



HAL
open science

Optimisation de la gestion des ressources voie retour

Yoann Couble

► **To cite this version:**

Yoann Couble. Optimisation de la gestion des ressources voie retour. Réseaux et télécommunications [cs.NI]. Institut National Polytechnique de Toulouse - INPT, 2018. Français. NNT : 2018INPT0058 . tel-04187451

HAL Id: tel-04187451

<https://theses.hal.science/tel-04187451v1>

Submitted on 24 Aug 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 (Toulouse INP)

Discipline ou spécialité :

Réseaux, Télécommunications, Systèmes et Architecture

Présentée et soutenue par :

M. YOANN PIERRE COUBLE

le lundi 3 septembre 2018

Titre :

Optimisation de la gestion des ressources voie retour

École doctorale :

Mathématiques, Informatique, Télécommunications de Toulouse (MITT)

Unité de recherche :

Institut de Recherche en Informatique de Toulouse (I.R.I.T.)

Directeur de Thèse :

M. ANDRE LUC BEYLOT

Rapporteurs :

M. HERVE RIVANO, INSA LYON

Mme SARA ALOUF, INRIA

Membres du jury :

M. HERVE RIVANO, INSA LYON, Président

M. ANDRE LUC BEYLOT, INP TOULOUSE, Membre

M. CÉDRIC BAUDOIN, THALES ALENIA SPACE, Membre

M. EMMANUEL CHAPUT, INP TOULOUSE, Membre

Mme CATHERINE ROSENBERG, UNIVERSITY OF WATERLOO, Membre

M. THOMAS NOEL, UNIVERSITE DE STRASBOURG, Membre

M. TIJANI CHAHED, TELECOM SUD PARIS, Membre

REMERCIEMENTS

Ces trois années de thèse auront été un moment particulièrement heureux de ma vie. Que ce soit sur le plan professionnel où j'ai eu l'occasion de découvrir le monde académique tout en étant au contact de l'industrie du satellite, ou sur le plan personnel avec de formidables rencontres et un cadre de travail optimal.

Ce cadre favorable au travail et à l'épanouissement, je suis bien conscient qu'il n'est pas automatique, et qu'il est en grande partie dû au laboratoire et surtout au directeur de thèse. C'est pourquoi je tiens en tout premier lieu à remercier André-Luc Beylot, mon directeur, pour tout ce qu'il a pu faire pour que ma thèse ait lieu et qu'elle se déroule dans les meilleures conditions. En sus de l'équipe d'encadrement qu'il a montée, de ses nombreuses incitations à participer à la vie de la communauté de recherche en réseaux et de ses conseils avisés, il m'a aussi permis d'allier le travail avec ma vie personnelle partagée entre Toulouse et Lyon, ce pour quoi je ne le remercierais jamais assez.

Je tiens également à remercier mes nombreux co-encadrants, toujours disponibles et prêts à m'apporter leur expertise et leur soutien. Chaque réunion avec eux répondait à mes questions et en ouvrait une multitude de nouvelles, et je pense que le succès de ma thèse doit beaucoup à la qualité des échanges que nous avons pu avoir. Plus particulièrement, je tiens à remercier Caroline Bès qui a énormément contribué à mettre en place cette thèse et qui a tenu à continuer à la suivre malgré un changement de poste, afin de pouvoir continuer à apporter ses remarques pertinentes jusqu'au bout. Je dois également beaucoup à Jean-Baptiste Dupé qui s'est particulièrement investi dans ma thèse, sans crainte de se plonger dans les détails techniques. Nos séances de réflexions m'ont permis de grandement clarifier les problèmes qui me faisaient face. Non content de participer au contenu technique, il a aussi su m'apporter un soutien moral important dans les nombreux moments de doute et de perte de confiance. Pour toutes ces raisons, je lui suis extrêmement reconnaissant. Tous mes remerciements vont aussi à Cédric Baudoin qui m'a apporté son expertise et son esprit critique tout au long de ces trois années, sachant à la fois remettre en question mes idées et garder un esprit ouvert aux propositions d'une personne moins expérimentée, tout en offrant généreusement son

rire et sa bonne humeur à tout moment. Je veux aussi remercier vivement Thibault Deleu qui s'est également beaucoup impliqué dans mes travaux, toujours prêt à apporter ses contributions pertinentes aux discussions, à m'éclaircir sur des points techniques mal compris ou à investir un temps considérable aux relectures permettant d'améliorer grandement la qualité de mes productions scientifiques. Sa disponibilité et ses conseils m'ont été précieux. Enfin, je tiens à exprimer ma reconnaissance à Emmanuel Chaput, qui a été très présent tout au long de ces trois années, toujours prêt à envoyer une petite pique sympathique tout en m'apportant son expérience, ses conseils avisés et son soutien (ainsi que son aide à la traduction du langage Beylot!).

Au cours de ces trois années, j'ai eu la chance de faire de nombreuses rencontres, toutes plus enrichissantes les unes que les autres. Je tiens donc à remercier tout particulièrement Catherine Rosenberg, qui a joué un rôle important dans ma thèse. J'ai énormément appris à son contact, à travers nos rencontres lyonnaises ou parisiennes ou encore lors de mon séjour au sein de son laboratoire, à l'université de Waterloo. Ses critiques, toujours pertinentes, et sa volonté d'aller au fond des choses de la manière la plus rigoureuse possible m'ont permis d'évoluer scientifiquement, de mieux maîtriser mon sujet et la comparaison avec le cas terrestre, et d'apporter un regard nouveau à mes recherches. De tout cela je lui suis extrêmement reconnaissant. D'autre part, notre rencontre n'aurait pas été possible sans l'intermédiaire des membres de l'équipe Agora et du CITI à Lyon, et en particulier Fabrice Valois, Razvan Stanica et Hervé Rivano, et je les remercie tout particulièrement pour cela, mais aussi pour leur générosité d'avoir accepté de me recevoir dans leurs locaux à plusieurs reprises, me permettant ainsi de limiter des déplacements trop fréquents tout en disposant d'un cadre favorable au travail. Mes séjours dans leur équipe ont été particulièrement enrichissants, permettant des discussions de qualité et une ouverture d'esprit à des approches et méthodes de travail différentes. Je tiens aussi à remercier, en plus de ces trois personnes, tous les membres de leurs équipes qui ont été particulièrement accueillantes, et notamment Jad et Romain. En parallèle, je veux aussi remercier très chaleureusement Mathieu Dervin et Nathalie Thomas, qui se sont à de nombreuses reprises rendus disponibles pour m'expliquer des aspects des systèmes satellitaires ou des couches basses des télécommunications qui sortaient de mon champ de compétences. Mes remerciements vont aussi à toutes les autres personnes qui ont accepté de me consacrer un peu de temps pour discuter de sujets à la limite de mes connaissances pendant ces trois années, et notamment Sandra Ngueveu, Alain Haït, Nicolas Jozefowicz, Brigitte Jaumard et Hervé Rivano pour leurs conseils et recommandations relatifs aux techniques d'optimisation. Je veux aussi remercier fortement Hervé Rivano et Sara Alouf d'avoir accepté de rapporter ma thèse et fait une relecture consciencieuse et de qualité.

Au delà des aspects purement scientifiques, il y a de nombreux autres facteurs qui rentrent en compte dans la manière de vivre sa thèse et qui favorisent son succès, et notamment l'entourage. Et de ce côté la, je veux en premier lieu remercier Élie et Dorin pour leur amitié constante et leur implication forte dans la réussite de cette thèse (notamment à coup de "juste une" et de nombreux trolls). Ces trois années auraient été beaucoup plus dures sans eux, et les nombreuses soirées et sorties escalade passées ensemble ont été salvatrices pour évacuer toute la pression de la thèse. Merci énormément aussi aux autres membres de la fine équipe du labo très présente pendant la dernière ligne droite : Oana, Adrien, Alexandra et Amal, mais aussi à tous les autres, amis, labo et thales : Nico, Julien, Renaud, Fabrice, Raph, Hugo, Elene, Santi, Machine, Cédric, Mohammed, Kuljaree, JGK, Mika, Riadh, Katia et tous ceux que j'oublie, qui participent grandement à cette bonne ambiance toulousaine, que ce soit à travers les restos du vendredi, les barathons ou les multiples occasions de se retrouver et d'oublier quelques instants la thèse!

Je tiens aussi à remercier ma famille pour son oreille attentive, et ses encouragements permanents.

Et enfin et par dessus tout, merci Amandine, pour tout.

RÉSUMÉ

La gestion des ressources d'un lien satellite est un enjeu particulièrement important pour les constructeurs et opérateurs de satellites, puisque les ressources sont très limitées, et définitives. Un des axes majeurs d'amélioration de la gestion des ressources qui vise à augmenter la rentabilité d'un système satellite est la réutilisation des fréquences, permettant ainsi de fournir un service à un plus grand nombre d'utilisateurs simultanément. C'est un concept particulièrement important pour l'adaptation des systèmes satellite au monde de l'Internet, où les communications suivent majoritairement le modèle client-serveur. Dans cette thèse nous nous intéressons à la gestion des ressources fréquentielles sur la voie retour d'un satellite géostationnaire multifaisceau, avec un accent particulier sur la gestion des interférences qui sont causées par cette utilisation intensive des fréquences.

La voie retour, somme toute assez récente, n'a que très peu été considérée par le passé, surtout du point de vue des interférences. En effet, la majeure partie du trafic étant traditionnellement porté par la voie aller (que ce soit en télévision par satellite ou pour l'accès à Internet par satellite), il est naturel que ce lien ait été traité en priorité. Mais le changement d'équilibre entre voie aller et voie retour dû à l'évolution des usages (mise en ligne de photos et vidéos, par exemple) pousse les industriels à s'intéresser de plus près au cas de la voie retour, qui diffère de la voie aller par la géométrie des interférences et les mécanismes et protocoles d'accès au support.

Pour autant, les problèmes de gestion des ressources fréquentielles en présence d'interférences ne sont pas nouveaux, et il est possible de trouver une littérature pléthorique dans le cadre des réseaux cellulaires terrestres. En effet, avec l'introduction des antennes multifaisceaux, le système satellite s'apparente à un système cellulaire terrestre de télécommunication mobile.

Dans ce manuscrit nous abordons le problème de la gestion des ressources radio et des interférences de manière globale et du point de vue du système, et apportons des réponses aux questions suivantes. Quels sont les gains que l'on peut raisonnablement attendre de la densification de l'utilisation des fréquences? Quel est le niveau de coordination est nécessaire pour réellement bénéficier de cette densification? Et à quel prix? Ces

questions fondamentales sont peu traitées dans la littérature, voire pas du tout dans la littérature de la voie retour des satellites géostationnaires. Pour répondre à ces questions, nous modélisons les problèmes d'allocation des ressources temporelles et fréquentielles, permettant d'évaluer le débit maximal d'un système donné, en prenant en compte ou non l'équité. Puis afin de quantifier l'importance de la coordination, nous étudions le système sous différents degrés de coordination, correspondant à différentes techniques de gestion des ressources radio. Nos résultats montrent que pour un schéma de réutilisation intense des fréquences, la coordination dynamique des interférences est nécessaire afin d'atteindre des gains significatifs par rapport aux schémas plus conservateurs, mais peut être seulement locale. De plus, une solution simple de coordination dynamique est présentée, permettant d'atteindre une grande partie des gains de la solution optimale, tout en réduisant significativement sa complexité.

ABSTRACT

The management of a satellite link radio resources is a particularly important aspect for satellite manufacturers and operators, since satellite resources are very limited and final. To increase the profitability of a satellite system, one of the main improvement axis of radio resource management is frequency reuse, which enables more users to access the service simultaneously. It is a particularly important concept in the process of adapting satellite systems to the Internet world, where communications mainly follow the client-server model. In this thesis, we focus on spectral resource management in the return link of a geostationary multibeam satellite, with a particular focus on the interference management issues that are put forward by this densification of frequency usage.

The return link, which is actually relatively recent, has not received much attention in the past, especially regarding interference management. As a matter of fact, since the majority of the traffic was traditionally carried by the forward link (be it for television by satellite or for Internet access through satellite), it was understandable that it was more widely studied. However, there is a recent shift in Internet usage towards a more balanced equilibrium between downlink and uplink traffic (video and picture upload, for example). Therefore, the satellite industry has put more interest in the return link, which differs from the forward link by the interference geometry and the various access mechanisms and protocols.

Nevertheless, spectral resource management problems in the presence of interference are not new, and there is a wide literature in the context of terrestrial cellular networks. Indeed, with the introduction of multibeam antennas, satellite systems are a new kind of cellular network, similar in many ways to the mobile telecommunication networks.

In this thesis, we tackle the problem of radio resources management in the presence of interference in a global manner and from the system perspective, and we try to bring answers to the following questions. What are the maximal gains that can reasonably be expected from frequency usage densification? What level of coordination is really necessary to achieve such gains? At what cost? These fundamental questions have rarely been addressed in the literature, and especially not in the return link of satellite

systems.

To answer to these questions, we model the radio resource allocation problems, enabling to evaluate the maximum throughput of a given system, whether equity is taken into account or not. Then, in order to quantify the impact of interference coordination, we study the system under different degrees of coordination, corresponding to different radio resource management schemes. Our results show that, for an aggressive frequency scheme, dynamic interference coordination is necessary to reach significant gains with reference to more conservative schemes, but this coordination can also be limited to the closest neighborhood. Moreover, a simple dynamic interference coordination solution is presented, reaching most of the optimal solution gains, but with lower complexity.

TABLE DES MATIÈRES

Table des figures	xiii
Liste des tableaux	xvii
Glossaire	xix
1 Introduction	1
2 Présentation du système	5
1 Introduction	5
2 Architecture du système satellitaire de référence	6
2.1 Segment sol	7
2.2 Segment spatial	7
2.3 Segment utilisateur	9
2.4 Lien <i>feeder</i> et lien <i>user</i>	9
3 Satellites multifaisceaux, interférences et bilan de liaison	10
3.1 Interférences	10
3.2 Bilan de liaison lien <i>user</i> uplink	11
4 Protocoles et mécanismes de communication	13
4.1 Structure des ressources de la voie retour	14
4.2 Codage et Modulation	15
4.3 Méthodes d'affectation des ressources	16
4.4 Contrôle de puissance	16
5 Gestion des ressources de la voie retour dans un système à forte réutilisation des fréquences	16
5.1 Définition du taux de réutilisation des fréquences	16
5.2 Schémas de réutilisation des fréquences pour la voie retour	17
6 Conclusion	18

3	État de l'art	19
1	Introduction	19
2	Gestion des interférences	22
2.1	Atténuation d'interférences (<i>Interference Mitigation</i>)	23
2.2	Coordination d'Interférences	25
2.3	Conclusion sur les approches de gestion d'interférences	42
3	Modélisation des problèmes de gestion des ressources radio en présence d'interférences	43
3.1	Graphes d'interférences	44
3.2	Modèles avec contraintes d'interférences	46
3.3	Modèles faisant appel à la théorie des jeux	48
3.4	Conclusion sur les modèles des problèmes de gestion d'interférences	50
4	Équité et gestion des ressources radio	50
4.1	Préambule : mesurer l'équité	51
4.2	Stratégies de partage des ressources	54
4.3	Conclusion sur les approches de l'équité dans la gestion des interfé- rences	56
5	Conclusion de l'état de l'art : quelles solutions pour la voie retour des satellites multifaisceaux?	56
4	Calcul de la borne supérieure de l'allocation	59
1	Introduction	59
1.1	Plan du chapitre	60
1.2	Récapitulatif des hypothèses systèmes	60
2	Problème de maximisation du débit du système	63
2.1	Formulation du problème	64
2.2	Réduction des symétries du problème	68
3	Recherche de l'allocation <i>Proportional Fairness</i> (PF) maximale	70
3.1	Formulation du problème global	72
4	Résultats	73
4.1	Environnement d'évaluation de performances	73
4.2	Récapitulatif des problèmes définis	74
4.3	Résultats pour un pavage hexagonal des faisceaux	74
4.4	Résultats pour un pavage carré	78
5	Conclusions du chapitre	80

5	Importance de la coordination	83
1	Introduction	83
2	Préliminaire : allocation PF-optimale sans connaissance des interférants . .	84
3	Nécessité et nature de la coordination	85
3.1	Solution d'allocation des ressources sans coordination dynamique .	86
3.2	Solution d'allocation des ressources avec ordonnancement conjoint	89
3.3	Solution intermédiaire de coordination dynamique	90
3.4	Comparaison des différentes natures de coordination	91
4	Portée de la coordination	93
4.1	Faisceaux coordonnés, faisceaux non-coordonnés	94
4.2	Résultats	95
5	Conclusion sur les degrés de coordination	96
6	Schémas agressifs de réutilisation de fréquences	99
1	Introduction	99
2	Un nouveau schéma statique de réutilisation de fréquences	100
3	Évaluation de performances des schémas statiques pour la voie retour . . .	102
3.1	Critères de comparaison	103
3.2	Comparaison des schémas de réutilisation de fréquences	105
4	Application à la voie aller	110
4.1	Analyse qualitative	110
4.2	Analyse quantitative	111
5	Conclusions	112
7	Conclusions et Perspectives	115
	Bibliographie	121
	Annexe A Réduction du nombre de contraintes de TSO-CAPA	133
	Annexe B Résultats de la détermination du facteur d'interférence résiduel pour différents degrés de coordination	135
	Annexe C Extension du schéma Six demi-couleurs (6HC) au cas à une polarisation	137

TABLE DES FIGURES

1.1	Illustration des différents types de satellites géostationnaires, des réseaux terrestres et de zones où l'infrastructure est peu présente.	2
2.1	Quelques exemples d'orbites dans un hypothétique plan commun, à l'échelle, inspiré de [8].	6
2.2	Topologies de systèmes satellitaires définies dans [9]. La topologie considérée ici est celle en étoile où tout le trafic est directement renvoyé vers la gateway.	6
2.3	Architecture du système considéré.	7
2.4	Polarisation circulaire droite (RHCP) et gauche (LHCP) : orientation du champ électrique. Illustration tirée de [11].	8
2.5	Organisation des faisceaux.	8
2.6	Diagramme d'antenne pour un faisceau utilisateur. Au niveau de l'équateur, 0.1 degré d'ouverture correspond à environ 62.5 km au niveau de la mer.	10
2.7	Comparaison de la géométrie des interférences entre voie aller et voie retour, sur un cas avec 3 faisceaux	11
2.8	Éléments pris en compte dans le bilan de liaison.	12
2.9	Structure et organisation des ressources sur la voie retour.	14
2.10	Schémas classiques de réutilisation homogène des fréquences, montrés sur une disposition des faisceaux selon un pavage carré.	17
3.1	Schémas homogènes de réutilisation de fréquences (Frequency Reuse) à 3, 4 et 7 couleurs. Les couleurs correspondent à des bandes de fréquences de taille égale.	20
3.2	Classification des principales approches de la gestion des interférences.	22
3.3	Transmission conjointe et formation dynamique de faisceaux.	25
3.4	Polarisations orthogonales.	26
3.5	Directions de propagation du signal.	27
3.6	Atténuation en fonction de la distance au centre du faisceau ou de la cellule.	28

3.7	Déploiements d'antennes directionnelles/omnidirectionnelles.	29
3.8	Schémas de réutilisation de fréquences classiques.	31
3.9	35
3.10	Différents contextes de l'utilisation d'association des utilisateurs aux cellules.	37
3.11	Illustration du fonctionnement des ordonnancements coopératif et conjoint.	39
3.12	Problèmes d'allocation de fréquences (Frequency Assignment Problem (FAP)).	44
3.13	Différentes natures de graphes d'interférences.	45
3.14	Exemple d'hypergraphe, correspondant au modèle donné dans [118] et de coloration d'hypergraphe. Dans l'exemple, les zones 2e et 7e peuvent utiliser le même canal à condition que la zone 5e n'utilise pas ce même canal.	45
4.1	Structure de la matrice de contraintes du problème TSO-CAPA . Les coefficients non nuls sont représentés par un rectangle bleu, et les coefficients correspondant aux variables x_{im}^{kc} nécessairement nulles ne sont pas représentés.	68
4.2	Traitement global ou séquentiel.	70
4.3	Scénario et pré-colorations considérés pour le pavage hexagonal (une seule polarisation).	75
4.4	Résultats en débit total du système et moyenne géométrique des débits utilisateurs pour le pavage hexagonal, avec un nombre variable d'utilisateurs et un nombre de porteuses constant. Les intervalles de confiance à 95% sont également représentés pour chaque point.	76
4.5	Passage à l'échelle des formulations, pour le pavage hexagonal.	77
4.6	Scénario, et pré-colorations considérés pour le pavage carré (une seule polarisation).	78
4.7	Résultats pour le pavage carré.	79
5.1	Moyenne géométrique du goodput et du throughput , ainsi que Taux d'Erreur Paquet (PER) moyen en fonction du facteur d'interférence η pour les schémas Frequency Reuse (FR)-2 et FR -4, avec une allocation de ressources sans coordination dynamique Round Robin Randomisé (RRR) et pour un pavage carré . La zone autour du goodput représente l'intervalle entre les 5 ^e et 95 ^e centiles.	88
5.2	Moyenne géométrique du goodput et du throughput , ainsi que le PER moyen en fonction du facteur d'interférence η pour les schémas FR -2 et FR -4, avec une allocation de ressources sans coordination dynamique RRR et pour un pavage hexagonal . La zone autour du goodput représente l'intervalle entre les 5 ^e et 95 ^e centiles.	89

5.3	Diagramme d'antenne, avec limite des faisceaux (schématique).	93
6.1	Illustration de la localisation des interférences principales.	100
6.2	Principe du schéma Six demi-couleurs (6HC), pour les pavages carré et hexagonal.	101
6.3	Schémas classiques FR-3 et Fractional Frequency Reuse (FFR)-4.	101
6.4	Pires cas d'interférences pour les schémas FFR-4 et 6HC.	103
6.5	Représentation graphique des performances des différentes stratégies de gestions des ressources.	104
6.6	Schémas de coloration Soft Frequency Reuse (SFR) et Partial Frequency Reuse (PFR), pour le pavage hexagonal, le principe étant le même pour le pavage carré.	105
6.7	Performances en débit total du système des schémas à contrôle de puissance, sur des scénarios à 18 faisceaux, 12 porteuses et 20 utilisateurs par faisceau.	106
6.8	Performances des différents schémas de coloration pour le pavage hexagonal.	107
6.9	Performances des différents schémas de colorations pour le pavage carré.	108
6.10	Pires cas d'interférences pour les schémas FFR-4 et 6HC pour la voie aller (interférences sur le pire utilisateur) et un pavage hexagonal.	111
6.11	Résultat des simulations pour la voie aller, pour 18 faisceaux.	112
C.1	Principe de l'extension du schéma 6HC, à un cas à une polarisation et à une réutilisation plus agressive sur un pavage hexagonal. Comme mis en évidence par les contours blancs on retrouve le principe du 6HC, où l'on concentre les pires interférants sur la même couleur, et en se privant d'utiliser cette couleur dans le faisceau.	137

LISTE DES TABLEAUX

2.1	Quelques schémas de codage et modulation standardisés dans le DVB Return Channel via Satellite 2 (DVB-RCS2) [21].	15
3.1	Comparaison des schémas classiques de réutilisation de fréquences.	32
3.2	Récapitulatif des approches semi-statiques présentées.	38
3.3	Récapitulatif des approches dynamiques présentées	41
3.4	Comparaison des schémas classiques de réutilisation de fréquences	42
3.5	Récapitulatif des modèles pour les problèmes de gestion d'interférences	50
4.1	Notations utilisées dans ce manuscrit.	63
4.2	Données utilisées pour les tests	75
5.1	Comparaison des performances des trois solutions de coordination pour un PER de 10^{-2} en pourcentage des performances de l'allocation quasi PF-optimale RBO-PF-2 , et mise en rapport avec le quantité d'informations nécessaire et les temps d'exécution.	92
5.2	Portées de coordination considérées.	94
5.3	Gains moyens par rapport à l'état de l'art (RRR-4) pour différentes métriques, pour un $PER \leq 10^{-2}$, pour les différents degrés de coordination appliqués.	95
A.1	Temps de résolution du problème TSO-CAPA sur quelques exemples.	134
B.1	Détermination du facteur d'interférence optimal pour un $PER \leq 10^{-2}$ pour toutes les portées de coordination considérées et les allocations de ressources RRR , COORDMCS et RBO-PF	135

GLOSSAIRE

This document is incomplete. The external file associated with the glossary ‘main’ (which should be called `these.gls`) hasn’t been created.

Check the contents of the file `these.glo`. If it’s empty, that means you haven’t indexed any of your entries in this glossary (using commands like `\gls` or `\glsadd`) so this list can’t be generated. If the file isn’t empty, the document build process hasn’t been completed.

You may need to rerun `LATEX`. If you already have, it may be that `TEX`’s shell escape doesn’t allow you to run `makeindex`. Check the transcript file `these.log`. If the shell escape is disabled, try one of the following:

- Run the external (Lua) application:
`makeglossaries-lite.lua "these"`
- Run the external (Perl) application:
`makeglossaries "these"`

Then rerun `LATEX` on this document.

This message will be removed once the problem has been fixed.

INTRODUCTION

Dans son article visionnaire de 1945, intitulé “*Extra-terrestrial relays*” [1], le célèbre ingénieur-écrivain Arthur C. Clarke a mis en évidence les avantages techniques et économiques considérables de l’utilisation de satellites en orbite géostationnaire pour les services de diffusion. En effet, en restant toujours au-dessus du même point de la Terre et étant à 36 000 km d’altitude, leur couverture est immense et ils offrent une qualité de service constante et uniforme en tout point du globe. Ainsi, même si le coût de lancement d’un satellite est très élevé, un service de diffusion par satellite représente un coût négligeable par rapport aux investissements nécessaires au déploiement des réseaux d’accès des solutions terrestres.

Cette vision s’est rapidement concrétisée avec la course à l’espace et en 1964 le lancement de SYNCOM 3, premier satellite géostationnaire, et continue d’être un des moyens privilégiés pour offrir des services de diffusion à l’échelle d’un pays ou d’un continent.

De manière concurrente, l’Internet a fait son apparition dans les années 70, s’est développé, et a depuis largement pris le dessus en termes de volume de données, d’applications au quotidien et surtout de potentiel économique. Les satellites se sont longtemps tenus à l’écart des communications pour l’Internet, en raison de la faible compétitivité du satellite face aux réseaux terrestres pour des communications *unicast*, et en particulier depuis le déploiement des fibres optiques intercontinentales.

Cependant, si les réseaux terrestres desservent déjà une grande partie de la population mondiale, il reste encore des situations où les satellites sont perçus comme la meilleure option de raccordement à l’Internet. Par exemple, dans le cas de zones reculées et peu densément peuplées (zones rurales, montagneuses) ou encore sans infrastructure pré-existante (pays en voie de développement), le déploiement des technologies très haut débit

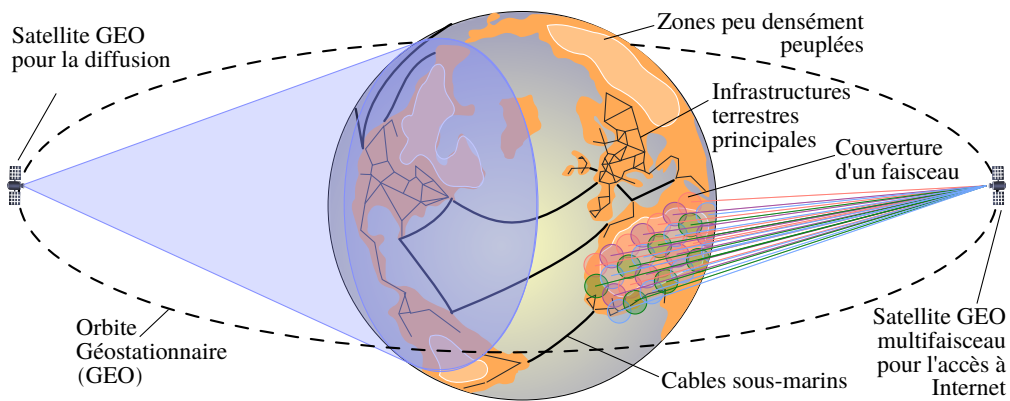


FIGURE 1.1 Illustration des différents types de satellites géostationnaires, des réseaux terrestres et de zones où l'infrastructure est peu présente.

(de type fibre) représente un investissement colossal. Ces deux situations ont ainsi motivé depuis plusieurs années le développement et l'adaptation de solutions géostationnaires d'accès à Internet par satellite. Plus récemment, elles ont aussi attiré de nombreux géants du Web tels que Facebook ou Google et des acteurs du monde des satellites comme OneWeb et O3b Networks sur le créneau des méga-constellations où des milliers de petits satellites en orbite basse offrent une couverture globale [2, 3].

Pour le cas géostationnaire, cette adaptation est passée d'une part par le développement des antennes multifaisceaux qui a permis d'augmenter considérablement la capacité des satellites, et d'autre part par le développement de la voie retour (le lien des utilisateurs vers le reste du monde) nécessaire pour une adaptation au modèle de communication de l'Internet. En effet, contrairement aux réseaux de diffusion de contenu de type télévision par satellite où les terminaux utilisateurs ne sont que des récepteurs passifs, les communications sur Internet sont interactives (donc bidirectionnelles), indépendantes et variables ce qui demande un très grand nombre de canaux et une flexibilité importante. Les antennes multifaisceaux permettent la réutilisation spatiale des fréquences, comme illustré sur la figure 1.1, et donc une multiplication des canaux de communication qu'il est possible d'allouer aux utilisateurs. Ainsi, la grande couverture et la capacité importante de ce type de satellites en font une solution concurrente très intéressante vis-à-vis du déploiement filaire qui est très coûteux dans ces zones.

Cependant, la réutilisation des fréquences rendue possible par les satellites multifaisceaux va de paire avec l'apparition d'interférences, lorsque les fréquences sont réutilisées dans des zones proches géographiquement. Ainsi, une approche conservatrice généralement adoptée consiste à éviter la réutilisation des fréquences dans ces cas-là, et de n'utiliser qu'une partie des fréquences dans les différentes régions. Si cette solution est efficace pour

éviter les interférences, elle ne permet pas une utilisation optimale des ressources fréquentielles, et de plus en plus d'intérêt est porté vers l'augmentation de la réutilisation des fréquences, quitte à diminuer les marges du système. Il devient alors nécessaire d'assurer une gestion précise et intelligente des ressources fréquentielles que ce soit sur la voie aller (satellite vers utilisateurs) ou sur la voie retour (utilisateurs vers satellite). Pour cela, il convient d'utiliser tous les leviers à notre disposition pour que l'impact des interférences soit contenu, et qu'elles n'augmentent pas l'iniquité entre utilisateurs.

Contributions et plan

Dans cette thèse nous nous intéressons à la gestion des ressources fréquentielles sur la voie retour d'un satellite géostationnaire multifaisceau. La voie retour, somme toute assez récente [4], n'a que très peu été considérée par le passé, surtout du point de vue des interférences. En effet, la majeure partie du trafic étant porté par la voie aller (que ce soit en télévision par satellite ou pour l'accès à Internet par satellite), il est naturel que ce lien ait été traité en priorité. Mais le changement d'équilibre entre voie aller et voie retour dû à l'évolution des usages (mise en ligne de photos et vidéos, par exemple) pousse les industriels à s'intéresser de plus près au cas de la voie retour, qui diffère de la voie aller par la géométrie des interférences et les mécanismes et protocoles d'accès au support.

Pour autant, les problèmes de gestion des ressources fréquentielles en présence d'interférences ne sont pas nouveaux, et il existe une littérature pléthorique dans le cadre des réseaux cellulaires terrestres [5, 6]. En effet, avec l'introduction des antennes multifaisceaux, le système satellitaire s'apparente à un système cellulaire présentant de grandes ressemblances avec les réseaux cellulaires tels que le Long Term Evolution (LTE).

Dans ce manuscrit nous abordons le problème de la gestion des ressources radio et des interférences de manière globale et du point de vue du système, et apportons des réponses aux questions suivantes. Quels sont les gains que l'on peut raisonnablement attendre de la densification de l'utilisation des fréquences ? Quel est le niveau de coordination nécessaire pour réellement bénéficier de cette densification, et à quel prix ?

Pour y répondre, nous modélisons les problèmes d'allocation des ressources temporelles et fréquentielles, permettant d'évaluer le débit maximal d'un système donné, en prenant en compte ou non l'équité. Puis afin de quantifier l'importance de la coordination, nous étudions le système sous différents degrés de coordination, correspondant à différentes techniques de gestion des ressources radio. Notre analyse et nos propositions sont organisées en cinq chapitres, dont le détail est donné ci-après :

Dans le chapitre 2 nous décrivons le système sur lequel nous nous sommes concentrés. Nous nous focalisons alors sur les principes de base des interférences et les spécificités

liées à la voie retour, afin de mettre en exergue la complexité du problème auquel nous nous intéressons et d'en comprendre tous les aspects.

Le chapitre 3 propose une synthèse de la gestion des ressources radio, orientée selon trois axes majeurs. Premièrement, nous nous intéressons aux approches de la gestion des interférences en classifiant les méthodes proposées dans la littérature à la fois pour les réseaux cellulaires terrestres et satellitaires, sur les liens montant et descendant. Puis, nous passons en revue les outils mathématiques utilisés pour modéliser les problèmes d'allocation de ressources radio en présence d'interférences. Enfin, les approches de l'équité sont abordées, en lien avec la gestion des interférences. Cette synthèse s'efforce de faire un rapprochement régulier avec l'application des différentes méthodes au cas d'étude initial : la voie retour d'un satellite multifaisceau.

Dans le chapitre 4, nous formulons le problème du calcul du débit maximal d'un système satellite multifaisceau, sous les contraintes liées au système ainsi qu'à la voie retour et en considérant un ordonnancement conjoint qui prend en compte les interférences. Cette formulation est transformée sans perte d'optimalité pour prendre la forme d'un problème linéaire en nombres entiers, qu'il est possible de résoudre en utilisant des outils classiques. Une simplification permettant de traiter des problèmes de plus grande taille est aussi étudiée et comparée aux solutions exactes en termes de perte d'optimalité et de réduction du temps de résolution. Enfin, nous adaptons cette formulation au problème d'allocation proportionnellement équitable des ressources aux utilisateurs, avant de résoudre une version simplifiée de ce dernier problème.

Le chapitre 5 s'intéresse à l'impact de la coordination sur l'efficacité des solutions de gestion des interférences, et de la faisabilité d'un schéma de réutilisation de fréquence agressif. Ce chapitre porte en particulier sur la quantité d'information nécessaire à la coordination, la complexité de résolution et les performances en débit du système.

Enfin nous présentons dans le dernier chapitre une solution spécifique aux satellites à double polarisation, ne nécessitant pas une architecture centralisée, ni de coordination. Elle repose sur une approche originale de la gestion des ressources spectrales, et s'apparente à un schéma agressif de réutilisation des fréquences tout en présentant des performances supérieures à l'état de l'art dans cette catégorie. Sans égaler les performances des solutions centralisées et dynamiquement coordonnées, la simplicité de sa mise en place et l'efficacité de cette dernière solution la rendent des plus attractives pour l'industrie.

PRÉSENTATION DU SYSTÈME

1 Introduction

L'utilisation des satellites pour le déploiement de services commerciaux de télécommunication remonte aux années 60. D'abord utilisés pour des besoins de communications téléphoniques intercontinentales, c'est surtout leur utilisation pour la diffusion de contenu (télévision par satellite) qui a connu, et connaît toujours, le plus grand succès. La mise en place de ce type de services passe par l'utilisation d'un satellite géostationnaire, c'est-à-dire sur une orbite géosynchrone et circulaire. Cette orbite très particulière permet de garantir un lien de qualité constante (distance parcourue par le signal constante) à une zone donnée, sans interruption, et ce, avec un seul satellite. L'orbite terrestre GÉOstationnaire (GEO) correspond à une altitude de 35 786.6 km, sur le plan de l'équateur [7]. Les systèmes de télécommunications étudiés dans cette thèse proviennent directement de ces systèmes.

D'autres systèmes de télécommunications par satellite utilisent des orbites différentes comme les orbites basses (LEO) typiquement retenues pour les constellations de satellites telles qu'IRIDIUM, les orbites moyennes (MEO) pour les services de navigation par exemple ou encore les orbites fortement elliptiques (HEO) pour la couverture des zones de latitude élevée [7, 8], représentées à l'échelle sur un plan commun hypothétique en figure 2.1. Les systèmes utilisant ces orbites ne seront pas abordés dans ce manuscrit.

Dans cette thèse, nous considérons un système utilisant un satellite géostationnaire, multifaisceau et transparent, c'est-à-dire sans traitement bord autre qu'une ré-amplification du signal et utilisant une topologie en étoile [9], comme représenté en figure 2.2. Nous allons détailler dans ce chapitre ce système, en commençant par présenter son architecture et ses composants. Ensuite, nous mettrons en évidence les grands principes des satellites multifaisceaux et les interférences qui découlent de leur utilisation. Puis nous nous

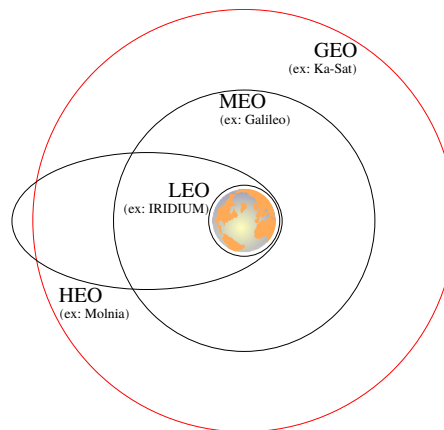


FIGURE 2.1 Quelques exemples d'orbites dans un hypothétique plan commun, à l'échelle, inspiré de [8].

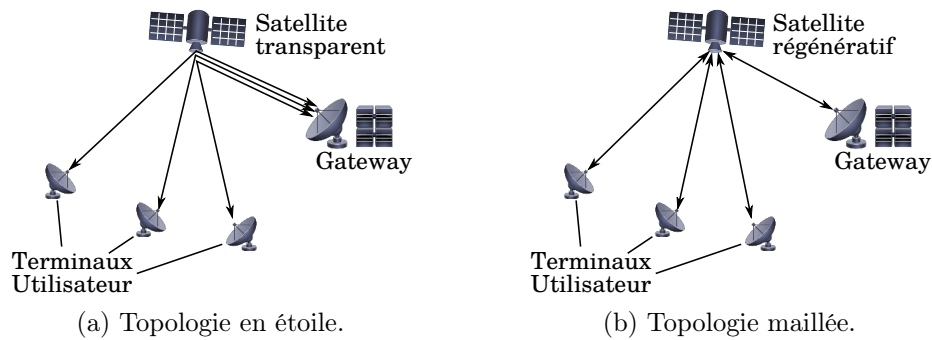


FIGURE 2.2 Topologies de systèmes satellitaires définies dans [9]. La topologie considérée ici est celle en étoile où tout le trafic est directement renvoyé vers la gateway.

intéresserons aux protocoles de communication qui sont déployés sur la voie retour des systèmes de dernière génération. Enfin nous mettrons en évidence la difficulté de la gestion des ressources spectrales sur la voie retour dans un contexte où l'on cherche toujours à augmenter la réutilisation des fréquences, sujet central de cette thèse.

2 Architecture du système satellitaire de référence

Les systèmes de télécommunication par satellites géostationnaires pour l'accès fixe à Internet sont composés de 3 segments : le segment sol, le segment spatial et le segment utilisateur, représentés sur la figure 2.3, et de deux types de liens : le lien segment sol – segment spatial, dit lien *feeder* et le lien segment spatial – segment utilisateur, dit lien *user*.

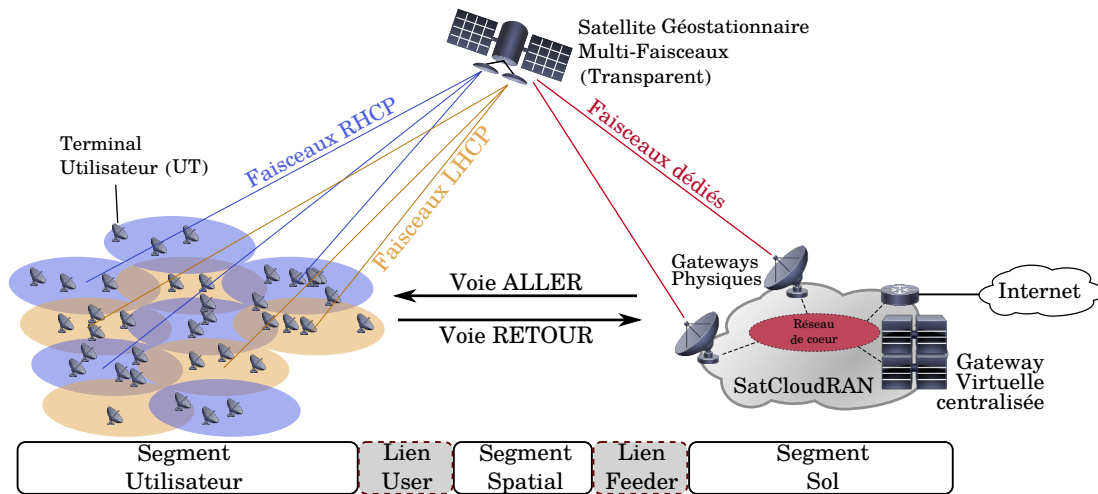


FIGURE 2.3 Architecture du système considéré.

2.1 Segment sol

Le segment sol comprend les passerelles (ou gateways) physiques de l'opérateur ainsi que tous les équipements réseaux permettant la gestion du système de télécommunication. Afin d'augmenter la capacité et la disponibilité du système, plusieurs gateways sont utilisées pour un même système.

Nous considérons de plus une architecture partiellement virtualisée avec une gateway virtuelle centralisée¹, comme présentée dans [10]. Dans cette architecture, toute la gestion des ressources est effectuée par une entité centralisée, disposant d'une grande capacité de calcul. Les gateways physiques sont connectées entre elles, à la gateway virtuelle et à internet à l'aide d'un réseau de cœur à très haut débit.

2.2 Segment spatial

Le segment spatial est composé uniquement du satellite. Dans le système considéré, le satellite est dit transparent : il ne fait que répéter et amplifier vers le segment sol le signal reçu sur le segment utilisateur, et vice-versa. Aucun autre traitement (démodulation, commutation ou autre) n'est effectué à bord².

1. Dans la suite et sauf indication contraire, lorsque nous parlerons de gateway, c'est à cette gateway virtuelle que nous ferons référence, et non aux gateways physiques.

