapport au centre du faisceau pour les MSI (SFRP = 9, ZE = 9dB).....	77
Figure 4-1 : Principe d'allocation "Position Aware"	82
Figure 4-2 : Schéma de réutilisation fréquences partiel (PFR)	83
Figure 4-3 : Schémas de réutilisation de fréquence terrestre.....	84
Figure 4-4: Exemple d'allocation des couleurs pour les familles B et C en fonction du gain antenne satellite	85
Figure 4-5 : Interférences du système terrestre engendrées sur le faisceau central.....	86
Figure 4-6: Configuration des faisceaux et des cellules terrestres	87
Figure 4-7 : Comparaison des schémas d'allocation terrestre.....	89
Figure 4-8: Rapport (Iter/N) en fonction du nombre d'utilisateurs terrestres actifs par cellule. (a) Comparaison des stratégies d'allocation pour le schéma 1-reuse (b) Comparaison des stratégies d'allocation pour le schéma 3-reuse (c) Comparaison des stratégies d'allocation pour le schéma PFR92	
Figure 4-9 : SINR moyen des ue. des cellules en fonction du schéma d'allocation de ressource. SINR pour les ue. au centre des cellules (bleu) et sur la zone extérieure (jaune) (24 ue. actifs par cellule)...	93
Figure 4-10 : Capacité moyenne des cellules en fonction du schéma d'allocation de ressource. 24 ue. actifs par cellule (bleu) et à pleine charge (jaune).....	94
Figure 5-1 : Architecture d'un système LTE intégré	100
Figure 5-2 : Eléments de réseaux d'un EPS de système intégré	100
Figure 5-3 : Boucle de contrôle de l'ICoI.....	103
Figure 5-4: Exemple de processus de correction d'interférence par boucle de contrôle fermée	105
Figure 5-5 : Signaux de référence diffusé par le satellite vers les BS.....	108
Figure 5-6 : Allocation des fréquences en fonction du l'IPP	111

Liste des Tables

Table 1-1 : Niveaux d'intégration du terminal.....	16
Table 1-4 : Niveaux d'intégration du spectre.....	19
Table 1-6 : Niveaux d'intégration pour les systèmes intégrés de diffusion	22
Table 1-7 : Niveaux d'intégration pour les systèmes intégrés bidirectionnels.....	23
Table 1-8 : Caractéristiques principales de notre système de référence.....	24
Table 1-9 : Cas d'exemples de besoin en reconfiguration du système.....	30
Table 2-2 : Modes duplex terrestre en mode duplex satellite FDD.....	39
Table 2-4 : Interférences inter-composantes en mode FDD inversé	42
Table 2-5 : Puissance du signal uplink reçu par le satellite des équipements au sol.....	46
Table 2-6 : Puissance moyenne de l'interférence agrégée en fonction de la densité des UECGC.....	49
Table 2-7 : Tailles de la zone de recouvrement et impact sur la possibilité de coordonner les plans de fréquences.....	60
Table 4-1 : Principaux paramètres du modèle.....	87
Table 4-2 : Correspondance entre nombre d'ue. par cellule et densité moyenne des ue.....	89

Liste des Abréviations

AAA	Authentication Authorization Accounting
AWGN	Additive White Gaussian Noise
AS	Access Stratum
BS	Base Station
CDM	Code Division Multiplexing
CDMA	Code Division Multiple Access
CDF	Cumulative Density Function
CE	Commission Européenne
CEPT	Conférence Européenne des Postes et des Télécommunications
CGC	Complementary Ground Component
CN	Core Network
DAB	Digital Audio Broadcasting
DVB-SH	Digital Video Broadcast – Satellite Handheld
ECC	Electronic Communications Committee
eNB	Evolved Node B
EPC	Evolved Packet Core
EPS	Evolved Packet System
ETRI	Electronics and Telecommunications Research Institute
ETSI	European Telecommunications Standards Institute
E-UTRAN	Evolved-UTRAN
EZ	Exclusion Zone
FCC	Federal Communication Commission
FDD	Frequency Division Duplexing
FDM	Frequency Division Multiplexing
FDMA	Frequency Division Multiple Access
FRR	Fractional Frequency Reuse
GBBF	Ground Based Beam Forming
GEO	Geostationary Orbit
GSM	Global System for Mobile communications
GW	Gateway
HEO	Highly Elliptical Orbit
IA	ICoI Aware
ICI	Inter-Cell Interference
ICIC	Inter-Cell Interference Coordination
ICoI	Inter-COMponent Interference
ICoIC	Inter-COMponent Interference Coordination
IPP	Interference Potential Power
ISIS	Interference Simulator for Integrated Systems
LEO	Low Earth Orbit
LOS	Line Of Sight
LTE	Long Term Evolution
MME	Mobility Management Entity
MSI	Major Sources of Interference
MSS	Mobile Satellite Service (Service mobile par satellite)
NAS	Non Access Stratum
NB	Node B
NICT	National Institute of Information and Communications Technology
OBFF	On Board Beam Forming
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexing
OFDMA	Orthogonal Frequency Division Multiple Access

OI	Overload Indicator
PA	Position Aware
PDF	Probability Density Function
PIRE	Puissance Isotrope Rayonnée Effective
PFR	Partial Frequency Reuse
PRB	Physical Resource Block
SNMP	Simple Network Management Protocol
TDD	Time Division Duplexing
TDM	Time Division Multiplexing
TDMA	Time Division Multiple Access
TSI	Total Sources of Interference
RF	Radio Fréquence
RRM	Radio Resource Management
SAE	System Architecture Evolution
SC	Spacecraft
SCN	Satellite Communications and Navigation
S-DMBSatellite	Digital Multimedia Broadcasting
S-eNB	Satellite Evolved Node B
SES	Satellite Earth Stations and Systems
SFN	Single Frequency Network
SFRP	Satellite Frequency Reuse Pattern
S-GW	Serving Gateway
SIM	Subscriber Identity Module
SNIR	Signal to Interference plus Noise Ratio
SIR	Signal to Interference Ratio (Rapport Signal sur Interférence)
SMIST	Système Mobile Intégré Satellite-Terrestre
UE	User Equipment
UMTS	Universal Mobile Telecommunication System
UTRAN	Universal Terrestrial Radio Access Network
W-CDMA	Wideband Code Division Multiple Access
WiMAX	Worldwide Interoperability for Microwave Access
ZE	Zone d'Exclusion

Introduction

Le mobile par satellite, un rêve de grandeur ressuscité

Les services commerciaux de télécommunications mobiles par satellite ont émergé il y a 30 ans et ont connu depuis une évolution incessante tant sur la partie d'accès satellite que sur les aspects réseau. D'une approche spécifique de type « un service, un terminal, un système », les systèmes mobiles satellite adoptent de plus en plus une stratégie d'intégration avec les technologies de réseau terrestre qui se sont imposées par ailleurs. Par le biais de cette intégration avec le monde terrestre, la technologie mobile par satellite trouvera peut être sa place auprès du grand public.

L'origine des services mobiles par satellite (MSS ou Mobile Satellite Services) peut être datée à 1982 avec le lancement du service d'Inmarsat et de son système de satellites géostationnaires. Ce système fournissait principalement des services de communications téléphoniques maritimes avec des terminaux volumineux suivis quelques années plus tard par des services de transmission de données. Dans les années 1990, les constellations de satellites à basse orbite firent leur apparition, avec la promesse d'offrir un service de téléphonie mondial sur de petits terminaux portables. Naît alors le rêve que le service mobile par satellite peut trouver sa place auprès du grand public. Les réseaux cellulaires terrestres qui se déployaient rapidement ne satisfaisaient pas entièrement les besoins du grand public. Certains ont pensé à ce moment là que les systèmes mobiles par satellite pourraient supplanter les systèmes terrestres. Les téléphones satellite¹ ont donc connu une brève opportunité de se faire adopter par le grand public ce qui a laissé des traces encore présentes dans les esprits. Au tout début des réseaux cellulaires terrestres, le nombre de stations et l'infrastructure de cœur étaient insuffisants pour couvrir entièrement le territoire et fournir la bande passante requise, ce qui se traduisait par une impossibilité fréquente de se connecter ou des ruptures de connexion. De plus, l'hétérogénéité des solutions terrestres choisies par les différents opérateurs à travers le monde, et parfois au sein d'un même pays, obligeait les utilisateurs à se procurer un nouvel équipement lorsqu'ils voyageaient. Aussi, à ce moment précis de l'histoire, les systèmes satellite en orbite basse se présentent comme la solution pour palier ces différents problèmes : très large couverture, peu d'infrastructure et une technologie disponible mondialement avec un unique terminal. Créée en 1991, l'opérateur Iridium symbolise ce rêve de conquête du grand public. La mise en service en 1998 est un échec qui conduira l'entreprise à la faillite (sous chapitre 11) un an plus tard. Pourquoi cet échec alors que la qualité du service est à la hauteur des attentes du public ? Il est principalement dû au coût des communications largement supérieur aux offres terrestres qui par ailleurs se sont bien améliorées dans le même temps. Le grand public ne peut se payer la technologie satellite qui est donc réservée aux utilisateurs qui n'ont pas le choix et qui ont les moyens.

Au début des années 2000, un nouvel espoir renaît pour la communauté satellite de se faire une part dans l'immense gâteau du marché mobile. Cette fois, plutôt que d'un affrontement frontal avec leurs concurrents terrestres, les opérateurs satellite se placent sous le signe de l'intégration avec les solutions cellulaires. Ils partent d'un simple constat : les technologies mobiles terrestre et satellite sont naturellement complémentaires. Les réseaux cellulaires terrestres sont adaptés aux villes où la densité

¹ Le mot « satellite » est souvent utilisé comme adjectif dans le langage usuel de la communauté « satellite ». En tant que substantif, il ne s'accorde cependant pas.

d'utilisateurs est maximale mais perdent leur rentabilité dans les zones peu peuplées. A l'inverse, les systèmes mobile satellite permettent de couvrir de vastes zones à moindre coût mais n'assurent pas la couverture dans les zones urbaines car le signal est bloqué par les constructions. En les combinant pour assurer la couverture en ville par le réseau terrestre et dans les zones moins denses avec le satellite, on obtient un système à la couverture totale pour un coût optimal. Nous appelons un tel système combinant une composante satellite et une composante terrestre un « système intégré » satellite-terrestre.

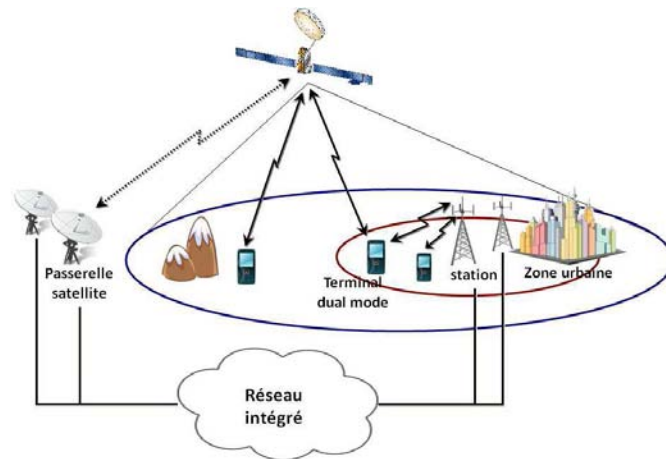


Figure 0-1 : Système mobile intégré satellite-terrestre

Cependant, le succès d'un système intégré est le résultat d'une alchimie complexe. L'expérience des utilisateurs doit être la plus proche de celle des réseaux terrestres avec un coût des communications satellite le plus bas possible, un terminal comparable aux téléphones terrestres en taille et en fonctionnalités avec un abonnement unique et une intégration suffisante au niveau réseau (carte SIM unique, *roaming* entre réseaux voire *handover*). De plus, il faut pouvoir supporter les coûts de conception et de déploiement d'un tel système qui sont énormes. Les seuls abonnements des utilisateurs justifient difficilement le retour sur investissement. Une solution est donc avancée en 2001 par les opérateurs satellite : la réutilisation du spectre satellite par le réseau terrestre pourrait permettre de créer l'apport financier nécessaire à la réalisation d'un système intégré. En effet, alors que l'utilisation du spectre satellite est « gratuite », la valeur du spectre terrestre ne cesse de croître et les coûts de licence d'exploitation atteignent déjà à l'époque des sommes astronomiques. En 2003, la FCC (Federal Communication Commission) américaine accepte à la demande de certains opérateurs satellite, l'utilisation de stations terrestres dans la même bande de fréquence que le système satellite. Aujourd'hui, aucun n'a encore connu le succès escompté. Le plus proche d'y parvenir, Lightsquared (a.k.a Skyterra) est pour l'instant bloqué par des problèmes d'interférences avec le service GPS dans la bande de fréquence adjacente à la sienne. Le système intégré le plus avancé est celui de Terrestar, qui propose un service terrestre et satellite sur un terminal de la taille d'un *smartphone*. Toutefois, cet opérateur n'a pas encore la licence pour partager le spectre avec les systèmes terrestre. L'intégration avec son partenaire terrestre AT&T se limite au terminal et au réseau et ils ne partagent pas le même spectre. Leur système est donc peu rentable jusqu'à présent.

D'autres régions du monde s'intéressent aussi aux systèmes mobiles intégrés depuis quelques années. En 2007, l'Europe a accordé aux opérateurs satellite Inmarsat et Solaris le même type de licence qu'aux USA, pour qu'ils puissent compléter leur service en utilisant des stations terrestres dans leur spectre. Aucun des deux n'a encore lancé de service. Les coréens s'intéressent aussi de près au sujet de l'intégration, ainsi que les japonais qui souhaitent ainsi posséder un service mobile qui puisse résister aux pannes du réseau terrestre grâce au satellite. De nombreuses études ont donc été lancées

un peu partout sur l'intégration avec les systèmes mobile terrestre et en particulier sur le partage de spectre.

Nul doute que d'ici quelques années, le rêve de la communauté satellite de rendre tous les terminaux mobiles capable de se connecter à un satellite sera accessible. Le satellite pourra ainsi être vu comme une énième technologie d'accès à un système « intégré » pour des terminaux portables, aux côtés du Bluetooth, du Wifi et des technologies cellulaires (GSM, UMTS, LTE). La réutilisation de la fréquence satellite par les systèmes terrestre est un facteur déterminant dans le succès de cette intégration car elle permet de justifier les investissements dans le système satellite qui ne peut être rentabilisé par les abonnements seuls. Toutefois sa mise en œuvre pose de nombreux problèmes : réglementaires, commerciaux et bien entendu techniques. Notre thèse apporte des solutions sur ce dernier point et nous espérons qu'elle contribuera ainsi à rendre possible ce rêve d'intégration.

Objectifs de la thèse

Cette thèse porte sur la réutilisation des fréquences satellite par le système terrestre dans un système intégré satellite-terrestre dans un contexte de 4^{ème} génération. Le sujet de l'intégration des systèmes mobiles terrestre et satellite est très vaste et peu documenté. Les principes de partage de spectre dans les systèmes intégrés et de réutilisation des fréquences sont encore peu étudiés et les problématiques associées mal définies. **L'objectif principal de cette thèse est donc d'ouvrir une voie sur ce thème nouveau et prometteur : la réutilisation du spectre satellite par le système terrestre dans un système intégré satellite-terrestre.**

Afin de pouvoir mettre en œuvre le principe de réutilisation des fréquences, il faut résoudre le problème associé des interférences entre composantes satellite et terrestre. Aussi, nous avons eu pour objectifs :

- **De faire une synthèse sur la problématique des interférences inter-composantes.**
- **De définir et d'analyser des solutions de coordination de ces interférences en termes de performances et d'impact sur les systèmes satellite et terrestre.**
- **D'étudier la mise en œuvre de ces solutions dans un système intégré fondé sur les systèmes cellulaires de 4^{ème} génération.**

Réalisations et contributions

En premier lieu, j'ai activement participé à l'établissement de définitions communes concernant divers aspects de l'intégration des systèmes satellite et terrestre. En effet, la problématique de l'intégration de ces systèmes mobiles est au cœur des discussions sur l'avenir des systèmes mobile satellite qui prennent place au sein de la recherche, des institutions, des agences spatiales et des opérateurs commerciaux. Il est donc primordial de bien saisir cette thématique complexe et de disposer d'un vocabulaire et de définitions communs. A cette fin, j'ai participé tout au long de ma thèse à un travail de synthèse pour le groupe ETSI-SES-SCN (Satellite Communication and Navigation) et rédigé une note technique en cours de validation ([1.20]).

Je me suis ensuite plongé dans le sujet de la réutilisation des fréquences dans les systèmes intégrés et de l'interférence entre composantes satellite et terrestre (ICoI) qui en résulte. J'ai réalisé un l'état de l'art sur le sujet composé majoritairement d'études de cas particuliers, de brevets et d'analyses

règlementaires. Il a donc fallu le compléter par des analyses conduites avec un outil de simulation statistique développé à cet effet. J'ai ainsi pu établir une synthèse de cette problématique qui constitue le deuxième chapitre de ce document.

A partir de ce travail, j'ai commencé à explorer les solutions à l'ICoI, avec l'étude de principe de zone d'exclusion. Enoncé il y a dix ans, aucune analyse de ses performances n'avait jamais été publiée. Pour ce faire, j'ai modélisé puis développé un simulateur complet de système intégré. Les résultats produits sont l'objet de ma première publication scientifique ([2.21]). J'ai de plus identifié les limitations de ce principe et caractérisé plus précisément les sources de l'ICoI. Cette caractérisation m'a permis d'identifier plusieurs voies d'améliorations possibles du principe de zone d'exclusion. J'ai donc défini plusieurs solutions d'allocation de fréquences coordonnée entre systèmes satellite et terrestre : « *Position Aware* » et « *ICoI Aware* ». Afin de les étudier, j'ai dû améliorer l'outil développé précédemment pour pouvoir simuler précisément des cellules terrestres au sein d'une couverture satellite. Les résultats très encourageants m'ont permis de rédiger ma deuxième publication scientifique ([2.22]). Ces travaux ont enfin abouti à la conception d'une solution complète d'allocation de ressource pour la composante terrestre d'un système intégré. Elle permet notamment au système satellite de contrôler les interférences engendrées par le système terrestre. Ce point est primordial dans la mise en œuvre de la réutilisation des fréquences et aucune solution publiée à ce jour dans la littérature ne propose de tels mécanismes. De plus, j'ai défini les moyens d'implanter cette solution dans un système LTE intégré. Cette étude a donné lieu à une publication scientifique ([5.1]) ainsi qu'au dépôt d'un brevet.

Structure du document

Ce document se concentre sur la réutilisation des fréquences dans les systèmes intégrés. Dans ce chapitre, nous positionnons le sujet dans son contexte pour en extraire les objectifs. Nous exposons brièvement nos réalisations. Dans le chapitre 1, nous définissons les systèmes mobiles intégrés satellite-terrestre de façon générale pour amener progressivement au sujet de la réutilisation des fréquences et à l'énoncé du cœur de notre problématique. Le chapitre 2 constitue l'état de l'art et l'analyse complète des interférences inter-composantes résultant de la réutilisation des fréquences. Dans le chapitre 3, nous étudions le principe de zone d'exclusion et analysons en profondeur l'impact de son application sur le système. Nous définissons ensuite des solutions d'allocation de fréquences coordonnée que nous étudions dans le chapitre 4. Afin de permettre au système satellite de contrôler l'interférence terrestre, nous mettons au point une solution présentée dans le chapitre 5. Nous définissons aussi les moyens de la mettre en œuvre dans un système LTE intégré. Enfin, nous concluons cette thèse et suggérons des pistes de recherche pour poursuivre le travail accompli.

1. Les systèmes mobiles intégrés satellite-terrestre

Les systèmes combinant un système mobile satellite et un système mobile terrestre sur un seul et même terminal sont apparus assez récemment bien qu'ils furent imaginés de longue date. Le terme « système intégré satellite-terrestre » est utilisé depuis la fin des années 80, mais son sens a évolué en même temps que l'intégration entre les systèmes se faisait plus complète. Il ne définit donc pas de système bien précis aujourd'hui. Pour parler de « système intégré », la seule condition suffisante communément acceptée est l'intégration des terminaux en un seul et unique appareil appelé terminal dual-mode. Dans cette partie, nous introduisons le sujet de la réutilisation des fréquences, en expliquant ce que recouvre l'intégration des systèmes mobiles et en ayant une attention particulière pour l'intégration du spectre.

Dans la partie 1.1, nous commençons par présenter notre approche de la problématique de l'intégration des systèmes mobiles. Les possibilités d'intégration étant très nombreuses, nous avons spécifié un système intégré particulier dans le but d'effectuer nos recherches (partie 1.2). Nous nous centrons ensuite sur le sujet, en évoquant tout d'abord le partage de spectre dans les systèmes intégrés dans la partie 1.3, puis le principe réutilisation des fréquences (partie 1.4). Enfin, dans la partie 1.5, nous énonçons la problématique soulevée par la mise en œuvre de ce principe.

1.1. L'intégration des systèmes satellite et terrestre

Afin d'aborder le thème de l'intégration nous commençons par présenter brièvement les spécificités des systèmes mobiles par satellite, notamment en mettant en relief leurs différences avec les systèmes cellulaires terrestres (§1.1.1). Nous dressons ensuite un historique de l'intégration des systèmes intégrés (§1.1.2). Après avoir listé les bénéfices recherchés cette l'intégration (§ 1.1.3), nous établissons une topologie concernant ses divers aspects (§1.1.4). Enfin, nous présentons les architectures des systèmes « intégrés » existants (§1.1.5).

1.1.1. Les systèmes mobiles

1.1.1.1. Par satellite

Jusqu'à présent, les systèmes MSS (Mobile Satellite Services) ont été relégués aux marchés de niche dont les principaux sont les télécommunications maritimes, aériennes et militaires. Dans ce document, un « système mobile satellite » correspond à un système où le terminal mobile utilisateur est transportable et se connecte directement à un satellite sans intermédiaire. Nous détaillons ici certains points des systèmes de communications mobiles par satellite qui nous paraissent importants par rapport à notre sujet. Toutefois, le lecteur peut se référer à l'ouvrage [1.1] pour de plus amples détails.

Orbites

Ces services sont assurés soit par des systèmes satellite en orbite basse (LEO) ou géostationnaire (GEO), plus rarement en orbite elliptique (HEO) ou intermédiaire (MEO).

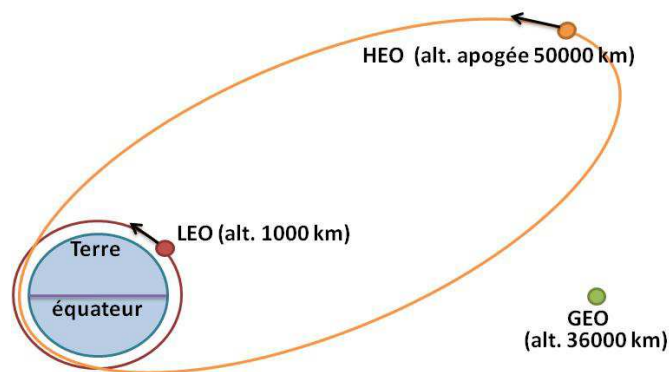


Figure 1-1 : Exemples des principales orbites de satellite de télécommunication mobile

Les plus communs sont les systèmes LEO et GEO. Les systèmes LEO présentent des pertes de propagation moindres que les GEO (1000km contre 36000km) au prix d'une complexité accrue (lien inter-satellites, routage des données vers les passerelles terrestres) et un prix supérieur aux GEO pour couvrir le globe (66 satellites environ plus de nombreuses passerelles au sol, contre 3 à 4 satellites et autant de passerelles pour les GEO). Ils sont plutôt destinés aux services mondiaux car peu rentables pour assurer une couverture régionale. Les systèmes Iridium et Globalstar sont les principaux et sont en cours de lancement d'une seconde génération de satellites. Les systèmes GEO, historiquement les premiers à lancer des services commerciaux, présentent des caractéristiques contrastées. Ils sont immobiles par rapport au sol, ce qui est un avantage car on peut les pointer avec des antennes directrices. En revanche, l'altitude du satellite (36000 km) induit des pertes de propagation importantes (~190 dB). Une seule passerelle est suffisante pour relier le satellite au réseau terrestre et un seul satellite GEO est capable de couvrir environ un tiers du globe (hors pôles). Les systèmes GEO ont fait d'énormes progrès depuis leur origine, en termes de puissance, d'antenne et de systèmes de formation de faisceaux. Les systèmes d'Inmarsat et de Thuraya sont les principaux de ce genre. Les systèmes intégrés de Terrestrial et de Lightsquared sont aussi des systèmes GEO.

Dans la suite de ce document, nous ne considérerons que des systèmes GEO ou HEO. En effet, les zones prévues pour le déploiement de systèmes intégrés (USA, Europe, Japon ou Corée) sont considérées comme régionales et donc pas couvertes de façon rentable avec des systèmes LEO.

Systèmes multi-faisceaux

Les systèmes GEO mobile actuels possèdent tous une technologie de formation de faisceaux qui leur permet de « découper » la couverture en un ensemble de faisceaux contigus. Les satellites les plus performants sont capables de former environ 400 faisceaux de 200 km de diamètre environ. Cela permet d'augmenter la capacité du système par une réutilisation du spectre dans les faisceaux suffisamment éloignés les uns des autres, de la même façon que dans les systèmes cellulaires terrestres. Il existe une certaine analogie entre faisceaux satellite et cellules terrestres, toutefois il y a aussi des différences de taille qu'il est important de souligner pour éviter tout malentendu dans la suite du document :

- Tous les faisceaux sont formés à partir du même satellite.
- Un faisceau satellite mesure entre 200 km et 1000 km de diamètre à 2 GHz.

- Les pertes de propagation en espace libre entre les terminaux d'un même faisceau et le satellite sont presque les mêmes (la distance terminaux-satellite peut être considérée comme égale pour tous). Au premier ordre, on peut même considérer que c'est vrai pour tous les utilisateurs de la couverture.
- En conséquence, la frontière entre deux faisceaux adjacents se fait uniquement par discrimination du gain antenne (cette discrimination provient de la « forme » des faisceaux) contrairement aux systèmes cellulaires où la frontière se fait généralement par éloignement de la station. Pour mieux comprendre cette différence, la Figure 1-2 montre la dynamique de puissance des signaux entre cellules et faisceaux. Dans un système cellulaire terrestre, la dynamique de puissance des signaux (notée ΔG_{ter}) est de l'ordre de 90 dB alors que dans un système satellite multi-faisceaux (noté ΔG_{sat}), elle n'est que de 3 dB ! Bien que cela soit une valeur définie par dimensionnement et qui donc peut être variable d'un système à l'autre, cela donne un ordre d'idée. C'est une différence fondamentale en termes d'ingénierie radio qu'il faut bien avoir à l'esprit lors du dimensionnement de systèmes MSS.

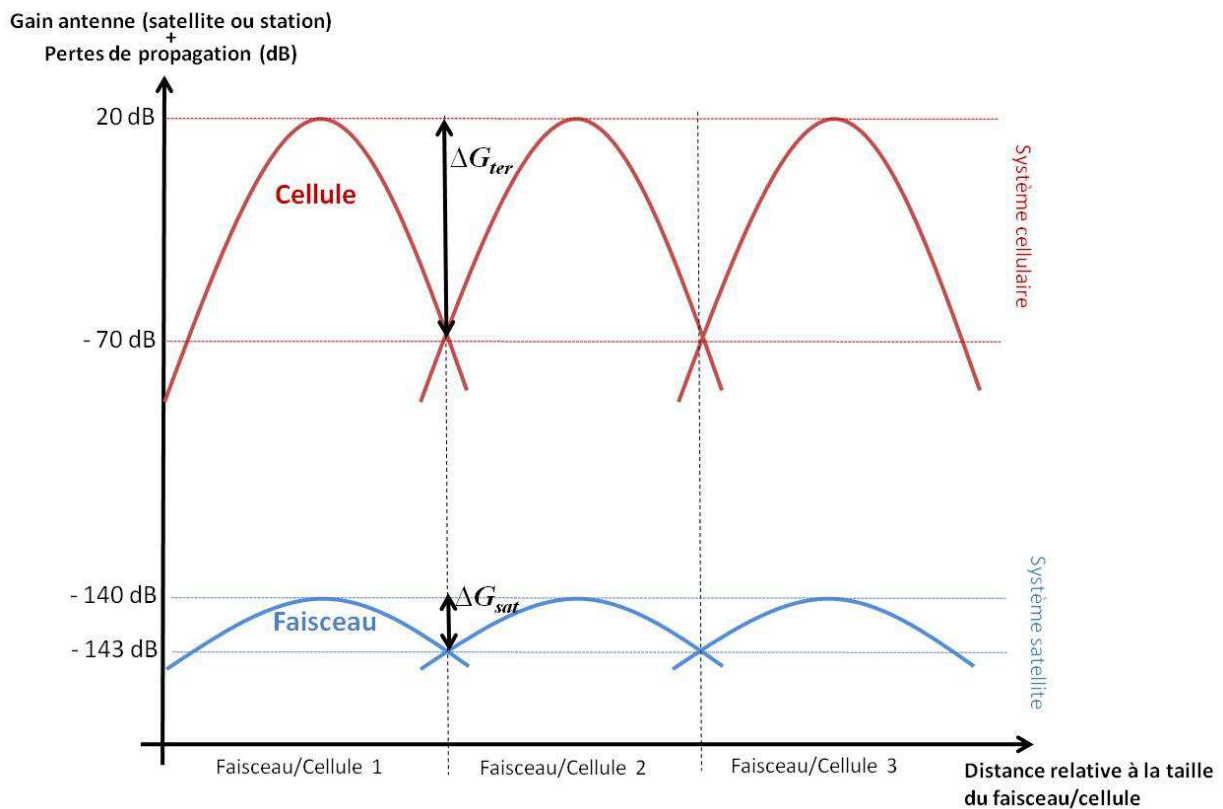


Figure 1-2 : Gain antenne station (et satellite) plus pertes de propagation en fonction de la distance relative à la taille des cellules (et faisceau).

Terminaux

Il en existe de toutes sortes, du terminal sur bateau avec antenne parabolique manœuvrable, au téléphone portable (ou « satphone ») sans antenne apparente. Ils fournissent généralement des services de voix, SMS et internet à débit limité. Dans cette thèse, c'est sur la classe des terminaux « satphones » que nous nous sommes concentrés. L'amélioration des performances RF des satellites (en particulier géostationnaires) a permis une réduction considérable de la taille de ces terminaux. Le système GEO Terrestrial possédant l'un des satellites les plus puissants à ce jour, peut fonctionner avec un terminal de la taille d'un *smartphone* terrestre classique avec son antenne intégrée à l'appareil.

Standards MSS

Dans les systèmes MSS, peu de protocoles sont standardisés et chaque système utilise un standard unique. Depuis quelques années cependant, on assiste à un effort de la part de certains équipementiers et opérateurs satellite pour « ouvrir » les protocoles qu'ils mettent en œuvre et les « standardiser ».

Le standard MSS le plus abouti à ce jour est le standard GMR-1 3G ([5.3][5.4][5.5]). Depuis son origine en 2001, ce standard a été bâti au-dessus du standard du 3GPP, en appliquant une méthode comparable à la notion d'héritage en informatique. Le standard terrestre reste applicable si aucun document du GMR-1 ne vient le remplacer (la numérotation des deux est identique). La liste complète des documents se trouve dans [5.3].

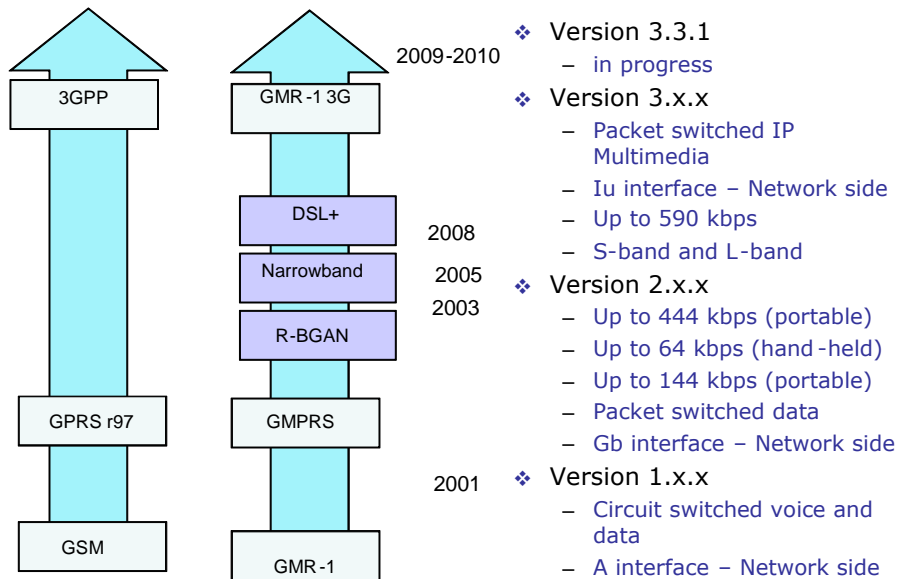


Figure 1-3: Historique de l'évolution du standard GMR-1 (source [5.6])

Les couches de la Non Access Stratum (NAS) du standard d'origine restent applicables et ne sont pas modifiées dans GMR-1. Seules les couches de l'Access Stratum (AS) ont été réécrites. Il faut noter que l'interface radio du GMR-1 3G est fondée sur du FDMA/TDMA, avec une flexibilité dans l'allocation des porteuses (en temps et en fréquence) afin d'adapter les débits aux besoins et aux terminaux qui peuvent être de nature très différente en satellite. Les avantages d'une telle approche sont nombreux : une partie du protocole est déjà validée, l'arborescence de la documentation est cohérente et non ambiguë et surtout la compatibilité avec les interfaces existantes est conservée, de même que l'interopérabilité avec les équipements réseaux existants. Toutefois, cette démarche rend les systèmes GMR-1 dépendants de l'approvisionnement en équipements produits pour les systèmes terrestres. L'évolution continue des systèmes du 3GPP, et donc des équipements, oblige donc les architectes des systèmes satellite GMR-1 à faire évoluer leur système en parallèle.

Une progression probable de GMR-1 est donc d'adapter les versions suivantes des standards 3GPP et notamment de se rendre compatible avec l'architecture de l'EPS (Evolved Packet System) définie au travers de LTE et de SAE (System Architecture Evolution) dans la version 8 du standard 3GPP. C'est à partir de cette supposition que nous avons défini une architecture de système intégré satellite-terrestre. La définition de l'architecture que nous proposons repose sur le même principe que pour GMR1-3G : seule la NAS est modifiée et on conserve un maximum de compatibilité et d'interopérabilité avec le standard existant. Si on suit le découpage fonctionnel entre E-UTRAN

(Evolved-UTRAN) et EPC (Evolved Packet Core), les entités et fonctions de l'EPC restent inchangées tandis que l'E-UTRAN nécessite certaines adaptations.

Cœur de réseau

Le terminal utilisateur se raccorde au travers du satellite à une passerelle qui est directement reliée à un cœur de réseau, qui est fortement similaire à ceux des systèmes cellulaires terrestres, voire identique pour certains systèmes. Par exemple, les cœurs de réseaux des systèmes Inmarsat et Terrestar [5.3] sont compatibles avec les cœurs de réseaux UMTS. Cela permet aux opérateurs satellite d'économiser les coûts de conception et de validation des équipements de cœur et de plus ils sont *de facto* interopérables avec les réseaux cellulaires terrestres.

Technologie d'accès

Les technologies d'accès des systèmes mobiles satellite sont principalement fondées sur des méthodes d'accès de type FDMA/TDMA [5.5]. Depuis quelques années cependant, de nombreuses études sont en cours pour étudier les possibilités de l'adaptation de l'OFDMA et du SC-FDMA au satellite ([5.7]-[5.10]). Les bandes de fréquences les plus utilisées pour les services mobiles commerciaux sont la bande L (1.5 GHz) et la bande S (2 GHz).

1.1.1.2. Cellulaires

Les systèmes cellulaires terrestres connaissent un succès planétaire qui en feront peut être un des premiers moyens d'accès au réseau (en termes de volume de téléchargement) d'ici quelques années. Cet engouement génère des besoins en capacité de plus en plus important, notamment sur le lien d'accès entre les terminaux et les stations. Malgré la constante amélioration de l'efficacité spectrale des technologies d'accès, les opérateurs vont avoir du mal à répondre à la demande. En effet, le spectre disponible est restreint et les opérateurs plaident auprès des instances réglementaires pour libérer plus de spectre pour les services mobiles terrestres. Il est important de souligner ce point car il permet de mieux comprendre l'intérêt du partage de spectre avec le satellite qui constitue le cœur de cette thèse.

Comparés aux systèmes MSS, les systèmes cellulaires terrestres sont bien mieux définis du fait de l'immense effort de standardisation fournis par l'ensemble des acteurs (opérateurs, équipementiers, chercheurs). Etant donnée la complexité de ces systèmes, nous renvoyons le lecteur aux nombreux ouvrages de référence sur le sujet [1.2][1.3][1.4].

1.1.2. De l'intégration des systèmes aux systèmes intégrés

Les systèmes mobiles intégrés satellite-terrestre sont en passe de devenir réalité. Les communications par satellite pourraient ainsi connaître le succès auprès du grand public alors qu'elles ont toujours été cantonnées à des marchés de niche (e.g. maritime, aéronautique, militaire). En effet, sur le terrain des télécommunications mobiles grand public, les technologies terrestres présentent de nombreux avantages par rapport au satellite et se sont donc imposées. Mais grâce aux évolutions en termes d'intégration et d'interopérabilité, service satellite et service terrestre peuvent désormais être présents sur un unique terminal de petite taille. Par ailleurs, cette intégration est encouragée par les organismes de régulation qui y voient la possibilité d'offrir un service plus complet aux citoyens et aussi d'optimiser l'utilisation du spectre. C'est pourquoi l'autorisation fut donnée aux USA puis en Europe de déployer dans la même fréquence des stations terrestres pour compléter le service satellite dans les zones que celui-ci ne peut couvrir, en particulier les zones urbaines. Le sujet de l'intégration des

systèmes terrestre et satellite fit alors son grand retour dans la communauté scientifique du domaine spatial par le biais de la réutilisation des fréquences qui constitue le thème central de cette thèse.

L'intégration des systèmes mobiles satellite et terrestre a une longue histoire derrière elle. Elle est pensée dès la naissance des systèmes mobiles vers la fin des années 80. A cette époque, où les deux types de systèmes sont développés de façon concurrente aux USA et en Europe, le bénéfice principal d'une telle intégration apparaît déjà clairement : la possibilité de déployer un service de télécommunication rapidement et de façon omniprésente [1.5] [1.6]. Dans cette optique, le terminal dual-mode satellite et terrestre est alors imaginé et des solutions d'interconnexion de niveau réseau entre les systèmes sont proposées. Dans les années 90, la communauté satellite entreprend de nombreux projets dont le but est d'étudier jusqu'où les systèmes peuvent être intégrés et les problématiques techniques liées à cette intégration [1.7][1.8][1.9]. Pourtant, en dépit de cette impulsion initiale, les systèmes mobile satellite et terrestre sont déployés séparément et les terminaux dual-mode ne connaissent pas le succès escompté.

Dans la deuxième moitié des années 90, il devient évident que le succès écrasant du système mobile terrestre GSM a relégué la téléphonie par satellite au second plan. Le faible nombre de systèmes MSS (Mobile Satellite Service) ainsi que leur disparité (types d'orbites, classes de terminaux, bandes de fréquence) ne poussent pas les opérateurs et les équipementiers de MSS à définir ensemble un standard de référence pour le mobile par satellite. Concernant les protocoles satellite de la couche NAS (Non Access Stratum) du terminal et des équipements cœur de réseau, les standards déjà développés pour les systèmes terrestres, en particulier ceux du 3GPP, sont récupérés et légèrement adaptés. Cela permet aux opérateurs MSS non seulement d'obtenir des terminaux et des équipements de cœur à moindre coût, mais aussi d'être interopérables au niveau réseau avec les systèmes cellulaires terrestre. Parmi les protocoles effectivement utilisés et ayant adopté ce principe d'héritage des standards 3GPP, on peut citer le S-UMTS, Family SL déployé par Inmarsat et surtout le GMR-1 dans ses différentes versions qui est déployé dans les systèmes Inmarsat, Terrestrial, MSV, Thuraya et ICO. La famille GMR a été mise au point par Hughes Network Systems et standardisé par l'ETSI [5.3]. La version la plus avancée repose sur la version 6 du standard 3GPP. Ce principe d'héritage des standards terrestres est révélateur : la téléphonie satellite reste un marché de niche et qui suit tant bien que mal les évolutions des systèmes terrestres. Les efforts d'intégration entre systèmes viennent donc principalement de la communauté réduite des acteurs du mobile par satellite.

Ainsi, après la crise des télécoms en 2001, les opérateurs satellite américains ICO, Globalstar et MSV demandent à la FCC (Federal Communication Commission) l'autorisation de pouvoir déployer dans leur bande de fréquence des stations terrestres en complément de leur couverture satellite [1.11]. L'autorisation leur est accordée en 2003 [1.12]. Le fait que l'opérateur du système global puissent gérer à la fois les ressources des systèmes satellite et terrestre ouvre de nouvelles possibilités techniques en terme d'intégration comme le handover satellite-terrestre et le partage de ressource. Aujourd'hui, les opérateurs Terrestrial [1.13] et Lightsquared (anciennement MSV) ont conçu un réseau intégré satellite-terrestre. Le système de Terrestrial est pleinement opérationnel. En Europe, bien que la Commission Européenne ait accordé le même type de droit aux opérateurs satellite en bande S [1.14][1.15][1.16], aucun service n'a encore été lancé par les deux opérateurs licenciés (Solaris et Inmarsat). L'ETSI travaille depuis 10 ans sur l'adaptation du W-CDMA au satellite pour l'IMT-2000 qui permet une intégration très forte des systèmes au niveau de l'interface radio (et donc a fortiori au niveau du cœur de réseau) [1.17]. Au Japon, le projet STICS (Satellite Terrestrial Integrated Communication System) vise à concevoir puis déployer un système mobile intégré qui puisse résister aux catastrophes naturelles. Très ambitieux, ce projet commencé en 2008 étudie la plupart des pistes possibles en termes d'intégration : terminal, spectre, réseau, service [1.18].

1.1.3. Les bénéfices de l'intégration

L'intégration d'un système mobile satellite avec un système mobile terrestre peut être motivée par des objectifs variés et est fonction du point de vue : opérateurs de réseau ou de service, régulateurs, équipementiers, utilisateurs. Afin de pouvoir parler de « bénéfices » de l'intégration des systèmes, il est important de définir des moyens de comparaison à partir desquels ces bénéfices sont évalués. Pour cela, nous introduisons deux systèmes comparables qui marquent les limites de l'intégration : le système « non-intégré » et le système « totalement-intégré ».

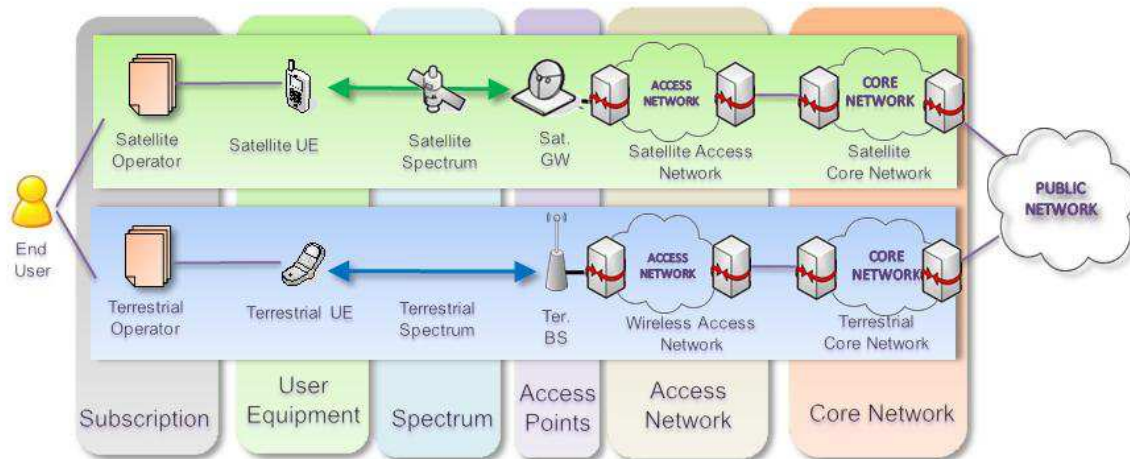


Figure 1-4: Système de référence "non-intégré"

Le système « non-intégré » (cf. Figure 1-4) correspond au niveau zéro d'intégration. Les terminaux et les abonnements sont différents, les réseaux d'accès et de cœur de chaque système sont disjoints et reliés entre eux au travers du réseau public. L'utilisateur a donc bien accès aux deux systèmes, mais sans aucune intégration entre eux.

A l'opposé, le système « totalement-intégré » (cf. Figure 1-5) est un système idéal dans lequel l'intégration est réalisée en tout point (équipements, protocoles et ressources), exceptés les équipements points d'accès. L'utilisateur n'a qu'un terminal et qu'un abonnement. L'utilisation du service est quasi-transparente entre systèmes (différence de qualité de service uniquement).

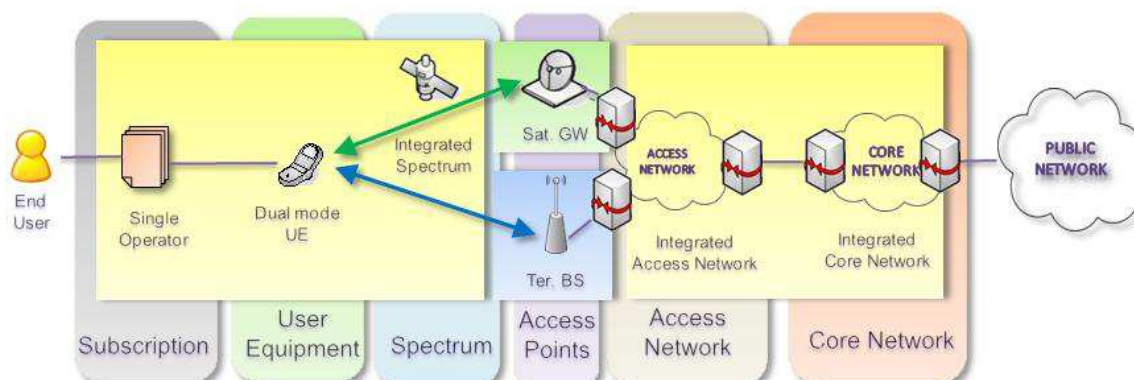


Figure 1-5: Système de référence "totalement-intégré"

Nous pouvons ainsi déterminer les bénéfices de l'intégration en comparant le système « totalement-intégré » aux systèmes existants « non-intégrés ». Par la suite, nous classons les bénéfices par entité intéressée par l'intégration.

1.1.3.1. Opérateurs et utilisateurs du service

Couverture totale

Grâce à l'intégration des systèmes, les utilisateurs peuvent bénéficier d'une couverture presque totale avec un unique terminal et un unique abonnement. La continuité de service est assurée lorsque l'utilisateur change de système d'accès. En comparaison, un service terrestre seul n'offre qu'une couverture limitée (n'atteint pas des zones reculées, la mer ou le ciel). Un service satellite seul souffre d'une dégradation trop importante dans les zones couvertes (villes, forêts, etc.). Cette couverture totale peut être offerte par deux systèmes séparés (système « non-intégré »), mais pour cela les utilisateurs doivent avoir deux terminaux et deux abonnements. De plus, la continuité de service ne peut être assurée dans ce cas.

Service résistant aux catastrophes

En cas de catastrophe, les services mobiles terrestres seuls peuvent connaître une perte partielle ou totale de disponibilité. Avec un système intégré, on peut maintenir un service dégradé (satellite) même en cas de perte du service terrestre. Il est bien sûr possible d'utiliser un système satellite dans ce cas mais cette solution nécessite de disposer de terminaux satellite et d'abonnements valides au moment de la catastrophe.

1.1.3.2. Opérateur de réseau

Couverture rapide

L'intégration d'un système terrestre avec un système satellite est un moyen des plus rapides pour obtenir une couverture complète et permettre aux opérateurs terrestres de répondre aux exigences de couverture en termes de surface couverte.