2. De plus en plus de travaux proposent des charges utiles flexibles (démodulation à bord, commutation à bord, routage dynamique de la bande), si nous ne les considérons pas explicitement, tous les travaux présentés dans ce manuscrit pourraient également s'y appliquer et profiter de la flexibilité offerte par ces nouveaux systèmes.

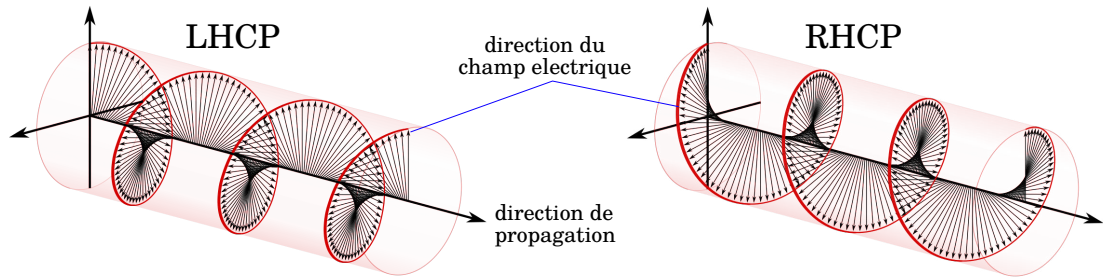
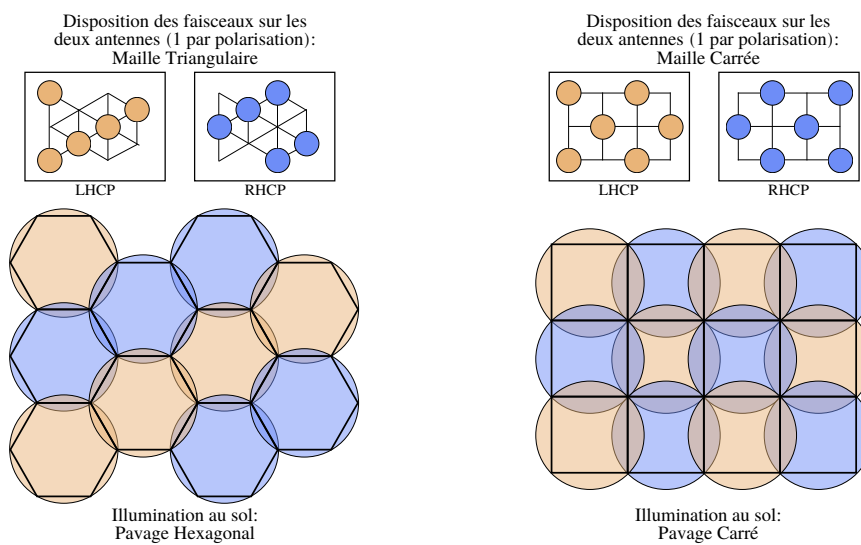


FIGURE 2.4 Polarisation circulaire droite (RHCP) et gauche (LHCP) : orientation du champ électrique. Illustration tirée de [11].



(a) Disposition classique (hexagonale). (b) Disposition présentée dans [12] (carrée).

FIGURE 2.5 Organisation des faisceaux.

Le satellite dispose de deux antennes multifaisceaux, chacune engendrant la moitié des faisceaux. Chaque antenne utilise une polarisation circulaire différente : Polarisation Circulaire Droite (RHCP) ou Polarisation Circulaire Gauche (LHCP). Une polarisation circulaire est obtenue en émettant une onde électromagnétique dont la direction du champ électrique est en rotation dans le plan perpendiculaire à la direction de la propagation, comme illustré en figure 2.4. Deux arrangements des faisceaux sont envisagés : l'un où les faisceaux forment une maille triangulaire, donnant lieu à un pavage hexagonal au sol comme illustré sur la figure 2.5a et l'autre où les faisceaux suivent une maille carrée comme présenté dans [12] et illustré sur la figure 2.5b.

Les faisceaux du satellite (vers le segment sol comme vers le segment utilisateur) sont

formés de manière statique, à la conception du satellite. La conception des faisceaux utilisateurs (c'est-à-dire ceux pour le lien *user*) vise un compromis entre une directivité forte, afin de concentrer le gain en émission et réception sur la zone couverte, et couverture importante. Par convention, nous considérerons que les faisceaux sont disposés de manière à ce que tout terminal utilisateur affecté à un faisceau ait une atténuation angulaire entre 0 et -3 dB. Les faisceaux *feeder* (ceux pour le lien *feeder*), un par gateway physique, sont quant à eux très fortement directifs de manière à maximiser le gain dans la direction de la gateway et à limiter les interférences entre liens *feeder*.

Remarque 1. Charge utile : puissance et routage. Dans un souci d'abstraction du matériel, nous prenons l'hypothèse que toutes les contraintes bord induites par nos choix système (nombre de faisceaux *user/feeder*, puissance, routage des faisceaux) peuvent être satisfaites. Ces contraintes sont souvent fortement liées à un matériel donné, qui est donc amené à évoluer régulièrement. La faisabilité effective de l'architecture devra donc être évaluée pour chaque instance du système.

2.3 Segment utilisateur

Le segment utilisateur est composé des terminaux utilisateurs. Les terminaux sont fixes et pointés en direction du satellite au moment de l'installation. Ce sont des terminaux à ouverture très faible, permettant de concentrer le gain en émission et en réception dans la direction du satellite. Les terminaux considérés ici disposent d'une chaîne de transmission unique pour la voie retour, et d'une chaîne de réception pour la voie aller. Chaque terminal est affecté au faisceau pour lequel il a le meilleur bilan de liaison, et ne peut pas changer de faisceau (un tel changement nécessite une reconfiguration administrative et éventuellement une intervention physique).

2.4 Lien *feeder* et lien *user*

Le lien *feeder* (respectivement le lien *user*) est le lien entre les gateways physiques (resp. Terminaux Utilisateurs (UTs)) et le satellite. Dans les systèmes satellitaires à Très Haut Débit (THD), ces deux liens utilisent généralement les bandes Ku/Ka [7, 13]. En plus des bandes Ka/Ku, les bandes Q/V qui offrent plus de bande sont envisagées, notamment pour le lien *feeder* des futurs satellites [8, 14–17].

La bande spectrale relativement faible (à l'échelle d'un continent) justifie l'utilisation de :

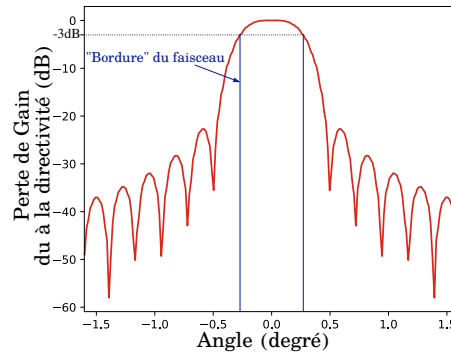


FIGURE 2.6 Diagramme d'antenne pour un faisceau utilisateur. Au niveau de l'équateur, 0.1 degré d'ouverture correspond à environ 62.5 km au niveau de la mer.

1. nombreuses gateways physiques sur le lien *feder*, permettant une forte réutilisation de la bande ;
2. nombreux faisceaux utilisateurs sur le lien *user*, permettant une certaine réutilisation de la bande. Étant donné que les faisceaux sont moins directifs, davantage d'interférences sont engendrées entre les faisceaux, limitant donc ce taux de réutilisation.

3 Satellites multifaisceaux, interférences et bilan de liaison

Comme indiqué précédemment, l'utilisation d'un satellite multifaisceau permet une forte réutilisation de fréquence par isolation spatiale. Ce n'est pas sans rappeler les réseaux cellulaires terrestres, où l'atténuation du signal (*path loss*) permet la réutilisation d'une fréquence d'une cellule à l'autre, à partir du moment où les deux cellules ne sont pas trop proches [18]. Pour autant, l'application au cas satellite n'est pas immédiate. En effet la distance parcourue par le signal est sensiblement la même d'un faisceau à l'autre, et toutes les antennes du satellite multifaisceau sont situées en un même point de l'espace. C'est grâce à l'utilisation d'antennes très directives, avec un diagramme d'antenne semblable à celui donné en figure 2.6, qu'il a été possible d'obtenir une isolation suffisante entre faisceaux proches.

3.1 Interférences

Comme on peut le constater sur la figure 2.6, l'isolation entre les faisceaux n'est pas parfaite, et des Interférences Co-Canal (CCIs), sont provoquées par les faisceaux utilisant les mêmes bandes de fréquences. Sur l'uplink du lien *user*, le niveau d'interférence dépend

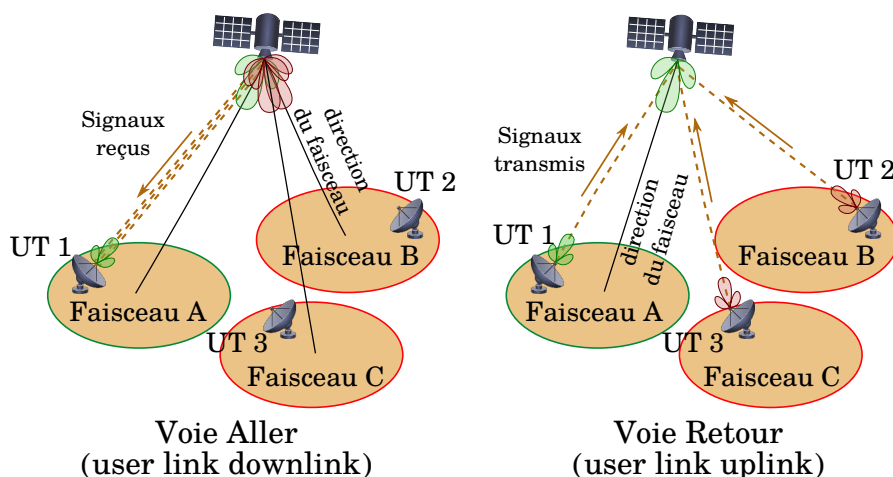


FIGURE 2.7 Comparaison de la géométrie des interférences entre voie aller et voie retour, sur un cas avec 3 faisceaux

de la position du terminal responsable de l'interférence, alors que sur le downlink du lien *user*, la donnée des antennes utilisant les mêmes bandes de fréquences suffit à connaître le niveau d'interférence subi par chacun des terminaux. Cette différence dans la géométrie des interférences est illustrée sur la figure 2.7, et a un impact non négligeable sur la manière de les gérer.

3.2 Bilan de liaison lien *user* uplink

Le bilan de liaison de l'uplink du lien *user* prend en compte plusieurs phénomènes, il est fortement inspiré de [13] et illustré en figure 2.8 :

1. Caractéristiques du canal :

- Pertes en espace libre $L_{FSL}(i, c)$ qui dépendent de la distance terminal i – satellite et de la porteuse c considérée :

$$L_{FSL}(i, c) = \left(\frac{4\pi f_c \times d_{sat}(i)}{C_l} \right)^2 \quad (2.1)$$

où $d_{sat}(i)$ est la distance séparant l'utilisateur i du satellite, C_l est la vitesse de la lumière dans le vide et f_c est la fréquence centrale de la porteuse.

- Pertes atmosphériques L_{atm} dues à la traversée de l'atmosphère, considérées constantes ici.
- Largeur de bande de la porteuse c considérée : BW_c .
- Densité de puissance du bruit $N_0 = k_B \times T$, où T est la température de bruit

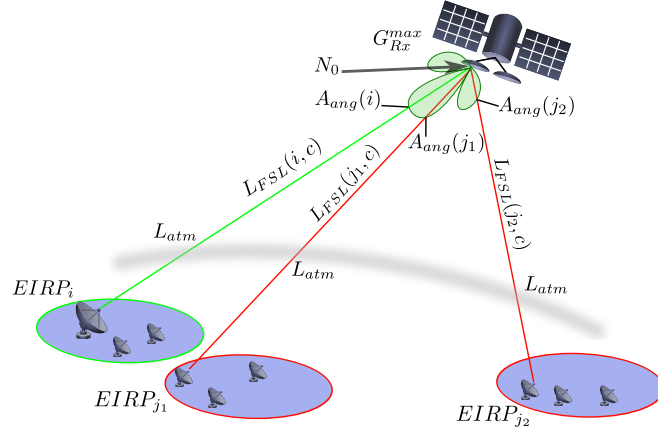


FIGURE 2.8 Éléments pris en compte dans le bilan de liaison.

($T = 290 K$).

2. Caractéristiques de l'antenne de réception :

- Gain maximum G_{Rx}^{max} .
- Atténuation angulaire de l'antenne $A_{ang}(k, i)$ qui dépend du faisceau considéré et de l'angle de l'utilisateur i par rapport à la direction du faisceau k considéré.

3. Caractéristiques du terminal utilisateur :

- Puissance Isotropique Rayonnée Équivalente du terminal $EIRP_i$, qui est proportionnelle à la puissance d'émission de l'utilisateur P_i .

Pour simplifier les notations, nous noterons $G_k(i, c)$ une grandeur agrégeant tous les phénomènes de gains et d'atténuation passifs du signal reçu, et définie par :

$$G_k(i, c) = \frac{EIRP_i}{P_i} \times G_{Rx}^{max} \times A_{ang}(k, i) \times \frac{1}{L_{atm}} \times \frac{1}{L_{FSL}(i, c)} \quad (2.2)$$

Avec ces paramètres, nous obtenons l'expression suivante du Rapport Signal à Bruit (SNR) pour l'utilisateur i , en réception de l'antenne du faisceau k :

$$SNR_i^k(c) = \frac{P_i G_k(i, c)}{N_0 BW_c} \quad (2.3)$$

Cette expression est valable à la fois quand l'utilisateur appartient au faisceau k , mais aussi quand il s'agit d'un utilisateur j d'un autre faisceau, engendrant une interférence sur le faisceau k . Par conséquent, la puissance de CCI reçue par le faisceau k provenant de l'utilisateur j est $I_{CCI}(j, k, c) = P_j G_k(j, c)$.

En plus des CCI, les plus importantes en puissance, d'autres interférences doivent être prises en compte, incluant celles venant d'un canal adjacent, de la seconde polarisation, ou encore d'autres systèmes satellitaires utilisant les mêmes bandes de fréquences. Elles sont ici considérées comme un bruit blanc constant et agrégées dans le terme I_{autres} .

On obtient alors l'expression du Rapport Signal sur Interférence plus Bruit (SINR) suivante :

$$SINR_i^k(c) = \frac{P_i G_k(i, c)}{N_0 BW_c + \sum_{\substack{j \in \mathcal{I}_c \\ j \neq i}} I_{CCI}(j, k, c) + I_{autres}} = \frac{P_i G_k(i, c)}{\mu_c + \sum_{\substack{j \in \mathcal{I}_c \\ j \neq i}} P_j G_k(j, c)} \quad (2.4)$$

où \mathcal{I}_c est l'ensemble des terminaux utilisant la porteuse c au même moment et en posant $\mu_c = N_0 BW_c + I_{autres}$ pour alléger les notations.

Remarque 2. Bilan de liaison complet. À cela, il faudrait ajouter les pertes et interférences à bord ainsi que le bilan de liaison (dont interférences) sur le lien *feeder* downlink, mais ce dernier dépend fortement de l'architecture bord, et du routage des faisceaux. Comme cette partie n'est pas standardisée, nous nous concentrons uniquement sur la partie lien *user* et supposons que tout le reste est constant dans le temps et identique pour tous les faisceaux.

Remarque 3. Sensibilité à la météo. Les bandes de fréquences utilisées pour les satellites THD sont très sensibles aux conditions météorologiques. En effet les fréquences des bandes Ku/Ka sont fortement atténuées par la traversée des gouttelettes d'eau contenues dans les nuages, et donc très sensibles à l'épaisseur de la couche nuageuse, à la pluie et à la neige [13]. Cela affecte fortement l'atténuation atmosphérique, donc le bilan de liaison, et nécessite une certaine capacité d'adaptation de l'utilisation des ressources. Cet aspect n'est pas pris en compte dans les présents travaux, mais n'affecteraient en rien la méthodologie qui y est présentée. Seules les données d'entrée et résultats seraient affectés.

4 Protocoles et mécanismes de communication

Le système satellitaire considéré est asymétrique, et les deux sens de communication sont traités indépendamment. Le lien gateway-terminaux est appelé **voie aller** standardisé par l'European Telecommunications Standards Institute (ETSI) dans le DVB via Satellite 2 (DVB-S2) [19], bien décrite par exemple dans [20]. L'autre sens de communication

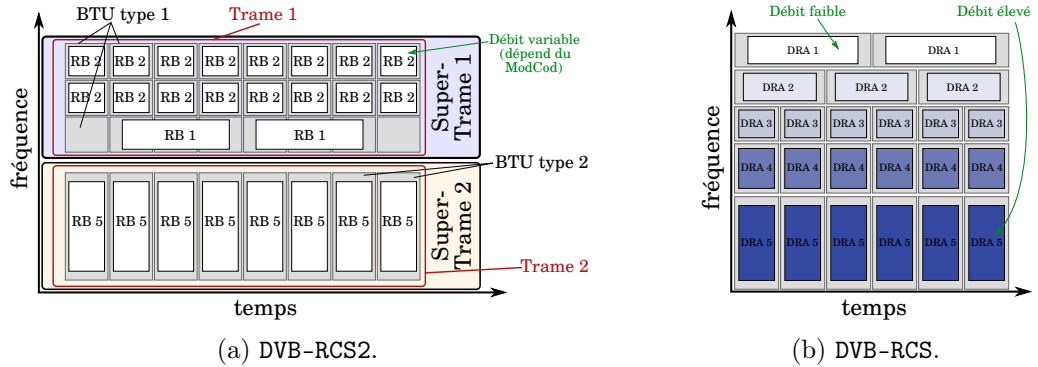


FIGURE 2.9 Structure et organisation des ressources sur la voie retour.

(terminaux-gateway) est donc logiquement appelé **voie retour** et est standardisé dans le DVB Return Channel via Satellite 2 (DVB-RCS2) [9] par le même organisme.

Sur la voie retour, qui est le sens de communication étudié dans cette thèse, deux méthodes d'accès sont proposées de manière concurrente et avec chacune une bande fréquentielle dédiée. La première est l'accès sans contention, où les ressources sont dédiées et allouées aux utilisateurs dynamiquement par affectation sollicitée, appelé *Demand Assigned Multiple Access* (DAMA). La seconde est l'accès à contention ou accès aléatoire, où les données sont envoyées de manière opportuniste. Dans la suite, nous présenterons la structure des ressources de l'accès sans contention de la voie retour, qui est la méthode d'accès sélectionnée dans cette thèse.

4.1 Structure des ressources de la voie retour

Le DVB-RCS2 utilise la méthode d'accès Multiple Frequency Time Division Multiple Access (MF-TDMA) où le spectre est divisé en blocs temps-fréquence, appelés *Bandwidth-Time Unit* (BTU). Ces BTUs sont regroupés en Blocs de Ressources (RBs)³, qui sont les ressources allouées aux terminaux. Les RBs sont regroupés en trames, elles-mêmes contenues dans des super-trames, dont l'organisation est rendue flexible par le standard. Un exemple de structuration des ressources en DVB-RCS2 est donné en figure 2.9a.

3. La terminologie DVB-RCS2 est Bloc Temporel (*timeslot*), mais étant donné la proximité sémantique entre Bloc Temporel (*timeslot*) et *Time Transmit Interval* (TTI), nous préférons la dénomination Bloc de Ressource (RB) qui est de plus la dénomination la plus couramment utilisée dans les réseaux cellulaires terrestres.

ID* du ModCod	Longueur du RB (Nb symb.)	Modulation	Taux de codage	bits/symbole	bits par RB	Es/N0 (dB) @PER=10 ⁻⁵
13	1616	QPSK	1/3	0.61	984	-0.51
17	1616	QPSK	5/6	1.64	2664	5.94
19	1616	8PSK	3/4	1.98	3200	8.77
20	1616	8PSK	5/6	2.19	3552	10.23
22	1616	16QAM	5/6	2.96	4792	12.04

* Les ID font référence à [21, Annex A.].

† PER = Taux d'erreur "paquet" (comprendre RB)

TABLE 2.1 Quelques schémas de codage et modulation standardisés dans le DVB-RCS2 [21].

4.2 Codage et Modulation

Les conditions de propagation évoluent énormément, que ce soit entre les utilisateurs qui peuvent avoir des bilans de liaison bien différents (au centre ou en bordure de faisceau par exemple, mais aussi à cause de mauvais réglages etc.), ou en raison de changements météorologiques. Pour la télévision par satellite [8], choisir un Schéma de Codage et Modulation (ModCod) permettant d'assurer un taux d'erreur satisfaisant dans toutes les conditions était nécessaire et suffisant, mais conduirait ici à une très mauvaise utilisation des ressources, puisque le bilan de liaison à valider est strictement individuel.

Dans la version précédente du standard, DVB-RCS [4], plusieurs rythmes symboles sont utilisés afin de permettre la transmission avec différents niveaux d'efficacité spectrale et de robustesse (*Dynamic Rate Adaptation (DRA)*). Le débit d'une trame y est donc défini de manière statique, avec un nombre fixe de ressource de chaque régime DRA. Cette organisation des ressources est donc peu flexible et ne permet pas d'adaptation efficace aux changements météorologiques.

Le DVB-RCS2 répond à ce besoin de flexibilité en adoptant une structure complètement différente, présentée dans la sous-section précédente, qui utilise une durée et un rythme symbole constant pour la BTU. Il définit aussi un grand nombre de couples {modulation, taux de codage} à nombre de symboles constant, c'est-à-dire une série de configurations prédéfinies et présentant des débits variables ainsi que des exigences de SINR variables, comme montré dans le tableau 2.1. Ces ModCods sont standardisés, pré-programmés dans les terminaux et conçus pour chaque type de RB. Ainsi il est possible d'indiquer au terminal le ModCod à utiliser, et d'en changer de manière dynamique sans changer l'affectation terminaux-porteuse, ni même de RB.

4.3 Méthodes d'affectation des ressources

La principale méthode d'affectation des ressources en DVB-RCS2 se fait par un mécanisme d'accès par affectation sollicitée, appelé DAMA et se déroule en 3 étapes. 1) Les utilisateurs transmettent des requêtes de débit sur les canaux en accès aléatoire⁴. 2) La gateway leur affecte des ressources et diffuse les tables d'allocation. 3) Les utilisateurs transmettent leurs données sur les ressources dédiées.

4.4 Contrôle de puissance

Le standard DVB-RCS2 prévoit un mécanisme d'ajustement de puissance d'émission, afin de permettre de réduire la puissance d'émission d'un terminal engendrant trop d'interférence, ou ayant un bilan de liaison trop faible. Cela passe par l'envoi d'un message qui peut donner une instruction de correction de puissance sur 7 bits, par sauts de 0.5 dB. La période des messages de correction de puissance est généralement d'une toutes les 40 trames, soit toutes les secondes en considérant des trames de 25 ms. Cette granularité temporelle du mécanisme de puissance est trop longue pour être exploitée comme contrôle dynamique de puissance (qui demanderait d'ajuster la puissance potentiellement à chaque RB).

5 Gestion des ressources de la voie retour dans un système à forte réutilisation des fréquences

Dans les sections précédentes, nous avons décrit la structure des ressources d'un faisceau. Avec l'utilisation des satellites multifaisceaux, ces mêmes ressources sont utilisées plusieurs fois par les différents faisceaux. Afin d'éviter des interférences trop fortes, il est nécessaire de définir des politiques de gestion des ressources spectrales, régissant la réutilisation des différentes portions du spectre, par exemple en limitant l'utilisation d'une partie du spectre à un sous-ensemble des faisceaux.

5.1 Définition du taux de réutilisation des fréquences

Les schémas de réutilisation des fréquences tels que le schéma à 4 couleurs décrit dans cette section sont très utilisés en cellulaire. Ces schémas homogènes seront ici nommés schémas Frequency Reuse (FR) accolé du nombre de couleurs du schéma de coloration, par exemple FR-4 pour le schéma à quatre couleurs. À ce nombre de couleurs correspond

4. Ou éventuellement sur des ressources dédiées déjà allouées.

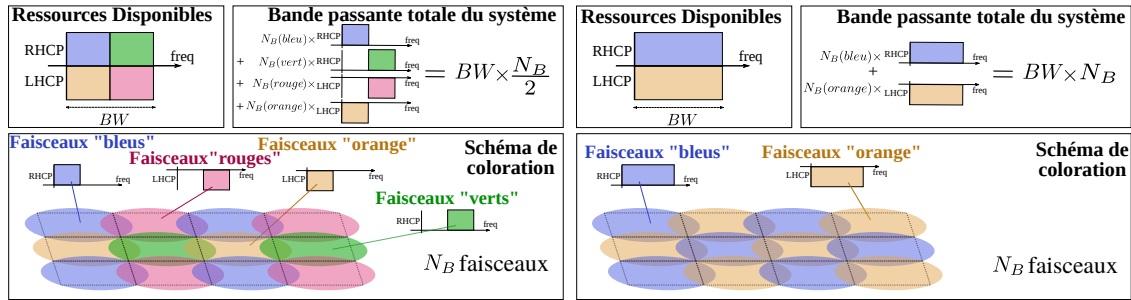
un Taux de Réutilisation des Fréquences (FRF), qui indique la proportion de faisceaux utilisant une couleur. Il est formellement défini ici ⁵ comme la moyenne des proportions de faisceaux utilisant chacune des couleurs :

$$frf = \frac{1}{N_C} \sum_c \frac{N_F(c)}{N_F} \quad (2.5)$$

Ce taux est compris entre 0 et 1, et dans le cas des schémas homogènes, tels que FR-2, FR-4, cela correspond à l'inverse du nombre de couleurs.

5.2 Schémas de réutilisation des fréquences pour la voie retour

Comme nous l'avons vu dans la section 2 de ce chapitre, la bande dédiée à l'uplink de la voie retour est limitée. Elle doit être partagée entre tous les faisceaux mais peut tout à fait être réutilisée plusieurs fois. La plupart des systèmes satellitaires actuels qui utilisent deux polarisations, comme celui que nous considérons, choisissent une réutilisation des fréquences à quatre sous-bandes (deux par polarisation) [15], comme illustré sur la figure 2.10a. Cette répartition de la bande entre les faisceaux permet un compromis entre isolation des interférences (et donc efficacité spectrale) et réutilisation de la bande.



(a) FR-4 : Schéma de réutilisation des fréquences à 4 sous-bandes. (b) FR-2 : Schéma de réutilisation des fréquences à 2 sous-bandes.

FIGURE 2.10 Schémas classiques de réutilisation homogène des fréquences, montrés sur une disposition des faisceaux selon un pavage carré.

Cette réutilisation des fréquences, à une époque où les réseaux cellulaires terrestres font de la réutilisation universelle de fréquences (toute la bande est utilisée dans toutes les cellules), peut paraître un peu faible. En effet chaque faisceau ne dispose que de la moitié de la bande de sa polarisation, laissant penser qu'il y a encore beaucoup de marge pour augmenter la capacité d'un système satellite, quitte à engendrer un niveau d'interférence

5. Cette définition n'est pas universelle, et de nombreuses références définissent le FRF comme l'inverse de notre définition

plus important, par exemple en utilisant un schéma de réutilisation de fréquences à deux sous-bandes (une par polarisation), ou deux couleurs, illustré en figure 2.10b.

Toutefois, le cas du satellite diffère, tant par la géométrie des interférences que par les contraintes du système. Il est donc nécessaire de bien évaluer les performances de techniques de réutilisation des fréquences plus agressives. De plus, comme nous l'avons précisé dans la section 3.1, le cas de l'uplink pose des difficultés supplémentaires puisque le niveau d'interférence engendré dépend de l'utilisateur qui transmet, et donc de l'allocation des ressources. Cette variation du niveau d'interférence est d'autant plus importante que l'atténuation angulaire est particulièrement variable (plusieurs dizaines de dB d'atténuation) dans les zones proches du faisceau considéré.

On voit par conséquent que la gestion des interférences devient profondément liée à l'allocation des ressources aux utilisateurs. Le débit d'un utilisateur va dépendre des utilisateurs à qui sera affectée la même ressource dans les faisceaux voisins. La coordination de l'allocation des ressources semble donc une solution nécessaire à l'augmentation de la réutilisation des ressources, tout en entraînant une complexification de cette allocation. En effet, l'affectation de fréquences à un ensemble d'utilisateurs est un problème bien connu dans la littérature pour être NP-difficile [22].

6 Conclusion

La présente thèse se concentre sur la gestion des ressources de la voie retour et plus spécifiquement de son lien *user*, dans un cadre où l'on tente d'augmenter le taux de réutilisation des fréquences afin d'augmenter la capacité du système satellitaire. L'objectif est donc d'optimiser la gestion des interférences sur ce canal de communication de manière à ce que la densification de l'utilisation des fréquences soit constructive. En effet, dans un contexte où ces interférences sont prépondérantes et fortement dépendantes des utilisateurs à qui sont affectées les ressources, une gestion non coordonnée risque d'être contre-productive, ou représenter un coût trop élevé pour les faibles bénéfices engendrés.

Nous considérons ce problème sous plusieurs aspects : du point de vue des performances (capacité, efficacité, et équité), mais aussi du point de vue de la complexité et des besoins d'échanges d'information entre les différents acteurs. Mais avant cela, il convient de s'intéresser aux travaux traitant des problèmes similaires, que ce soit pour des systèmes satellitaires ou pour des systèmes cellulaires terrestres qui présentent de nombreuses similarités.

ÉTAT DE L'ART

1 Introduction

La demande continuellement croissante en débit des utilisateurs impose de toujours trouver de nouvelles manières de mieux utiliser le spectre radio, que ce soit en développant du matériel capable d'exploiter de nouvelles bandes de fréquences, en ayant recours à des modulations et techniques de codage plus performantes ou en réutilisant le spectre disponible. Une des grandes tendances des dernières années est de densifier l'utilisation des fréquences, c'est-à-dire de déployer toujours plus d'antennes pour une même surface.

Dans les réseaux cellulaires, cela a récemment donné naissance aux architectures de réseaux de petites cellules très denses (ultra-dense networks) [23] et souvent hétérogènes [24]. Ces derniers hiérarchisent les cellules en plusieurs classes : les macro-cellules, équivalent des antennes déjà déployées, et des cellules à plus courte portée (micro, pico ou femto), typiquement des points d'accès domestiques améliorés, des relais radio ou des antennes déployées sur de l'infrastructure déjà existante (lampadaire etc.). Les micro-cellules ayant une portée moindre, il est possible dans chacune de réutiliser le même spectre, tout en soulageant la macro-cellule du trafic de tous les utilisateurs desservis par cette micro-cellule.

Dans les réseaux satellitaires, l'utilisation d'antennes à faisceaux multiples remonte au début des années 90 [25, 26] et s'est généralisée dans les années 2000 pour l'application à l'accès à Internet par satellite. Ce type de satellite dispose d'antennes formant plusieurs faisceaux directifs couvrant chacun une partie différente de la surface terrestre, comme présenté dans le chapitre précédent. Il est ainsi possible de réutiliser un grand nombre de fois les bandes spectrales disponibles pour le satellite. La densification de l'utilisation des fréquences se matérialise par la réduction de la taille des faisceaux et l'augmentation du

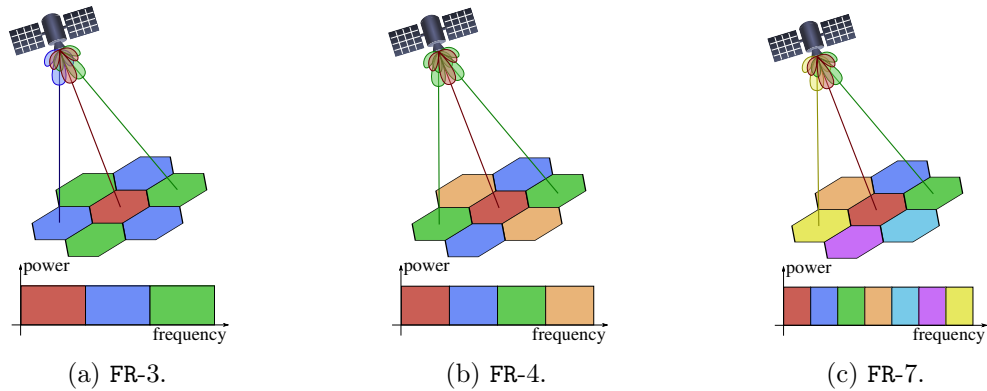


FIGURE 3.1 Schémas homogènes de réutilisation de fréquences (Frequency Reuse) à 3, 4 et 7 couleurs. Les couleurs correspondent à des bandes de fréquences de taille égale.

nombre de faisceaux [27].

Dans tous les cas le principe est le même : densifier le déploiement d'antennes, permettant ainsi de réutiliser la même portion de spectre un très grand nombre de fois. Cependant, la densification de réutilisation des cellules engendre un problème majeur que sont les interférences. Lorsque deux cellules ou faisceaux proches physiquement utilisent la même portion de spectre en même temps, les interférences engendrées réduisent fortement l'efficacité spectrale de cette portion du spectre, limitant ainsi les gains en capacité visés par la réutilisation de fréquences.

Pour pallier ce problème, l'approche naturelle, initialement utilisée était de ne pas réutiliser le même canal dans deux cellules voisines¹, donnant lieu à des schémas systématiques de réutilisation de fréquences. Le modèle de couverture le plus classique des réseaux cellulaires étant un déploiement fondé sur un pavage hexagonal, il existe trois manières de répartir les fréquences entre les différentes cellules. La figure 3.1 montre une telle répartition pour les 3 possibilités.

Ces techniques, bien qu'efficaces pour isoler les interférences, ont un FRF jugé trop faible ($1/3$, $1/4$ et $1/7$ respectivement pour FR-3, FR-4 et FR-7) pour les exigences actuelles. Ainsi, il est devenu nécessaire de s'orienter vers une utilisation plus agressive des ressources spectrales et, ce faisant, de gérer les interférences co-canal qui deviennent alors prépondérantes.

Les gains potentiels d'une telle utilisation agressive des fréquences sont considérables. Par exemple : passer de 3 couleurs à une couleur revient à disposer de 3 fois plus de spectre par cellule ou faisceau et donc à offrir un débit potentiellement 3 fois plus important.

1. Les premières publications sur le sujet, dans le cadre de l'IMTS [28] ou, plus tard, de l'AMPS [18] font référence à des schémas de réutilisation encore moins agressifs (par exemple 12 et 19 couleurs).

Étant donné les enjeux, l'intérêt de la communauté pour ce sujet est considérable.

Organisation de l'état de l'art. Ce chapitre propose une synthèse générale des différentes propositions qui ont été faites à ce jour dans la littérature. Il s'organise selon trois axes majeurs : les approches générales, la modélisation et l'équité.

Le premier de ces axes (section 2) s'intéresse aux approches générales de gestion des interférences et les classe selon leur dynamique de fonctionnement : statique (planification), semi-statique (planification + mise à jour d'adaptation) ou dynamique (coordination active). Le second axe (section 3) présente les principaux outils de modélisation des problèmes de gestion de ressources radio en présence d'interférences, leurs intérêts et défauts, en faisant le lien avec les approches qui les utilisent. Le troisième et dernier axe (section 4), présente les approches de l'équité dans ce contexte où les interférences renforcent les inégalités potentielles entre les utilisateurs.

Cette organisation, découplant l'approche générale du modèle et de l'objectif, se justifie par le fait que la plupart des travaux utilisant un modèle donné ou une métrique particulière pourraient tout à fait être adaptés (et le sont régulièrement) à un autre modèle ou en utilisant une métrique différente. Il nous semble alors raisonnable de séparer le traitement de ces aspects que l'on peut voir comme quasi-orthogonaux, ce qui permettra de donner un certain recul au lecteur.

Dans chacune des parties constituant ce chapitre, la synthèse présentée se voudra représentative (mais pas forcément exhaustive) des propositions les plus pertinentes et les plus performantes.

Remarque 4. Autres problèmes de gestion d'interférences. Étant donné les fortes similarités entre les réseaux satellitaires et les réseaux cellulaires terrestres (c'est-à-dire réseaux WiMAX et mobiles (2G/3G/4G/5G) hors Réseaux Hétérogènes (HetNets)), nous présenterons ici un état de l'art unifié terrestre et satellite, en précisant les spécificités de chacun si nécessaire.

Ainsi, pour alléger notre discours, lorsque le domaine d'application n'est pas précisé, nous utiliserons les mots cellule et faisceau de manière équivalente pour désigner l'entité géographique ou administrative rassemblant tous les terminaux utilisateurs associés à une même station de base ou à un même faisceau.

De plus, d'autres domaines des réseaux présentent aussi des problèmes de gestion d'interférences mais nous ont semblé moins pertinents car trop éloignés de notre sujet d'étude initial. C'est le cas par exemple des HetNets où le problème des interférences se

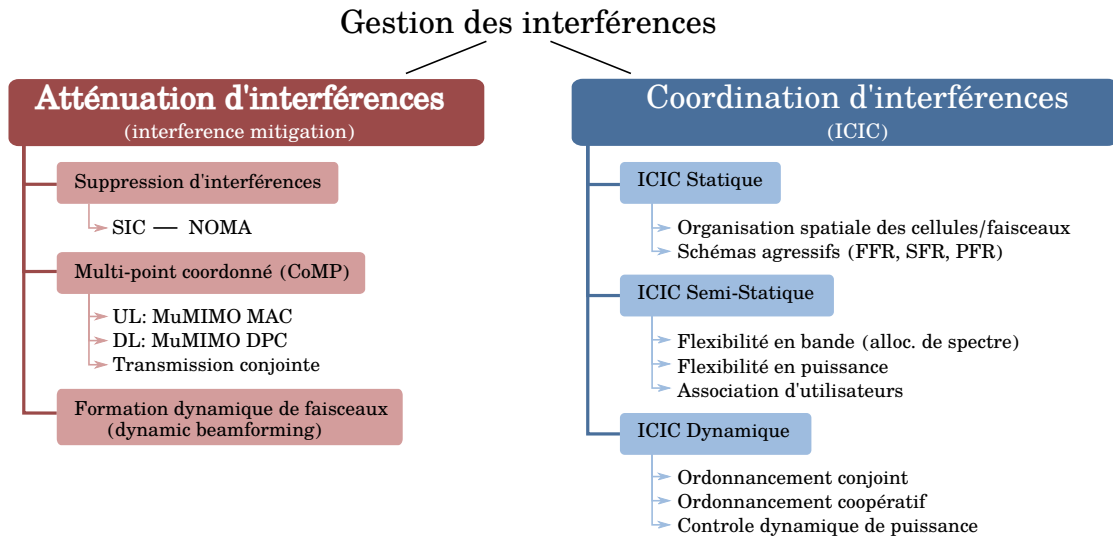


FIGURE 3.2 Classification des principales approches de la gestion des interférences.

pose aussi entre la macro-cellule et ses micro-cellules (inter-tier interference) [29], des réseaux ad-hoc où l'on cherche à affecter des ressources temporelles et fréquentielles conjointement avec le routage des paquets [30], ou encore les problèmes de contrôle d'accès au canal dans les réseaux téléphoniques mobiles (cellulaires ou satellitaires) où l'enjeu est d'arriver à affecter des fréquences à chaque couple de correspondants, tout en garantissant la qualité de la transmission [22, 31–33].

2 Gestion des interférences

Dans cette partie nous proposons une classification des méthodes de gestion d'interférences. Cette classification est présentée sous forme d'arbre sur la figure 3.2. Deux grandes composantes se distinguent : la coordination des interférences (*interference avoidance*) et l'atténuation des interférences (*interference mitigation*) qui sont deux approches complémentaires d'un même problème, et souvent utilisées conjointement afin de tirer profit des deux aspects. Le premier essaie de limiter les interférences subies par les récepteurs en évitant d'émettre si l'interférence risque d'être trop importante, en limitant la puissance d'émission des interférants, ou encore en choisissant soigneusement des utilisateurs limitant les interférences mutuelles. La seconde approche, d'atténuation des interférences, considère que les interférences sont inévitables, et va chercher à diminuer leur impact, en combinant plusieurs signaux par exemple. Cette dernière approche, venant plus de la communauté traitement du signal, est peu traitée dans ce manuscrit qui se concentre principalement

sur les approches de coordination d'interférences.

Dans les techniques dites de coordination d'interférences, la tendance générale a d'abord été de définir des schémas de réutilisation de fréquences fixes. Ces schémas permettent une gestion du réseau sans besoin de coordination ou de communication entre les couches de gestion des ressources radio des différentes cellules ou faisceaux, c'est-à-dire une gestion distribuée des ressources radio. Puis, pour encore densifier l'utilisation du spectre, des techniques plus dynamiques sont apparues, soit dans un but de reconfiguration occasionnelle, soit pour s'adapter dynamiquement à la charge ou aux conditions environnementales. Enfin, profitant des nouvelles possibilités offertes par la virtualisation des réseaux d'accès radio (C-RAN) [10,34], des solutions centralisées ont fait leur apparition. Elles peuvent s'appuyer sur des ressources calculatoires plus importantes, et ainsi proposer des approches globales ou par grappes qui permettent une adaptation fine et intelligente de l'ordonnancement et un contrôle de puissance en temps quasi-réel.

Ces deux paradigmes et trois familles de techniques de coordination d'interférences sont examinées plus en détail dans la suite.

2.1 Atténuation d'interférences (*Interference Mitigation*)

Les techniques d'atténuation d'interférences considèrent une réutilisation des fréquences importante (typiquement une réutilisation universelle de la bande). Afin d'augmenter les performances du réseaux, ces techniques cherchent alors à limiter l'impact des interférences ainsi engendrées, au prix d'une plus grande complexité.

Cette approche n'étant pas le point de focalisation de ce manuscrit, seul un bref aperçu de ces techniques sera donné, et un lecteur avide d'en savoir plus pourra se référer à l'une des synthèses plus complètes consacrées au sujet, par exemple celle du groupe de travail ARTIST4G [35] pour le cas cellulaire et [36,37] pour le cas satellite.

2.1.1 Suppression d'interférence (*Interference Cancellation*)

La suppression d'interférence [38] est utilisée lorsque l'on a deux signaux en interférence, et que l'on a la connaissance d'un des deux messages (l'un des signaux est plus fort que l'autre, si bien qu'il est généralement décodable sans erreur en considérant le second comme du bruit). L'idée est de "soustraire" à la somme des deux signaux le signal précédemment décodé, remodulé et ré-encodé identiquement, tout en simulant le canal de propagation afin d'obtenir le second signal avec un bon SINR. En poussant le concept un peu plus loin, les techniques de Suppression Successive d'Interférences (SIC) permettent de retrouver une grande partie des messages, même si plus de deux signaux interférant sont sommés.