Déploiement du service adapté au besoin

En plus du bénéfice cité précédemment, il est possible pour un opérateur d'utiliser le système le plus adapté au besoin (surface ou capacité) en fonction de la rentabilité de la zone à couvrir, dans le but d'optimiser les coûts de déploiement et de fonctionnement. En effet, il est plus rentable de couvrir les zones peu denses avec le satellite que de déployer et maintenir un réseau de stations.

Gestion optimisée du trafic

Le satellite peut être considéré comme une surcouche pour le système terrestre. Il peut donc être utilisé comme système de débordement du système terrestre quand celui-ci est surchargé. Ce bénéfice a été particulièrement mis en avant et étudié à la fin des années 90, mais l'écart énorme en terme de capacité entre les systèmes actuels rend ce point moins pertinent aujourd'hui.

1.1.3.3. Organismes de régulation

Les récentes évolutions des réglementations en Europe et aux USA autorisent l'utilisation de systèmes terrestres dans la même bande de fréquence en complément du satellite, favorisant ainsi leur intégration. Les objectifs de ces évolutions pour les organismes de régulations sont :

Déploiement de nouveaux services

De nouveaux services de diffusion radio ou TV mobile (e.g. Sirius-XM aux USA, TU-Media en Corée) sont rendus possibles par l'intégration d'un système de diffusion satellite et de stations terrestres de diffusion dans les zones urbaines. Ces services n'auraient pas été possibles (problème de couverture) ou rentables (coût du déploiement des stations terrestres) pour des systèmes satellite seuls ou terrestres seuls. Il faut noter que de tels services sont envisageables avec des systèmes émettant dans des fréquences disjointes mais au prix d'une complexité accrue et d'une utilisation du spectre moins efficace. En effet, les signaux terrestres et satellite sont émis dans des bandes de fréquences différentes et ne peuvent être combinés au niveau physique.

Optimisation de l'utilisation du spectre

Ce dernier point fait l'objet de cette thèse. La réutilisation du spectre satellite par le système terrestre peut conduire à une amélioration de l'utilisation globale du spectre. Le prix à payer est l'accroissement de la complexité du système pour gérer les interférences résultantes entre systèmes.

1.1.4. Typologie des aspects de l'intégration

1.1.4.1. Clarification et classification dans les systèmes « intégrés »

Dans cette thèse, le terme « *système mobile intégré satellite terrestre* » définit : « un système de télécommunication mobile dans lequel le terminal utilisateur implante une technologie d'accès terrestre (e.g. LTE) et une technologie d'accès satellite (e.g. GMR). ».

Cette définition donne le niveau minimal d'intégration (le terminal) nécessaire pour qualifier un système d'« *intégré* ». Cependant, en fonction des bénéfices recherchés (cf. §1.1.3), des niveaux d'intégration plus avancés peuvent exister.

Dans la littérature, l'adjectif « *intégré* » couplé avec « *satellite* » et/ou « *terrestre* » est utilisé pour qualifier des systèmes de natures très différentes : intégration d'un système de navigation satellite avec un système mobile terrestre, ou intégration d'un système satellite en bande C avec un autre système satellite en bande Ka. De plus, l'adjectif « *hybride* » est aussi communément employé pour qualifier un *système mobile intégré satellite terrestre*. Pourtant les termes « *intégré* » et « *hybride* » ne suffisent pas à définir précisément un système. Cette imprécision dans les termes est dommageable à bien des égards : elle rend plus ardue la bibliographie sur un type précis de système (les systèmes mobile intégré satellite-terrestre dans le cas de cette thèse) ; cela rend confus les messages de la communauté scientifique à destination de personnes qui ne sont pas expertes du domaine ; d'un point de vue recherche, il est important d'identifier clairement les familles de systèmes avec des termes communément admis ; les organismes de régulations ont besoin de termes bien définis pour désigner des systèmes précis dans les documents réglementaires. Sur ce dernier point, l'ITU-R (Working Party 4B) a initié un document [1.19] dont le but est de clarifier et de définir les termes utilisés pour désigner les systèmes combinant un lien satellite et un lien terrestre. Un type particulier de système intégré, l'« *integrated MSS system* », y est défini. Dans ce dernier, l'intégration entre les systèmes concerne surtout les aspects du spectre et de la gestion de la ressource au niveau du réseau.

L'ETSI via le groupe Satellite Earth Stations and Systems Technical Committee (TC-SES) contribue aussi à ce travail de clarification (cf. Work Item « *DTR/SES-00322: Definitions of hybrid and integrated Mobile Satellite Systems* »). Au cours de cette thèse, j'ai participé à ce travail, par la publication d'un rapport technique sur la classification et la terminologie de ces systèmes [1.20]. L'objectif du document est de classer puis de nommer les différents systèmes existants combinant satellite et terrestre, et ce de façon exhaustive et hiérarchique. La présentation de ce document au groupe ETSI SCN a soulevé de nombreux débats et commentaires. Il en ressort que l'élaboration d'une classification qui couvrirait tous les systèmes possibles semble trop complexe pour être lisible. Par ailleurs, les possibilités de combinaisons étant presque infinies, il semble difficile d'être réellement exhaustif. C'est pourquoi le groupe a décidé d'adopter une autre approche qui est retranscrite dans ce manuscrit.

Entre les systèmes « non-intégrés » et « totalement-intégrés », les possibilités d'intégration sont très nombreuses. Différents aspects recouvrent la notion d'intégration. Les principaux que nous avons identifiés sont le service, le terminal, le réseau, le spectre et le standard. En fonction de leur niveau d'intégration dans chacun de ces aspects, les systèmes offriront tout ou partie des bénéfices précités. Par conséquent, un système intégré présentera différents niveaux d'intégration dans chacun de ces aspects en fonction des bénéfices (cf. §1.1.3) et des capacités souhaités, ainsi que des contraintes (coût, réglementation, standardisation) imposés par chacune des parties impliquées dans cette intégration.

Nous présentons dans la suite les niveaux d'intégration pour chacun de ces aspects sous la forme de tableau. Il existe parfois des dépendances entre niveaux qui sont signalées, mais ils sont souvent indépendants. Plusieurs niveaux peuvent parfois être combinés. Cette typologie des différents aspects de l'intégration nous est utile dans la suite pour caractériser les différents systèmes intégrés qui peuvent exister, ou qui sont envisagés dans des études. Elle permet ainsi, de façon très synthétique de résumer ces niveaux d'intégration. Dans la partie suivante (§1.1.5), nous décrivons des systèmes intégrés existants en nous appuyant sur cette typologie. Enfin, il faut noter que cette typologie, bien que définie pour les systèmes mobiles, peut aussi servir à caractériser l'intégration dans les systèmes satellite fixes.

1.1.4.2. Intégration du terminal

L'intégration du terminal concerne tous les aspects de l'équipement utilisateur, de la partie RF à la partie applicative. Le niveau d'intégration « équipement » (Te0) est le niveau minimal d'intégration, correspondant à la mise en commun des équipements de chaque système en un seul équipement utilisateur. Cet aspect de l'intégration constitue le plus petit commun dénominateur des systèmes dits « intégrés » trouvés dans la littérature.

Table 1-1 : Niveaux d'intégration du terminal

Niveau	Intégration	Description	Niveaux requis
Te0	Équipement	Le terminal satellite et le terminal terrestre sont intégrés en un seul terminal dual-mode. Le terminal est composé d'un seul équipement utilisateur avec éventuellement une antenne externe. L'Operating System et les logiciels applicatifs sont les mêmes pour les deux systèmes.	-
Te1	Module d'authentification	Le module d'authentification du terminal est commun pour les deux systèmes (e.g. même carte SIM).	Te0, (St1 ou St2)
Te2	Couche NAS	Les composants logiciels et matériels de la couche NAS (Non Access Stratum) du terminal sont communs pour les deux systèmes.	Te0, Te1 St3
Te3	Couche AS	Les composants logiciels et matériels de la couche AS (Access Stratum) du terminal sont communs pour les deux systèmes.	Te0, Te2 St4
Te4	Couche Physique	Le chipset de la couche physique du terminal est commun.	Te0 St5
Te5	Antenne	L'antenne du terminal est commune.	Te0
Te6	Accès dual	Le terminal peut accéder simultanément aux deux systèmes.	Te0

1.1.4.3. Intégration du service

L'intégration du service regroupe les aspects d'accès aux services pour l'utilisateur (abonnement) et de la relation entre les services satellite et terrestre. Bien que ce volet n'ait que peu d'impact au niveau technique, nous le listons afin d'être exhaustif.

Table 1-2 : Niveaux d'intégration du service

Niveau	Intégration	Description	Niveaux requis
Sv0	Abonnements indépendants	Deux abonnements différents sont nécessaires pour accéder aux services de chaque système. Les services sont indépendants.	-
Sv1	Abonnement commun	Un seul abonnement donne accès aux deux systèmes. Les services fournis par les réseaux satellite et terrestre peuvent être identiques. L'itinérance entre les systèmes est possible.	Te0
Sv2	Gestion des services	La gestion des services est commune pour les systèmes. Cela permet d'offrir les mêmes services et d'autoriser leur continuité entre réseaux d'accès différents (par exemple en cas de handover).	Te0, Sv1 Nw1, Nw2
Sv3	Complémentarité des services	Les deux systèmes sont requis simultanément pour pouvoir accéder au service, ou pour fournir une qualité de service suffisante (disponibilité, couverture).	Te0, Sv1

1.1.4.4. Intégration du réseau

L'intégration du réseau est la plus communément implantée dans les architectures des réseaux mobiles existants, terrestre ou satellite. Historiquement, elle constitue le premier type d'intégration. Il faut noter qu'un système satellite et un système terrestre peuvent être intégrés au niveau du réseau sans pour autant que l'équipement terminal soit intégré (Niveau Te0).

Table 1-3 : Niveaux d'intégration du réseau

Niveau	Intégration	Description	Niveaux requis
Nw0	Interconnexion	Les cœurs de réseau des systèmes satellite et terrestre sont interconnectés au travers du réseau public.	-
Nw1	Modules AAA	Les modules AAA des deux systèmes interagissent directement au travers d'une interface ou indirectement au travers d'une passerelle. Cela rend possible l'itinérance des utilisateurs entre systèmes.	St1 ou St2
Nw2	Plateforme de services	La plateforme de services est la même pour les deux systèmes. Cela permet d'offrir les mêmes services à l'utilisateur et de mettre en commun les équipements.	St1 ou St2/St3
Nw3	Gestion des abonnés	Les deux réseaux sont connectés à la même base de données des abonnés.	St1 ou St2/St3
Nw4	Passerelle IP	Les points d'attachement à l'Internet des deux systèmes sont communs ou interagissent au travers d'une interface commune ou d'une passerelle. Cela permet la mobilité entre systèmes tout en conservant la même adresse IP.	Nw3 St1 ou St2/St3
Nw5	Serving Gateway	Les points d'interface entre réseaux d'accès (Station de Base ou gateway satellite) interagissent directement ou au travers d'une passerelle. Cela permet le handover vertical entre systèmes.	Nw3, Nw4 St1 ou St2/St3
Nw6	Entité RRM	Les entités RRM des systèmes interagissent directement ou au travers d'une passerelle. Cela permet la gestion dynamique de ressources entre systèmes en vue de réaliser une gestion dynamique de trafic ou une optimisation de l'utilisation du spectre.	Nw3, Nw4, Nw5 (St1 ou St2/St3)
Nw7	Point d'accès	Les points d'accès de deux systèmes (Station de Base ou passerelle satellite) directement ou au travers d'une passerelle. Cela permet l'échange rapide d'informations entre points d'accès en vue de gérer la ressource spectrale entre systèmes ou d'assurer les handovers plus efficacement.	Nw3, Nw4, Nw5, Nw6 (St1 ou St2/St3)

1.1.4.5. Intégration du spectre

Les niveaux possibles d'intégration du spectre dépendent de la réglementation et des accords entre opérateurs satellite et terrestre. En fonction de ce niveau d'intégration, certaines techniques de gestion de la ressource spectrale deviennent possibles au niveau du terminal (diversité de signal) ou du réseau (partage statique ou dynamique de ressource). Comme cette thèse traite principalement de ce sujet, nous y revenons plus en détail dans la partie 1.3.

Table 1-4 : Niveaux d'intégration du spectre

Niveau	Intégration	Description	Niveaux requis
Sp0	Bandes dédiées	Les systèmes satellite et terrestre opèrent dans des bandes de fréquences différentes : le système satellite dans une bande dédiée MSS et le système terrestre dans une bande dédiée aux services terrestres.	-
Sp1	Bande intégrée avec séparation	Les systèmes satellite et terrestre opèrent dans la même bande de fréquence (e.g. la bande S MSS en Europe). La bande de fréquence est séparée en deux sous-bandes par l'opérateur. Chaque système (terrestre et satellite) opère dans une des sous-bandes qui lui est dédiée.	-
Sp2	Bande intégrée partagée - Diffusion	Les systèmes satellite et terrestre opèrent dans la même bande de fréquence et diffusent le même signal à la même fréquence.	Te4, Te5
Sp3	Bande intégrée partagée - Bidirectionnel - Gestion Statique	Les systèmes satellite et terrestre opèrent un service de communications bidirectionnelles dans la même bande de fréquence. Le système terrestre réutilise la bande utilisée par le système satellite. Il en résulte des interférences entre systèmes qui sont gérées de façon statique par une planification coordonnées. En dehors de cet aspect, les deux systèmes peuvent être opérés de façon indépendante.	-
Sp4	Bande intégrée partagée - Bidirectionnel - Gestion Dynamique	Les systèmes satellite et terrestre opèrent un service de communications bidirectionnelles dans la même bande de fréquence. Le système terrestre réutilise la bande utilisée par le système satellite. Les interférences entre systèmes sont gérées de façon dynamique par le monitoring du spectre et/ou par des mécanismes dynamiques de gestion de ressource entre systèmes.	-

1.1.4.6. Intégration du standard

L'intégration du standard est l'approche adoptée par les opérateurs satellite qui ont réutilisé les standards du 3GPP pour le cœur de réseau et la couche NAS des systèmes MSS. Leur objectif principal fut d'économiser les coûts de développement et de fabrication des équipements (terminaux et cœur de réseau). Toutefois, l'intégration des standards va plus loin que la réutilisation des équipements. Elle permet aussi l'interopérabilité entre réseaux terrestre et satellite et donc l'intégration des services et la possibilité d'itinérance/handover entre systèmes. Certains niveaux d'intégration permettent d'optimiser la gestion des ressources.

Table 1-5 : Niveaux d'intégration du standard

Niveau	Intégration	Description	Niveaux requis
St0	Piles de protocoles dédiées	Les piles protocolaires des systèmes satellite et terrestre sont différentes et n'ont pas été conçues pour interagir. Les deux systèmes ne peuvent donc avoir qu'une interaction limitée au travers de passerelles.	-
St1	Couche IP	Les couches hautes des piles protocolaires des deux systèmes fonctionnent sur IP. Le recours à des protocoles de contrôle et de gestion adaptés à IP (e.g. SIP, MIP, MIH) et/ou des équipements réseau (passerelle, proxy, base de données communes), le système intégré peut obtenir des capacités telles que la gestion commune des utilisateurs et des services, et la mobilité entre systèmes.	-
St2	Module d'authentification	Les systèmes utilisent des modules d'authentification compatibles (e.g. SIM). Cela autorise les terminaux à s'authentifier sur les deux systèmes. Avec des accords adéquats entre opérateurs, l'itinérance entre systèmes est possible pour les utilisateurs.	-
St3	Standards Mobiles - Couches Non Access Stratum	Les piles protocolaires des deux systèmes sont issues de standards mobiles (e.g. GSM, UMTS) et ont la même couche NAS (Non Access Stratum). Au niveau du terminal, cela permet de réutiliser le même logiciel et/ou matériel pour l'implantation de la NAS des deux systèmes. Au niveau des cœurs des deux réseaux, cela permet d'utiliser les mêmes équipements. D'un point de vue fonctionnel, il est possible d'offrir des services complètement intégrés, des fonctions de mobilité avancées (handover sans couture) et des fonctions de gestion intégrée du réseau.	-
St4	Standards Mobiles - Couches Access Stratum	Les piles protocolaires des deux systèmes sont issues de standards mobiles (e.g. GSM, UMTS) et ont la même couche AS (Access Stratum). Au niveau du terminal, cela permet de réutiliser le même logiciel et/ou matériel pour l'implantation de l'AS des deux systèmes. Au niveau des points d'accès (gateway satellite ou station de base), cela permet d'utiliser les mêmes équipements. D'un point de vue fonctionnel, cette intégration peut faciliter la gestion de ressource entre systèmes (partage de charge sur les deux systèmes) et la mobilité (sélection de « cellules », cohérence des métriques)	-
St5	Couche Physique	Les couches physiques des deux systèmes sont identiques. Au niveau du terminal, cela permet de réutiliser le même logiciel et/ou matériel pour la génération de la forme d'onde. D'un point de vue fonctionnel, il devient possible d'utiliser des fonctions avancées de gestion de la ressource (cas où le spectre est partagé, niveau Sp4) ou de combiner les signaux terrestre et satellite pour bénéficier de la diversité de signaux.	-

1.1.5. Architecture des Systèmes Intégrés

Dans la partie précédente, nous avons présenté une typologie de l'intégration concernant différents aspects. Nous supposons que nous pouvons qualifier un système d'« intégré », lorsque les terminaux sont au moins intégrés au niveau Te0 (un seul équipement terminal).

Nous décrivons donc dans cette partie les architectures des systèmes intégrés vérifiant cette définition minimale. Ces systèmes peuvent être classés en deux catégories : les systèmes de diffusion et les systèmes bidirectionnels. En effet, l'architecture et les problématiques de gestion du spectre y sont très différentes.

1.1.5.1. Systèmes intégrés de diffusion

L'architecture d'un système intégré de diffusion se présente comme sur la Figure 1-6. Elle est composée d'un système de diffusion satellite classique, couplé à un réseau de stations de diffusion terrestre. Le satellite et les stations diffusent le même contenu à destination des mobiles. Le satellite est alimenté par une passerelle satellite. Les stations terrestres peuvent être alimentées soit directement par le satellite (S_{f_sat} sur la figure) soit par un lien terrestre (S_{f_ter}). Le signal S_{f_sat} peut être soit un signal dédié (en bande X ou Ka par exemple) soit directement égal au signal utilisateur satellite (S_{u_sat}) qui est ensuite réémis.

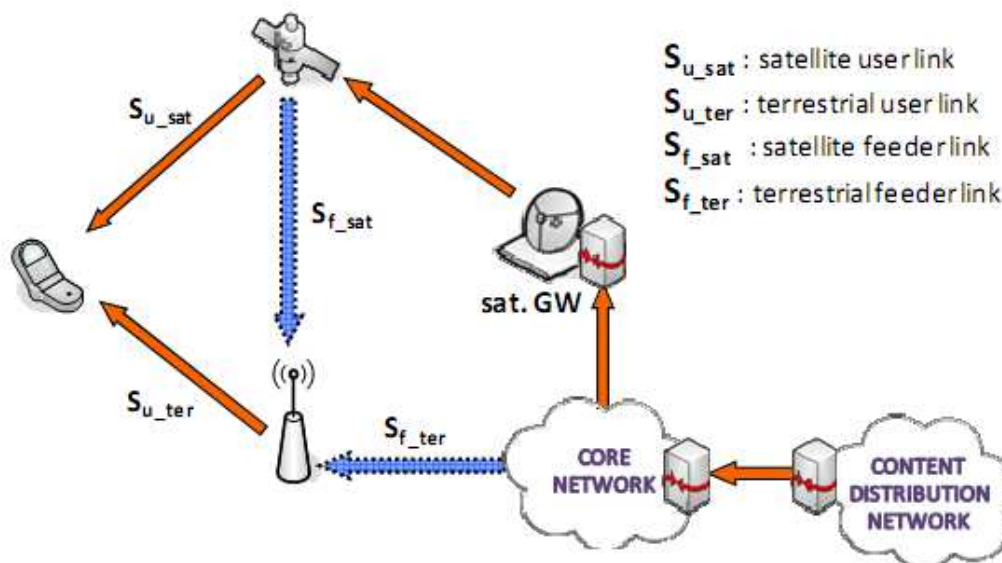


Figure 1-6 : Architecture d'un système intégré de diffusion

Plusieurs systèmes intégrés de diffusion sont actuellement opérationnels : Sirius-XM aux USA [1.20] et TU-Media en Corée et au Japon [1.22]. Un service de diffusion mobile sur satellite verra peut être le jour en Europe. L'opérateur Solaris qui y possède une licence envisage le déploiement d'un tel service à l'aide de la technologie DVB-SH [1.23].

Bien que la typologie établie précédemment soit plutôt adaptée aux systèmes bidirectionnels, nous donnons les différents niveaux d'intégration pour ces trois systèmes dans la table ci-dessous.

Table 1-6 : Niveaux d'intégration pour les systèmes intégrés de diffusion

Système	Service	Terminal	Réseau	Spectre	Standard
Sirius	Sv1, Sv2	Te0, Te3, Te4, Te5, Te6	Nw2	Sp1	-
TU-Media DVB-SH	Sv1, Sv2	Te0, Te3, Te4, Te5, Te6	Nw2	Sp2	St5

1.1.5.2. Réseaux intégrés bidirectionnels

L'architecture d'un système intégré bidirectionnel est beaucoup plus complexe. Trois systèmes marquent bien l'évolution de l'intégration des systèmes cellulaires terrestres et des systèmes mobile satellite : les systèmes Inmarsat Isatphone pour la première génération, Thuraya SO-2520 et Terrestar Genus pour la dernière génération. Bien que ce dernier n'ait pas encore été mis en service, c'est un des plus avancés dont l'architecture ait été publiée [1.13].

**Figure 1-7 : Comparaison de terminaux mobile satellite**

L'IsatPhone Pro représente certainement le plus petit niveau d'intégration possible. Le terminal peut fonctionner sur satellite ou sur réseau GSM terrestre, mais il faut pour cela posséder deux cartes SIM (une par système). Le terminal ne peut en contenir qu'une seule à la fois. Bien que le même système d'identification soit employé au niveau du terminal (Te1), l'itinérance entre opérateurs satellite et terrestre n'est pas possible.

Le Thuraya SG2520 implante le standard GMR et propose donc un meilleur niveau d'intégration du terminal (couche NAS, Te2) et du réseau (Nw1). Une seule carte SIM est suffisante pour rendre possible l'itinérance entre opérateurs satellite et terrestre.

Enfin, le Terrestar Genus est le terminal du système intégré de Terrestar, dont les composantes opèrent dans la même bande de fréquence (Sp1). Les cœurs de réseau terrestre et satellite, fondés sur GMR (partie satellite), HSPA et LTE, sont intégrés au niveau de la Serving Gateway et du MME [1.13]. Les handovers entre systèmes sont donc possibles.

Ces différents niveaux d'intégration sont résumés dans la Table 1-7 :

Table 1-7 : Niveaux d'intégration pour les systèmes intégrés bidirectionnels

Système	Service	Terminal	Réseau	Spectre	Standard
Inmarsat Isatphone	Sv0	Te0, Te1	Nw0	Sp0	St2
Thuraya SG2520	Sv0	Te0, Te1, Te2	Nw0, Nw1	Sp0	St2
Terrestar Genius	Sv1	Te0, Te1, Te2	Nw1, Nw2, Nw3, Nw4, Nw5	Sp1	St2, St3

1.2. Système de référence étudié

Pour répondre à la problématique posée, nous l'avons étudiée dans son ensemble pour dégager les principes généraux et imaginer des solutions les plus indépendantes possibles des types de systèmes intégrés existants ou considérés dans la littérature. Cependant, le choix de certains paramètres peut modifier fortement l'efficacité de certaines solutions. Notamment, les paramètres qui affectent le plus le principe de réutilisation fréquentielle sont :

- Le type d'orbite du satellite. La différence entre orbites basses défilantes et orbites géostationnaires provient:
 - Des faisceaux dérivant (LEO) ou Couverture fixe (GEO ou HEO) ;
 - De la synchronisation au niveau de la *gateway* satellite (GEO ou HEO) ou des multiples *gateways* (LEO).
- Les types de terminaux : *handheld*, véhiculaires ou nomades, simple mode ou dual-mode.
- La zone de déploiement de la composante terrestre : à l'intérieur des bâtiments, zones urbaines, ou couverture totale.
- La planification de fréquence :
 - Le mode duplex qui définit les cas d'interférences.
 - La répartition de fréquence entre système satellite et terrestre : bandes exclusives et bandes partagées.
- L'interface radio : FDMA/TDMA, CDMA ou OFDMA.

Même si nous essayons de rester le plus général possible, toutes les combinaisons de paramètres ne peuvent être explorées. Nous avons donc déterminé un système de référence le plus « crédible » possible sur lequel nos résultats sont fondés.

Comme aucun système intégré avec réutilisation des fréquences n'est déployé aujourd'hui, nous avons dû faire des hypothèses sur le système cible à étudier. Nos choix ont été guidés par :

- Les systèmes intégrés américains qui sont les plus avancés aujourd'hui : Lightsquared et Terrestar. Ce sont tous deux des systèmes GEO multi-faisceaux fonctionnant avec des terminaux *handheld* de petite taille.
- Les tendances des systèmes sans fil terrestres qui ont adopté des technologies de type OFDMA.
- Le standard 4G des systèmes cellulaires le plus populaire est le LTE.
- La réglementation en vigueur, en particulier en Europe.

Voici réunies dans les tables suivantes les caractéristiques principales de notre système de référence.

Table 1-8 : Caractéristiques principales de notre système de référence

	Caractéristique	Valeur du système de référence
Système satellite	Orbite	GEO ou HEO
	Fréquence nominale	2 GHz
	Puissance RF	≈2 kW
	Couverture	Continentale, latitude > 30° N
	Formation de faisceaux	GBBF (Ground Based Beam Forming) ou OBBF (On Board Beam Forming)
	Taille antenne	≈ 20 m
	Nombre de faisceaux	Entre 400 et 500
	Diamètre des faisceaux	≈200 km
	Gain maximum centre de faisceau	Gmax ≈ 50 dB
	Gain en bord de faisceau	Gedge ≈ Gmax – 3 dB
	Technologie d'accès	De type FDMA ou OFDMA
Système terrestre	Zone de déploiement	Urbaine
	Technologie/Standard	Type LTE
	BTS	Macro (outdoor)
	Antenne	Tri-sectorielle
Terminal	Facteur de forme	Type handheld
	Modes	Dual mode (satellite+terrestre) ou Simple mode (terrestre seulement)
	Antenne	Mode satellite : faiblement directionnelle Mode terrestre : omni-directionnelle
	Puissance RF maximale	1W
Plan de fréquence	Bande de fréquence	Uplink : 1980-2010 MHz Downlink : 2170-2200 MHz
	Largeur de bande du système	D : 15 MHz / U : 15 MHz
	Mode duplex	FDD direct (cf. §2.1)

1.3. Le partage de fréquence dans les systèmes intégrés

1.3.1. La raison du partage

Avant d'étudier la manière de réutiliser le spectre fréquentiel entre systèmes satellite et terrestre, il est intéressant de détailler rapidement les bénéfices que l'on souhaite en retirer. En effet, les services fournis par un système intégré qui exploite le principe de réutilisation des fréquences peuvent être aussi fournis par un système intégré avec partage de bande simple (Sp1 dans la Table 1-4). Or, la conception et l'implantation de techniques de réutilisation sont coûteuses, il est donc légitime de se demander ce qu'elles peuvent apporter.

La réponse est relativement simple : la demande en spectre pour les nouveaux services de communication mobile dans les bandes sous les 3 GHz a fortement augmenté ces dernières années conduisant au besoin d'utiliser le spectre disponible de façon plus efficace. C'est une des raisons qui a poussé certaines agences de réglementation à autoriser le déploiement dans la même bande de fréquence de systèmes de communication mobile terrestre et satellite.

1.3.1.1. Une réponse à la pénurie

Tout système de communication sans fil nécessite une portion du spectre des fréquences électromagnétiques pour émettre. Or, même s'il est théoriquement infini, ce spectre est limité réglementairement dans son utilisation pour les radiocommunications. Il s'étend de 300kHz à environ 300 GHz et les fréquences inférieures à 3GHz sont les plus recherchées pour les communications sur terminaux mobiles. En effet à ces fréquences, les terminaux peuvent fonctionner avec des antennes peu directives, voire pas du tout,

Cette limitation du spectre des radiofréquences implique directement une limitation dans l'utilisation que l'on peut en faire. En effet, pour une qualité de lien donnée entre un émetteur et un récepteur, la capacité limite de transmission dans une portion (ou bande) de fréquence est proportionnelle à la largeur de cette bande. Or, le besoin global en quantité d'information à transmettre augmente sans cesse, en raison de l'augmentation du nombre de systèmes de communication sans fil et des débits de leurs applications. Même si les avancées techniques en traitement du signal permettent aujourd'hui d'accroître la quantité d'information transmise dans une bande donnée, les besoins croissants en débit des systèmes actuels ne semblent plus pouvoir être satisfaits avec les bandes qui leur sont allouées. Des stratégies de plus en plus sophistiquées de réutilisation de fréquence au sein des systèmes sont donc mises en œuvre pour multiplier la capacité disponible et minimiser les effets des interférences intra-système qui en résultent (e.g. division en cellules, antennes multiples et directionnelles avec réutilisation spatiale, diversité de polarisation, etc.). En contrepartie, ces techniques impliquent un accroissement de la complexité des systèmes.

Ce manque de spectre fréquentiel qui est un facteur limitant de la capacité des systèmes sans fil est appelé « pénurie de spectre » (*spectrum scarcity* en anglais). Toutefois, dans [1.24], l'auteur soutient que cette pénurie est principalement due à la manière dont le spectre est réglementé i.e. que chaque bande de fréquence est allouée exclusivement à un système donné. En effet, des règles de partage très strictes protègent fortement chaque système dans sa bande de fréquence en interdisant d'autres systèmes à fonctionner dans la même bande. Or, l'évolution des technologies d'accès au support sans

fil (e.g. radio logicielle et intelligente) permettent notamment d'envisager la réutilisation de fréquence inter-système. Le principe est de réutiliser la fréquence d'un système dit « primaire » au niveau d'un système dit « secondaire » et ce de manière transparente pour le système primaire (i.e. sans interférence dommageable pour ce système) [1.25]. Selon ce même principe, la fréquence d'un système mobile satellite peut être réutilisée par un système mobile terrestre.

Cependant, un système intégré satellite-terrestre se démarque d'un système de type primaire/secondaire. En effet, la planification et la gestion des ressources du système principal (le système satellite) peuvent prendre en compte la présence d'un système terrestre sous-jacent qui réutilise sa fréquence. Cela permet ainsi de mettre en œuvre d'autres méthodes de réutilisation de fréquences que nous allons détailler dans le chapitre 2.

La réutilisation de la fréquence satellite par un système terrestre est une manière d'optimiser l'utilisation du spectre et donc de répondre à ce problème de pénurie dans les systèmes mobiles. C'est une des raisons qui ont poussé certaines organisations de réglementation du spectre à autoriser l'application de ce principe.

1.3.1.2. Aspects règlementaires

L'utilisation du spectre fréquentiel est règlementée à différents niveaux (mondial, continental et national) par des agences de régulation. Pour en citer quelques unes, l'ITU-R au niveau mondial, la FCC aux USA, la CEPT, l'ETSI et la CE en Europe. En juxtaposant les différentes réglementations, on obtient l'utilisation que l'on peut faire du spectre fréquentiel à un endroit donné et selon certaines conditions. Ces conditions portent notamment sur le type de service, les caractéristiques du signal émis dans la bande de fréquence considérée (puissance maximum, *roll-off*, etc.), le type d'émetteur qui peut y être utilisé (téléphone mobile, station de base, satellite, etc.) et éventuellement les standards qui doivent y être utilisés.

A l'origine, les agences de réglementation allouaient la fréquence aux différents systèmes de façon exclusive et monolithique : une bande de fréquence, un service, un système. L'évolution des technologies ajoutée à la pression croissante des opérateurs de télécommunication pour l'obtention de spectre pousse les instances de réglementation à envisager de nouveaux paradigmes pour le partage de la fréquence entre différents systèmes comme par exemple la réutilisation de la fréquence satellite par un système terrestre.

Aux USA en 2003, l'optimisation de l'utilisation du spectre est une des raisons avancées dans l'autorisation donnée par la FCC aux opérateurs satellite ICO, MSV et Globalstar d'utiliser des stations terrestre dans leur bande de fréquence [1.12]. Toutefois, les opérateurs américains terrestres y voient une source potentielle de concurrence déloyale, puisque le spectre satellite est gratuit. En effet, les opérateurs satellite pourraient ne déployer que la partie terrestre de leur système, se servant du satellite comme d'un cheval de Troie. Afin d'éviter ce cas, la FCC imposa des contraintes strictes, notamment l'obligation de ne n'autoriser que des terminaux dual-mode satellite-terrestre, qui sont plus chers et volumineux que des terminaux terrestres uniquement. Or, ce critère a été levé en 2011 pour l'opérateur Lightsquared. Comme le spectre est beaucoup plus rentable s'il est utilisé pour fournir des services terrestres, la tentation sera donc forte pour Lightsquared de privilégier cette utilisation au détriment du service satellite.

En Europe, depuis 2006, la réglementation permet le déploiement de réseaux terrestres dans la bande MSS à 2GHz [1.15]. Les opérateurs Solaris et Inmarsat ont obtenu une licence pour fonctionner dans

cette bande, mais jusqu'à présent seul Solaris a déployé un satellite en orbite (nommé W2A). Toutefois, le satellite n'est que partiellement opérationnel et aucun service commercial n'a encore été déployé. Les services envisagés par Solaris sont plutôt de type diffusion de radio et de TV sur mobile. Cependant, les *business model* pour ces marchés semblent difficiles à établir. Il n'est donc pas exclu qu'un système intégré bidirectionnel voit le jour en Europe dans quelques années et que le principe de réutilisation des fréquences y devienne donc une réalité.

1.3.2. Les types de partage

Comme vu dans la typologie de l'intégration pour le spectre, il existe plusieurs niveaux d'intégration du spectre entre systèmes satellite et terrestre (cf. Table 1-4). Afin de mieux les visualiser, la Figure 1-8 présente graphiquement les différentes possibilités d'intégration de la bande de fréquence.

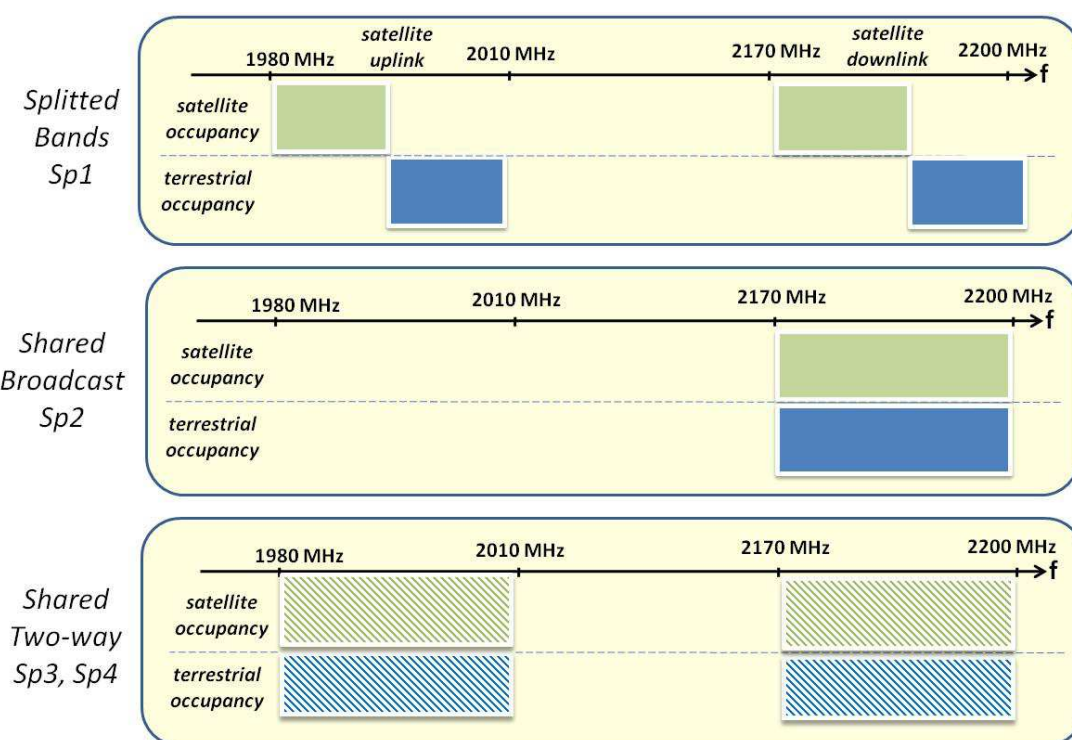


Figure 1-8 : Possibilités de répartition de fréquence entre systèmes satellite et terrestre (bande S).

Nous distinguerons par la suite le partage de fréquences dans les systèmes de diffusion et dans les systèmes bidirectionnels. En effet, la problématique du partage y est très différente. Comme le sujet de cette thèse porte sur les systèmes bidirectionnels, nous les détaillerons dans les chapitres suivants. Le partage dans les systèmes de diffusion est abordé dans le prochain paragraphe mais ne sera plus évoqué par la suite.

1.3.2.1. Partage dans les systèmes de diffusion

Concernant le partage de bande pour des services de diffusion multimédia, nous distinguons les cas où les systèmes terrestres et satellite émettent dans des portions de bandes distinctes, avec séparation du cas où ils émettent dans la même bande de fréquence.

Bande intégrée avec séparation : Exemple de Sirius-XM

Les implantations du partage avec séparation pour la diffusion exploitent toujours le même principe : le même contenu est envoyé à la fois depuis le satellite et depuis les stations terrestres dans des portions de fréquences distinctes ; le terminal mesure et choisit le signal, satellite ou terrestre, qui offre les meilleures conditions de réception.

Le système Sirius-XM résulte de la fusion en 2008 entre les systèmes Sirius, mis en service en 2001 et XM, mis en service en 2002. Ces deux systèmes offrent des services de diffusion de radio numérique de type Digital Audio Broadcasting (DAB) sur les USA et le Canada. Ils sont opérés dans la bande S par la même entité, mais dans deux bandes de fréquence contiguës et avec des récepteurs différents. Ils sont décrits dans [1.20]. Nous décrivons ci-dessous l'usage qui est fait de la fréquence dans ces deux systèmes.

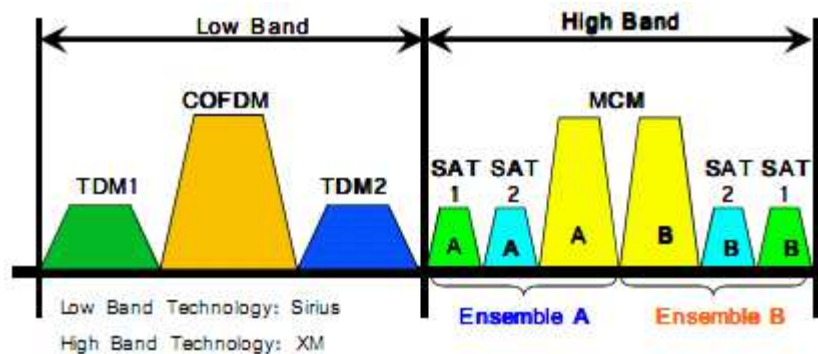


Figure 1-9 : Plan de fréquence de Sirius-XM (source [1.20]).

Sirius

La composante satellite du système Sirius est composée : de 3 satellites en orbite elliptique (HEO) qui permettent d'obtenir une élévation élevée dans les hautes latitudes et de minimiser les probabilités de blocage du signal ; d'un satellite GEO pour améliorer la couverture des récepteurs fixes. La couverture satellite est complétée dans les zones urbaines par des stations terrestres qui reçoivent le signal *feeder* (S_{f_sat}) par satellite en bande X et le retransmettent dans la bande utilisateur (bande S).

La bande de fréquence est séparée en trois sous-bandes comme indiqué sur la Figure 1-9 : les deux aux extrémités sont allouées au satellite, la bande centrale aux stations terrestres (afin de minimiser les émissions hors-bande). Les sous-bandes satellite sont multiplexées en temps (TDM) et modulent les mêmes signaux envoyés avec 4 secondes d'écart, afin d'atténuer le problème d'évanouissement rapide du signal très sensible pour des terminaux véhiculaires (principales cibles de ce marché). Dans la sous-bande terrestre, on utilise l'OFDM.

XM

Le système XM comporte quant à lui deux satellites GEO en orbite, plus sensibles aux problèmes de blocage de signal que les HEO. Il nécessite donc plus de stations terrestres pour compléter la couverture satellite (environ 800 sur les USA et le Canada). La bande est ici découpée en 6 sous-bandes : 3 groupes (1 par satellite et 1 pour les stations terrestres) de 2 TDM, soient 6 TDM qui transmettent toutes le même contenu (cf. Figure 1-9). Chaque groupe est donc composé de deux TDM qui modulent et codent le signal différemment. Ce découpage permet une bonne diversité de signal (2 satellites GEO, répéteurs terrestres, codage et modulation différents) qui améliore la disponibilité du service au détriment de la capacité.

Bande partagée

Le partage de fréquence satellite et terrestre permet de concevoir des réseaux de diffusion isofréquence satellite-terrestre. Dans ce type de réseau, les faisceaux satellite et les cellules terrestres diffusent le même signal de façon synchronisée. Par rapport au cas avec séparation, cela évite de diviser la bande entre les deux systèmes et donc la capacité totale. De plus, vu du terminal, les signaux satellite et terrestre sont indiscernables. Ce dernier n'a donc pas à implanter deux chaînes de réception distinctes pour le satellite et le terrestre.

L'inconvénient de cette technique réside dans le fait qu'au niveau du récepteur, les signaux provenant du satellite et des différentes stations terrestres sont reçus avec un décalage temporel. C'est une forme de multi-trajet qui doit être prise en compte par la chaîne de réception.

On peut citer notamment deux standards existants qui mettent en œuvre cette technique :

- Le DVB-SH [1.29], dans son mode SH-A. Dans ce mode, le satellite et les stations terrestres émettent en OFDM. Ce standard a été largement étudié en Europe et est candidat pour être utilisé pour de la diffusion multimédia en bande S [1.23].
- Le S-DMB. Le satellite et les stations terrestres émettent en CDM. Ce standard est actuellement utilisé dans un système déployé en Corée depuis 2005 en bande S [1.22].

1.3.2.2. Partage dans les systèmes bidirectionnels

La problématique de l'intégration de la bande dans les systèmes bidirectionnels est plus complexe que pour les systèmes de diffusion. La bande disponible peut soit :

- être divisée en deux portions exclusives à chaque système, ce qui simplifie les problèmes d'interférences et de planification coordonnée entre les systèmes ;
- être partagée entre les systèmes de façon à allouer la fréquence au système qui en a le plus besoin à un moment donné sur une zone donnée (agilité fréquentielle) et même à autoriser le système terrestre à réutiliser la fréquence satellite (réutilisation des fréquences).

Il est aussi intéressant d'évoquer la bande dédiée dans les systèmes bidirectionnels, car dans ce cas il est possible d'optimiser l'utilisation des ressources spectrales.

Bande dédiée

Dans le cas où les systèmes opèrent dans des bandes dédiées au sens réglementaire (S_{p0}), l'optimisation de l'utilisation des ressources spectrales entre systèmes se limite au partage de charge entre systèmes.

Ce sujet était à la mode dans les années 90, dans le thème des réseaux hiérarchiques. Le système satellite était alors envisagé comme voie de désengorgement du système mobile terrestre : en cas de surcharge dans le réseau terrestre, les appels sont passés au système satellite par handover. Nous pouvons citer les études [1.26] et [1.27], parmi les plus complètes sur le sujet. La procédure de handover pour un système intégré fondé sur le GSM est étudiée dans [1.28], bien que sa faisabilité y soit considérée comme difficile et jamais réalisée à ce jour. Aujourd'hui, les écarts incommensurables entre les capacités des systèmes satellite et terrestre ont amoindri l'intérêt porté à cette idée de partage de charge dynamique.

Bande intégrée avec séparation

La bande intégrée avec séparation s'apparente beaucoup au principe de la bande dédiée. Ici, la licence d'utilisation de la fréquence étant à l'origine accordée à un seul opérateur, il est donc possible que les réseaux terrestre et satellite soient tous deux détenus par ce dernier. L'intégration au niveau du réseau peut donc être plus poussée que dans le cas de la bande dédiée.

L'opérateur du système intégré a le choix de répartir la bande de fréquence de façon exclusive entre les systèmes en fonction du besoin global en capacité de chacun. Il est possible de reconfigurer la fréquence utilisée par les systèmes sur des échelles de temps relativement longues (quelques heures) si le besoin évolue dans un sens ou dans l'autre. Chaque système est ensuite libre d'exploiter la bande comme il le souhaite, sans prendre en compte des interférences éventuelles entre systèmes. C'est l'avantage de cette solution : la liberté d'exploitation de la fréquence dans chaque système. La planification de fréquence entre systèmes satellite et terrestre ne requiert donc aucune coordination, ce qui simplifie grandement la tâche aux opérateurs des systèmes. En revanche, on peut penser que la fréquence est alors sous-utilisée, ce qui nous amène au cas suivant : la bande intégrée partagée.

Bande intégrée partagée

La bande intégrée partagée est le cas le plus complexe d'intégration du spectre. Par rapport à la bande avec séparation, la bande intégrée partagée offre plusieurs avantages : la flexibilité dans la répartition de la fréquence entre satellite et terrestre en fonction des besoins en trafic et l'optimisation de l'utilisation de la fréquence grâce au principe de réutilisation des fréquences.

L'agilité fréquentielle

Dans un système intégré, les besoins en fréquence (fonction des besoins en capacité) dépendent de la zone de couverture considérée (qui contient plus ou moins d'utilisateurs en mode satellite ou terrestre). Or, la répartition des utilisateurs terrestres est très hétérogène sous la couverture satellite : ils sont disséminés en grappes, correspondant aux zones urbaines non couvertes par le satellite. Sur une zone urbaine très étendue d'une taille comparable à celle d'un faisceau (e.g. l'Île de France), il est possible que toute la zone soit couverte par le réseau terrestre : le besoin en fréquence pour le satellite y est donc nul. À l'inverse, sur une zone déserte (e.g. sur la mer), le besoin en fréquence pour le réseau terrestre est nul. De plus, les besoins en trafic fluctuent dans le temps de façon plus ou moins rapide (cf. Table 1-9). Les besoins en fréquences des systèmes satellite ou terrestre peuvent donc aussi varier dans le temps en fonction de la zone. La gestion de cette disparité géographique et temporelle dans les besoins en fréquence introduit un besoin de flexibilité dans la manière dont on alloue la ressource.

Table 1-9 : Cas d'exemples de besoin en reconfiguration du système

	Vitesse de reconfiguration	Zone à reconfigurer	Prévisible
Week-end à la montagne	< 1 jour	Toute la couverture	+
Migration quotidienne ville/campagne	< 2h	Toute la couverture	++
Urbanisation d'une zone	< 1an	1 cellule satellite	++
Catastrophe naturelle	< 1h	Plusieurs cellules	-
Événement sportif	< 2h	1 cellule satellite	++
Satellite en panne	-	Toute la couverture	--

En utilisant systèmes satellite et terrestre dans une bande intégrée partagée, il est possible d'adapter la proportion de bande allouée à chaque système à un endroit donné et à un instant donné en fonction des besoins locaux de chaque système. Nous appelons cette capacité l'*agilité fréquentielle* qui correspond à la capacité du système à reconfigurer dynamiquement et de manière coordonnée ses plans de fréquence terrestre et satellite, i.e. d'allouer/réallouer dynamiquement le spectre des cellules terrestres et satellites.

La figure ci-dessous présente un exemple simple avec un motif satellite à 3 couleurs. Le système terrestre utilise la fréquence f_4 . Le (1) représente un transfert fréquence de f_1 vers f_2 , ce qui augmente la bande passante pour la cellule satellite f_2 . Le (2) représente un transfert fréquence de f_3 vers f_4 , ce qui augmente la bande passante pour toutes les cellules terrestres utilisant f_4 .