C'est une des techniques très prometteuses utilisées en satellite pour l'accès aléatoire, ou plusieurs copies d'un même message sont envoyées, puis décodées successivement en retirant les copies décodées avec succès précédemment [39–43].

En satellite, la SIC a aussi été envisagée dans le cadre de l'accès dédié, sur la voie retour dans le cas où cette technique est combinée à du Multiple user MIMO (Mu-MIMO), avec par exemple les travaux [44–48].

2.1.2 Transmissions coordonnées multi-point (*Coordinated Multi-Point*)

Les techniques de transmission multi-point coordonnées (Coordinated MultiPoint (CoMP)) [49] visent à coordonner les signaux de différentes stations de base, afin d'obtenir un meilleur SINR. Ces techniques peuvent être très performantes, mais demandent une synchronisation parfaite entre les émetteurs et/ou récepteurs coordonnés ainsi que le partage des données à transmettre entre les stations de base.

Le Mu-MIMO précédemment cité [44] rentre dans cette catégorie (sur l'uplink, on le trouve aussi sous le nom de MIMO Multiple Access Channel). Utilisé pour l'uplink, il s'agit de considérer le système $\{N$ utilisateurs distincts, N antennes coordonnées $\}$ comme un système Multiple Input Multiple Output (MIMO), c'est-à-dire de N signaux en entrée et en sortie.

Le Dirty Paper Coding (DPC) est l'approche réciproque, utilisée pour le downlink : MIMO Broadcast Channel, où les émetteurs envoient leurs signaux en compensant par anticipation les interférences de manière à ce que la somme des signaux au niveau de chaque récepteur soit un signal dépourvu (ou presque) d'interférences.

Enfin, la transmission conjointe (*joint transmission*, illustrée en figure 3.3a) [49, Section 8] permet à deux antennes (ou plus) d'émettre simultanément le même signal, de manière à obtenir au niveau du récepteur un signal beaucoup plus fort et plus robuste vis-à-vis des interférences éventuelles.

2.1.3 Formation dynamique de faisceaux (*Precoding*)

Poussée par l'essor des antennes réseaux à commande de phase (*phased array antenna*), la formation dynamique de faisceaux [50] permet de concentrer l'énergie émise dans la direction de l'utilisateur sélectionné à chaque instant d'ordonnancement, comme illustré sur la figure 3.3b. De cette manière, la puissance de l'antenne est concentrée sur l'utilisateur, permettant une utilisation plus efficace et une qualité de réception améliorée pour l'utilisateur (particulièrement pour ceux en bordure de cellule), tout en limitant la zone interférée par cette transmission (i.e. le cône dirigé vers l'utilisateur). D'autre part,

on peut alors tout à fait imaginer réutiliser la même fréquence dans le même secteur, comme montré sur la figure 3.3b.

La formation dynamique de faisceaux a été beaucoup étudiée en satellite [51–56] ainsi qu’en cellulaire [35, 57] ; elle est vue comme un moyen très prometteur d’augmenter la réutilisation de fréquences et la capacité des cellules tout en offrant de meilleures conditions de transmission aux utilisateurs défavorisés. Cependant, elle demande de connaître en temps réel la position précise des utilisateurs, ce qui peut poser de nombreux problèmes en pratique (précision, mobilité, terminaux bas coût).

2.2 Coordination d’Interférences

La seconde approche, la Coordination d’Interférences (ICIC) (ou *Inter-Cell Interference Coordination*) consiste à mettre en place des mécanismes visant à éviter de causer des interférences, par exemple en contrôlant la puissance d’émission des cellules, faisceaux ou terminaux de manière à ne pas engendrer trop d’interférences pour les cellules voisines, ou encore, en sélectionnant à chaque instant des utilisateurs de manière à ce que les interférences soient tolérables pour chacun de ces utilisateurs.

Dans cette section nous nous intéresserons à trois grandes classes d’ICIC, classées par dynamique et complexité croissante : les stratégies d’ICIC statiques, semi-statiques et dynamiques.

2.2.1 Préliminaire 1 : Polarisation du signal

Un signal radio est une onde électromagnétique composée d’un champ électrique et d’un champ magnétique, orientés perpendiculairement l’un par rapport à l’autre. La polarisation est, par convention, l’orientation du champ électrique du signal [13].

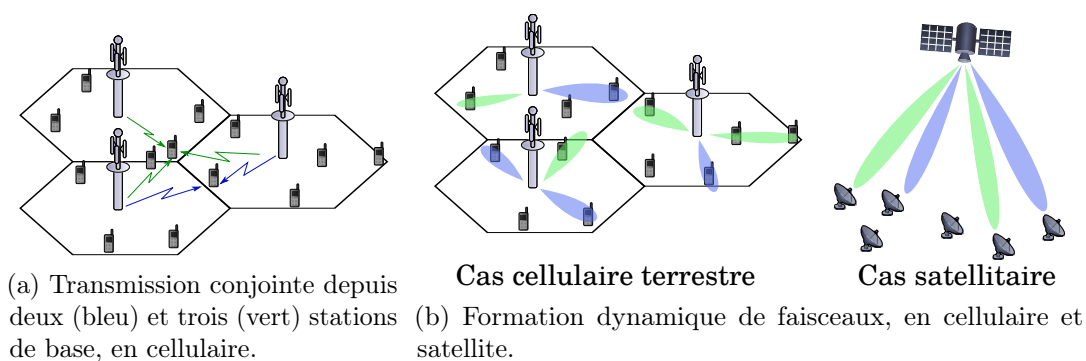
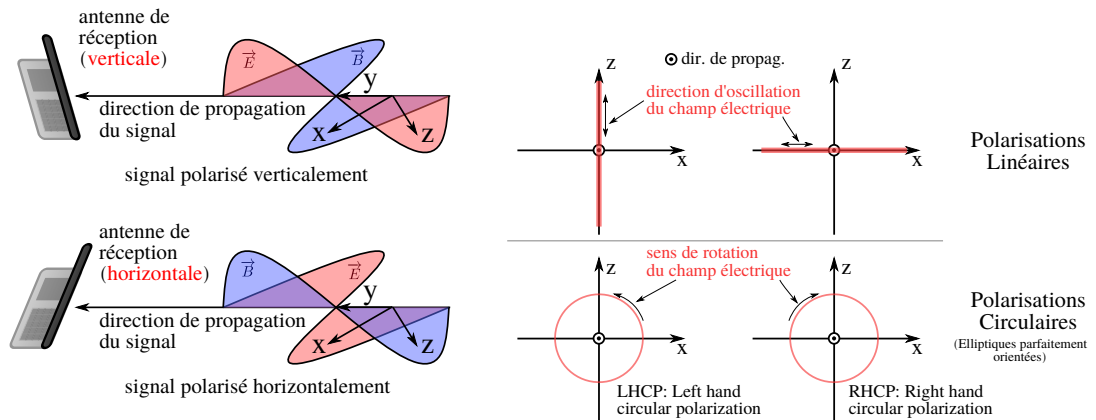


FIGURE 3.3 Transmission conjointe et formation dynamique de faisceaux.



(a) Deux signaux polarisés orthogonalement. (b) Différents types de polarisation, et orthogonalité.

FIGURE 3.4 Polarisations orthogonales.

Lors d'une transmission, l'antenne de réception acquiert le signal selon son orientation physique, comme illustré sur la figure 3.4a. Par conséquent, il est théoriquement possible de transmettre deux signaux parfaitement polarisés dans deux polarisations orthogonales sur le même lien, sans engendrer d'interférences en réception entre les polarisations (Interférences Cross-Polarisation (CPI)). Cela représenterait un gain potentiel énorme, car la bande fréquentielle disponible pour le système serait doublée.

Deux types de polarisations sont possibles [58] : les polarisations linéaires où les signaux ont une polarisation constante, et les polarisations elliptiques où la polarisation varie dans le temps en suivant une rotation dans un plan donné (cf. figure 3.4b). Un cas particulier très répandu de polarisation elliptique est la polarisation circulaire. L'orthogonalité des polarisations est alors obtenue de par le sens de rotation de la polarisation : sens horaire pour la RHCP et sens anti-horaire pour la LHCP.

En théorie il est donc possible de faire de la réutilisation de fréquences sur deux polarisations orthogonales. Mais en pratique, l'utilisation de polarisations orthogonales pose des contraintes physiques très fortes (orientation du récepteur, plusieurs antennes orthogonales). De plus, le canal de propagation peut ne pas conserver parfaitement la polarisation, comme c'est le cas par exemple avec du multi-trajet ou lors de la traversée de l'atmosphère [58].

- En cellulaire, l'orientation du mobile n'est pas maîtrisable et l'espace est limité² rendant impossible la réutilisation par polarisation. En revanche de la diversité en

2. Il faut que les antennes soient orientées dans la direction/le plan de la polarisation. De plus, pour discriminer les polarisations, il en faudrait 2 dans le plan perpendiculaire à la direction de propagation, ou 3 sans besoin d'orientation, ce qui en pratique revient à imposer un mobile cubique.

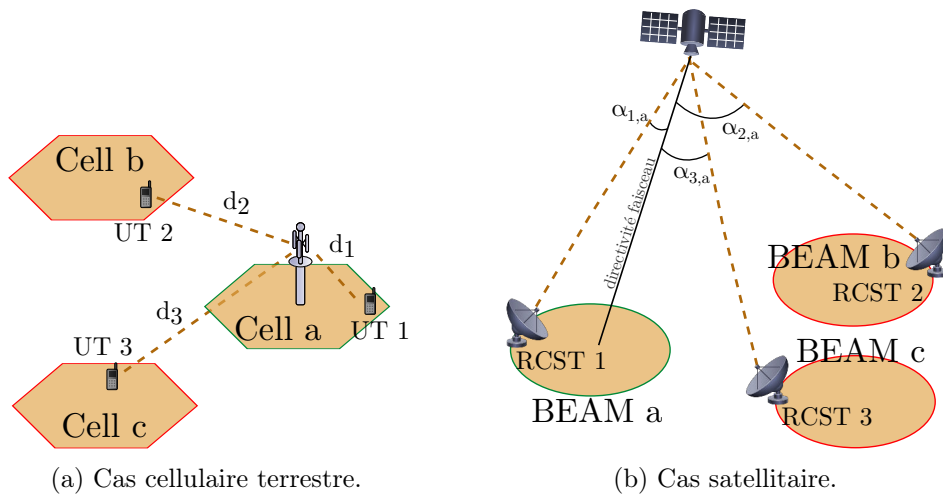


FIGURE 3.5 Directions de propagation du signal.

polarisation (même message sur les deux polarisations) est utilisée pour améliorer la qualité du lien.

- En revanche pour l'accès fixe par satellite géostationnaire, la géométrie du problème est fixe. Les antennes satellites sont orientées dans la direction de propagation, et il est tout à fait possible d'utiliser deux polarisations orthogonales, et ce avec une très bonne isolation des CPI [59–61]. Dans ce contexte, il a aussi été montré que les polarisations circulaires résistent mieux aux effets dépolarisant de la traversée de l'atmosphère [13, 58] et sont donc généralement favorisées dans ce contexte.

2.2.2 Préliminaire 2 : propagation du signal et géométrie des interférences

L'interférence engendrée par une cellule sur une cellule voisine dépend fortement de la distance entre ces cellules, que ce soit sur le downlink ou sur l'uplink. Cependant, malgré les similarités apparentes entre les réseaux satellitaires multifaisceaux et les réseaux cellulaires terrestres, les conditions de propagation du signal sont fondamentalement différentes, comme illustré sur la figure 3.5 :

- Pour les réseaux terrestres, le signal se propage (en première approximation) horizontalement à la surface de la terre de la station de base jusqu'à l'utilisateur (ou inversement pour le lien montant). L'atténuation du signal n'est donc régie que par la distance parcourue par le signal (*path loss*).
- Pour les réseaux par satellite en revanche, le signal se propage de la terre vers le satellite, et la distance parcourue par les signaux (utiles comme interférants) est sensiblement la même. Ils diffèrent cependant par la direction depuis laquelle

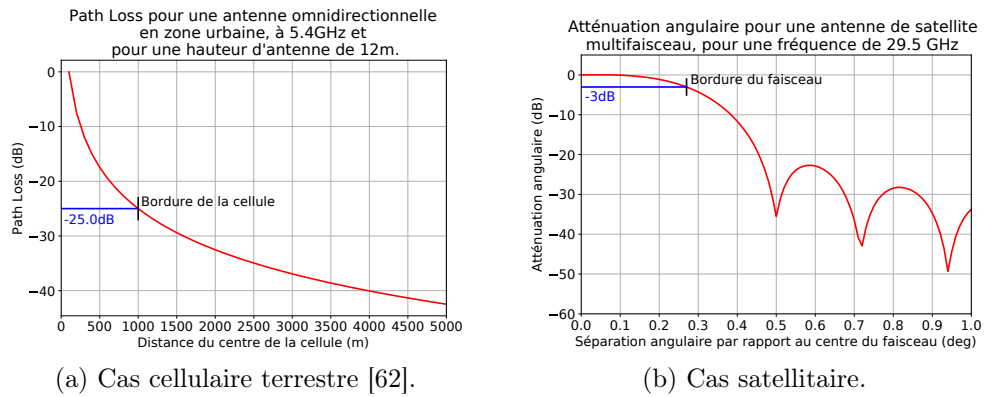


FIGURE 3.6 Atténuation en fonction de la distance au centre du faisceau ou de la cellule.

ils arrivent. Les antennes engendrant les faisceaux du satellite sont conçues de manière à limiter les interférences reçues ou provoquées sur les faisceaux voisins.

Cette différence fondamentale est illustrée sur la figure 3.6. On y voit effectivement qu'en cellulaire, la puissance en réception est atténuée de plusieurs ordres de grandeur lorsque l'utilisateur est situé en bordure de cellule, ou dans une cellule voisine. Elle est aussi largement inférieure à celle d'un utilisateur proche du centre de la cellule. En revanche, en satellite, il n'y a qu'un facteur d'écart assez faible (traditionnellement -3dB) entre le centre d'un faisceau et sa bordure. De même, pour un utilisateur se trouvant dans un faisceau voisin, proche de la bordure du faisceau, son niveau de réception n'est diminué que de 3 à 10 dB. Cette chute très lente en bordure rend difficile l'utilisation simultanée de la même ressource en bordure d'un faisceau et au centre d'un faisceau voisin (qui reviendrait à avoir un Rapport Signal sur Interférence (SIR) très faible). Une autre manière de voir les choses est de remarquer qu'en cellulaire, il y a une forte variabilité (jusqu'à -25 dB dans l'exemple) des atténuations au sein d'une même cellule mais que les atténuations sont beaucoup moins variables en bordure et à l'extérieur, tandis qu'en satellite, l'atténuation angulaire est très peu variable au sein d'un même faisceau, mais les interférences engendrées (resp. subies) varient très fortement (de -3 à -50 dB) en fonction de la position de l'utilisateur interféré (resp. interférant).

Pour ces raisons, en cellulaire terrestre il est plus facile de réutiliser les fréquences, quitte à jouer sur les puissances d'émission, tandis qu'en satellite l'isolation spatiale des interférences joue un rôle prépondérant.

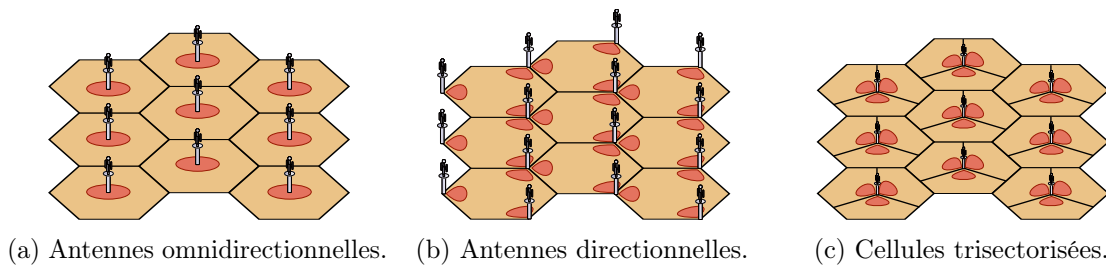


FIGURE 3.7 Déploiements d'antennes directionnelles/omnidirectionnelles.

2.2.3 Coordination statique (*Static ICIC*)

La première des trois familles de coordination d'interférences comprend les stratégies qui se concentrent sur la planification, de sorte qu'elles ne sont pas conçues pour être modifiées une fois déployées. Elle rassemble toutes les techniques d'allocation de fréquences, d'organisation spatiale des cellules ou faisceaux et les schémas de réutilisation de fréquences, ainsi que de pré-allocation de puissance.

2.2.3.a Organisation spatiale des cellules et faisceaux. Exceptionnellement, cette partie sera traitée séparément pour les cas cellulaire et satellitaire, puisque les techniques proposées par chacun des domaines ne sont pas applicables dans l'autre. Ceci est en grande partie dû aux différences mises en évidence dans les préambules de cette section (sous-sections 2.2.1 et 2.2.2).

Cas cellulaire terrestre. Dès les débuts des réseaux cellulaires, le pavage hexagonal a été adopté car c'est la solution la plus économique [18] pour couvrir une surface avec des cellules de même taille et forme³.

Sur ce pavage hexagonal, deux architectures de déploiement des stations de base ont été prévues [18], selon que des antennes directionnelles ou omnidirectionnelles sont utilisées. Ces deux schémas de déploiement sont illustrés sur la figure 3.7 : dans le cas omnidirectionnel les antennes sont placées au centre des cellules et ne couvrent que celles-ci, tandis que dans le cas directionnel, les antennes sont placées sur des coins de cellules, chacune en servant alors 3, en se répartissant les canaux disponibles dans chaque cellule.

La solution la plus courante dans la littérature récente est logiquement inspirée du déploiement directionnel, mais avec une définition administrative de la cellule centrée sur

3. Il existe 3 pavages réguliers qui permettent de couvrir un plan sans recouvrement et sans trou de couverture : le pavage triangulaire, carré et hexagonal. La dernière permet de couvrir la même surface avec moins de cellules.

l'antenne, et une ségrégation des utilisateurs par antenne (cellule tri-sectorisée de la figure 3.7c). Cette solution permet entre autre, de réutiliser la même fréquence jusqu'à trois fois dans la même cellule, à condition d'arriver à suffisamment bien gérer les interférences inter-secteurs en bordure.

Cas satellite Dans le cas satellite, il n'est pas possible d'exploiter le *path loss* pour la réutilisation de fréquences, puisque tous les signaux viennent du même point (le satellite), et que la distance parcourue est sensiblement la même. Si le pavage hexagonal a été naturellement repris car efficace pour couvrir une surface donnée, la prédominance des interférences a poussé les constructeurs de satellites, tels Thales Alenia Space, à remettre en question cette disposition des faisceaux. Par exemple, un pavage carré permet une meilleure isolation des interférences pour des schémas agressifs de réutilisation de fréquences [12]. La perte d'efficacité de couverture par rapport au pavage hexagonal n'est pas importante car l'enjeu est principalement de densifier une couverture, et non de l'étendre.

2.2.3.b Schémas agressifs de réutilisation de fréquences. Tous les utilisateurs d'une cellule ne sont pas égaux dans leurs conditions de transmission, que ce soit par rapport à leur SNR en émission (resp. réception), ou encore de par l'interférence qu'ils provoquent sur les (resp. reçoivent des) cellules voisines. C'est pourquoi de nombreuses approches partagent artificiellement chaque cellule en plusieurs zones, chacune recevant un sous-ensemble des canaux disponibles et éventuellement une pré-affectation de puissance d'émission (de l'utilisateur en uplink, et de la cellule en downlink).

Remarque 5. Uplink et downlink. Beaucoup de schémas de réutilisation de fréquences sont initialement pensés pour le downlink. L'efficacité de ces schémas de réutilisation de fréquences sur l'uplink n'est pas évidente, de même que leur mise en œuvre (par exemple du contrôle de puissance).

Les solutions les plus répandues [6, 63] sont exposées ci-après et illustrées en figure 3.8, en ne mentionnant que les solutions qui ne comprennent pas de complément plus dynamique tels que l'ordonnancement coordonné ou des techniques avancées d'atténuation d'interférences. Ces solutions là (alliant pré-répartition statique et mécanisme semi-statique ou dynamique) seront présentées dans les parties correspondantes.

- Fractional Frequency Reuse (FFR) : la cellule est divisée en deux zones, une Zone centrale de la cellule (CCA) et une Zone en bordure de la cellule (CEA). Toutes

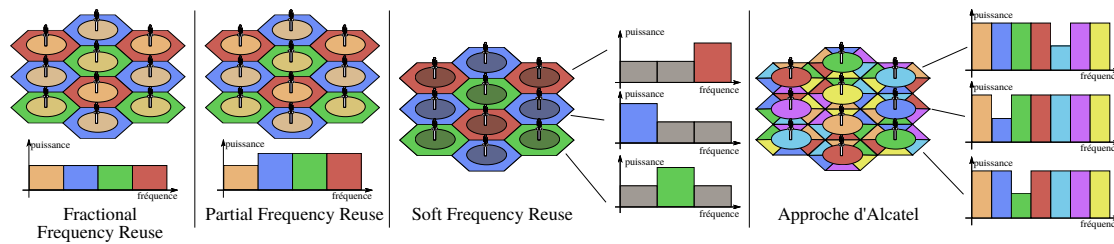


FIGURE 3.8 Schémas de réutilisation de fréquences classiques.

les zones centrales utilisent la même bande de fréquences, tandis que les zones externes utilisent un schéma de coloration plus conservateur, typiquement FR-3 ou FR-4 (on note alors respectivement FFR-3 et FFR-4 ces schémas de réutilisation de fréquences). De cette manière, les utilisateurs éloignés de la station de base, qui ont un mauvais SNR, sont plus protégés des interférences. Les utilisateurs des zones centrales sont quant à eux naturellement isolés des interférences des autres utilisateurs ou antennes utilisant la même bande de fréquences, situés dans des zones distantes. Cette solution a donné lieu à de très nombreuses adaptations.

- Partial Frequency Reuse (PFR) : cette solution part du même partage en zone que FFR et de la même allocation de sous-bandes, mais accorde une puissance de transmission supérieure pour la zone externe, les utilisateurs s’y trouvant étant naturellement défavorisés.
- Soft Frequency Reuse (SFR) : SFR va plus loin que PFR en permettant aux utilisateurs des zones centrales d’utiliser la totalité de la bande. Cette adaptation vise une meilleure flexibilité des ressources, tout en protégeant les zones externes.
- Solution proposée par Alcatel : cette solution se concentre plus sur le downlink, et se fonde sur un découpage plus fin de la cellule, en 7 zones. De cette manière tout le spectre est utilisé dans chacune des cellules, et les interférences sont limitées. Un utilisateur en zone centrale est naturellement protégé, et pour les utilisateurs en bordure, les interférences viennent soit de cellules lointaines, soit ont une puissance réduite.

La plupart des solutions présentées ici dans un cadre général supposant des antennes omnidirectionnelles ont un équivalent sectorisé, nécessitant une légère adaptation pour les interférences inter-secteurs.

Le tableau 3.1 présente une comparaison en termes de réutilisation de fréquences des solutions décrites ci-dessus, ainsi que des schémas homogènes. La solution qui se démarque en cellulaire est le SFR, qui permet à la fois un bon compromis entre forte réutilisation des fréquences, flexibilité et isolation des interférences, comme montré dans [64, 65].

Schéma	Zones		Contrôle de puissance	Coloration		% Bande disponible*		FRF*
	CCA	CEA		CCA	CEA	CCA	CEA	
FR-1	1	0	Non	1	N/A	100	N/A	1
FR-2	1	0	Non	2	N/A	50	N/A	2
FR-3	1	0	Non	3	N/A	33	N/A	3
FR-4	1	0	Non	4	N/A	25	N/A	4
FR-7	1	0	Non	7	N/A	14	N/A	7
FFR-3	1	1	Non	1	3	25	25	2
FFR-4 [†]	1	1	Non	2	4	17	17	3
PFR-3	1	1	Oui	1	3	25	25	2
PFR-4 [†]	1	1	Oui	2	4	17	17	3
SFR-3	1	1	Oui	1	3	100	33	1
SFR-4 [†]	1	1	Oui	2	4	50	25	2
Alcatel	1	6	Oui	Spécial		14	14	1

* Valeurs à bande et surface équivalente entre CEA et CCA

[†] Version à deux polarisations du schéma de réutilisation, utile pour certaines applications satellites. Dans ces cas, les valeurs sont indiquées en pourcentage de la somme des deux polarisations.

TABLE 3.1 Comparaison des schémas classiques de réutilisation de fréquences.

Adaptation au satellite. Si les schémas de réutilisation de fréquences présentés précédemment ont largement été étudiés pour les réseaux cellulaires, ce n'est pas forcément le cas pour le satellite, très peu de travaux évaluant par exemple les performances de FFR, PFR ou SFR. Parmi les rares à le faire, [66] ne présente pas de comparaison avec l'état de l'art et il est alors difficile de conclure sur son efficacité.

Comme présenté précédemment, de nombreux systèmes satellitaires GEO utilisent deux polarisations pour augmenter la réutilisation de fréquences. Si cela permet d'utiliser plus de bande, cette réutilisation vient aussi avec des contraintes opérationnelles sur les antennes, et la pratique la plus commune est d'embarquer deux antennes à bord, une pour chaque polarisation, ce qui suppose une organisation précise des faisceaux sur les deux polarisations. Cela revient à imposer une pré-coloration à deux couleurs, où chaque faisceau n'a accès qu'à une seule polarisation, et le schéma de réutilisation de fréquences doit s'adapter à cette contrainte. Cela signifie en particulier que le schéma FR-3 n'est pas utilisable sur un système à deux polarisations (tous les faisceaux d'une même couleur ne seraient pas sur la même polarisation). Ainsi, il est nécessaire d'adapter les différents schémas agressifs de réutilisation de fréquences au cas satellite, avec par exemple les schémas FFR-4 où la réutilisation de fréquences sur les zones en bordure de faisceau suivent un schéma FR-4 et les zones centrales un schéma FR-2, comme indiqué dans le tableau 3.1.

Les schémas PFR et SFR pourraient également être envisagés pour le satellite, voie aller comme voie retour, grâce aux mécanismes de contrôle de puissance [21], mais n'ont pas à ce jour été évalués et comparés aux solutions plus traditionnelles.

2.2.3.c Conclusions sur la coordination statique. Les techniques statiques de coordination des interférences sont variées, tout en ayant un même but général : augmenter la réutilisation de fréquences tout en isolant au maximum les interférences afin de protéger les utilisateurs vulnérables (en bordure de faisceau).

Certaines approches visent à réduire naturellement les interférences en changeant l'organisation des cellules, comme la maille carrée qui semble très prometteuse et qui est utilisée dans cette thèse. D'autres, plus répandues, cherchent à protéger et isoler dans l'espace les interférants majeurs de manière à garantir une qualité de signal tolérable tout en densifiant l'utilisation des fréquences, tels que les schémas FFR, PFR et SFR. Ces schémas classiques de réutilisation de fréquences ont un impact important dans le reste de cet état de l'art, dans la mesure où ils servent régulièrement de base de travail pour des solutions plus évoluées.

Si ces schémas statiques permettent une augmentation du FRF, la répartition des utilisateurs est rarement uniforme, de même que la demande peut largement varier dans le temps, diminuant fortement les performances de ces approches. C'est ce qui motive le développement des techniques dites semi-statiques disposant de mécanismes d'adaptation à l'environnement (répartition des utilisateurs, charge des cellules, etc.).

Application à la voie retour du satellite. La nature fondamentalement différente des interférences entre les mondes du cellulaire terrestre et du satellite rend l'application de schémas de réutilisation de fréquences statiques tels que FFR (plutôt efficaces en cellulaire) délicat en satellite, et doit être étudié plus amplement afin d'en vérifier la viabilité.

Cependant, certaines approches, comme l'utilisation d'un maillage carré des faisceaux semble très prometteuse pour isoler les interférences, et donnent naissance à de nouvelles possibilités. Par exemple, appliquer une coloration type FFR-4 à une maille carrée pourrait s'avérer efficace.

2.2.4 Coordination semi-statique (*Semi-Static ICIC*)

Lorsque la charge varie dans le temps, il est intéressant de chercher à ajouter de la flexibilité dans le système, par le biais de re-configuration ou de ré-allocation de spectre dynamique, en fonction de la charge ou d'autres critères, tout en gardant les contraintes d'interférences comme entrées du problème.

D'autre part, la classification en deux catégories d'utilisateurs (centre, bordure) des schémas agressifs de coloration classiques est parfois trop grossière pour permettre de garantir un niveau stable et équitable d'interférence, et donc de débit pour tous les

utilisateurs [67]. Dans le cas du satellite, c'est d'autant plus valable que l'interférence est fortement variable au sein des faisceaux interférants les plus proches.

Les techniques présentées dans cette section proposent des mécanismes d'adaptation, permettant de reconfigurer le système de temps en temps (c'est-à-dire de manière exceptionnelle ou au maximum avec une granularité de l'ordre de l'heure). Pour autant, le paradigme est essentiellement le même que pour les solutions statiques : il s'agit de planification des interférences, de manière à ce qu'elles n'aient pas à être prises en compte par la station de base lors de l'ordonnancement des utilisateurs. Le but de ces techniques est d'adapter la répartition des ressources en fonction de l'environnement, que ce soit l'évolution de la demande, la mobilité des utilisateurs ou encore des changements météorologiques.

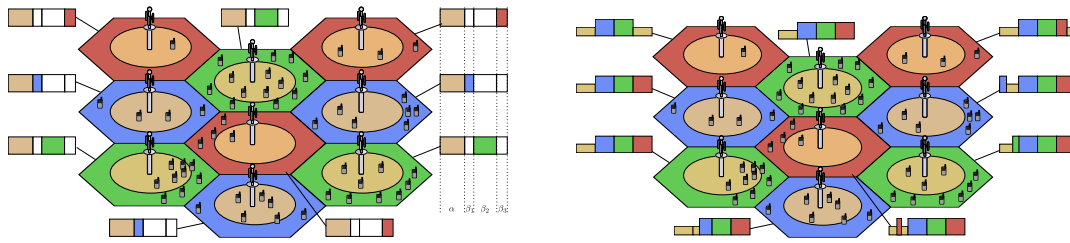
Nous différencierons ici trois catégories de techniques de coordination semi-statique : les techniques d'allocation dynamique de spectre, celles utilisant une diversité de puissance de transmission et enfin les techniques s'appuyant sur l'association des utilisateurs aux cellules ou aux zones. Cette dernière catégorie ne sera que très succinctement traitée car elle répond à une problématique cellulaire terrestre, et n'est pas présente dans le monde des communications par satellite géostationnaire.

Dans tous les cas cités, la gestion des ressources se fait en deux temps : une première phase d'affectation des ressources à des groupes d'utilisateurs et éventuellement de formation de ces groupes d'utilisateurs et une deuxième phase d'ordonnancement des utilisateurs où l'allocation des ressources est effectivement faite. La première phase se déroule généralement hors ligne et de manière centralisée⁴ et a peu de contraintes temporelles, permettant l'utilisation d'algorithmes plus performants et plus complexes.

2.2.4.a Allocation flexible de spectre. Pour répondre à une hétérogénéité de la répartition des utilisateurs dans les cellules, la méthode la plus directe consiste à chercher à allouer plus de bande passante là où il y a plus d'utilisateurs. Cela passe souvent par l'utilisation d'une entité centrale, gestionnaire du spectre (*spectrum broker*) qui a une vision globale de la charge des cellules et coordonne l'adaptation de répartition de spectre. Cependant, dès lors que l'on change l'allocation de bande passante à un moment, la répartition des interférences change, et l'on sort du cadre du schéma de coloration fixe. Deux approches de ce problème se détachent : une flexibilité par couleur (i.e. toutes les cellules ont la même répartition de bande) ou par cellule (i.e. répartition personnalisée).

La première ne va modifier que la proportion de bande allouée à chaque couleur,

4. Sauf dans quelques cas [68–70] où le réseau s'auto-organise grâce à des messages d'information d'état du canal (*Channel State Information*) (CSI)



(a) Exemple d'affectation de bande passante de (b) Exemple d'affectation de bande passante, locale à chaque cellule, à partir d'un schéma initial PFR.

FIGURE 3.9

comme dans [71], de manière à ne pas affecter les conditions de transmission de tous les faisceaux, comme illustré en figure 3.9a. En revanche, le gain de flexibilité est moindre, car il n'est pas garanti que le déséquilibre entre les couleurs soit global.

L'autre approche, plus ambitieuse, va s'autoriser à changer la proportion de bande allouée à une couleur localement, comme illustré sur l'exemple de la figure 3.9b. C'est notamment le cas de [72–79] en satellite et de [31, 80–86] en cellulaire. Cette approche donne une très grande flexibilité d'allocation et d'adaptation à la demande, mais le problème devient plus complexe : il faut s'assurer que dans chaque cellule ou secteur, le niveau d'interférence ne sera pas trop élevé. Cela impose que l'ordonnancement soit fait avec des informations sur le canal (*channel-aware scheduling*), et nécessite un partage d'information d'état du canal (*Channel State Information*) (CSI) pour chaque cellule.

Sur le downlink, c'est assez aisé en principe car l'on connaît les émetteurs. En effet, des mesures effectuées au niveau du terminal utilisateur permettent de connaître assez précisément le SINR (moyen ou pire cas) de ce terminal, qui n'évoluera qu'en fonction de la mobilité de l'utilisateur, et non des décisions d'ordonnancement des cellules voisines (tant qu'elles ne changent pas l'affectation de bande passante, ou de puissance).

Sur l'uplink, la situation est plus délicate car le niveau d'interférence sur la bande allouée dynamiquement à un utilisateur peut changer le niveau d'interférence de plusieurs ordres de grandeur. Il est donc difficile ou sous-optimal de garantir un niveau d'interférence donné, ou encore de se reposer sur des mesures effectuées par le terminal utilisateur.

Une répartition temporelle de la bande passante. Une autre manière de voir les choses est de répartir la bande passante non plus dans le domaine fréquentiel, mais dans le domaine temporel. C'est le cas de [87–89], où l'idée est d'alterner des périodes de transmission et des périodes sans transmission (*cell muting*, *cell blanking* ou encore *beam-hopping*).

2.2.4.b Allocation flexible en puissance. Encore une fois, la puissance est un second vecteur d'adaptation, particulièrement efficace en cellulaire terrestre, complémentaire à la flexibilité en bande. L'objectif de cette approche est d'adapter la puissance de transmission aux besoins des cellules.

Des approches distribuées exploitant ce degré de liberté sont présentées dans [68–70] pour un cas d'utilisation où le trafic est relativement stable (trafic à débit constant), pour le downlink, puis pour l'uplink. D'autres approches, centralisées, ont été proposées pour le downlink de réseaux satellitaires dans [90–93] avec comme but principal de réaffecter des ressources pour mieux les exploiter dans les faisceaux subissant des conditions météorologiques difficiles (l'une en compensant l'atténuation, l'autre en ré-exploitant les ressources rendues inutilisables).

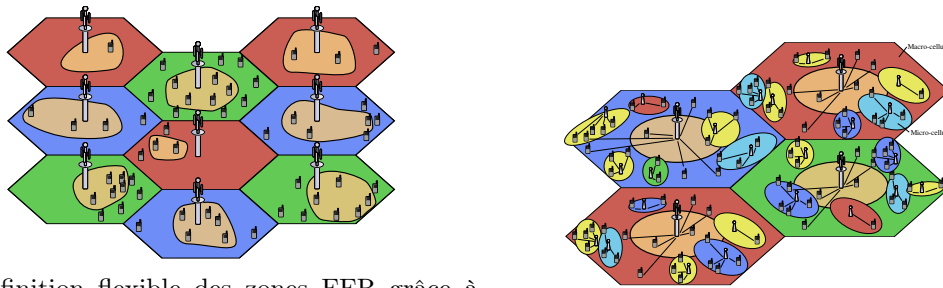
Enfin, certains travaux [76–79] en satellite proposent de combiner la flexibilité en bande et en puissance, permettant de compenser l'excès d'interférence induit par l'utilisation localement plus agressive d'une fréquence par une allocation de puissance adaptée.

2.2.4.c Association et groupage d'utilisateurs. En plus des degrés de flexibilité (puissance et répartition bande) cités dans le paragraphe précédent, la manière de constituer les zones et des groupes d'utilisateurs qui vont partager les mêmes ressources a toute son importance du point de vue de la répartition de la charge sur les cellules.

Plutôt que d'utiliser le critère d'association simple, qui est de choisir la cellule (macro/micro dans le cas des *HetNets*) avec le meilleur SINR, d'autres méthodes peuvent favoriser l'équilibrage de charge. Quelques exemples peuvent être trouvés en cellulaire terrestre ([86, 94] où l'on définit dynamiquement les utilisateurs associés à la bande de fréquence en FR-2, comme illustré en figure 3.10a. Mais c'est surtout en *HetNet* que cette approche prend tout son sens, avec la disponibilité de nombreuses petites cellules qui permettent d'avoir une flexibilité supplémentaire pour répartir la charge entre les micro-cellules et la macro-cellules [95, 96].

En satellite, les systèmes géostationnaires pour l'accès fixe à l'internet actuels utilisent une affectation statique des utilisateurs aux faisceaux, et une disposition des faisceaux fixes et homogènes, rendant difficile l'exploitation de ce genre d'approches. Cependant, la question se pose à nouveau dès lors que le faisceau est partagé en plusieurs zones logiques, comme en FFR. À notre connaissance, aucune étude de ce type en satellite n'a pour le moment été publiée.

2.2.4.d Conclusions sur la coordination semi-statique. Les techniques de coordination semi-statiques exploitent principalement trois degrés de flexibilité afin d'offrir une



(a) Définition flexible des zones FFR grâce à l'association flexible d'utilisateurs.

(b) Association d'utilisateurs dans les HetNets.

FIGURE 3.10 Différents contextes de l'utilisation d'association des utilisateurs aux cellules.

capacité d'adaptation face à une demande non-homogène, et de permettre une utilisation plus efficace des ressources. Ces trois degrés de flexibilité sont la proportion de bande passante (répartition statique ou par alternance temporelle), la puissance d'émission et la diversité spatiale des utilisateurs. Un tableau récapitulatif des approches présentées est donné en table 3.2 et montre bien le déséquilibre entre le downlink et l'uplink. On peut aussi noter sur ce tableau une large majorité de solutions à coordination centralisée.

Application à la voie retour du satellite. Si les techniques semi-statiques de coordination d'interférences ont largement été plébiscitées sur la voie aller du satellite, la voie retour a vu très peu de travaux de cette nature. En effet, la grande variabilité des interférences engendrées par les utilisateurs d'un faisceau ne permettent pas de garantir de bonnes conditions de transmission.

Le contrôle de puissance pourrait peut-être permettre un gain de flexibilité et d'adaptation face aux variations météorologiques. De plus, le gain de flexibilité et la faible complexité de la coordination semi-statique d'interférences pourraient grandement bénéficier à la voie retour, mais à ce jour, très peu de solutions mettant en place de telles techniques ont été publiées.

2.2.5 Coordination dynamique (*Dynamic ICIC*)

Enfin, afin de densifier l'utilisation des fréquences, certains contextes exigent une gestion plus individualisée des interférences. C'est par exemple le cas de la voie retour en satellite, où, comme nous l'avons vu plus tôt, les interférences sont très fortes et très variables dans les faisceaux voisins et dépendent beaucoup de l'utilisateur auquel chaque bloc est alloué. De même pour la formation de faisceaux dynamique sur le downlink en cellulaire (cf. section 2.1), l'interférence varie énormément en fonction de l'orientation du faisceau formé à chaque instant d'ordonnancement, et dépend aussi de l'utilisateur

Référence	DL	UL	Degré de flexibilité exploité	Nature de la coordination
CELLULAIRE				
[68, 69]	x		Puissance	Distribuée
[70]		x	Puissance	Distribuée
[80–85]	x		Bande (cellule)	Centralisée
[31, 71]	x		Bande (couleur)	Centralisée
[87]	x		Bande (temporel)	Centralisée
[86]	x		Spatial (association) + Bande (cellule)	Centralisée
[94–96]	x		Spatial (association)	Centralisée
SATELLITE				
[90–93]	x		Puissance	Centralisée
[72–75]	x		Bande (cellule)	Centralisée
[88]		x	Bande (temporel)	Centralisée
[76–79]	x		Bande (cellule) et Puissance	Centralisée
[89]	x		Bande (beam-hopping)	Centralisée

TABLE 3.2 Récapitulatif des approches semi-statiques présentées.

qui est sélectionné. Dans ces deux cas, gérer les interférences au niveau du RB et de l'utilisateur permet d'assurer une flexibilité totale, et une adaptation en temps réel au niveau d'interférence.

Parmi les techniques de coordination dynamique d'interférences, nous distinguerons deux grandes familles qui exploitent une fois de plus deux degrés de flexibilité déjà vus précédemment : l'ordonnancement coordonné exploite la diversité spatiale des utilisateurs afin d'améliorer les conditions de transmission de chacun, et le contrôle dynamique de puissance permet d'ajuster en temps réel la puissance des émetteurs afin de contenir ou compenser les interférences.

2.2.5.a Ordonnancement coordonné L'ordonnancement coordonné est une approche très adaptée pour les cas de forte réutilisation de fréquences, avec des niveaux d'interférence variables, tels que l'uplink du satellite et la formation dynamique de faisceaux. En effet, le principe est de sélectionner soigneusement les utilisateurs qui vont transmettre en même temps sur le même support, et donc d'éviter que les mauvais cas d'interférences surviennent.

Deux stratégies proposées dans la littérature permettent de faire de l'ordonnancement coordonné : l'ordonnancement conjoint et l'ordonnancement coopératif, dont la principale différence se situe dans l'aspect centralisé ou non de la solution.

Ordonnancement conjoint (joint user scheduling). Dans cette approche, une entité centrale calcule une affectation des ressources aux utilisateurs pour toutes les cellules conjointement. Cette stratégie permet une grande précision et une flexibilité maximale d'allocation des ressources, au prix d'une complexité souvent importante, car il

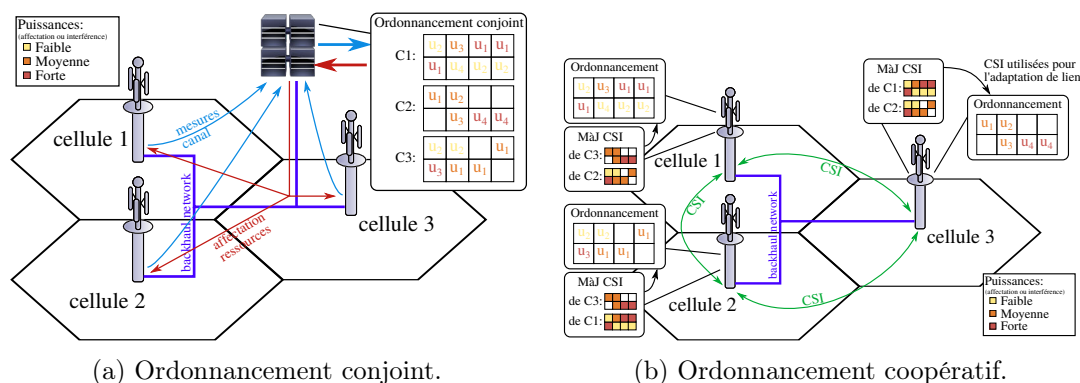


FIGURE 3.11 Illustration du fonctionnement des ordonnancements coopératif et conjoint.

s'agit de sélectionner un ensemble d'utilisateurs dans chaque cellule du réseau, en prenant en compte les contraintes de tout le réseau. Historiquement, elles ont d'abord été utilisées comme solutions optimales de référence pour comparaison avec des approches plus simples (par exemple [97]). Mais avec l'arrivée des Réseaux d'Accès Radio Virtualisés (C-RANs) où toutes les informations sont co-localisées et disponibles pour une entité disposant d'une grande capacité de calcul cette pratique a été remise au goût du jour, et des heuristiques performantes sont maintenant considérées pour des implantations pratiques d'ordonnancement conjoint [98].

Des solutions d'ordonnancement conjoint sont proposées sur le downlink des réseaux cellulaires [99–101], et parfois combinées avec du contrôle dynamique de puissance [97, 98, 102, 103]. Toutes ces solutions reposent sur une connaissance des conditions de transmission des utilisateurs, et des interférences qu'ils provoquent sur les cellules voisines, et ce sur chaque RB.

D'autre part, sur l'uplink du cas satellite, l'ordonnancement conjoint est perçu comme une solution très prometteuse de gestion d'interférences, car l'architecture est naturellement centralisée au niveau des gateways. De plus, dans notre cas d'application, les gains des utilisateurs changent très peu car les terminaux ne sont pas mobiles. À ce titre, une grande majorité des travaux récents de ce domaine utilisent cette approche pour améliorer les performances de techniques d'atténuation d'interférences [44, 45, 104], ou encore améliorer les performances d'un schéma FFR-4 [63].

[105] présente une des rares approches d'ordonnancement conjoint du downlink satellite où les avantages de cette approche sont exploités pour coordonner la formation dynamique de faisceaux.

Ordonnancement coopératif. Dans cette approche, aucune architecture centralisée de type C-RAN n'est présente, et on parle de réseaux auto-organisés (*self-organised networks*). L'ordonnancement est alors effectué localement dans chaque cellule, à partir d'informations d'occupation des canaux échangées périodiquement entre les cellules. L'avantage notable de cette stratégie est de permettre une coordination distribuée, et un ordonnancement de faible complexité, tout en ayant une gestion des ressources spectrales à granularité fine, et donc une flexibilité très importante.

Pour le moment et à notre connaissance, seul le downlink des réseaux cellulaires a vu des contributions utilisant ces approches, comme [106–109] où l'ordonnancement coopératif est combiné à un contrôle dynamique de puissance, [57] où il est utilisé à des fins de formation dynamique de faisceaux et [109, 110] où l'absence de contrôle de puissance est compensé par une technique de “cell blanking” (la cellule ne transmet rien sur certains RBs). Enfin, [97] est un cas un peu particulier de d'ordonnancement coordonné dans le sens où il n'utilise pas de messages pour informer les cellules voisines de l'allocation ou des interférences, et repose uniquement sur des mesures de SINR par les terminaux.

L'ordonnancement coopératif est une solution concurrente très attrayante à l'ordonnancement conjoint car de faible complexité algorithmique. Cependant, les performances de cette approche sont inférieures à celles de l'ordonnancement conjoint car les informations (les informations d'état du canal (*Channel State Information*) (CSIs)) dont disposent les stations de base sont incomplètes, peuvent expirer et sont souvent assez grossières⁵. Ainsi, un compromis entre “fraîcheur” et précision des CSIs et performances doit être trouvé [57].

2.2.5.b Contrôle dynamique de puissance En plus des travaux cités ci-dessus proposant un ordonnancement coordonné, certaines approches ne proposent qu'une adaptation de puissance dynamique à l'échelle de chaque RB, sans modification de l'ordonnancement. Les deux approches relevées dans la littérature [110, 111] s'apparentant à cette famille proposent des approches décentralisées, avec échanges périodiques de CSI.

2.2.5.c Conclusions sur la coordination dynamique d'interférences. Les besoins d'augmentation de bande passante toujours croissants et une volonté de flexibilité extrême dans l'allocation des ressources ont motivé le développement de solutions hautement dynamiques et flexibles de gestion des interférences. L'ordonnancement coordonné propose d'exploiter la diversité spatiale des utilisateurs pour éviter les interférences,

5. Par exemple, [108] utilise des indicateurs d'interférence à 4 niveaux pour indiquer aux cellules voisines les RBs qui sont utilisés par la cellule et le niveau de puissance pré-déterminé utilisé.

Référence	Contr. Puiss.	Ordo. Coop.	Ordo. Conj.	Nature Coord.	UL	DL
CELLULAIRE						
[111, 112]	x			Distribuée		x
[97, 98, 102, 103]	x		x	Centralisée		x
[97, 106–109]	x	x		Distribuée		x
[57, 110]		x		Distribuée		x
[99–101, 113]			x	Centralisée		x
[114]			x	Centralisée	x	
SATELLITE						
[105]	x			Centralisée		x
[44, 45, 63, 104]			x	Centralisée	x	

TABLE 3.3 Récapitulatif des approches dynamiques présentées

en sélectionnant des utilisateurs dont l'interférence mutuelle est limitée. Pour cela, des approches distribuées d'ordonnancement coopératif essaient d'apporter des solutions pratiques et implantables, tout en limitant la quantité des données échangées entre les cellules. D'autre part, l'ordonnancement conjoint propose de centraliser l'allocation des ressources aux utilisateurs, de manière à profiter d'une connaissance complète du problème pour effectuer un ordonnancement optimal. En complément de ces deux approches, le contrôle actif de puissance permet d'adapter les puissances d'émission afin de limiter autant que possible les interférences engendrées sur les cellules voisines. Les approches vues dans cette partie sont regroupées dans le tableau 3.3.

Application à la voie retour du satellite. L'ordonnancement conjoint a déjà fait l'objet de plusieurs travaux, l'organisation centralisée naturelle des faisceaux d'un satellite permettant cette approche. En effet, les gateways gèrent chacune plusieurs faisceaux, et l'on tend de plus en plus vers des architectures du tout-centralisé avec les Réseaux d'Accès Radio Virtualisés pour Satellite (**SatCloudRANs**). Cependant, tout comme pour les réseaux cellulaires, la complexité de la résolution reste rédhibitoire et des solutions efficaces restent à être mises en avant. De plus, si l'ordonnancement coopératif est un peu désuet dans une architecture centralisée, il reste essentiel d'identifier les informations qui doivent être prises en compte dans la coordination, et le degré de coordination nécessaire pour permettre une forte réutilisation des fréquences.

Remarque 6. Voie aller du satellite. Dans le tableau 3.3, on peut remarquer l'absence du downlink satellite (à l'exception de [105]), dont la méthode d'accès ne permet pas une gestion des interférences au niveau du RB. En effet, la structure de chaque trame DVB-S2 n'est pas figée. Notamment, la longueur de chaque trame est

variable et son organisation est propre à chaque faisceau (dépendante de la charge dans chaque ModCod, voir [20]), ce qui ne permet pas une gestion synchronisée des interférences. De plus, la flexibilité en puissance est fortement contrainte par les équipements embarqués à bord du satellite et est pour le moment limitée à des re-configurations lentes.

Technique	Dynam- icité	Ordo. affecté	Nature Coord.†	Appl. RL†	Over- head	Comp- lexité
Atténuation d'interférences						
+ Suppression d'interférences	+++	non	∅	oui	-	+
+ CoMP†MuMIMO MAC	+++	non	C	oui	+++	++
+ CoMP†MuMIMO DPC	+++	non	C	non	+++	++
+ CoMP†Joint Transmission	+++	non	C	non	+++	++
+ Form. Dyn. de faisceaux	+++	non	C	oui [?]	++	++
Coordination statique d'interférences						
+ Réorganisation spatiale	—	non	∅	oui	∅	∅
+ Schémas sans PowC†(FFR)	-	non	∅	oui	+	-
+ Schémas avec PowC (SFR...)	-	non	∅	non	+	-
Coordination semi-statique d'interférences						
+ Alloc. flexible de spectre	+	non	C	oui	+	+++
+ Alloc. flexible de puissance	+	non	C/D	non	+ / +++	++ / -
+ Association d'utilisateurs	+	non	C/D	non	+ / +++	++ / -
Coordination dynamique d'interférences						
+ Ordonnancement conjoint	+++	oui	C	oui	+	+++
+ Ordonnancement coopératif	+++	oui	D	non	+++	+
+ Contrôle dyn. de puissance	+++	variable	C/D	non	+ / +++	+ / +

† RL = voie retour satellite, PowC : Contrôle de puissance, ∅ = Pas de coord., C = coord. centralisée, D = coord. distribuée

[?] En principe applicable, mais aucun exemple dans la littérature

TABLE 3.4 Comparaison des schémas classiques de réutilisation de fréquences

2.3 Conclusion sur les approches de gestion d'interférences

Dans cette section, nous avons présenté une classification des approches de la gestion d'interférence en satellite et en cellulaire, pour l'uplink et le downlink, en séparant deux paradigmes principaux : l'atténuation d'interférences et la coordination d'interférences. Le premier comprend les méthodes de bas niveau qui visent à limiter les effets des interférences voire à les supprimer. Le second vise à éviter les interférences par une coordination entre les potentiels interférants, avec une dynamique et des besoins d'échanges de messages variables. Le tableau 3.4 propose un récapitulatif des approches présentées dans cette section, avec une évaluation simple de l'*overhead* associé, et de la complexité algorithmique de la solution.

Sur l'ensemble des travaux présentés, on peut remarquer qu'une large majorité s'intéresse au downlink, et cela s'explique facilement par le fait que c'est le sens de communi-

tion qui traditionnellement porte la majorité du trafic. Cependant, les nouveaux usages (réseaux sociaux avec mise en ligne de photos/vidéos, vidéos en direct, appels vidéos etc.) tendent à modifier cet équilibre et un intérêt croissant est porté à l'uplink des réseaux cellulaires et satellitaires.

Parmi toutes ces solutions, certaines ne sont pas envisageables pour la voie retour, que ce soit à cause de limitations physiques ou des protocoles et mécanismes propres à la voie retour qui ne permettent pas leur mise en œuvre pour le moment. C'est le cas notamment des mécanismes reposant sur un contrôle de puissance dynamique.

Les techniques statiques de coordination d'interférence sont des solutions pouvant augmenter la capacité du système sans le complexifier, mais une adaptation au cas satellitaire est nécessaire, de même qu'une évaluation complète des performances de ces solutions. Peu d'approches semi-statiques augmentant la flexibilité de la gestion des ressources ont été proposées pour la voie retour, et c'est probablement un des axes qui mériterait d'être plus amplement traité, malgré la difficulté du problème. Enfin, la voie retour a beaucoup été considérée sous l'angle de l'ordonnancement conjoint, encouragé par l'architecture centralisée des **SatCloudRANs**. Cependant, les approches sont assez disparates et le sujet nécessiterait une formulation directe et générale du problème.

En parallèle des techniques de coordination, l'atténuation d'interférences semble proposer des approches complémentaires intéressantes dont un certain nombre sont déjà envisagées pour la voie retour (SIC, **Mu-MIMO**).

3 Modélisation des problèmes de gestion des ressources radio en présence d'interférences

Tout comme les approches de gestion d'interférences, les modèles utilisés pour formaliser ces problèmes sont variés. La nature de la modélisation est souvent affectée par l'approche choisie, qui donne son lot de contraintes temporelles ou change la nature des ressources du problème à formuler. Cependant, les modèles ne sont pas uniques et propres à chaque approche de gestion des interférences, et de nombreux recoupements sont observables. Cette partie propose de présenter les grandes familles de modèles régulièrement utilisés, et les impacts sur la résolution ou sur les résultats obtenus grâce à ces modèles, et enfin de croiser cela avec la section précédente.

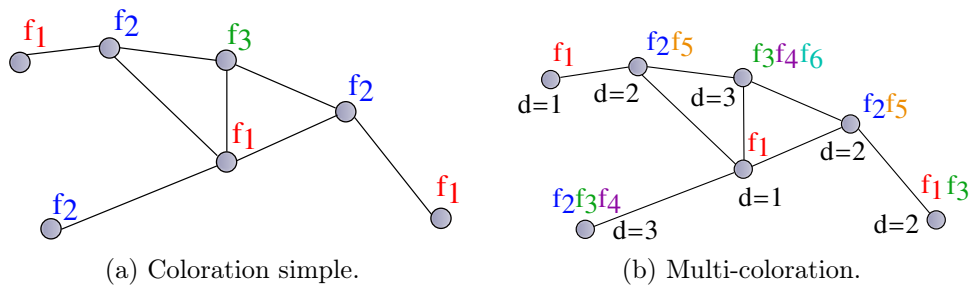


FIGURE 3.12 Problèmes d'allocation de fréquences (FAP).

3.1 Graphes d'interférences

Les graphes sont des objets mathématiques souvent utilisés pour étudier les réseaux. L'utilisation des graphes d'interférences permet notamment de justifier rigoureusement les schémas de coloration classiques ou agressifs présentés en section 2.2.3. De plus, de nombreuses approches semi-statiques s'appuient sur les graphes d'interférences pour affecter des sous-bandes de fréquences aux cellules [22, 81–84, 115, 116] ou aux terminaux directement [80].

Principe des graphes d'interférences Les graphes d'interférences ont beaucoup été utilisés pour modéliser les problèmes d'allocation de fréquences (Frequency Assignment Problem (FAP)), étudiés sous toutes leurs formes par exemple dans [22]. Le principe est de se ramener à un problème de coloration de graphe, ou de multi-coloration de graphe [115] (la différence entre les deux étant que l'on peut affecter plusieurs fréquences (couleurs) à chaque nœud de graphe pour remplir la demande, comme illustré en figure 3.12).

Un graphe d'interférences considère les cellules comme sommets du graphe et les arêtes représentent une interférence “forte” entre les deux cellules, selon un critère donné :

- La proximité des cellules/zones (par ex. cellules adjacentes) [81, 82, 84, 116].
- Une distance minimale de réutilisation des fréquences ou de manière similaire une puissance d'interférence maximale autorisant la réutilisation de fréquences [22, 117, 118].
- Ou encore une combinaison de critères (deux zones d'une même cellule, distance, opérateur...) [82, 83, 116].

Lorsque plusieurs zones sont définies dans une cellule (par ex [82, 116]), le graphe d'interférences peut être adapté, comme illustré sur la figure 3.13a, en ajoutant une arête entre les zones centrales et les zones externes, qui n'indique plus une interférence trop forte, mais une impossibilité de transmission simultanée.

Afin d'augmenter la flexibilité de l'allocation des fréquences, il est aussi possible

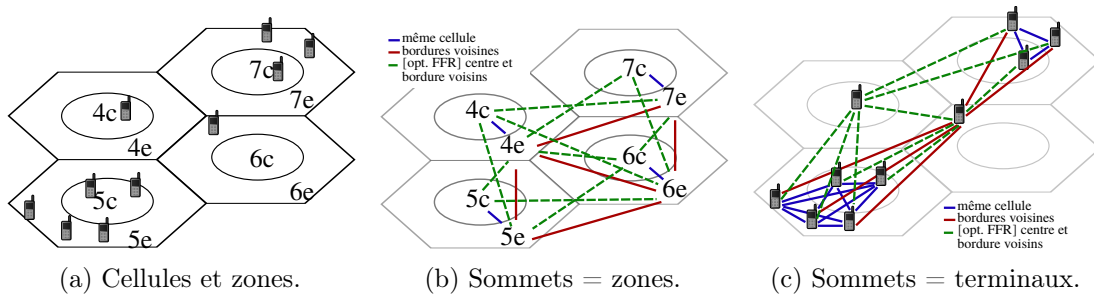


FIGURE 3.13 Différentes natures de graphes d'interférences.

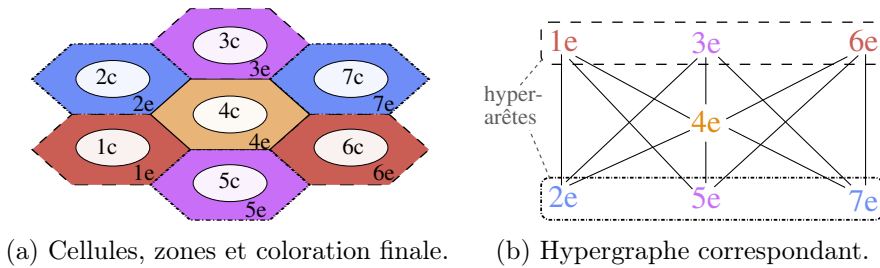


FIGURE 3.14 Exemple d'hypergraphe, correspondant au modèle donné dans [118] et de coloration d'hypergraphe. Dans l'exemple, les zones 2e et 7e peuvent utiliser le même canal à condition que la zone 5e n'utilise pas ce même canal.

considérer les terminaux comme sommets du graphe, comme proposé dans [80] et illustré en figure 3.13.

Hypergraphes d'interférences. Quelques travaux [117–119] dans la littérature proposent d'étendre les graphes d'interférences à des hypergraphes, dans le but d'améliorer leur pertinence. Un hypergraphe est un graphe disposant d'arêtes particulières, dites hyper-arêtes, pouvant relier deux ou plus sommets entre eux. Dans ce cadre, pour colorer le graphe, tous les sommets d'une hyper-arête **sauf un** peuvent utiliser la même couleur [117, 118]. Cela reflète bien le fait qu'en général, c'est l'accumulation d'un certain nombre d'interférences engendrées par plusieurs cellules qui provoque le dépassement du niveau d'interférence tolérable. Ce modèle de graphe amélioré permet de prendre en compte toute une nouvelle diversité de cas de figure. Un exemple d'hypergraphe et une coloration possible sont proposés en figure 3.14. D'autres modélisations utilisant des hypergraphes ont été étudiées pour les **HetNets**, et une synthèse sur le sujet peut être trouvée dans [120].

Critiques des modèles de graphes d'interférences Les graphes d'interférences sont un outil assez intuitif pour modéliser les interférences. Cependant, ils ont plusieurs faiblesses :

1. **Granularité de la prise en compte de l'interférence** : Les modèles utilisant des graphes d'interférences ont généralement des considérations pire cas, ce qui peut déboucher sur des performances largement sous-optimales, d'autant plus lorsque les interférences sont fortement variables.
2. **Indication binaire d'interférence** : Les graphes d'interférences donnent une indication binaire. Il y a interférence ou il n'y en a pas, alors que dans tous les systèmes de communication modernes plusieurs débits sont proposés, correspondant à plusieurs niveaux de SINR.
3. **Cécité à la méthode d'allocation** : La coloration de graphe d'interférences ne prend en compte que les contraintes d'interférence, et ne permet pas d'exprimer d'autres types de contraintes, comme par exemple celles liées aux méthodes d'accès des réseaux de données modernes.
4. **Contrôle de puissance** : Une fois le graphe d'interférences donné, il n'est plus possible de jouer avec les puissances d'émission pour adapter l'interférence engendrée par une cellule. Or comme nous avons pu le voir dans la section précédente, le contrôle de puissance est une des approches privilégiées de gestion des interférences, que les graphes ne peuvent pas modéliser.

En conclusion, les modèles utilisant des graphes d'interférences permettent une modélisation des problèmes statiques et semi-statiques d'allocation de bande passante considérant les cellules ou des zones entières, mais restent souvent sous-optimaux et ne permettent pas de modéliser un grand nombre de problèmes associés à différentes approches (contrôle de puissance, multiplicité des ModCod, autres).

3.2 Modèles avec contraintes d'interférences

Les graphes ne modélisant pas bien des phénomènes tels que la multiplicité des niveaux de transmission ou encore les variations de niveaux d'interférence, des modèles plus génériques utilisant les mêmes idées initiales (mettre une condition sur la possibilité ou l'impossibilité d'une transmission) ont été avancés. Ces modèles mettent en place une formalisation plus lourde, où des variables représentent l'affectation des ressources aux cellules ou aux utilisateurs, ou encore, représentent les puissances allouées aux différentes transmissions pour le contrôle de puissance. Des contraintes modélisent ensuite

les relations entre les variables d'allocation, décrivant les conditions de bonne ou de mauvaise transmission.

Cette approche se prête particulièrement bien aux cas où la gestion des ressources est centralisée et où l'entité centrale a une connaissance étendue des conditions de transmission de la partie du réseau qu'il contrôle.

Contrairement aux modèles utilisant des graphes d'interférences, ils n'ont pas de structure particulière qui permette de les traiter de manière générique, et la résolution du problème demande alors souvent de résoudre un problème d'optimisation.

Les contraintes intégrant les interférences sont de plusieurs natures :

1. Satisfaction d'un SINR minimum, permettant la transmission avec n'importe quel ModCod [?, 31, 51, 52, 84, 88, 121, 122]. Cette approche simplifie grandement le problème, et ressemble fortement à la modélisation par graphes, tout en laissant la possibilité de compléter le modèle avec d'autres contraintes du système.
2. Satisfaction d'un SINR minimum pour chaque ModCod, en veillant à utiliser le meilleur disponible [76–78, 96, 106, 107, 123–126]. Profiter de la multiplicité des ModCod pour valoriser dans un sens ou dans l'autre les interférences permet d'avoir une gestion très fine des interférences, et de combiner l'allocation des ressources à une adaptation du mode de transmission.

En plus de ces contraintes d'interférences, les modèles sont souvent complétés de diverses contraintes du système dont voici quelques exemples :

- **Contrôle de puissance en downlink** : sur le downlink, que ce soit en cellulaire ou en satellitaire, la somme des puissances utilisées pour l'émission sur chaque porteuse ou sous-porteuse doit être inférieure ou égale à la puissance totale disponible [76, 78, 107].
- **Contrôle de puissance en uplink** : sur l'uplink des réseaux cellulaires LTE, la méthode d'accès, le Single Carrier Frequency Division Multiplexing (SC-FDMA), permet d'agréger plusieurs sous-porteuses en une seule porteuse large bande. Cela permet d'augmenter l'efficacité spectrale, mais la densité de puissance sur chaque sous-porteuse y est donc plus faible [126].
- **Méthodes d'accès en satellite** : les modes de fonctionnement en DVB-S2 et en DVB-RCS2 imposent à un utilisateur de n'utiliser qu'une seule porteuse à la fois [45, 63].
- **Satisfaction de la demande des utilisateurs** : ces contraintes peuvent prendre plusieurs formes, comme la satisfaction d'un débit minimal [73], ou l'interdiction d'allocation excédentaire [63].

3.3 Modèles faisant appel à la théorie des jeux

D'autres approches ont été adoptées, pour répondre à des problèmes plus spécifiques, notamment quand la gestion des ressources est distribuée. Une des approches très populaire ces dernières années concerne la théorie des jeux [35, 68–70, 97, 127].

La théorie des jeux s'intéresse à un ensemble de joueurs participant à un jeu qui est un ensemble de règles régissant les interactions entre eux. Les joueurs étant conscients des règles, ils cherchent seuls ou en coopérant à maximiser leurs profits individuels. Dans le cas de la gestion de ressources radio, les joueurs sont les cellules⁶ qui doivent allouer les RBs et éventuellement la puissance à leurs utilisateurs de manière à maximiser leur notion du profit. Cette notion de profit est à définir de manière à encourager une utilisation des ressources radio bénéfique pour le système en entier.

L'allocation des ressources radio dans un cadre multi-cellules est un jeu à somme non-nulle, c'est-à-dire que ce que perd l'un n'est pas ce que gagne l'autre, ou de manière plus concrète : les cellules ne sont pas concurrentes pour les mêmes ressources. Il est possible de réutiliser plusieurs fois les fréquences, mais le faire peut nuire fortement aux cellules voisines.

La mise en œuvre de mécanismes ayant recours à la théorie des jeux peut reposer sur deux de ses sous-domaines d'étude : les jeux coopératifs et non-coopératifs. Dans le premier, les joueurs forment des coalitions leur permettant d'établir une stratégie commune tendant à maximiser le profit des membres de la coalition. Dans le second [128], les joueurs ne peuvent établir de stratégie commune, mais cela n'empêche pas l'échange d'information entre les joueurs. La différence essentielle entre les jeux coopératifs et les jeux non-coopératifs est que dans les premiers, les coalitions vont pouvoir établir une stratégie commune, c'est-à-dire résoudre un problème d'optimisation conjoint, tandis que dans les derniers la prise de décision est toujours uniquement locale et indépendante.

3.3.1 Jeux coopératifs

Les jeux coopératifs, introduits par Von Neumann [129], pourraient s'appliquer à des réseaux qui s'auto-organisent en formant des groupes de cellules dont la gestion de ressources radio serait déléguée à l'une des cellules, [68]. L'intérêt est d'arriver à trouver un compromis entre l'efficacité d'un ordonnancement conjoint et une faible complexité due à la taille réduite du sous-problème [130–132]. Cependant, la mise en place d'un tel système semble d'une part complexe à cause de la diversité des interactions possibles

6. Les cellules étant les gestionnaires des ressources radio, ce sont elles qui sont considérées comme joueurs, et non les utilisateurs.

(protocoles de négociation d'une coalition, optimisation locale de la gestion de ressources radio, échanges de CSI entre coalitions, etc.) et d'autre part serait probablement coûteuse car chaque cellule devrait alors disposer d'une capacité de calcul suffisante pour accomplir l'ordonnancement conjoint pour toute une coalition.

3.3.2 Jeux non-coopératifs

Les jeux non-coopératifs ont une application directe pour la gestion de ressources radio distribuée et les réseaux auto-organisés, permettant un ordonnancement local à chaque cellule et des échanges d'information très limités. Avant de présenter quelques exemples représentatifs de l'utilisation des jeux non-coopératifs pour la gestion de ressources radio, il est nécessaire de présenter un concept fondamental des jeux non-coopératifs : l'équilibre de Nash.

3.3.2.a Équilibre de Nash. La notion d'équilibre de Nash est capitale pour les jeux non-coopératifs. Cette notion désigne une situation où les joueurs ne peuvent espérer améliorer leur profit en changeant, seuls, de stratégie [133]. Ce qui donne lieu à un équilibre stable de la répartition des ressources. Un équilibre de Nash n'est pas nécessairement bon pour le système, mais seulement une garantie de convergence et de stabilité.

La qualité d'une solution fondée sur la théorie des jeux non-coopérative dépend donc de plusieurs facteurs tels que l'ensemble des règles et interactions entre les joueurs (idéalement qui n'incitent pas les joueurs à une attitude destructrice), la définition du profit (fonction d'utilité) alliant bénéfices individuels et efficacité globale, et l'existence d'équilibre(s) de Nash uniquement bénéfique(s) au système.

3.3.2.b Application à la gestion de ressources radio Dans un jeu non-coopératif, les joueurs peuvent s'appuyer sur différentes informations afin d'adapter leur stratégie :

1. Les informations locales : mesures d'interférences au niveau de l'antenne, rapports de qualité de canal des utilisateurs, mesures de SINR sur l'uplink [97].
2. Des CSI transmises par les cellules voisines [68, 69].
3. Des informations spécifiques au mécanisme de gestion de ressources radio mis en place [70].

Dans tous les cas donnés ci-dessus, les ressources allouées sont à la fois de la puissance et des sous-porteuses. Les démarches reposent sur le fait que les utilisateurs sont systématiquement affectés aux mêmes sous-porteuses, de manière à stabiliser au mieux l'interférence générée sur les voisins et permettre la convergence du mécanisme.

3.4 Conclusion sur les modèles des problèmes de gestion d'interférences

Dans cette partie nous avons vu les différents modèles utilisés pour les problèmes comprenant une gestion des interférences. Parmi ces modèles, les graphes d'interférences ont une importance historique et fondatrice, et ont donné lieu à d'autres modèles, moins structurés mais plus versatiles, permettant de modéliser plus précisément les problèmes d'allocation de ressources sous contraintes d'interférences.

D'autres modèles peuvent être trouvés dans la littérature, comme ceux utilisant la théorie des jeux, mais avec des objectifs de décentralisation de l'allocation de ressources, et d'auto-organisation du réseau. Un tableau récapitulant les approches de modélisation vues et les domaines d'application est présenté sur le tableau 3.5

Modèles	Type de problèmes	Dynamacité adressée	Coordination nécessaire
Graphes d'interférences	Allocation bande	Statique Semi-statique	Centralisée
Hypergraphes d'interférences	Allocation bande	Statique Semi-statique	Centralisée
Contraintes de SINR min	Allocation ressources, puissance, association	Semi-statique Dynamique	Centralisée / Distribuée avec CSI
Théorie des jeux	Allocation ressources, puissance, association	Semi-statique Dynamique	Distribuée avec/sans CSI

TABLE 3.5 Récapitulatif des modèles pour les problèmes de gestion d'interférences

4 Équité et gestion des ressources radio

La troisième et dernière composante de notre état de l'art porte sur les approches de l'équité entre utilisateurs dans la gestion des ressources radio, sous contraintes d'interférences. En effet, aux inégalités naturelles entre les utilisateurs (distance à la cellule, présence d'une ligne de vue...) s'ajoutent des inégalités provenant de la gestion des interférences. Un utilisateur subissant un fort niveau d'interférences va avoir besoin soit de plus de ressources, soit de ressources subissant moins d'interférences, ce qui revient potentiellement à priver les utilisateurs des cellules voisines de ces ressources. Dans tous les cas le coût associé à chaque utilisateur varie énormément, et les intérêts des utilisateurs sont très différents de l'intérêt du système.

Il est donc nécessaire de prendre en compte l'équité dans la solution envisagée, ce qui a un impact non négligeable sur la modélisation ou sur la manière de résoudre le problème. La présente section propose de s'intéresser à la manière avec laquelle la littérature aborde

la question de l'équité, afin d'orienter le système vers un compromis acceptable entre débit du système et intérêts individuels.

4.1 Préambule : mesurer l'équité

Si la notion d'équité est assez intuitive, sa mesure effective l'est beaucoup moins. Le besoin de définir une métrique d'équité n'est pas nouveau, et de nombreux travaux [134–144] ont abordé la question. Les propriétés désirables d'une mesure de l'équité sont étudiées dans un cadre très général dans [134, 141], réunifiant toutes les mesures d'équité les plus pertinentes sous une même formulation, tout en mettant en valeur les différents compromis atteints par chacune et les bonnes propriétés inhérentes.

La suite de cette sous-partie se limite à présenter les métriques les plus utilisées dans les travaux présentés en section 2. Plus de détails sont fournis dans la synthèse proposée par Shi [144] ou dans les travaux précédemment cités.

4.1.1 L'indice d'équité de Jain

L'indice d'équité de Jain [137] est une des premières propositions de quantification spécifique de l'équité. La volonté de son créateur était de proposer un indice intuitif (borné, continu, non dépendant du nombre d'utilisateurs et indépendant des ressources partagées). Il est défini par :

$$\mathcal{J}(\mathbf{x}) = \frac{\left(\sum_{i=1}^N x_i\right)^2}{N \sum_{i=1}^N x_i^2} \quad (3.1)$$

où \mathbf{x} est le vecteur des allocations x_i . Cet indice varie dans $[0, 1]$; $\mathcal{J}(\mathbf{x}) = 1$ correspondant à un partage égal des ressources entre les utilisateurs.

Cependant, le partage égalitaire des ressources n'est pas forcément désirable du point de vue de l'efficacité de l'utilisation des ressources. De plus, lorsqu'il y a plusieurs ressources distinctes et que les utilisateurs n'ont pas accès aux mêmes ressources, ce qui est le cas de la gestion des ressources radio (plusieurs cellules ayant chacune leur portion de spectre), l'indicateur de Jain peut présenter de très mauvaises valeurs non pas en raison d'un partage inéquitable mais à cause d'une répartition hétérogène des utilisateurs dans le réseau. Ainsi, d'autres mesures ou critères d'équité ont été avancés pour orienter un système vers un compromis plus acceptable ou plus représentatif de l'équité réelle, bien que l'indice de Jain soit tout de même régulièrement utilisé en complément [76, 144, 145].

4.1.2 L'équité MaxMin

MaxMin [135, 136, 139] est un critère binaire d'équité. Un partage des ressources \mathbf{x} est **MaxMin**-équitable si et seulement si augmenter l'allocation d'un utilisateur i débouche nécessairement à la dégradation de l'allocation d'un utilisateur j ayant une allocation plus faible. Être **MaxMin**-équitable revient à servir, tant que possible, tout le monde de manière égalitaire jusqu'à atteindre un point de blocage partiel (capacité d'un lien atteinte, demande satisfaite) et de continuer de la même manière avec les utilisateurs qu'il est encore possible de servir [136].

4.1.3 Équité α (α -fairness).

L'équité **MaxMin** donne une priorité absolue aux utilisateurs les moins servis et il est parfois très coûteux pour le système d'augmenter l'allocation du plus faible. Pour pallier ce problème, l'équité α propose une mesure personnalisable d'équité, dont **MaxMin** est un cas particulier. Elle associe à l'allocation de chaque utilisateur i une utilité $U_\alpha(x_i)$ définie comme suit [135, 136, 139] :

$$U_\alpha(x_i) = \begin{cases} \frac{x_i^{1-\alpha}}{1-\alpha} & \text{si } \alpha \neq 1 \\ \log(x_i) & \text{si } \alpha = 1 \end{cases} \quad (3.2)$$

L'objectif de l'algorithme de gestion des ressources est alors de maximiser la somme des utilités. La valeur de α permet de personnaliser l'empathie de l'allocation vis-à-vis des utilisateurs les moins bien servis (c'est-à-dire les plus coûteux en ressources). Plusieurs valeurs particulières de α sont à noter :

1. $\alpha \rightarrow +\infty$ correspond à l'équité **MaxMin**.
2. $\alpha = 1$ est l'équité proportionnelle, commentée un peu plus loin.
3. D'autres valeurs de α ont été étudiées (par exemple $\alpha = 2$ pour *maximum potential delay fairness* [136]), mais beaucoup moins appliquées que les deux précédentes dans le cas de la gestion des ressources radio.

4.1.4 L'équité proportionnelle (*Proportional Fairness*)

Proportional Fairness (PF) est un cas particulier d'équité α , dont l'objectif est de maximiser la somme des logarithmes des allocations à chaque utilisateur. Le logarithme tendant vers $-\infty$ quand l'allocation tend vers 0, PF accorde une valeur extrêmement élevée à éviter une allocation nulle (*starvation*). D'un autre côté, l'efficacité du système

est favorisée car la même valeur est accordée à l'augmentation relative d'une allocation (doubler une petite allocation ou doubler une grosse allocation).

En plus d'être exprimé comme fonction d'utilité, PF est aussi, comme **MaxMin**, un critère binaire qualifiant une allocation. Une allocation \mathbf{x} est dite proportionnellement équitable si et seulement si, pour tout autre allocation faisable \mathbf{y} , la somme des changements proportionnels est négative :

$$\sum_i \frac{y_i - x_i}{x_i} < 0 \quad (3.3)$$

L'équivalence entre la maximisation de la somme des logarithmes et ce critère a été démontrée dans [139].

Une extension de PF consiste à utiliser des poids w_i par utilisateur pour valoriser d'autres aspects, comme le prix payé par l'utilisateur [139]. La fonction objectif du système est alors :

$$U(\mathbf{x}) = \sum_i w_i \log(x_i) \quad (3.4)$$

Application à l'ordonnancement opportuniste dans les réseaux cellulaires.

Une des applications de PF est celle du cas cellulaire avec des utilisateurs mobiles. Dans ce contexte-là, les conditions de transmission changent au cours du temps et donc le coût associé au service d'un utilisateur varie dans le temps, rendant la gestion de l'équité difficile. En effet, dans le cas statique, il est possible d'allouer une certaine proportion de temps à chaque utilisateur, de manière à maximiser la fonction objectif du système. Or dans ce cas (conditions de transmission variables), la valeur d'une allocation change très rapidement. L'idée est donc d'être opportuniste et d'allouer une plus grande proportion des ressources aux utilisateurs qui sont dans de bonnes conditions de transmission, tout en assurant une allocation minimale aux utilisateurs dans de mauvaises conditions.

La politique d'ordonnancement opportuniste de [146], dont la nature PF a été démontrée par Kushner dans [140] remplit exactement ces conditions. Elle indique que, étant donné des utilisateurs i ayant un débit instantané estimé r_i et un débit moyen θ_i , l'utilisateur à servir est celui ayant le plus grand rapport entre débit instantané et débit moyen :

$$i^* = \arg \max_i \frac{r_i}{\theta_i} \quad (3.5)$$

De cette manière, l'allocation sera d'autant plus probable que l'utilisateur aura un fort débit instantané r_i (i.e. de bonnes conditions de transmission), tout en s'assurant qu'un utilisateur peu servi (débit moyen θ_i faible) devienne prioritaire avec une probabilité non nulle [140].

Application au cas sans prise en compte des interférences. Il a été montré à de nombreuses reprises (par exemple dans [95]) que lorsque les interférences ne sont pas prises en compte, et lorsque que les puissances sont fixées, PF est équivalent à l'équité temporelle (*Temporal Fairness (TF)*)

Maintenant que ces mesures d'équité ont été présentées, nous pouvons nous intéresser aux différentes approches de l'équité pour la gestion des ressources radio en présence d'interférences.

4.2 Stratégies de partage des ressources

La gestion des ressources radio à l'échelle d'un réseau pose le problème de l'équité du partage des ressources à plusieurs niveaux :

1. Entre les cellules
2. Entre les utilisateurs d'une même cellule
3. Entre tous les utilisateurs du réseau

Les différentes techniques de gestion des ressources radio et des interférences abordées dans la section 2 n'agissent pas toutes au même niveau. Nous nous efforçons dans cette partie de distinguer les approches adoptées, en soulignant les ressources partagées et les critères d'évaluation utilisés pour justifier ou orienter les solutions de gestion d'interférences en terme d'équité.

4.2.1 Découpler la gestion de l'équité et la gestion des interférences.

De nombreuses approches, souvent de bas niveau (ex : CoMP) mais pas seulement, considèrent que l'équité n'est pas de leur ressort, et qu'une entité intervenant en amont a déjà réglé la question. Il ne s'agit alors plus que de maximiser l'efficacité spectrale. Dans ce genre d'approche, s'il y a N ressources et M utilisateurs le problème à traiter est alors d'affecter les utilisateurs aux ressources de la manière la plus efficace pour le système. Cela peut signifier dégrader systématiquement les mêmes utilisateurs. Des exemples utilisant ce type de mécanisme peuvent être trouvés dans [44, 45, 98, 104, 105, 111]

4.2.2 Gestion statique des ressources : une équité entre cellules.

Lorsque les ressources sont affectées de manière statique, la notion d'équité entre les utilisateurs n'a pas de sens. C'est donc généralement uniquement un partage équitable des ressources (bandes spectrales) entre les cellules ou zones qui est abordé. Par exemple, dans le cas des schémas de coloration classiques (FR-3, FR-4), chaque cellule reçoit une part égale

de la bande. De même pour les schémas agressifs (FFR, PFR, SFR), chaque zone (CEA, CCA) reçoit une portion du spectre proportionnelle à la surface couverte. C'est une répartition équitable du spectre par unité de surface entre les zones, mais pas nécessairement une répartition équitable des ressources spectrales entre les utilisateurs d'une même cellule et encore moins entre tous les utilisateurs du réseau. En effet :

1. L'équité entre utilisateurs d'une même cellule sera du ressort de l'ordonnanceur de la cellule.
2. L'équité entre tous les utilisateurs dépendra aussi de l'ordonnanceur de chaque cellule, mais aussi de la répartition des utilisateurs entre les cellules, qui n'est pas contrôlable.

Le contrôle de puissance statique, comme en PFR, vise à améliorer l'équité des conditions de transmission (par ex. SINR moyen) entre CEA et CCA par une allocation de puissance en rapport avec les conditions moyennes des zones.

En revanche en SFR, la possibilité de réutilisation des bandes de bordure permet d'augmenter la flexibilité, et vise donc à offrir de plus grandes possibilités à l'ordonnanceur de chaque cellule. Dans un certain sens, cela peut être vu comme une augmentation de l'équité entre les utilisateurs, bien que rien ne soit garanti.

4.2.3 Utilisation de fonctions d'utilité prenant en compte l'équité.

De très nombreux travaux utilisent des fonctions d'utilité. Ces fonctions associent une valeur à l'allocation d'une ressource à un utilisateur, éventuellement agrémentée d'un poids propre à chaque utilisateur. Il s'agit ensuite pour le système de trouver l'allocation des ressources qui maximise la somme des utilités. Cela peut prendre la forme d'un problème d'optimisation, lorsqu'une entité centrale est en charge de l'allocation, ou encore une formulation distribuée à la façon de la théorie des jeux, où chaque cellule vise à maximiser sa part de la fonction objectif du système.

C'est la pratique qui domine dans la littérature ; elle se répartit sur les objectifs d'équité présentés plus tôt dans cette section, mais aussi sur des adaptations pour répondre à des besoins plus spécifiques.

- Équité Max-Min (**MaxMin**) est parfois utilisée, mais plus dans un objectif de référence de comparaison que comme solution idéale [72–74, 147, 148].
- PF est très présente dans la gestion dynamique d'interférences, notamment car cette fonction d'utilité porte un compromis attrayant entre efficacité spectrale et équité [87, 94, 95, 100, 103, 112–114, 147].
- Dans les problèmes d'allocation flexible de bande passante aux cellules, ce sont

les métriques qui visent à maximiser la satisfaction de la demande qui sont quasi-systématiquement choisies. Pour cela, il s'agit généralement de minimiser la somme des écarts quadratiques entre la demande \mathbf{d} et l'allocation \mathbf{x} [72–74, 76–79, 90, 91]

$$\underset{\mathbf{x}}{\text{Minimiser}} \sum_k (d_k - x_k)^2, \text{ s.t. } x_k \leq d_k \quad (3.6)$$

- Dans des systèmes sous-chargés, certains forcent à satisfaire la demande de chaque utilisateur (ou éventuellement des contraintes de Qualité de Service (QoS)), puis de maximiser la capacité du système [71, 85] ou d'autres métriques plus spécifiques comme l'efficacité énergétique [97, 102, 109].