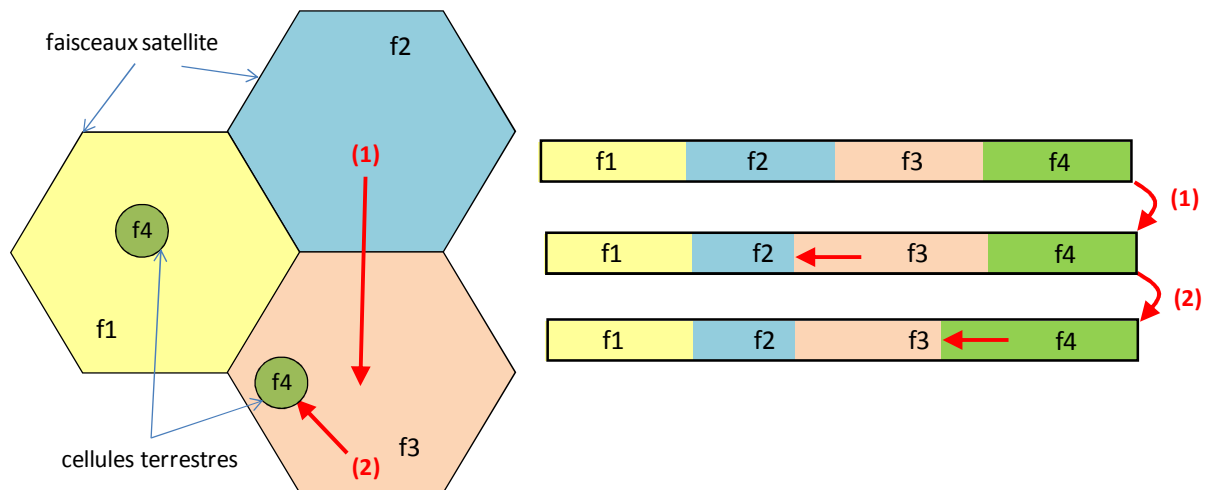


Figure 1-10 : Exemple de réallocation de fréquence

La mise en œuvre de ce principe nécessite de coordonner les planifications de fréquences des systèmes. En fonction de la vitesse de reconfiguration souhaitée, cette coordination sera plus ou moins complexe à mettre en œuvre : d'une opération manuelle pour une reconfiguration annuelle à des mécanismes de configuration dynamique pour une adaptation aux variations de trafic journalières.

La réutilisation des fréquences

Lorsque la bande est intégrée, la fréquence utilisée par le satellite peut être réutilisée au niveau du système terrestre. La détermination des ressources spectrales qui lui sont autorisées peut se faire de façon statique, par la coordination des plans de fréquence satellite et terrestre (Sp3) ou de façon dynamique avec plus ou moins de coopération entre les deux systèmes (Sp4). Nous appelons ce principe la *réutilisation des fréquences* dans les systèmes intégrés. L'étude de ce principe constitue l'objet principal de cette thèse et sera détaillé dans la suite du document.

1.4. La réutilisation des fréquences des origines à nos jours

La réutilisation des fréquences entre un système satellite et un système terrestre est un principe assez récent puisque son énoncé remonte au milieu des années 1990. L'état de l'art sur le sujet n'est pas très fourni et il est essentiellement composé d'études réglementaires, de brevets et de quelques publications dans des conférences ou des journaux que nous allons présenter dans cette partie.

La réutilisation des fréquences met en jeu des aspects techniques évidemment, mais aussi des aspects économiques et réglementaires qui sont difficilement dissociables. En effet, le déploiement d'un système intégré avec réutilisation des fréquences nécessite :

- Une technologie suffisamment mature pour permettre techniquement de réaliser l'intégration entre composantes, avec un coût supportable pour les investisseurs.
- Des accords économiques entre opérateurs mobile satellite et terrestre qui permettent de répartir les rôles et les services et de redistribuer les bénéfices.
- Une réglementation dans la région considérée qui autorise l'utilisation dans la même bande de fréquence d'un système satellite et terrestre. C'est aujourd'hui le cas aux USA, en Europe, en Corée et au Japon.

Dans cette thèse, nous nous sommes bien sûr concentrés sur les aspects techniques. Cependant, nombre de ces choix techniques résultent de réglementations et d'orientations données par le marché des services. Aussi, est-il intéressant de mettre en regard l'état de l'art sur la technique de réutilisation des fréquences avec l'historique de la réglementation et des évolutions des marchés associées, et ce dans les différents pays qui se sont intéressés au sujet. C'est la manière dont nous abordons ce chapitre. La plupart des publications citées dans ce chapitre seront à nouveau référencées aux endroits pertinents dans le reste du document.

1.4.1. L'origine du principe, de 1993 à 2005

Les Etats-Unis sont les pionniers du principe de réutilisation des fréquences satellite par un système mobile terrestre. Ils sont les premiers à l'avoir théorisé et à envisager son application. De 1993 à 2005, la quasi-totalité de la production scientifique sur le sujet provient du continent nord-américain.

Il est difficile de dater précisément l'émergence du principe ou d'en déterminer la paternité car le concept de « réutilisation des fréquences » va bien au-delà des systèmes mobiles intégrés. Par exemple, il peut être appliqué au partage de fréquence entre aéronefs et mobiles terrestres. Le document trouvé le plus ancien évoquant l'emploi de cette technique délimité à un système composé d'un système mobile satellite et d'un système mobile terrestre est un brevet américain déposé en 1993 par T. Freeburg et intitulé « *Networked satellite and terrestrial cellular radiotelephone systems* » [2.1]. Il est important de citer ce document car il énonce déjà de façon simple et précise :

- Le principe de la réutilisation des fréquences : « *This invention increases efficiency through terrestrial frequency reuse of satellite-to-ground frequencies* ».
- Le bénéfice recherché : « *enhancing the economic feasibility of globally-integrated, cellular radio telephone service using satellites* ».
- Le problème des interférences associé : « *The problem associated with this terrestrial reuse of the satellite spectrum is to keep the satellite and terrestrial uses of the same frequencies from interfering with another* ».

- L'énoncé général de la solution pour résoudre les deux principaux cas d'interférences :
« *maintaining subscriber-received transmissions about one order of magnitude above co-channel satellite transmissions to overcome interference and maintaining subscriber transmissions to terrestrial networks at power levels about one order of magnitude of the below co-channel transmissions to satellite networks to avoid causing interference at the satellite* ».

Par la suite, de nombreux brevets vont être déposés sur le principe de réutilisation des fréquences et les solutions pour gérer les interférences inter-composantes. On peut citer un brevet de W. Mayfield déposé en 1998 [2.2] dans lequel est décrit pour la première fois le mode de duplex inversé (cf. 2.1.2) inspiré d'une méthode de réutilisation de fréquence entre système de communication aéronef et système mobile terrestre. Le brevet de P. Karabinis, pour l'opérateur satellite MSV [2.3] déposé en 2001 introduit le principe de zone d'exclusion selon lequel le plan de fréquence terrestre est asservi sur le plan de fréquence satellite (cf. §2.3.3.1). Cet opérateur est d'ailleurs à l'origine d'un grand nombre de brevets (plus de mille) sur la réutilisation, l'allocation, la planification et le contrôle des fréquences dans les systèmes intégrés ainsi que sur des méthodes de réduction et d'annulation d'interférences inter-composantes (la liste des principaux brevets se trouve dans le document [2.4]). Sans les énumérer tous, citons le brevet [2.5] qui est un des plus complets car il réunit de nombreuses méthodes déposées précédemment sur le sujet. MSV continue encore aujourd'hui à enrichir son portefeuille de brevet dans le but d'être incontournable si le principe de réutilisation fréquentielle est appliqué un jour.

En dehors des brevets, il existe peu de documentation sur le principe de réutilisation des fréquences dans les articles de revues et de conférences avant 2008. Pourtant, il est souvent cité dans les articles de presse pour mettre en avant l'optimisation de l'utilisation du spectre par les opérateurs de systèmes intégrés. La raison est certainement qu'au début des années 2000, peu de personnes en dehors des opérateurs mobiles américains s'intéressent au sujet. Citons le document [2.6], souvent référencé, qui présente sans les analyser les principes de réutilisation fréquentielle et de zone d'exclusion (cf. §2.3.3) envisagés pour le système de MSV. Puis en 2005, MSV publie encore deux études : une étude expérimentale sur la puissance d'émission des terminaux terrestres [2.7] pour montrer qu'elle est en moyenne inférieure aux hypothèses prises par les régulateurs et que le principe de réutilisation en est d'autant plus applicable ; une étude sur une méthode de formation de faisceaux pour supprimer les interférences inter-composantes [2.8]. A part des articles de presse, rien ne sera plus publié sur le sujet jusqu'en 2008.

Cette implication précoce des Etats-Unis dans la recherche sur la réutilisation fréquentielle et plus généralement sur les systèmes intégrés n'est pas le fruit du hasard. En effet, le territoire américain est très vaste avec des zones très densément peuplées et de grandes zones presque désertes de population. Il est donc propice au déploiement de tels systèmes, et l'intérêt commercial y paraît plus évident qu'ailleurs.

1.4.2. La bataille de la FCC et la remise en question

Au vu de la quantité de brevets sur le sujet, la technique semble donc prometteuse. Pourtant, bien que son bénéfice semble établi, la réutilisation des fréquences n'a jamais été appliquée à ce jour. Quelles sont les raisons à cela ?

Pour trouver des pistes de réponses à cette question, il est intéressant d'évoquer le débat qui prit place entre opérateurs de systèmes de télécommunications au sein de la FCC en particulier sur la période de 2001 à 2003.

En 2001, les opérateurs américains de satellite mobiles MSV, ICO et Globalstar proposèrent à la FCC d'introduire des stations terrestres dans leur système satellite [1.11]. Ces stations sont nommées ATC (comme Ancillary Terrestrial Component). Une des raisons avancées est la possibilité de réutiliser la fréquence satellite au sol et ainsi d'améliorer l'utilisation du spectre. S'engage alors une bataille entre ces opérateurs satellite et des opérateurs mobiles terrestres. Elle porte notamment sur la question du bénéfice réel de la réutilisation fréquentielle et sur la possibilité de déployer un système intégré avec deux opérateurs satellite et terrestre distincts.

En effet, la réutilisation des fréquences a pour but d'améliorer l'utilisation du spectre, par rapport à un partage simple avec bandes exclusives entre systèmes satellite et terrestre. Or il est difficile d'évaluer ce gain alors qu'il est nécessaire d'accroître la complexité du système pour gérer les interférences inter-composantes. De plus, et tous les acteurs sont unanimes sur ce point, un système mobile terrestre totalement indépendant ne peut réutiliser la fréquence satellite sans engendrer des interférences intolérables pour le système satellite. La gestion de ces interférences nécessite donc une collaboration entre l'opérateur du système satellite et l'opérateur du système terrestre lorsqu'ils ne sont pas la même entité (ce qui est le cas le plus probable). Toutefois, il semble très délicat pour deux opérateurs satellite et terrestre de définir les moyens techniques et les accords commerciaux qui permettraient ce partage de spectre. Dans la bataille de la FCC, les opérateurs satellite prônent la réutilisation des fréquences, en précisant que seul un opérateur unique (sous-entendu MSS) peut mettre en œuvre le principe. A l'opposé, les opérateurs terrestres arguent que l'utilisation dans des bandes séparées des systèmes satellite et terrestre est la seule option viable et que dans ce cas, le système terrestre peut-être opéré par un opérateur tiers (sous-entendu terrestre).

Quelques études parmi les plus complètes sur le sujet ont émergé de ces discussions. Les deux principales sont [2.10] et [2.11]. Ces documents doivent toutefois être étudiés avec un regard critique, car ils ont souvent été écrits dans un but précis par l'une ou l'autre des parties.

La FCC conclut en 2003 [1.12] sans vraiment trancher la question. Elle autorise la mise en œuvre de la réutilisation des fréquences soit par un opérateur unique soit par plusieurs opérateurs distincts. Cependant, consciente des difficultés techniques que pose cette mise en œuvre, elle autorise aussi l'utilisation des systèmes satellite et terrestre dans des sous-bandes disjointes : l'opérateur satellite peut « sous-louer » une partie de sa bande à un opérateur terrestre qui en aurait l'usage exclusif en un endroit donné.

Le déploiement de systèmes MSS intégrés va toutefois prendre un certain temps. Ces systèmes coûtent très chers et les phases de conception et de déploiement de systèmes satellite mobiles sont relativement longues. Des difficultés financières viennent de plus freiner l'élan initial des opérateurs. En 2011, Lightsquared (héritier de MSV) est l'opérateur de système MSS intégré le plus avancé dans le déploiement de son système. Ce dernier a choisi de signer des accords de vente en gros de spectre et de *roaming* avec des opérateurs terrestres plutôt que de déployer lui-même le service terrestre. La mise

en œuvre de réutilisation fréquentielle est donc envisageable pour leur système, mais dans un cadre multi-opérateurs uniquement, ce qui la rend plus compliquée car les cœurs de réseaux sont séparés. Par ailleurs, la FCC a autorisé Lighsquard en 2011 à utiliser des terminaux terrestres uniquement dans sa bande. C'est une donnée à prendre en compte dans l'étude de la réutilisation des fréquences.

Depuis quelques années, d'autres pays commencent à s'intéresser de près au sujet. L'espoir de voir un jour ce principe mis en application viendra donc peut-être d'ailleurs que des USA.

1.4.3. La possible résurgence

Dans la deuxième moitié des années 2000, le sujet de la réutilisation fréquentielle a quitté le continent américain pour arriver en Corée, au Japon et en Europe.

Au Japon, le NICT lance un grand projet de recherche et développement en 2008 pour mettre au point un système de communication mobile résistant aux catastrophes [1.18]. Ce système, combinant les technologies satellite et terrestre, est prévu pour fonctionner avec des mobiles dual-mode satellite-terrestre de format classique. Deux axes majeurs de recherche sont en cours, dont l'un concerne l'étude des interférences inter-composantes dans les systèmes CDMA ([1.18], [2.13]) et OFDMA [2.14].

En Corée, l'ETRI travaille auprès de l'ITU-R à l'introduction d'un standard d'interface radio satellite compatible IMT-Advanced. Dans ce cadre, elle étudie les interférences inter-composantes ([2.15], [2.16]) et la réutilisation des fréquences en OFDMA avec des schémas de partitionnement de fréquence relativement sophistiqués ([2.17], [2.18], [2.19]).

En Europe, aucun système intégré bidirectionnel n'est encore déployé malgré la possibilité de déployer des stations terrestres en bande S satellite depuis 2006 [1.14]. Ces stations sont appelées CGC (Complementary Ground Component) et correspondent aux ATC américains. Les efforts des agences spatiales et des opérateurs s'étant plutôt concentrés sur les systèmes intégrés de diffusion vers les mobiles, la réutilisation des fréquences n'a pas été beaucoup étudiée. Nous pouvons tout de même citer l'Université de Surrey qui dans le cadre d'études sur l'adaptation de l'OFDMA sur satellite propose une méthode de formation de faisceau pour annuler les interférences inter-composantes [2.20]. Le fabricant de satellite Astrium a étudié le sujet de la réutilisation des fréquences dans le cadre d'une étude pour le CNES et bien entendu au cours de cette thèse, proposant des résultats sur la caractérisation des interférences [2.21] et des méthodes d'allocation de fréquences [2.22].

La nouveauté des solutions proposées relance l'intérêt suscité initialement par la réutilisation des fréquences. Cette nouveauté provient principalement :

- Des technologies liées à l'OFDMA. En effet, l'OFDMA offre une grande flexibilité dans l'allocation de fréquence. Ainsi, les interférences inter-composantes peuvent être gérées par des techniques de coordination fines et dynamiques. Ce sont les pistes de solutions que nous avons explorées dans cette thèse.
- Des technologies d'antennes satellite et de formation de faisceaux. D'une part, les faisceaux au sol sont de plus en plus petits, ce qui permet de réduire le nombre de terminaux terrestres co-fréquence avec le satellite dans un faisceau. Il est de plus possible d'ajuster la forme des faisceaux pour créer des « trous » au niveau des grandes zones urbaines contenant le plus d'utilisateurs terrestres et ainsi minimiser les interférences provenant de cette zone.

La phase originelle des années 2000 est désormais terminée et nous nous trouvons en 2012 à l'âge de bronze de la réutilisation des fréquences satellite-terrestre. Parti des USA, son étude s'est désormais propagée à l'ensemble de la communauté internationale ce qui est un facteur des plus encourageants. Bien que sa mise en œuvre semble délicate à cause de l'entrecroisement des problèmes techniques, réglementaires et économiques, nul doute que des solutions technologiques efficaces et rentables à mettre en œuvre vont émerger d'ici quelques années.

1.5. Problématique de la réutilisation des fréquences

Après avoir fait état du contexte autour des systèmes intégrés satellite-terrestre et de l'avancée des connaissances sur le sujet de la réutilisation des fréquences, nous pouvons formuler le problème central :

« La réutilisation des fréquences d'un système mobile satellite par un système mobile terrestre est un moyen possible d'augmenter la capacité de l'ensemble. Le problème majeur associé à cette réutilisation du spectre réside dans la gestion des interférences co-fréquence entre équipements du système satellite et équipements du système terrestre. »

Donc, la problématique posée par la réutilisation des fréquences peut se résumer ainsi :

Comment réutiliser la fréquence d'un système mobile satellite dans un système mobile terrestre :

- **Afin de maximiser la capacité de l'ensemble (système satellite + système terrestre) ;**
- **En maintenant les interférences entre systèmes satellite et terrestre à des niveaux acceptables ;**
- **Si possible, en utilisant des méthodes :**
 - *peu coûteuses* à implanter sur les terminaux et sur les équipements d'accès et de cœur du réseau ;
 - qui requièrent le *minimum de coopération et d'interfaces* entre le système satellite et le système terrestre ;
 - qui peuvent être implantées en réutilisant les *standards existants*.

L'objectif majeur de cette thèse est d'apporter des solutions à cette problématique. Toute la suite de ce document présente les travaux que nous avons menés avec ce dessein à l'esprit.

2. Analyse et Gestion des Interférences Inter-Composantes (ICoI)

Dans le chapitre précédent, nous avons dressé l'état de l'art sur les systèmes intégrés et sur le principe de réutilisation des fréquences. Cela nous a permis de cerner et d'énoncer la problématique de la mise en œuvre de la réutilisation des fréquences dans les systèmes intégrés. Comme guerre et paix, réutilisation des fréquences et interférences entre composantes satellite et terrestre sont des sujets indissociables. Nous appelons « interférences inter-composantes » les interférences co-fréquence entre les systèmes, ou composantes, satellite et terrestre. Dans la littérature, il n'existe pas d'analyse exhaustive de ce type d'interférences. Ce chapitre a donc pour but de définir de façon exhaustive tous les cas d'interférences possibles (§2.1) puis de les analyser en profondeur (§2.2). Enfin, dans la partie 2.3, nous présentons les différentes techniques possibles pour annuler, réduire ou coordonner ces interférences.

2.1. Définition des cas d'interférences

Les cas d'interférences inter-composantes dépendent des modes de duplex entre satellite et terrestre. Chaque système peut fonctionner en FDD ou en TDD. La Table 2-1 présente toutes les combinaisons où le satellite opère en TDD. La Table 2-2 présente toutes les combinaisons où le satellite opère en FDD. Dans ce document, nous étudions principalement les cas où les deux systèmes opèrent en FDD (FDD direct et inversé, Table 2-2) qui sont les plus étudiés dans la littérature. En tout, il existe 8 cas d'interférences possibles.

Table 2-1 : Modes duplex terrestre en mode duplex satellite TDD

		Satellite TDD	
		↑s ↓s	
Terrestre	FDD uplink	↑t	
	FDD downlink	↓t	
	TDD	↑t ↓t	

↑s uplink satellite
 ↓s downlink satellite
 ↑t uplink terrestre
 ↓t downlink terrestre

Le cas dans lequel le satellite opère en TDD est simplement présenté ici afin d'être exhaustif et nous ne le détaillerons pas par la suite. En effet, aucun système satellite en mode TDD déployé en combinaison avec une composante terrestre n'a été envisagé à ce jour (seul le système de satellites LEO Iridium fonctionne en TDD). On retrouve de toute façon les mêmes cas d'interférences inter-composantes que dans les autres modes.

Table 2-2 : Modes duplex terrestre en mode duplex satellite FDD

		Satellite FDD	
		↑s	↓s
Terrestre	FDD direct	↑t	↓t
	FDD inversé	↓t	↑t
	TDD uplink	↑t ↓t	
	TDD downlink		↑t ↓t

↑s uplink satellite
 ↓s downlink satellite
 ↑t uplink terrestre
 ↓t downlink terrestre

Lorsque le satellite opère en FDD, quatre modes de duplex terrestre sont possibles. Les deux modes en TDD terrestre sont présentés au chapitre 2.1.3. Les cas d'interférences y sont identiques aux cas FDD ; nous détaillerons donc surtout ces derniers.

En FDD terrestre, deux modes de duplex existent :

- **Mode direct** : l'uplink terrestre et l'uplink satellite sont co-fréquence ; le downlink terrestre et le downlink satellite sont co-fréquence.
- **Mode inversé** : l'uplink terrestre et le downlink satellite sont co-fréquence ; le downlink terrestre et l'uplink satellite sont co-fréquence.

Dans chacun des modes, direct et inversé, il existe 4 cas d'interférences inter-composantes définis dans les sous-chapitres suivants.

Le mode direct est le seul mode autorisé en Europe [1.14] et aux USA [1.12]. Une des raisons à cela est qu'en mode inversé (et par extension dans les autres modes TDD), certains cas d'interférences hors-bande inter-systèmes peuvent poser problème. Par exemple, une station CGC en mode inversé (émission dans la bande 1980–2010 MHz) et une BTS UMTS émettant dans une bande adjacente (réception dans la bande 1920–1980 MHz en France) pourraient être déployées très rapprochées et engendrer ainsi des interférences mutuelles. Il faudrait donc suffisamment éloigner ces stations ou limiter leur puissance d'émission hors bande par des filtres assez performants. Pour éviter ces cas d'interférences et l'introduction de contraintes supplémentaires sur les CGC et/ou les systèmes des bandes adjacentes, il a donc été décidé de n'autoriser que le mode direct. Le mode inversé peut pourtant présenter certains avantages. Il est donc envisagé dans certains systèmes, comme le système STICS [2.14].

Dans cette thèse, c'est donc le mode direct qui a été privilégié. Toutefois, le mode inversé est analysé dans le chapitre 2.1.2.

2.1.1. Mode FDD direct

En FDD direct, les fréquences uplink satellite et terrestre sont identiques ; il en est de même pour les fréquences downlink. Les communications du terminal utilisateur en mode satellite (UE_{SAT}) vers le satellite (SC) sont donc co-fréquence avec les communications du terminal utilisateur en mode terrestre (UE_{CGC}) vers la station terrestre (BS). En parallèle, les communications du SC vers l' UE_{SAT} sont co-fréquence avec les communications de la BS vers l' UE_{CGC} . Les cas d'interférences inter-composantes en mode direct sont représentés sur la Figure 2-1 et résumés dans la Table 2-3:

- Cas 1. Interférence de l' UE_{CGC} sur le SC
- Cas 2. Interférence du SC sur l' UE_{CGC}
- Cas 3. Interférence de l' UE_{SAT} sur la BS
- Cas 4. Interférence de la BS sur l' UE_{SAT}

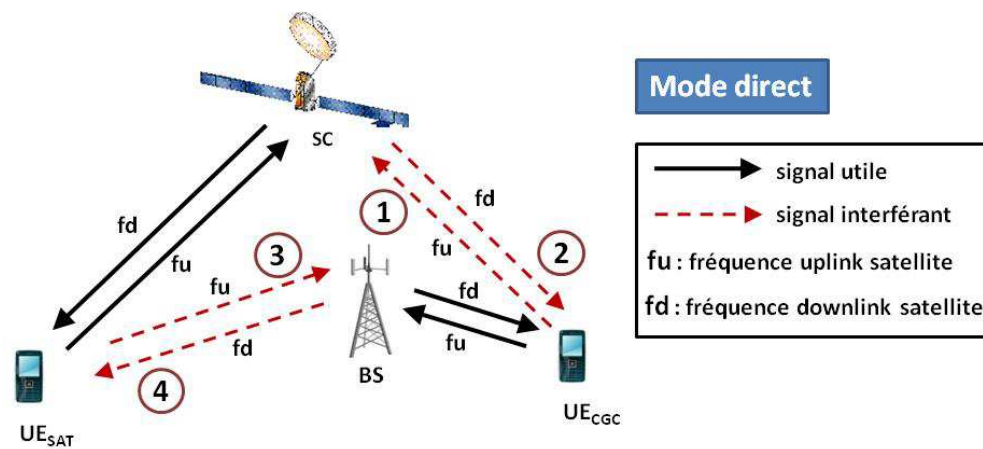


Figure 2-1 : Représentation des cas d'ICoI en mode FDD direct

Le cas le plus préoccupant est le cas 1 ($UE_{CGC} \rightarrow SC$). En effet, dans ce cas le nombre de sources d'interférences (les UE_{CGC}) peut être très élevé, de l'ordre de plusieurs milliers. Le cas 4 peut aussi poser problème en fonction de l'implantation de la BS. L'effet des autres cas d'interférence (2 et 3) se limite géographiquement autour de la BS. On peut donc les gérer localement par des méthodes relativement simples (cf. §2.2).

Table 2-3 : Résumé des cas d'interférences inter-composantes en mode FDD direct

Cas N°	Symbole	Liaison génératrice d'interférence	Source (s) de l'interférence	Liaison victime des interférences	Récepteur(s) de l'interférence
1	$I_{up,CGC}$	uplink $UE_{CGC} \rightarrow BS$	Tous les UE_{CGC} co-fréquence des UE_{SAT} (même hors faisceau)	uplink $UE_{SAT} \rightarrow SC$	Le satellite
2	$I_{down,SAT}$	downlink $SC \rightarrow UE_{SAT}$	Le satellite	downlink $BS \rightarrow UE_{CGC}$	Tous les UE_{CGC} co-fréquence des UE_{SAT} (mêmes hors du faisceau)
3	$I_{up,SAT}$	uplink $UE_{SAT} \rightarrow SC$	Un UE_{SAT}	uplink $UE_{CGC} \rightarrow BS$	Les BS co-fréquence et « proches » de l' UE_{SAT}
4	$I_{down,CGC}$	downlink $BS \rightarrow UE_{CGC}$	Les BS co-fréquence et « proches » de l' UE_{SAT}	downlink $SC \rightarrow UE_{SAT}$	Un UE_{SAT}

2.1.2. Mode FDD inversé

En FDD inversé, la fréquence uplink satellite correspond au downlink terrestre, et vice-versa. Les liens uplink satellite et downlink terrestre sont co-fréquence, ainsi que les liens downlink satellite avec les liens uplink terrestre. Les cas d'interférences inter-composantes en mode inversé sont représentés sur la Figure 2-2 :

- Cas 5. Interférence de la BS sur le SC
- Cas 6. Interférence du SC sur la BS
- Cas 7. Interférence de l'UE_{SAT} sur l'UE_{CGC}
- Cas 8. Interférence de l'UE_{CGC} sur l'UE_{SAT}

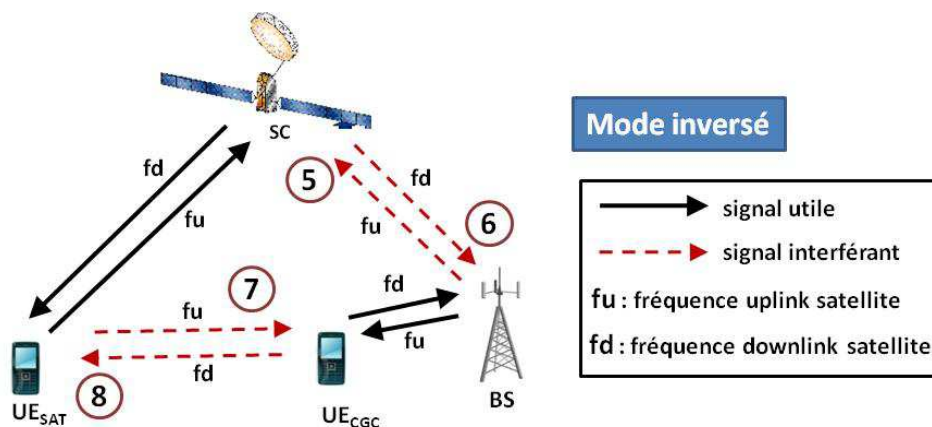


Figure 2-2 : Représentation des cas d'ICoI en mode FDD inversé

Ces cas d'interférences sont similaires aux précédents en mode direct. Simplement, la BS et l'UE_{CGC} sont inversés. Pour la même raison que pour le cas 1, le cas 5 (BS→SC) est le plus dommageable car le nombre de BS co-fréquence avec un UE_{SAT} peut être de l'ordre de plusieurs milliers. De plus, à moins que les antennes des BS ne soient conçues pour limiter leur émission vers l'espace, le cas 5 est alors bien plus dommageable que le cas 1 : une récente étude expérimentale du NICTS a relevé une puissance rayonnée vers le satellite mille fois plus élevée dans le cas 5 que dans le cas 1 [1.18]. Ce mode est donc presque exclu sans conception spécifique des antennes pour les BS.

Les cas 6, 7 et 8 sont analogues aux cas 2, 3 et 4. Ils sont limités géographiquement autour de la BS et peuvent être gérés par des méthodes similaires aux cas en mode direct.

Table 2-4 : Interférences inter-composantes en mode FDD inversé

Cas N°	Symbole	Liaison génératrice d'interférence	Source (s) de l'interférence	Liaison victime des interférences	Récepteur(s) de l'interférence
5	$I_{up,CGC}$	downlink $BS \rightarrow UE_{CGC}$	Toutes les BS co-fréquence des UE_{SAT} (même hors du faisceau)	uplink $UE_{SAT} \rightarrow SC$	Le satellite
6	$I_{down,SAT}$	downlink $SC \rightarrow UE_{SAT}$	Le satellite	uplink $UE_{CGC} \rightarrow BS$	Toutes les BS co-fréquence des UE_{SAT} (même hors du faisceau)
7	$I_{up,SAT}$	uplink $UE_{SAT} \rightarrow SC$	Un UE_{SAT}	downlink $BS \rightarrow UE_{CGC}$	Des UE_{CGC} co-fréquence et « proche » de l' UE_{SAT}
8	$I_{down,CGC}$	uplink $UE_{CGC} \rightarrow BS$	Des UE_{CGC} co-fréquence et « proche » de l' UE_{SAT}	downlink $SC \rightarrow UE_{SAT}$	Un UE_{SAT}

2.1.3. Modes TDD

Les cas d'interférences dans les modes TDD uplink (Figure 2-3) et TDD downlink (Figure 2-4) sont les mêmes que dans les modes FDD. Ces modes peuvent paraître moins intéressants que les modes FDD car seule la moitié de la fréquence satellite est réutilisée. Toutefois, ils peuvent être préférés à ces derniers car les combinaisons des cas d'interférences qu'ils présentent sont différentes.

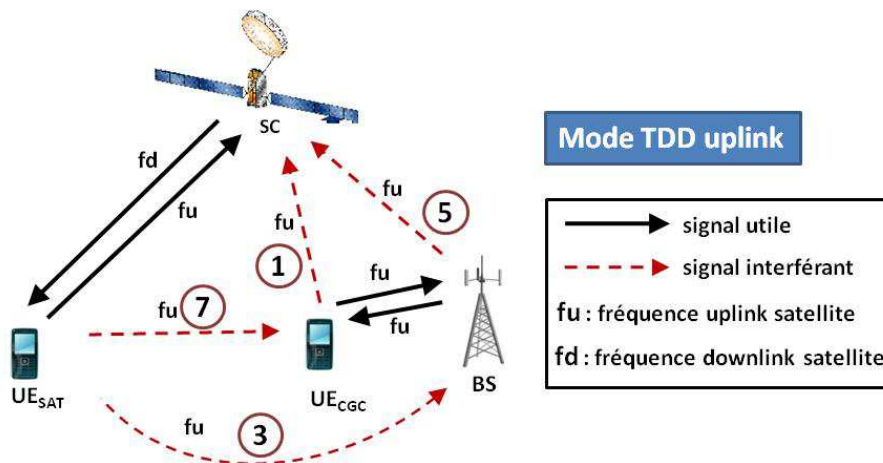


Figure 2-3 : Représentation des cas d'ICoI en mode TDD uplink

En TDD uplink, le CGC opère en TDD dans la fréquence uplink du satellite. Ce mode (Figure 2-3) cumule les deux cas d'interférence de la composante terrestre vers le satellite (cas 1 et 5) qui sont dommageables pour le système satellite. A moins d'utiliser des stratégies d'allocation dynamique permettant d'allouer des ressources non utilisées par le satellite, ce mode est donc très perturbant pour le lien uplink satellite.

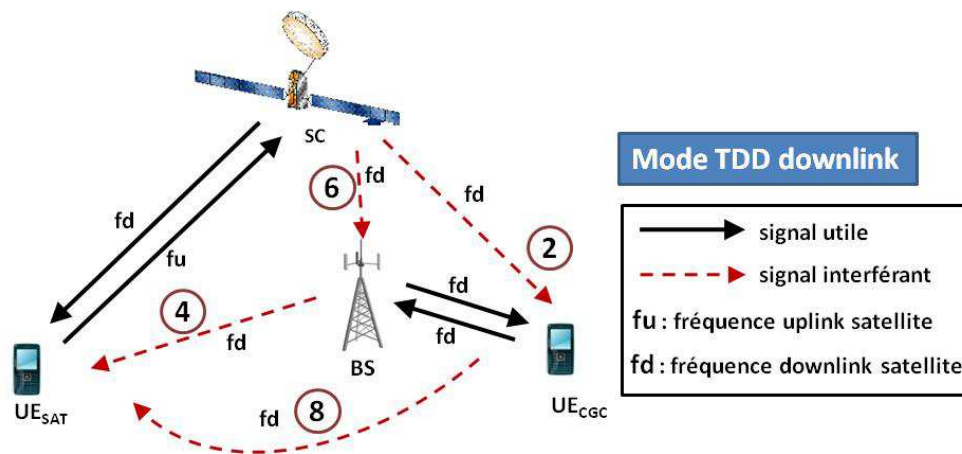


Figure 2-4 : Représentation des cas d'ICoI en mode TDD downlink

A l'inverse, en TDD downlink, le CGC opère en TDD dans la fréquence downlink du satellite. Ce mode (Figure 2-4) exclut ces deux cas les plus gênants. Les 4 cas restants sont plus faciles à gérer. Bien que seule la moitié de la fréquence satellite soit réutilisée par le système terrestre, les contraintes supplémentaires et l'accroissement de complexité sur le système restent minimales. De plus, les méthodes de gestion ou d'atténuation d'interférences pour les cas 2 et 6 et pour les cas 4 et 8 reposent sur les mêmes principes. Ce mode semble donc être un bon compromis entre le bénéfice de réutiliser la fréquence satellite et le coût d'implantation des techniques de gestion des interférences qui dans ce cas sont plus simples.

2.2. Analyse des interférences

Dans cette section, nous analysons plus en détail les cas d'interférences présentés précédemment. Lorsque cela est possible, nous indiquons des méthodes simples pour les prendre en compte dans le dimensionnement du système. Des techniques plus évoluées sont présentées dans le chapitre 2.3.

L'objectif de cette section n'est pas d'effectuer une analyse système pour obtenir des valeurs d'interférences pour un système donné. Nous essayons ici de dégager des principes généraux sur la caractérisation des interférences qui sont valides quelque soit le système considéré (interface radio, orbite, type de terminaux). Toutefois, pour pouvoir illustrer les analyses, nous évaluons parfois les données pour le système de référence choisi (cf. §1.2).

Nous distinguons les interférences de la façon « composante A sur composante B uplink/downlink ». Les cas que nous avons le plus étudiés dans cette thèse sont ceux où la composante satellite est victime des interférences du CGC (§2.2.1 et §2.2.2). En effet, comme nous le montrons dans ce chapitre, les cas où le CGC est victime sont moins dommageables pour ce dernier (§2.2.3 et §2.2.4). Nous évoquerons enfin le cas particulier des pico-BS (§2.2.5) avant de conclure sur cette analyse (§2.2.6).

Afin de bien comprendre le phénomène des interférences dans les systèmes intégrés, il faut avoir conscience des ordres de grandeur des systèmes en jeu. Un faisceau satellite « mesure » au minimum 200 km de diamètre au sol. Dans cette zone, un canal fréquentiel donné ne peut être utilisé que par un seul UE_{SAT} à un moment précis. A 2 GHz, les cellules des BS du CGC contenues dans ce faisceau « mesurent » de 2 km en zone urbaine à une vingtaine de km en zone rurale.

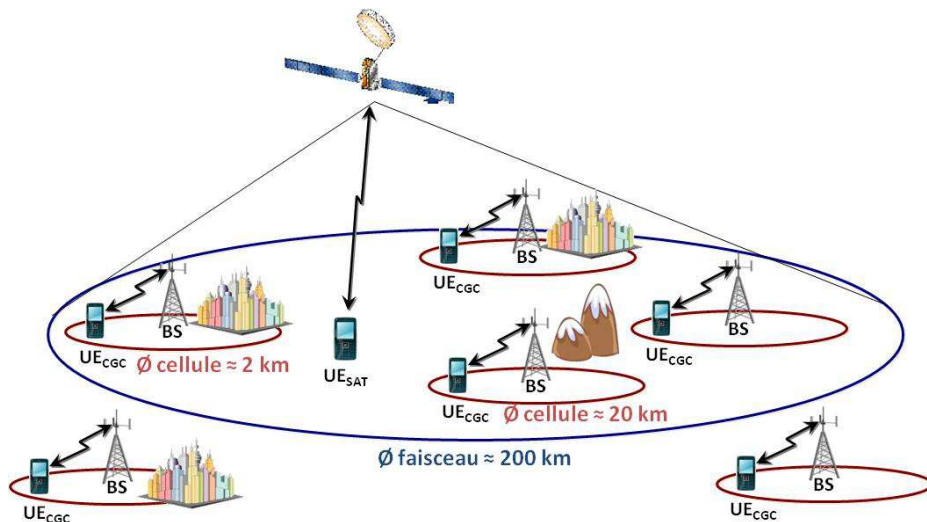


Figure 2-5 : Représentation d'un système intégré à l'échelle d'un faisceau satellite.

Chaque faisceau peut contenir un nombre élevé de cellules terrestres : pour donner un ordre d'idée, un faisceau de 200 km de diamètre peut contenir au maximum 10 000 cellules terrestres de 2 km de diamètre ; un seul UE_{SAT} est donc potentiellement co-fréquence d'un grand nombre d'UE_{CGC} à l'intérieur du faisceau. Il faut de plus noter que les équipements terrestres co-fréquence à l'extérieur du faisceau doivent aussi être pris en compte dans les analyses d'interférences co-fréquence.

2.2.1. Interférence du CGC sur le satellite - uplink

Ces interférences proviennent des terminaux terrestres (cas 1, modes direct et TDD uplink) et/ou des BS (cas 5, mode inversé et TDD uplink). Ce cas d'interférence est considéré comme le plus préoccupant dans la plupart des études sur les interférences inter-composantes ([2.10][2.11][2.13][2.15][2.16][2.17][2.21]). La raison principale est que le nombre de sources d'interférence sur ce lien et qui sont « captées » par le satellite sous toute la couverture peut être très élevé (Figure 2-6). C'est aussi ce cas que nous avons le plus étudié dans cette thèse.

Dans cette partie, nous allons présenter des résultats fondamentaux obtenus à partir d'une étude statistique et qui nous seront utiles par la suite. Nous considérons ici qu'aucune technique de coordination ou de réduction d'interférence n'est mise en œuvre. En pratique, cela signifie que composantes satellite et terrestre fonctionnent indépendamment.

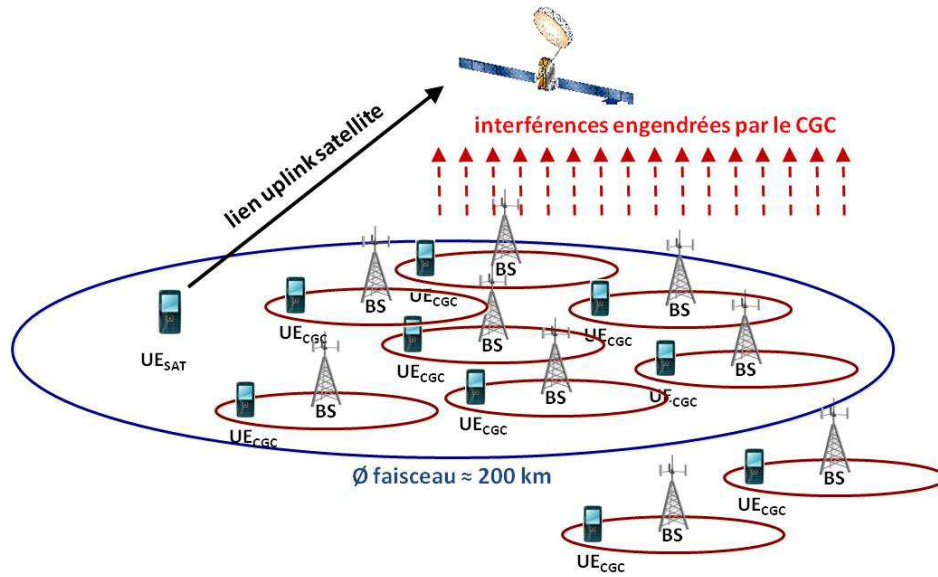


Figure 2-6 : Interférence de la composante terrestre sur l'uplink satellite

Soit $P_{rx,sat}(e_i, c_j, b_k)$, la puissance du signal uplink émis par l'équipement e_i qui est reçue par le satellite dans un canal c_j , d'un faisceau b_k donné.

$$(2.1) \quad P_{rx,sat}(e_i, c_j, b_k) = P_{tx}(e_i, c_j) \cdot G_{tx}(e_i) \cdot L(e_i) \cdot F(e_i) \cdot G_{rx,sat}(e_i, b_k)$$

où $P_{tx}(e_i, c_j)$ est la puissance d'émission de l'équipement e_i dans le canal c_j , $G_{tx}(e_i)$ son gain antenne en direction du satellite. $L(e_i)$ représente les pertes de propagation en espace libre entre le satellite et l'équipement e_i , et $F(e_i)$ les pertes de propagation dues aux autres effets d'atténuation (masquage, *fast fading*). Enfin, $G_{rx,sat}(e_i, b_k)$ est le gain antenne satellite en direction de e_i dans le faisceau b_k .

La formule (2.1) nous permet donc de calculer la puissance reçue par le satellite provenant d'un signal utile d'UE satellite ou d'un signal interférant d'équipement CGC (UE, macro ou pico BS). Dans le tableau suivant, nous donnons les valeurs de ces puissances obtenues pour notre système de référence (cf. §1.2). L'objectif de ce tableau est de fournir des ordres de grandeur des puissances des signaux mis en jeu. En particulier, il est intéressant de comparer les niveaux maximum des puissances du signal utile satellite et des signaux d'interférence. Le tableau permet aussi de visualiser la plage de variation des paramètres du bilan de liaison. Cette plage conditionne le gain maximum que l'on peut espérer lorsque que l'on joue sur ce paramètre pour atténuer les interférences.

Table 2-5 : Puissance du signal uplink reçu par le satellite des équipements au sol

Paramètre	Signal utile UE _{SAT}	Signal interférent UE _{CGC}	Signal interférent Macro BS	Signal interférent Pico BS (indoor)
$P_{tx}(e_i, c_j)$	24 dBm (pour 180 kHz)	-30 → 24 dBm (pour 180 kHz)	30→46 dBm (pour 5 MHz)	23→30 dBm (pour 5 MHz)
$G_{tx}(e_i)$	0 →4 dBi ⁽¹⁾	0 dBi	< 0 dBi ⁽²⁾ (40° élévation)	0 dBi
$L(e_i)$	≈ -190 dB			
$F(e_i)$	0→-10 dB (masquage)	0→-40 dB (masquage + pénétration)	0 dB (LOS)	-20→-40 dB ⁽³⁾ (masquage + pénétration)
$G_{rx,sat}(e_i, b_k)$	47→50 dB	< 50 dB en fonction de la zone d'exclusion ⁽⁴⁾		
$P_{rx,sat}(e_i, c_j, b_k)$ (pour 180 kHz)	Minimum	-129 dBm bord de faisceau	-200 dBm centre de faisceau	-
	Nominale	-115 dBm	-	-
	Maximum	-112 dBm centre de faisceau	-116 dBm centre de faisceau	< -108 dBm centre de faisceau

⁽¹⁾ L'usage du terminal en mode satellite peut requérir l'assistance de l'utilisateur (main sous l'antenne du téléphone, appareil orienté vers le satellite), ce qui permet d'utiliser une antenne directive.

⁽²⁾ Sans conception spécifique, une BS terrestre émet en général 20 à 30 dB en-dessous leur maximum à 40° d'élévation (à 50° de latitude pour un satellite GEO). Avec un gain maximum de 20 dBi, cela donne 0 dBi de gain vers le satellite au maximum.

⁽³⁾ Pour des pico BS située à l'intérieur des bâtiments

⁽⁴⁾ On peut décider d'interdire l'utilisation du CGC en deçà d'un certain seuil de gain, appelé zone d'exclusion (ZE). Voir (§2.3.3.1).

Ces bilans de liaison simplifiés nous permettent d'obtenir les bornes supérieures et inférieures des interférences *uplink* et de comprendre l'influence de chacun des facteurs. Par la suite, nous appelons $I_{ter,agrégée}(F_i, B_j)$ ou plus simplement $I_{ter}(F_i, B_j)$ la puissance de l'interférence agrégée reçue par le satellite dans la fréquence F_i du faisceau B_j .

2.2.1.1. Cas 1 - Interférence provenant des UE_{CGC}

C'est le cas d'interférence que nous avons le plus étudié dans cette thèse. Nous présentons ici des résultats préliminaires que nous approfondirons par la suite.

Interférence unitaire

La puissance maximale de l'interférence d'un seul UE_{CGC} est du même ordre que la puissance nominale du signal utile satellite (-115 dBm). Pour obtenir ce cas, l'UE_{CGC} doit se trouver au centre du faisceau interféré, émettre à pleine puissance dans le canal et être en ligne de vue directe du satellite. A l'inverse, si l'UE_{CGC} (toujours au centre du faisceau) émet à puissance minimale et se trouve à l'intérieur d'un bâtiment qui est masqué du satellite (40 dB d'atténuation), l'interférence est presque 10^{10} fois plus faible que le signal utile satellite. On en conclut donc que la puissance des interférences est extrêmement variable en fonction des conditions et de l'environnement de la source de l'interférence, ici l'UE_{CGC}. Ce constat semble évident et pourtant il est rarement relevé dans les différentes études sur le sujet : dans [2.10] et [2.16], la puissance d'émission des UE_{CGC} est constante et le facteur de masquage entre l'UE et le satellite n'est pas pris en compte. Or ces deux facteurs jouent un rôle prépondérant dans la valeur de l'interférence.

Afin de déterminer la distribution de $I_{ier, agrégée}$, nous avons mené une étude en tenant compte des distributions statistiques de chacun des paramètres intervenant dans le calcul des interférences. Par une méthode Monte-Carlo, nous avons obtenu la courbe de la Figure 2-7.