4.3 Conclusion sur les approches de l'équité dans la gestion des interférences

Dans cette partie nous avons présenté les métriques d'équité les plus répandues dans les travaux traitant la gestion d'interférences, puis mis en avant les différentes manières de la mettre en place. Si la question de l'équité n'est pas systématiquement traitée, ou alors seulement de manière succincte, de très nombreux travaux utilisent les fonctions d'utilité, leur permettant ainsi de guider les algorithmes d'allocation des ressources vers une répartition équitable. Parmi elles, la minimisation de l'écart quadratique entre le service et la demande est la métrique plébiscitée pour l'allocation semi-statique de ressources fréquentielles, et PF est choisie par un grand nombre de solutions dynamiques de gestion de ressources radio car elle porte un bon compromis entre équité et efficacité spectrale.

5 Conclusion de l'état de l'art : quelles solutions pour la voie retour des satellites multifaisceaux ?

Ce chapitre présente une synthèse selon trois axes des techniques de gestion des ressources spectrales dans un contexte où les interférences deviennent prépondérantes : les approches générales, les modèles et la gestion de l'équité. De très nombreuses solutions sont proposées, souvent dans des contextes différents. Il nous revient alors de déterminer les solutions qui sont applicables à la voie retour d'un système satellitaire.

La coordination statique d'interférences a montré des gains de performance prometteurs dans les cas cellulaires, mais les schémas agressifs de réutilisation de fréquences ont très peu été étudiés sur la voie retour ; il convient de les adapter à la nature différente de l'atténuation angulaire par rapport au *pathloss* pour étudier leurs performances. D'autre

part, la nature des interférences sur la voie retour fait que les niveaux d'interférences sont très variables en fonction des utilisateurs qui sont choisis, réduisant dramatiquement les performances des techniques statiques et semi-statiques de coordination d'interférences, qui considèrent des zones très larges et nécessitent des garanties fortes sur les niveaux d'interférences attendus, comme c'est par exemple le cas dans [?, 88]. Il reste alors à se tourner vers la coordination dynamique d'interférences si l'on veut atteindre des gains de performances plus importants, et plus particulièrement vers l'ordonnancement conjoint.

En effet, cette approche permet une gestion des interférences au niveau de chaque utilisateur et de chaque RB. C'est aussi le parti pris par une grande partie des travaux les plus récents traitant le problème des interférences sur la voie retour [44, 45, 63, 104]. Cependant, ces travaux présentent chacun des heuristiques spécifiques, ou utilisent des techniques complémentaires telles que l'annulation d'interférences ou le Mu-MIMO, et la question de l'équité n'est que très brièvement abordée. Deux questions se posent alors à nous :

1. Jusqu'où peut on augmenter le débit d'un système satellite multifaisceau grâce à de la coordination dynamique d'interférences ?
2. Peut-on proposer une gestion équitable des ressources, et quel est le prix de l'équité ?

Ce sont les questions auxquelles ce manuscrit tente de répondre dans les chapitres à venir.

CALCUL DE LA BORNE SUPÉRIEURE DE L'ALLOCATION

1 Introduction

Nous considérons le système décrit dans le chapitre 2, et nous intéressons donc à la gestion des interférences sur l'uplink de la voie retour de ce système. Dans ce chapitre, nous allons nous intéresser à l'obtention de bornes supérieures de l'allocation, hors-ligne, en approchant le problème frontalement. Nous modéliserons et résoudrons le problème de l'affectation globale et conjointe des ressources aux utilisateurs.

Cette approche correspond à un ordonnancement coordonné, l'approche la plus dynamique de gestion des interférences, présentée en section 2.2.5 du chapitre 3. Cette approche, utilisée à plusieurs reprises dans la littérature [44, 45, 63, 104], se justifie par deux aspects fondamentaux de la voie retour en satellite :

1. La position des utilisateurs provoquant des interférences a un impact primordial sur le niveau d'interférence subi dans les faisceaux voisins.
2. L'architecture du satellite facilite la centralisation de l'allocation des ressources.

Cette modélisation prendra la forme d'un problème d'optimisation en nombres entiers, prenant en compte les interférences sous forme de contraintes de faisabilité, comme présenté dans la section 3.2 du chapitre 3, et en considérant des débits discrétisés. Il s'agira donc, de manière plus précise, de l'affectation des blocs de ressources et du ModCod aux utilisateurs, de manière globale et conjointe.

Deux versions du problème seront envisagées. La première version du problème vise à maximiser la capacité du système, sans considération d'équité. La résolution de cette

version conduit au débit maximal du système pour une distribution d'utilisateurs donnée. On pourra exploiter cette valeur pour comparer l'efficacité d'autres algorithmes d'allocation des ressources. La seconde version du problème cherche à maximiser l'équité proportionnelle (PF) du système, ou en d'autres termes, à maximiser la moyenne géométrique des débits.

L'évaluation des performances de chacun de ces problèmes sera effectuée par simulation et en faisant appel à un solveur commercial (Gurobi [149]) pour résoudre les différents problèmes d'optimisation. Ces performances seront évaluées pour plusieurs scénarios et en considérant deux organisations des faisceaux : l'un formant un pavage hexagonal, l'autre un pavage carré. De plus, nous considérerons un système ambitieux en termes de réutilisation des fréquences : un schéma à deux sous-bandes où chaque faisceau utilise toute la bande sur chaque polarisation. Nous comparerons les performances optimales sur ce schéma à celles du schéma FR-4, plus classique et conservateur.

1.1 Plan du chapitre

Ce chapitre s'organise de la manière suivante : la section 2 détaille la formulation du problème de maximisation de la capacité du système sur un *Time Transmit Interval* (TTI), et présente deux approches de résolution, une exacte mais nécessitant de longs calculs et une méthode approchée réduisant les symétries du problème afin d'accélérer la résolution. Ensuite, la section 3 présente l'extension de cette formulation à la maximisation de l'équité proportionnelle (PF), en prenant cette fois en compte la dimension temporelle. De manière similaire, deux méthodes de résolution sont proposées et discutées. Enfin, en section 4 nous présenterons les résultats de la résolution numérique des problèmes d'optimisation précédemment formulés. Ces travaux ont été présentés dans [150, 151] pour la section 2 et dans [152] pour la section 3.

1.2 Récapitulatif des hypothèses systèmes

Les systèmes satellitaires sont très complexes, et avec un très grand nombre de contraintes, rendant toute étude globale très laborieuse. Afin de placer un cadre fixe d'étude simple et isolant les problèmes propres à la voie retour et aux interférences, nous avons choisi de prendre un certain nombre d'hypothèses simplificatrices. Cette section propose un récapitulatif du système et des hypothèses considérées.

Le système considéré est composé d'un satellite GEO multifaisceau, transparent, utilisant deux polarisations orthogonales. Il offre un accès à Internet fixe à des utilisateurs fixes, qui communiquent uniquement avec la gateway (topologie en étoile) virtuelle et centralisée, en charge de la gestion des ressources. Nous ne considérons que la gestion des ressources

passant par l'accès sans contention, avec requêtes de ressources via le mécanisme DAMA. L'ensemble des hypothèses du système considéré sont rassemblées ci-dessous :

1. Gestion des ressources

[H-RRM1] La puissance d'émission des terminaux utilisateurs est fixe et identique pour tous les utilisateurs et aucun contrôle de puissance n'est effectué. Cette hypothèse est simplificatrice, mais ne change que les données du problème, pas son analyse.

[H-RRM2] Les ressources spectrales ne sont composées que d'un seul type de super-trame MF-TDMA, constituée d'un seul type de BTU et de RB. Cela correspond à l'étude d'une seule des super-frames du système, à laquelle sont pré-affectés un ensemble fixe d'utilisateurs, et au cas le plus flexible de la configuration de la trame (granularité la plus fine).

[H-RRM3] Le choix du ModCod peut être dynamique et variable d'un RB à l'autre. C'est une possibilité offerte par le standard DVB-RCS2.

[H-RRM4] Pour alléger les notations et l'analyse, nous ne considérons qu'une seule des deux polarisations, la même analyse et résolution s'appliquant identiquement à la seconde polarisation.

2. Canal lien *user* :

[H-UL1] Une transmission est considérée comme réussie si et seulement si son SINR est supérieur au seuil de SINR pour un Taux d'Erreur Paquet (PER)¹ de 10^{-5} . C'est une hypothèse courante, et reflète assez bien le fait que la pente du taux d'erreur paquet en fonction du SINR est très forte [153].

[H-UL2] Le canal est considéré comme plat, c'est-à-dire que toutes les porteuses sont équivalentes. En pratique, l'atténuation dépend du canal (terme d'atténuation en espace libre), mais en bande Ka, la variation maximale d'une porteuse à l'autre est de l'ordre de 0.015 dB, et l'on considérera le pire cas pour toutes les porteuses. Par conséquent, $\forall c, c', G_k(i, c) = G_k(i, c')$ et $\mu_c = \mu_{c'}$, et dans la suite on n'indiquera plus la porteuse pour ces grandeurs : $G_k(i)$ et μ .

[H-UL3] Les gains sont considérés constants à l'échelle de temps observée. Les changements du canal sont en effet majoritairement liés aux changements climatiques, et ont une dynamique très lente (plusieurs minutes) par rapport à la durée de la période observée (de l'ordre de la seconde).

[H-UL4] Nous supposons de même que les conditions météorologiques sont les mêmes pour tous les terminaux (atténuation atmosphérique identique), peu

1. Attention, il ne s'agit pas ici de paquet au sens réseau, mais du point de vue couche physique, du bloc de ressource.

importe le faisceau. En réalité, il s'agit ici aussi d'une hypothèse simplificatrice n'ayant d'impact que sur les données.

[H-UL5] Les interférences faibles (canal adjacent, cross-polarisation, autres systèmes) sont considérées comme un bruit de densité spectrale de puissance constante.

3. Gestion des demandes :

[H-D1] Nous nous intéressons ici seulement à l'affectation des ressources, et pas à la gestion des demandes. On supposera donc qu'une entité en amont gère les demandes (on l'appellera gestionnaire DAMA). Nous ne considérerons donc que les utilisateurs "actifs", c'est-à-dire ceux auxquels le gestionnaire DAMA accepte d'allouer des ressources. De plus, nous supposons qu'aucune arrivée/départ n'a lieu durant la période considérée, et la demande des utilisateurs largement supérieure à ce qu'il est possible de leur allouer sur la période considérée. C'est une hypothèse courante dans la littérature (ex. [140]).

4. Autres portions du système :

[H-SYS1] Les terminaux considérés sont destinés à un usage par des particuliers, donc assez simples et peu coûteux, et nous supposons qu'ils ne disposent que d'une seule chaîne de transmission.

[H-SYS2] Pas d'interférences sur le lien *feeder*. C'est une hypothèse raisonnable puisque les antennes sur ces faisceaux sont très directives et les gateways éloignées les unes des autres.

[H-SYS3] Nous supposons le bilan de liaison sur le lien *feeder* constant et identique pour tous les faisceaux *feeder*. C'est une des hypothèses simplificatrices fortes du système considéré : pour avoir un système plus réaliste, il faudrait prendre en compte le bilan de liaison complet lien *user* et lien *feeder*. Cependant, le routage des faisceaux à bord et la gestion des ressources sur le lien *feeder* sont des sujets de recherche actifs [154, 155] et méritent une étude beaucoup plus approfondie. Cela dit, la gestion des ressources du lien *feeder* et celle des ressources du lien *user* se font à des échelles de temps différentes, et considérer que les ressources du lien *feeder* ne changent pas sur l'intervalle de temps considéré l'allocation de ressources du lien *user* est une hypothèse tout à fait raisonnable.

[H-SYS4] Le réseau de cœur est supposé non-limitant, que ce soit en termes de débit ou de délai. Cela revient à disposer d'un réseau de cœur dédié, ce qui est parfaitement envisageable.

[H-SYS5] Charge utile idéale (routage des faisceaux, bande passante uplink =

Symbole	Description
$N_B / N_U / N_C$	Nombre de faisceaux ¹ / d'utilisateurs ¹ / de porteuses ¹
k / i ou j / c	Indice de faisceau / d'utilisateur / de porteuse
$\mathcal{U} / \mathcal{U}_k$	Ensemble des utilisateurs du système / du faisceau k
t / N_{tti}	Indice de l'instant de transmission (TTI) / Nombre de TTIs
m / \mathcal{M}	Indice de ModCod / Ensemble des ModCods
r_m	Débit du ModCod m
r_i	Débit moyen de l'utilisateur i
$r_{t,i}$	Débit alloué à l'utilisateur i à l'instant t
γ_m	SINR seuil du ModCod m pour un PER de 10^{-5}
P_i	Puissance d'émission de l'utilisateur i
$G_k(i)$	Gain pour l'utilisateur i en réception sur l'antenne du faisceau k
μ	Terme constant (Bruit + interférences de second ordre)
BW	Largeur de bande d'une porteuse
\mathcal{I}_c	Ensemble des utilisateurs utilisant la porteuse c (à un instant donné)
x_{im}^{kc}	Variable d'affectation
\mathcal{S}_c	Ensemble d'utilisateurs affectés sur la porteuse c .
$\boldsymbol{\theta} / \theta_t$	Vecteur des débits moyens asymptotiques / à l'instant t
$\theta_i / \theta_{t,i}$	Débit moyen de l'utilisateur i asymptotique / à l'instant t

¹ Pour la polarisation considérée uniquement

TABLE 4.1 Notations utilisées dans ce manuscrit.

bande passante downlink, puissance totale suffisante). Hypothèse dépendant fortement du matériel utilisé et des compromis effectués par l'équipementier.

2 Problème de maximisation du débit du système

Dans un premier temps, nous allons nous intéresser au problème de maximisation du débit du système (aussi appelé capacité du système), sans prendre en compte l'équité entre les utilisateurs. Les solutions fournies par cette formulation ne sont donc probablement pas souhaitables en pratique, ou en tout cas pas sans un autre mécanisme d'équité (par exemple effectué par le gestionnaire DAMA). Dans ce cadre précis, il est important de remarquer que la dimension temporelle n'a aucun impact : étant donné que les demandes sont infinies, et qu'aucune contrainte n'empêche d'affecter systématiquement les ressources aux mêmes utilisateurs, trouver la combinaison d'utilisateurs qui maximise le débit du système sur un TTI donne directement la capacité du système. Le problème se ramène donc à la maximisation de la capacité sur un TTI.

Dans cette section, donc, nous ne considérerons pas d'aspect temporel. Si les ressources d'un TTI sont insuffisantes pour servir tous les utilisateurs, certains utilisateurs ne seront jamais servis.

2.1 Formulation du problème

Le problème que nous cherchons à modéliser est l'affectation des RBs et d'un ModCod aux utilisateurs. Cette affectation peut être vue comme une décision binaire : on associe le RB (t, c) du faisceau k à un utilisateur i pour qu'il transmette sur ce RB avec le ModCod m ou pas. Cette décision sera représentée par la variable binaire $x_{im}^{kc} \in \{0, 1\}^2$.

Nous allons formuler le problème comme un problème linéaire en nombres entiers (et plus précisément à variables binaires), c'est-à-dire le mettre sous la forme générale suivante [156] :

$$\text{Maximiser}_{\mathbf{x}} \quad f(\mathbf{x}) \quad (4.1a)$$

$$\text{s.t.} \quad \mathbf{Ax} \leq \mathbf{b} \quad (4.1b)$$

$$\mathbf{x} \in \{0, 1\}^N \quad (4.1c)$$

où \mathbf{A} et \mathbf{b} sont des matrices représentant les contraintes, f une fonction linéaire, \mathbf{x} un vecteur de variables binaires de dimension N . Cela revient à formuler chaque contrainte p du problème individuellement sous une forme linéaire : $\sum_{n=1}^N a_{np}x_n \leq b_p$, où les a_{np} sont les coefficients de la matrice de contraintes \mathbf{A} .

2.1.1 Expression des contraintes structurelles

De par la définition des variables x_{im}^{kc} , il est nécessaire d'ajouter deux contraintes, régissant l'affectation du RB (t, c) du faisceau k :

1. Pour un utilisateur donné, il n'est possible d'avoir qu'un seul ModCod sélectionné. Soit, avec les notations du tableau 4.1 :

$$\forall c, \forall k, \forall i \in \mathcal{U}_k, \quad \sum_m x_{im}^{kc} \leq 1 \quad (4.2)$$

Cette formulation de la contrainte n'est valable que parce que nous travaillons ici uniquement avec des variables binaires.

2. De plus, l'affectation d'un RB est exclusive, donc nous avons la contrainte suivante :

$$\forall c, \forall k, \quad \sum_{i \in \mathcal{U}_k} \sum_m x_{im}^{kc} \leq 1 \quad (4.3)$$

2. Le temps n'est pas indiqué ici car nous ne considérons qu'un seul TTI, et cela alourdirait des notations déjà assez chargées.

Il est possible de remarquer que cette dernière contrainte contient la précédente, aussi nous ne considérerons que celle-là dans la suite.

À cela se rajoute une série de contraintes provenant du système étudié. Tout d'abord, les terminaux sont affectés de manière statique à un faisceau, et n'ont donc accès qu'aux ressources de ce faisceau. Par conséquent, les variables d'affectation des RBs d'un faisceau doivent être nulles pour les utilisateurs n'appartenant pas au faisceau :

$$\forall c, \forall k, \forall i \notin \mathcal{U}_k, \forall m, \quad x_{im}^{kc} = 0 \quad (4.4)$$

En pratique, pour éviter de définir des variable inutilisées, nous ne définirons les variables x_{im}^{kc} que pour les cas où l'utilisateur i appartient au faisceau k .

Ensuite, notre hypothèse [H-SYS1] indique que les terminaux ne disposent que d'une seule chaîne de transmission. Cela signifie qu'ils ne peuvent émettre que sur une seule porteuse à la fois. Ainsi :

$$\forall k, \forall i \in \mathcal{U}_k, \quad \sum_c \sum_m x_{im}^{kc} \leq 1 \quad (4.5)$$

Toutes ces contraintes sont naturellement linéaires et ne posent donc aucun problème.

2.1.2 Expression et linéarisation des contraintes d'interférence

Enfin, l'hypothèse [H-UL1] de ce chapitre impose que pour qu'une transmission soit réussie, le SINR du RB doit être supérieur au seuil du ModCod. Cela se traduit par :

$$\forall c, \forall k, \forall i \in \mathcal{U}_k, \forall m, \quad x_{im}^{kc} = 1 \quad \Rightarrow \quad SINR_i^k(c) \geq \gamma_m \quad (4.6)$$

En intégrant la définition du SINR donnée en équation 2.4 (plus l'hypothèse [H-UL2] qui indique que les gains ne dépendent pas du canal), nous obtenons :

$$\forall c, \forall k, \forall i \in \mathcal{U}_k, \forall m, \quad x_{im}^{kc} = 1 \quad \Rightarrow \quad \frac{P_i G_k(i)}{\mu + \sum_{\substack{j \in \mathcal{I}_c \\ j \neq i}} P_j G_k(j)} \geq \gamma_m \quad (4.7)$$

Dans cette équation, il reste à identifier plus formellement les utilisateurs $j \in \mathcal{I}_c$ utilisant simultanément la même porteuse c . Pour cela, il faut remarquer qu'il n'y a qu'un utilisateur par faisceau qui engendre de l'interférence (comme déjà précisé par l'équation 4.3), et que par conséquent, si j^* est l'utilisateur choisi par le faisceau k' pour transmettre avec le

ModCod m^* sur la même porteuse ($x_{j^*m^*}^{k'c} = 1$), nous avons :

$$G_k(j^*)P_{j^*} = \sum_{j \in \mathcal{U}_{k'}} \sum_{m'} x_{jm'}^{k'c} P_j G_k(j) \quad (4.8)$$

tous les autres $x_{jm'}^{k'c}$ étant nuls. Nous obtenons donc, en intégrant cette égalité dans l'équation 4.7 et en linéarisant le SINR :

$$\forall c, \forall k, \forall i \in \mathcal{U}_k, \forall m, \quad x_{im}^{kc} = 1 \quad \Rightarrow \quad \frac{P_i G_k(i)}{\gamma_m} \geq \mu + \sum_{\substack{k' \neq k \\ j \in \mathcal{U}_{k'}}} \sum_{m'} x_{jm'}^{k'c} P_j G_k(j) \quad (4.9)$$

En l'état, cette contrainte n'est pas linéaire puisqu'elle contient une implication, mais il est possible d'utiliser une astuce de modélisation classique qui consiste à définir un entier B suffisamment grand et à reformuler la contrainte comme suit :

$$\forall c, \forall k, \forall i \in \mathcal{U}_k, \forall m, \quad \frac{P_i G_k(i)}{\gamma_m} \geq \mu + \sum_{\substack{k' \neq k \\ j \in \mathcal{U}_{k'}}} \sum_{m'} x_{jm'}^{k'c} P_j G_k(j) + (x_{im}^{kc} - 1)B \quad (4.10)$$

De cette manière, lorsque $x_{im}^{kc} = 1$, $(x_{im}^{kc} - 1)B = 0$ et cette contrainte est effectivement équivalente à l'équation 4.9, et lorsqu'au contraire $x_{im}^{kc} = 0$, la contrainte est vérifiée, peu importe la valeur des $x_{jm'}^{k'c}$.

2.1.3 Expression de la fonction objectif : maximisation de la capacité

L'objectif du problème que nous formulons ici est de maximiser le débit du système, ce qui s'exprime dans le cadre où les débits sont discrétisés par la définition de la fonction f :

$$f(\mathbf{x}) = \sum_{k, i \in \mathcal{U}_k} \sum_{c, m} x_{im}^{kc} r_m \quad (4.11)$$

où \mathbf{x} représente le vecteur des variables x_{im}^{kc} .

2.1.4 Problème complet

Le problème de l'affectation des RBs et ModCods aux utilisateurs, que nous nommerons **TSO-CAPA**, se pose donc sous la forme :

Problème TSO-CAPA :

$$\text{Maximiser}_{\mathbf{x}} \quad \sum_{k,i \in \mathcal{U}_k} \sum_{c,m} x_{im}^{kc} r_m \quad (4.12a)$$

s.t.

$$\forall c, \forall k \quad \sum_{i \in \mathcal{U}_k} \sum_m x_{im}^{kc} \leq 1 \quad (4.12b)$$

$$\forall k, \forall i \in \mathcal{U}_k \quad \sum_c \sum_m x_{im}^{kc} \leq 1 \quad (4.12c)$$

$$\forall c, \forall k, \forall i \in \mathcal{U}_k, \forall m \quad \frac{P_i G_k(i)}{\gamma_m} \geq \mu + \sum_{\substack{k' \neq k \\ j \in \mathcal{U}_{k'}}} \sum_{m'} x_{jm'}^{k'c} P_j G_k(j) + (x_{im}^{kc} - 1)B \quad (4.12d)$$

$$\forall c, \forall k, \forall i \in \mathcal{U}, \forall m \quad \begin{cases} x_{im}^{kc} \in \{0, 1\} & \text{si } i \in \mathcal{U}_k \\ x_{im}^{kc} = 0 & \text{sinon} \end{cases} \quad (4.12e)$$

Notons qu'il est aussi possible, pour réduire le nombre de contraintes de regrouper toutes les contraintes 4.12d d'un RB pour un faisceau en une seule (notamment grâce à la présence des contraintes 4.12b, plus de détails en annexe A) :

$$\sum_{i,m} x_{im}^{kc} \frac{P_i G_k(i)}{\gamma_m} \geq \mu + \sum_{\substack{k' \neq k \\ j \in \mathcal{U}_{k'}}} \sum_{m'} x_{jm'}^{k'c} P_j G_k(j) + \left(\sum_{i,m} x_{im}^{kc} - 1 \right) B \quad (4.13)$$

Remarque 7. Commentaires sur la discrétisation des débits. Dans notre formulation, nous avons fait le choix d'utiliser une définition discrétisée du débit, ou les seules valeurs possibles sont les débits des ModCods. C'est un choix réfléchi qui est loin de faire l'unanimité dans la littérature, en particulier dans le contexte du satellite.

De nombreux travaux utilisent une définition continue du débit correspondant à la capacité de Shannon : $r_i = BW \log_2(1 + \text{SINR}_i)$. C'est d'ailleurs le cas des autres travaux traitant la voie retour [44, 45, 63, 104]. Cette définition du débit a l'avantage d'être indépendante du standard, et réduit le nombre de variables. En revanche, elle rend le problème non linéaire (donc plus complexe), et encourage une affectation des RBs qui vise à augmenter le SINR des utilisateurs, même si le gain de SINR ne permet pas l'utilisation d'un ModCod plus efficace.

L'utilisation d'un débit discrétisé permet au contraire de ne donner une utilité plus forte qu'aux affectations permettant l'utilisation d'un meilleur ModCod. Cette pratique,

	c=2								c=2							
	k=1				k=2				k=1				k=2			
	i=1	i=2	i=3	i=4	i=1	i=2	i=3	i=4	i=1	i=2	i=3	i=4	i=1	i=2	i=3	i=4
	m=1	m=2	m=1	m=2	m=1	m=2	m=1	m=2	m=1	m=2	m=1	m=2	m=1	m=2	m=1	m=2
contrainte USER i=1,k=1	■	■							■	■						
contrainte USER i=1,k=1		■	■							■	■					
contrainte USER i=1,k=1			■	■							■	■				
contrainte USER i=1,k=1				■	■								■	■		
contrainte RB k=1,c=1	■	■	■	■	■	■	■	■								
contrainte RB k=2,c=1																
contrainte SINR k=1,c=1	■	■	■	■	■	■	■	■								
contrainte SINR k=2,c=1																
contrainte RB k=1,c=2									■	■	■	■	■	■	■	■
contrainte RB k=1,c=2																
contrainte SINR k=1,c=2									■	■	■	■	■	■	■	■
contrainte SINR k=2,c=2																

} contraintes liantes

FIGURE 4.1 Structure de la matrice de contraintes du problème **TSO-CAPA**. Les coefficients non nuls sont représentés par un rectangle bleu, et les coefficients correspondant aux variables x_{im}^{kc} nécessairement nulles ne sont pas représentés.

qui pour cette thèse est inspirée de López-Peréz *et al.* [107], est plus populaire dans la littérature cellulaire terrestre [99, 100, 124].

D'autres méthodes de modélisation du débit ont aussi été proposées (discrétisation incrémentale [30], fonction linéaire par morceaux [157], ou encore utilisation d'une fonction de débit continue non linéaire) pour différents besoins, mais ne s'adaptent pas bien à notre cas, ou bien conduisent à des résultats équivalents.

2.2 Réduction des symétries du problème

Le problème défini précédemment est un problème linéaire à variables binaires, ce qui est un des cas les plus favorables de l'optimisation combinatoire. Cependant, la résolution de problèmes de cette classe reste assez longue en pratique. Dans cette sous-section, nous allons d'abord analyser la structure du problème, afin d'en exploiter les symétries pour définir une méthode de résolution approchée plus efficace.

2.2.1 Analyse de la structure du problème

Le problème **TSO-CAPA** est composé de $N_{var}(\mathbf{TSO}) = N_{MCS}N_CN_U$ variables binaires non-nulles, engendrant un espace de solution de taille $2^{N_{var}(\mathbf{TSO})}$, et $N_{cstr}(\mathbf{TSO}) = N_CN_B + N_U + 2 \times N_CN_UN_{MCS}$ contraintes linéaires³, ce qui est assez important surtout au vu de la taille du problème (allant jusqu'à une centaine de faisceaux, potentiellement des centaines d'utilisateurs par faisceau, quelques dizaines de porteuses et de ModCod).

3. $N_{cstr}(\mathbf{TSO}) = 2 \times N_CN_B + N_U + N_CN_UN_{MCS}$ en utilisant les contraintes 4.13.

La matrice des contraintes (la matrice \mathbf{A} dans la forme générale en équation 4.1) a une structure un peu particulière, illustrée sur la figure 4.1, avec des blocs linéairement indépendants de contraintes propres aux porteuses, et des contraintes liant les porteuses (les contraintes 4.12c). Sans ces dernières contraintes, le problème pourrait se décomposer en N_C sous-problèmes indépendants pouvant donc être résolus indépendamment, ce qui réduirait grandement la complexité du problème. De plus, cette formulation a une symétrie structurelle par rapport aux porteuses : ce qui a un impact sur la valeur de l'objectif c'est l'ensemble des utilisateurs qui interfèrent en utilisant le même RB, et pas le RB auquel cet ensemble d'utilisateurs est affecté. Les porteuses sont donc permutables sans modification de la valeur de l'objectif, ce qui signifie que l'espace de recherche est $N_C!$ fois plus grand que nécessaire.

Cela étant dit, comme nous ne cherchons ici qu'à obtenir une borne supérieure de la capacité, la méthode et les performances temporelles de la résolution du problème ne sont pas primordiales et l'on peut se contenter de fournir le problème à un solveur générique, comme **Gurobi**. Cependant, en pratique les temps de résolution sont très importants et il devient très rapidement impossible de résoudre le problème global **TSO-CAPA** en un temps raisonnable, justifiant d'essayer de réduire les symétries du problèmes.

2.2.2 Décomposition du problème pour une résolution approchée

Pour pallier la difficulté de la grande taille du problème et de son grand nombre de symétries, nous avons proposé une méthode de résolution approchée⁴, conjecturant que la perte d'optimalité serait faible. Cette méthode consiste à traiter le problème non pas globalement sur toutes les porteuses conjointement, mais en résolvant le problème d'affectation porteuse par porteuse, en s'assurant que la contrainte 4.12c (qui limite un utilisateur à l'utilisation d'une seule porteuse par TTI) est respectée. Pour cela, nous résolvons le problème, appelé **RBO-CAPA**, d'affectation de chaque porteuse séparément et séquentiellement et en ne considérant que les utilisateurs qui n'ont pas encore reçu d'affectation sur les porteuses précédentes, comme illustré en figure 4.2.

Le problème résolu à chaque étape est une version simplifiée mais très proche du problème global :

4. Une approche exacte a aussi été envisagée, avec l'utilisation de génération de colonnes, mais abandonnée car très complexe à mettre en place.

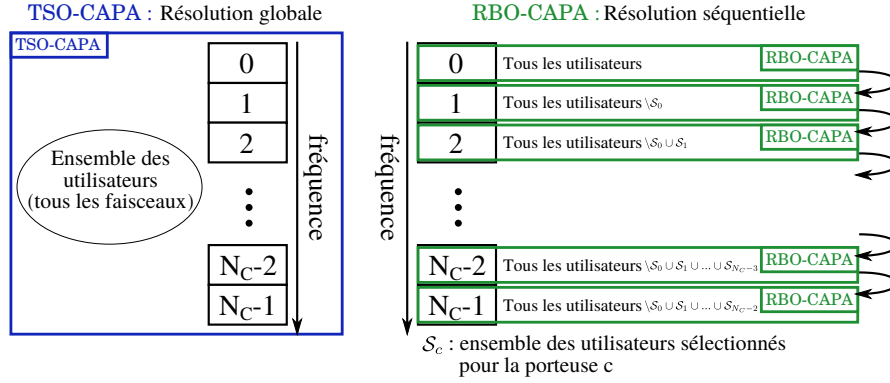


FIGURE 4.2 Traitement global ou séquentiel.

Problème RBO-CAPA pour la porteuse c :

$$\text{Maximiser}_{\mathbf{x}} \sum_{k,i \in \mathcal{U}_k^*} \sum_m x_{im}^{kc} r_m \quad (4.14a)$$

s.t.

$$\forall k \quad \sum_{i \in \mathcal{U}_k^*} \sum_m x_{im}^{kc} \leq 1 \quad (4.14b)$$

$$\forall k, \forall i \in \mathcal{U}_k^*, \forall m \quad \frac{P_i G_k(i)}{\gamma_m} \geq \mu + \sum_{\substack{k' \neq k \\ j \in \mathcal{U}_{k'}^*}} \sum_{m'} x_{jm'}^{k'c} P_j G_k(j) + (x_{im}^{kc} - 1)B \quad (4.14c)$$

$$\forall k, \forall i \in \mathcal{U}^*, \forall m \quad \begin{cases} x_{im}^{kc} \in \{0, 1\} & \text{si } i \in \mathcal{U}_k^* \\ x_{im}^{kc} = 0 & \text{sinon} \end{cases} \quad (4.14d)$$

où \mathcal{U}_k^* (resp. \mathcal{U}^*) est l'ensemble \mathcal{U}_k (resp. \mathcal{U}) privé des utilisateurs ayant déjà reçu une affectation sur les porteuses précédentes.

Ce nouveau sous-problème, **RBO-CAPA** comporte $N_{var}(\mathbf{RBO-CAPA}) = N_U N_{MCS}$ variables (N_C fois moins que précédemment), et $N_{cstr}(\mathbf{RBO-CAPA}) = N_B + 2 \times N_U N_{MCS}$ contraintes.

3 Recherche de l'allocation PF maximale

Dans la section précédente, nous nous sommes intéressés à la recherche du débit maximal atteignable par le système considéré. Ce débit maximal est simplement une borne supérieure de l'allocation, mais ne propose pas une solution souhaitable pour le système, c'est-à-dire une solution qui soit équitable entre les utilisateurs.

Au vu de la section 4 du chapitre 3, notre choix de métrique d'équité s'est porté

sur l'équité proportionnelle (PF), qui représente un bon compromis entre équité pure et augmentation du débit total du système. Maximiser cette métrique d'équité est équivalent à maximiser la moyenne géométrique des débits moyens [139], ou encore à maximiser la somme des logarithmes des débits moyens.

En pratique, le problème de la définition de l'intervalle de temps considéré se pose : cherche-t-on à maximiser la métrique PF sur une trame, deux trames, plus ou alors de manière asymptotique ? En effet, la maximisation sur une durée donnée est fondamentalement différente de la maximisation asymptotique : dans le premier cas cela revient à considérer un problème fini, et dans l'autre il s'agit d'un problème sur un intervalle infini seulement abordable avec une approche de proche en proche.

C'est généralement la seconde option qui est choisie dans la littérature et qui a également été préférée ici. Dans le monde cellulaire terrestre cela se justifie d'autant plus que les gains des utilisateurs sont variables dans le temps [100, 114, 140, 146], ce qui permet de faire de l'ordonnancement opportuniste (on affecte les ressources aux utilisateurs ayant les meilleures conditions de transmission), mais cette option a aussi été choisie en satellite [158, 159]. Nous allons nous efforcer d'en détailler ici le raisonnement :

L'objectif final est la maximisation de la fonction d'utilité du système, définie comme la somme des logarithmes des débits moyens θ_i des utilisateurs :

$$\underset{\boldsymbol{\theta}=(\theta_i)_{i \in \mathcal{U}}}{\text{Maximiser}} \quad U(\boldsymbol{\theta}) = \sum_{i \in \mathcal{U}} \log(\theta_i + \delta_i) \quad (4.15)$$

où $\delta_i > 0$ est un réel positif aussi petit que l'on veut, qui permet d'éviter les divisions par zéro à l'initialisation, sans affecter aucunement le raisonnement, comme proposé dans [140]. À un instant t , avec la seule connaissance de l'état présent du canal et du débit moyen des utilisateurs à l'instant t , on ne peut que chercher à maximiser l'augmentation de la fonction objectif globale, c'est-à-dire maximiser :

$$\begin{aligned} U(\boldsymbol{\theta}_{t+1}) - U(\boldsymbol{\theta}_t) &= \sum_{i \in \mathcal{U}} \left(\log(\theta_{t+1,i} + \delta_i) - \log(\theta_{t,i} + \delta_i) \right) \\ &= \sum_{i \in \mathcal{U}} \log \left(\frac{\theta_{t+1,i} + \delta_i}{\theta_{t,i} + \delta_i} \right) \end{aligned} \quad (4.16)$$

Or, il est possible d'exprimer le débit moyen par récurrence :

$$\theta_{t+1,i} = \theta_{t,i} + \frac{1}{t+1} (r_{t+1,i} - \theta_{t,i}) \quad (4.17)$$

où $r_{t+1,i}$ est le débit alloué à l'instant $t+1$ à l'utilisateur i (i.e. le débit du ModCod retenu

sur un des RB du TTI concerné si l'utilisateur est choisi, et 0 sinon). En remplaçant $\theta_{t+1,i}$ par cette expression dans 4.16, nous obtenons :

$$\begin{aligned} U(\boldsymbol{\theta}_{t+1}) - U(\boldsymbol{\theta}_t) &= \sum_{i \in \mathcal{U}} \log \left(\frac{\theta_{t,i} + \frac{1}{t+1}(r_{t+1,i} - \theta_{t,i}) + \delta_i}{\theta_{t,i} + \delta_i} \right) \\ &= \sum_{i \in \mathcal{U}} \log \left(1 + \frac{1}{t+1} \frac{r_{t+1,i} - \theta_{t,i}}{\theta_{t,i} + \delta_i} \right) \end{aligned} \quad (4.18)$$

Or, $\frac{1}{t+1}$ tend très rapidement vers 0 et $\frac{r_{t+1,i} + \theta_{t,i}}{\theta_{t,i} + \delta_i}$ est borné dans $\llbracket 0, \max_m(r_m) \rrbracket$, et pour de petites valeurs de x , $\log(1+x) = x + \mathcal{O}(x^2)$. Cela nous donne donc :

$$U(\boldsymbol{\theta}_{t+1}) - U(\boldsymbol{\theta}_t) \approx \sum_{i \in \mathcal{U}} \frac{1}{t+1} \frac{r_{t+1,i} + \theta_{t,i}}{\theta_{t,i} + \delta_i} \quad (4.19)$$

Maximiser cette expression à l'instant $t+1$ est équivalent, en retirant les facteurs et termes constants, à maximiser :

$$\sum_{i \in \mathcal{U}} \frac{r_{t+1,i}}{\theta_{t,i} + \delta_i} \quad (4.20)$$

Nous obtenons finalement une nouvelle fonction objectif, linéaire en fonction des $r_{t+1,i}$, qu'il va être possible d'intégrer avec les contraintes du système pour formuler le problème de l'allocation optimale, avec la métrique PF.

3.1 Formulation du problème global

En revenant au formalisme de la partie précédente, $r_{t+1,i}$ est le débit alloué à l'utilisateur i pour le TTI considéré, donc :

$$r_{t+1,i} = \sum_{c,m} x_{im}^{kc}(t+1)r_m \quad (4.21)$$

où $x_{im}^{kc}(t+1)$ est la variable d'affectation du RB $(t+1, c)$, que pour alléger les notations nous noterons x_{im}^{kc} , le TTI concerné étant supposé connu. Le problème de recherche de l'allocation PF-optimale revient donc à résoudre le problème suivant ⁵ :

5. On peut remarquer l'absence du facteur $t+1$ de l'équation 4.21 dans l'objectif du problème, qui est un facteur constant, donc non essentiel à la définition du problème.

Problème TSO-PF à l'instant $t + 1$:

$$\text{Maximiser}_{\mathbf{x}} \quad \sum_{k,i \in \mathcal{U}_k} \sum_{c,m} x_{im}^{kc} \frac{r_m}{\theta_{t,i} + \delta_i} \quad (4.22a)$$

Sous les contraintes 4.12b, 4.12c, 4.12d et 4.12e.

(mêmes contraintes que **TSO-CAPA**)

On peut remarquer que pour un instant t donné, ce problème est une version pondérée du problème **TSO-CAPA** défini précédemment. Et de la même manière que nous avons défini **RBO-CAPA** en proposant une décomposition par porteuse, nous définissons **RBO-PF** comme la décomposition de **TSO-PF** par porteuse. Plus formellement, pour chaque porteuse c , on définit le problème suivant :

Problème RBO-PF pour la porteuse c , à l'instant $t + 1$:

$$\text{Maximiser}_{\mathbf{x}} \quad \sum_{k,i \in \mathcal{U}_k^*} \sum_m x_{im}^{kc} \frac{r_m}{\theta_{t,i} + \delta_i} \quad (4.23a)$$

Sous les contraintes 4.14b, 4.14c et 4.14d.

(mêmes contraintes que **RBO-CAPA**)

4 Résultats

4.1 Environnement d'évaluation de performances

Pour les besoins de cette thèse nous avons créé un programme nous permettant de modéliser simplement les systèmes considérés sous différents schémas de réutilisation de fréquences, et avec toute une variété de techniques de gestion des ressources. Disposer d'une grande liberté dans la définition du scénario (placement et organisation des faisceaux, placement des utilisateurs, choix d'un schéma de coloration, définition de schémas de coloration non standards, polarisation, approches globales ou de proche en proche de la gestion des ressources, interfaçage avec des solveurs divers) a été notre principale contrainte dans le choix d'un environnement de test. Parmi les des simulateurs actuellement disponibles pour des systèmes satellite, seul SNS3 [160] contient une implantation du DVB-RCS2 et permet de gestion de l'allocation au niveau du bloc de ressource, mais ne permet pas de modifier le plan d'allocation des fréquences, ni de faire de l'allocation de ressources prenant en compte les interférences.

Pour ces raisons nous avons choisi de développer notre propre simulateur, ce qui nous a donné une grande liberté dans la définition des scénarios. Cet environnement de simulation est programmé en python, de manière modulaire pour permettre de changer

chaque partie du gestionnaire de ressources radio (par exemple schéma de coloration, algorithmes d'ordonnancement, granularité de l'allocation de ressources ou degré de coordination) très facilement. C'est avec ce simulateur que nous avons effectués tous les tests décrits dans ce manuscrit.

4.2 Récapitulatif des problèmes définis

Dans les deux sections précédentes, nous avons défini quatre problèmes d'optimisation :

- **TSO-CAPA** : Recherche du débit maximum du système sur un TTI, c'est-à-dire la meilleure combinaison d'utilisateurs.
- **RBO-CAPA** : Version approchée de **TSO-CAPA**, avec un traitement séquentiel par porteuse.
- **TSO-PF** : Recherche de l'allocation PF-optimale, sur une durée indéterminée.
- **RBO-PF** : Version approchée de **TSO-PF**, avec un traitement séquentiel par porteuse.

Ce sont tous des problèmes en nombres entiers, linéaires qui se résolvent aisément à l'aide de solveurs génériques, comme **CPLEX** ou **Gurobi**. C'est sur ce dernier que s'est porté notre choix car il est reconnu comme très performant pour cette classe de problème, et qu'il offre une interface en python facilitant son intégration dans notre simulateur.

Dans cette section nous allons comparer les performances des solutions des différents problèmes définis précédemment. Pour cela, nous allons constituer un scénario simple pour les deux arrangements de faisceaux que nous étudions dans cette thèse (pavage carré et hexagonal). Afin de simplifier la présentation, l'analyse et la compréhension des résultats, nous allons nous concentrer dans un premier temps sur le pavage hexagonal et les résultats obtenus pour ce scénario. Puis dans un second temps nous verrons ceux pour le pavage carré, en mettant l'accent sur les différences avec le pavage hexagonal.

4.3 Résultats pour un pavage hexagonal des faisceaux

4.3.1 Définition du scénario

Nous considérons le scénario représenté en figure 4.3, avec un nombre d'utilisateurs par faisceau variable. Ces derniers sont placés aléatoirement, de manière uniforme et avec une répartition égale entre les faisceaux (échantillonnage avec rejets pour placer le même nombre d'utilisateurs par faisceau). Les données indiquées dans le tableau 4.2 sont celles utilisées pour modéliser le système et les caractéristiques du canal.

Tout ce que nous avons présenté dans cette partie n'est pas du tout spécifique à un schéma de réutilisation des fréquences précis, et il est ainsi possible de définir les

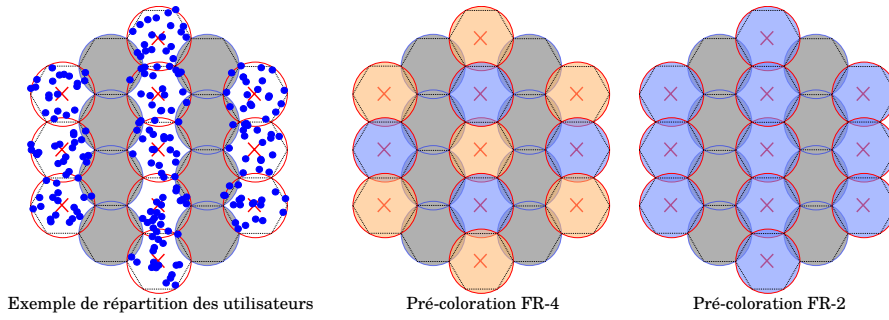


FIGURE 4.3 Scénario et pré-colorations considérées pour le pavage hexagonal (une seule polarisation).

mêmes problèmes d'optimisation pour n'importe quel schéma de coloration, qu'on dira de pré-coloration, puisque l'affectation réelle des porteuses n'est faite qu'après la résolution du problème d'optimisation. Nous ferons donc référence au schéma de pré-coloration utilisé en ajoutant le nombre de couleurs à la fin du nom du problème (ex : **TSO-CAPA-4** pour un schéma 4 couleurs, et **TSO-CAPA-2** pour celui à deux couleurs qui nous intéresse principalement ici). Considérer ces deux schémas de pré-coloration nous permettra de calculer les gains par rapport à un schéma plus conservateur (FR-4) que l'on peut espérer obtenir en utilisant un schéma plus agressif (FR-2) et un ordonnancement conjoint optimal.

Bilan de liaison			
Ouverture faisceau θ_{3dB}	0.27 deg	Gain max satellite	50.5 dBi
Puissance terminal	1 W	Gain max terminal	20.9 dBi
Fréquence f_c	Ka (29.5 GHz)	Taille de porteuse	10 MHz
Roll-off	0.2	Taille BTU	1616 symboles
μ	-134 dB		
Paramètres du scénario			
$N_U(k)$	variable : 4 \rightarrow 16	N_C	8 (par polarisation)
N_B	11 (1 polar.)	N_{tti}	50 (-PF uniquement)
ModCod considérés	13, 17, 19, 20, 22 (cf. tableau 2.1)		
Paramètres d'optimisation			
B	100	Tolérance d'optimalité	0.05
Matériel	Intel Core i7-4790 (3.60 GHz), 16 GB RAM		

TABLE 4.2 Données utilisées pour les tests

4.3.2 Gains par rapport au schéma FR-4

La résolution des problèmes formulés dans la section précédente nous donne une affectation des RBs et ModCods aux utilisateurs, ce qui nous permet de calculer le débit total du système, et les débits moyens des utilisateurs. Ces résultats sont représentés pour

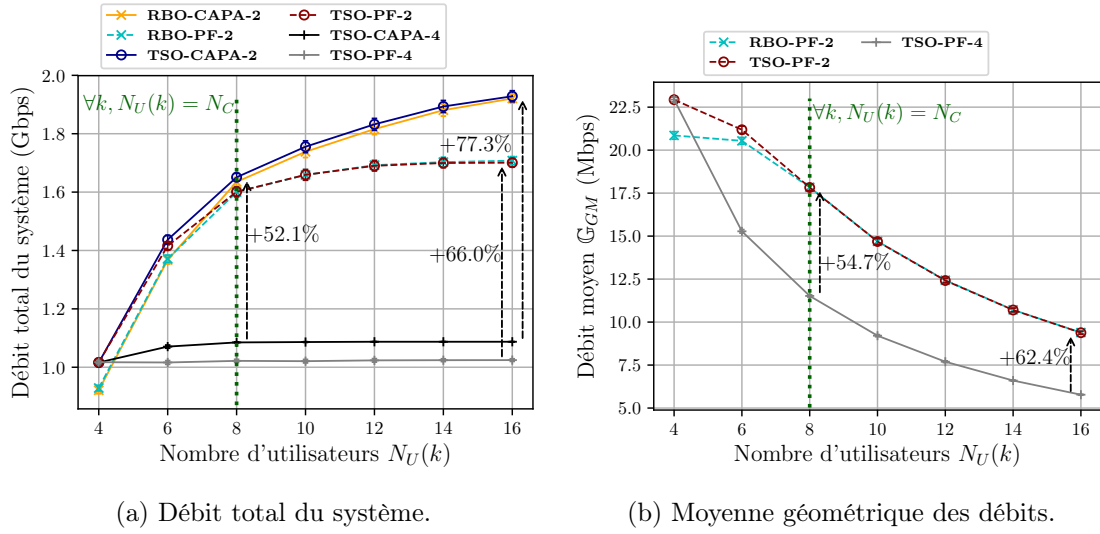


FIGURE 4.4 Résultats en débit total du système et moyenne géométrique des débits utilisateurs pour le pavage hexagonal, avec un nombre variable d'utilisateurs et un nombre de porteuses constant. Les intervalles de confiance à 95% sont également représentés pour chaque point.

toutes les formulations et pour les deux pré-colorations sur la figure 4.4a pour le débit du système, et sur la figure 4.4b pour la moyenne géométrique des débits des utilisateurs.

De nombreuses informations sont données sur ces deux figures, et nous allons commencer par ne regarder que les résolutions exactes (**TSO-PF** et **TSO-CAPA**), afin de quantifier les gains que l'on peut obtenir en augmentant le taux de réutilisation de fréquences. Le premier constat est que les gains varient du simple au double en fonction du nombre d'utilisateurs dans le système.

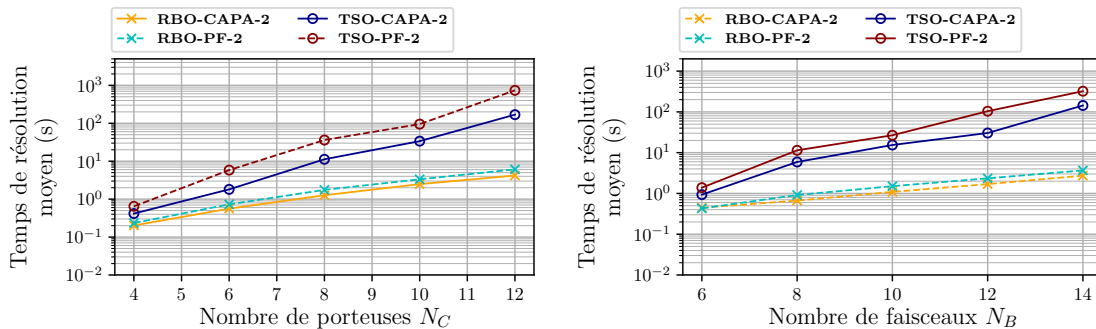
- Pour $N_U(k) \leq N_C$ c'est attendu puisque le nombre de ressources est supérieur au nombre d'utilisateurs, et le schéma **FR-2** permet d'utiliser toutes les ressources, contrairement au **FR-4** qui ne peut plus allouer de ressources supplémentaires.
- Pour $N_U(k) > N_C$, cette croissance du débit total du système s'explique par le fait que la diversité spatiale augmente, laissant plus de possibilités de "bonnes" combinaisons d'utilisateurs. Ce gain de diversité spatiale est particulièrement fort pour le débit maximal du système obtenu par la résolution de **TSO-CAPA**, et un peu moins marqué pour **TSO-PF** qui doit servir tous les utilisateurs, et ne peut donc pas éviter des combinaisons d'utilisateurs moins efficaces. S'il est normal que la tendance soit inversée pour le débit moyen (figure 4.4b) qui diminue quand le nombre d'utilisateurs augmente, on retrouve le même phénomène dans le fait que

la diminution du débit moyen est de moins en moins forte.

La comparaison avec le schéma FR-4 montre que les gains offerts par un schéma FR-2 sont considérables, avec jusqu'à 80% de gain de débit maximal pour **TSO-CAPA** et un débit total du système qui peut atteindre jusqu'à +66% tout en restant équitable (au sens PF) dans l'allocation des ressources. Les gains en débit par utilisateur (moyenne géométrique) suivent sensiblement les mêmes tendances, ce qui semble indiquer que ces gains profitent à tous les utilisateurs.

4.3.3 Perte d'optimalité et passage à l'échelle

En plus des remarques précédentes, nous observons sur les courbes de la figure 4.4 que les méthodes de résolution approchées (**RBO-CAPA** et **RBO-PF**) donnent des résultats sensiblement équivalents. La perte d'optimalité est faible pour les deux formulations sauf pour des valeurs de $N_U(k) < N_C$ où la résolution par porteuse est trop gloutonne. En effet, cette méthode de résolution va chercher à maximiser l'utilité sur chaque porteuse, sans prendre en compte le fait qu'il y a plus de ressources que d'utilisateurs, et qu'il est donc plus intéressant dans ces cas de répartir les utilisateurs sur les différentes porteuses.



(a) Temps de résolution en fonction du nombre de porteuses ($N_C/N_U(k) = 1$). (b) Temps de résolution en fonction du nombre de faisceaux ($N_C = 12, N_U(k) = 20$).

FIGURE 4.5 Passage à l'échelle des formulations, pour le pavage hexagonal.

En dehors de ces cas-là, la perte d'optimalité est faible (généralement inférieure à 2%). La contrepartie de cette perte d'optimalité est la réduction du temps de résolution. En effet, grâce à la décomposition du problème en N_C sous-problèmes de plus petite taille, les gains en temps de résolution sont considérables, permettant de traiter des problèmes nettement plus gros, et donc plus proches de la réalité.

Afin de mettre en évidence ces gains, nous avons représenté sur les figures 4.5a et 4.5b le temps moyen de résolution en fonction de la taille du problème. Pour cela deux axes

d'augmentation de la taille du problèmes ont été considérés. D'abord en faisant uniquement varier le nombre de porteuses et d'utilisateurs, en gardant un rapport $N_U(k)/N_C$ constant et égal à 1. Garder le rapport nombre d'utilisateurs sur nombre de porteuses constant permet de garder un problème qui ne devienne pas trivial passé un certain moment. Le second cas considéré consiste à faire varier le nombre de faisceaux, en gardant un nombre constant de ressources et d'utilisateurs par faisceau. Dans les deux cas nous pouvons voir que les formulations par porteuse sont résolues beaucoup plus rapidement, et passent beaucoup mieux à l'échelle. Cependant, la tendance dans les deux cas semble indiquer que le temps de résolution croît toujours de manière exponentielle avec la taille du problème.

4.4 Résultats pour un pavage carré

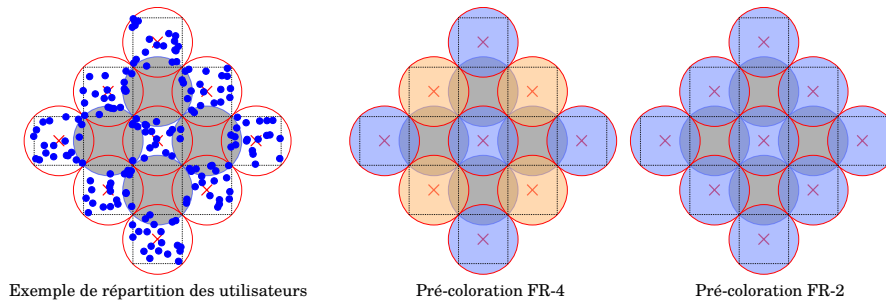
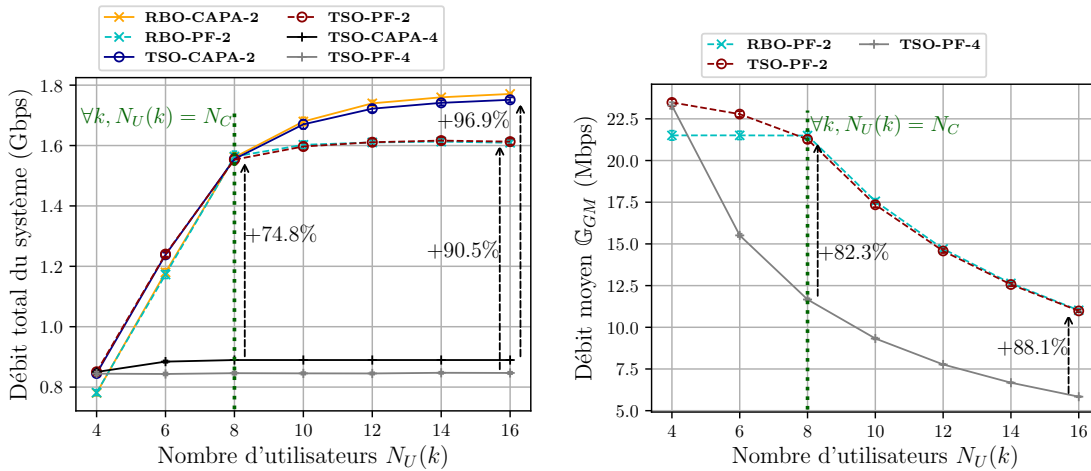


FIGURE 4.6 Scénario, et pré-colorations considérés pour le pavage carré (une seule polarisation).

Les mêmes simulations ont été effectuées pour un pavage carré. Les résultats, pour cette autre disposition des faisceaux qui vise à mieux isoler les interférences dans le cas d'un schéma de réutilisation de fréquences agressif (de type FFR ou FR-2), sont représentés sur les figures 4.7a et 4.7b, pour un scénario contenant légèrement moins de faisceaux, comme illustré sur la figure 4.6.

On y voit que les résultats sont sensiblement les mêmes, mais avec une ampleur parfois différente. Par exemple, les gains maximaux par rapport au schéma FR-4 sont plus élevés, jusqu'à +96% en débit maximal, et +90% avec une allocation PF-optimale. Cela confirme l'idée que le pavage carré offre une meilleure isolation d'interférences pour un schéma FR-2, facilitant l'obtention des gains des schémas de réutilisation de fréquences agressifs comme le FR-2.

Pour autant, même si les chiffres semblent meilleurs pour le cas du pavage carré, il est difficile à ce stade de faire une comparaison directe entre les deux organisations de faisceaux, et ce pour plusieurs raisons :



(a) Débit total du système.

(b) Moyenne géométrique des débits.

FIGURE 4.7 Résultats pour le pavage carré.

- Tout d'abord, les deux scénarios considérés n'ont pas le même nombre de faisceaux (à cause de la topologie choisie, où l'on prend les deux couronnes de faisceaux), et donc les interférences cumulées sont différentes.
- Il ne s'agit pas de la couverture d'une même zone, les utilisateurs sont répartis dans les faisceaux et non sur une surface donnée, ce qui peut donner un autre facteur de confusion.
- Il faudrait intégrer dans la comparaison l'efficacité de couverture des dispositions de faisceaux : à taille de faisceau égale, il faut plus de faisceaux suivant un pavage carré qu'il n'en faut avec un pavage hexagonal.

4.4.1 Remarque : formulation exacte moins performante que la formulation approchée

La figure 4.7a présente un résultat particulièrement surprenant au premier abord : les performances en débit de **RBO-CAPA-2** dépassent celles de **TSO-CAPA-2** qui sont théoriquement les performances optimales selon cette métrique. On retrouve le même constat en figure 4.7b pour **RBO-PF-2** et **TSO-PF-2**.

Une explication à ce résultat paradoxal vient des paramètres de tolérance d'optimalité donnés au solveur. En effet, une valeur élevée a été donnée (5%), ce qui signifie que la résolution s'arrête lorsque la meilleure solution faisable (*incumbent solution*) que le solveur ait trouvée a une valeur d'objectif à moins de 5% de la plus petite borne inférieure de l'optimal (*best bound*) obtenue par le solveur (le solveur alterne des périodes de recherche

de meilleures solutions et des périodes de recherche de preuve d'optimalité). Ainsi, la solution renvoyée a une valeur v_{ret} comprise dans $[\cdot95 \times v_{bnd}, v_{bnd}]$, et l'on sait seulement que la valeur de la solution optimale est comprise dans l'intervalle $[v_{ret}, v_{bnd}]$.

Pour en revenir à notre cas, la résolution des sous-problèmes de **RBO-CAPA** est beaucoup plus rapide, et l'écart entre v_{ret} et v_{bnd} est régulièrement inférieur à 5%, tandis que pour **TSO-CAPA**, la résolution est beaucoup plus laborieuse, en particulier pour les derniers pourcents. Par conséquent l'écart entre v_{ret} et v_{bnd} pour les formulations exactes sont quasi-systématiquement à 5%.

En conclusion, la grande tolérance de sous-optimalité choisie pour accélérer la résolution du problème peut expliquer la supériorité des solutions des formulations approchées **RBO-CAPA** et **RBO-PF** sur leurs équivalents en formulation exacte dans certains cas.

5 Conclusions du chapitre

Dans ce chapitre, nous nous sommes intéressés au calcul du débit maximal d'un système, et aux performances d'une allocation PF-optimale des ressources. Pour le premier il s'agissait de trouver la combinaison optimale d'utilisateurs, ce qui nous donne la borne supérieure du débit pour un scénario donné. Cette borne pourra ensuite être utilisée comme base de comparaison pour l'efficacité des futures propositions, que ce soit pour des schémas de coloration statiques, ou pour des mécanismes coordonnés de gestion des interférences. Pour le second, il s'agissait de trouver les N_{tti} combinaisons d'utilisateurs qui maximisent de proche en proche l'équité proportionnelle, ou de manière équivalente la moyenne géométrique des débit des utilisateurs. Comme pour le débit maximal, cette approche nous fournit une borne supérieure de l'allocation PF, c'est-à-dire une allocation favorisant un compromis entre équité et efficacité.

Nous avons formulé les deux problèmes sous la forme de problèmes d'optimisation linéaire en nombres entiers, et avons avancé deux approches de résolution hors-ligne : une première qui résout directement le problème global et une seconde, approchée, qui décompose le problème par porteuse. Nous avons ensuite analysé les résultats des simulations mettant en place ces deux méthodes de résolution sur des scénarios de petite taille, pour les deux arrangements de faisceaux considérés dans cette thèse (pavages carré et hexagonal). Les résultats sur ces scénarios annoncent des performances très prometteuses. En effet, par rapport à un schéma 4 couleurs optimisé de la même manière, il existe un ordonnancement PF-optimal offrant un débit total (respectivement débit moyen en moyenne géométrique) de 80% (resp. 60%) supérieur pour un pavage hexagonal et de plus de 95% (resp. 87%) supérieur pour un pavage carré. De plus, les résultats

sur ces problèmes semblent encourager la décomposition du problème par porteuse, qui présente une faible perte d'optimalité dès lors que le nombre d'utilisateurs est plus grand que le nombre de porteuses, contrebalancée par des temps de résolution beaucoup plus courts.

Les solutions présentées dans cette section permettent de quantifier des bornes supérieures pour un système donné. Dans la pratique, une allocation efficace des ressources visera donc à atteindre ces performances, mais avec un temps de calcul réduit afin d'être exploitable en temps réel. Plusieurs pistes sont explorées dans la suite dans cette perspective, soit en réduisant le nombre de faisceaux pris en compte dans les calculs d'interférences, soit en jouant sur la nature de la coordination.

IMPORTANCE DE LA COORDINATION

1 Introduction

Nous avons jusqu'ici supposé qu'il était nécessaire de coordonner les interférences afin d'utiliser un schéma à deux sous-bandes (deux couleurs). Les résultats du chapitre précédent semblent indiquer qu'il existe en effet de très bonnes solutions que l'on peut obtenir par un ordonnancement conjoint, mais ne justifient pas sa nécessité. Ainsi, il semble raisonnable de se demander s'il n'est pas possible d'obtenir des performances similaires avec des mécanismes de gestion des interférences plus légers.

Ce chapitre se propose d'étudier cette question sous plusieurs angles, en considérant toujours un schéma de réutilisation des fréquences à deux couleurs (FR-2). Le premier axe d'étude est la nature de la coordination : quelles performances peut-on espérer en ne coordonnant pas ou peu l'allocation des ressources dans les différents faisceaux ? Ou est-ce qu'au contraire seul un ordonnancement conjoint, donc une coordination forte, permet d'atteindre des performances acceptables ? Le second axe d'étude est la portée de la coordination : est-il nécessaire de prendre en compte les décisions d'allocation de l'ensemble des faisceaux pour prendre sa propre décision d'allocation de ressources ? Et si non, quels sont les faisceaux que l'on doit coordonner en priorité ?

La littérature de la coordination d'interférences sur la voie retour [27, 44, 45, 63, 104] s'est principalement concentrée sur l'ordonnancement conjoint, et vise généralement à maximiser le débit du système. L'apport de nos contributions, publiées dans [150–152], est d'une part de se placer un cadre fixe où l'allocation de ressources tend à être PF-optimale, et d'autre part de définir et comparer différents degrés de coordination. Ce chapitre, en plus d'apporter des éléments analytiques de réponse à ces questions, propose une comparaison par simulation des différents degrés de coordination, chacun combinant une

nature et une portée de coordination.

2 Préliminaire : allocation PF-optimale sans connaissance des interférants

L'allocation PF-optimale a été décrite dans le chapitre précédent dans le cas de l'ordonnancement conjoint. Dans cette partie nous allons considérer des cadres d'étude différents où l'allocation des RBs est faite sans coordination dynamique. Il faut donc définir précisément ce que signifie être PF-optimal dans ce cadre-là. L'absence de coordination dynamique d'interférences se traduit par le fait que l'on n'a aucun contrôle sur les utilisateurs qui vont engendrer une interférence. Le niveau d'interférence subi doit alors être estimé d'une manière ou d'une autre. Nous supposons dans un premier temps que l'on connaît ce niveau d'interférence $I_{est}(k)$ pour chaque faisceau k . La méthode d'obtention de ce niveau d'interférence est discutée dans les parties suivantes.

En reprenant le critère PF que nous avons présenté dans le chapitre précédent (section 3, problème 4.22), obtenir une allocation PF-optimale est équivalent à trouver, à chaque instant $t+1$, la combinaison d'utilisateurs solution du problème suivant, déduit de **TSO-PF**, que l'on nommera **TSO-LOC** :

Problème TSO-LOC à l'instant $t+1$:

$$\text{Maximiser}_{\mathbf{x}} \quad \sum_{k,i \in \mathcal{U}_k} \sum_{c,m} x_{im}^{kc} \frac{r_m}{\theta_{t,i} + \delta_i} \quad (5.1a)$$

s.t.

$$\forall c, \forall k \quad \sum_{i \in \mathcal{U}_k} \sum_m x_{im}^{kc} \leq 1 \quad (5.1b)$$

$$\forall k, \forall i \in \mathcal{U}_k \quad \sum_c \sum_m x_{im}^{kc} \leq 1 \quad (5.1c)$$

$$\forall c, \forall k, \forall i \in \mathcal{U}_k, \forall m \quad \frac{P_i G_k(i)}{\gamma_m} \geq \mu + I_{est}(k) + (x_{im}^{kc} - 1)B \quad (5.1d)$$

$$\forall c, \forall k, \forall i \in \mathcal{U}, \forall m \quad \begin{cases} x_{im}^{kc} \in \{0, 1\} & \text{si } i \in \mathcal{U}_k \\ x_{im}^{kc} = 0 & \text{sinon} \end{cases} \quad (5.1e)$$

où les x_{im}^{kc} sont les variables d'allocation pour les RBs $(t+1, c), \forall c$.

Dans ce problème mis à jour, seule la contrainte 5.1d change : il n'y a plus aucun lien entre les variables des différents faisceaux puisque l'on n'a aucune connaissance des interférants, et le problème est alors composé de N_B sous-problèmes indépendants. De plus $I_{est}(k)$ étant constant et supposé connu, le ModCod de chaque utilisateur sera lui aussi

constant (le ModCod le plus performant vérifiant la contrainte 5.1d). L'objectif devient alors, pour chaque faisceau k :

$$\text{Maximiser}_{\mathbf{x}^k} \sum_{i \in \mathcal{U}_k} x_i^{kc} \frac{r_i}{\theta_{t,i} + \delta_i} \quad (5.2)$$

où x_i^{kc} est la variable qui indique si l'utilisateur i transmet (peu importe le ModCod) sur la porteuse c du faisceau k et $r_i = \arg \max_m \left\{ m \mid \frac{P_i G_k(i)}{\mu + I_{est}(k)} \geq \gamma_m \right\}$.

Remarquons que 1) dès que $\theta_{t,i} > 0$ on a $\theta_{t,i} + \delta_i \approx \theta_{t,i}$, étant donné que δ_i est aussi petit que l'on veut et 2) $\theta_{t,i}$ en tant que moyenne arithmétique des débits peut aussi s'écrire $\theta_{t,i} = \frac{1}{t} \sum_{l=0} x_i^{kc}(l) r_i$. On voit alors que l'objectif ne dépend plus du débit de chacun des utilisateurs, mais seulement du nombre d'allocations reçues par l'utilisateur. Il ne s'agit donc plus que de choisir les N_C utilisateurs les moins servis, en respectant les contraintes 5.1c et 5.1b, c'est-à-dire en servant au maximum une fois chacun de ces utilisateurs.

On voit donc que l'allocation PF-optimale des ressources sans connaissance des interférents est équivalente à une allocation en Round Robin (RR), à une exception près :

- Si $N_U(k) < N_C$, alors tous les utilisateurs sont sélectionnés, et affectés arbitrairement aux différentes porteuses.
- Si $N_U(k) \geq N_C$, alors les N_C utilisateurs les moins servis sont sélectionnés en même temps.

Remarque 8. Optimalité PF. Il peut sembler paradoxal de dire que toute allocation qui alloue autant de RBs à chaque utilisateur est PF-optimale, même si de meilleures solutions existent en moyenne géométrique des débits, comme par exemple l'allocation obtenue par TSO-PF. C'est en réalité lié à la fois au cadre fixé qui fait que les débits sont supposés constants et aussi à la quantité limitée d'informations disponibles au moment de l'allocation des ressources. À partir des données disponibles, aucune autre décision d'allocation qu'une allocation égalitaire en nombre de RBs ne donnerait d'utilité supérieure, l'utilité étant également définie à partir de ces données.

3 Nécessité et nature de la coordination

La centralisation des fonctions d'allocation de ressources n'implique pas nécessairement que l'allocation soit coordonnée et omnisciente. En effet, la quantité d'information est importante et plusieurs problèmes peuvent se poser :

- Le temps de calcul : comme nous l’avons vu dans la partie précédente, l’exploitation de toutes ces données pour une coordination optimale est très complexe et demande des temps de calcul rédhibitoires pour une utilisation en temps réel.
- La quantité de données : plusieurs choses dépendent de la quantité de données nécessaire à effectuer l’allocation de ressource, comme par exemple l’*overhead* qui est engendré par l’échange et le rafraîchissement régulier de ces données, ou encore la mémoire vive nécessaire pour stocker les données relatives à toutes les combinaisons utilisateur/faisceau.

Il convient alors d’étudier précisément les données et les traitements nécessaires à une coordination efficace des interférences.

3.1 Solution d’allocation des ressources sans coordination dynamique

La première solution à laquelle nous nous intéressons dans cette section est une solution sans coordination dynamique d’interférences. Pour cela, il est nécessaire que chaque faisceau dispose d’une estimation du niveau d’interférence subi. Nous supposons que le système est capable d’obtenir, pour chaque faisceau, l’interférence moyenne engendrée par chacun des faisceaux :

$$I_{est}(k) = \eta \sum_{k' \neq k} \frac{1}{N_U(k')} \sum_{j \in \mathcal{U}_{k'}} P_j G_k(j) \quad (5.3)$$

où η est un facteur variable permettant d’ajuster l’agressivité de l’estimation d’interférence (plus η est petit, plus l’interférence supposée est faible, et donc plus grande sont les chances de sous-estimer l’interférence réellement subie).

Dans cette solution, l’allocation des ressources de chaque faisceau peut être faite de manière indépendante et en parallèle. De plus, une allocation PF-optimale est très facile à obtenir, puisque comme vu dans le préliminaire en section 2, une allocation RR est suffisante.

Cependant, il est important de noter que puisque l’on repose sur une estimation de l’interférence, il est possible que le niveau réel de celle-ci soit supérieur et qu’alors le SINR soit inférieur au seuil du ModCod, entraînant une forte probabilité d’erreur sur le RB. C’est pourquoi il est important de différencier le débit de transmission d’un utilisateur que nous nommerons **throughput**, et le débit effectif de l’utilisateur, c’est-à-dire le débit de ce qui est reçu sans erreur, que nous nommerons **goodput**.

Afin de diminuer la probabilité qu’un même utilisateur reçoive systématiquement un RB subissant un niveau élevé d’interférence, nous avons introduit un part d’aléatoire dans

l'affectation des ressources. Le Round Robin Randomisé (RRR) est une adaptation de RR où l'affectation des porteuses aux utilisateurs sélectionnés est aléatoire et uniforme. Comme elle associe autant de ressources à chaque utilisateur, cette variante reste PF-optimale dans ce cadre d'étude.

3.1.1 Paramétrisation de l'estimation d'interférence

Dans le chapitre précédent, tout était maîtrisé et l'on s'assurait d'avoir toujours un SINR supérieur au seuil du ModCod affecté, si bien que le `goodput` était égal au `throughput`. En revanche, il faut ici considérer le Taux d'Erreur Paquet (PER), c'est-à-dire le taux de RBs où le SINR est inférieur au seuil du ModCod affecté, et donc choisir un facteur d'interférence qui garantisse un PER acceptable.

Prenons pour exemple un scénario légèrement plus grand qu'au chapitre précédent, avec 18 faisceaux sur la polarisation d'intérêt, 12 porteuses et 20 utilisateurs par faisceau afin de disposer d'une certaine diversité spatiale. Pour chaque instance du scénario (c'est-à-dire chaque répartition aléatoire d'utilisateurs), nous effectuons l'allocation des ressources suivant l'algorithme RRR décrit plus haut sur une durée totale de 50 TTIs. Puis, pour chaque valeur du facteur d'interférence nous déterminons la moyenne des différentes métriques (moyenne géométrique des `goodput` et `throughput`, de même que le PER), représentées sur les figures 5.1 et 5.2 pour les deux organisations de faisceaux étudiées. Deux schémas de coloration, FR-2 et FR-4 sont étudiés afin de fournir une comparaison de l'efficacité de la méthode d'estimation d'interférences.

Sur toutes les figures, deux valeurs du facteur d'interférence sont mises en évidence : la valeur optimale en `goodput` η^* et la valeur pour laquelle le PER devient inférieur à un seuil arbitraire (ici 10^{-2} , ce qui est un taux d'erreur très moyen, mais permet déjà d'illustrer notre propos) $\eta^{<1\%}$. Cette dernière valeur est particulièrement importante, car le PER est un critère de performance capital dans le contexte du satellite, où les retransmissions sont très coûteuses en raison du Temps d'Aller-Retour (RTT) très important.

3.1.1.a Cas du pavage carré. Sur la figure 5.1, on peut observer que pour les deux schémas de coloration étudiés, le `goodput` atteint rapidement un plateau avant de diminuer plus ou moins lentement avec le facteur d'interférence. Dans le cas du schéma FR-4, les valeurs du `goodput` pour η^* et $\eta^{<1\%}$ sont très proches, et l'on voit que le PER diminue très rapidement, garantissant de très bonnes conditions de transmission pour tous les utilisateurs. Ce constat confirme la propriété de bonne isolation d'interférences du schéma FR-4, généralement utilisé avec un mécanisme d'estimation d'interférences semblable à celui présenté ici.

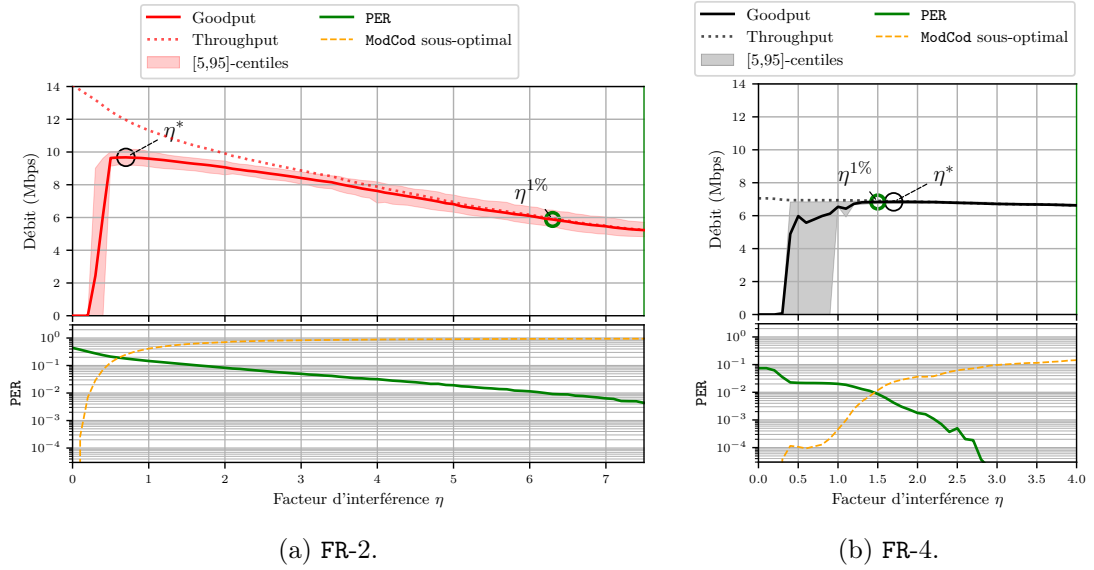


FIGURE 5.1 Moyenne géométrique du **goodput** et du **throughput**, ainsi que **PER** moyen en fonction du facteur d'interférence η pour les schémas **FR-2** et **FR-4**, avec une allocation de ressources sans coordination dynamique **RRR** et pour un **pavage carré**. La zone autour du **goodput** représente l'intervalle entre les 5^e et 95^e centiles.

Pour le **FR-2**, c'est différent : le **PER** diminue plus lentement, ce qui fait que le **goodput** obtenu pour un **PER** acceptable est bien inférieur à la valeur optimale. Cela s'explique par le fait que pour garantir un **PER** suffisamment bas quelles que soient les conditions, l'interférence estimée est pour la grande majorité des **RBs** sur-estimée comme illustré par la courbe orange qui représente la proportion de **RBs** ayant un **ModCod** sous-optimal, entraînant une perte de débit globale. Ainsi, même s'il est possible en **FR-2** d'obtenir un certain gain par rapport au **FR-4** sans coordination dynamique, ces gains sont largement contrebalancés par les forts taux de pertes qui en découlent, ce qui est très pénalisant dans le contexte du satellite.

3.1.1.b Cas du pavage hexagonal. En revanche, la situation est bien différente pour le **FR-2** dans le cas du pavage hexagonal, dont les résultats sont représentés sur la figure 5.2, alors que les résultats du **FR-4** sont similaires à ceux du pavage carré. En effet, pour le **FR-2**, il n'y a pas réellement de plateau, et le **goodput** diminue rapidement¹ avant de retomber à 0. La décroissance des pertes dues à une diminution du nombre de sous-estimation pour certains est compensée par une surestimation des interférences,

1. La zone de chute de la courbe du **goodput** a une très grande incertitude (intervalle 5-95 centiles important) car la valeur de η pour laquelle au moins un utilisateur a un débit nul varie selon les instances.

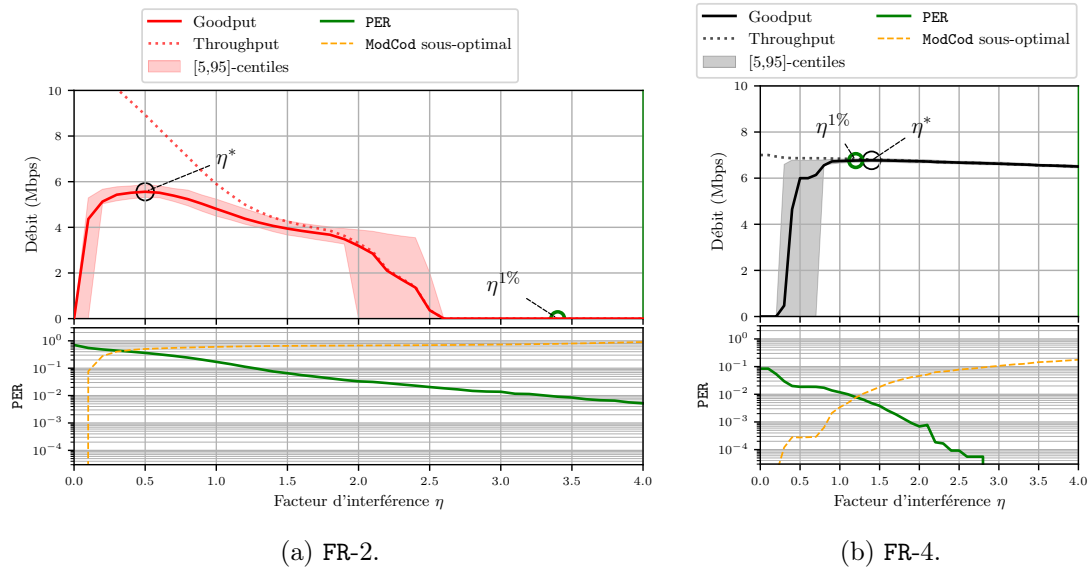


FIGURE 5.2 Moyenne géométrique du **goodput** et du **throughput**, ainsi que le **PER** moyen en fonction du facteur d'interférence η pour les schémas FR-2 et FR-4, avec une allocation de ressources sans coordination dynamique RRR et pour un **pavage hexagonal**. La zone autour du **goodput** représente l'intervalle entre les 5^e et 95^e centiles.

menant à des cas où l'interférence estimée est si forte qu'aucun ModCod ne permet de compenser, et donc à un débit nul en moyenne géométrique. Cela conforte de plus l'idée que pour contrer la grande variabilité des interférences pressentie à l'observation du diagramme d'antenne dans les chapitres précédents, il est nécessaire de recourir à une estimation d'interférences plus individualisée, et donc dynamique.

3.2 Solution d'allocation des ressources avec ordonnancement conjoint

La solution aux antipodes de celle présentée dans la section précédente (RRR) est évidemment une solution où l'allocation des ressources est faite par de l'ordonnancement conjoint, comme présenté dans la section 3 du chapitre 4. Comme nous l'avons vu, les performances d'une telle stratégie de coordination sont bonnes, mais la résolution des problèmes successifs est trop longue pour être mise en place dans une solution réelle. Cette solution doit donc être vue comme une référence permettant d'évaluer les techniques proposées.

3.3 Solution intermédiaire de coordination dynamique

L'allocation des ressources peut être vue comme la combinaison de deux actions : la sélection d'un ou plusieurs ensembles d'utilisateurs qui vont transmettre sur le même RB, et la sélection d'un ModCod pour chaque utilisateur. Dans les solutions **TSO-PF** et **RBO-PF**, ces deux actions sont effectuées en même temps de manière à tirer le meilleur des deux degrés de liberté. Dans la solution **RRR**, ces deux actions étaient découplées : une fois l'interférence moyenne estimée, le ModCod de chaque utilisateur pouvait être déterminé une fois pour toute. Puis, la sélection des utilisateurs y est faite de manière aléatoire et distribuée (chaque faisceau effectue son choix indépendamment, même si les décisions peuvent être physiquement prises au même endroit).

Dans cette section, nous allons présenter une solution intermédiaire, qui nécessite une coordination forte, mais très peu de calcul afin d'essayer de tirer le meilleur des deux approches. L'allocation de ressources dans cette solution, nommée **COORDMCS** (pour sélection coordonnée des ModCods), est composée de trois étapes :

1. Affectation en **RRR** des RBs aux utilisateurs, de manière locale à chaque faisceau et indépendante ;
2. Échange des tables d'allocation entre les faisceaux ;
3. Affectation des ModCods à partir des données reçues des autres faisceaux.

3.3.1 Sélection des utilisateurs

La première étape de cette solution consiste à affecter les RBs aux utilisateurs, de manière à tendre vers une solution PF-optimale. Puisque l'on ne connaît pas les utilisateurs qui vont engendrer des interférences, on se retrouve à nouveau dans le cas de la section 2. À la différence de la solution **RRR**, on ne connaît pas encore les débits des utilisateurs, car on ne fait aucune hypothèse sur le niveau d'interférence. Cela ne change pas pour autant le raisonnement de la section 2, puisque l'on y voit que dans ce cadre, l'optimalité ne dépend pas du débit de chaque utilisateur, mais uniquement du nombre de RBs reçus par chaque utilisateur. Une allocation en **RRR** est donc tout aussi recevable (et optimale) que pour la solution **RRR**.

3.3.2 Échange des tables d'allocation

Dans cette étape, tous les faisceaux s'échangent les informations relatives à l'affectation qu'ils ont effectués dans l'étape précédente. Que ce soit la position de l'utilisateur (permettant de déduire les gains relatifs à cet utilisateur) ou directement le niveau d'interférence

de cet utilisateur, cette étape permet un partage *idéal* des gains pour chaque faisceau des utilisateurs sélectionnés par chaque faisceau.