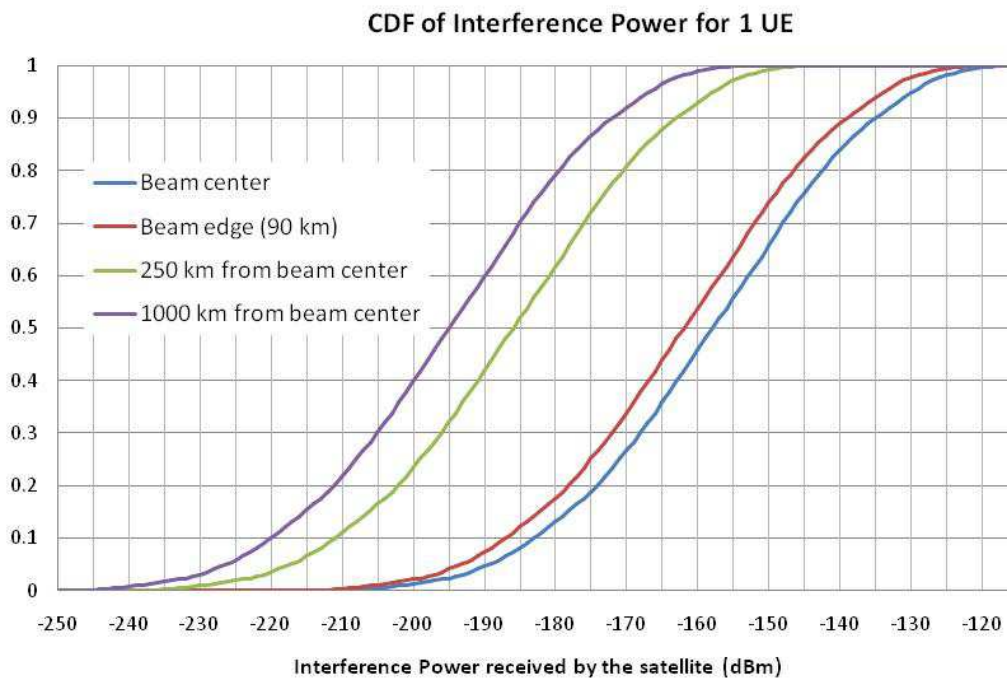


Figure 2-7 : Fonction de répartition de la puissance de l'interférence générée par un UE_{CGC} placé à différentes distances du centre du faisceau interféré

Pour une position donnée, il apparaît clairement que la dynamique de la puissance des interférences est très grande (plus de 90 dB). En centre de faisceau, 10% d'UE_{CGC} émettent un signal interférant supérieur à plus de 20 dB en-dessous du niveau du signal satellite utile (>135 dBm, SIR < 20 dB). Moins de 2% engendrent une interférence supérieure à 10dB sous le signal utile (>125 dBm, SIR < 10 dB). Si la densité d'UE_{CGC} reste faible, la probabilité d'avoir une source d'interférence gênante dans le faisceau est donc faible. Par exemple, pour un faisceau de 180km de diamètre qui contient 50 cellules terrestres, soit 50 UE_{CGC} co-fréquence au maximum (une ville de bonne taille), un seul UE_{CGC} gênant en moyenne (SIR < 10 dB) est contenu dans le faisceau. Au-delà d'une certaine distance par rapport au centre du faisceau, les sources d'interférences ne peuvent plus être considérées comme gênantes unitairement (SIR > 30 dB au-delà de 250 km).

Il faut alors réfléchir à l'agrégation de ces interférences. En effet, si leur puissance est décroissante lorsque l'on s'éloigne du faisceau, le nombre de sources est lui fortement croissant avec la distance. Nous allons donc étudier ce phénomène d'agrégation.

Interférence agrégée

On note $I_{ter,agrégée}(F_i, B_j)$ la somme des puissances des interférences provenant de tous les équipements terrestre co-fréquence dans la fréquence F_i , et reçues par le satellite pour le faisceau B_j donné :

$$(2.2) \quad I_{ter,agrégée}(F_i, B_j) = \sum_k I_{ter,unitaire}(F_i, B_j, BS_k)$$

$I_{ter,unitaire}(F_i, B_j, BS_k)$ correspond à la puissance de la composante unitaire de l'interférence qui est générée par la cellule BS_k dans la fréquence F_i du faisceau B_j .

En théorie, tous les équipements du CGC sous la couverture du satellite contribuent à cette interférence agrégée, même ceux qui se trouvent éloignés de plusieurs milliers de km du centre du faisceau. La contribution dans l'interférence agrégée des sources d'interférences « éloignées » doit donc être évaluée. Pour faire une analogie avec les interférences inter-cellules dans les systèmes cellulaires, cela reviendrait à évaluer la contribution des terminaux co-fréquence distants de plusieurs cellules.

Pour obtenir les courbes de la Figure 2-8, nous avons évalué l'interférence agrégée sur une zone circulaire de 1800 km autour du centre du faisceau par une méthode Monte-Carlo. Nous avons considéré différentes densités de sources d'interférence (i.e. un nombre d' UE_{CGC} dans la zone considérée). Ces sources sont ici uniformément réparties même si en pratique, les sources d'interférence sont localisées en grappes dans les zones urbaines denses. D'un point de vue probabiliste, les résultats obtenus sont équivalents pour les deux modèles.

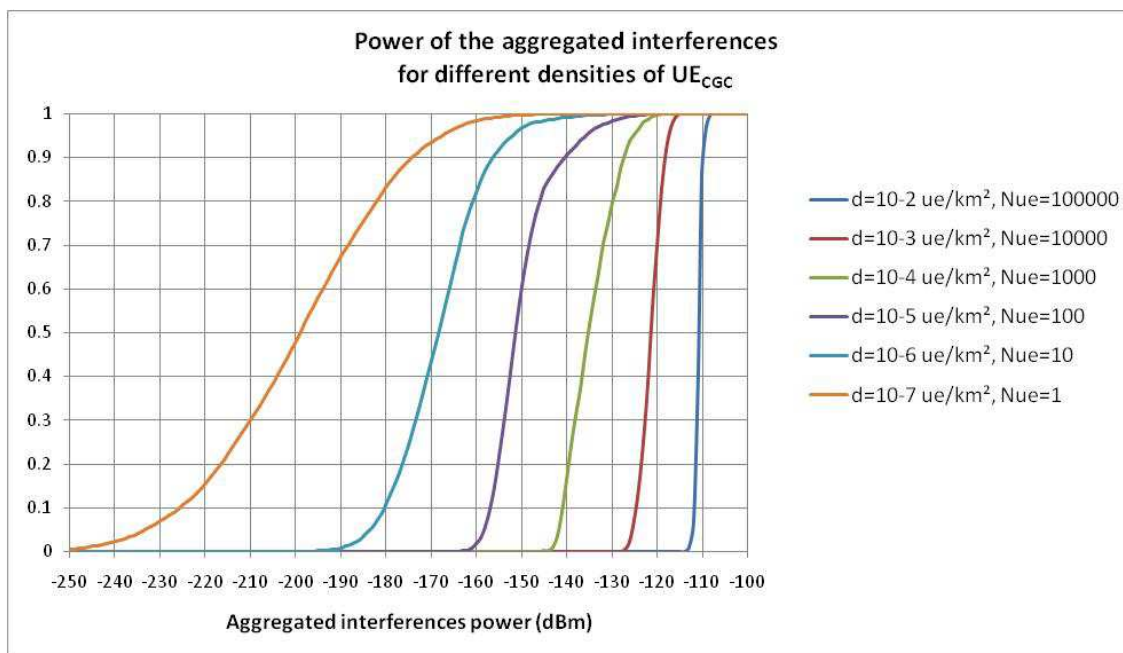


Figure 2-8: Puissance agrégée des interférences en fonction de la densité des UE_{CGC} (zone considérée circulaire de 1800 km de rayon autour du centre du faisceau)

L'interférence moyenne croît de façon strictement proportionnelle avec la densité des UE_{CGC} (cf. Table 2-6) et plus le nombre d' UE_{CGC} est important, plus l'écart type est faible. Si on compare ces résultats à la puissance du signal utile (-115 dBm), on note que seule des densités très faibles d' UE_{CGC}

(<10⁻⁵ ue/km², soit environ 2 UE_{CGC} par faisceau) permettent d'obtenir des interférences inter-composantes acceptables (i.e. 95% des cas impliquent un SIR < 20 dB).

Table 2-6 : Puissance moyenne de l'interférence agrégée en fonction de la densité des UECGC

Density ue/km ²	Mean I _{ag,up,CGC} (dBm)
10 ⁻²	-110
10 ⁻³	-120
10 ⁻⁴	-131
10 ⁻⁵	-141
10 ⁻⁶	-150
10 ⁻⁷	-159

Nous retrouvons donc la conclusion à laquelle les opérateurs américains arrivèrent en 2002, à savoir qu'un système terrestre ne peut fonctionner dans la même fréquence que le système satellite sans coordination ou mise en œuvre de techniques de réduction des interférences inter-composantes. Une nuance cependant : la seule condition acceptable est que la densité d'utilisateurs terrestres reste très faible (<10⁻⁵ ue/km² pour notre système de référence). Dans ce cas, seule une faible proportion des canaux satellite souffriront d'interférences dommageables.

Portée des interférences

Lorsque l'on considère l'interférence agrégée, deux phénomènes contradictoires opèrent à la fois :

1. Le gain antenne pour un faisceau donné décroît rapidement avec la distance (cf. Figure 2-9) en particulier au niveau du premier lobe,
2. Plus on s'éloigne du centre du faisceau, plus le nombre d'UE_{CGC} à une distance donnée est élevé (fonction du carré de la distance).

On peut donc s'interroger sur la prépondérance éventuelle d'un des deux phénomènes. Pour ce faire, nous avons simulé de façon statistique des sources d'interférences contenues dans une zone circulaire de diamètre croissant allant de 180 km (le diamètre du faisceau environ) à 3600 km. Pour chaque zone, la densité des UE_{CGC} est constante, égale à 1 UE pour 100 km². Les résultats sont présentés Figure 2-10.

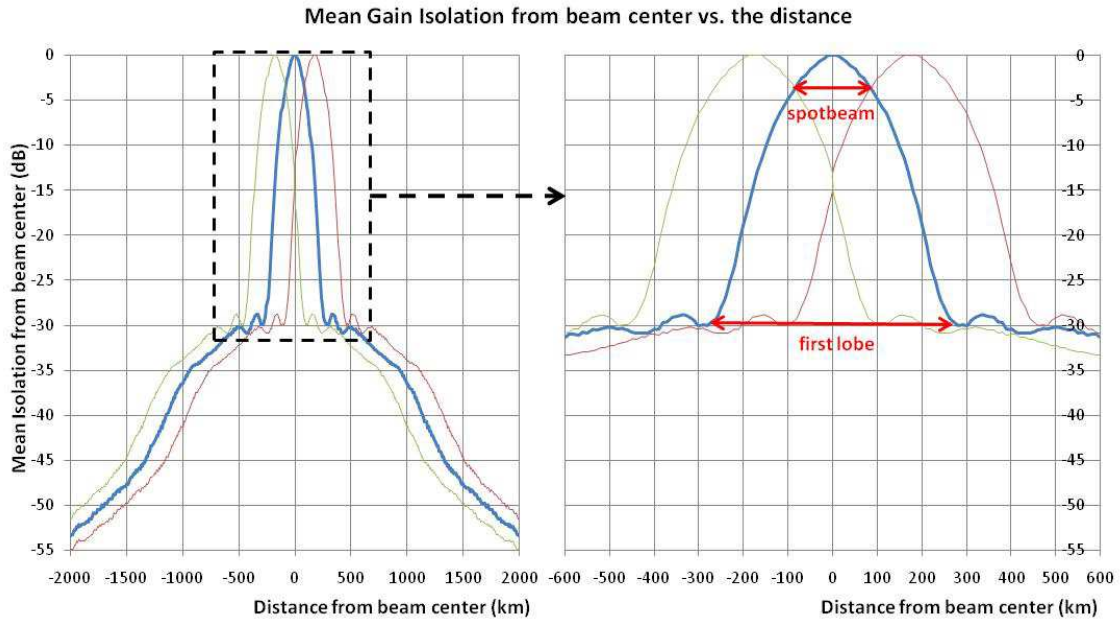


Figure 2-9 : Isolation par rapport au gain antenne au centre du faisceau

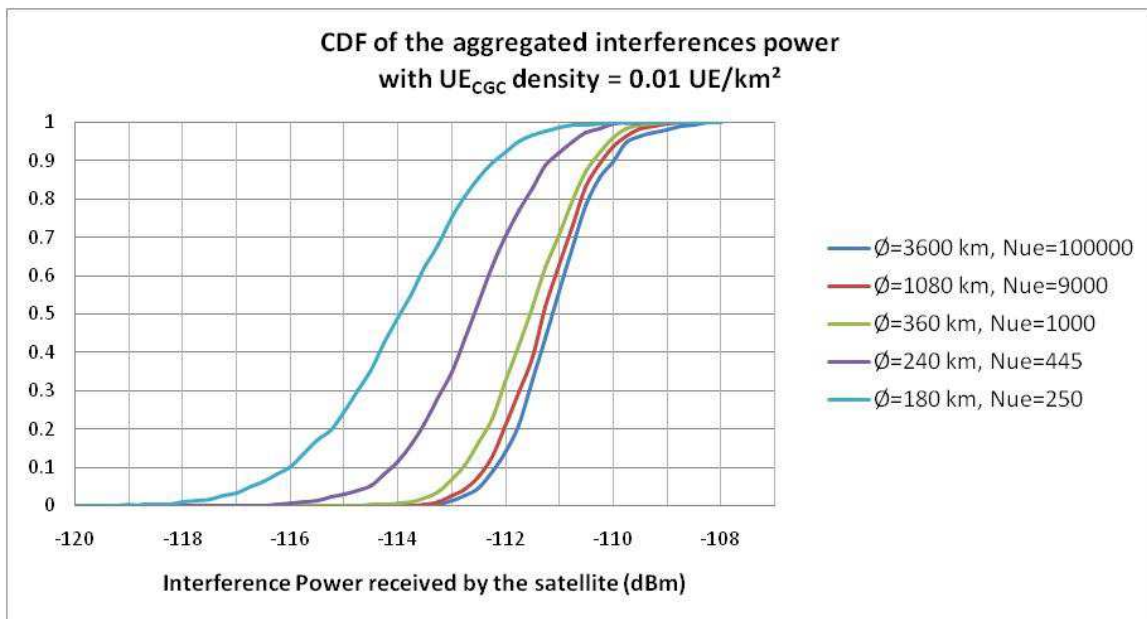


Figure 2-10 : Distribution de la puissance de l'interférence agrégée en fonction du diamètre de la zone considérée

Le constat est très intéressant : au-delà d'une distance assez réduite correspondant au lobe principal (360 km, soit 2 fois la taille du faisceau dans notre système), la contribution des sources d'interférence, même très nombreuses, devient négligeable. Dans l'anneau contenu entre la zone de 360 km de diamètre et celle de 3600 km, se trouvent 99% des UE_{CGC} (99000 UEs sur 100000). Or ils ne contribuent qu'à hauteur de 1% dans l'interférence totale (accroissement de la puissance moyenne de l'interférence de seulement 0.2 dB). En conclusion, nous pouvons négliger la contribution des sources d'interférences au-delà du lobe principal (au premier ordre).

Résultats principaux

Pour résumer cette première analyse sur ce cas d'interférence, nous retiendrons les résultats fondamentaux suivants :

- Sans technique de coordination ou de réduction des interférences, le système terrestre provoque un niveau d'interférence inacceptable sur le lien *uplink* satellite à moins de limiter sévèrement la densité des terminaux terrestres.
- La puissance de l'interférence engendrée par un UE_{CGC} est extrêmement variable en fonction de 3 facteurs : sa puissance d'émission, son facteur de masquage et de sa distance au centre du faisceau interféré.
- Seules les sources d'interférences contenues dans le lobe principal du faisceau sont à considérer dans l'étude de ce cas d'interférence. Au-delà, leur contribution est négligeable au premier ordre.

C'est en prenant en compte ces paramètres que nous avons élaboré des stratégies pour coordonner ces interférences.

2.2.1.2. Cas 5 - Interférence provenant de la BS

La réglementation rend le cas FDD inversé assez improbable mais il est intéressant de l'évoquer brièvement car il a été déjà envisagé dans le cas de macro-BS ([2.11], [2.14], [2.15]).

La Table 2-5 montre un niveau d'interférence généré par une macro-BS supérieur de 5 dB au signal utile satellite. Il a été proposé de concevoir spécifiquement les antennes des BS pour qu'elles n'émettent pas de signal vers le satellite [2.11]. Cependant, même ainsi, les signaux émis vers le bas ont une forte probabilité de se réfléchir sur le sol ou sur les éléments environnants (e.g. des panneaux solaires) en direction du satellite et de le perturber fortement. Il est donc extrêmement complexe de modéliser le niveau de puissance réellement émis vers le satellite. Aussi, aucun modèle de propagation entre station de base et satellite n'existe-t-il pour l'instant. Le NICT japonais a mené une étude expérimentale pour évaluer la puissance des interférences rayonnées vers l'espace par des BS et par des terminaux terrestres [1.18]. La conclusion est claire : la puissance émise vers le satellite (représenté par un ballon dans l'étude) par une BS (W-CDMA) est de 25 à 30 dB plus élevée que celle émise par un terminal. Dans ce cas, même en ayant recours au principe de zone d'exclusion, le niveau d'interférence sera intolérable pour le satellite.

Ce cas ne peut donc être envisagé sans l'emploi de techniques de suppression d'interférences très sophistiquées. Par exemple, les BS pourraient envoyer une copie de leur signal à la passerelle satellite qui pourrait ainsi récupérer le signal utile satellite par soustraction des signaux d'interférence. Cependant, même si elle est théoriquement possible, cette technique demanderait beaucoup de calcul au niveau de la passerelle et de gros transferts de données.

En conclusion, sans solution d'annulation d'interférences, les modes FDD inversé et TDD *uplink* ne sont pas vraiment applicables.

2.2.2. Interférence du CGC sur le satellite - downlink

Ce cas d'interférence intervient sur le lien downlink d'un UE_{SAT}. Les sources des interférences sont soit des BS co-fréquence (cas FDD direct), soit des UE_{CGC} co-fréquence (FDD inversé ou TDD). Nous considérons ici que le terminal satellite est dual-mode satellite-terrestre i.e. qu'il opère sur le réseau terrestre lorsqu'il est suffisamment proche d'une BS.

2.2.2.1. Cas 4. Interférence de la BS sur l'UE_{SAT}

Généralités

Dans la littérature, il existe peu d'études sur le sujet et elles sont uniquement réglementaires ou proviennent d'opérateurs. De plus, les résultats sont très controversés : d'après [2.24], ce cas d'interférence est impossible à surmonter et rend le principe de partage des fréquences infaisable en *downlink* ; dans [2.10], il est considéré peu gênant car limité à une zone « proche » de la BS.

Après analyse, cette dissonance provient principalement d'un seul point : le modèle de propagation de terrain utilisé dans chaque cas. Comme le montre la Figure 2-11, l'espace autour d'un BS peut être divisé en 3 zones :

- **Mode CGC** ($d < d_{CGC}$) : au plus proche de la BS, la puissance du signal de la BS reçu par l'UE est prépondérante par rapport à la puissance du signal satellite (donc vu comme une interférence). L'UE opère donc en mode CGC.
- **Mode Satellite** ($d > d_{SAT}$) : au plus éloigné de la BS, la puissance du signal de la BS reçu par l'UE est minime par rapport à la puissance du signal satellite (donc vu comme le signal utile). L'UE opère donc en mode satellite.
- **Zone de recouvrement** ($d_{CGC} < d < d_{SAT}$) : entre les deux zones précédentes, une zone où les deux signaux sont du même ordre de grandeur. Deux possibilités : l'UE maintient sa connexion avec l'une ou l'autre des composantes moyennant une dégradation de la qualité du lien ou bien il ne peut tout simplement pas maintenir sa connexion. Quelque soit le cas, on préférera que cette zone soit la plus restreinte possible.

La gravité des interférences subies par un UE_{SAT} est donc principalement fonction de la distance d_{SAT} qui correspond à la taille extérieure de la zone de recouvrement. Elle dépend :

- Du (C/I) minimum requis pour fonctionner en mode satellite. C'est un paramètre du système.
- Du niveau de la puissance reçue du satellite. Nous la supposons constante sous la couverture, ce qui est une approximation raisonnable dans ce cas.
- Du niveau de la puissance reçue de la BS et qui décroît en fonction de la distance à la BS.

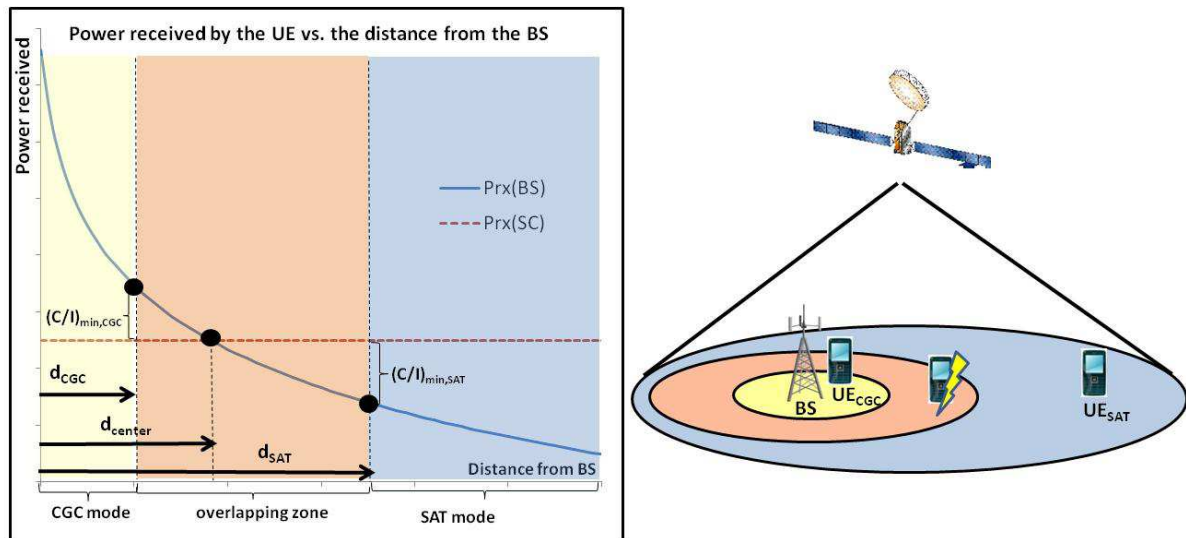


Figure 2-11 : Puissance reçue par un UE du signal satellite ou de la BS en fonction de sa distance à la BS (le gain antenne satellite est supposé constant)

De plus, pour le calcul de ce cas d'interférence, il faut tenir compte de l'agrégation des signaux provenant des BS entourant un UE_{SAT} . Le nombre de BS contributrices multiplie d'autant les interférences reçues. Ce nombre est proportionnel à d_{SAT}^2 (pour des BS uniformément réparties). C'est une raison supplémentaire de restreindre au maximum cette zone.

Zone de recouvrement

Afin de déterminer la taille de la zone de recouvrement, nous devons modéliser l'atténuation du signal de la BS en utilisant un modèle de propagation de terrain. Nous n'effectuons pas ici une analyse exhaustive des différents modèles existants mais souhaitons simplement évaluer l'étendue possible de la zone. Pour ce faire, nous avons appliqué différents modèles de propagation à notre système de référence:

- Modèle « perte en espace libre » (pire cas), $(C/I)_{min,SAT} = 12\text{dB}$: $d_{center} = 210\text{ km}$ et $d_{SAT} = 650\text{ km}$, ce qui correspond à une zone de recouvrement de diamètre égal à plus de 7 diamètres de faisceaux. Dans ce cas, nous parlerons de zone de recouvrement **grande**.
- Modèle d'Egli [2.25] ($h_b = 30\text{m}$ et $h_m = 1.5\text{m}$), $(C/I)_{min,SAT} = 12\text{dB}$: $d_{center} = 4\text{ km}$ et $d_{SAT} = 15\text{ km}$, ce qui correspond à une zone de recouvrement de diamètre égal à plus de 1/10 de faisceau. Dans ce cas, nous parlerons de zone de recouvrement **petite**.
- Modèle d'Egli ($h_b = 50\text{m}$ et $h_m = 20\text{m}$), $(C/I)_{min,SAT} = 12\text{dB}$: $d_{center} = 20\text{ km}$ et $d_{SAT} = 65\text{ km}$, ce qui correspond à une zone de recouvrement de recouvrement de diamètre égal à plus de 1/3 de faisceau. Dans ce cas, nous parlerons de zone de recouvrement **moyenne**.

Dans un environnement réel, la zone de recouvrement aura certainement une forme quelconque non convexe avec des « trous » et des « branches » pouvant s'étendre à grande distance. Il est donc difficile de planifier *a priori* les BS pour qu'elles opèrent dans des fréquences non gênantes pour le satellite à moins de sur-dimensionner la zone de recouvrement par un disque recouvrant. En effet, il semble exclu d'effectuer des mesures sur plusieurs centaines de km autour de chaque BS pour évaluer avec précision la forme de la zone.

Une modélisation difficile

Comme nous l'avons vu dans le simple exemple précédent, les tailles de zones de recouvrement sont extrêmement variables en fonction du modèle choisi. De façon plus générale, il est difficile d'évaluer ces interférences tant la sensibilité des résultats à l'environnement de propagation est importante.

Au cours d'une étude expérimentale pour l'ITU [2.23], l'ESA a mesuré l'atténuation du signal au sol sur des distances allant jusqu'à 600 km et pour différentes configurations de terrain. Les résultats montrent des tailles de zone de recouvrement très variables pour leur système de référence : de 66 km de rayon pour des terrains montagneux (zone moyenne) à 411 km lorsque le signal se propage sur la mer (grande zone donc réutilisation impossible). Il faut cependant noter que leurs BS se trouvaient en zones rurales et que les résultats sont certainement plus encourageants lorsque les BS se trouvent en zone urbaine, ce qui constitue notre système de référence (et celui des opérateurs de système intégrés jusqu'à présent).

Il est donc difficile d'étudier par simulation ce cas d'interférence à cause de la complexité des phénomènes de propagation à longue distance et de leur variabilité en fonction de l'environnement des équipements (BS et UE). D'autres études dans la lignée de [2.23] devraient donc être menées afin de déterminer au mieux les modèles d'atténuation à longue distance en fonction de différents paramètres d'environnement.

Résultats principaux

En conclusion, ce cas d'interférence doit être pris sérieusement en considération :

- Sa conséquence est une dégradation partielle voire totale du service satellite dans une zone annulaire plus ou moins étendue autour des BS. Son impact est fortement dépendant des environnements de la BS et de l'UE_{SAT} ;
- Les BS placées sur des hauteurs dégagées engendrent des interférences se propageant sur de très grandes distances (plusieurs centaines de km) et donc qui sont particulièrement gênantes pour les UE_{SAT} co-fréquences environnants. A l'inverse, les BS installées en zones urbaines à faible hauteur posent moins de problèmes (moins de 100 km).
- Les UE_{SAT} situés dans des zones ouvertes (typiquement sur la mer) seront très exposés à ces interférences. Ceux situés dans des zones à fort relief (typiquement au cœur de montagnes) seront peu exposés.

Par conséquent, l'étude de ce cas nécessite de posséder des modèles réalistes de propagation au sol à longue portée, ainsi que des données numériques de terrain associées.

En fonction de la portée du signal de la BS, la réutilisation des fréquences satellite par planification simple sera possible ou pas, partiellement ou totalement (c.f. §2.3.3.1). La coordination de ces interférences en fréquence est relativement complexe dans ce cas. Toutefois, des mécanismes dynamiques de coordination en temps peuvent être efficaces pour gérer ce cas d'interférences (c.f. §2.3.3.2).

2.2.2.2. Cas 8. Interférence de l'UE_{CGC} sur l'UE_{SAT}

Dans ce cas, la source de l'interférence est l'UE_{CGC} au lieu de la BS. Ce cas est moins critique que le précédent, puisque l'UE_{CGC} émet à puissance moindre et surtout est moins haut que la BS. La portée de son signal interférant est donc moindre. Le principe de zone de recouvrement s'applique ici aussi et se détermine à partir de la BS. En revanche, son rayon est égal au rayon de la BS qui détermine la

position extrême de l'UE_{CGC}, plus la portée de son interférence. Dans le cas précédent, la position de la source de l'interférence (la BS) est connue et les effets de propagation peuvent être anticipés, même si cela est difficile comme nous l'avons vu. Dans ce cas, il est difficile de déterminer toutes les positions possibles des UE_{CGC}. La zone de recouvrement ne peut donc être déterminée qu'en prenant la superposition des zones de recouvrement à partir des « pires » cas de position d'UE_{CGC}.

2.2.3. Interférence du satellite sur le CGC – uplink

Ce cas d'interférence intervient sur le lien uplink d'un UE_{CGC}. Les sources des interférences sont soit un UE_{SAT} co-fréquence (cas FDD direct ou TDD uplink), soit le SC (FDD inversé ou TDD downlink).

2.2.3.1. Cas 3. Interférence provenant de l'UE_{SAT}

Comme il a été vu dans le cas précédent, la prédominance des signaux downlink provenant de la BS ou du SC conditionne le mode dans lequel un UE opère (cf. Figure 2-11). En mode satellite, un UE_{SAT} est donc situé à une distance relativement éloignée du bord d'une cellule terrestre, au moins de plusieurs km. Sa PIRE (Puissance Isotrope Rayonnée Effective) est au maximum quelques dB au-dessus de celle d'un UE_{CGC}. Par conséquent, la puissance du signal interférant reçu par la BS sera du même ordre que celle du signal utile de l'UE_{CGC}. De plus, la densité des UE_{SAT} est faible et donc la probabilité qu'un d'entre eux soit proche d'une BS et émette co-fréquence est assez faible.

Ce cas d'interférence peut être réglé très simplement par planification des fréquences. Même si une BS est sensible aux interférences provenant des UE_{SAT} de par sa situation géographique par exemple, il suffit de lui interdire la fréquence utilisée dans le faisceau auquel elle appartient (ou de 2 faisceaux si la BS est en bord de faisceau). Ainsi, les UE_{SAT} co-fréquence les plus proches sont distants de une à plusieurs centaines de km en fonction de la taille des faisceaux. Ils sont donc assez éloignés pour que la puissance de leur interférence soit négligeable.

2.2.3.2. Cas 6. Interférence provenant du SC

Comme pour le cas 5, la puissance du signal satellite reçu par la BS va beaucoup dépendre du canal de propagation entre le SC et la BS. Cependant, même en supposant que la BS est en vue directe du satellite avec un gain antenne de 0 dBi, le niveau de signal du SC reçu par la BS sera négligeable par rapport au niveau de signal utile provenant des UE_{CGC}. Pour les liens *uplink*, seuls les UE en bord de cellule seront réellement interférés par le signal satellite. Il suffit donc là aussi d'attribuer des fréquences de faisceaux éloignés à ces UE pour éviter ce cas d'interférence.

2.2.4. Interférence du satellite sur le CGC – downlink

Ce cas d'interférence intervient sur le lien downlink d'un UE_{CGC}. Les sources des interférences sont soit le SC (cas FDD direct ou TDD downlink) ou un UE_{SAT} co-fréquence (FDD inversé ou TDD uplink).

2.2.4.1. Cas 2. Interférence provenant du SC

Comme le montre la Figure 2-11, il existe une distance d_{CGC} , au-delà de laquelle le signal satellite devient gênant. La gravité de ce cas d'interférence va donc beaucoup dépendre de la taille de la cellule. Si elle est inférieure à d_{CGC} , le cas est négligeable. Si la taille est supérieure, les UE_{CGC} en bord de cellule seront perturbés par le satellite. Comme dans le cas 6, on peut leur attribuer des fréquences de faisceaux éloignés pour éviter les interférences.

2.2.4.2. Cas 7. Interférence provenant de l'UE_{SAT}

De par la faible densité des UE_{SAT}, le nombre de BS affectées par ce cas est restreint. Lorsqu'un UE_{SAT} se trouve proche du bord d'une cellule (en fonction de la taille de la zone de recouvrement, cf. 2.2.2), il engendrera alors des interférences significatives vers un UE_{CGC}, surtout si ce dernier se trouve en bord de cellule. Mais encore une fois, par simple planification, il suffit d'attribuer des fréquences des faisceaux éloignés aux UE_{CGC} sensibles.

2.2.5. Cas particulier : les pico-BS

Comparée à la macro-BS, la pico-BS possède 2 avantages concernant les interférences inter-composantes : elle est généralement utilisée à l'intérieur des bâtiments (nous envisageons ce cas par la suite) et émet à puissance réduite. Si on considère que les terminaux de la pico-BS émettent à 0 dBm en indoor au centre d'un faisceau, le niveau de l'interférence reçue par le satellite est de -160dBm soit 45 dB sous le niveau du signal utile (cf. Table 2-5). C'est par conséquent un cas d'utilisation très favorable à l'implantation de la réutilisation des fréquences satellite. La fréquence satellite pourrait donc être utilisée uniquement par les pico-BS d'un réseau terrestre sans risquer de perturber beaucoup le satellite.

Nous n'avons pas retenu ce scénario pour la suite car il est éloigné des systèmes actuellement en cours de déploiement (Lightsquared, Terrestrial), mais il pourrait être intéressant de l'étudier dans le futur.

2.2.6. Conclusion sur les interférences

De cette première étude des différents cas d'interférences, les principaux éléments à retenir sont :

- La composante terrestre ne peut réutiliser la fréquence uplink satellite que dans le cas FDD direct et dans ce cas, il est nécessaire de mettre en œuvre des solutions de gestion d'interférence.
- La possibilité de réutilisation de la fréquence downlink satellite est largement conditionnée par l'environnement de propagation autour de la BS qui réutilise la fréquence. Des études supplémentaires doivent être menées afin de mieux caractériser les phénomènes de propagation au sol à longue distance.
- Les cas d'interférences de la composante satellite sur la composante terrestre sont peu dommageables pour cette dernière et peuvent être gérés facilement par un asservissement du plan de fréquence de la composante terrestre sur le plan de fréquence satellite.

Pour pouvoir mettre en œuvre la réutilisation des fréquences, il faut donc trouver des moyens de maintenir les interférences de la composante terrestre vers la composante satellite à un niveau acceptable. En d'autres termes, il faut avant tout protéger le satellite des interférences provenant du système terrestre.

2.3. Stratégies de gestion de l'ICoI

Notre système satellite utilise des méthodes d'accès de type FDMA. Les interférences inter-composantes (ICoI) peuvent donc être prises en compte de plusieurs manières. Nous présentons brièvement les principaux principes de gestion d'interférences dans cette partie : l'annulation (§2.3.1), l'étalement (§2.3.2) et la coordination (§2.3.3).

Nous nous concentrons surtout sur la gestion des interférences de la composante terrestre sur la composante satellite. Il faut noter toutefois que certaines qui visent à résoudre ces cas d'interférences permettent aussi de réduire les interférences de la composante satellite sur la composante terrestre.

2.3.1. Annulation de l'ICoI - Formation de faisceau adaptative

L'annulation des interférences inter-composantes consiste à supprimer les interférences provenant de l'autre composante au niveau du récepteur. La technique que nous évoquons ici, la formation de faisceau adaptative, est présentée dans [2.8]. Son principe repose sur le fait que les cellules terrestres sont généralement regroupées en cluster (zones urbaines) dont certains sont de très grande taille (e.g. mégapoles). Comme nous l'avons vu dans la partie 2.2.1, les interférences reçues dans un faisceau sont fonction du gain antenne satellite dans la direction des sources d'interférences. Même si au niveau du système satellite, on ne peut connaître avec exactitude l'emplacement et le nombre de cellules, il est tout de même possible de déterminer les grandes zones urbaines qui contiendront un grand nombre de cellules et donc aucun utilisateur satellite (e.g. l'île de France). A partir de cette connaissance, les systèmes de formation de faisceau satellite permettent de créer des « trous » dans la couverture qui correspondent à ces zones. Cela signifie concrètement que les signaux provenant de la zone (dans ce cas les ICoI) seront reçus avec un gain fortement réduit au niveau du satellite. C'est une forme

d'« annulation des interférences », même s'il n'est pas possible de réduire à zéro le gain antenne, et donc d'annuler complètement les interférences avec cette technique. Toutefois, son efficacité est importante et elle peut tout à fait être combinée avec d'autres techniques comme la coordination d'interférence.

A noter que cette technique est applicable aussi sur le gain antenne en downlink et permet donc de réduire les interférences du satellite sur le CGC (cas 6 et 2).

Il existe d'autres techniques d'annulation fondées sur la soustraction de signaux d'interférence au niveau du récepteur. Toutefois, il n'existe aucune publication sur le sujet à ce jour. Ce genre de techniques semble difficile à appliquer dans le cas des ICoI où le nombre de sources contributives à un cas d'interférences est élevé.

2.3.2. Étalement de l'ICoI

Le principe de l'étalement d'interférences dans le cas de systèmes FDMA consiste à rendre aléatoire les signaux de fréquences par entrelacement ou saut de fréquence. Ainsi, plutôt que de générer une interférence importante sur un signal utile donné, on génère une interférence réduite sur un plus grand nombre de signaux utiles. Dans le cas de l'ICoI du CGC sur le satellite, le nombre de sources d'interférence peut être très élevé. Si les schémas d'allocation de fréquences ne sont pas corrélés entre toutes ces sources (ce qui est le plus probable), on obtient un étalement « naturel » par distribution statistique de la puissance et de la fréquence allouées aux sources d'interférences. Toutefois, comme nous allons le voir par la suite (chapitre 3), l'ICoI sur l'uplink est souvent le fait d'un petit nombre de sources d'interférences. Il pourrait donc être bénéfique d'appliquer un tel principe. Concernant l'ICoI du satellite sur le CGC, l'étalement des interférences est certainement plus efficace puisque dans ce cas, le nombre de sources d'interférences (les faisceaux satellite ou les UE_{SAT}) est restreint.

Aucune étude sur le sujet n'a été publiée, mais c'est une technique qui pourrait présenter un intérêt et qui vaut donc d'être explorée.

2.3.3. Coordination de l'ICoI

La coordination des ICoIs est la technique la plus présente dans la littérature et seuls les cas d'ICoI du CGC sur le satellite sont traités. Nous appelons « coordination de l'ICoI », le fait de coordonner les schémas et les mécanismes d'allocation de ressources des systèmes terrestre et satellite afin de réduire l'ICoI. En d'autres termes, on restreint l'utilisation possible de la ressource spectrale en temps, fréquence et espace. La fréquence avec laquelle ces restrictions évoluent détermine le niveau de coordination statique (de l'ordre de l'heure) et dynamique (jusqu'à la ms).

C'est la stratégie de réduction de l'ICoI que nous avons adoptée pour cette thèse et qui fera l'objet des chapitres 3 à 5. Nous évoquons donc brièvement le sujet ici, mais il sera largement détaillé par la suite.

2.3.3.1. Coordination statique

La coordination statique des interférences revient simplement à coordonner les plans de fréquences satellite et terrestre. Étant donné l'écart d'échelle entre faisceau satellite et cellule terrestre, c'est le plan de fréquence terrestre qui doit s'adapter au plan de fréquence satellite et qui va utiliser les « trous » (fréquence/espace) laissés par le système satellite. Comme nous l'avons vu dans la partie 2.1,

l'ICoI sur les liens satellite uplink et downlink n'est pas symétrique et donc il en va de même pour les principes de coordination statique même s'ils restent similaires sur l'uplink et le downlink.

Planification coordonnée sur l'uplink - Principe de la zone d'exclusion

Ce principe de coordination d'ICoI est le premier à être énoncé dans une publication scientifique [2.4]. Il consiste simplement à interdire à chaque cellule terrestre les fréquences satellite utilisées dans les faisceaux trop proches (au sens gain antenne) de cette dernière. Cela permet de réduire les interférences co-fréquences au détriment de la fréquence disponible pour le système terrestre. Son étude a constitué le sujet de notre première publication et nous en présentons les résultats détaillés au chapitre 3.

Planification coordonnée sur le downlink - Principe de la zone de recouvrement

Comme nous l'avons vu dans la partie 2.1, c'est le cas d'interférence en FDD direct (BS sur UE_{SAT}) qui pose problème sur le downlink satellite. Dans ce cas, il existe une zone autour des BS dans laquelle un terminal satellite ne peut recevoir son signal, appelée zone de recouvrement.

Un moyen d'éviter ce cas d'interférence est d'interdire à la BS la fréquence des faisceaux satellite se trouvant en intersection avec la zone de recouvrement. Cela a pour effet de réduire la fréquence disponible par la BS sur le downlink. Aussi, l'application de ce principe dépend de la taille de la zone de recouvrement.

Dans le cas d'une grande zone, cette dernière recouvre l'ensemble des faisceaux du motif de fréquence satellite. La coordination par simple planification n'est donc plus applicable car on interdirait toutes les fréquences satellite à la BS. Dans ce cas, les downlink satellite et terrestre doivent donc fonctionner dans des fréquences disjointes à moins d'utiliser des mécanismes dynamiques de gestion de ressources entre satellite et CGC.

Dans le cas d'une zone moyenne, la coordination statique est possible dans certains cas. Le nombre de fréquences satellite réutilisables par la BS dépend de la taille de la zone, de la densité des BS et du nombre de couleurs dans le motif de réutilisation des fréquences satellite.

Dans le cas d'une petite zone, la coordination statique est possible dans presque tous les cas pour une BS seule, sauf exceptions (e.g. BS à l'intersection de 3 faisceaux). Cependant, si la densité des BS est importante, le phénomène d'agrégation peut empêcher son application.

Nous résumons ces résultats dans la table suivante :

Table 2-7 : Tailles de la zone de recouvrement et impact sur la possibilité de coordonner les plans de fréquences

Zone de recouvrement	Diamètre de la zone de recouvrement (Φ_z) par rapport au diamètre des faisceaux (Φ_f)	Coordination des plans de fréquence sur le downlink
Grande	$\Phi_z > n \times \Phi_f$ $n > 1$ dépend du pattern de fréquence satellite	Toujours impossible. La zone vient recouvrir tous les faisceaux du motif de fréquence satellite
Moyenne	$1/3 \Phi_f < \Phi_z < n \times \Phi_f$ $n > 1$ dépend du pattern de fréquence satellite	Possible mais restreinte aux fréquences satellite des faisceaux non recouverts par la zone + agrégation
Petite	$\Phi_z < 1/3 \Phi_f$	Possible, éventuellement seule la fréquence du faisceau contenant la cellule est interdite.

2.3.3.2. Coordination dynamique

La coordination statique est relativement simple à mettre en œuvre mais elle peut être relativement limitée en fonction des conditions, surtout de densité des cellules terrestres. Nous mettons ce fait en relief au chapitre 3. Nous avons défini au chapitre 5 des méthodes de coordination dynamique dont certaines sont fondées sur les mécanismes de gestion de l'interférence inter-cellules mis en place dans LTE. Aussi nous ne faisons ici qu'évoquer brièvement le principe.

Réutilisation optimale des ressources

La coordination dynamique de l'ICoI peut donc permettre au système terrestre de réutiliser le spectre satellite même lorsque la coordination statique ne le permet pas.

En pratique, l'utilisation des ressources satellite dans les faisceaux n'est pas uniforme dans le temps ou l'espace. Lorsqu'un faisceau n'utilise pas ses ressources spectrales, les cellules terrestres proches de ce faisceau peuvent alors réutiliser ces ressources sans restriction. Cela nécessite toutefois de communiquer rapidement aux BS les ressources qu'elles peuvent réutiliser.

Les bénéfices de la coordination dynamique d'ICoI sont évidents puisqu'elle permet de réutiliser de façon optimale les ressources satellite au niveau du système terrestre. Elle peut être utilisée en complément de la coordination des plans de fréquences. Toutefois, sa mise en œuvre requiert des interfaces entre systèmes satellite et terrestre pour communiquer les informations sur l'état d'utilisation des ressources.

Contrôle des interférences

La coordination dynamique de l'ICoI présente un autre avantage. Elle permet de réagir en temps réel à l'ICoI réellement subie. Si le système satellite constate dans un faisceau à une fréquence donnée un niveau d'interférence trop important, il peut demander au système terrestre de réduire son niveau d'émission. Une telle boucle de contrôle de l'ICoI peut permettre au système satellite de garantir que l'ICoI subie ne dépasse pas un seuil déterminé. Le fait de pouvoir assurer une telle garantie est un

point primordial dans la mise en œuvre de la réutilisation des fréquences. Nous détaillons davantage ce principe au chapitre 5.

3. Coordination Statique de l'ICoI - Concept de Zone d'Exclusion

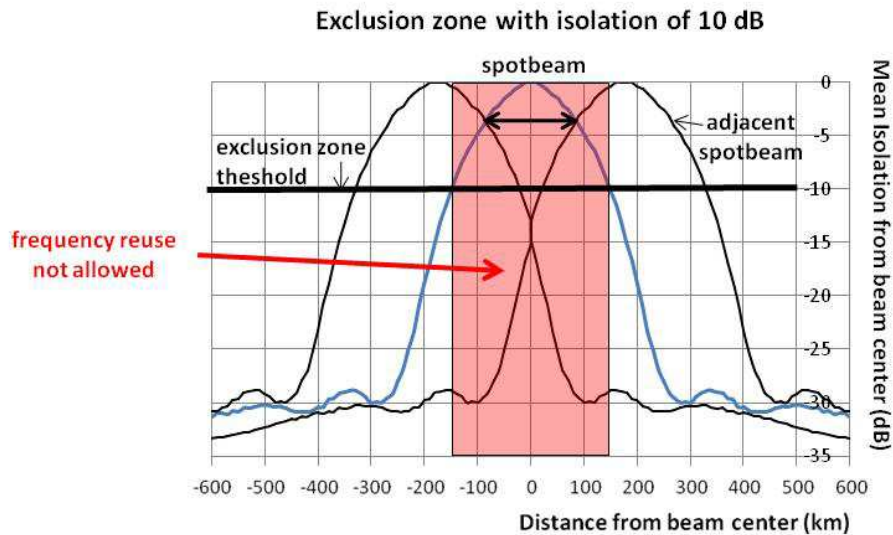
Comme nous l'avons montré dans le chapitre précédent, la réutilisation des fréquences satellite par le système terrestre n'est pas possible sans coordonner l'allocation des fréquences afin de conserver les interférences entre composantes sous un niveau acceptable (en particulier sur le lien uplink satellite). Nous avons évoqués plusieurs solutions pour réduire ces interférences (§2.3). Un des moyens les plus simples est de coordonner statiquement les fréquences (§2.3.3.1), i.e. d'élaborer un plan de fréquence coordonné entre les composantes satellite et terrestre. Pour déterminer les fréquences qui sont disponibles dans chaque cellule et faisceau, un moyen simple a été imaginé au début des années 2000 : le concept de zone d'exclusion ou bande de garde spatiale. En pratique, on établit le plan de fréquence satellite en attribuant une portion de la bande à chaque faisceau. Le plan de fréquences terrestres est ensuite asservi sur le plan satellite. Une cellule terrestre n'est autorisée à utiliser que les fréquences satellite qui ne sont pas considérées comme gênantes pour ce dernier i.e. qui ne sont pas utilisées par des faisceaux « proches » de la cellule. En effet, on considère qu'à partir d'un niveau d'isolation entre un faisceau satellite et une cellule terrestre, les interférences entre le faisceau et la cellule restent sous un niveau acceptable.

Nous avons donc entrepris d'appliquer ce concept à notre système afin de l'analyser et d'en évaluer les performances [2.21]. Dans ce chapitre, nous commençons par établir la définition de la problématique posée par le concept de zone d'exclusion (§3.1) puis la description du système que nous avons utilisé pour l'étude (§3.2). Le premier problème tient dans le dimensionnement de la zone d'exclusion (§3.3). Ensuite, nous avons évalué et analysé, pour notre système, les interférences de la composante terrestre sur le lien uplink satellite pour différentes configurations (§3.4). Enfin, nous définissons les caractéristiques de la source de ces interférences qui nous permettront d'aller plus loin par la suite (§3.5), avant de conclure (§3.6).

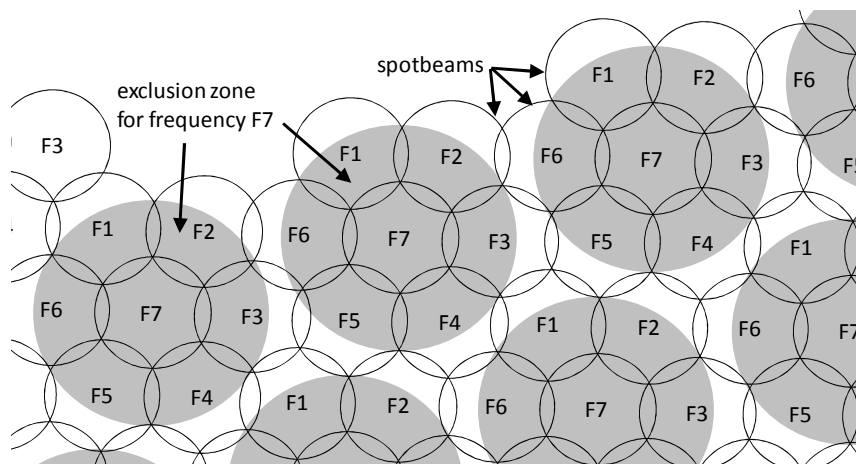
3.1. Problématique

Le concept de zone d'exclusion a été introduit par MSV en 2001 dans le brevet [2.3]. Il est ensuite décrit dans le papier [2.6] en 2003 qui a eu pour effet de le rendre populaire.

La zone d'exclusion d'un faisceau satellite correspond à la zone dans laquelle la fréquence de ce faisceau ne peut pas être réutilisée par le système terrestre. Cette zone est délimitée par un seuil évalué en dB d'isolation par rapport au gain antenne du centre du faisceau concerné. La Figure 3-1 montre un exemple avec un seuil de 10dB. La fréquence du faisceau central ne peut alors être réutilisée à moins de 150 km du centre du faisceau.



Dans un système satellite multifaisceaux avec un motif de réutilisation des fréquences à N couleurs, chaque faisceau utilise $1/N$ fraction de la fréquence totale. Dans la Figure 3-2, chaque faisceau du motif représenté utilise $1/7^{\text{ème}}$ de la fréquence disponible (noté de F1 à F7) et possède sa zone d'exclusion. Les zones d'exclusion pour la fréquence F7 sont représentées. La fréquence F7 peut donc être réutilisée par le système terrestre dans toutes les zones blanches de la figure.



Si on applique le concept à tous les faisceaux, nous obtenons le schéma de la Figure 3-3. Pour une station terrestre se trouvant dans le faisceau central (de fréquence F7), nous évaluons l'isolation d'antenne par rapport au centre de tous les faisceaux du motif. Nous obtenons l'isolation pour chaque faisceau et donc pour chaque fréquence. Dans notre exemple, les isolations avec les faisceaux de fréquences F4, F5 et F7 sont trop faibles pour autoriser l'utilisation de ces fréquences pour la station terrestre. La station peut donc utiliser les fréquences F1, F2, F3 et F6, soit $4/7^{\text{ème}}$ du spectre total.

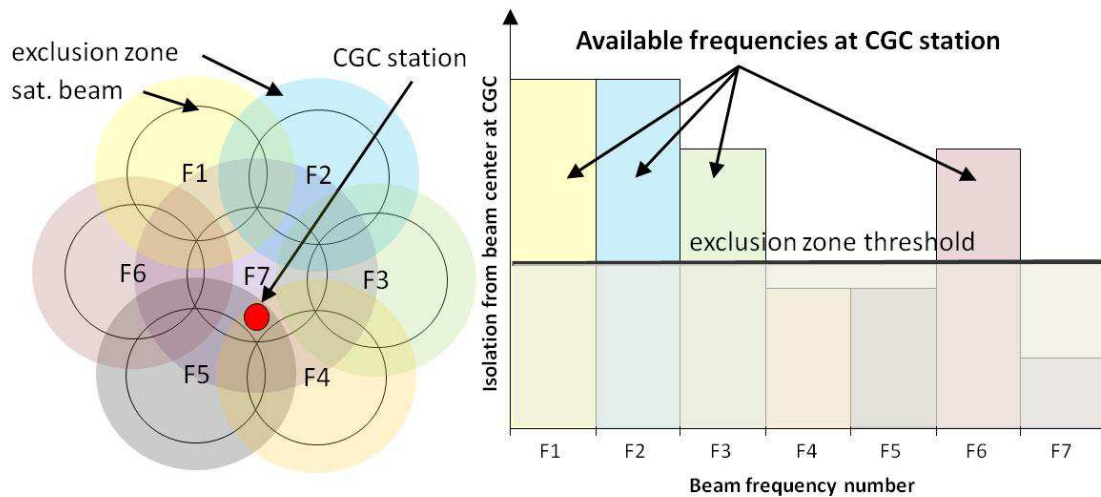


Figure 3-3 : Exemple des fréquences disponibles pour une station terrestre

En d'autres termes, on peut dire que le plan de fréquence terrestre est asservi par le plan de fréquence satellite. C'est sur la base de ce concept qu'en 2001, les opérateurs américains justifiaient auprès de la FCC la possibilité d'implanter la réutilisation des fréquences dans les systèmes intégrés.

Dans la partie 2.2.1.1, nous avons étudié le cas d'ICoI le plus critique pour le système (i.e. les interférences de la composante terrestre sur le lien uplink satellite) et montré qu'au-delà d'une certaine distance par rapport au centre du faisceau, les interférences mêmes agrégées deviennent négligeables. Le concept de zone d'exclusion vise à « exclure » les sources d'interférences potentielles proches du centre du faisceau. Introduire pour chaque faisceau une isolation de plusieurs dB entre le satellite et les équipements terrestres co-fréquence est-il suffisant pour protéger le système satellite ?

Pour pouvoir répondre à cette question, nous avons modélisé, simulé, puis analysé un système intégré sur l'Europe en y appliquant la réutilisation des fréquences et le concept de zone d'exclusion. Les résultats de cette étude sont publiés dans [2.21].

3.2.Scénario et outil

Afin d'étudier le concept de zone d'exclusion, nous l'avons appliqué à un système intégré complet et réaliste. Le segment satellite est composé d'un satellite HEO dont l'apogée se situe environ à 40000 km d'altitude. Il couvre l'Europe (EU27) avec 415 faisceaux maintenus fixes au sol. Les diagrammes antenne des faisceaux sont établis à partir de fichiers obtenus par simulation. Le segment terrestre est composé de stations de type GSM tri-sectorielles.

Dans un système intégré, les terminaux communiquent en mode satellite lorsque le réseau terrestre n'est pas disponible. Dans les zones urbaines, les terminaux sont considérés en mode terrestre et dans les zones rurales en mode satellite. En 2009, l'ensemble des zones dont la densité était supérieure à 50 hab./km² correspondait grossièrement à la couverture du réseau 3G au Royaume Uni [3.1]. Nous avons donc considéré qu'au-dessus de cette valeur, les terminaux fonctionnent en mode terrestre. Les répartitions moyennes des terminaux actifs satellite et terrestre sont données respectivement par la Figure 3-4 et la Figure 3-5.

Les utilisateurs sont répartis proportionnellement à la densité de population et non de manière uniforme sur la couverture, y compris les utilisateurs satellite. On constate alors que la majorité des terminaux satellite se situe dans les zones suburbaines (légèrement inférieures à 50 hab./km²). On pourrait toutefois penser que les utilisateurs satellite soient plutôt concentrés dans les zones désertiques. Or les systèmes intégrés visent le grand public qui est localisé dans les zones urbaines et suburbaines. Même si la probabilité de ne pas être couvert par le réseau terrestre y est plus faible que dans les zones désertiques (montagne et mer en Europe), le nombre d'utilisateurs potentiels y est bien plus important. En multipliant la probabilité de non-couverture par le nombre potentiel d'utilisateurs, il semble que ce soit dans les zones suburbaines que le nombre d'utilisateurs potentiels du satellite soit le plus grand. En effet, cette même hypothèse a poussé Viasat à lancé un service d'Internet par satellite aux USA qui ne couvre pas les zones désertiques du pays [3.2] et vise principalement les zones suburbaines qui sont « mal » desservies.

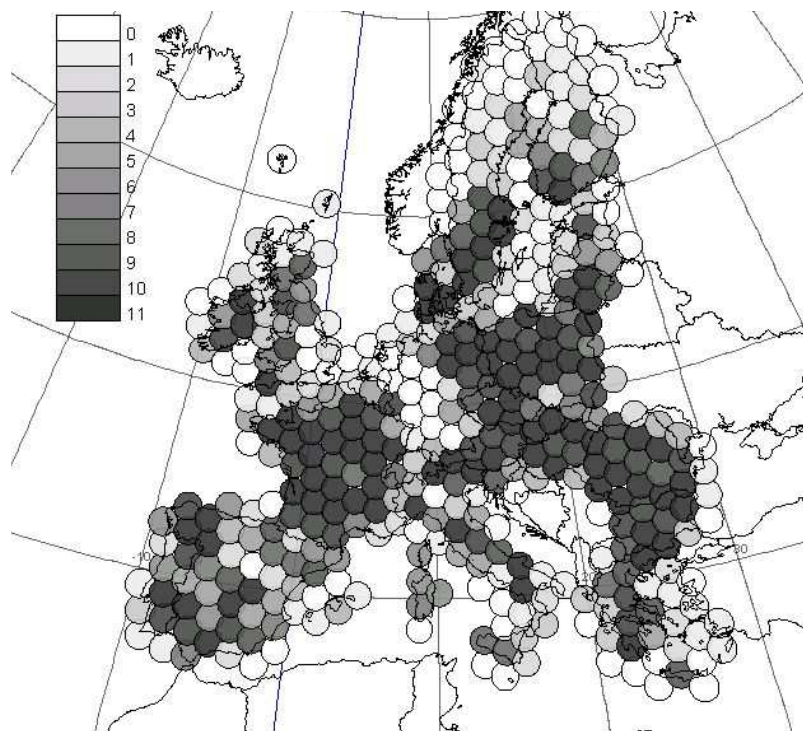


Figure 3-4 : Nombre moyen d'utilisateurs satellite par faisceau sur l'ensemble de la couverture

Etant données les spécificités de notre système, nous n'avons pu trouver d'outil existant permettant de le simuler. En particulier, nous avons besoin d'un outil capable de simuler un système satellite en coordonnées géographiques à l'échelle continentale et des cellules terrestres bien plus petites. Nous avons donc décidé de développer entièrement un outil de simulation, nommé ISIS (Interference Simulator for Integrated Systems). Il a été codé en Java et réutilise un module de cartographie open source (OpenMap) pour la visualisation. Il permet d'établir les bilans de liaison sur tous les liens entre utilisateurs satellite, terrestres, stations de base et satellite et ainsi d'analyser les performances du système. Nous avons utilisé ce simulateur pour l'étude de la zone d'exclusion et c'est avec ce dernier que nous avons obtenu tous les résultats présentés dans ce chapitre.

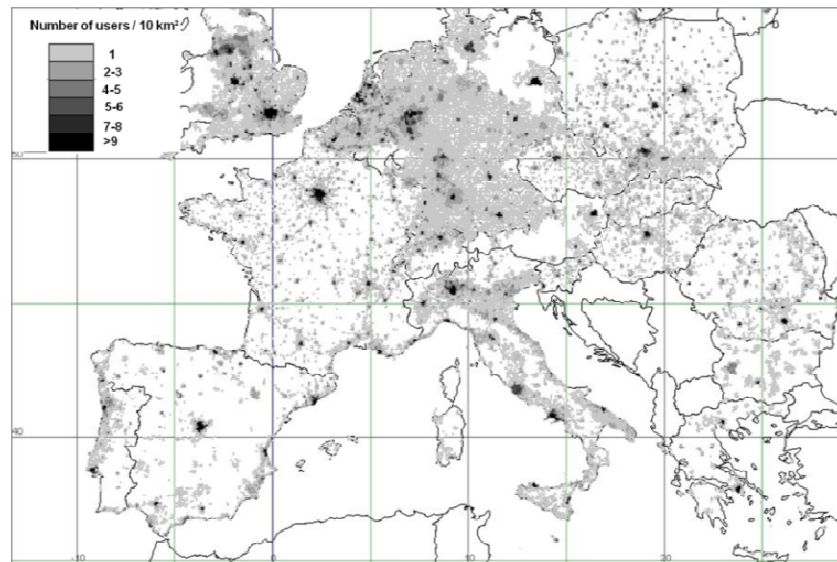


Figure 3-5 : Densité moyenne des utilisateurs terrestres (100 000 terminaux actifs)

3.3. Dimensionnement de la zone d'exclusion

Dans la littérature, la valeur de zone d'exclusion de 10 dB est souvent citée ([2.6], [2.13]), mais sans jamais vraiment en préciser la raison, ni les conséquences sur le système. L'effet recherché quand on détermine une zone d'exclusion à 10 dB est que le niveau des ICoIs entre le satellite et une cellule terrestre soit réduit d'un facteur 10 (au mieux) par rapport au niveau maximal d'interférence (i.e. lorsque la cellule se trouve au centre du faisceau). Toutefois, l'impact de ce choix sur le système est rarement précisé.

La conséquence principale est que la taille de la zone d'exclusion a un fort impact sur la capacité du système terrestre. Son dimensionnement doit résulter d'une étude comparative complexe entre les capacités des systèmes satellite et terrestre. Lorsque la zone d'exclusion est étendue, cela a pour effet de réduire les interférences inter-composantes au détriment de la fréquence disponible pour le système terrestre. De plus, la détermination de la valeur en dB de la zone d'exclusion dépend d'autres paramètres, dont les principaux sont:

- Le diagramme antenne des faisceaux satellite : comme nous exprimons la zone d'exclusion en dB, plus le diagramme d'un faisceau aura des bords « verticaux » (décroissance rapide du gain antenne en dehors du faisceau), moins la zone d'exclusion sera étendue en surface.
- Le nombre de couleurs du motif de réutilisation fréquentielle satellite : la distance entre les faisceaux de même fréquence en dépend. Pour une surface de zone d'exclusion donnée, la proportion de spectre disponible pour le système terrestre est plus élevée lorsque le nombre de fréquences du motif satellite est grand, comme le montre la Figure 3-6.

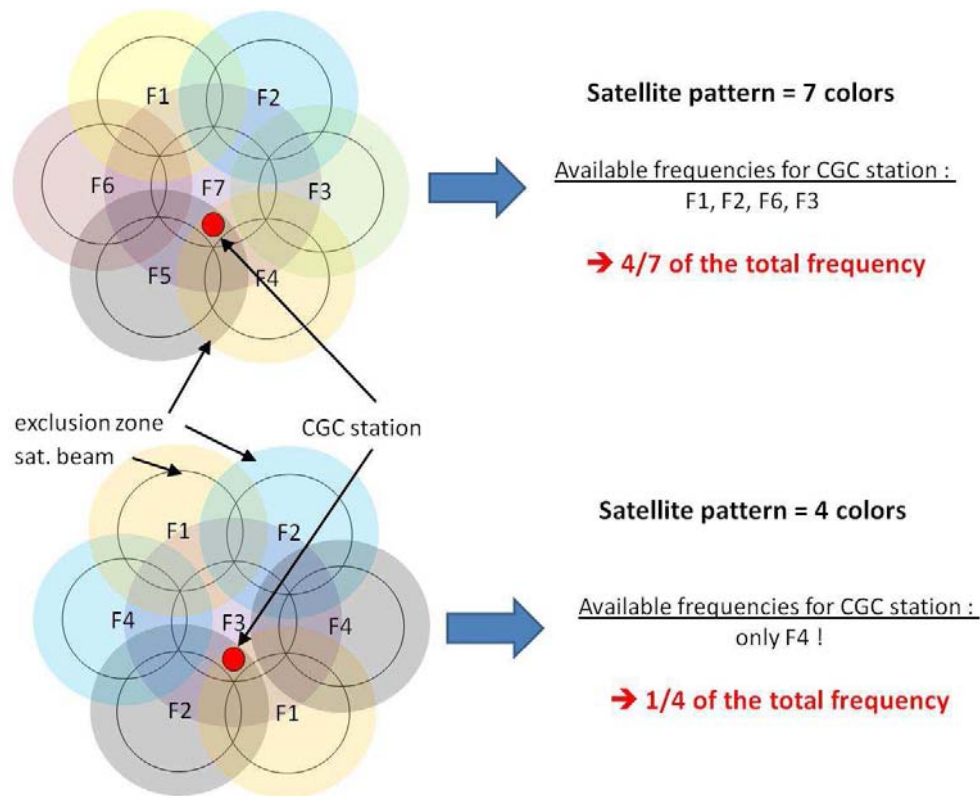


Figure 3-6: Proportion de spectre disponible pour le système terrestre en fonction du nombre de couleurs

Dans notre système, les diagrammes antenne de tous les faisceaux ont été calculés avec grande précision. Pour chaque faisceau, nous connaissons en chaque point de la couverture la valeur de gain antenne. En fonction du nombre de couleur du motif satellite et de la taille de la zone d'exclusion, nous pouvons donc déterminer si nous appartenons à la zone d'exclusion d'un faisceau (comme sur la Figure 3-6). Nous avons ainsi calculé sur l'ensemble de la zone de couverture, la proportion de fréquence moyenne disponible pour le système terrestre en fonction du nombre de couleurs du motif satellite ainsi que de la valeur de la zone d'exclusion en dB. Un exemple de résultats est présenté sur la Figure 3-7 pour un motif satellite à 7 couleurs. Sur cette figure, nous remarquons que :

- Un motif se répète régulièrement sur l'ensemble de la couverture: le centre des faisceaux dispose de plus de fréquence ; le cas le moins favorable pour le système terrestre se trouve à l'intersection de 3 faisceaux (voir aussi Figure 3-6).
- Le spectre disponible n'est pas homogène entre le centre et les bords de couverture du satellite qui ont moins de fréquence disponible. Ceci est dû à l'élargissement des faisceaux en bord de couverture (dû à la rotondité de la Terre) qui implique un élargissement de la zone d'exclusion et donc une diminution de la fréquence disponible pour le terrestre.
- Avec un motif satellite à 7 couleurs et au-delà de 7dB de zone d'exclusion, il apparaît des zones pour lesquelles aucune fréquence n'est disponible en terrestre (en noir sur la figure).

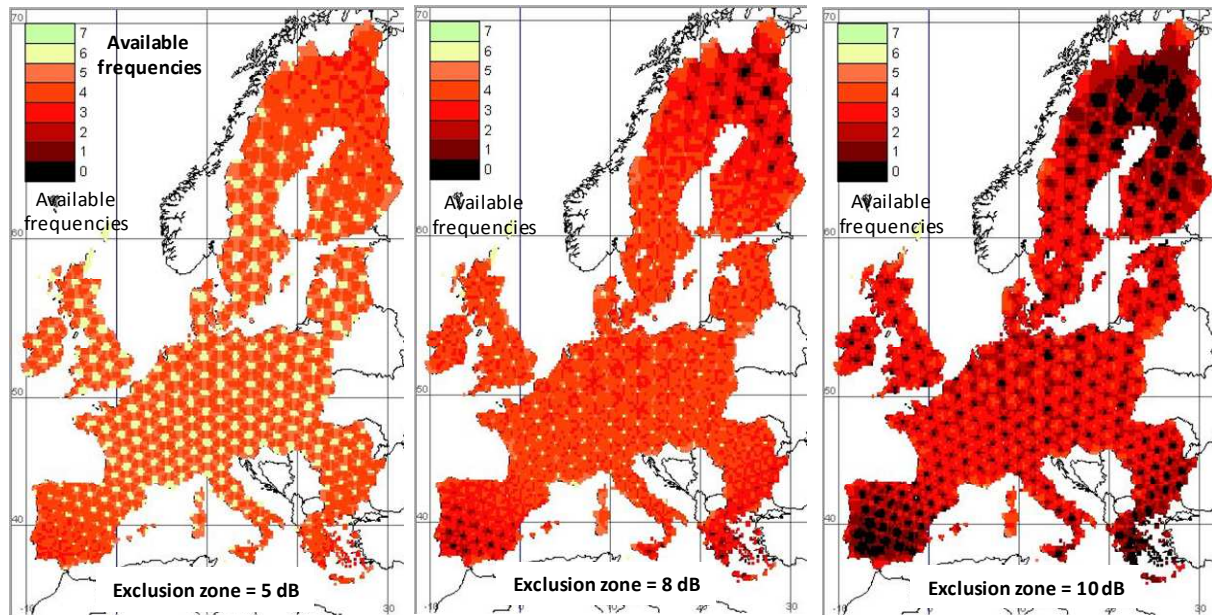


Figure 3-7 : Nombre de fréquences disponibles en terrestre pour différentes zones d'exclusion (motif satellite à 7 couleurs)

La Figure 3-8 résume les résultats pour différentes zones d'exclusion et motifs de fréquence satellite. Chaque point des courbes représente la moyenne sur l'ensemble de la couverture de la proportion de spectre disponible pour le système terrestre (i.e. la moyenne du nombre de fréquences disponibles comme sur la Figure 3-7 divisée par le nombre total de fréquences). Lorsque la courbe est en pointillés, cela signifie qu'il existe au moins 1% de la couverture pour lequel aucune fréquence n'est disponible pour le terrestre (zones noires sur la Figure 3-7). Cela signifie que dans ce cas, il existe ce cas des zones où le système terrestre ne peut émettre dans la fréquence satellite.

Ainsi avec le motif satellite à 4 couleurs, il ne semble pas possible d'appliquer le principe de zone d'exclusion. En effet, dès 5dB d'isolation, il apparaît des zones sans fréquence pour le système terrestre. Or en-dessous de 5 dB de zone d'exclusion, l'isolation entre systèmes satellite et terrestre est très faible (en général, le bord de faisceau se trouve à 3dB). Pour un motif à 7 couleurs, des zones sans fréquence pour le système terrestre apparaissent lorsque la zone d'exclusion excède 8dB. On peut aller jusqu'à 13 dB pour 9 couleurs et 17 dB pour 12 couleurs.

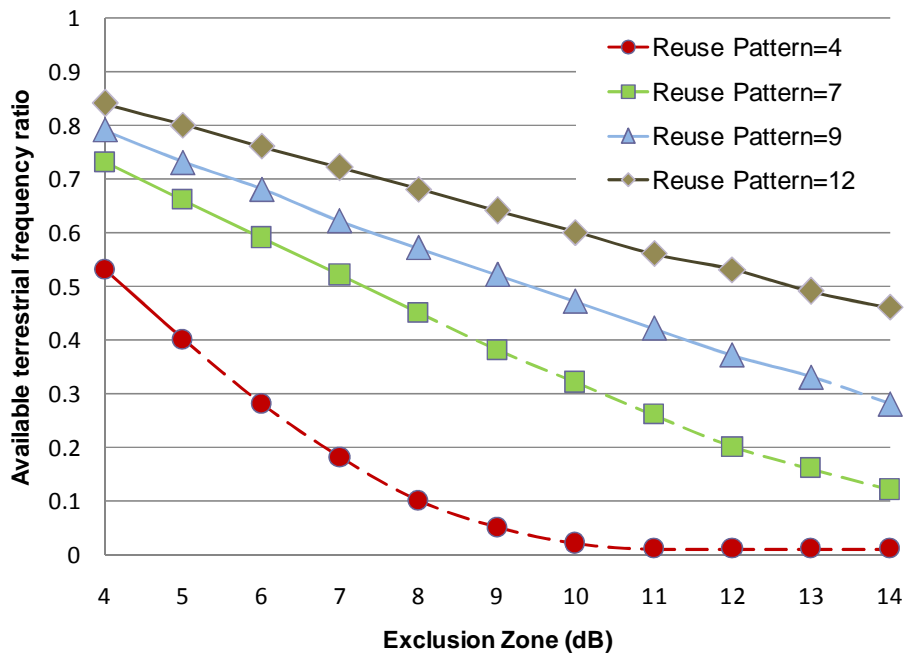


Figure 3-8 : Moyennes de la proportion de la fréquence disponible pour le système terrestre en fonction de la zone d'exclusion et du motif de réutilisation satellite (Reuse Pattern) à 4, 7, 9 et 12 couleurs

Les possibilités d'application du principe de zone d'exclusion sont donc relativement restreintes. Dans les systèmes mobiles satellite classiques, « non-intégrés », l'augmentation du nombre de couleurs n'a pour but que de réduire les interférences co-fréquence entre utilisateurs satellite. Pour notre système, au-delà de 9 couleurs, la diminution des interférences co-fréquences satellite est relativement faible. Nous n'envisagerons donc pas les cas avec plus de 9 couleurs dans la suite de l'étude, car la capacité satellite s'en trouverait trop réduite, sans pour autant améliorer le bilan de liaison de façon significative. Avec 7 couleurs, nous n'envisagerons pas de zone d'exclusion de plus de 9 dB, car au-delà il existe des zones terrestres sans fréquence disponible.

En conclusion, le choix de la zone d'exclusion couplé à celui du nombre de couleurs du motif de réutilisation des fréquences satellite se réduit à la détermination d'un point de fonctionnement optimal entre capacité du système satellite, capacité du système terrestre et niveau acceptable d'interférences co-fréquences intra et inter-composantes.

Les motifs de réutilisation des fréquences satellite à 4 couleurs ou moins ne peuvent être utilisés lorsqu'on applique le concept de zone d'exclusion dans notre système. En effet dans ce cas, il existe des zones sans fréquence disponible pour le système terrestre. Nous préférons donc des motifs à plus de 7 couleurs par la suite, même si cela réduit la fréquence disponible pour le satellite.

3.4. Evaluation des interférences inter-composantes du CGC sur le satellite

Après ces remarques préliminaires sur les compromis à trouver afin d'équilibrer la capacité entre les systèmes, nous présentons ici les performances de l'application du concept de zone d'exclusion sur les interférences inter-composantes. Comme identifié dans le chapitre 2, le cas d'interférences inter-composantes le plus critique est le cas des interférences de la composante terrestre sur le satellite dans le sens uplink. Comme nous nous plaçons en mode FDD direct, les sources d'interférences dans ce cas sont les utilisateurs terrestres. Nous avons donc évalué ces interférences en faisant varier différents paramètres pour comprendre leur influence sur la valeur de l'ICoI.

3.4.1. Les interférences co-fréquence dans les systèmes satellite

3.4.1.1. Notations

La puissance de l'interférence co-fréquence totale reçue par le satellite dans une fréquence uplink c_j d'un faisceau b_k est égale à :

$$(3.1) \quad I(c_j, b_k) = I_{sat}(c_j, b_k) + I_{ter}(c_j, b_k)$$

I_{sat} et I_{ter} correspondent à la somme des interférences co-fréquence générées respectivement par les terminaux satellite et terrestre.

$$(3.2) \quad I_{sat}(c_j, b_k) = \sum_{\substack{e_i \in \{U_{sat}\} \\ l \neq i}} P_{tx}(e_i, c_j) \cdot G_{tx}(e_i) \cdot L(e_i) \cdot F(e_i) \cdot G_{rx,sat}(e_i, b_k)$$

$$(3.3) \quad I_{ter}(c_j, b_k) = \sum_{\substack{e_i \in \{U_{ter}\} \\ l \neq i}} P_{tx}(e_i, c_j) \cdot G_{tx}(e_i) \cdot L(e_i) \cdot F(e_i) \cdot G_{rx,sat}(e_i, b_k)$$

où $\{U_{sat}\}$ et $\{U_{ter}\}$ représentent les ensembles des utilisateurs satellite et terrestre respectivement, $P_{tx}(e_i, c_j)$ est la puissance d'émission de l'équipement e_i dans le canal c_j , $G_{tx}(e_i)$ son gain antenne en direction du satellite. $L(e_i)$ représente les pertes de propagation en espace libre entre le satellite et l'équipement e_i , et $F(e_i)$ les pertes de propagation dues aux autres effets d'atténuation (masquage, *fast fading*). Enfin, $G_{rx,sat}(e_i, b_k)$ est le gain antenne satellite en direction de e_i dans le faisceau b_k .

3.4.1.2. Considérations sur les interférences

Contrairement aux systèmes cellulaires terrestres, les systèmes géo-mobiles satellite sont des systèmes dimensionnés par le bruit thermique. En effet à 2.2 GHz, les pertes dues à l'atténuation en espace libre sont de l'ordre de 190 dB pour un satellite GEO ou HEO. Or les terminaux mobiles satellite n'émettent qu'avec des PIRE relativement faibles (entre 0 dBW pour les terminaux *handheld* et 10dBW pour les terminaux véhiculaires). Les signaux sont donc reçus à des puissances très basses par le satellite (~ -167 dBm/Hz). Le bruit thermique est donc un facteur dimensionnant (~ -170 dBm/Hz).

Dans de tels systèmes, il est donc difficile de « boucler le bilan de liaison » et de faire en sorte que des signaux exploitables puissent être échangés entre le satellite et les terminaux de petite taille. La

communication ne peut être rendue possible que dans les meilleures conditions de propagation (terminal immobile et en ligne de vue directe du satellite) et d'interférences, notamment d'interférences co-fréquence.

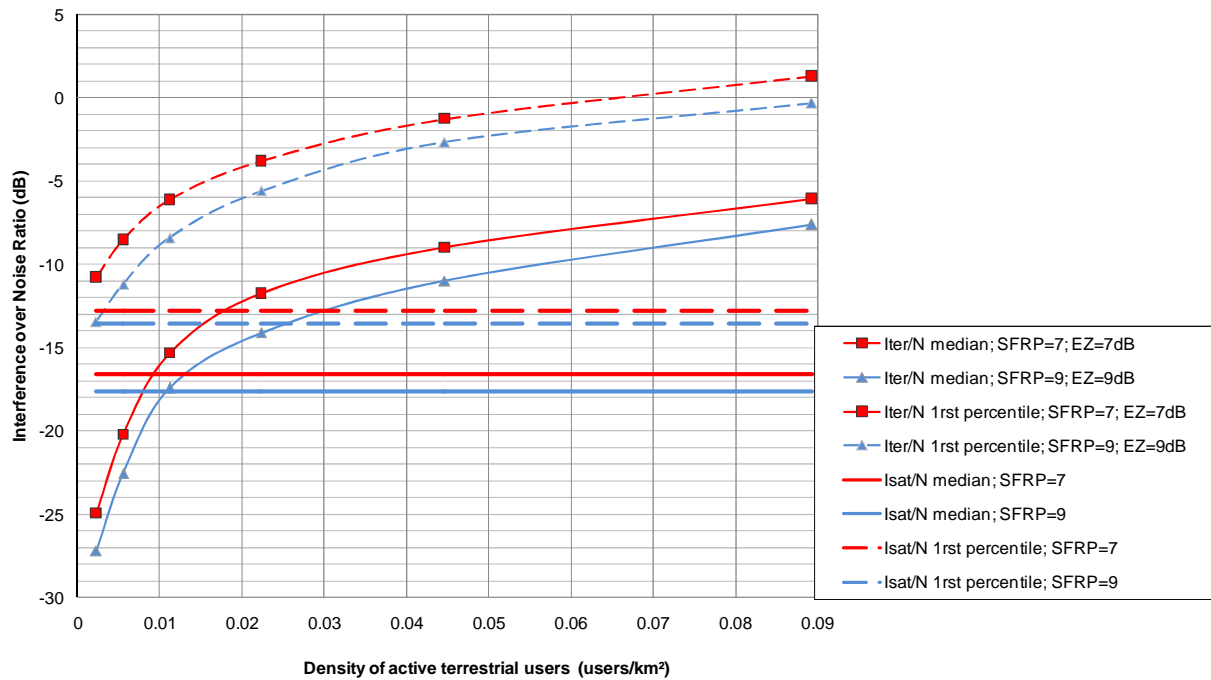
Pour cette raison, la puissance des interférences co-fréquences provenant des autres utilisateurs satellite (I_{sat}) doit être maintenue à un niveau très bas. Généralement, dans un système géomobile multifaisceaux, le système est conçu pour que le rapport interférences co-fréquences satellite sur bruit n'excède pas environ -15dB ($I_{sat}/N < -15\text{dB}$).

Nous supposons donc que dans un système intégré, la même contrainte doit s'appliquer sur le niveau d'interférence co-fréquences provenant des utilisateurs terrestres (I_{ter}). Comme nous l'avons vu dans la partie 2.2.1, cette contrainte se traduit par une limitation du nombre d'utilisateurs terrestres actifs simultanément sous la couverture satellite si l'on veut conserver un niveau d'ICoI acceptable. En effet, les interférences subies par la composante satellite croissent strictement avec le nombre de sources d'interférences, ici les équipements terrestres. La difficulté consiste à évaluer la valeur des interférences en fonction du nombre de ces sources. Dans cette étude, nous ne souhaitons pas ajouter un énième résultat sur la valeur absolue du nombre de sources d'interférence terrestre admissibles. Notre objectif se concentre plutôt sur l'identification et l'analyse de résultats qui puissent être généralisés à l'ensemble des systèmes intégrés.

3.4.2. Influence du nombre d'utilisateurs terrestres

Afin d'étudier l'influence du nombre d'utilisateurs terrestres, il faut déterminer des valeurs pour la zone d'exclusion (ZE) et le nombre de couleurs du motif satellite (SFRP pour Satellite Frequency Reuse Pattern). Nous en avons choisi deux : 7/7 (SFRP=7 et EZ=7dB) et 9/9 (SFRP = 9 et EZ=9dB) à partir des analyses précédentes (cf. §3.3). En effet avec ces configurations, le système terrestre dispose en moyenne de 52% de la fréquence satellite totale. La densité d'utilisateurs terrestres dans chaque canal fréquentiel est donc identique. La différence entre les deux configurations est que dans le cas 7/7 chaque faisceau dispose de 1/7^{ème} de la fréquence mais est moins protégé que dans le cas 9/9 pour lequel 1/9^{ème} de la fréquence est disponible dans chaque faisceau mais avec une protection plus grande. Nous discuterons plus loin l'effet de ces paramètres (§3.4.3).

Nous faisons varier le nombre d'utilisateurs terrestres actifs et observons les rapports interférence reçue en uplink satellite sur bruit. Nous distinguons pour les interférences co-fréquence provenant des autres utilisateurs satellite (I_{sat}/N) et des utilisateurs terrestres sur bruit (I_{ter}/N). Pour cela, nous avons évalué dans chacun des cas la médiane des observations ainsi que le 1^{er} percentile (pires cas pour des interférences). Les résultats sont présentés sur la Figure 3-9.



**Figure 3-9: Rapport Interférence sur Bruit en fonction du nombre de terminaux terrestres actifs.
2500 utilisateurs satellite actifs.**

Les interférences co-fréquence provenant des autres utilisateurs satellite ($I_{sat/N}$) ne varient pas en fonction du nombre d'utilisateurs terrestre et forment donc des droites sur le graphique. Nous les présentons afin de pouvoir les comparer aux interférences provenant des utilisateurs terrestres. Les constats que nous pouvons faire sont les suivants :

- Le 1^{er} percentile d'interférences terrestre est toujours supérieur au 1^{er} percentile des interférences satellite même pour un nombre d'utilisateurs terrestres relativement faible. De plus, on peut noter que par rapport aux interférences satellite, l'écart entre le 1^{er} percentile et la médiane est plus grand pour les interférences terrestres (10dB environ pour ces dernières contre 4dB pour les interférences satellite). D'un point de vue conception, cela pose problème car cela signifie que l'on doit dimensionner le système par rapport à ces pires cas d'interférence qui sont éloignés du cas médian.
- Le niveau médian des interférences terrestres dépasse rapidement celui des interférences satellite, à partir d'une densité de 10^{-2} utilisateurs terrestres actifs simultanément par km² (soit 50 000 utilisateurs sur notre couverture). Au-delà, la perte de capacité pour le système satellite est significative. Avec un pourcentage d'utilisation temporelle de 2.5 % (soit 18 min sur 12h) et un multiplexage de 8 utilisateurs sur une porteuse fréquentielle (comme en GSM), cela correspond à 16 000 000 d'utilisateurs terrestres pour ce système, ce qui est relativement faible pour un marché de la taille de l'Europe. Bien que ce résultat ne soit valide que pour notre modèle, il permet de fournir un ordre d'idée du nombre d'utilisateurs terrestres admissibles par le système. Sous d'autres hypothèses plus optimistes (puissances des terminaux terrestres, taux d'utilisation indoor), ce résultat pourrait bien sûr être amélioré. Cependant notre objectif ici est plus de caractériser les phénomènes qui influent sur le niveau des interférences. Ce nombre de 50000 est toutefois encourageant dans notre étude. En effet, pour susciter un intérêt commercial, il faudrait qu'il soit au moins multiplié par un facteur 10.

A l'inverse, divisé par 10, il serait décourageant pour des éventuels opérateurs. Nous nous trouvons donc à la limite d'obtenir un système opérationnel et il faut donc se pencher sur les voies d'améliorations.

3.4.3. Influence de la zone d'exclusion

Nous avons ensuite étudié l'influence du nombre de couleurs du motif de réutilisation des fréquences satellite (SFRP) et de la valeur de la zone d'exclusion sur les interférences. Les résultats de rapport interférences terrestres sur bruit sont présentés sur la Figure 3-10, en distinguant la médiane (en bleu) et le 1^{er} percentile (en rouge) des valeurs obtenues. Nous excluons certaines configurations où il existe des zones terrestres sans fréquence disponible, i.e. certaines valeurs de ZE pour un SFRP de 4 et 7 couleurs.

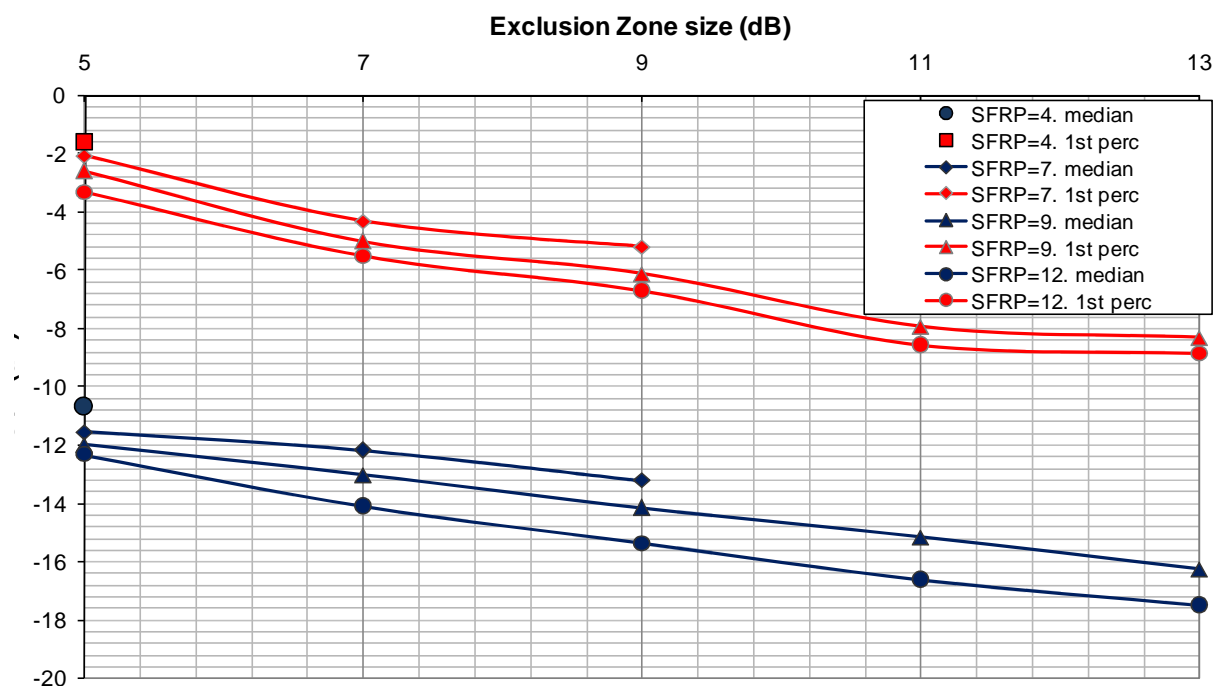


Figure 3-10: Rapport d'interférences terrestres sur bruit en fonction de la taille de la zone d'exclusion pour différents SFRP (4, 7, 9 et 12). 100 000 ut. terrestres

Comme le montre la figure ci-dessus, l'augmentation de la ZE résulte toujours en une baisse des interférences, ce qui est le but recherché. Etudions la courbe médiane des interférences pour un SFRP de 9 couleurs. En augmentant la ZE de 5 à 13 dB, soit 8 dB d'augmentation, les interférences ne sont réduites que de 5,7 dB (et non de 8 dB). La réduction d'interférences n'est donc pas proportionnelle à l'augmentation de la valeur de la ZE comme on aurait pu le penser. En effet, lorsque l'on augmente la ZE autour d'un faisceau, on « repousse » uniquement les utilisateurs co-fréquence proches du bord de celui-ci. Ceux qui se trouvaient déjà au-delà de la nouvelle zone ne sont pas affectés. La réduction effective des interférences n'a donc lieu que pour les utilisateurs terrestres se trouvant « entre » l'ancienne et la nouvelle zone d'exclusion. La réduction des interférences est donc toujours moindre que l'augmentation de la valeur de la zone d'exclusion.

En conclusion, le gain en interférence que l'on peut espérer par l'extension de la zone d'exclusion est limité au mieux à un facteur 10 environ dans notre système.

3.5. Etude des sources d'interférences

Dans la partie précédente, nous avons estimé les interférences terrestres et constaté qu'au-delà d'une certaine densité d'utilisateurs terrestres, autour de 10^{-2} ue/km² pour notre système, elles deviennent dommageables pour le système satellite. L'application du concept de zone d'exclusion seul ne permet pas de réduire les interférences d'un facteur important (10 au grand maximum) et toujours au prix de la capacité du système terrestre. Afin de découvrir des pistes d'amélioration, nous avons étudié les caractéristiques des sources d'interférences. En particulier, nous souhaitons déterminer si les interférences provenant de la composante terrestre résultent de l'agrégation de multiples sources d'interférences ou sont plutôt dues à des sources d'interférences isolées et de forts niveaux.

3.5.1. Définition des Sources Majeures d'Interférence

Pour cela, nous introduisons le concept de Sources Majeures d'Interférence (ou *Major Sources of Interference*, MSI). L'interférence I_{ter} subie par un utilisateur satellite provient de l'agrégation des interférences du nombre total d'utilisateurs terrestres co-fréquences (*Total Sources of Interference*, TSI). Si on classe les sources par ordre décroissant d'interférence engendrée vers le satellite, les MSI correspondent au groupe de sources les plus importantes dont l'agrégation est égale au moins à 90% de l'interférence totale (en rouge sur la Figure 3-11).

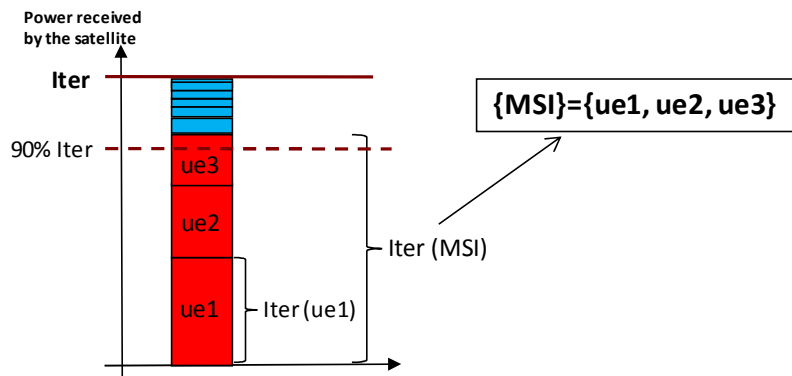


Figure 3-11 : Définition des sources majeures d'interférence

Dans cette partie, nous montrons les résultats que nous avons obtenus sur la caractérisation des sources d'interférences et en particulier sur les MSI.

3.5.2. Gravité des interférences et nombre de Sources Majeures

Les courbes de la Figure 3-12 permettent d'étudier la corrélation entre la gravité des interférences terrestres (leur valeur) et le nombre de sources majeures contributrices. Elles montrent 3 CDF caractérisant les interférences agrégées subies par les utilisateurs satellite dans une configuration (ZE et SFRP) donnée correspondant à 3 populations d'utilisateurs satellite:

- $(I_{ter}/N) > -12$ dB. Ce sont les utilisateurs satellite recevant les interférences terrestres les plus dommageables.
- $(I_{ter}/N) > -18$ dB. Ce sont les utilisateurs satellite recevant des interférences moyennement dommageables au pire.
- $(I_{ter}/N) < -18$ dB. Ce sont les utilisateurs satellite recevant des interférences peu dommageables.

Dans chacun des 3 cas, la CDF présente la proportion de sources majeures (MSI) par rapport au nombre total de sources d'interférences (TSI).

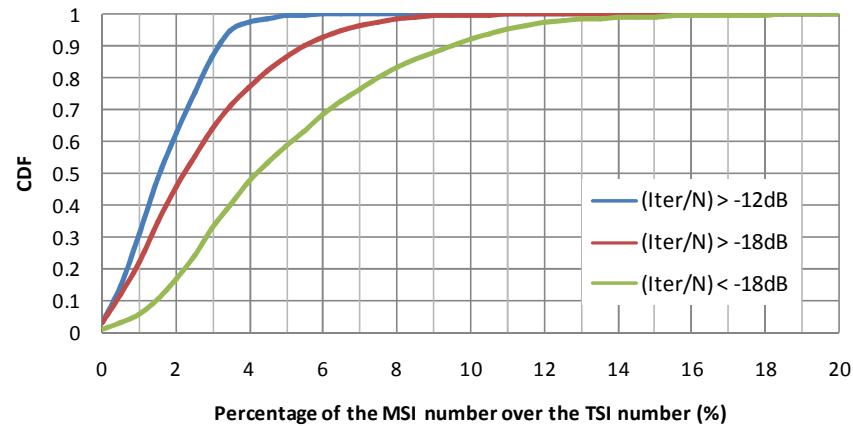


Figure 3-12: CDF de la moyenne du rapport du nombre de sources majeures sur le nombre total de sources ((MSI) / (TSI))

Les résultats obtenus sont très intéressants :

- Dans tous les cas, le nombre de MSI ne dépasse pas 20% du nombre total de sources. Cela corréle les résultats obtenus au §2.2.1.1 qui montraient qu'au-delà d'une certaine distance, les sources d'interférences ne sont plus contributrices, même en grand nombre.
- Plus un utilisateur satellite subit une interférence agrégée élevée, plus le nombre de MSI est faible par rapport au nombre de TSI i.e. plus l'interférence est le fait d'un petit nombre de sources. Pour les cas d'interférences les plus dommageables ($(I_{ter}/N) > -12$ dB), le nombre de MSI ne dépasse pas 6% du nombre total de sources avec une valeur médiane inférieure à 2%.

Ces résultats sont très encourageants pour la suite car ils dénotent un fait que nous pourrions exploiter pour réduire les interférences : l'ICoI sont plus le résultat de sources d'interférences isolées que de l'agrégation de sources d'interférences homogènes. Cela est d'autant plus accentué que les interférences sont élevées. Aussi, si on isole ces sources qui sont en petit nombre, il est possible de réduire d'au moins 90% les interférences.

Or l'ICoI a une dispersion importante (écart entre la médiane et le 1^{er} percentile dans le §3.4.2). Comme les cas les plus dommageables (le 1^{er} percentile typiquement) sont aussi ceux qui ont le moins de MSI, il serait aisé de réduire ces cas en isolant les MSI et ainsi de réduire cette dispersion.

3.5.3. Caractérisation des MSI

Étudions maintenant les caractéristiques des MSI pour déterminer si elles sont remarquables et si on peut les exploiter. Pour cela, nous avons étudié tous les paramètres qui entrent en jeu dans le calcul des interférences et qui sont dépendants de la source : sa puissance, sa position et son masquage vis-à-vis du satellite.

3.5.3.1. Puissance des MSI

La Figure 3-13 présente les CDF des puissances de transmission des utilisateurs terrestres. On distingue les cas « puissance de tous les utilisateurs terrestres » et « puissance des MSI ». Les courbes montrent très clairement que la puissance de transmission des MSI est bien supérieure à la puissance moyenne de tous les utilisateurs terrestres. On peut traduire cela par le fait que les MSI sont des utilisateurs éloignés de leur station de base ou masqués de celle-ci.