3.3.3 Sélection des ModCods

Une fois que les interférences sont connues², il est possible d'obtenir le SINR de chaque utilisateur et il est trivial d'en déduire le ModCod optimal à utiliser. Cette opération est très rapide, puisqu'il ne s'agit que de trouver pour chaque utilisateur i , m_i^* tel que :

$$m_i^* = \arg \max_m \{r_m \mid SINR_i^k \geq \gamma_m\} \quad (5.4)$$

Cette solution, réduisant la complexité du traitement des informations de coordination, permet de mettre en évidence les importances relatives des deux actions : est-ce que dans un cadre donné la coordination du ModCod est plus importante qu'une sélection coordonnée des utilisateurs qui interfèrent ? Analytiquement, il n'y a cependant aucune garantie que les gains apportés par cette solution soient importants. En effet, s'il y a une majorité de cas défavorables (i.e. engendrant des interférences mutuellement destructrices), alors la sélection coordonnée de ModCod ne pourra pas rendre ces situations meilleures. En revanche, grâce à la coordination du choix du ModCod on évite tous les problèmes de sous-estimation et sur-estimation des interférences rencontrés dans la première solution de ce chapitre, **RRR**.

Remarque 9. Obtention des gains Étant donné que les conditions de transmissions évoluent d'un instant à l'autre, et d'un RB à l'autre, il peut sembler compliqué d'obtenir les gains individuels. La gateway a accès aux SINR des utilisateurs sur chaque bloc, et en supposant que les autres paramètres du canal sont connus (bruit ambiant, interférences mineures...) alors la connaissance des SINR de chaque RB et des utilisateurs qui ont été sélectionnés sur chaque RB nous donne un système linéaire de N_B équations à N_B inconnues pour chaque RB, que l'on sait donc résoudre, et qui nous permet d'obtenir une estimation précise des gains des utilisateurs.

3.4 Comparaison des différentes natures de coordination

Nous évaluons maintenant les performances des deux solutions présentées dans cette section : **RRR**, **COORDMCS** en les comparant avec celles de l'ordonnancement conjoint quasi-optimal **RBO-PF**, sur un schéma de coloration **FR-2**. Afin de fournir un point de repère

² Voir remarque sur l'obtention des gains.

supplémentaire, nous ajoutons également les performances de la solution représentative de l'état de l'art, **RRR-4**, donc avec un schéma de coloration **FR-4**.

PAVAGE CARRÉ						
Solution	Nature de la Coordination	\mathbb{G}_{GM}	\mathbb{G}_{AM}	PER	$T_{exec}/slot$	Qté. données
RRR-4	Intf. moyenne	51.9%	51.7%	0.3%	0.117ms	-
RRR-2	Intf. moyenne	46.1%	50.7%	0.9%	0.164ms	-
COORDMCS-2	Sélec. ModCod	91.5%	91.5%	0.0%	0.458ms	++
RBO-PF-2	Sélec. ModCod et user	100.0%	100.0%	0.0%	236.869s	++
PAVAGE HEXAGONAL						
Solution	Nature de la Coordination	\mathbb{G}_{GM}	\mathbb{G}_{AM}	PER	T_{exec}	Qté. données
RRR-4	Intf. moyenne	61.3%	60.0%	0.4%	0.119ms	-
RRR-2	Intf. moyenne	0.0%	27.9%	1.0%	0.168ms	-
COORDMCS-2	Sélec. ModCod	79.6%	79.1%	0.0%	0.456ms	++
RBO-PF-2	Sélec. ModCod et user	100.0%	100.0%	0.0%	682.207s	++

TABLE 5.1 Comparaison des performances des trois solutions de coordination pour un PER de 10^{-2} en pourcentage des performances de l'allocation quasi PF-optimale **RBO-PF-2**, et mise en rapport avec le quantité d'informations nécessaire et les temps d'exécution.

Les simulations ont été effectuées dans les mêmes conditions que pour la détermination du facteur d'interférence, présentées en 3.1.1, et les solutions **RRR** utilisent ici une valeur du facteur d'interférence qui leur garantit un taux d'erreur $PER \leq 10^{-2}$. Ces résultats sont rassemblés dans le tableau 5.1, où la moyenne géométrique du *goodput* \mathbb{G}_{GM} est indiquée ainsi que sa moyenne arithmétique \mathbb{T}_{GM} qui est proportionnelle au débit total du système. De plus, le temps de calcul moyen T_{exec} nécessaire pour obtenir l'affectation des RBs et ModCods aux utilisateurs sur un TTI est indiqué, ainsi qu'une indication de la quantité de données nécessaire pour effectuer l'allocation des ressources.

Du point de vue des performances en débit, on retrouve les performances très basses de **RRR-2** pour les deux pavages, et on voit en revanche que les solutions **COORDMCS-2** ont des résultats tout à fait satisfaisants, avec 80% des performances optimales sur le pavage hexagonal, et plus de 90% des performances optimales sur le pavage carré.

Ces bons résultats sont de plus confortés par la faible complexité de cette approche. En effet, dans la solution **COORDMCS**, l'affectation des RBs se fait en **RRR**, donc en temps constant, et la sélection du ModCod est légèrement plus complexe puisqu'il faut calculer le SINR de chaque utilisateur pour déterminer le ModCod optimal, mais reste polynomial (N_B^2 opérations par RB) et ne dépend pas du nombre d'utilisateurs. En regard des calculs nécessaires pour déterminer les solutions quasi-optimales de **RBO-PF**, c'est une réduction considérable qui est confirmée numériquement par les résultats.

Enfin, en termes de quantité de données nécessaires pour la coordination, **COORDMCS** nécessite autant d'informations que **RBO-PF** puisque la connaissance en temps réel des gains de chaque utilisateurs pour chaque faisceau ($N_U \times N_B$ données) est requise. C'est bien plus important que **RRR** qui ne nécessite que la seule connaissance des gains locaux ($N_U(k)$ pour chaque faisceau k) et une mise à jour sporadique des interférences moyennes. Les conséquence de l'échange d'un tel volume de données à une fréquence élevée pourraient faire l'objet d'une étude approfondie.

4 Portée de la coordination

La section précédente nous montre qu'il semble nécessaire d'avoir une coordination forte si l'on veut augmenter la réutilisation des fréquences. Cette coordination forte permet une gestion des interférences individualisée et évite les erreurs d'estimation, là où une coordination statique ou semi-statique doit composer avec des interférences qui peuvent être extrêmement variables.

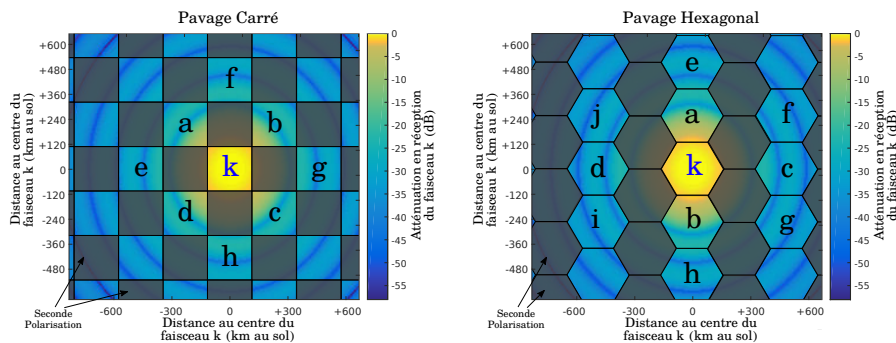


FIGURE 5.3 Diagramme d'antenne, avec limite des faisceaux (schématique).

Un autre axe d'étude de la coordination est d'identifier les données qu'il est pertinent de prendre en compte pour effectuer l'allocation de ressources. Par exemple, il est assez clair que les informations d'affectation des ressources des faisceaux directement voisins sont importantes, car l'interférence engendrée est très variable en fonction de l'utilisateur affecté à la ressource. Mais qu'en est-il des faisceaux moins proches ? La connaissance de l'utilisateur qui va engendrer une interférence à l'autre extrémité du système a-t-elle un réel impact sur l'interférence subie ? Le diagramme d'antenne, donné en figure 5.3, semble nous indiquer que lorsque l'on s'éloigne du faisceau d'intérêt, il est très rapidement suffisant de savoir qu'un faisceau a un utilisateur qui transmet, peu importe qui sont ces utilisateurs.

4.1 Faisceaux coordonnés, faisceaux non-coordonnés

Cette section apporte des éléments de réponse à ces questions, en considérant différentes portées de coordination. Nous définissons cette portée comme la distance maximale (en nombre de rayons d'un faisceau) séparant deux faisceaux qui vont mutuellement partager les informations relatives à l'affectation des ressources. Pour le reste des faisceaux, l'interférence qu'ils engendrent sera considérée comme un bruit, et estimée de manière similaire à ce qui est fait dans la section 3.1 de ce chapitre (garantissant un PER de 10^{-2}).

Remarquons que la définition de la portée de coordination est centrée sur chaque faisceau. C'est une approche qui diffère de celle prise par exemple dans [44, 45] où des grappes de faisceaux coordonnés sont formées de manière statique, chaque grappe pouvant ensuite effectuer l'allocation des ressources de manière indépendante. Dans ce dernier cas, l'utilisation de grappes de faisceaux se justifie car chacune est considérée comme un système Mu-MIMO, comme présenté dans la section 2.1 du chapitre 3, permettant une importante isolation des interférences entre les faisceaux de la grappe et les autres.

Les différentes portées de coordination considérées (3 pour le pavage carré, 4 pour le pavage hexagonal) sont données dans le tableau 5.2 et les lettres font référence à la figure 5.3.

PAVAGE CARRÉ		PAVAGE HEXAGONAL	
Portée	Voisins pris en compte	Portée	Voisins pris en compte
$P = 0$	$\{\}$	$P = 0$	$\{\}$
$P = 2$	$\{a, b, c, d\}$	$P = 2$	$\{a, b\}$
$P = 4$	$\{a, b, c, d, e, f, g, h\}$	$P = 3$	$\{a, b, c, d\}$
$P = +\infty$	Tous	$P = 4$	$\{a, b, c, d, e, f, g, h, i, j\}$
		$P = +\infty$	Tous

TABLE 5.2 Portées de coordination considérées.

4.1.1 Le cas particulier du pavage hexagonal, et de la portée $P = 2$

Un cas particulier remarquable est le cas du pavage hexagonal, où les faisceaux sont organisés en ligne. La portée $P = 2$ revient à ne prendre en compte que les deux voisins directs, c'est-à-dire ceux appartenant à la même ligne. Dans cette configuration là, la gestion des ressources de chaque ligne de faisceaux devient indépendante des autres. Un des impacts important est de réduire fortement la complexité de la résolution du problème d'optimisation **RBO-CAPA**, ou de toute autre formulation, qu'il est possible de décomposer en plusieurs sous-problèmes indépendants, que l'on peut alors résoudre en

parallèle et séparément.

Si les résultats d'un tel degré de coordination sont convaincants, cela ouvrirait également la voie à la conception d'algorithmes de construction de proche en proche d'ensembles d'utilisateurs particulièrement compatibles.

4.2 Résultats

Afin de déterminer l'impact de la portée de coordination sur l'efficacité de la gestion des interférences, nous considérons les différentes portées de coordination appliquées aux différentes techniques d'allocation de ressources coordonnées dynamiquement, présentées dans la section précédente.

PAVAGE CARRÉ						
Technique d'allocation	Portée	Gain \mathbb{G}_{GM}	Perte \mathbb{G}_{GM} vs. ∞	PER	T_{exec}/RB	Gain \mathbb{G}_{AM}
RRR-4 (ref.)	$P = 0$	+0.0%	N/A	0.3%	0.117ms	+0.0%
RRR-2	$P = 0$	-11.1%	N/A	0.9%	0.164ms	-1.8%
COORDMCS-2	$P = 2$	+74.6%	-1.0%	0.5%	0.327ms	+75.2%
COORDMCS-2	$P = 4$	+75.8%	-0.3%	0.1%	0.415ms	+76.3%
COORDMCS-2	$P = \infty$	+76.4%	0.0%	0.0%	0.458ms	+76.9%
RBO-PF-2	$P = 2$	+86.2%	-3.4%	0.2%	10.067s	+86.6%
RBO-PF-2	$P = 4$	+90.9%	-1.0%	0.0%	69.444s	+91.5%
RBO-PF-2	$P = \infty$	+92.8%	0.0%	0.0%	236.869s	+93.4%
PAVAGE HEXAGONAL						
Technique d'allocation	Portée	Gain \mathbb{G}_{GM}	Perte \mathbb{G}_{GM} vs. ∞	PER	T_{exec}/RB	Gain \mathbb{G}_{AM}
RRR-4 (ref.)	$P = 0$	+0.0%	N/A	0.4%	0.119ms	+0.0%
RRR-2	$P = 0$	-100.0%	N/A	1.0%	0.168ms	-53.5%
COORDMCS-2	$P = 2$	+26.9%	-2.2%	0.8%	0.275ms	+28.9%
COORDMCS-2	$P = 3$	+28.5%	-1.0%	0.3%	0.401ms	+30.5%
COORDMCS-2	$P = 4$	+29.3%	-0.3%	0.2%	0.540ms	+31.4%
COORDMCS-2	$P = \infty$	+29.8%	0.0%	0.0%	0.456ms	+31.8%
RBO-PF-2	$P = 2$	+42.9%	-12.1%	0.8%	5.759s	+45.8%
RBO-PF-2	$P = 3$	+58.6%	-2.8%	0.3%	23.240s	+62.4%
RBO-PF-2	$P = 4$	+61.8%	-0.8%	0.1%	150.702s	+65.3%
RBO-PF-2	$P = \infty$	+63.0%	0.0%	0.0%	682.207s	+66.6%

TABLE 5.3 Gains moyens par rapport à l'état de l'art (**RRR-4**) pour différentes métriques, pour un $PER \leq 10^{-2}$, pour les différents degrés de coordination appliqués.

Les simulations ont été effectuées dans les mêmes conditions que pour le reste du chapitre, présentées en 3.1.1. Pour chaque portée de coordination, une première étape consiste à déterminer expérimentalement la valeur du facteur d'interférence garantissant un $PER < 10^{-2}$ en moyenne. Ce facteur d'interférence ne concerne que les faisceaux hors

de portée de coordination. Les résultats de cette première étape peuvent être trouvés en annexe B. Toutes ces stratégies de coordination sont ensuite comparées pour la valeur du facteur d'interférence ainsi déterminé. Les résultats de ces simulations sont donnés dans le tableaux 5.3 pour différentes métriques, avec en particulier le gain en moyenne géométrique du `goodput` \mathbb{G}_{GM} , la perte de performances due à la réduction de la portée de coordination "Perte \mathbb{G}_{GM} vs. ∞ ", le temps moyen de calcul de la solution et le gain en moyenne arithmétique du `goodput` \mathbb{G}_{AM} .

Ces résultats confirment qu'une coordination locale est acceptable pour l'allocation de ressources `COORDMCS`, puisque la perte de performances est relativement faible, de l'ordre de quelques pourcents par rapport à la même solution avec coordination globale, comme indiqué dans la colonne "Perte \mathbb{G}_{GM} vs. ∞ " du tableau 5.3.

En revanche pour `RBO-PF` la perte de performances est plus importante, mais la réduction du temps de calcul est significative, ouvrant la voie à des méthodes de résolutions efficaces (de type algorithmes gloutons) coordonnant également la sélection des utilisateurs de proche en proche.

5 Conclusion sur les degrés de coordination

Le schéma de réutilisation de fréquences `FR-2` a un fort potentiel, puisque l'on peut atteindre des débits jusqu'à deux fois plus importants que pour un schéma `FR-4`, comme nous l'avons vu dans le chapitre précédent. Cependant, ces performances ne sont pas toujours facilement atteignables. C'est ce que nous avons mis en évidence dans ce chapitre, en soulignant la nécessité d'une gestion des interférences à l'échelle du `RB`, et donc d'une coordination dynamique de l'allocation des ressources. En effet, les performances d'une stratégie naïve, `RRR`, utilisant une estimation de l'interférence moyenne qui fonctionne bien sur un schéma de réutilisation de fréquences moins agressif sont moindres, et présentent des taux de pertes de transmission trop élevés pour être envisageables en pratique.

Dans un second temps, nous avons présenté une stratégie de coordination simple `COORDMCS`, qui coordonne la sélection du `ModCod` et la retarde afin de l'effectuer après l'affectation des `RBs`. Cette approche s'est montrée très satisfaisante dans le cas d'un pavage carré, et correcte dans le cas d'un pavage hexagonal. Cela peut s'expliquer par le fait que dans le cas hexagonal, une grande partie des combinaisons d'utilisateurs ne sont pas favorables (i.e. les interférences mutuelles sont importantes), et la coordination du choix du `ModCod` n'est que corrective. En effet, elle permet principalement d'éviter les erreurs d'estimation d'interférence de la stratégie précédente, `RRR`, mais pas d'améliorer les conditions de transmission comme le fait la stratégie d'ordonnancement conjoint

RBO-PF, présentée dans le chapitre précédent.

Dans un troisième temps, nous avons étudié l'influence de la portée de coordination, c'est-à-dire de la prise en compte des voisins plus ou moins proches sur les décisions d'allocation de ressources. Cette étude confirme l'intuition qu'il est suffisant de ne tenir compte que des faisceaux les plus proches, à condition d'accepter une légère perte de performances.

SCHÉMAS AGRESSIFS DE RÉUTILISATION DE FRÉQUENCES

1 Introduction

Dans les deux chapitres précédents, nous nous sommes concentrés sur l'étude de la borne supérieure de l'allocation PF des ressources, à partir d'un schéma de réutilisation de fréquences à deux couleurs (FR-2), et à l'étude des différents degrés de coordination. Les performances optimales sont très attrayantes mais difficiles à atteindre. Certaines simplifications permettent de nous en approcher tout en gardant une complexité relativement faible. Cependant, la coordination dynamique, nécessaire pour atteindre des performances satisfaisantes, pose des contraintes très fortes sur l'infrastructure permettant la gestion centralisée des ressources.

Dans ce chapitre, fort des méthodes et conclusions des chapitres précédents, nous introduisons un nouveau schéma de réutilisation des fréquences, dit 6HC, qui vise à isoler les interférants principaux, tout en offrant un taux de réutilisation de fréquences supérieur à celui du FR-4. Afin d'en évaluer la pertinence et l'efficacité, nous le comparons aux différents schémas agressifs classiques tels que FFR-4, SFR-4 et PFR-4, qui ont un certain succès dans le contexte cellulaire terrestre.

Nous présentons également quelques éléments montrant que le schéma Six demi-couleurs (6HC) conduit aussi à des gains sur la voie aller. C'est donc un bon candidat pour la gestion des interférences des systèmes satellites futurs et il fait l'objet d'un dépôt de brevet [161].

Toutes les stratégies de gestion des ressources radio (schéma de réutilisation de fréquence et allocation de ressource combinés) sont également évaluées à l'aune d'une

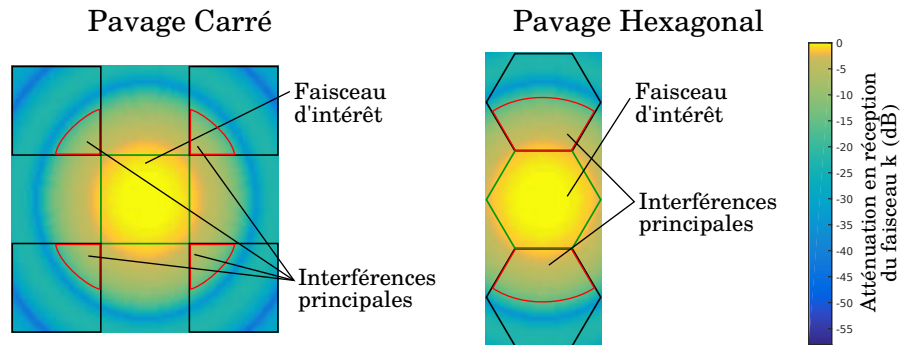


FIGURE 6.1 Illustration de la localisation des interférences principales.

métrique, l'efficacité en bande du système, qui a une importance prédominante en satellite. Elle est peu présente dans la littérature mais nous semble mieux rendre compte à la fois des performances pures en débit, mais aussi des contraintes engendrées par l'utilisation de schéma agressifs.

2 Un nouveau schéma statique de réutilisation de fréquences

Dans le contexte du satellite, la principale source d'atténuation d'interférences provient de l'atténuation angulaire de l'antenne satellite. Et, contrairement au cas cellulaire terrestre, il y a peu de différence de SNR entre centre et bordure de faisceau¹. Par conséquent, certains interférants, proches de la bordure du faisceau observé (cf. figure 6.1), seront toujours extrêmement nuisibles, et ce quel que soit l'utilisateur sélectionné dans ce faisceau. Il est donc préférable de ne jamais transmettre sur les mêmes fréquences que ces interférants.

Deux bonnes propriétés se dégagent de ce choix :

1. Il est alors intéressant de synchroniser les pires interférants du faisceau en question et éviter ainsi d'engendrer une interférence importante sur les fréquences utilisées dans le faisceau.
2. Réciproquement, l'absence de transmission dans le faisceau diminue l'interférence subie par les utilisateurs des faisceaux voisins.

À partir de ce seul principe, nous avons construit un motif régulier, définissant le schéma de réutilisation de fréquences suivant, illustré en figure 6.2, et que nous appellerons 6HC :

¹. Comme nous l'avons vu dans les chapitres 2 et 3, la bordure d'un faisceau du satellite est généralement définie à -3dB d'atténuation angulaire.

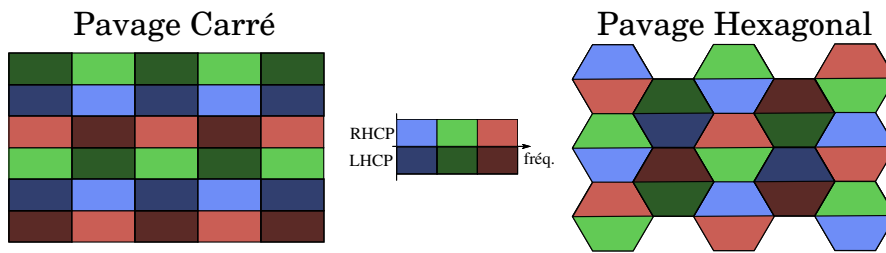


FIGURE 6.2 Principe du schéma Six demi-couleurs (6HC), pour les pavages carré et hexagonal.

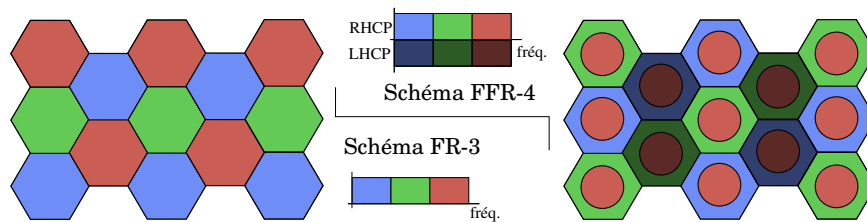


FIGURE 6.3 Schémas classiques FR-3 et FFR-4.

1. Les utilisateurs sont répartis dans deux zones géographiques, déterminées en fonction de leur proximité avec les faisceaux directement voisins. Dans le cas du pavage hexagonal le partage est direct et dans le cas du pavage carré, il est nécessaire de choisir une orientation de découpage de manière arbitraire.
2. Le spectre est divisé en trois sous-bandes (ou couleurs) identiques, pour chaque polarisation. Les bandes sont affectées aux zones de manière régulière et cyclique, de manière à respecter le principe suivant : la couleur non-utilisée dans le faisceau est utilisée dans toutes les zones géographiques les plus proches du faisceau.

Ce schéma utilise deux couleurs sur trois (pour une polarisation) dans chaque faisceau, ce qui revient à avoir un FRF de $1/3$, comme d'autres schémas de réutilisation de fréquences : le schéma homogène FR-3 qui est incompatible avec l'utilisation de deux polarisations, ou le FFR-4, avec une répartition de bande égale entre zone centrale et zone externe, comme illustré en figure 6.3. Dans la suite de ce chapitre nous allons évaluer les performances de ce schéma statique de réutilisation de fréquences, et en comparer l'efficacité à celle des schémas classiques (FR-X, FFR, SFR, PFR).

Remarque 10. Adaptation du schéma à un contexte à une seule polarisation Les mêmes principes peuvent être appliqués à un contexte à une seule

polarisation, et à une réutilisation de fréquence plus agressive. Un exemple d'une telle extension est donnée en annexe C.

3 Évaluation de performances des schémas statiques pour la voie retour

Comme nous l'avons souligné dans la partie précédente, le nouveau schéma présenté a le même taux de réutilisation de fréquences **FRF** que le schéma **FFR-4**, plus classique, aussi utilisable dans le contexte satellite à deux polarisations. Par conséquent, le **6HC** peut être utilisé dans les mêmes contextes que le **FFR-4**, contrairement par exemple au **FR-2** qui nécessite plus de bande totale. À ce titre, ces deux schémas (**FFR-4** et **6HC**) sont comparables, et concurrents directs.

Afin de les comparer, il est possible, entre autre et par degré de réalisme :

1. d'analyser qualitativement les interférences pires cas pour chaque couleur
2. de regarder les interférences moyennes à l'aide par exemple de techniques de géométrie stochastique
3. de simuler l'allocation de ressources pour permettre de prendre en compte plus plus d'aspects.

La première approche se fait sans mal, étant donné que l'atténuation angulaire est en première approximation décroissante en fonction de l'angle et donc de la distance. La figure 6.4 représente visuellement les interférants principaux pour les différents types de couleur des deux schémas dans le cas hexagonal. Les zones externes du schéma **FFR-4** sont les mieux protégées, mais les zones centrales subissent une interférence pire cas plus importante que les zones du schéma **6HC** et les interférants sont beaucoup plus nombreux pour les utilisateurs de ces zones-là, en **FFR-4** qu'en **6HC**.

Cependant, les pires cas ne sont pas la généralité, il faut donc des critères de comparaison plus réalistes ou plus représentatifs des conditions moyennes. Nous avons choisi l'approche par simulation car les interférences moyennes ne nous semblaient pas rendre compte de la variabilité et de l'impact réel des interférences, notamment sur le choix du **ModCod** et donc sur le débit réel. L'approche par simulation est plus lourde à mettre en place mais est plus réaliste, puisque l'on peut évaluer les pertes au niveau de chaque **BTU** et donc plus facilement quantifier des débits, et d'autres métriques riches en information.

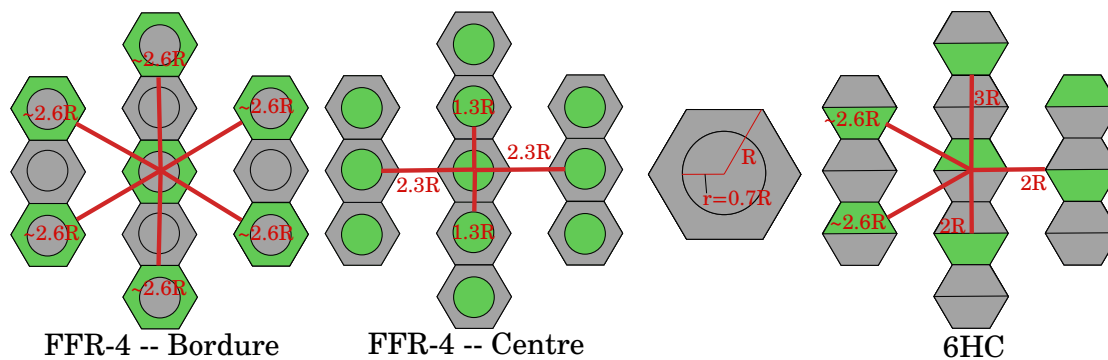


FIGURE 6.4 Pires cas d'interférences pour les schémas FFR-4 et 6HC.

3.1 Critères de comparaison

Afin de comparer les différents schémas de coloration, nous les avons considérés dans plusieurs contextes de gestion des ressources radio permettant de donner des indicateurs de performances de chacun :

1. Dans un premier temps nous cherchons à quantifier le débit maximal du schéma, en résolvant le problème **RBO-CAPA** défini dans le chapitre 4. Ce débit maximal nous indique à quel point le schéma est porteur de bonnes combinaisons d'utilisateurs, et donne une borne supérieure du débit du système, quelle que soit la technique de gestion des interférences employée, équitable ou non. Cette quantité est obtenue en résolvant le même problème **RBO-CAPA** défini dans le chapitre 4. D'autres métriques provenant de la résolution de ce problème seront aussi utilisées, et seront toutes notées avec un indice $_{max}$.
2. Puis, nous quantifions les performances des schémas pour différents degrés de coordination et en supposant une allocation des ressources qui s'efforce d'être PF-optimale, à savoir :
 - Les performances optimales avec ordonnancement conjoint, ou capacité PF, qui correspondent à la borne déterminée dans la section 3 du chapitre 4 via la résolution successive des problèmes **RBO-PF**. Ces quantités sont accompagnées de l'indice $_{pf}$.
 - Les performances sans coordination, déterminées en utilisant l'allocation de ressources **RRR** avec un $PER \leq 10^{-3}$, décrite dans la section 3.1 du chapitre 5. Ces performances sont représentatives de ce qu'il est "facile" d'atteindre avec une coordination minimale voire inexistante. Elles sont accompagnées de l'indice $_{rrr}$.

NB : Ces performances sont très souvent catastrophiques pour des schémas

agressifs, indiquant non pas que le schéma de réutilisation de fréquences est mauvais, mais seulement qu'il nécessite une coordination dynamique forte.

- Enfin, les performances avec coordination de **ModCod**, en utilisant l'allocation de ressources **COORDMCS**, présentée dans la partie 3.3 du chapitre 5. Elles permettent de rendre compte des performances atteintes avec un minimum de coordination dynamique, et soulignent l'impact du choix d'un ensemble performant d'utilisateurs grâce à la comparaison avec les performances optimales. Elles sont accompagnées de l'indice mcs

Représentation graphique. Afin de pouvoir visualiser facilement ces résultats, nous utiliserons la représentation graphique de la figure 6.5. Avec cette représentation graphique, il devient alors facile de se rendre compte de l'efficacité du schéma s : si le segment $[X_{pf}(s), X_{rrr}(s)]$ est court cela signifie que les performances du schéma sont indépendantes de l'allocation des ressources, et reflètent donc une isolation des interférences très efficace. Si au contraire ce segment est long, cela signifie que le schéma nécessite une coordination forte des interférences. Ce segment représente en quelque sorte la région des possibles pour une allocation PF, car toute allocation cherchant à être PF sera nécessairement moins performante que **RBO-PF**, et pour peu qu'elle tienne compte des interférences, ses performances devraient dépasser celles de **RRR**.

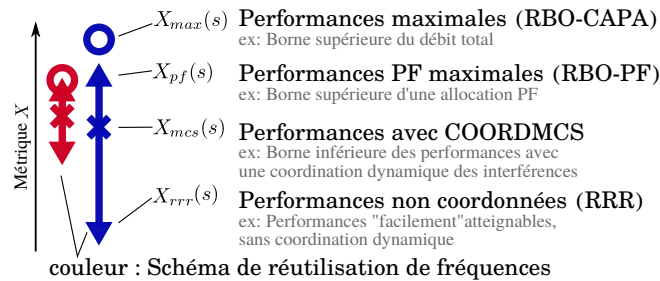


FIGURE 6.5 Représentation graphique des performances des différentes stratégies de gestions des ressources.

La proximité des performances PF-optimales et non coordonnées est particulièrement importante. Elle peut être vue comme une condition suffisante pour une gestion distribuée des ressources, ce qui a des conséquences très importantes sur le système. En effet, chaque gateway physique peut alors gérer indépendamment ses ressources, et les contraintes sur le segment sol sont bien moindres : aucun besoin d'entité centrale de gestion des ressources, réseau de cœur moins contraint en délai par exemple, taille des données à traiter dans chaque gateway physique et synchronisation inter-gateway physique moindres etc.

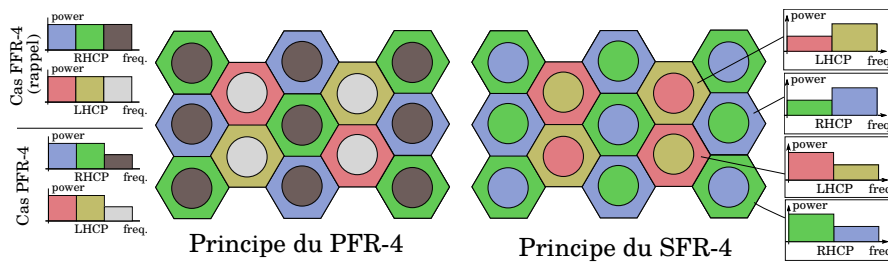


FIGURE 6.6 Schémas de coloration SFR et PFR, pour le pavage hexagonal, le principe étant le même pour le pavage carré.

3.2 Comparaison des schémas de réutilisation de fréquences

Nous avons déjà mentionné le schéma FFR-4, qui a un FRF identique à notre schéma 6HC (cf. figures 6.2 et 6.3). Il est régulièrement envisagé comme schéma de base pour la gestion des ressources d'un satellite multifaisceau (comme par exemple dans [63]). D'autres schémas sont aussi parfois évoqués dans la littérature du cas satellite car performants dans le cadre cellulaire [27], mais leurs performances sont rarement évaluées ni comparées à celles des schémas plus conservateurs comme le FR-4. C'est ce que nous proposons de faire dans cette section afin d'évaluer l'efficacité relative de notre proposition.

3.2.1 Schémas de coloration performants issus des réseaux terrestres cellulaires

Nous nous proposons d'inclure dans la comparaison deux schémas qui sont très populaires dans les réseaux cellulaires terrestres, les schémas PFR-4 et SFR-4 présentés dans la partie 2.2.3 du chapitre 3, et illustrés dans leur mise en place pour notre cas d'étude en figure 6.6. Ces deux schémas ont comme particularité de proposer du contrôle de puissance. C'est une fonctionnalité disponible sur la voie retour, permettant d'envisager ce type de schéma. Le contrôle de puissance vise à réduire l'interférence engendrée par les zones centrales sur les autres zones centrales dans le cas de PFR et sur les zones externes dans le cas de SFR².

Afin d'établir une comparaison juste, il est nécessaire de déterminer le bon facteur de réduction de puissance PR qui indique la réduction de puissance appliquée dans les zones centrales (CCA) de ces schémas avec $P_{CCA} = PR \times P_{max}$. En faisant varier ce facteur, nous obtenons les résultats donnés en figure 6.7 pour le débit total du système, en utilisant la représentation graphique présentée en figure 6.5.

2. Sur le downlink, il s'agit aussi et surtout de mieux répartir la puissance disponible en émission entre les utilisateurs bien et mal servis.

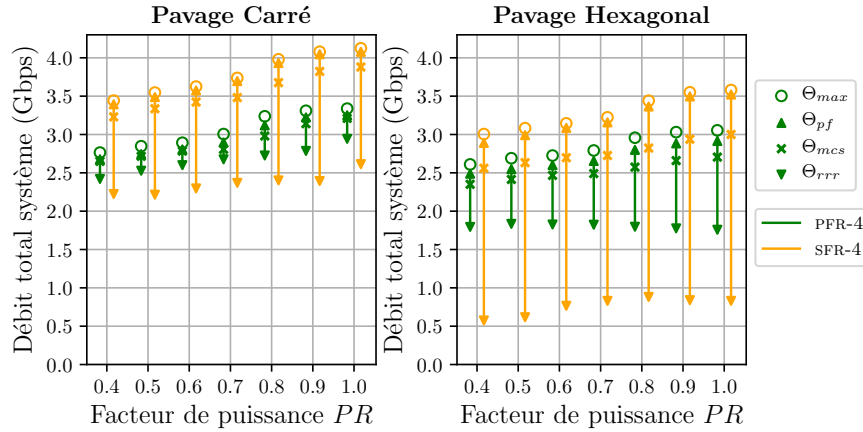


FIGURE 6.7 Performances en débit total du système des schémas à contrôle de puissance, sur des scénarios à 18 faisceaux, 12 porteuses et 20 utilisateurs par faisceau.

Il ressort directement de ces courbes que quel que soit le schéma de coloration, et quelle que soit l'allocation de ressource ou encore le pavage utilisé, le contrôle de puissance ne semble pas apporter les gains escomptés, puisque les meilleures performances sont obtenues pour $PR = 1$, c'est à dire aucun contrôle de puissance. La perte de puissance semble davantage nuire au système et aux utilisateurs qu'apporter une réduction des interférences, contrairement au cas cellulaire terrestre. C'est un résultat attendu, étant donné les rapports de puissance entre centre et bordure qui sont très différents entre systèmes terrestres cellulaires et systèmes satellitaires. Pour $PR = 1$, le PFR est identique au FFR et n'apparaîtra par conséquent plus dans les comparaisons futures, et le SFR-4 sera comparé pour la valeur optimale du facteur de réduction de puissance, à savoir $PR = 1$.

3.2.2 Comparaison

Nous avons mené les simulations pour chaque stratégie de gestion des ressources, chaque pavage et chaque schéma de réutilisation de fréquences, sur les mêmes scénarios qu'au chapitre précédent, c'est-à-dire des scénarios à 18 faisceaux, 12 porteuses et 20 utilisateurs par faisceau.

Les résultats sont rassemblés dans les figures 6.8 et 6.9, représentant à chaque fois le débit total du système, le débit des 5% d'utilisateurs les moins bien servis³ et l'efficacité en bande. Cette dernière métrique s'exprime comme le débit total du système ramené à

3. Étant donné que **RBO-CAPA** ne porte que sur un seul TTI, il est attendu que lorsqu'il y a plus d'utilisateurs que de porteuses, une partie des utilisateurs aura un débit nul, d'où les valeurs nulles des 5% pires débits sur les figures 6.8c et 6.9c

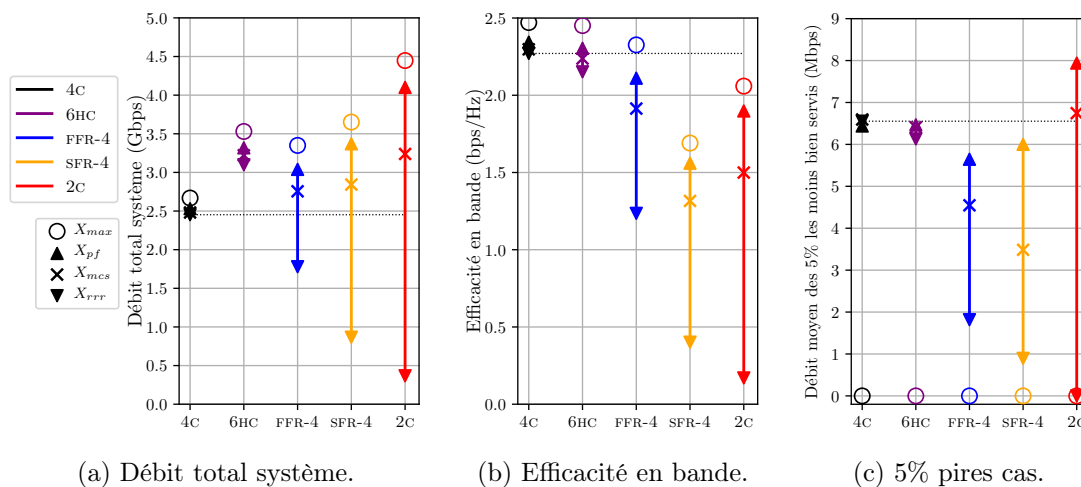


FIGURE 6.8 Performances des différents schémas de coloration pour le pavage hexagonal.

la bande totale agrégée nécessaire pour utiliser le schéma de réutilisation de fréquences, et peut s'apparenter à une efficacité spectrale moyenne du système. Considérer les performances sous cet angle permet de relativiser celles, pourtant importantes, du FR-2, qui nécessite deux fois plus de bande qu'un schéma FR-4. Dans la suite de cette section, nous allons commenter les résultats des différents schémas de réutilisation de fréquences en les traitant par taux de réutilisation de fréquence.

3.2.2.a Schéma de référence (FRF = 1/4) : FR-4 Les résultats pour le schéma à 4 couleurs sont cohérents et sans surprise : l'isolation d'interférence est forte, ce qui a pour conséquence qu'une gestion des ressources non coordonnée est faisable, sans perte d'efficacité, ce qui se matérialise sur les figures 6.8 et 6.9 par un segment $X_{max}(4C) - X_{rrr}(4C)$ très court, pour toutes les métriques étudiées.

3.2.2.b Schéma très agressifs (FRF = 1/2) : SFR-4 et FR-2 Pour le schéma FR-2, on retrouve les résultats présentés dans les chapitres précédents : sans coordination dynamique les performances sont particulièrement mauvaises en grande partie à cause de la grande variabilité des interférences, et avec une coordination dynamique des interférences des gains importants sont obtenus par rapport au schéma FR-4.

En revanche, les gains escomptés par l'utilisation d'un schéma SFR ne sont pas au rendez-vous. Pour un taux de réutilisation de fréquences égal à celui du schéma FR-2, on n'obtient qu'une partie des gains potentiels d'une telle utilisation intensive du spectre. Par exemple, pour le pavage carré, le débit total du système sous une allocation de ressources

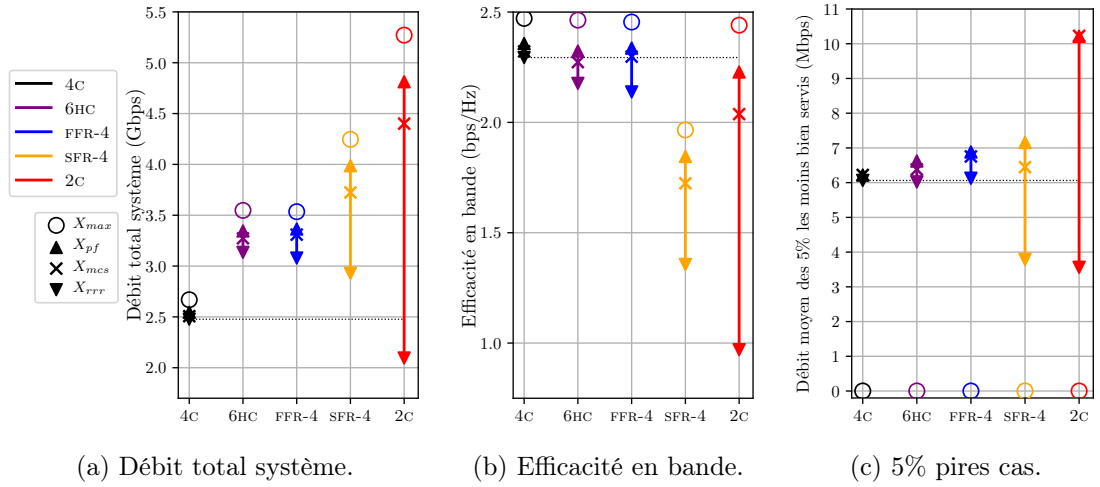


FIGURE 6.9 Performances des différents schémas de colorations pour le pavage carré.