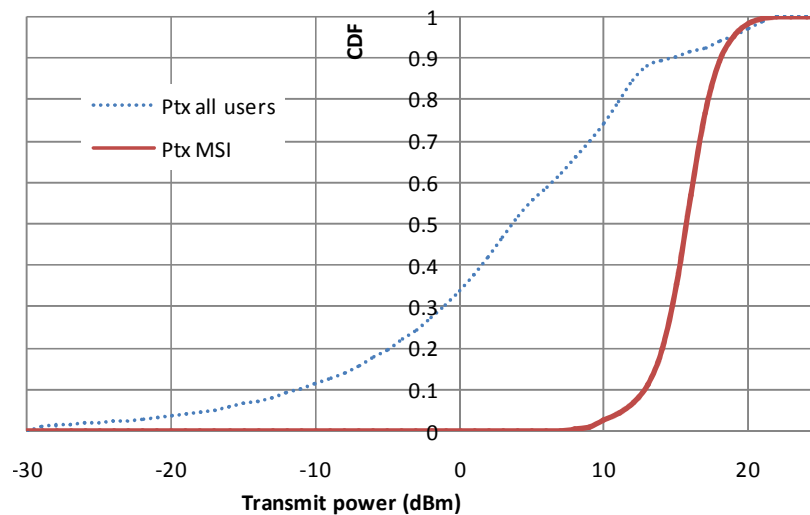


Figure 3-13: CDF de la puissance de transmission des MSI

3.5.3.2. Position

La Figure 3-13 présente les CDF des isolations de gain antenne entre le centre du faisceau interféré et les sources de l'interférence, caractérisant les interférences subies par les utilisateurs satellite qui sont supérieures à 12 dB sur le bruit, 18 dB et inférieures à 18 dB. Ces résultats ont été obtenus pour une zone d'exclusion de 9 dB, c'est l'isolation minimale que l'on peut donc obtenir entre le centre du faisceau et une source d'interférence.

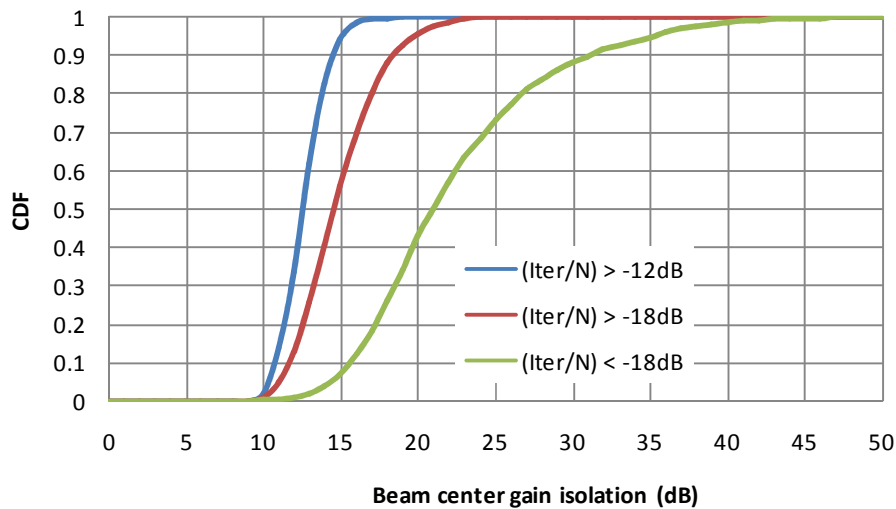


Figure 3-14: CDF de la moyenne d'isolation de gain antenne par rapport au centre du faisceau pour les MSI (SFRP = 9, ZE = 9dB)

Dans le cas $(I_{ter}/N) > 12\text{dB}$, l'isolation médiane est de 12 dB environ, soit 3 dB environ au-dessus de la ZE. Cela signifie que les MSI se trouvent très près de la bordure de la ZE. Moins les cas d'interférences sont sévères, plus les MSI sont éloignés de la bordure de la ZE (courbes rouge et verte).

3.5.3.3. Masquage

Enfin le dernier paramètre à étudier est le masquage des MSI avec le satellite. Les MSI ont en moyenne une perte due au masquage de 0,05 dB. Cela signifie que les MSI sont majoritairement en ligne de vue directe du satellite. Ce fait pourra aussi être exploité par la suite.

3.6. Conclusion

Dans cette partie, nous avons pu montrer comment certains paramètres influent sur la valeur des interférences agrégées provenant des utilisateurs terrestres et subies par le satellite. La coordination statique des interférences par l'application du concept de zone d'exclusion permet de réduire les interférences engendrées, mais au prix d'une réduction importante de la fréquence disponible pour le système terrestre. Aussi, si la zone d'exclusion est trop étendue, la bande passante utilisable pour le terrestre est réduite à zéro. Par conséquent, la réduction d'interférence est par principe limitée. Les évaluations d'interférences effectuées sur notre système montrent que le principe de zone d'exclusion n'est pas suffisant pour appliquer la réutilisation des fréquences, à moins de maintenir la densité d'utilisateurs terrestres très faible. Nous avons donc cherché d'autres méthodes afin de réduire ces interférences.

Pour déterminer les pistes de recherche, nous avons caractérisé les ICoIs :

- La différence entre la médiane des cas d'interférence et le 1^{er} percentile est important. Il est donc primordial de réduire cet écart et de s'occuper en priorité des cas les plus dommageables.

- Les pires cas d'interférences sont la conséquence d'un petit nombre d'utilisateurs terrestres. Leurs caractéristiques sont la proximité du bord de la zone d'exclusion et une émission à forte puissance en ligne de vue directe du satellite.

Dans la suite de notre thèse, nous avons donc exploité ces résultats pour mettre au point des méthodes de réduction d'interférence par une allocation de ressource dynamique qui tient compte de la valeur des différents paramètres des utilisateurs terrestres.

4.Coordination Avancée de l'ICoI – Application aux Schémas d'Allocation Terrestres

L'étude du concept de zone d'exclusion dans la partie précédente a mis en relief les limitations de cette technique et la nécessité de trouver d'autres solutions pour rendre possible la mise en œuvre du concept de réutilisation des fréquences. Nous avons aussi caractérisé plus précisément la nature des sources d'interférences terrestres sur le lien uplink satellite. Dans ce chapitre, nous allons tirer partie de ces caractéristiques pour définir puis étudier des schémas d'allocation coordonnée avancée de fréquences entre composantes satellite et terrestre.

Après avoir établi la problématique, nous décrivons le scénario d'étude pour lequel nous allons évaluer différentes techniques d'allocation. Nous définissons ensuite ces techniques. Enfin, nous présentons les résultats de l'étude.

4.1.Problématique

Le concept de zone d'exclusion ne suffit pas pour conserver un niveau d'ICoI acceptable sur l'uplink satellite. Un système intégré satellite-terrestre diffère d'un système cellulaire « classique » (terrestre ou satellite), où le nombre de sources d'interférence co-fréquence est limité géographiquement, et pour lequel la coordination statique des interférences par planification est suffisante. Dans les systèmes intégrés, le nombre de sources terrestres d'interférences co-fréquence peut théoriquement atteindre plusieurs milliers dans une zone géographique restreinte autour d'un faisceau. A moins de pouvoir garantir que la densité d'utilisateurs terrestres reste très faible en tout point et tout le temps, ce qui est une contrainte très forte sur le système, la coordination statique ne suffit pas pour appliquer la réutilisation des fréquences.

C'est pourquoi nous avons décidé d'établir des mécanismes d'allocation de ressources pour le système terrestre plus avancés qui non seulement s'appuient sur le concept d'isolation spatiale avec les faisceaux satellite, mais vont plus loin en tenant aussi compte des conditions des utilisateurs terrestres. En effet, dans le chapitre précédent, nous avons identifié des caractères très marqués des sources d'interférences principales. Les mécanismes décrits par la suite tirent donc profit de ces profils d'utilisateurs afin de réduire les ICoIs.

Conditionner l'allocation des ressources terrestres par la réduction des ICoIs a des conséquences importantes sur les performances du système terrestre. Dans le chapitre précédent, nous avons montré que la taille de la zone d'exclusion conditionnait la fréquence disponible pour le système terrestre. Dans ce chapitre, nous nous interrogerons aussi sur les conséquences de l'application de mécanismes d'allocation de ressources en termes d'interférence inter-cellules dans le système terrestre. Nous nous plaçons encore une fois dans le cas FDD direct et analysons les ICoI sur le lien uplink satellite.

4.2. Stratégies d'allocation

4.2.1. Interférences unitaires

Comme elle est définie dans l'équation 3.3, l'interférence inter-composante reçue par le satellite dans un faisceau b_k pour un canal c_j , notée $I_{ter}(c_j, b_k)$ est l'agrégation des interférences unitaires provenant de chaque équipement terrestre co-fréquence. L'interférence agrégée $I_{ter}(c_j, b_k)$ est égale à :

$$(4.1) \quad I_{ter}(c_j, b_k) = \sum_{e_l} I_{ter,unitaire}(c_j, b_k, e_l)$$

Cette interférence unitaire engendrée par un équipement terrestre e_l et reçue par le satellite dans un faisceau b_k pour un canal c_j , s'écrit de façon simplifiée :

$$(4.2) \quad I_{ter,unitaire}(c_j, b_k, e_l) = PIRE(e_l, c_j) \cdot L(e_l) \cdot F(e_l) \cdot G_{rx,sat}(e_l, b_k, c_j)$$

où $PIRE(e_l, c_j)$ est la PIRE de l'équipement e_l dans le canal c_j . $L(e_l)$ représente les pertes en espace libre entre l'équipement e_l et le satellite. $F(e_l)$ représente les pertes dues aux autres effets de propagation principalement le masquage entre l'équipement et le satellite. Enfin $G_{rx,sat}(e_l, b_k, c_j)$ est le gain antenne pour le faisceau b_k à la position de l'équipement e_l et pour le canal c_j . Par convention, nous admettons que $G_{rx,sat}(e_l, b_k, c_j)$ est nul dans le cas où la couleur attribuée au faisceau b_k ne contient pas le canal c_j .

4.2.2. Facteurs de réduction d'interférence

Pour réduire l'ICoI agrégée, une solution consiste à réduire chaque composante unitaire $I_{ter,uni}$ de l'interférence totale, en particulier celles provenant des sources majeures (MSI) qui représentent 90% du niveau total. L'idée principale derrière notre principe de réduction d'interférence est simple : le système terrestre essaie d'identifier les utilisateurs terrestres les plus susceptibles de gêner le satellite et les « isole » afin qu'ils n'engendrent pas d'interférence en leur attribuant des canaux « moins sensibles ». C'est ce que nous appelons « ICoI Aware ».

Pour cela, l'allocation des ressources dans les cellules terrestres doit prendre en compte certains paramètres qui font varier l'ICoI. Ces paramètres sont ceux qui apparaissent dans la formule (4.2) : les pertes en espace libre, le gain antenne satellite pour les différents canaux, la PIRE des terminaux terrestres, leur facteur de blocage. Certains de ces paramètres sont les mêmes pour tous les terminaux (pertes en espace libre et gain antenne) dans une cellule donnée, les autres sont dépendants de ces derniers (PIRE, blocage).

4.2.2.1. Pertes en espace libre

En première approximation, nous pouvons considérer que les pertes en espace libre entre le satellite GEO ou HEO et les équipements terrestres sont toutes égales (moins de 1dB de différence entre le minimum et le maximum sur notre couverture). De plus, nous essayons ici de différencier les utilisateurs terrestres d'une même cellule. Or à l'échelle d'une cellule (30 km de rayon maximum en bande S), l'écart entre le maximum et le minimum de perte en espace libre est au plus de 0.01 dB. Ce paramètre est donc indépendant des terminaux dans une cellule donnée.

4.2.2.2. Gain antenne satellite

Pour une cellule donnée, nous pouvons définir un gain antenne satellite pour chaque canal (ou une isolation par rapport au centre). Ce gain est déterminé comme le gain antenne du faisceau utilisant le canal qui est le plus élevé (généralement le plus proche de la cellule). Comme pour les pertes en espace libre, on peut considérer en première approximation que le gain antenne d'un faisceau est le même dans toute la cellule. Pour notre diagramme antenne, même lorsque où la décroissance du gain avec la distance est la plus importante, la différence de gain pour 30 km (la rayon maximum d'une cellule) est inférieure à un dB. De plus, nous considérons que les terminaux terrestres opèrent en zone urbaine ou suburbaine avec des cellules de rayon 1500 mètres maximum. Ce paramètre est donc indépendant des terminaux dans une cellule donnée pour notre système.

4.2.2.3. PIRE des terminaux

L'interférence engendrée par un terminal est proportionnelle à sa PIRE qui elle-même est proportionnelle à la puissance d'émission du terminal. Dans notre système, nous considérons qu'un contrôle de puissance idéal est appliqué. La puissance du terminal dépend donc des pertes de propagation entre la BS et le terminal et des interférences co-fréquence provenant des autres terminaux terrestres. Ce facteur dépend donc de chaque terminal terrestre.

4.2.2.4. Facteur de masquage

Le facteur de masquage entre le terminal et le satellite est bien sûr dépendant de chaque terminal. Pour nos simulations, il est déterminé selon le modèle de Pérez-Fontan [3.3]. Dans un système intégré, les utilisateurs terrestres sont principalement localisés en zone urbaine. Les probabilités de masquage avec le satellite sont donc élevées avec des facteurs d'atténuation importants. C'est donc un paramètre à prendre en compte dans les stratégies de réduction d'interférence.

Il faut noter que sous certaines conditions les facteurs de masquages entre terminal/satellite et entre terminal/BS peuvent être corrélés, en particulier en zone dégagée (LOS du satellite et de la BS). La PIRE du terminal étant liée à son facteur de masquage avec la BS, il pourrait donc exister une corrélation entre PIRE et facteur de masquage satellite. Toutefois en zone urbaine, les nombreux canyons urbains font que la corrélation entre les deux est certainement faible. Nous avons donc considérés que la PIRE des terminaux et le facteur de masquage satellite n'étaient pas corrélés.

4.2.3. Principes d'allocation de fréquence coordonnée avec le système satellite

Pour cette étude, nous avons défini trois stratégies d'allocation de fréquence coordonnée avec le système satellite. Ces stratégies seront ensuite appliquées aux schémas d'allocation terrestre.

4.2.3.1. Principe 1 – « Satellite Indépendant » (SI)

Ce premier principe marque en fait l'absence de coordination entre composante satellite et terrestre. Les ressources dans le système terrestre sont attribuées de façon aléatoire en suivant le schéma d'allocation établi dans le système terrestre. La position de la cellule dans le motif de fréquence satellite ou les conditions des utilisateurs terrestres ne sont pas prises en compte.

Ce principe servira de point de référence pour évaluer les autres principes. C'est en quelque sorte un « pire cas ».

4.2.3.2. Principe 2 – « Position Aware » (PA)

Ce principe rejoint celui de zone d'exclusion. En effet, l'attribution des fréquences pour les cellules terrestres va dépendre de la position de la cellule dans le motif de fréquence satellite i.e. de l'isolation de gain avec chaque faisceau du motif. Pour une cellule donnée, on évalue l'isolation avec chaque faisceau représentant chacun une couleur du motif (Figure 4-1). Ensuite, les fréquences sont attribuées dans l'ordre où elles sont les moins gênantes pour le satellite (la plus grande isolation possible). Ce principe marque le premier niveau de coordination avec le satellite. Toutefois, il reste statique puisque les faisceaux et les cellules sont immobiles.

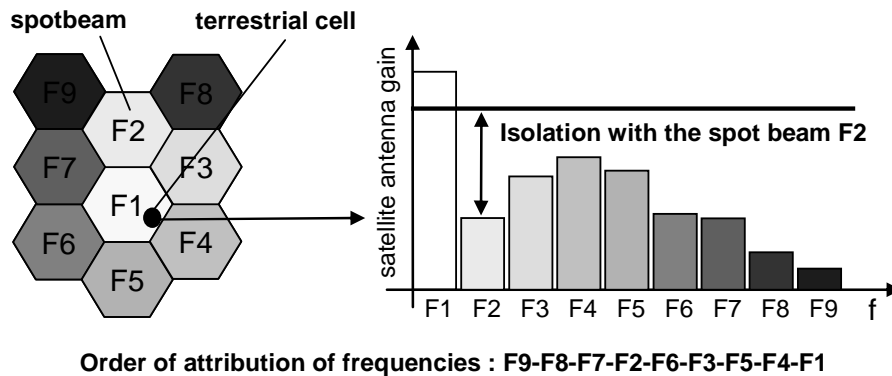


Figure 4-1 : Principe d'allocation "Position Aware"

4.2.3.3. Principe 3 – « ICoI Aware » (IA)

Ce principe va plus loin que le précédent dans la coordination. De la même façon que pour « Position Aware », les fréquences sont triées par ordre d'isolation avec le satellite. Le système terrestre va ensuite allouer les fréquences les moins gênantes aux utilisateurs qui présentent les caractères les « plus menaçants » pour le satellite, et inversement. Pour ce faire, nous définissons un nouveau paramètre : la puissance potentielle d'interférence. Plus il est élevé, plus l'utilisateur est considéré comme étant potentiellement gênant pour le satellite (défini ci-dessous). L'IPP (Interference Potential Power) est évalué pour tous les utilisateurs au moment de l'allocation de ressource. On attribue ensuite aux utilisateurs de plus forts IPP les fréquences dont l'isolation est la meilleure.

Puissance Potentielle d'Interférence

Ce paramètre noté $IPP(e_l)_{dB}$ est propre à chaque utilisateur terrestre e_l . Sa formule est donnée par :

$$(4.3) \quad \begin{aligned} IPP(e_l)_{dB} &= PIRE(e_l)_{dB} - PL_{sat}(e_l)_{dB} \\ &= I_{sat}(e_l)_{dB} - G_{rx,sat}(e_l)_{dB} \end{aligned}$$

Il correspond à la puissance de l'interférence émise par un utilisateur et reçue par le satellite au niveau de son antenne. Il est une fonction des facteurs dépendants des utilisateurs (c.f.§4.2.2) : la PIRE ($PIRE(e_l)_{dB}$) et les pertes de propagation avec le satellite ($PL_{sat}(e_l)_{dB}$ pour path loss). Pour le path loss, on considère au premier ordre les pertes de propagation en espace libre comme indépendantes des utilisateurs. Par conséquent, seul le facteur de masquage avec le satellite est dépendant des utilisateurs.

Formulé autrement, $IPP(e_l)_{dB}$ est la puissance de l'interférence reçue ($I_{sat}(e_l)_{dB}$), moins le gain antenne satellite ($G_{rx,sat}(e_l)_{dB}$).

Dans l'algorithme d'allocation de la BS, les canaux sont alloués en fonction de l'IPP de chaque utilisateur. On connaît le path loss de chaque utilisateur, en revanche la PIRE n'est pas connue au moment de l'allocation. En effet, comme nous appliquons un contrôle de puissance, elle dépend du canal qui est alloué à l'utilisateur. L'allocation se fait donc à partir d'une estimation de l'IPP qui est fondée sur une estimation de la PIRE ($PIRE_{est}(e_l)_{dB}$) donné dans la formule ci-dessous.

$$(4.4) \quad PIRE_{est}(e_l)_{dB} = f(PL_{ter}(e_l)_{dB}, G_{rx_BS}(e_l)_{dB})$$

La PIRE estimée correspond à la PIRE de l'utilisateur calculée en boucle ouverte pour que ce dernier atteigne un rapport signal à bruit souhaité. Elle est une fonction du path loss entre la BS et l'utilisateur ($PL_{ter}(e_l)_{dB}$) ainsi que du gain antenne de la BS dans la direction de l'utilisateur ($G_{rx_BS}(e_l)_{dB}$), qui n'est pas le même dans toutes les directions pour notre modèle (cf. Table 4-1).

En résumé, le potentiel d'interférence d'un utilisateur terrestre est principalement fonction de sa PIRE et de son facteur de masquage avec le satellite.

4.2.4. Application au schéma d'allocations terrestres

Pour le système terrestre, nous définissons 3 familles de schémas de réutilisation des fréquences auxquels seront appliqués les principes définis précédemment :

- Famille A – Schéma « 1-reuse » : Les cellules terrestres utilisent tout le spectre disponible.
- Famille B – Schéma 3 couleurs : Chaque cellule n'utilise qu'un tiers du spectre, le but étant de ne jamais utiliser la même bande de fréquence qu'une cellule adjacente.
- Famille C – Schéma de réutilisation partiel ou Partial Frequency Reuse (PFR) : C'est un compromis entre les deux familles précédentes. Les cellules sont découpées en deux « zones », centrale et extérieure. Dans la zone centrale, la plus proche de la station de base au sens des pertes de propagation, toutes les cellules utilisent la même fréquence, soit une partie de la fréquence totale. Le reste de la fréquence disponible est divisé en trois parties qui sont attribuées aux portions extérieures de chaque cellule selon un schéma à trois couleurs (cf. Figure 4-2).

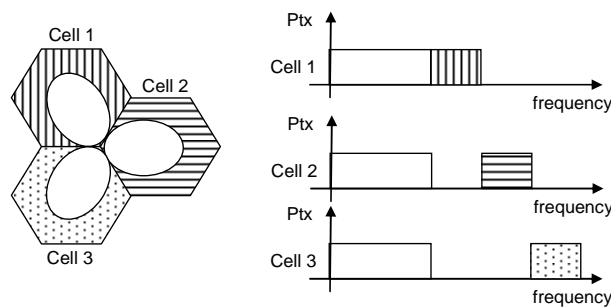


Figure 4-2 : Schéma de réutilisation fréquences partiel (PFR)

Les familles retenues proviennent de schémas « classiques » terrestres. Le 3-reuse est généralement

utilisé dans le GSM. Le 1-reuse offre une plus grande capacité globale, bien que les performances en bord de cellule soient dégradées du fait des interférences inter-cellules. Il est envisagé pour le LTE. Le PFR a été également proposé comme compromis entre les deux précédents.

Afin de faciliter les algorithmes d'allocation, nous découpons le spectre en 9 bandes correspondant aux 9 couleurs du schéma satellite. La Figure 4-3 présente les 3 familles de schémas terrestres (A, B et C) et la correspondance avec les couleurs satellite.

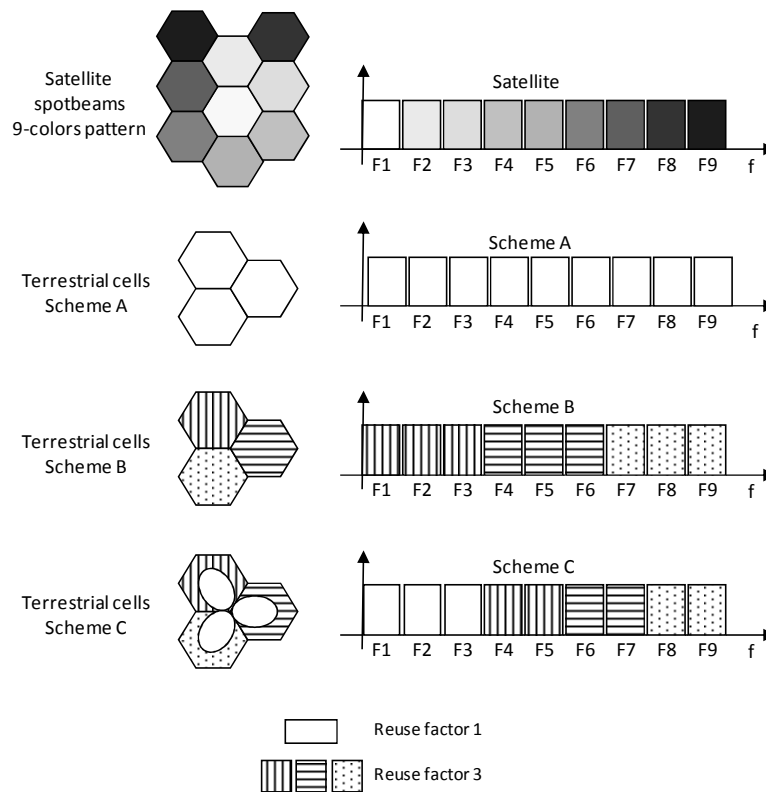


Figure 4-3 : Schémas de réutilisation de fréquence terrestre

Chaque principe d'allocation coordonnée de ressources est ensuite appliqué aux 3 familles, ce qui nous donne 9 schémas d'allocation de ressources en tout, notés A1, A2, A3, B1, B2, B3, C1, C2 et C3. La lettre représente la famille et le chiffre le principe d'allocation.

4.2.5. Exemple d'application

Appliquer les principes d'allocation coordonnée aux schémas d'allocation terrestre à plusieurs couleurs n'est pas une opération triviale (familles B et C). En effet, on attribue à chaque « couleur » terrestre, un certain nombre de fréquences correspondant aux « couleurs » satellite. Or pour une cellule donnée, les isolations de gain antenne satellite dans chaque couleur satellite sont différentes. Les couleurs satellite ne sont donc pas toutes équivalentes vu de la cellule. Lorsque l'on alloue les fréquences satellite aux cellules, il faut donc prendre en compte le gain antenne satellite de chaque fréquence.

La Figure 4-4 montre comment allouer les couleurs pour les familles B et C dans un cas particulier. Dans cet exemple, nous avons « équilibré » la somme des gains antennes des couleurs satellite allouées aux cellules du motif terrestre. Pour ce faire, on attribue aux couleurs satellite une note de 1 à 9 par gain décroissant (cf. Figure 4-4).

Pour la famille B (schéma terrestre 3 couleurs), nous allouons 3 couleurs satellite à chaque couleur terrestre de façon que les sommes des notes de gains soient équilibrées (=15). Pour la famille C, nous allouons d'abord les fréquences satellite de plus fort gain à la partie centrale des cellules. En effet, ce sont les couleurs les plus gênantes pour le satellite, or les terminaux au centre des cellules émettent généralement avec des PIRE plus faibles qu'à l'extérieur. Nous allouons ensuite 2 couleurs satellite à chacune des 3 couleurs terrestres de façon à ce que les sommes des notes de gains soient équilibrées (=13). Pour chaque cellule, cela donne donc 5 couleurs satellite, dont 3 au centre et 2 à l'extérieur. La limite entre zone centrale et extérieure sera donc placée de sorte que 3/5^{ème} des terminaux se trouvent au centre.

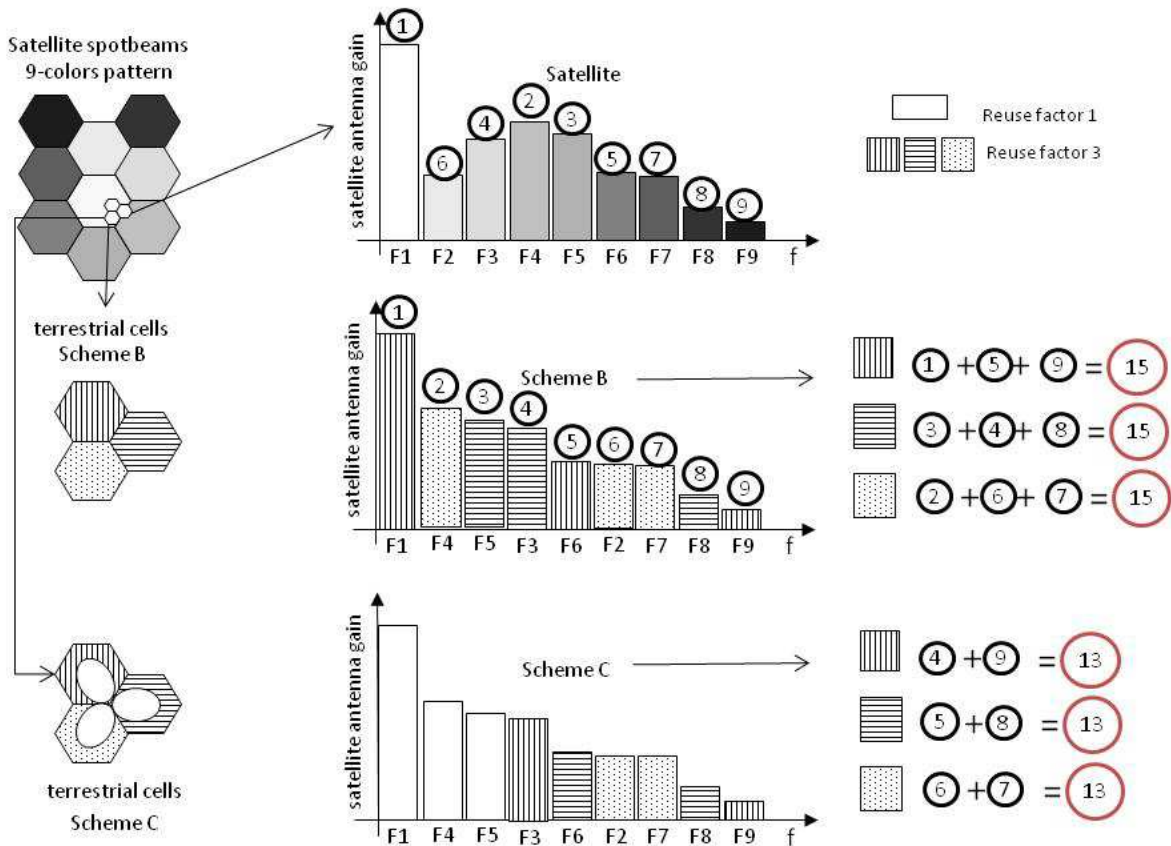


Figure 4-4: Exemple d'allocation des couleurs pour les familles B et C en fonction du gain antenne satellite

4.3.Scénario et outil

4.3.1. Système

Dans cette partie, nous décrivons le scénario pour lequel nous allons évaluer différentes techniques d'allocation de ressources. Comme nous l'avons vu au chapitre précédent, plusieurs centaines de milliers d'utilisateurs terrestres peuvent communiquer simultanément, dans un système intégré de la taille de l'Europe. Il est difficile de simuler précisément le système cellulaire terrestre avec autant d'utilisateurs. Or, l'étude de mécanismes d'allocation de ressources nécessite un niveau de modélisation relativement précis. Nous avons donc décidé de ne modéliser qu'un sous-ensemble représentatif de système intégré.

Notre système est donc limité à une configuration de 19 faisceaux satellite, extraite de la couverture utilisée jusqu'à présent. Nous répartissons 19 clusters de cellules terrestres représentant des zones urbaines. Nous évaluons ensuite les interférences générées par ces clusters sur le faisceau central (cf. Figure 4-5). Comme nous l'avons démontré dans la partie 2.2.1.1 (cf. Figure 2-8), les interférences générées par les utilisateurs terrestres présents dans un disque de 360 km de diamètre autour d'un faisceau génère 99% des interférences. Un ensemble des 19 faisceaux contient un disque de 600 km de diamètre. On peut donc considérer que l'interférence générée par les terminaux terrestres au-delà de ce disque est négligeable.

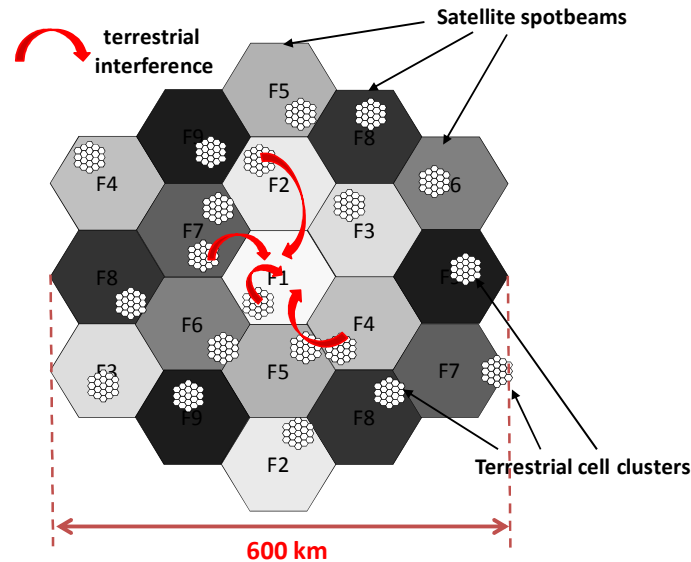


Figure 4-5 : Interférences du système terrestre engendrées sur le faisceau central

Un cluster de cellule terrestre est composé de 57 cellules au total, générées par 19 sites avec 3 antennes tri-sectorielles de 120° (cf. Figure 4-6). Les principaux paramètres du modèle sont donnés dans la Table 4-1.

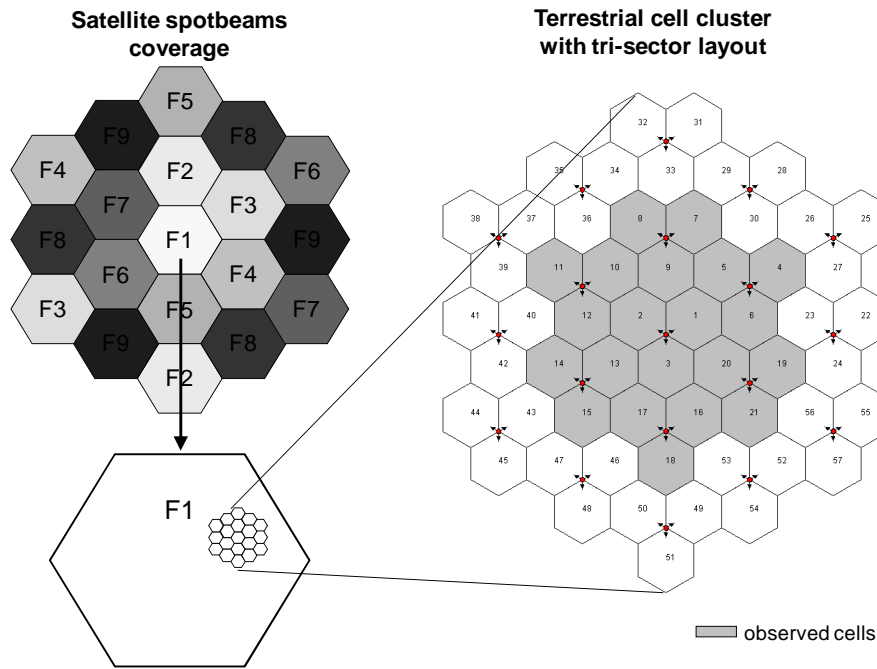


Figure 4-6: Configuration des faisceaux et des cellules terrestres

Table 4-1 : Principaux paramètres du modèle

Parameter	Value
Carrier Frequency	2GHz
Bandwidth	15 MHz
Number of PRBs	72
PRB bandwidth	180 kHz
Satellite antenna pattern	Realistic pattern files
Satellite Channel Model	Pérez Fontán [3.5]
Spot beam diameter	200 km
Terrestrial cell cluster latitude	45°N
Terrestrial Inter Site Distance	1000m
BS/UE antenna gain	15dBi/0dBi
BS antenna attenuation pattern	$A(\theta) = -\min\left[12\left(\frac{\theta}{\theta_{3dB}}\right)^2, A_m\right]$ $\theta_{3dB} = 70^\circ, A_m = 20dB$
Terrestrial Channel Model	WINNER II (C2) [4.1]
Terminal Min/Max power	-30dBm/24dBm

4.3.2. Gestion des ressources spectrales

Nous supposons que l'interface radio utilisée pour les systèmes satellite et terrestre est issue du standard LTE. Pour le plan de fréquence satellite, les 15 MHz de spectre disponibles sont découpés en 9 couleurs, comportant chacune 8 Physical Resource Blocks (PRB) soit 72 en tout. Dans LTE, un PRB est défini comme l'unité de ressource minimale d'allocation. Il s'étend en fréquence sur 180kHz (12 sous-porteuses OFDM de 15 kHz) et en temps sur un TTI (Transmission Time Interval). Nous supposons que les PRBs satellite et terrestre correspondent parfaitement en temps et en fréquence. Cette hypothèse permet de faciliter les calculs d'interférence inter-composante. Sa mise en œuvre peut

toutefois s'avérer complexe car elle nécessite une synchronisation entre systèmes satellite et terrestre en temps et en fréquence.

En fonction du schéma d'allocation de ressources terrestre choisi (familles A, B ou C) chaque cellule terrestre se voit attribuer un certain nombre de « couleurs » satellite comme expliqué dans la partie 4.2.5. Puis, chaque utilisateur terrestre se voit attribuer une couleur satellite définie en fonction du principe d'allocation choisi (1, 2 ou 3). Ensuite, un unique PRB est déterminé aléatoirement, parmi les 8 de la couleur puis alloué à l'utilisateur. La famille A (1-reuse) permet donc d'atteindre au maximum 72 utilisateurs actifs simultanément par cellule, la famille B (3-reuse) seulement 24, et la famille C (PFR) 40. C'est pourquoi dans les courbes que nous présentons par la suite, le nombre maximum d'ue./cell. n'est pas le même pour les 3 familles.

Une fois qu'un PRB est alloué à un utilisateur, la puissance initiale d'émission de ce dernier est fonction de la perte de propagation avec la BS. Une boucle de contrôle de puissance fermée est ensuite appliquée, avec pour objectif un SINR de 10,5 dB.

4.3.3. Logiciel utilisé

Afin d'étudier les schémas d'allocation définis dans ce chapitre, nous avons adapté l'outil utilisé précédemment pour l'analyse de la zone d'exclusion. Cette fois, nous souhaitons simuler de façon bien plus précise le système terrestre. En effet, dans la première version du logiciel, les cellules terrestres étaient simulées de façon indépendante sans aucune interaction entre elles (notamment concernant les interférences inter-cellules). Nous avons donc amélioré ISIS (§3.2) afin qu'il intègre une couche terrestre plus détaillée. Le système terrestre est donc simulé par cluster de cellules dans un repère différent du repère géographique satellite. Les utilisateurs terrestres possèdent donc deux jeux de coordonnées : un pour le système terrestre et un pour le système satellite.

4.4. Analyse des performances

Dans cette partie, nous présentons les performances des 9 schémas, en terme d'interférences engendrées sur la composante satellite (cf. §4.4.1) ainsi que sur les performances du système terrestre (cf. §4.4.2).

4.4.1. Analyse des Interférences inter-composantes

4.4.1.1. Méthode d'évaluation de l'ICoI

Dans le chapitre 3, nous avons simulé des utilisateurs satellite et terrestres. Les interférences évaluées dans ce chapitre étaient les interférences reçues par le satellite dans des canaux fréquentiels effectivement alloués à des utilisateurs satellite.

Ici, seuls les utilisateurs terrestres sont modélisés et nous évaluons la puissance des signaux émis par le système terrestre dans tous les canaux et qui sont reçus par les faisceaux satellite. Pour ce faire, nous avons modélisé un cluster de cellules terrestres dans chaque faisceau (distribué aléatoirement), puis évalué l'agrégation d'interférences engendrées sur le faisceau central (cf. Figure 4-5).

Nous avons fait varier le nombre d'utilisateurs terrestres dans les cellules de 8 à 72 au maximum pour le schéma de réutilisation totale du spectre (1-reuse). A titre de comparaison avec les résultats trouvés précédemment, nous donnons la correspondance avec la densité d'utilisateurs sur la couverture (Table 4-2).

Table 4-2 : Correspondance entre nombre d'ue. par cellule et densité moyenne des ue.

Nue / cellule	Nue / cluster	Nue / couverture	Densité moyenne (Nue./km ²)
8	456	8664	0.03
16	912	17328	0.06
24	1368	25992	0.09
32	1824	34656	0.11
40	2280	43320	0.14
72	4104	77976	0.25

La gamme de valeur d'interférence que nous obtenons avec de telles densités est assez élevée, présentant des ($Iter / N$) entre -25 et 20 dB. Toutefois, cela nous permet de comparer les schémas et principes d'allocation.

4.4.1.2. Comparaison des schémas d'allocation terrestres

La Figure 4-7 présente le rapport ($Iter / N$) moyen pour les 3 schémas d'allocation terrestre. Afin de les comparer, nous avons utilisé ici le principe 1 (« satellite independant ») i.e. les PRBs sont déterminés aléatoirement parmi les couleurs disponibles dans la cellule.

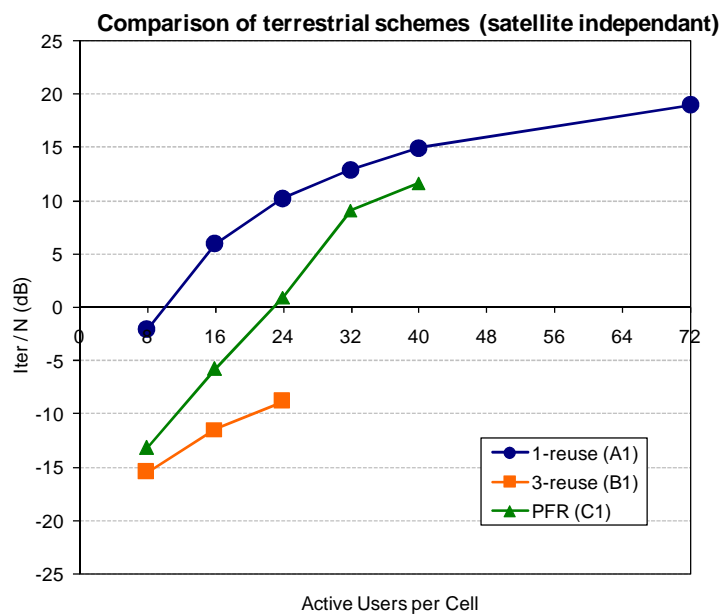


Figure 4-7 : Comparaison des schémas d'allocation terrestre

Les valeurs d'interférences présentent des écarts significatifs entre les schémas. Le schéma 1-reuse est la solution engendrant le plus d'ICoI. A faible charge (8 ue. par cellule), son ($Iter / N$) est 13 dB au dessus du 3-reuse et 11 dB au dessus du PFR. Comme le principe d'allocation est aléatoire, ce résultat provient principalement d'un seul facteur : la puissance d'émission des terminaux terrestres. En effet, le système terrestre que nous avons modélisé est urbain et donc plutôt dimensionné par les

interférences. Dans le cas 1-reuse, où les interférences co-fréquence inter-cellule sont importantes, les terminaux augmentent leur puissance afin de compenser les interférences. Ainsi, même si la charge est faible dans le schéma 1-reuse, la puissance moyenne de transmission des terminaux est plus forte que pour les autres schémas (PFR et 3-reuse).

Lorsque la charge augmente, le phénomène s'accroît pour le 1-reuse. Les interférences inter-cellule augmentent, et donc la puissance d'émission doit aussi être augmentée. Cet effet combiné (augmentation du nombre de sources d'interférences et de leur puissance) résulte en une très rapide augmentation de l'ICoI. À l'inverse, le schéma à 3 couleurs ne souffre presque pas du problème d'interférence inter-cellule. Ainsi, l'augmentation des ICoIs est proportionnelle à la charge (au nombre de sources d'interférences), avec un coefficient proche de 1.

Enfin, le schéma PFR présente un compromis entre le 1-reuse et le 3-reuse. À faible charge, ses performances sont proches du 3-reuse, et à forte charge, elles se rapprochent de celles du 1-reuse. L'augmentation avec la charge est d'ailleurs très rapide. En effet, le spectre disponible pour les utilisateurs en centre de cellule est réduit à $3/9^{\circ}$ du spectre total. Les interférences inter-cellule entre utilisateurs au centre augmentent donc très vite, ce qui se traduit par une augmentation de leur puissance d'émission et donc de l'ICoI.

En conclusion, le schéma 3-reuse est de loin le plus performant en termes d'ICoI. En revanche, il restreint le spectre disponible dans chaque cellule et donc a priori la capacité du système terrestre (cf. §4.4.2).

4.4.1.3. Comparaison des principes d'allocation coordonnée

La Figure 4-8 présente les valeurs d'ICoI sur le bruit pour les 9 schémas d'allocation en fonction de la charge de la cellule. Les résultats sont présentés par famille de schéma d'allocation terrestre.

Principe « ICoI Aware » (IA)

Pour tous les schémas terrestres, le principe IA conduit aux meilleures performances. Pour le schéma 3-reuse, il permet de gagner environ 9dB par rapport à un schéma d'allocation aléatoire, quelle que soit la charge. En effet, en 3-reuse, l'augmentation de la charge n'implique pas une augmentation significative de la puissance d'émission des utilisateurs pour compenser l'interférence inter-cellule. On obtient donc toujours le même gain par « classement » des utilisateurs dans les fréquences satellite.

Dans le cas du 1-reuse, les gains sont moindres (7 dB au plus), surtout à faible et à forte charges (environ 3 dB). En effet, à faible charge, l'application du principe IA implique que les couleurs satellite avec les meilleures isolations sont allouées prioritairement. De ce fait, toutes les cellules utilisent ces couleurs en priorité. Par conséquent, les interférences inter-cellule sont aussi élevées à faible ou à forte charge. Cela induit une augmentation de la puissance d'émission des terminaux (pour compenser l'ICI) et donc une augmentation de l'ICoI.

Dans le cas du PFR, le gain est assez petit à faible charge (3 dB) et monte à plus de 8 dB à forte charge. En effet, à faible charge, les terminaux engendrant les plus d'ICoI (en bord de cellule) se voient allouer les fréquences avec la meilleure isolation (cf. Figure 4-4). Les interférences inter-cellules étant relativement faibles, les utilisateurs centraux émettent à faible puissance et n'engendrent donc pas beaucoup d'ICoI. On gagne donc peu à leur allouer les fréquences de forte isolation. À forte charge, les terminaux au centre émettent avec une puissance supérieure, et le gain obtenu par l'application du principe est donc plus important.

Principe « Position Aware » (PA)

A faible charge, les performances du principe PA sont très proches de celles du principe IA. En effet, lorsque la charge ne dépasse pas 8 utilisateurs par cellule (une fréquence satellite), seule la fréquence de meilleure isolation est allouée dans les deux cas. La valeur des interférences est donc la même pour les deux principes. A forte charge, le principe perd son efficacité. Toutes les fréquences sont allouées et les performances se rapprochent de celles du principe SI.

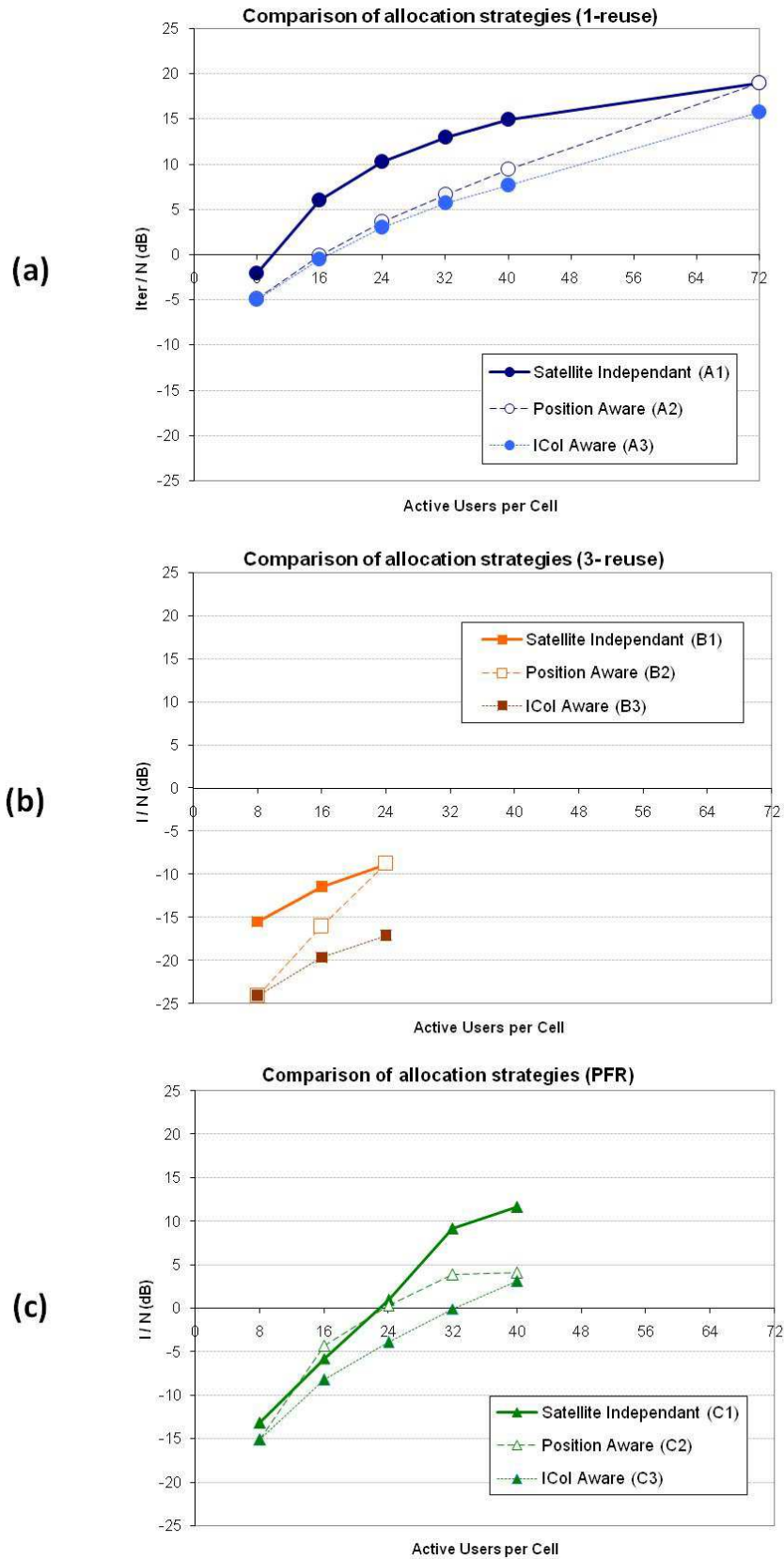


Figure 4-8: Rapport I/N en fonction du nombre d'utilisateurs terrestres actifs par cellule.

(a) Comparaison des stratégies d'allocation pour le schéma 1-reuse

(b) Comparaison des stratégies d'allocation pour le schéma 3-reuse

(c) Comparaison des stratégies d'allocation pour le schéma PFR

4.4.2. Performances du système terrestre

Le fait de coordonner l'allocation de ressources dans le système terrestre a des conséquences sur les performances de ce dernier. Dans le chapitre précédent, nous avons vu que l'application du principe de zone d'exclusion aboutit à la réduction du spectre disponible pour le système terrestre, ce qui réduit d'autant sa capacité. Dans ce chapitre, nous n'avons pas limité le système terrestre dans son utilisation du spectre (tout le spectre est utilisable, contrairement au principe de Zone d'Exclusion), mais plutôt dans la manière dont il alloue les ressources. Par conséquent, nous avons analysé l'impact de l'application de chaque schéma d'allocation sur le SINR dans le système terrestre, ainsi que sur la capacité des cellules.

4.4.2.1. Analyse du SINR

Quel que soit le mécanisme d'allocation de ressources choisi, le système effectue un contrôle en puissance des utilisateurs. La puissance initiale est déterminée à partir des pertes de propagation entre l'UE et sa BS. Ensuite, une boucle de contrôle est appliquée avec pour objectif d'atteindre un SINR de 10,5 dB. Cette valeur peut être excédée, dans le cas où l'UE se trouve au plus proche de la BS et émet à puissance minimale. Si les interférences sont trop importantes et que l'UE émet à puissance maximale, elle peut ne pas être atteinte.

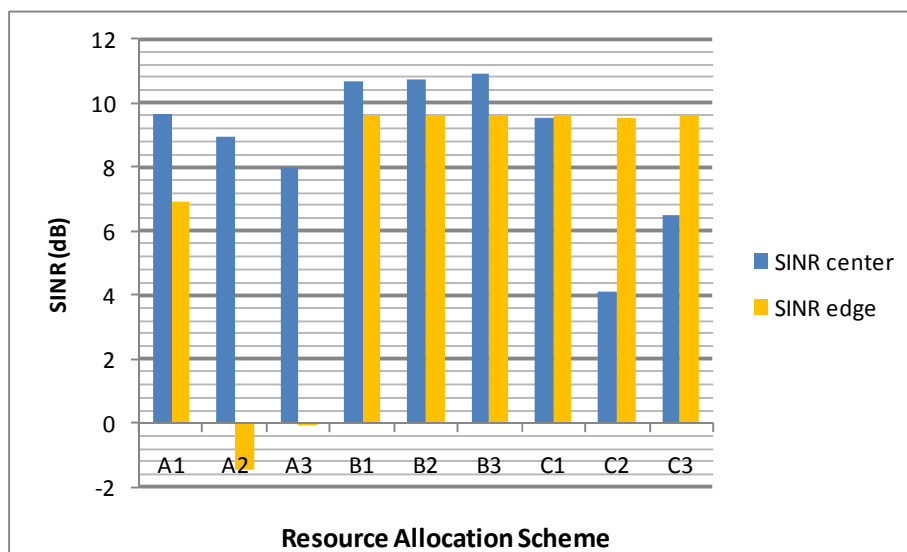


Figure 4-9 : SINR moyen des ue. des cellules en fonction du schéma d'allocation de ressource. SINR pour les ue. au centre des cellules (bleu) et sur la zone extérieure (jaune) (24 ue. actifs par cellule)

Dans cette partie, nous analysons les moyennes de SINR obtenues pour les UEs se trouvant dans les parties centrale et extérieure des cellules (cf. Figure 4-9). Le SINR ne tient compte que des interférences co-fréquences (pas de multi-trajet ni de fast fading). Le 1-reuse (famille A) présente les résultats de SINR les moins bons, en particulier dans la zone extérieure, ce qui est attendu. L'application des principes PA (A2) et IA (A3) est très dommageable concernant les interférences à tel point que les UEs extérieurs ne peuvent pas communiquer (SINR trop faibles). Pour le 3-reuse (famille B), les résultats sont satisfaisants puisque le SINR cible est atteint en moyenne au centre, et quasiment atteint sur l'extérieur. Ils restent stables quel que soit le principe d'allocation. Le PFR (famille C) présente des résultats similaires au 3-reuse à l'extérieur, ce qui est cohérent. Toutefois au centre, la moyenne des SINR est relativement faible lorsque l'on applique les principes PA et IA,

comme pour le 1-reuse. En effet, pour les principes PA et IA, le système « classe » les fréquences satellite et les alloue aux utilisateurs dans un certain ordre. Les PRBs alloués sont donc concentrés dans un nombre minimal de fréquences. Cela a pour effet de maximiser le nombre d'utilisateurs co-fréquence, même à faible charge, et donc d'augmenter l'ICI (Inter-Cell Interference).

4.4.2.2. Analyse de la capacité

Nous définissons la capacité maximale de la cellule comme la somme de la capacité fournie par tous les PRBs utilisés dans la cellule, comme suit :

$$(4.5) \quad Capacity_{cell} = \sum_{i=1}^N Capacity_{PRBi}$$

Où PRBi est le $i^{ème}$ PRB et N est le nombre total de PRBs utilisés dans la cellule.

La capacité d'un PRB est donnée par l'équation de Shannon pour un canal AWGN, en remplaçant le SNR par le SINR du canal uplink des UE.

$$(4.6) \quad Capacity_{PRBi} = BW_{PRBi} \times \log_2(1 + SINR_{PRBi})$$

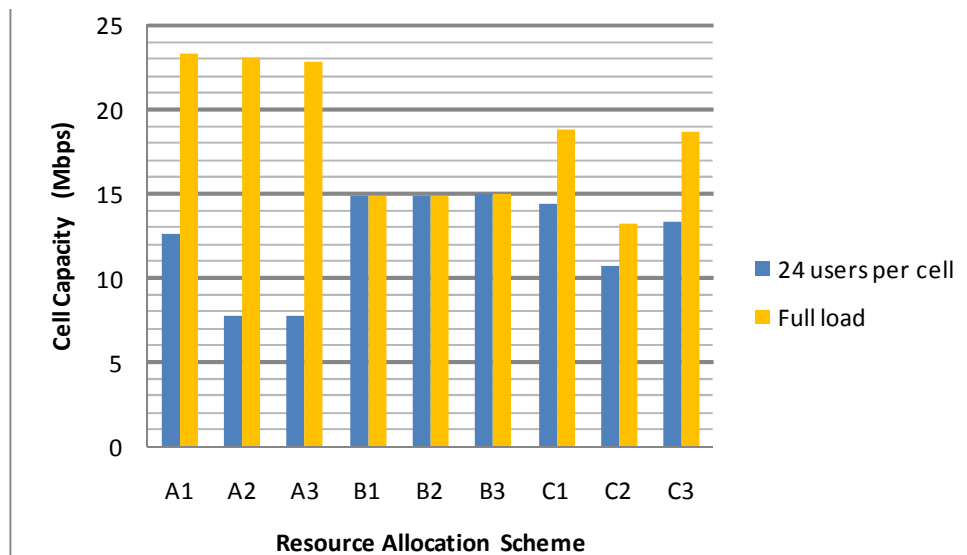


Figure 4-10 : Capacité moyenne des cellules en fonction du schéma d'allocation de ressource. 24 ue. actifs par cellule (bleu) et à pleine charge (jaune)

La Figure 4-10 présente les résultats de capacité moyenne de cellule pour chacun des schémas. Les capacités ont été calculées pour 24 UE par cellule et à pleine charge. Le 1-reuse fournit les capacités les plus élevées à pleine charge, principalement au centre des cellules. L'application des principes PA et IA affecte peu les performances à pleine charge, du fait que l'ICI est élevée quel que soit le principe. Le PFR fournit des résultats intermédiaires à pleine charge sauf pour l'application du principe PA à cause de l'ICI.

Dans le cas 24 UE par cellule, les résultats les meilleurs sont obtenus avec le 3-reuse, ce qui fait de ce schéma le plus économe en ressource spectrale lorsque les besoins en capacité du système terrestre sont moyens.

4.5. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons proposé deux principes d'allocation de fréquences coordonnée entre système satellite et terrestre. Le premier, appelé « Position Aware » (PA), se présente comme l'extension du principe de zone d'exclusion et alloue en priorité les fréquences du système satellite les moins gênantes pour ce dernier. Le second, « ICoI Aware » (IA), va plus loin et prend en compte dynamiquement la puissance potentielle d'interférence des utilisateurs terrestres afin d'allouer les fréquences satellite les moins gênantes aux utilisateurs de plus fort potentiel de nuisance. Nous avons ensuite appliqué ces principes aux schémas d'allocation de fréquence terrestre « classiques » que sont le 1-reuse, le 3-reuse et le PFR.

Dans notre système, les cellules terrestres sont déployées en zone urbaine et sont donc de taille restreintes. Dans ces conditions, les conséquences du choix du schéma d'allocation terrestre sur l'ICoI sont assez claires : le 1-reuse engendre au minimum 13dB d'ICoI de plus que le 3-reuse ; le PFR, qui est presque au même niveau d'interférence que le 3-reuse à faible charge se dégrade rapidement lorsque cette dernière augmente, ce qui rend son application plus délicate. L'explication provient du fait qu'avec des petites cellules, le phénomène d'interférence inter-cellule terrestre couplé au contrôle de puissance fait augmenter la puissance des terminaux en 1-reuse et en PFR à forte charge. Ainsi, l'ICoI est fortement augmentée. Le 3-reuse semble par conséquent le meilleur choix.

Concernant les performances des principes d'allocation coordonnée de ressources sur l'ICoI, les résultats des simulations sont encourageants :

- Le principe « Position Aware » permet de gagner de 2 à 8 dB d'ICoI à faible charge par rapport à un principe d'allocation aléatoire. L'intérêt de cette solution réside dans sa simplicité d'application car il suffit de connaître les gains et fréquences des faisceaux alentour pour l'appliquer. Toutefois, les performances se dégradent rapidement avec la charge. Cette dernière devrait donc être limitée dans ce cas, ce qui reviendrait à interdire certaines fréquences au système terrestre comme pour le principe de zone d'exclusion.
- Le principe « ICoI Aware » offre de très bonnes performances, en particulier en 3-reuse (9 dB de gain par rapport à l'allocation aléatoire quelle que soit la charge). En 1-reuse et PFR, le gain varie entre 2 et 8 dB. Plus complexe à mettre en œuvre, il requiert que la BS ait connaissance de l'état des canaux de propagation satellite et terrestre des utilisateurs.

Concernant l'impact de l'application des ces principes sur les performances du système terrestre :

- Pour le 3-reuse, elle est quasi-nulle du fait du faible impact de l'ICI sur la puissance des terminaux et donc sur l'ICoI.
- Pour le 1-reuse et le PFR, l'application des principes PA et IA sont dommageables sur les SINR des terminaux terrestres. En effet, cela réduit virtuellement la fréquence disponible dans chaque cellule et fait donc croître le nombre de terminaux co-fréquence.

La conclusion est donc relativement claire : le schéma de réutilisation de fréquence à trois couleurs est celui à privilégier dans un système intégré tel que nous l'avons défini. Bien que la capacité maximale du système terrestre en soit réduite par rapport au 1-reuse et au PFR, il présente de nombreux avantages :

- l'ICoI y est bien plus faible,
- les principes d'allocation coordonnée sont bien plus efficaces que pour les autres schémas de réutilisation,
- la dégradation de performances du système terrestre du fait de leur application est quasiment nulle.

5. Coordination dynamique d'ICoI dans un système LTE intégré

Dans les chapitres 3 et 4, nous avons étudié en profondeur l'interférence inter-composante (ICoI) sur la voie montante satellite car nous avons démontré dans le chapitre 2 que c'était l'un des cas d'ICoI les plus dommageables. Nous avons évalué différentes techniques visant à réduire cette interférence par la coordination de l'allocation de ressources des systèmes satellite et terrestre. Des améliorations de performances notables ont été obtenues.

Nous poursuivons la démarche dans ce chapitre. Après avoir établi la problématique à laquelle nous ont conduit les chapitres précédents (§5.1), nous décrivons tout d'abord une architecture réseau d'un système intégré LTE (§5.2). En nous appuyant sur cette architecture, nous décrivons un schéma complet de coordination des ICoI (ICoIC), incluant des mécanismes de coopération entre composantes (§5.3).

Le travail présenté dans ce chapitre a donné lieu à une publication [5.1] et au dépôt d'un brevet.

5.1. Problématique

Des pistes d'amélioration des solutions étudiées précédemment sont souhaitables, notamment :

- La mise en place d'une garantie de ne pas dépasser une valeur limite de l'ICoI subie par le satellite (§5.1.1).
- L'adaptation dynamique des mécanismes d'allocation terrestre aux variations du système satellite (pointage des faisceaux, état d'allocation de ressources) (§5.1.2).

De plus, les solutions doivent plus être implantées facilement dans un système intégré, si possible en s'appuyant sur des technologies existantes (§5.1.3).

5.1.1. Limitation de l'ICoI

L'étude du principe de zone d'exclusion et de schémas d'allocation coordonnée de ressources plus avancés est encourageante : il est possible d'envisager la réutilisation de spectre satellite par le système terrestre mais sous certaines conditions seulement, notamment en ce qui concerne la densité des utilisateurs terrestres. Pour une densité donnée, ce seuil dépend de nombreux paramètres dont les plus sensibles sont :

- le schéma d'allocation de ressources terrestres (vis-à-vis du schéma d'allocation satellite),
- la zone de déploiement du système terrestre (urbain/rural, en grappe/uniformément réparti)

En résumé, on peut dire que l'application de la réutilisation des fréquences revient à faire une étude de compromis entre la capacité du système satellite et la capacité du système terrestre. Toutefois, l'architecte d'un système intégré peut difficilement anticiper ou contrôler précisément la densité d'utilisateurs terrestres utilisant le spectre satellite. Or, pour envisager la mise en œuvre de la

réutilisation de fréquence, il faudrait pouvoir garantir que le système terrestre ne perturbe pas le système satellite au-delà d'une valeur limite déterminée. Les schémas d'allocation que nous avons définis nécessitent la coordination entre composantes terrestre et satellite, dans le sens où c'est le système terrestre qui asservit son plan de fréquence et son schéma d'allocation de ressource au système satellite.

Les principes définis sont donc transparents pour le système satellite. Une fois son plan de fréquence établi, c'est au système terrestre de s'adapter au système satellite. C'est un avantage important, car le système satellite n'a pas à se préoccuper du système terrestre sous-jacent qui va utiliser le spectre de manière « secondaire ». Toutefois, si aucun contrôle de l'allocation des ressources terrestres n'est effectué par le système satellite, on ne peut garantir que l'ICoI restera en deçà d'un seuil déterminé. Une coopération plus étroite entre les composantes pourrait donc bénéficier à l'ensemble, notamment dans le but de garantir ce seuil d'ICoI.

5.1.2. Adaptation dynamique

Les schémas d'allocation de ressources que nous avons définis prennent tous en compte le gain antenne et la fréquence utilisée par les faisceaux proches de la cellule. Or, ces données peuvent changer dans le temps :

- Les faisceaux satellite peuvent être modifiés dynamiquement :
 - Les systèmes de formation de faisceau (en particulier la formation de faisceaux au sol choisie pour les systèmes Terrestar et Lightsquared) permettent de former dynamiquement des faisceaux ou de faire varier en temps réel le gain antenne des faisceaux (donc leur « forme » et leur « position »).
 - Sans une correction suffisante, la couverture des faisceaux ne peut être maintenue fixe au sol, en raison des mouvements du satellite en orbite et des déformations thermiques de l'antenne. Vu du sol, cela implique une variation du gain antenne des faisceaux dans le temps [5.2].
- La planification de fréquence des systèmes satellite peut être dynamique et s'adapter en fonction des demandes.

Un système terrestre qui planifie sa gestion de ressource en fonction de ces données variables doit donc pouvoir s'adapter à ces variations. Pour cela, il faut mettre en place des moyens d'informer les stations des variations et de s'y adapter de façon dynamique.

5.1.3. Implantation dans un système LTE intégré

Avec ces deux contraintes supplémentaires en tête (limite d'ICoI et adaptation dynamique), nous nous sommes interrogés sur les modalités d'implantation de schémas d'ICoIC dans un système intégré. Pour cela, il nous faut définir pour notre système une architecture réseau qui offre un maximum de mécanismes possibles pour l'implantation de nos schémas. Les cœurs de réseau des systèmes intégrés existants (Lightsquared et Terrestar) sont fondés sur des technologies cellulaires terrestres : le cœur de réseau de Terrestar repose sur le standard GMR-1 3G qui est compatible avec le cœur de réseaux du standard 3GPP Release 6 [1.9]. En extrapolant, on peut supposer que les futures versions du standard GMR-1 seront compatibles avec les technologies LTE et LTE-advanced du 3GPP. Ces technologies

sont donc des candidates pour l'implantation de la réutilisation des fréquences. De plus, de nombreux mécanismes et interfaces ont été développés dans ces standards pour la gestion des ressources et en particulier pour la coordination des interférences inter-cellules (ICIC). Nous pourrions donc les réutiliser pour la coordination des interférences inter-composantes (ICoIC).

Dans ce chapitre, nous proposons donc de répondre à ces différentes problématiques, i.e. nous proposons une architecture réseau s'appuyant sur des standards existants et qui permettent d'implanter des schémas d'ICoIC permettant d'établir un seuil d'interférence et s'adaptant dynamiquement à l'état de l'allocation de ressources du système satellite.

5.2. Définition d'un système LTE intégré

5.2.1. Architecture d'un réseau LTE intégré

La Figure 5-1 présente l'architecture système du réseau intégré LTE que nous avons défini :

- Le réseau d'accès intégré est composé de :
 - Une partie terrestre déployée en zone urbaine qui est composée d'eNBs LTE.
 - Une partie satellite qui est composée de S-eNB (Satellite eNodeB), chacun contrôlant un faisceau satellite. Les S-eNB sont généralement physiquement co-localisés derrière les passerelles satellite (plusieurs S-eNB derrière chaque passerelle).
- L'équipement utilisateur (UE) est un téléphone dual mode qui peut communiquer à la fois avec les S-eNB au travers du satellite et avec les eNBs terrestres au travers des antennes sol. Ce type de téléphone existe déjà, bien que la technologie satellite soit le GMR-1 3G (terminal Terrestar, cf. Figure 1-4). Lorsque les fréquences terrestres sont identiques ou proches, une seule antenne est nécessaire pour recevoir les deux signaux. La puissance des satellites actuels permet même d'avoir une antenne intégrée à l'appareil en fonctionnement satellite.
- Le cœur de réseau intégré est conforme au CN LTE. Il communique avec les eNBs et les S-eNB au travers d'interface standard S1.
- Le gestionnaire de ressource central qui est en lien avec tous les eNBs et S-eNBs. Il fournit notamment un support à la planification de fréquence et à la gestion des schémas d'allocation de fréquence coordonnés tels que définis au chapitre 4 ou dans la suite de ce chapitre.

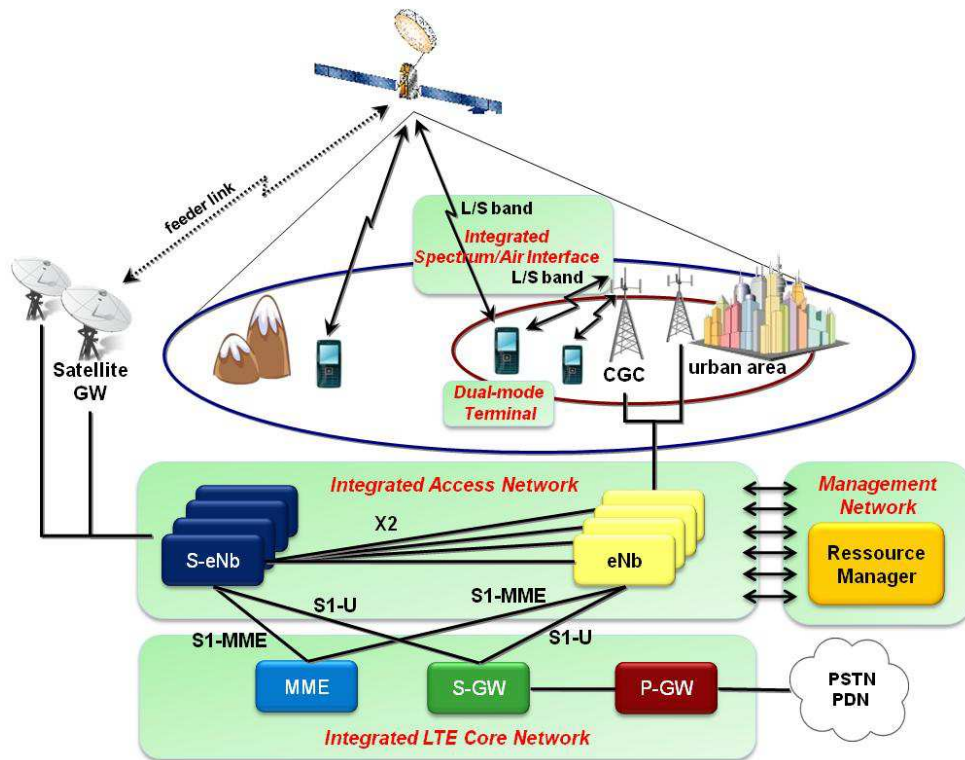


Figure 5-1 : Architecture d'un système LTE intégré

La Figure 5-2 présente une partie des éléments réseaux et des interfaces d'un EPS intégré. Seuls l'UE, le S-eNB et l'interface entre les deux (LTE-SUu) nécessitent des modifications par rapport au standard du 3GPP. Notons en particulier que des adaptations sont nécessaires pour l'optimisation de la gestion des handovers en termes de mécanismes et protocoles mais cela sort de l'architecture proposée.

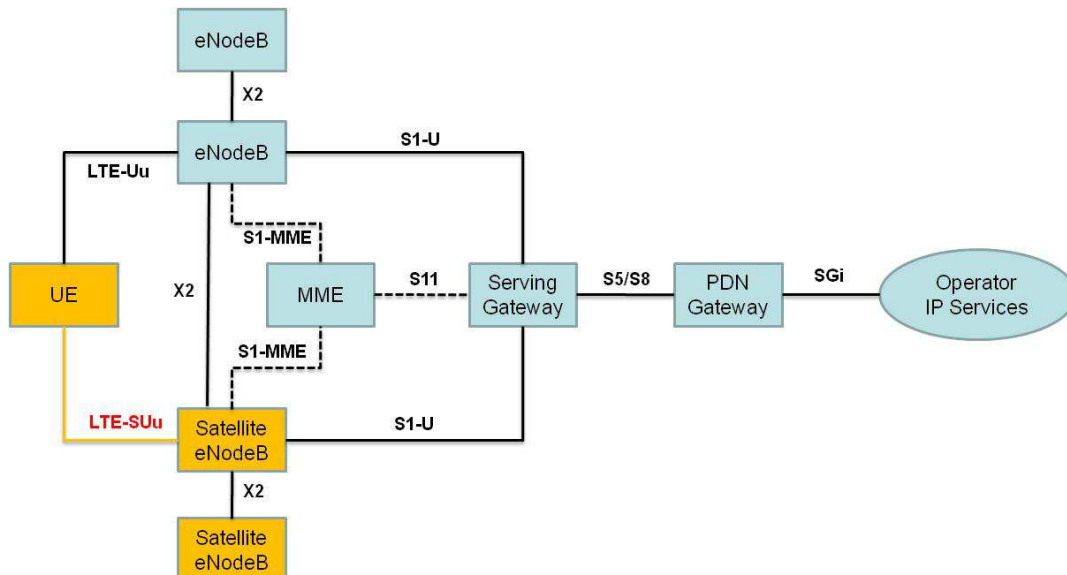


Figure 5-2 : Eléments de réseaux d'un EPS de système intégré

L'architecture présentée est la plus aboutie en termes d'intégration de réseau. C'est celle qui nécessite le moins de modifications du standard terrestre et offre la plus grande interaction possible entre systèmes terrestre et satellite. En revanche, elle requiert la mise en œuvre d'un grand nombre d'interfaces X2 entre entités satellite et terrestre ce qui peuvent être coûteux. En effet, un faisceau

satellite contrôlé par un S-eNB peut « contenir » jusqu'à plusieurs milliers de eNBs. Les liens entre S-eNBs et eNBs concernent les procédures de handover entre systèmes satellite et terrestre ainsi que la gestion d'allocation de ressources et des interférences. Sur ce dernier point (les interférences inter-composantes), un eNB peut être en relation avec des S-eNB contrôlant des faisceaux même éloignés (dans la partie 2.2.1.1, on a vu que l'ICoI d'un UE terrestre est contributrice jusqu'à environ 360 km de distance du centre d'un faisceau). Le nombre d'interfaces X2 entre eNBs et S-eNBs peut donc être extrêmement élevé.

5.2.2. Adaptation nécessaire des couches d'accès LTE

5.2.2.1. Accès satellite

Les couches de l'AS du standard terrestre (L1, MAC, RLC et RRC pour le plan de contrôle) ne fonctionnent pas efficacement sur satellite et doivent donc être modifiées. Des études sont en cours sur le sujet de l'adaptation de l'OFDMA sur satellite et de l'interface radio LTE en particulier ([5.7] - [5.10]). Comme ce n'est pas le sujet de cette thèse, nous considérerons par la suite que l'interface radio satellite est très proche de l'interface terrestre, notamment en ce qui concerne le mapping des PRBs : pour simplifier, nous supposons que la synchronisation en temps et fréquence des PRBs dans les trames satellite et terrestre est parfaite.

5.2.2.2. Accès terrestre

Comme nous l'avons constaté dans les chapitres 3 et 4, la réutilisation des fréquences n'est possible que si le système terrestre coordonne l'allocation de ses ressources avec le satellite. Dans le chapitre 4, le schéma d'allocation « ICoI Aware » que nous avons défini est celui qui propose les meilleurs résultats en termes d'ICoI. Toutefois, la mise en œuvre de ce schéma nécessite le recours à des mécanismes qui ne sont pas tous présents dans le standard LTE. Plusieurs solutions d'implantations sont proposées (cf. §5.3). Nous avons réutilisé au maximum les mécanismes proposés dans le standard. En effet, l'idéal serait de pouvoir mettre en œuvre nos schémas avec des terminaux terrestres standards. Ainsi, n'importe quel terminal LTE « sur étagère » pourrait être utilisé dans un système intégré avec réutilisation de fréquence.

5.3. Schéma d'ICoIC avec coopération inter-composante

Le schéma que nous définissons dans cette partie est une extension du schéma « ICoI Aware » défini dans le chapitre 4. Au travers de la coopération entre les composantes, nous définissons des mécanismes qui permettent au système de contrôler l'ICoI engendrée par les cellules terrestres. Nous proposons de plus l'implantation de ce schéma et des mécanismes qui le composent dans l'architecture définie précédemment.

5.3.1. Vers la garantie d'un seuil d'ICoI

5.3.1.1. Principe de coopération

Comme nous l'avons montré dans les chapitres précédents, l'ICoI est fonction de nombreux paramètres, dont la densité d'utilisateurs terrestres. Pour pouvoir limiter l'ICoI agrégée dans chaque fréquence satellite, une solution consiste à définir un seuil à l'ICoI engendrée par chaque cellule. Le respect d'un seuil maximum de l'ICoI par toutes les cellules ne peut pas garantir totalement que l'agrégation des ICoIs sera elle-même bornée (par exemple si le nombre de cellules est infini). Toutefois, si on réduit l'ICoI unitaire engendrée par chaque cellule d'une valeur ΔI , l'ICoI agrégée sera aussi réduite de ΔI . L'application de ce simple principe peut donc suffire à maintenir l'ICoI agrégée sous un seuil donné.

Pour réduire l'ICoI engendrée par une seule cellule, la BS peut soit modifier la répartition des ressources allouées, voire interdire certaines fréquences si l'ICoI est trop importante, soit réduire la puissance d'émission des terminaux. Cela revient à limiter l'utilisation du spectre de chaque BS. Si le principe reste simple, sa mise en œuvre s'avère complexe. Il est en effet difficile de déterminer les restrictions à l'utilisation locale du spectre dans chaque cellule qui permette de garantir que l'agrégation de l'ICoI provenant de toutes les cellules sous la couverture ne dépasse pas un seuil donné.

Comme ce seuil global est déterminé par le système satellite, on comprend aisément que c'est ce dernier qui va devoir indiquer aux BS le seuil local à ne pas dépasser. Cela peut se faire de deux façons :

- En boucle ouverte : à partir de données connues ou collectées périodiquement, le système satellite calcule des seuils locaux pour chaque fréquence satellite et pour chaque BS. Ces seuils doivent être déterminés par une fonction prenant en entrée des paramètres comme la densité des utilisateurs terrestres, le nombre de couleurs du motif satellite, le schéma d'allocation terrestre, l'état d'allocation de ressources de tout le système, les gains antenne satellite. Chaque seuil est ensuite envoyé aux BS qui la traduisent en limitation de l'utilisation du spectre et manière d'allouer leurs ressources. Cette solution paraît délicate à mettre en œuvre, car les fonctions de calcul de seuil à ne pas dépasser nécessitent une connaissance parfaite de nombreux paramètres du système qui sont difficiles à collecter et qui de plus peuvent varier dans le temps. Un tel dimensionnement nécessiterait donc d'être fait sur le pire cas.
- En boucle fermée : le satellite évalue en temps réel l'ICoI dans chaque fréquence (ou PRB). En fonction de sa valeur, il envoie une consigne à chaque BS et pour chaque fréquence. Si l'ICoI est supérieure au seuil fixé, la BS doit réduire son ICoI d'une valeur donnée (typiquement la différence entre l'ICoI mesurée et la limite). Sinon, elle peut être autorisée à augmenter son ICoI, ce qui se traduit par un relâchement des contraintes sur l'utilisation du spectre. Cette solution est plus simple à mettre en œuvre que la boucle ouverte. De plus, elle s'accommode des variations temporelles qui peuvent être difficiles à anticiper. Par conséquent, c'est celle que nous avons retenue.

Par la suite, nous allons étudier la mise en œuvre d'une boucle de contrôle fermée, tout en réutilisant le schéma d'allocation « ICoI Aware » que nous avons étudié dans le chapitre précédent.

5.3.1.2. Boucle de contrôle de l'ICoI

Afin de contrôler l'ICoI sur le lien montant, nous définissons une boucle de contrôle de l'ICoI. La Figure 5-3 présente les principales étapes de cette boucle.

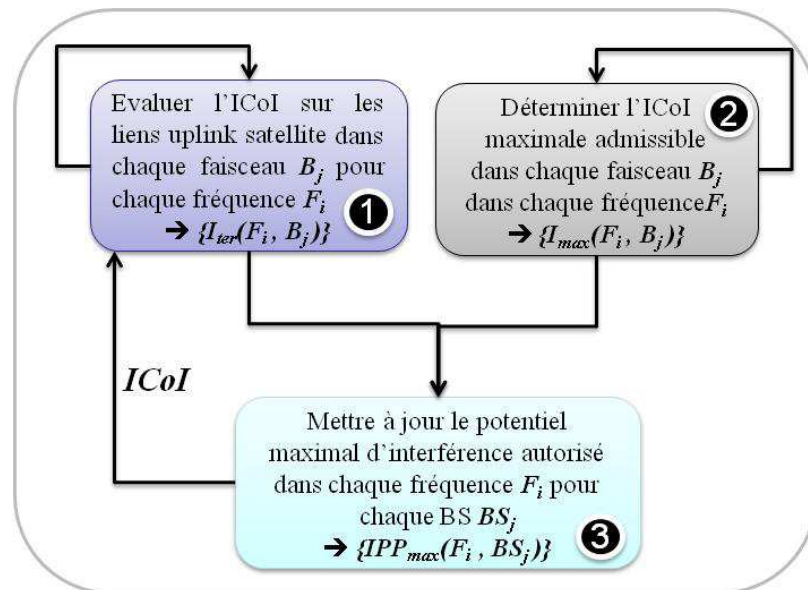


Figure 5-3 : Boucle de contrôle de l'ICoI

1. **Évaluation de l'ICoI :** Pour chaque faisceau satellite B_j , on évalue régulièrement l'ICoI sur le lien montant dans chaque fréquence F_i ($I_{ter}(F_i, B_j)$). Cette évaluation nécessite de pouvoir extraire l'ICoI du bruit et des autres sources d'interférences, en particulier des interférences co-fréquence provenant des autres utilisateurs satellite. Il peut être suffisant dans certains cas de n'évaluer que les variations de cette interférence plutôt que sa valeur absolue, ce qui est plus simple. Il faut de plus noter que s'il est possible d'évaluer l'interférence agrégée, on ne peut distinguer les contributions unitaires provenant de chaque cellule terrestre.
2. **Détermination de l'ICoI maximale :** Pour chaque faisceau satellite, on détermine régulièrement une ICoI maximale ($I_{max}(F_i, B_j)$) que l'on peut supporter. Cette valeur est un paramètre système généralement fixe. Toutefois, les contraintes peuvent varier d'un faisceau à l'autre et au sein d'un faisceau dans le temps. Par exemple, si aucune communication n'est en cours dans le faisceau pour une fréquence F_i , on peut autoriser le système terrestre à émettre sans limitation. Dans ce cas, le paramètre I_{max} sera positionné à la valeur « infini ». Si au contraire les interférences doivent être maintenues au minimum pour perturber le moins possible un faisceau, I_{max} sera maintenu le plus bas possible.
3. **Mise à jour du potentiel maximal d'interférence autorisé :** A partir des paramètres précédents, on met à jour pour chaque station BS_j , le maximum de potentiel d'interférence maximal autorisé ($IPP_{max}(F_i, BS_k)$). La définition de ce paramètre et la façon dont il est mis à jour sont expliquées par la suite. Il permet de fixer la limite d'utilisation de chaque fréquence que peut faire la BS.

5.3.1.3. Exemple de mise en œuvre

Afin de mieux comprendre comment fonctionne la boucle de contrôle, nous décrivons dans cette partie un exemple simple de mise en œuvre, représenté par la Figure 5-4.

- a Étape initiale : Le satellite reçoit dans les fréquences F_1 et F_2 d'un faisceau B_j donné des interférences agrégées $I_{ter}(F_1, B_j)$ et $I_{ter}(F_2, B_j)$. Les seuils d'ICoI maximaux, $I_{max}(F_1, B_j)$ et $I_{max}(F_2, B_j)$, sont respectés. Dans la cellule terrestre représentée, les terminaux UE1 et UE2 utilisent les fréquences F_1 et F_2 tout en respectant les maxima autorisés $I_{max}(F_i, B_j)$.
- b Dépassement du seuil : Le seuil est dépassé (1). Dans notre exemple, c'est la diminution du seuil $I_{max}(F_1, B_j)$, qui provoque ce dépassement (dû par exemple à une augmentation de la capacité requise dans le faisceau sur cette fréquence). Le dépassement peut aussi être provoqué par une augmentation de $I_{ter}(F_1, B_j)$ (due par exemple à un accroissement de la densité de terminaux terrestre utilisant la fréquence). En réaction (2), le système satellite envoie à toutes les stations BS_k en relation avec le faisceau B_j (proches de ce dernier), une correction de $IPP_{max}(F_1, BS_k)$ afin de le réduire (3).
- c Réaction des stations (4) : la station dans l'exemple réagit afin de respecter la nouvelle valeur réduite de $IPP_{max}(F_1, BS_k)$. Elle attribue donc à l'utilisateur UE1 la fréquence F_3 . Cela enlève donc une composante unitaire à l'interférence agrégée $I_{ter}(F_1, B_j)$. En plus de l'action de chacune des stations qui ont réagi, $I_{ter}(F_1, B_j)$ est suffisamment réduite pour repasser sous le seuil maximal $I_{max}(F_1, B_j)$. D'autres actions que la simple réallocation de fréquence auraient pu être mise en œuvre par la station pour réduire l'interférence unitaire : contrôle de la puissance de UE1, échange de fréquence.

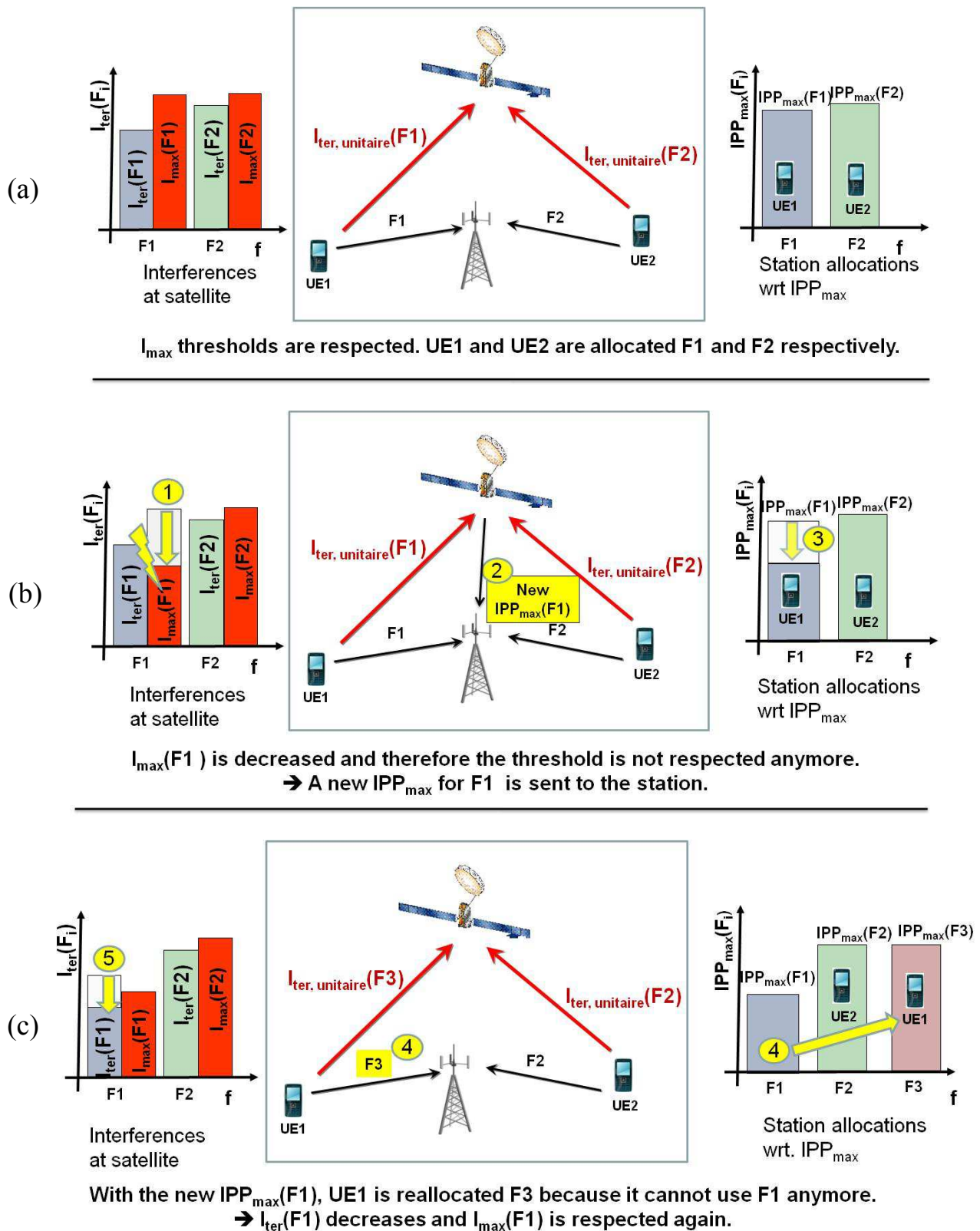


Figure 5-4: Exemple de processus de correction d'interférence par boucle de contrôle fermée

5.3.2. Potentiel Maximal d'Interférence (IPP_{max})

5.3.2.1. Définition

Nous définissons, pour chaque BS, la puissance maximale du potentiel d'interférence (IPP_{max}) dans chaque fréquence. $IPP_{max}(F_i, BS_k)$ correspond à la valeur maximale de puissance potentielle l'interférence (IPP) qu'une station BS_k est autorisée à émettre vers le satellite dans la fréquence F_i . Le potentiel d'interférence est tel que défini dans la partie 4.2.2.3 (équation (4.1)). Il correspond à la puissance d'un signal émis par un utilisateur e_l de la station BS_k dans la fréquence F_i et reçue au niveau de l'antenne du satellite, hors gain antenne.

$$(5.1) \quad IPP(F_i, BS_k)_{dB} = IPP(e_l)_{dB} = PIRE(e_l)_{dB} - PL_{sat}(e_l)_{dB}$$

Chaque station doit veiller à ce que le potentiel d'interférence dans chaque fréquence soit inférieur à IPP_{max} , c'est-à-dire :

$$(5.2) \quad IPP(F_i, BS_k) < IPP_{max}(F_i, BS_k) \quad \forall F_i$$

L'interférence qui est vraiment reçue par le satellite dépend des faisceaux qui utilisent la fréquence F_i et qui seront donc affectés par cette interférence. L'interférence unitaire engendrée par une station BS_j dans la fréquence F_i et reçue par un faisceau B_j s'écrit :

$$(5.3) \quad I_{ter,unitaire}(F_i, B_j, BS_k) = IPP(F_i, BS_k) \times G_{rx,sat}(B_j, BS_k)$$

où $G_{rx,sat}(B_j, BS_k)$ est le gain antenne du faisceau B_j à la position de la station BS_j .

Plus la station est proche du centre du faisceau, plus $G_{rx,sat}(B_j, BS_k)$ est élevé. On comprend donc qu'on autorise un $IPP_{max}(F_i, BS_k)$ plus élevé pour les stations éloignées du centre. L'interférence agrégée reçue par un faisceau B_j dans la fréquence F_i s'écrit alors :

$$(5.4) \quad I_{ter,agrégée}(F_i, B_j) = \sum_k I_{ter,unitaire}(F_i, B_j, BS_k)$$

Si toutes les cellules allouent les ressources de manière à respecter le potentiel maximum (équation (5.2)), on peut écrire que l'interférence reçue dans le faisceau B_j , à la fréquence F_i vérifie la formule :

$$(5.5) \quad I_{ter}(F_i, B_j) < \sum_k IPP_{max}(F_i, BS_k) \times G_{rx,sat}(B_j, BS_k)$$

La formule (5.5) montre bien que l'ICoI est bornée par une valeur finie tant que le nombre de stations est lui aussi fini. Ce seuil dépend des $IPP_{max}(F_i, BS_k)$ et des gains antenne aux différentes positions des stations. Les gains antenne sont des données qui ne varient pas dans le temps en dehors des erreurs de pointage. Le moyen le plus simple de faire varier le seuil d'ICoI est donc de modifier les IPP_{max} des stations. Nous montrons comment dans la partie suivante.

5.3.2.2. Calcul

Le système doit positionner la valeur de $IPP_{max}(F_i, BS_k)$ pour chaque BS et chaque fréquence de sorte que les interférences $I_{ter}(F_i, B_j)$ ne dépassent pas $I_{max}(F_i, B_j)$ dans chaque faisceau B_j et pour chaque fréquence F_i . $I_{ter}(F_i, B_j)$ résulte de l'agrégation des interférences en provenance de toutes les cellules utilisant F_i . L'interférence que l'on va autoriser à chaque cellule dépend donc de la densité de

cellules qui utilisent F_i dans le voisinage du faisceau B_j et des gains antenne satellite aux différentes stations. Or, au niveau du système satellite, il est difficile de connaître le nombre et la position (donc le gain antenne) de toutes les cellules utilisant la fréquence F_i à un instant donné. De plus, la valeur d' IPP_{max} conditionne la quantité de ressource disponible pour la station. Les besoins en capacité des stations peuvent donc être aussi des paramètres à prendre en compte dans le calcul d' IPP_{max} . En résumé, l'obtention de chaque $IPP_{max}(F_i, BS_k)$ résulte donc d'un calcul d'optimisation complexe qui dépend :

- de la densité des stations terrestres autour de la station BS_k ;
- du besoin en capacité de la station ;
- de la proximité de faisceaux utilisant la fréquence F_i .

Par exemple, une station dans une zone à faible densité de cellule et éloignée de faisceaux utilisant F_i se verra attribuer un F_i bien plus élevé qu'une station au cœur d'une zone densément peuplée de cellule et proche d'un faisceau F_i . Les différents paramètres cités précédemment et influant sur la valeur d' IPP_{max} peuvent varier dans le temps. Elle doit donc être réévaluée régulièrement en fonction de ces variations.

Nous ne nous sommes pas lancés dans l'étude de la fonction de calcul d' $IPP_{max}(F_i, BS_k)$. Toutefois, nous proposons ici une façon de simplifier sa mise à jour dans le temps.

5.3.2.3. Mise à jour

Pour commencer, nous définissons deux paramètres :

- $I_{ref}(F_i, BS_k)$ est une valeur d'interférence de référence propre à chaque station. Elle correspond à la valeur de référence pour l'ICoI que peut générer les utilisateurs de la BS vers le satellite dans la fréquence F_i . Ce paramètre dépend fortement de la densité de cellules terrestres contributrices à l'ICoI dans la fréquence F_i . A l'extrême, s'il n'existe qu'une cellule BS_k et qu'un seul faisceau B_j utilisant la fréquence F_i , $I_{ref}(F_i, BS_k)$ sera égal à $I_{max}(F_1, B_j)$ du faisceau B_j
- $G_{est}(F_i, BS_k)$ est le gain antenne satellite « estimé » par la BS dans chaque fréquence F_i . Nous expliquons plus loin comment il est calculé. Il faut noter que ce gain n'est rattaché à aucun faisceau en particulier.

Nous définissons $IPP_{max}(F_i, BS_k)$ à partir de ces deux paramètres tout en restant homogènes avec la définition de la puissance potentielle d'interférence :

$$(5.6) \quad IPP_{max}(F_i, BS_k)_{dB} = I_{ref}(F_i, BS_k)_{dB} - G_{est}(F_i, BS_k)_{dB}$$

Le système peut donc jouer sur ces deux paramètres I_{ref} et de G_{est} pour mettre à jour IPP_{max} possédant ainsi deux leviers pour faire varier l'ICoI reçue par le système satellite. Plusieurs facteurs peuvent déclencher la mise à jour d' IPP_{max} , comme décrit dans la partie 5.3.1.2 :

- Variation dans l'ICoI mesurée $I_{ter}(F_i, B_j)$: Si dans un faisceau B_j , l'ICoI dépasse $I_{max}(F_1, B_j)$ d'un facteur ΔI pour la fréquence F_i , l' IPP_{max} devra être réduite (d'au moins autant) pour la faire baisser. A l'opposé, si l'ICoI mesurée est inférieure à $I_{max}(F_i, B_j)$, l' IPP_{max} pourra être augmentée pour certaines stations (les plus proches du faisceau).

- Conditions de trafic dans le faisceau B_j : Si un faisceau n'utilise pas une fréquence de façon temporaire, $I_{max}(F_1, B_j)$ peut être considéré comme infini et donc l' IPP_{max} pourra là aussi être augmentée pour certaines stations (les plus proches du faisceau). A l'opposé, si une meilleure qualité de signal est requise, $I_{max}(F_1, B_j)$ peut être diminué et IPP_{max} devra être réduite (d'au moins autant) pour faire baisser l'ICoI.

Mise à jour avec I_{ref}

Plusieurs solutions sont possibles pour modifier $I_{ref}(F_i, BS_k)$ dans l'architecture que nous avons définie dans la partie 5.2 :

- 1) Le plus simple est d'utiliser une interface spécifique du plan de gestion entre le gestionnaire de ressource et les eNB gérant chaque cellule grâce au protocole SNMP par exemple. Cette solution ne propose cependant pas une grande dynamique et sera préférée pour des réglages ponctuels.
- 2) Il est possible d'utiliser l'interface X2 entre S-eNB et eNB (c.f. Figure 5-5). Les S-eNB peuvent envoyer régulièrement des messages Overload Indicator (OI) aux eNB proches (avec un gain antenne significatif) du faisceau dont les S-eNB ont la gestion. Le message OI permet d'indiquer le niveau d'interférence subi dans chaque PRB et peut prendre trois valeurs : faible, moyen ou élevé. Il peut donc être utilisé pour indiquer aux stations terrestres le niveau d'ICoI reçu dans les faisceaux. $I_{ref}(F_i, BS_k)$ peut donc de même prendre trois valeurs prédéfinies correspondant aux valeurs du message OI. Cela permet ainsi d'adapter IPP_{max} en temps réel au prix cependant d'un grand volume d'échanges de messages entre S-eNB et eNB.

Mise à jour avec G_{est}

Le gain satellite $G_{est}(F_i, BS_k)$ est estimé par chaque station BS_k dans chaque fréquence F_i . Cette estimation est faite à partir de mesures de puissance de signaux pilotes envoyés par le satellite. Le satellite envoie dans chaque faisceau des signaux pilotes notés $S_{ref}(F_i)$ comme montré sur la Figure 5-5.

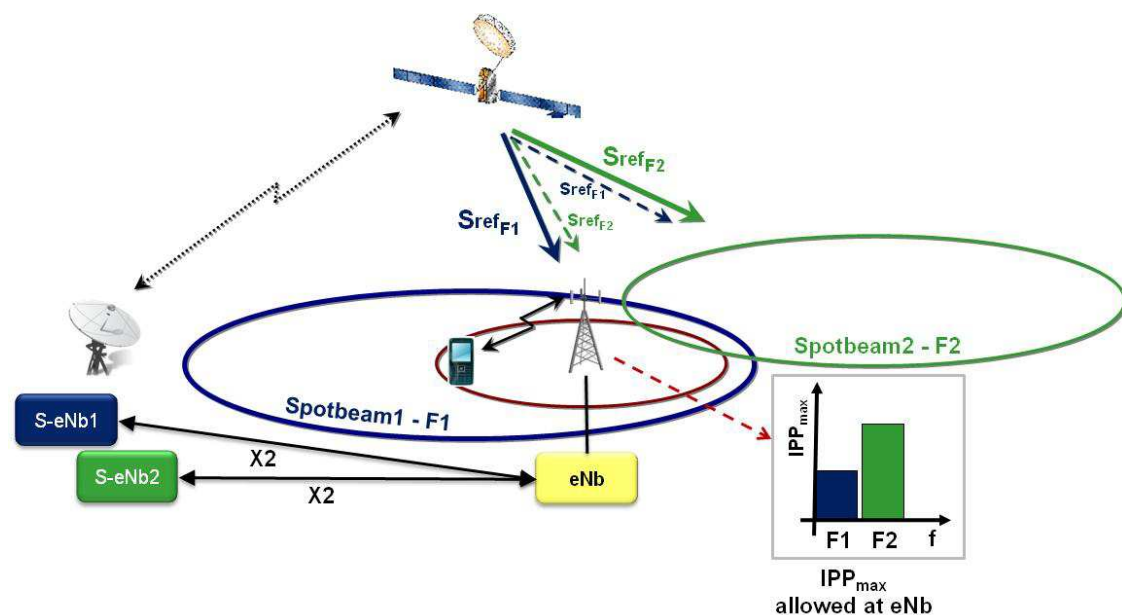


Figure 5-5 : Signaux de référence diffusés par le satellite vers les BS

Le gain estimé est donc déterminé par la station BS_k à partir de la formule suivante :

$$(5.7) \quad G_{est}(F_i, BS_k) = \frac{P_{rx,Sref}(F_i, BS_k) \times PL_{LOS}}{P_{ref}}$$

PL_{LOS} représente les pertes de propagation en espace libre entre la station et le satellite en ligne de vue directe (ce qui est supposé être toujours le cas pour les stations). Ces pertes sont considérées comme constantes. P_{ref} est la puissance de transmission de référence utilisée par le satellite pour transmettre les signaux pilotes. Ce paramètre est considéré comme constant par la station, bien qu'il puisse varier. $P_{rx,Sref}(F_i, BS_k)$ est la puissance du signal pilote effectivement mesurée par la station BS_k dans la fréquence F_i . Il résulte de la somme des puissances des signaux pilotes envoyés par tous les faisceaux dans la fréquence F_i et s'écrit :

$$(5.8) \quad P_{rx,Sref}(F_i, BS_k) = \frac{\sum_j P_{tx,Sref}(F_i, B_j) \times G_{tx,sat}(B_j, BS_k)}{PL_{LOS}}$$

où $P_{tx,Sref}(F_i, B_j)$ est la puissance d'émission du signal pilote dans le faisceau B_j à la fréquence F_i . $G_{tx,sat}(B_j, BS_k)$ est le gain antenne satellite pour le faisceau B_j en direction de la station BS_k .

Utilisation nominale des signaux pilotes

Lorsque $P_{tx,Sref}(F_i, B_j)$ est égale pour tous les faisceaux et toutes les fréquences à P_{ref} , l'équation (5.8) devient :

$$(5.9) \quad P_{rx,Sref}(F_i, BS_k) = \frac{P_{ref} \sum_j G_{tx,sat}(B_j, BS_k)}{PL_{LOS}}$$

qui réinjecté dans (5.7) donne :

$$(5.10) \quad G_{est}(F_i, BS_k) = \sum_j G_{tx,sat}(B_j, BS_k)$$

Notons que nous estimons le gain antenne de réception à partir du gain en émission. Nous considérons donc qu'ils sont égaux. Le gain estimé en réception correspond à la somme des gains antenne de tous les faisceaux utilisant F_i . Le gain estimé porte donc l'information du nombre de faisceaux utilisant F_i proches de la station, pondérés par le gain antenne de ces faisceaux. Si on relie à IPP_{max} (équation (5.6)), cela se traduit par le fait que l'utilisation d'une fréquence F_i par une station est conditionnée par le nombre et la proximité des faisceaux utilisant cette fréquence. Ce comportement se retrouve dans le principe de zone d'exclusion, qui interdit l'utilisation d'une fréquence utilisée par un faisceau trop proche de la station. L'avantage ici est que nous prenons en plus compte du nombre de faisceaux subissant l'ICoI que va engendrer la station. Enfin, cette méthode présente plusieurs avantages :

- Elle permet d'évaluer le gain antenne au niveau des stations de base de façon complètement autonome. On peut donc l'utiliser même si aucune interface entre les réseaux satellite et terrestre n'existe.
- L'évaluation est continue dans le temps. Les variations de gain antenne au sol dues aux erreurs de pointage peuvent donc être corrigées directement par cette méthode.

Utilisation des signaux pilotes pour faire varier l'ICoI

Les signaux pilotes peuvent être utilisés de façon détournée pour faire varier l'ICoI en fonction de l'ICoI mesurée, comme on pourrait le faire avec le paramètre I_{ref} . Comme nous l'avons défini précédemment, les stations considèrent que la puissance d'émission des signaux pilotes est constante égale à P_{ref} . Si on fait varier cette puissance dans un faisceau, cela va avoir pour conséquence de faire

varier le paramètre $G_{est}(F_i, BS_k)$ des stations BS_k qui sont proches du faisceau. L'impact de la variation sera d'autant plus important que les stations sont proches. Ainsi, une augmentation de la puissance du signal se traduira par une augmentation de G_{est} pour les stations proches et donc une baisse de l' IPP_{max} . Cette méthode présente des avantages importants :

- Elle ne nécessite aucune interface ou moyen de gestion entre les réseaux terrestre et satellite, contrairement à la modification de I_{ref} . C'est donc un moyen facile de mettre à jour IPP_{max} .
- Lorsqu'un faisceau souhaite signaler aux stations terrestres une modification de l'ICoI autorisée (au travers d' IPP_{max}), la variation est fonction du gain antenne entre les stations et le centre du faisceau. Si on utilise des interfaces entre réseaux satellite et terrestre pour modifier IPP_{max} (cf. mise à jour avec I_{ref}), cette variation due au gain antenne entre faisceau et station doit être calculé pour chaque station. Avec cette méthode, la variation est répercutée automatiquement. Il suffit donc de faire varier la puissance du signal pilote jusqu'à ce que l'ICoI souhaitée soit atteinte.

5.3.3. Schéma d'allocation et respect de l' IPP_{max}

Comme indiqué dans la partie précédente, chaque station se voit attribuer une consigne IPP_{max} à respecter dans chaque fréquence F_i . Nous allons maintenant décrire comment une station peut exploiter au maximum ses ressources spectrales tout en respectant cette consigne. Le schéma décrit exploite le principe « ICoI Aware » (c.f. §4.2.3.3).

La puissance du potentiel d'interférence (IPP) de chaque terminal est estimée régulièrement. L'IPP dépend des pertes de propagation (incluant le facteur de masquage) entre le satellite et le terminal ainsi que de sa PIRE. Rappelons l'équation (5.1) :

$$IPP(e_l)_{dB} = PIRE(e_l)_{dB} - PL_{sat}(e_l)_{dB}$$

Plusieurs solutions sont envisageables pour que la station détermine la PIRE d'un UE :

1. L'UE peut lui envoyer explicitement sa puissance d'émission. Cette solution bien qu'efficace, nécessite de mettre en place la signalisation adaptée qui n'est pas prévue dans le standard.
2. L'eNB peut utiliser de façon détournée les signaux de références sur le lien uplink, les DRS (Demodulation Reference Signal) transmis par l'UE avec les données. Les DRS sont normalement émis avec la même puissance que le reste des données. Certains de ces signaux (1 sur N par exemple) pourraient être émis avec une puissance connue de l'eNB. L'eNB pourrait ainsi en déduire la puissance d'émission de l'UE par comparaison entre les puissances des DRS normaux et des DRS émis à puissance connue. Cette solution nécessite aussi des modifications du standard mais moins que la précédente (réutilisation de mécanismes existants).
3. L'eNB peut interpréter les CQI (Channel Quality Indicator) envoyés par l'UE pour estimer sa puissance d'émission. Cette solution permet de ne pas modifier le standard mais est très approximative.

Pour déterminer les pertes de propagation ($PL_{sat}(e_l)$) entre le satellite et l'UE, il faut nécessairement mettre en place une procédure hors standard. Le satellite transmet des signaux de référence (le plus commodément dans une fréquence F_0 qui lui est propre). L'UE évalue ensuite la puissance de réception de ces signaux pour en déduire $PL_{sat}(e_l)$. Il peut ensuite envoyer cette valeur à l'eNB au travers de messages de signalisation spécifiques.

Une fois que l'eNB a estimé l'IPP de tous ses UEs, il peut allouer les ressources de sorte que . Un exemple est donné dans la Figure 5-6. L'UE1 est en visibilité directe de la station (faible PIRE) et est masqué du satellite : son IPP est donc faible. A l'inverse, l'UE2 est masqué de la station (forte PIRE) et en ligne de vue directe du satellite (IPP élevée). L'eNB connaît les IPP_{max} de chaque fréquence et alloue les fréquences en respectant la règle.

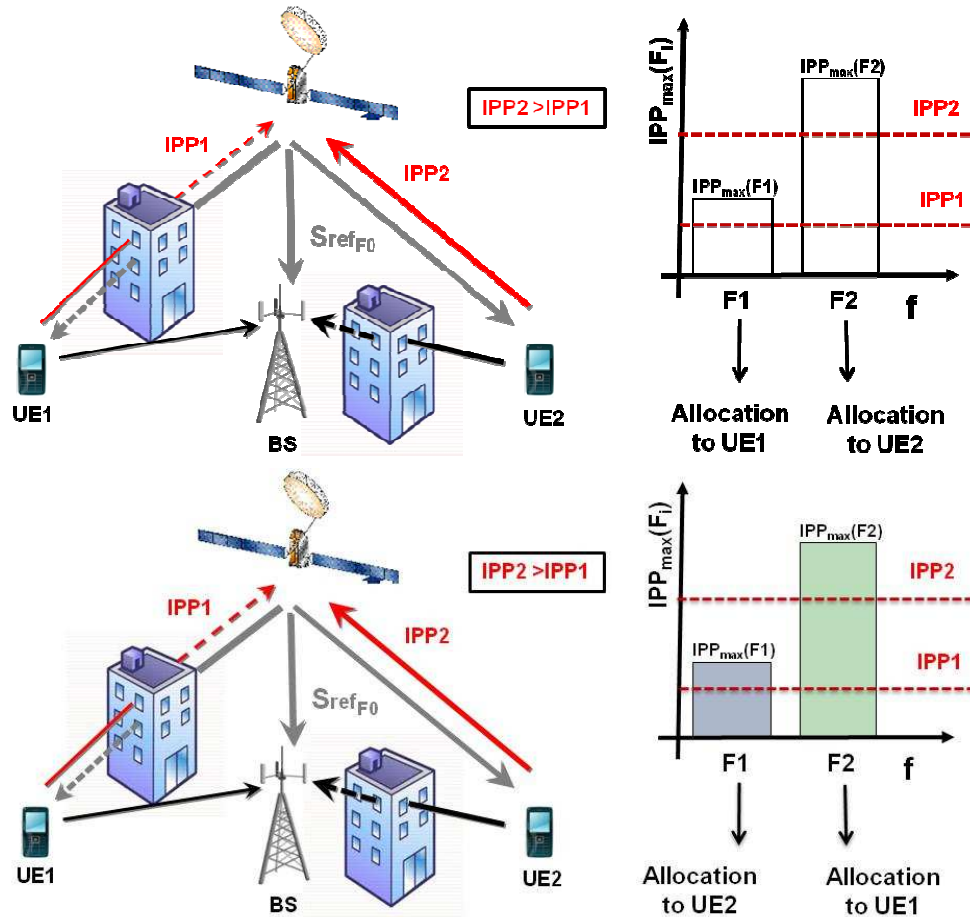


Figure 5-6 : Allocation des fréquences en fonction de l'IPP

Si les IPP des UEs de la cellule sont trop élevés par rapport aux IPP_{max} de certaines fréquences, l'eNB interdit d'allouer ces fréquences et multiplexe les UE dans le temps.

5.3.4. Principes d'ICoIC temporelle

La release 10 de LTE apporte des techniques intéressantes pour la coordination des interférences co-fréquence dans les réseaux hétérogènes [5.11]. On peut voir une similitude dans les couples pico-cellules/macro-cellules et macro-cellules/faisceaux (parfois appelés méga-cellules). De plus, le cas de déploiement co-fréquence pico/macro-cellule est envisagé. Cela correspond au cas de réutilisation de fréquence que nous avons étudié. La similitude a toutefois ses limites car les rapports entre les diamètres des cellules et les cas d'interférences entre pico/macro-cellule et macro-cellule/faisceaux satellite sont très différents.

Certaines techniques de gestion de l'interférence co-fréquence qui ont été développées pour les réseaux hétérogènes peuvent être adaptées aux systèmes intégrés avec réutilisation de fréquence. En particulier un mécanisme de coordination temporelle d'interférence est tout à fait adapté au système

intégré. Le principe repose sur le partitionnement en temps de la ressource. La macro-cellule envoie périodiquement (toutes les 40 ms) au travers de l'interface X2 à la pico-cellule un message de 40 bits correspondant aux 40 sous-trames de 1 ms. Chaque bit du message indique si la macro-cellule compte émettre dans la sous-trame ou pas. La pico-cellule peut donc réutiliser les sous-trames non utilisées, évitant ainsi de causer ou de subir des interférences co-fréquences.

La transposition de ce mécanisme aux systèmes intégrés peut être très intéressante. En effet, les faisceaux peuvent « contenir » et être en relation (au sens des interférences) avec un grand nombre de macro-cellules. L'utilisation de ce mécanisme de coordination temporelle permettrait au S-eNB contrôlant un faisceau d'indiquer les sous-trames non-utilisées à tous les eNBs avec lesquels il est en relation. Ainsi, si un faisceau est peu actif, on préférera étaler les ressources qu'il alloue sur toute la porteuse afin de libérer un maximum de sous-trames. Sa fréquence pourra ainsi être entièrement réutilisée une bonne partie du temps dans tous les eNBs concernés sans aucune restriction d'utilisation.

Ce mécanisme est simple à mettre en œuvre dans un système intégré dans la mesure où il existe un mapping entre trames satellite et terrestre et qu'elles sont parfaitement synchronisées en temps et en fréquence. Lorsque le trafic dans les faisceaux satellite est faible ou variable dans le temps, cette technique peut permettre d'augmenter grandement la capacité du système terrestre.

5.4. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons fourni un cadre réaliste d'application à la mise en œuvre de la réutilisation des fréquences. Nous avons proposé une architecture de système intégré fondée sur LTE appropriée à son implantation. Nous avons ensuite défini des mécanismes et leur mise en œuvre pour permettre au système satellite de contrôler l'ICoI engendrée par le système terrestre et de la maintenir sous un seuil fixé. Pour cela, la coopération entre composantes est nécessaire. Le système satellite communique aux stations terrestres une consigne de potentiel d'interférence à ne pas dépasser dans chaque fréquence, au travers de différentes méthodes qui ont été détaillées. Afin de respecter cette consigne, les stations doivent mettre en œuvre des mécanismes d'estimation du potentiel d'interférence des UEs et leur allouer les ressources en conséquence. Enfin, nous avons brièvement étudié l'application des principes de coordination d'interférence dans les réseaux hétérogènes aux systèmes intégrés. La mise en œuvre de techniques de coordination temporelle promet des bénéfices importants de capacité du réseau terrestre, dans le cas où le système satellite est peu chargé.

Conclusion et Ouverture

Conclusion

Les systèmes de télécommunication intégrant de façon invisible la technologie satellite dans un téléphone portable terrestre sont une réalité. Bien que la faisabilité technique de l'intégration des systèmes mobiles satellite avec les systèmes mobiles terrestre soit démontrée (par Terrestar), le succès commercial des services intégrés n'est pas encore au rendez-vous. Au-delà de l'aspect « service », il existe une solution pour accroître l'intérêt des systèmes intégrés : réutiliser le spectre satellite pour les systèmes cellulaires terrestres qui ont des besoins croissant en spectre. Ce concept original, inimaginable il y a quelques années, est rendu possible grâce aux évolutions techniques et réglementaires. Grâce à lui, l'utilisation globale du spectre peut être optimisée. Le sujet de cette thèse porte principalement sur cette réutilisation du spectre, y apportant un éclairage nouveau ainsi que des solutions innovantes.

Dans cette thèse, nous avons adopté une approche descendante du problème du partage de spectre dans les systèmes mobiles intégrés. Avant de nous lancer dans le vif du sujet, nous nous sommes heurtés à la problématique plus générale de l'intégration des systèmes mobile satellite et terrestre. Cette dernière recouvre de nombreux aspects. On trouve beaucoup d'études portant sur les systèmes mobiles « intégrés » ou « hybrides », termes souvent utilisés indistinctement pour désigner des systèmes qui sont différents. Même si *de facto*, ces termes sont communément acceptés, une certaine confusion persiste encore dans la littérature. Dans cette thèse nous avons donc tâché de clarifier cette notion d'intégration des systèmes mobiles satellite et terrestre et d'en explorer les différents aspects, afin de proposer une base commune permettant de mieux comprendre cette problématique complexe. Nos résultats, résumés dans le chapitre 1, alimentent un travail de fond entrepris à l'ETSI dans le groupe SES-SCN pour établir une base de définitions utiles à l'ensemble des acteurs (recherche, institutions, agences spatiales, opérateurs). A ce titre, nous avons rédigé une note technique pour ce groupe.

Cette étude préliminaire nous a permis de nous focaliser plus précisément sur la réutilisation des fréquences. Ce sujet fit son apparition au début des années 2000 aux Etats-Unis, où il donna lieu à de nombreuses publications de brevet, mais peu d'articles scientifiques. Il atteignit ensuite l'Europe, la Corée et le Japon, où ont été produits depuis 2008 une vingtaine d'articles environ sur la réutilisation des fréquences. Son principe peut se résumer ainsi : les stations terrestres réutilisent les portions de spectre du système satellite qui ne sont pas utilisées localement par ce dernier. Dans cette thèse, nous nous sommes penchés sur ce sujet ainsi que sur la problématique indissociable de l'interférence existant entre composantes satellite et terrestre (dite inter-composante). Aucune synthèse complète sur la réutilisation des fréquences n'existant à ce jour dans la littérature, nous souhaitons palier ce manque. Cette thèse propose donc une synthèse sur le sujet de la réutilisation des fréquences et sur l'interférence inter-composante résultante. Cela nous a permis de caractériser certains phénomènes et d'identifier les cas majeurs d'interférences dont le principal est l'interférence engendrée par le système terrestre sur le lien montant satellite.

A partir de ce travail, nous nous sommes attaqués au cœur de cette thèse : définir et analyser des solutions pour lutter efficacement contre ces interférences inter-composantes (ICoI). Nous avons commencé par étudier le principe de zone d'exclusion qui est souvent cité comme solution efficace à

ce problème dans les systèmes satellite multi-faisceaux : on autorise les cellules terrestres à réutiliser les fréquences des faisceaux satellite au-delà d'une certaine isolation avec ces derniers (i.e. celles des faisceaux adjacents à celui dans lequel les cellules se trouvent). Nous avons analysé ses performances dans un système intégré complet et l'impact de son application au niveau des systèmes satellite et terrestre. A moins de restreindre très fortement le spectre disponible pour le système terrestre, le principe de zone d'exclusion reste limité dans son application à des densités d'utilisateurs terrestres très faibles. Cette étude nous a surtout permis de caractériser un point primordial dans les interférences inter-composantes du système terrestre sur le lien montant satellite : ces dernières sont le fait d'un petit nombre d'utilisateurs terrestres aux caractéristiques bien particulières plutôt que de l'agrégation de toutes les sources d'interférences terrestres (qui peuvent s'élever à plusieurs milliers de signaux). Nous avons exploité ce constat pour définir des principes d'allocation de fréquences coordonnée entre systèmes satellite et terrestre. Le premier, « Position Aware », est une simple amélioration du principe de zone d'exclusion. Le second, « ICoI Aware », est plus performant : il tient compte de la puissance potentielle d'ICoI des utilisateurs terrestres afin de leur allouer les fréquences qui perturberont le moins possible le satellite. Nous avons ensuite appliqué ces principes à différents schémas d'allocation de fréquences terrestres (1-reuse, 3-reuse et Partial Frequency Reuse), obtenant ainsi des schémas d'allocation coordonnée. Il est apparu clairement que pour notre système où les cellules terrestres sont de taille restreinte (milieu urbain), les schémas fondés sur le 3-reuse terrestre sont les plus performants : l'interférence terrestre inter-cellules y est la plus faible et donc la puissance d'émission des terminaux reste réduite. Ainsi, les interférences engendrées vers le satellite par les utilisateurs terrestres restent plus faibles qu'avec les schémas 1-reuse et PFR. Lorsque le principe « ICoI Aware » est combiné avec le 3-reuse, il permet de gagner environ un facteur 10 sur les interférences inter-composantes par rapport à un principe d'allocation aléatoire, quelle que soit la charge du système terrestre. L'efficacité du principe « Position Aware » est identique au « ICoI Aware » à faible charge, mais se dégrade rapidement avec l'augmentation de celle-ci. En revanche, il est plus simple à mettre en œuvre.

Bien que nos schémas permettent de réduire les interférences inter-composantes, il manquait un ingrédient primordial pour former une solution complète de réutilisation des fréquences : un moyen pour le système satellite de contrôler l'interférence engendrée par le système terrestre. Comme il est difficile de maîtriser la densité des utilisateurs terrestres et donc des sources d'interférence, nous avons défini une boucle de contrôle fermée qui permet au système satellite de demander au système terrestre de réduire (ou d'autoriser plus) l'interférence subie dans un faisceau à une fréquence donnée. Les cellules terrestres peuvent ainsi réguler en temps réel les niveaux maximum d'interférences qu'elles sont autorisées à produire. Ce mécanisme permet en outre au satellite d'indiquer au système terrestre qu'une fréquence est complètement libre d'utilisation. La boucle de contrôle peut être mise en œuvre simplement avec des signaux pilotes émis par le satellite dans chaque faisceau. Afin que la description de notre solution soit complète, nous avons étudié les possibilités de son implantation dans une architecture de système intégré fondée sur LTE. En effet, LTE constitue naturellement la future génération des systèmes mobiles satellite comme successeur des systèmes actuels fondés sur l'UMTS. Le standard LTE propose des mécanismes de coordination des interférences inter-cellules qui peuvent facilement être adaptés à la coordination de fréquences inter-composantes et à l'implantation de nos solutions.

L'avenir des systèmes mobiles satellite se trouve très certainement dans l'intégration de la technologie satellite dans les terminaux mobiles, comme complément des technologies terrestres. Toutefois, pour en arriver là, de nombreux défis devront être relevés. La réutilisation des fréquences satellite par les systèmes terrestres en constitue un de taille. Nous espérons qu'au travers de nos travaux, nous aurons

servi à faire avancer le sujet et alimenter le rêve de voir un jour les télécommunications par satellite accessibles sur tous les téléphones.

Ouverture du sujet

Cette thèse peut constituer une base préliminaire à de nombreux travaux futurs. Tout d'abord, nous avons établi un cadre pour l'étude des différents aspects recouvrant l'intégration des systèmes satellite avec les systèmes terrestres. Le succès de cette intégration repose sur de nombreux points essentiels. Plus l'étude de l'intégration sera poussée sur ces différents points, plus les chances de succès seront grandes. Outre l'intégration du spectre, nous avons identifié les sujets majeurs qui peuvent être explorés plus avant : intégration du terminal, du service, du réseau et du standard. Chacun de ces sujets vaut d'être étudié et peut donner lieu à des recherches poussées.

Concernant le sujet central de cette thèse, la réutilisation des fréquences, voici différentes pistes qu'il nous semble intéressantes de poursuivre :

- L'analyse des interférences entre systèmes satellite et terrestre a fait apparaître deux cas majeurs : l'interférence de la composante terrestre sur le lien montant satellite et celle sur le lien descendant. Nous nous sommes concentrés sur l'étude du lien montant car c'est le cas qui paraît le plus critique. Toutefois, nous avons démontré que le cas du lien descendant (stations de base vers terminal satellite) peut être très dommageable sous certaines conditions. Il est donc primordial de bien comprendre ce cas d'interférence et d'en analyser les conséquences. A cette fin, il serait précieux de pouvoir disposer d'un modèle de propagation en bande S sur de très longues distances (de l'ordre de plusieurs centaines de km).
- Dans le modèle de système intégré que nous avons utilisé, les faisceaux satellite sont répartis de manière uniforme sur la couverture et les plans de fréquence satellite sont réguliers à N couleurs. Les cellules terrestres, qui sont dans les zones les plus densément peuplées, sont regroupées en grappes denses et localisées à l'échelle de la couverture. Or les techniques de coordinations d'allocation de ressources que nous avons étudiées font en sorte que le système terrestre s'adapte au plan de fréquence satellite. Il pourrait être intéressant d'adapter à l'inverse la forme des faisceaux et le plan de fréquence satellite aux caractéristiques du système terrestre. Une étude d'optimisation conjointe des plans de fréquences satellite et terrestre pourrait donc être menée en tenant compte de la répartition des utilisateurs sur l'ensemble de la couverture.
- Dans les schémas d'allocation coordonnée de ressources que nous avons définis, les stations terrestres sont autorisées à allouer des ressources à la condition que les terminaux terrestres respectent des conditions de puissance d'émission d'interférence vers le satellite. Il serait possible d'aller encore plus loin dans la coordination : la station pourrait ainsi adapter la puissance de ses terminaux dans le but de réduire les interférences inter-composantes. Cela fournirait un levier supplémentaire pour équilibrer capacité du système terrestre et capacité du système satellite. En contrepartie, la complexité de l'algorithme d'allocation des stations terrestres est accrue.
- Dans la dernière partie de cette thèse, nous avons défini une solution de contrôle de l'interférence engendrée par le système terrestre ainsi que l'architecture et les interfaces qui peuvent être utilisés pour les implanter. L'évaluation des performances de cette solution nécessite la simulation dynamique d'un système intégré LTE complet au niveau physique,

MAC et RRM terrestre et satellite. Le développement d'un tel outil constitue un travail qui pourrait bénéficier grandement à la communauté scientifique pour étudier des mécanismes d'allocation de ressources coordonnées. Nous avons d'ailleurs jeté une première pierre en travaillant à l'adaptation aux spécificités du satellite d'un simulateur LTE existant pour les couches MAC et RRM [5.12].

Les chemins à explorer ne manquent pas tant les possibilités de partager le spectre entre systèmes satellite et terrestre sont nombreuses. Notre travail a permis de défricher le sujet, mais il est certain que bien des solutions sont encore à trouver. Nous souhaitons donc que cette thèse engendre une dynamique de recherche positive autour de la réutilisation des fréquences entre systèmes satellite et terrestre et plus largement autour des systèmes intégrés.

Références

- [1.1] G. Maral, M. Bousquet, Z. Sun, “*Satellite Communications Systems: Systems, Techniques and Technology*”, 5th Edition, 742 pp., February 2010, John Wiley and Sons.
- [1.2] X. Lagrange, P. Godlewski, S. Tabbane, “*Réseaux GSM*”, 5th Edition, 521 pp., September 2000, Hermes Science Publications.
- [1.3] K. Al Agha, G. Pujolle, G. Vivier, “*Réseaux de mobiles et réseaux sans fil*”, 490 pp., October 2001, Eyrolles.
- [1.4] S. Sesia, I. Toufik, M. Baker, “*LTE - The UMTS Long Term Evolution: From Theory to Practice*”, 2nd Edition, 792 pp., July 2011, John Wiley and Sons.
- [1.5] E.S.K. Chien, J.A. Marinho, J.E. Russel, “*Design mobile satellite system architecture as an integral part of the cellular access digital network*”, Proceedings of the Mobile Satellite Conference, pp. 387-394, Pasadena, May 1988.
- [1.6] E. Del Re, “*A Satellite Mobile System Integrated with the Terrestrial Cellular Network*”, Conference record of IEEE International Conference on Communications (ICC 89, BOSTON/ICC 89), vol. 1, pp. 223-227, Boston, June 1989.
- [1.7] P.F. Hartigan, R.D. Dewell, “*The Extent of Integration between Satellite and Terrestrial Networks in Future Mobile Communications*”, Proceedings of the 5th International Conference on Satellite Systems for Mobile Communications and Navigation, pp. 147-150, London, May 1996.
- [1.8] E. Del Re, “*A Coordinated European Effort for the Definition of a Satellite Integrated Environment for Future Mobile Communications*”, IEEE Communication Magazine, vol. 34, no. 2, pp. 98-104, February 1996.
- [1.9] F.D. Priscoli, “*UMTS Architecture for Integrating Terrestrial and Satellite Systems*”, IEEE Multimedia Magazine, vol. 6, no. 4, pp. 38-45, December 1999.
- [1.10] B. Evans, M. Werner, E. Lutz, M. Bousquet and al., “*Integration of Satellite and Terrestrial Systems in Future Multimedia Communications*”, IEEE Wireless Communications Magazine, vol. 12, no. 5, pp. 72-80, October 2005.
- [1.11] Federal Communications Commission, “*FCC 01-225 - In the Matter of Flexibility for Delivery of Communications by Mobile Satellite Service Providers in the 2 GHz Band, the L-Band, and the 1.6/2.4 GHz Band*”, August 2001.
- [1.12] Federal Communications Commission, “*FCC 03-15 - In the Matter of Flexibility for Delivery of Communications by Mobile Satellite Service Providers in the 2 GHz Band, the L-Band, and the 1.6/2.4 GHz Band, Report and Order and Notice of Proposed Rulemaking*”, February 2003.
- [1.13] B. Vojcic, D. Matheson, H. Clark, “*Network of Mobile Networks; Hybrid Terrestrial-Satellite Radio*”, Proceedings of the International Workshop on Satellite and Space Communications (IWSSC 2009), pp. 451-455, Tuscany, September 2009.
- [1.14] European Communications Committee, “*ECC Decision of 1 December 2006 on the designation of the bands 1980-2010 MHz and 2170-2200 MHz for use by systems in the*

Mobile-Satellite Service including those supplemented by a Complementary Ground Component (CGC)", ECC/DEC/(06)09, December 2006.

- [1.15] European Commission, "*Commission Decision on the harmonised use of radio spectrum in the 2 GHz frequency bands for the implementation of systems providing mobile satellite services (MSS)*", Official Journal of the European Union, February 2007.
- [1.16] European Parliament, "*Decision No 626/2008/EC of the European Parliament and the Council of 30 June 2008 on the selection and authorisation of systems providing mobile satellite services (MSS)*", Official Journal of the European Union, June 2008.
- [1.17] B. Martin, N. Chuberre, H. Lee and al., "*A Satellite Radio Interface Allowing 3GPP Terminals to Operate over Mobile Satellite Systems*", Proceedings of the 26th International Communications Satellite Systems Conference (AIAA-ICSSC 2008), pp. 1-8, San Diego, June 2008.
- [1.18] Y. Fujino, A. Miura, N. Hamamoto, "*Satellite Terrestrial Integrated Mobile Communication System as a Disaster Contermeasure*", Proceedings of the General Assembly and Scientific Symposium of International Union of Radio Science (URSI GASS 2011), pp. 1-4, Istanbul, August 2011.
- [1.19] ITU-R, "*Annex 9 to Document 4B/148 (Working document towards a preliminary draft Report ITU-R [M/S.TERM] – Terminology used for networks using both satellite and terrestrial links)*", May 2009.
- [1.20] ETSI-SCN group, "SESSCN(11)0004- Satellite Earth Stations and Systems (SES); Classification and Terminology of Systems combining Satellite and Terrestrial Communication Systems", ETSI-SES-SCN group meeting #3, October 2011.
- [1.21] S. DiPierro, R. Akturan, R. Michalski, "*Sirius XM Satellite Radio system overview and services*", Proceedings of the 5th Advanced Satellite Multimedia Systems Conference (IEEE ASMS 2010) and the 11th Signal Processing for Space Communications Workshop (SPSC), pp. 506-511, Cagliari, September 2010.
- [1.22] K. Chung, J. Yu, "*An overview of S-DMB system and the testbed for satellite-mobile convergence services*", International Journal of Satellite Communications and Networking (IJSCN 2010), vol. 29, no. 5, pp. 282-291, September 2010.
- [1.23] S. A. Wilkus, J. D. Bailey, D. G. Brown, "*Field Measurement of a Hybrid DVB-SH Single Frequency Network With an Inclined Satellite Orbit*", IEEE Transactions on Broadcasting, vol. 56, no. 4, pp. 523-531. December 2010.
- [1.24] G. Staple, K. Werbach, "*The end of spectrum scarcity*", IEEE Spectrum Magazine, vol. 48, no. 3, pp. 48-52, March 2004.
- [1.25] J.M. Peha, "*Sharing Spectrum through Spectrum Policy Reform and Cognitive Radio*", Proceedings of the IEEE, vol. 97, no. 4, pp. 708-719, April 2009.
- [1.26] M. Mohoric, G. Kandus, E. Del Re and al., "*Performance study of an Integrated Satellite/Terrestrial Mobile Communication System*", International Journal of Satellite Communications, vol. 14, no. 5, pp. 413-425, May 1996.
- [1.27] G. Ruiz, T.L. Doumi, J.G. Gardiner, "*Teletraffic analysis of an integrated satellite/terrestrial mobile radio system based on nongeostationary satellites*", IEE Proceedings on Communications, vol. 145, no. 5, pp. 378-387, October 1998
- [1.28] E. Del Re, P. Iannucci, "*The GSM Procedures in an Integrated Cellular/Satellite System*", IEEE Journal on Selected Areas in Communications, vol. 13, no 2, pp. 421-430, February 1995.

-
- [1.29] DVB group, “*DVB-SH Implementation Guidelines*”, Standard A120, January 2009.
- [2.1] T. A. Freeburg, “*Networked satellite and terrestrial cellular radiotelephone systems*”, Motorola Inc., US Patent No. US 1995/5394561, Filed in July 1993.
- [2.2] W.W. Mayfield, D.C. Chang, J.I. Novak, “*Communication system employing reuse of satellite spectrum for terrestrial Communication*”, Hughes Electronics Corporation, US Patent No. US 2004/6735437, Filed in June 1998.
- [2.3] P. D. Karabinis et al., “*Coordinated satellite-terrestrial frequency reuse*”, Mobile Satellite Ventures, US Patent No. US 2005/6892068, Filed in August 2001.
- [2.4] R. Singh, “*An ATC Primer: The Future of Communications*”, MSV public document, November 2005.
- [2.5] P.D. Karabinis, “*Integrated or Autonomous System and Method of Satellite-Terrestrial Frequency Reuse using Signal Attenuation and/or Blockage, Dynamic Assignment of Frequencies and/or Hysteresis*”, US Patent No. US 2011/0034166 A1, Filed in February 2011.
- [2.6] P.D. Karabinis, S. Dutta, “*Recent Advances that may Revitalize Mobile Satellite Systems*”, Proceedings of the Advanced Satellite Mobile Systems Conference (ASMS), pp. 1-6, Frascati, July 2003.
- [2.7] P.D. Karabinis, S. Dutta, W. W. Chapman, “*Interference Potential to MSS due to Terrestrial Reuse of Satellite Band Frequencies*”, Proceedings of the 23rd International Communications Satellite Systems Conference (AIAA-ICSSC 2005), pp. 1-12, Rome, September 2005.
- [2.8] D. Zheng, P. D. Karabinis, “*Adaptive Beam-Forming with Interference Suppression in MSS with ATC*”, Proceedings of the 23rd International Communications Satellite Systems Conference (AIAA-ICSSC 2005), pp. 1-12, Rome, September 2005.
- [2.9] Federal Communications Commission, “*FCC 01-225 - In the Matter of Flexibility for Delivery of Communications by Mobile Satellite Service Providers in the 2 GHz Band, the L-Band, and the 1.6/2.4 GHz Band*”, August 2001.
- [2.10] J. Padgett, Telcordia Technologies, “*Analysis of Spectrum Sharing Between MSS and Terrestrial Wireless Services*”, May 2002. Download at (valid in august 2011) : <http://fjallfoss.fcc.gov/ecfs/document/view?id=6513192746>
- [2.11] M. Sturza, ICO Services Limited, “*Intra-System and Inter-System Spectrum Sharing of MSS Networks Including an Ancillary Terrestrial Component (ATC)*”, August 2006. Download at (valid in august 2011) : http://www.ico.com/_about/fcc/files/Filings_Made_With_The_FCC_In_Respect_Of_Ancillary_Terrestrial_Use_Of_ICOs_Spectrum_In_The_USA_Part_1.pdf
- [2.12] Federal Communications Commission, “*FCC 03-15 - In the Matter of Flexibility for Delivery of Communications by Mobile Satellite Service Providers in the 2 GHz Band, the L-Band, and the 1.6/2.4 GHz Band, Report and Order and Notice of Proposed Rulemaking*”, February 2003.
- [2.13] A. Miura, H. Watanabe, N. Hamamoto, “*On Interference Level in Satellite Uplink for Satellite/Terrestrial Integrated Mobile Communication System*”, Proceedings of the 28th International Communications Satellite Systems Conference (AIAA-ICSSC 2010), pp. 1-6, Anaheim, September 2010.
- [2.14] J. Mashino, Y. Shirato, T. Sugiyama, “*Subcarrier Suppressed Transmission Scheme for Satellite/Terrestrial Integrated Mobile Communication System*”, Proceedings of the

- 72nd IEEE Vehicular Technology Conference (VTC 2010-Fall), pp. 1-5, Ottawa, October 2010.
- [2.15] J.M Park, D.S. Oh, D.C. Park, “*Coexistence of Mobile-Satellite Service and Mobile Service in Cofrequency Bands*”, IEEE Transactions on Consumer Electronics, vol. 53, no. 3, pp. 1051-1055, August 2009.
- [2.16] J.M Park, D.S. Ahn, H.J. Lee, “*Feasibility of Coexistence of Mobile-Satellite Service and Mobile Service in Cofrequency Bands*”, ETRI Journal, vol. 32, no. 2, pp. 255-264, April 2010
- [2.17] H. Gam, H.W. Kim, D.S. Oh, “*Satellite Frequency Reuse of Complementary Ground Components in an Integrated MSS system*”, Proceedings of the 28th International Communications Satellite Systems Conference (AIAA-ICSSC 2010), pp. 1-6, Anaheim, September 2010.
- [2.18] H.W. Kim, U. Park, K. Kang, “*Satellite Frequency Reuse Method for Complementary Ground Components in an Integrated MSS System*”, Proceedings of the 73rd IEEE Vehicular Technology Conference (VTC 2011-Spring), pp. 1-5, Budapest, May 2011.
- [2.19] B. Kim, N. Lee, S. Ryoo, “*An Improved Power Estimation for Mobile Satellite Communication Systems*”, International Journal of Communications, Network and System Sciences (Scientific Research 2009), pp. 179-184, June 2009.
- [2.20] A. H. Khan, M.A. Imran, B.G. Evans, “*Adaptive Beamforming for OFDM Based Hybrid Mobile Satellite System*”, Proceedings of the 27th International Communications Satellite Systems Conference (AIAA-ICSSC 2009), pp. 1-6, Edinburgh, September 2010.
- [2.21] V. Deslandes, J. Tronc, A.L. Beylot, “*Analysis of Interference Issues in Integrated Satellite and Terrestrial Mobile Systems*”, Proceedings of the 5th Advanced Satellite Multimedia Systems Conference (IEEE ASMS 2010) and the 11th Signal Processing for Space Communications Workshop (SPSC), pp. 256-261, Cagliari, September 2010.
- [2.22] V. Deslandes, J. Tronc, A.L. Beylot, “*Inter-Component Interference Reduction through Flexible Frequency Reuse in Integrated Mobile Satellite-Terrestrial System*”, Proceedings of the 28th International Communications Satellite Systems Conference (AIAA-ICSSC 2010), pp. 1-9, Anaheim, September 2010.
- [2.23] ITU Radiocommunication Study Groups, ESA, “*Analysis and Assessment of propagation models for estimation of interference and separation distances between CGC Base Stations and Mobile Satellite Receivers*”, ITU-R Document 3M/161-E, November 2010.
- [2.24] Working Group SE of the ECC SE40, CEPT, “*Separation distance required between a CGC BS associated with one MSS system and a MES associated with another MSS system operating co-frequency*”, London, UK, June 2009.
- [2.25] J. Egli, “*Radio Propagation above 40 MC over Irregular Terrain*”, Proceedings of the IRE (IEEE), vol. 45, no. 10, pp. 1383-1391, October 1957.
- [3.1] “*Ofcom UK coverage maps*”, July 2009. Downloaded in November 2011 at: http://licensing.ofcom.org.uk/binaries/spectrum/mobile-wireless-broadband/cellular/coverage_maps.pdf
- [3.2] “*ViaSat-1 – Wildblue New Coverage Map*”, December 2011. Viewed in January 2010 at: <http://www.satelliteinternetupdate.com/2011/12/06/viasat-1-wildblue-new-coverage-map>

-
- [3.3] F. P. Fontán, M. Vázquez-Castro, C. Enjamio Cabado, and al. “*Statistical Modeling of the LMS Channel*”, IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. 50, no. 6, pp. 1549-1567, November 2001.
- [3.4] 3GPP TR 36.942 V8.2.0, “*Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Radio Frequency (RF) system scenarios*”, June 2009.
- [3.5] Columbia University, “*Gridded Population of the World 2005*”, SEDAC, <http://sedac.ciesin.columbia.edu/gpw>
- [4.1] P. Kyösti, et al., “*WINNER II Channel Models*”, IST-WINNER D1.1.2, September 2007.
- [5.1] V. Deslandes, J. Tronc, A.L. Beylot, “*Frequency Sharing Implementation in LTE-based Integrated Satellite-Terrestrial System*”, Proceedings of the 29th International Communications Satellite Systems Conference (AIAA-ICSSC 2011), pp. 1-7, Nara, December 2011.
- [5.2] H. Chowdhury, J. Lehtomäki, “*Interference Analysis Due to Spot Beams Drift in Integrated Satellite-Terrestrial Networks*”, Proceedings of the 4th International ICST Conference on Personal Satellite Services (PSATS 2012), pp. 1-12, Bradford, March 2012.
- [5.3] ETSI TS 101 376-1-2 V3.0.5, “*GEO Mobile Radio Interface Specifications (Release 3) Third Generation Satellite Packet Radio Service; Part 1: General specifications; Sub-part 2: Introduction to the GMR-1 family; GMR-1 3G 41.201*”, March 2009.
- [5.4] ETSI TS 101 376-1-2 V3.0.5, “*GEO Mobile Radio Interface Specifications (Release 3) Third Generation Satellite Packet Radio Service; Part 1: General specifications; Sub-part 3: General System Description; GMR-1 3G 41.202*”, March 2009.
- [5.5] Hughes Network System, “*GMR-1 3G Air Interface Overview*” – ETSI-SES-MSS Meeting #3, October 2008.
- [5.6] Hughes Network System, “*GMR-1 3G Modifications for Version 3.3.1*” – ETSI-SES-SCN Meeting #2, February 2012.
- [5.7] F. Bastia, C. Bersani, E.A. Candreva, et al., “*LTE Adaptation for Mobile Broadband Satellite Networks*”, EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking, vol. 2009, pp. 1-13, March 2009.
- [5.8] University of Bologna, ESYS, IASA, TAS, Qualcomm, “*Study of Satellite Role in 4G Mobile Networks*”, Final Report for ESA, 2008.
- [5.9] X. Luan, S. Ren, B. Li, “*Performance Comparison of OFDM and SC-FDMA for Next Generation Broadband Mobile Satellite Communications*”, Proceedings of the 29th International Communications Satellite Systems Conference (AIAA-ICSSC 2011), pp. 1-11, Nara, December 2011.
- [5.10] draft ETSI TR 101 542 V0.0.7, “*Satellite Earth Stations and Systems (SES): Comparison of candidate radio interfaces performances in MSS context*”, December 2011.
- [5.11] A. Damnjanovic, J. Montojo, Y. Wei and al., “*A Survey on 3GPP Heterogeneous Networks*”, IEEE Wireless Communication Magazine, vol. 18, no. 3, pp. 10-21, June 2011.

- [5.12] C. Morel, V. Deslandes, “*LTE-MARS : an Open Source Tool for Simulating OFDMA Satellite Systems*”, Proceedings of the 29th International Communications Satellite Systems Conference (AIAA-ICSSC 2011), pp. 1-6, Nara, December 2011.

Liste des Publications

Conférences Internationales

- V. Deslandes, J. Tronc, A.L. Beylot, “*Analysis of Interference Issues in Integrated Satellite and Terrestrial Mobile Systems*”, Proceedings of the 5th Advanced Satellite Multimedia Systems Conference (IEEE ASMS 2010) and the 11th Signal Processing for Space Communications Workshop (SPSC), pp. 256-261, Cagliari, September 2010.
- V. Deslandes, J. Tronc, A.L. Beylot, “*Inter-Component Interference Reduction through Flexible Frequency Reuse in Integrated Mobile Satellite-Terrestrial System*”, Proceedings of the 28th International Communications Satellite Systems Conference (AIAA-ICSSC 2010), pp. 1-9, Anaheim, September 2010.
- V. Deslandes, J. Tronc, A.L. Beylot, “*Frequency Sharing Implementation in LTE-based Integrated Satellite-Terrestrial System*”, Proceedings of the 29th International Communications Satellite Systems Conference (AIAA-ICSSC 2011), pp. 1-7, Nara, December 2011.
- C. Morel, V. Deslandes, “*LTE-MARS : an Open Source Tool for Simulating OFDMA Satellite Systems*”, Proceedings of the 29th International Communications Satellite Systems Conference (AIAA-ICSSC 2011), pp. 1-6, Nara, December 2011.

Documents de standardisation

- ETSI-SCN group, “*SESSCN(11)0004- Satellite Earth Stations and Systems (SES); Classification and Terminology of Systems combining Satellite and Terrestrial Communication Systems*”, ETSI-SES-SCN group meeting #3, October 2011.

Brevet

- Dépôt d’un brevet en attente de publication portant sur l’allocation de fréquences dans les systèmes intégrés satellite-terrestres.