PF-optimale en SFR, bien que supérieur à celui du FR-4, n'atteint que 83% de celui du FR-2 avec la même technique d'allocation des ressources, et 87% de celui obtenu avec une coordination dynamique des ModCod en FR-2.

Malgré tout, SFR a de meilleures performances que FR-2 pour une gestion non coordonnée des ressources (avec un $PER \leq 10^{-3}$), ce qui peut être interprété par le fait que la définition des zones permet de localiser les interférences, et d'en réduire la variabilité dans une certaine mesure. Les performances de SFR ne sont pas satisfaisantes pour autant, puisqu'elle sont inférieures à celles du FR-4 dans le cas du pavage hexagonal et à peine supérieures dans le cas du pavage carré. En résumé, ni le contrôle de puissance ni la définition des zones n'apportent de gains significatifs qui plaident en faveur de SFR. Ces faibles performances qui peuvent être imputées à la nature et au comportement différents de l'atténuation angulaire des interférences du contexte satellite.

3.2.2.c Schémas intermédiaires ($FRF = 1/3$) : FFR-4 et 6HC Le FFR-4 permet à la fois de protéger les utilisateurs en bordure, qui sont plus vulnérables car ils ont une atténuation angulaire plus élevée et de ne pas utiliser une porteuse si elle est utilisée en bordure d'un faisceau. Cependant, les utilisateurs au centre du faisceau ont quant à eux un taux de réutilisation plus élevé, et l'efficacité du schéma dépend beaucoup de l'efficacité de l'isolation d'interférences. Dans le cas du pavage hexagonal, les zones centrales restent proches de leurs voisins directs, et cela se reflète sur les résultats. En effet pour ce cas, les performances d'une allocation de ressources non coordonnée sont inférieures à celles du FR-4, à cause d'une variabilité des interférences importantes. A contrario, pour le

pavage carré, les zones centrales sont nettement moins proches ce qui fournit une meilleure isolation d'interférence. Cela se retrouve sur les performances non-coordonnées du FFR-4 qui sont très proches des performances PF-optimales.

Enfin, le schéma de réutilisation de fréquences que nous proposons vise uniquement à éviter de réutiliser une fréquence utilisée en bordure d'un faisceau directement voisin, sans différencier les utilisateurs du centre et de bordure. Les résultats de ce schéma sont particulièrement convaincants, puisque l'écart des performances PF-optimale et non-coordonnées est très faible quel que soit le pavage utilisé, et pour toutes les métriques présentées ici. On peut en particulier noter l'efficacité en bande du schéma 6HC qui est très proche de celle du FR-4.

De plus, il est intéressant de remarquer que notre proposition, 6HC, est toujours meilleure en termes de débit total du système qu'un schéma FFR-4, quels que soient le pavage ou la technique d'allocation de ressources, ce semble confirmer que le 6HC est la solution statique la mieux adaptée à la voie retour du satellite.

Débit moyen des 5% d'utilisateurs les moins bien servis : $\theta^{5\%}$ Ce critère de performance reflète les performances des utilisateurs particulièrement mal servis, que ce soit parce qu'ils n'ont pas de très bonnes conditions par rapport à leur faisceau, ou encore parce qu'ils subissent systématiquement des interférences très fortes. C'est un critère particulièrement intéressant lorsque l'on considère des schémas agressifs, car il permet de voir si l'augmentation de la capacité profite à tout le monde, ou si elle renforce au contraire les inégalités entre utilisateurs.

C'est en particulier un des objectifs des schémas de type FFR qui affectent des porteuses avec un FRF plus faible aux utilisateurs en bordure. Mais dans le cas du pavage hexagonal par exemple, on observe au contraire une baisse du $\theta^{5\%}$ pour les schémas FFR et SFR. En effet, les 5% les moins bien servis ne sont plus les utilisateurs en bordure, mais les utilisateurs au centre du faisceau qui subissent des interférences importantes.

Autre fait remarquable, le schéma FR-2 améliore le débit des utilisateurs les moins bien servis, à condition d'employer des mécanismes de coordination dynamique d'interférences. Ceci est particulièrement important puisque ce n'est par exemple pas le cas du schéma SFR, ou dans une moindre mesure.

Enfin, les schémas FFR-4 et 6HC avec un pavage carré sont encore une fois équivalents, avec une légère supériorité du FFR-4 pour ce critère de performances.

Conclusion sur les comparaisons Nous avons pu observé dans nos comparaisons que le schéma proposé, 6HC, présente des performances convaincantes à tout point de

vue. En débit total du système, un gain important par rapport au schéma FR-4 est obtenu (de l'ordre de +30%) et ce quel que soit le niveau de coordination. Par rapport au schéma FFR-4, ses performances sont bien meilleures dans le cas du pavage hexagonal, et sensiblement identiques pour le cas du pavage carré. Si les performances optimales du 6HC ne sont pas aussi importantes que celles du FR-2 sous une coordination dynamique, ce schéma représente un compromis intéressant puisqu'il présente une efficacité en bande proche de celle du FR-4.

4 Application à la voie aller

Dans la section précédente, nous avons présenté et comparé les différents schémas de réutilisation de fréquences pour la voie retour. Cependant, les grands choix de conception de l'architecture bord se font aussi en fonction de leur efficacité sur la voie aller. Il est donc particulièrement intéressant que les solutions efficaces sur la voie retour le soient également sur la voie aller, permettant alors un design unifié de l'architecture du satellite.

Dans cette section nous allons présenter quelques éléments qui permettent de justifier la pertinence du schéma de réutilisation de fréquences que nous avons proposé, le 6HC, pour la voie aller. Ces éléments sont à la fois qualitatifs, avec un analyse similaire à celle présentée pour la voie retour dans la section 2 de ce chapitre, et quantitatifs grâce à une évaluation des performances attendues sur la voie aller. Nous considérons des hypothèses simples pour faire cette évaluation. L'étude plus fine constitue une perspective pour des travaux futurs.

4.1 Analyse qualitative

La géométrie des interférences en voie aller est légèrement moins complexe qu'en voie retour puisqu'il n'y a qu'un seul émetteur par faisceau : le satellite. En effet, le niveau d'interférence dépend uniquement de la position de l'utilisateur qui les subit, et des puissances d'émissions des différents faisceaux qui engendrent cette interférence. Ce dernier point est important car une grande partie des travaux sur la voie aller considère une gestion semi-statique de la puissance affectée aux faisceaux comme moyen de compenser des conditions météo changeantes ou des demandes hétérogènes entre les faisceaux [76–79, 90–93].

Nous supposons ici que tous les faisceaux utilisent la même puissance d'émission, et que les conditions météo sont les mêmes sur tous les faisceaux, comme précédemment pour la voie retour. Sous ces hypothèses, le niveau d'interférence dépend donc uniquement de la position de l'utilisateur et de sa séparation angulaire par rapport aux faisceaux

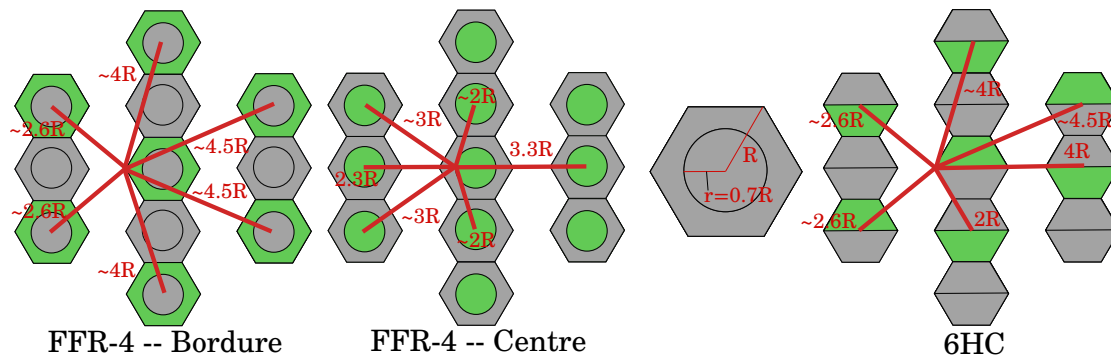


FIGURE 6.10 Pires cas d'interférences pour les schémas FFR-4 et 6HC pour la voie aller (interférences sur le pire utilisateur) et un pavage hexagonal.

voisins. On peut considérer les pires cas comme en voie retour, ce qui est illustré en figure 6.10, et avec les mêmes conclusions. Avec le schéma 6HC, le nombre de voisins proches qui utilisent la même fréquence est réduit par rapport au FFR-4 pour la zone centrale. De plus, il semble que les interférants principaux sont en moyenne plus loin.

4.2 Analyse quantitative

Afin de quantifier les gains potentiels de ce schéma pour les deux pavages considérés, nous avons effectué des simulations en prenant les mêmes hypothèses (même puissance et mêmes conditions météo), et en considérant de plus les hypothèses simplificatrices suivantes :

- Les utilisateurs sont *greedy*, c'est à dire que la gateway a toujours des données à transmettre aux utilisateurs. Il n'y a donc pas besoin de *bit stuffing* qui réduirait le débit utile du système.
- Le partage des ressources est équitable en temps entre les utilisateurs d'un même faisceau (ce qui, à puissance fixe est équivalent à être PF-équitable)⁴.
- Aucune contrainte de mise en trame ni d'ordonnancement n'est considérée, il est toujours possible de mettre en trame la quantité de donnée allouée à chaque utilisateur, peu importe le ModCod affecté ou la quantité de données pour chaque ModCod, et nous ne comptons pas l'*overhead* associé.
- On connaît parfaitement les caractéristiques du canal, i.e. les conditions de transmission n'ont pas changé depuis longtemps et l'Adaptation de Codage et de Modulation (ACM) a déjà permis de converger vers la sélection du ModCod optimal.

4. Les conditions sont les mêmes que pour la relaxation du problème **TSO-LOC** défini en section 3.1 du chapitre 5, donnant donc également un partage égalitaire en temps.

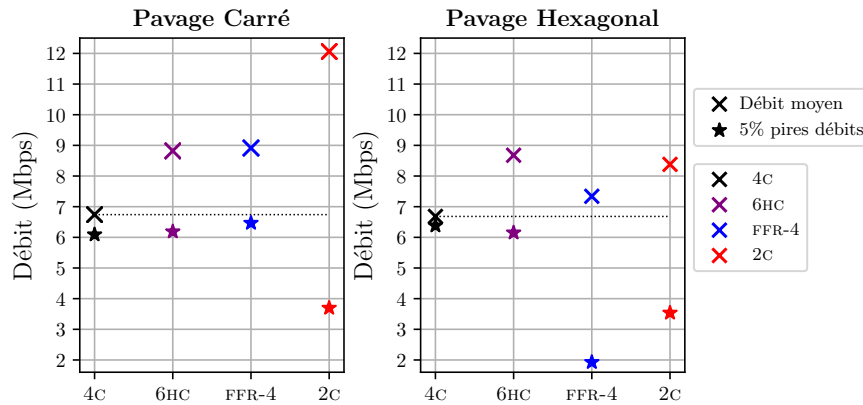


FIGURE 6.11 Résultat des simulations pour la voie aller, pour 18 faisceaux.

Sous ces hypothèses, nous avons produit 100 instances différentes de 18 faisceaux, 12 porteuses et 20 utilisateurs par faisceau, utilisateurs qui sont placés uniformément dans la zone de couverture de chaque faisceau. Pour chaque instance, les SINRs des utilisateurs sont calculés en fonction du schéma de coloration utilisé, ce qui permet de déterminer le ModCod optimal pour l'utilisateur (les conditions de transmission ne changent pas d'un instant à l'autre en voie aller, les sources d'interférences étant toujours les mêmes). Le débit total du système est alors calculé en affectant une portion égale des ressources affectées à chaque zone de chaque faisceau aux utilisateurs de ces zones. Les résultats en termes de débit total du système et de débit des 5% d'utilisateurs les moins bien servis sont représentés sur la figure 6.11. Sous ces hypothèses simplificatrices, les résultats obtenus en voie retour semblent être confirmés, encourageant le développement de solutions utilisant le schéma 6HC en remplacement du FFR-4.

5 Conclusions

Dans cette section nous avons présenté un nouveau schéma de réutilisation de fréquences fondé sur une isolation des interférences les plus fortes. Ce schéma s'adapte bien à la fois au pavage hexagonal et au pavage carré et se pose comme concurrent au schéma FFR-4, qui est lui inspiré des réseaux cellulaires terrestres.

Afin de les comparer, nous avons présenté une méthodologie générale ayant recours aux techniques de gestion des interférences présentées dans les chapitres précédents. Les résultats des simulations effectuées semblent indiquer que le schéma présenté, le 6HC est aussi performant que le FFR-4 pour un pavage carré, et se présente comme la seule solution viable pour le pavage hexagonal dans un contexte non dynamiquement coordonné. Dans

les deux cas, il est utilisable et performant pour une approche non coordonnée de gestion des interférences, ce qui représente un avantage significatif pour des déploiements à moyen terme.

De plus, en complément de la comparaison 6HC/FFR-4, nous avons aussi présenté les performances des schémas classiques PFR et SFR, qui ont un certain succès dans le monde du cellulaire terrestre, et proposent du contrôle de puissance pour améliorer les conditions de transmission. Nos résultats indiquent que l'effet recherché par ces schémas de coloration n'a pas lieu dans le contexte de la voie retour des satellites multifaisceaux, ce que nous interprétons comme étant dû à la nature différente de l'isolation d'interférences des antennes multifaisceaux.

Enfin, nous avons présenté quelques éléments qui encouragent l'approfondissement de l'étude du schéma 6HC pour la voie aller. Nous avons montré par première analyse qualitative et quantitative que les gains obtenus en voie retour sont confirmés pour la voie aller.

CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Conclusions

Les satellites de télécommunication géostationnaires constituent un complément judicieux aux réseaux de communication terrestres pour desservir les zones peu densément peuplées ou avec peu d'infrastructures pré-existantes. L'immense couverture qu'un seul satellite offre en fait une option peu coûteuse pour fournir un accès à Internet à une grande partie d'un pays ou d'un continent. L'arrivée des antennes multifaisceaux, permettant de réutiliser les mêmes fréquences un grand nombre de fois a permis une augmentation importante de la capacité des satellites géostationnaires et donc la compétitivité du service.

La réutilisation de fréquences permet en effet d'augmenter la bande disponible dans chaque faisceau, mais accroît aussi les interférences co-canal subies, ce qui limite l'efficacité de l'utilisation de cette bande. Il est donc primordial de trouver le bon compromis entre réutilisation intensive de la bande et efficacité spectrale. Les techniques statiques de coordination d'interférences, comme le schéma de coloration à 4 couleurs (FR-4) qui permet une isolation spatiale des interférences efficace, atteignent de bonnes performances mais n'utilisent pas le système au maximum de son potentiel.

Dans cette thèse nous nous sommes proposés de considérer un schéma de réutilisation plus ambitieux où toute la bande est réutilisée dans chaque faisceau, avec une alternance de polarisation, ce qui est équivalent à un schéma à deux couleurs (FR-2), offrant une bande spectrale deux fois plus importante que le schéma FR-4. Dans ce nouveau cadre, les interférences co-canal sont prépondérantes et très variables, ce qui rend difficile l'utilisation des stratégies actuelles de gestion des ressources spectrales et nous pousse à nous tourner vers des approches dynamiques de gestion des ressources, et notamment de coordination

dynamique des interférences.

Les travaux de cette thèse proposent une étude approfondie de l'impact de la coordination dynamique d'interférences, et des différents compromis qui rentrent en jeu. Les contributions présentées dans ce manuscrit sont organisées autour de trois axes principaux :

1. Dans un premier temps, l'optimisation de l'allocation des ressources spectrales et temporelles est étudiée sous l'angle de la coordination dynamique d'interférences, et deux problèmes sont alors formulés :
 - Le premier vise à maximiser le débit instantané du système en recherchant la meilleure combinaison d'utilisateurs.
 - Le second intègre l'équité proportionnelle entre les utilisateurs, et vise à maximiser de proche en proche la moyenne géométrique des débits.

Les deux formulations prennent la forme d'un problème d'optimisation en nombres entiers et sont résolus de manière exacte et approchée grâce à une décomposition du problème par porteuse. Nos résultats montrent que le schéma FR-2 permet des gains en débit du système très élevés par rapport à un schéma plus conservateur FR-4, et ce malgré l'augmentation du nombre et de la puissance des interférences provoquées par l'utilisation de ce schéma agressif de réutilisation de fréquences.

2. Dans un second temps nous avons étudié l'impact des différents degrés de coordination en fonction de leur nature (sélection des utilisateurs ou sélection du débit de transmission) et de leur portée (les informations prises en compte dans la prise de décision). Les résultats de nos simulations permettent de montrer la nécessité d'une coordination dynamique des interférences pour le schéma FR-2 et qu'une coordination de la sélection des débits de transmission est suffisante pour atteindre des performances satisfaisantes dans la plupart des cas. Nous confirmons également par nos simulations qu'il est suffisant de ne prendre en compte que les interférents les plus proches, ce qui permet de réduire la quantité d'information requise par chaque faisceau, et donc potentiellement de réduire l'*overhead*.
3. Enfin, nous présentons un nouveau schéma agressif de réutilisation de fréquences qui offre une isolation d'interférences proche de celle du schéma FR-4 tout en augmentant le taux de réutilisation de fréquences, et surpasse dans la grande majorité des cas les schémas agressifs non-homogènes de réutilisation de fréquences. Comme il offre une bonne isolation d'interférence, ce nouveau schéma peut être exploité de manière non coordonnée, ce qui représente un avantage considérable et le place comme un concurrent prometteur du schéma FFR classique qui est actuellement envisagé pour les futurs systèmes satellites géostationnaires.

Perspectives

Nos travaux présentent plusieurs solutions viables de gestion des ressources spectrales et temporelles de la voie retour, et montrent l'impact de la coordination dynamique d'interférences sur les performances d'un système satellite. Parmi les solutions avancées, la coordination dynamique du choix du ModCod et le schéma 6HC semblent être les deux approches les plus prometteuses pour une mise en place dans des systèmes réels, à court et moyen termes.

À court terme, il serait intéressant d'étendre l'évaluation des performances du schéma 6HC en voie aller et retour à des conditions plus réalistes, notamment du point de vue des dynamiques du système et de l'hétérogénéité des conditions de transmission. Par exemple, prendre en compte la dynamique et l'hétérogénéité des demandes sur l'ensemble des utilisateurs est un aspect important qui permettra de pousser la comparaison FFR-4 et 6HC. De même, l'intégration d'un modèle dynamique et non uniforme des conditions météorologiques pourrait apporter une confiance supplémentaire dans la pertinence de ce schéma, et de sa robustesse.

Dans cette thèse, nous avons mis en exergue l'importance de la coordination dynamique des interférences tout en soulignant les gains importants qui peuvent être obtenus grâce à elle. La coordination dynamique du choix du ModCod en est un exemple simple et peu complexe du point de vue algorithmique, laissant espérer une possible mise en place à moyen terme. Si la coordination peut être assez coûteuse à mettre en place de manière globale, une coordination locale apporte déjà des gains importants, malgré une légère perte de performances. Afin de diminuer ces pertes, il serait intéressant de combiner cette approche avec des techniques avancées d'atténuation d'interférences comme la suppression successive d'interférences. En effet, les faisceaux coordonnés disposent de plusieurs copies de chaque transmission, avec de grandes différences de puissance de réception, ce qui est un cas favorable pour ce type de techniques.

Enfin, à plus long terme, il serait intéressant d'adapter nos travaux à d'autres types de systèmes satellitaires. Par exemple, les récents projets de mégaconstellations vont poser des problèmes similaires de gestion des interférences, avec une dimension supplémentaire de la mobilité des satellites à orbite basse et donc une topologie dynamique. De même, l'intégration des systèmes satellitaires dans les systèmes terrestres est un des sujets forts de l'industrie spatiale pour lequel nos travaux pourraient être adaptés. En effet, la gestion des interférences y a une importance capitale, et ce dans un contexte hybride, que ce soit par rapport à l'hétérogénéité des ressources, aux différentes échelles temporelles ou spatiales ou encore aux contraintes héritées des deux mondes.

PUBLICATIONS

Revues internationales

[152] : COUBLE, Y., ROSENBERG, C., CHAPUT, E., DUPÉ, J.-B., BAUDOIN, C., AND BEYLOT, A.-L. Two-Color Scheme For A Multi-Beam Satellite Return Link: Impact Of Interference Coordination. *IEEE Journal on Selected Area in Communications* 36, 4 (May 2018), pp. 1–11

Conférence internationale avec comité de relecture

[150] : COUBLE, Y., CHAPUT, E., DELEU, T., BAUDOIN, C., DUPÉ, J.-B., BÉS, C., AND BEYLOT, A.-L. Interference-aware frame optimization for the return link of a multi-beam satellite. In *2017 IEEE International Conference on Communications* (Paris, May 2017), pp. 1–6

En soumission

[162] : COUBLE, Y., CHAPUT, E., DUPÉ, J.-B., BÉS, C., DELEU, T., BAUDOIN, C., AND BEYLOT, A.-L. Performance Evaluation of Aggressive Frequency Reuse Schemes in the Return Link of Multi-Beam Satellites. In *en soumission*

Conférence nationale avec comité de relecture

[151] : COUBLE, Y., CHAPUT, E., DELEU, T., BAUDOIN, C., DUPÉ, J.-B., BÈS, C., AND BEYLOT, A.-L. De la coordination optimale d'interférence sur le lien montant. In *Rencontres Francophones Sur La Conception de Protocoles, l'Évaluation de Performance et l'Expérimentation Des Réseaux de Communication* (Quiberon, France, May 2017), pp. 1–4

Brevets

[161] : BAUDOIN, C., COUBLE, Y., DELEU, T., DUPÉ, J.-B., AND CHAPUT, E. Procédé d'allocation de fréquences dans un système de radiocommunication satellitaire multifaisceaux, et système associé, 2018

BIBLIOGRAPHIE

- [1] CLARKE, A. C. Extra-terrestrial relays. *Wireless Worlds* (Oct. 1945), pp. 305–308.
- [2] GUIDOTTI, A., VANELLI-CORALLI, A., CAUS, M., BAS, J., COLAVOLPE, G., FOGGI, T., CIONI, S., MODENINI, A., AND TARCHI, D. Satellite-enabled LTE systems in LEO constellations. In *2017 IEEE International Conference on Communications Workshops (ICC Workshops)* (May 2017), pp. 876–881.
- [3] KODHELI, O., GUIDOTTI, A., AND VANELLI-CORALLI, A. Integration of Satellites in 5G through LEO Constellations. In *GLOBECOM 2017 - 2017 IEEE Global Communications Conference* (Dec. 2017), pp. 1–6.
- [4] ETSI. DVB-RCS (TR 101 790) : Interaction channel for satellite distribution systems. In *Digital Video Broadcasting (DVB) : Return Channel via Satellite (DVB-RCS)*. 2001.
- [5] KWAN, R., AND LEUNG, C. A Survey of Scheduling and Interference Mitigation in LTE. *Journal of Electrical and Computer Engineering 2010* (Jan. 2010).
- [6] PATEROMICHELAKIS, E., SHARIAT, M., UL QUDDUS, A., AND TAFAZOLLI, R. On the Evolution of Multi-Cell Scheduling in 3GPP LTE / LTE-A. *IEEE Communications Surveys & Tutorials 15*, 2 (22), pp. 701–717.
- [7] ZHILI, S. *Satellite Networking : Principles and Protocols*. Wiley, 2005.
- [8] EVANS, B. G., THOMPSON, P. T., CORAZZA, G. E., VANELLI-CORALLI, A., AND CANDREVA, E. A. 1945-2010 : 65 Years of Satellite History From Early Visions to Latest Missions. *Proceedings of the IEEE 99*, 11 (Nov. 2011), pp. 1840–1857.
- [9] ETSI. DVB-RCS2 (TS 101 545-1) : Overview and System Level specification. In *Digital Video Broadcasting (DVB) ; Second Generation DVB Interactive Satellite System (DVB-RCS2)*, v1.2.1 ed. 2014.
- [10] AHMED, T., DUBOIS, E., DUPÉ, J.-B., FERRÚS, R., GÉLARD, P., AND KUHN, N. Software-defined satellite cloud RAN. *International Journal of Satellite Communications and Networking 36*, 1 (2018), pp. 108–133.
- [11] WIKIPEDIA. Polarisation circulaire. *Wikipédia* (2017).
- [12] HIRSCH, A., BOSSHARD, P., LE BOULC’H, D., AND PRESSENSE, J. Systeme de radiocommunications satellitaire multifaisceaux large bande a reutilisation ameliee de frequences sur voie aller et procede de reutilisation associe, 2015.
- [13] MARAL, G., AND BOUSQUET, M. *Satellite Communications Systems : Systems, Techniques and Technology*. John Wiley & Sons, 2011.
- [14] KYRGAZOS, A., EVANS, B., THOMPSON, P., MATHIOPOULOS, P. T., AND PAPAHRALABOS, S. A terabit/second satellite system for European broadband

- access : A feasibility study. *International Journal of Satellite Communications and Networking* 32, 2 (Mar. 2014), pp. 63–92.
- [15] PEREZ-TRUFERO, J., EVANS, B. G., DERVIN, M., AND BAUDOIN, C. High Throughput Satellite System with Q/V-band gateways and its integration with terrestrial broadband communication networks. In *32nd AIAA International Communications Satellite Systems Conference* (2014), American Institute of Aeronautics and Astronautics.
- [16] PALACIN, B., FONSECA, N. J. G., ROMIER, M., CONTRERES, R., ANGEVAIN, J. C., TOSO, G., AND MANGENOT, C. Multibeam antennas for very high throughput satellites in Europe : Technologies and trends. In *2017 11th European Conference on Antennas and Propagation* (Mar. 2017), pp. 2413–2417.
- [17] DE COLA, T., GINESI, A., GIAMBENE, G., POLYZOS, G. C., SIRIS, V. A., FOTIOU, N., AND THOMAS, Y. Network and Protocol Architectures for Future Satellite Systems. *Foundations and Trends in Networking* 12, 1-2 (Sept. 2017), pp. 1–161.
- [18] MACDONALD, V. Advanced Mobile Phone Service : The Cellular Concept. pp. 15–41.
- [19] ETSI. DVB-S2 (EN302 307-1) : DVB-S2. In *Digital Video Broadcasting (DVB) ; Second Generation Framing Structure, Channel Coding and Modulation Systems for Broadcasting, Interactive Services, News Gathering and Other Broadband Satellite Applications ;*, v1.4.1 ed. ETSI, 2014.
- [20] DUPE, J.-B. *Ordonnancement et Gestion Des Ressources Pour Un Système de Télécommunications Haut Débit : Optimisation de La Bande Passante Satellite*. Thèse de doctorat, Toulouse, INPT, Oct. 2015.
- [21] ETSI. DVB-RCS2 (EN301 545-2) : Lower Layers for Satellite standard. In *Digital Video Broadcasting (DVB) ; Second Generation DVB Interactive Satellite System (DVB-RCS2)*, v1.2.1 ed. ETSI, 2014.
- [22] KOSTER, A. *Frequency Assignment - Models and Algorithms*. Thèse de doctorat, Universiteit Maastricht, 1999.
- [23] KAMEL, M., HAMOUDA, W., AND YOUSSEF, A. Ultra-Dense Networks : A Survey. *IEEE Communications Surveys Tutorials* 18, 4 (2016), pp. 2522–2545.
- [24] DAMNJANOVIC, A., MONTOJO, J., WEI, Y., JI, T., LUO, T., VAJAPEYAM, M., YOO, T., SONG, O., AND MALLADI, D. A survey on 3GPP heterogeneous networks. *IEEE Wireless Communications* 18, 3 (June 2011), pp. 10–21.
- [25] HARTWANGER, C., AND SCHNEIDER, M. From modest multi beam towards VHTS : Feed system evolution at AIRBUS DS GmbH. In *2017 11th European Conference on Antennas and Propagation (EUCAP)* (Mar. 2017), pp. 1511–1515.
- [26] RAO, K. S., CUCHANSKI, M., AND TANG, M. Q. Multiple beam antenna concepts for satellite communications. In *Symposium on Antenna Technology and Applied Electromagnetics* (Aug. 1994), pp. 289–292.
- [27] BATS, P. D4.5.1 - Overall Strategy and Algorithms for Interference Management. Tech. rep., 2015.
- [28] RING, D. Mobile Telephony - Wide Area Coverage - Case 20564. Tech. rep., Bell Telephone Laboratories, Decembre 1947.

- [29] ADHIKARY, A., AL SAFADI, E., AND CAIRE, G. Massive MIMO and inter-tier interference coordination. In *2014 Information Theory and Applications Workshop* (2014), pp. 1–10.
- [30] RIVANO, H. *Modélisation et optimisation du partage de ressources dans les réseaux radio multi-sauts*. Habilitation à Diriger des Recherches, INSA Lyon, June 2014.
- [31] HEMAZRO, T. D., JAUMARD, B., AND MARCOTTE, O. A column generation and branch-and-cut algorithm for the channel assignment problem. *Computers & Operations Research* 35, 4 (Apr. 2008), pp. 1204–1226.
- [32] CAMINO, J.-T., ARTIGUES, C., HOUSSIN, L., AND MOURGUES, S. A Decomposition Method for Frequency Assignment in Multibeam Satellite Systems. In *International Conference on Operations Research and Enterprise Systems* (Lisbonne, Portugal, Jan. 2015).
- [33] AARDAL, K. I., VAN HOESEL, S. P. M., KOSTER, A. M. C. A., MANNINO, C., AND SASSANO, A. Models and solution techniques for frequency assignment problems. *Annals of Operations Research* 153, 1 (2007), pp. 79–129.
- [34] CHECKO, A., CHRISTIANSEN, H. L., YAN, Y., SCOLARI, L., KARDARAS, G., BERGER, M. S., AND DITTMANN, L. Cloud RAN for Mobile Networks - A Technology Overview. *IEEE Communications Surveys Tutorials* 17, 1 (2015), pp. 405–426.
- [35] D’AMICO, V., AND GIESE, J. ARTIST4G - Innovative scheduling and cross-layer design techniques for interference avoidance. Tech. rep., July 2016.
- [36] PARABONI, A., CAPSONI, C., AND GABELLINI, P. Mitigation techniques for multi-beam broadcast satellite services. In *Proceedings of the Fourth European Conference on Antennas and Propagation* (Apr. 2010), pp. 1–5.
- [37] NERI, M., CASADEI, M., VANELLI-CORALLI, A., AND CORAZZA, G. E. Spatial interference cancellation techniques for Mobile Satellite Systems. In *2006 First European Conference on Antennas and Propagation* (Nov. 2006), pp. 1–6.
- [38] ANDREWS, J. G. Interference cancellation for cellular systems : A contemporary overview. *IEEE Wireless Communications* 12, 2 (Apr. 2005), pp. 19–29.
- [39] BUI, H. C., LACAN, J., AND BOUCHERET, M. L. An enhanced multiple random access scheme for satellite communications. In *Wireless Telecommunications Symposium 2012* (Apr. 2012), pp. 1–6.
- [40] BUI, H. C., ZIDANE, K., LACAN, J., AND BOUCHERET, M. L. A Multi-Replica Decoding Technique for Contention Resolution Diversity Slotted Aloha. In *2015 IEEE 82nd Vehicular Technology Conference* (Sept. 2015), pp. 1–5.
- [41] GAUDENZI, R. D., AND HERRERO, O. D. R. Advances in Random Access protocols for satellite networks. In *2009 International Workshop on Satellite and Space Communications* (Sept. 2009), pp. 331–336.
- [42] CASINI, E., GAUDENZI, R. D., AND HERRERO, O. D. R. Contention Resolution Diversity Slotted ALOHA (CRDSA) : An Enhanced Random Access Schemefor Satellite Access Packet Networks. *IEEE Transactions on Wireless Communications* 6, 4 (Apr. 2007), pp. 1408–1419.
- [43] CLAZZER, F., KISSLING, C., AND MARCHESE, M. Enhancing Contention Resolution ALOHA using Combining Techniques. *IEEE Transactions on Communications*, 99 (Oct. 2017).

- [44] BOUSSEMART, V., MARINI, L., AND BERIOLI, M. Impact of scheduling in the return-link of multi-beam satellite MIMO systems. In *2012 IEEE Global Communications Conference* (Dec. 2012), pp. 3322–3327.
- [45] BOUSSEMART, V., BERIOLI, M., AND ROSSETTO, F. User scheduling for large multi-beam satellite MIMO systems. In *2011 Conference Record of the Forty Fifth Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers* (Nov. 2011), pp. 1800–1804.
- [46] DEBBAH, M., GALLINARO, G., MÜLLER, R., RINALDO, R., AND VERNUCCI, A. Interference Mitigation for the Reverse-Link of Interactive Satellite Networks. In *Proceedings of 9th International Workshop on Signal Processing for Space Communications* (Jan. 2006), vol. 1.
- [47] LOMBARDO, F., VANELLI-CORALLI, A., CANDREVA, E. A., AND CORAZZA, G. E. Multi-gateway interference cancellation techniques for the return link of multi-beam broadband satellite systems. In *2012 IEEE Global Communications Conference* (Dec. 2012), pp. 3425–3430.
- [48] LOMBARDO, F., CANDREVA, E. A., THIBAUT, I., VANELLI-CORALLI, A., AND CORAZZA, G. E. Multi-user interference mitigation techniques for broadband multi-beam satellite systems. In *2011 Conference Record of the Forty Fifth Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers* (Nov. 2011), pp. 1805–1809.
- [49] 3GPP. Further advancements for E-UTRA physical layer aspects (Release 9). Tech. Rep. TR 36.814 V9.0.0, 2010.
- [50] VU, M., AND PAULRAJ, A. MIMO Wireless Linear Precoding. *IEEE Signal Processing Magazine* 24, 5 (Sept. 2007), pp. 86–105.
- [51] KIATMANAROJ, K., ARTIGUES, C., HOUSSIN, L., AND MESSINE, F. Frequency allocation in a SDMA satellite communication system with beam moving. In *2012 IEEE International Conference on Communications* (June 2012), pp. 3265–3269.
- [52] KIATMANAROJ, K., ARTIGUES, C., HOUSSIN, L., AND MESSINE, F. Frequency assignment in a SDMA satellite communication system with beam decentring feature. *Computational Optimization and Applications* 56, 2 (Oct. 2013), pp. 439–455.
- [53] JOROUGH, V., VÁZQUEZ, M. Á., PÉREZ-NEIRA, A. I., AND DEVILLERS, B. Onboard Beam Generation for Multibeam Satellite Systems. *IEEE Transactions on Wireless Communications* 16, 6 (June 2017), pp. 3714–3726.
- [54] JOROUGH, V., VÁZQUEZ, M. Á., AND PÉREZ-NEIRA, A. I. Precoding in Multigate-way Multibeam Satellite Systems. *IEEE Transactions on Wireless Communications* 15, 7 (July 2016), pp. 4944–4956.
- [55] GAO, Y., HE, Y., ZHENG, W., LI, B., AND WU, J. Resource scheduling for TH-precoding adoption on multi-beam satellite downlink signals. In *16th International Conference on Advanced Communication Technology* (Feb. 2014), pp. 1203–1207.
- [56] CHOI, J. P., AND CHAN, V. W. S. Resource management for advanced transmission antenna satellites. *IEEE Transactions on Wireless Communications* 8, 3 (Mar. 2009), pp. 1308–1321.
- [57] LI, M., COLLINGS, I. B., HANLY, S. V., LIU, C., AND WHITING, P. Multi-cell Coordinated Scheduling With Multiuser Zero-Forcing Beamforming. *IEEE Transactions on Wireless Communications* 15, 2 (Feb. 2016), pp. 827–842.

- [58] INTELSAT. Circular Polarization vs. Linear Polarization, 2013.
- [59] GONZALEZ, L., MCLAIN, C., AND HALL, W. A plausible CONOPS for frequency reuse at Ka-band on WGS system. In *2011 - MILCOM 2011 Military Communications Conference* (Nov. 2011), pp. 1676–1683.
- [60] OESTGES, C. A comprehensive model of dual-polarized channels : From experimental observations to an analytical formulation. In *2008 Third International Conference on Communications and Networking in China* (Aug. 2008), pp. 1071–1075.
- [61] HENDRIX, C. E., KULON, G., ANDERSON, C. S., AND HEINZE, M. A. Multigigabit transmission through rain in a dual polarization frequency reuse system : An experimental study. *IEEE Transactions on Communications* 41, 12 (Dec. 1993), pp. 1830–1837.
- [62] GLISIC, S. G. *Advanced Wireless Networks : 4G Technologies*. John Wiley & Sons, 2006.
- [63] NG, U. Y., KYRGIASOS, A., AND EVANS, B. Interference coordination for the return link of a multibeam satellite system. In *2014 7th Advanced Satellite Multimedia Systems Conference and the 13th Signal Processing for Space Communications Workshop* (Sept. 2014), pp. 366–373.
- [64] CHANG, H.-B., AND RUBIN, I. Optimal Downlink and Uplink Fractional Frequency Reuse in Cellular Wireless Networks. *IEEE Transactions on Vehicular Technology* 65, 4 (Apr. 2016), pp. 2295–2308.
- [65] NOVLAN, T. D., GANTI, R. K., GHOSH, A., AND ANDREWS, J. G. Analytical Evaluation of Fractional Frequency Reuse for OFDMA Cellular Networks. *IEEE Transactions on Wireless Communications* 10, 12 (Dec. 2011), pp. 4294–4305.
- [66] DAI, C., ZOU, G., AND YANG, B. Research on soft frequency reuse technology of multi-beam satellite communication system. In *2017 International Symposium on Intelligent Signal Processing and Communication Systems* (Nov. 2017), pp. 362–365.
- [67] BODDU, S., PHILIP, B. V., AND DAS, S. S. Analysis of Bandwidth Requirement of Users in Flexible Reuse Cellular Networks. *IEEE Communications Letters* 20, 3 (Mar. 2016), pp. 614–617.
- [68] STOLYAR, A. L., AND VISWANATHAN, H. Self-Organizing Dynamic Fractional Frequency Reuse in OFDMA Systems. In *2008 Proceedings IEEE INFOCOM* (Apr. 2008).
- [69] STOLYAR, A. L., AND VISWANATHAN, H. Self-Organizing Dynamic Fractional Frequency Reuse for Best-Effort Traffic through Distributed Inter-Cell Coordination. In *2009 Proceedings IEEE INFOCOM* (Apr. 2009), pp. 1287–1295.
- [70] RENGARAJAN, B., STOLYAR, A. L., AND VISWANATHAN, H. Self-organizing Dynamic Fractional Frequency Reuse on the uplink of OFDMA systems. In *2010 44th Annual Conference on Information Sciences and Systems* (Mar. 2010), pp. 1–6.
- [71] LI, Z., WANG, H., PAN, Z., LIU, N., AND YOU, X. Dynamic Load Balancing in 3GPP LTE Multi-Cell Fractional Frequency Reuse Networks. In *2012 IEEE Vehicular Technology Conference* (Sept. 2012), pp. 1–5.
- [72] PARK, U., KIM, H. W., OH, D. S., AND KU, B. J. Approach to Adaptive Resource Management Based on System Environments for Multi-beam Satellite Networks. In *2013 Seventh International Conference on Next Generation Mobile Apps, Services and Technologies* (Sept. 2013), pp. 165–169.

- [73] PARK, U., KIM, H. W., OH, D. S., AND KU, B.-J. A Dynamic Bandwidth Allocation Scheme for a Multi-spot-beam Satellite System. *ETRI Journal* 34, 4 (Aug. 2012), pp. 613–616.
- [74] PARK, U., KIM, H. W., OH, D. S., AND KU, B. J. Flexible Bandwidth Allocation Scheme Based on Traffic Demands and Channel Conditions for Multi-Beam Satellite Systems. In *2012 IEEE Vehicular Technology Conference* (Sept. 2012), pp. 1–5.
- [75] DEL CONSUELO HERNANDEZ RUIZ, G., Z, P., J, L., AND S, S. Dynamic Scheduling for High Throughput Satellites Employing Priority Code Scheme. *IEEE Access* 3 (2015), pp. 2044–2054.
- [76] COCCO, G., DE COLA, T., ANGELONE, M., AND KATONA, Z. Radio resource management strategies for DVB-S2 systems operated with flexible satellite payloads. In *Advanced Satellite Multimedia Systems Conference and the 14th Signal Processing for Space Communications Workshop (ASMS/SPSC), 2016 8th* (2016), IEEE, pp. 1–8.
- [77] COCCO, G., DE COLA, T., ANGELONE, M., KATONA, Z., AND ERL, S. Radio Resource Management Optimization of Flexible Satellite Payloads for DVB-S2 Systems. *IEEE Transactions on Broadcasting PP*, 99 (2017), pp. 1–15.
- [78] LEI, J., AND VAZQUEZ-CASTRO, M. A. Joint Power and Carrier Allocation for the Multibeam Satellite Downlink with Individual SINR Constraints. In *2010 IEEE International Conference on Communications* (May 2010), pp. 1–5.
- [79] LEI, J., AND VÁZQUEZ-CASTRO, M. Á. Multibeam satellite frequency/time duality study and capacity optimization. *Journal of Communications and Networks* 13, 5 (Oct. 2011), pp. 472–480.
- [80] CHANG, R. Y., TAO, Z., ZHANG, J., AND KUO, C.-C. J. Dynamic fractional frequency reuse (D-FFR) for multicell OFDMA networks using a graph framework. *Wireless Communications and Mobile Computing* 13, 1 (Jan. 2013), pp. 12–27.
- [81] CHANG, R. Y., TAO, Z., ZHANG, J., AND KUO, C. C. A Graph Approach to Dynamic Fractional Frequency Reuse (FFR) in Multi-Cell OFDMA Networks. In *2009 IEEE International Conference on Communications* (June 2009), pp. 1–6.
- [82] WANG, K., ZHAO, M., AND ZHOU, W. Graph-based dynamic frequency reuse in Cloud-RAN. In *2014 IEEE Wireless Communications and Networking Conference* (Apr. 2014), pp. 105–110.
- [83] SUBRAMANIAN, A. P., AND GUPTA, H. Fast spectrum allocation in coordinated dynamic spectrum access based cellular networks. In *New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks, 2007. DySPAN 2007. 2nd IEEE International Symposium On* (2007), IEEE, pp. 320–330.
- [84] SUBRAMANIAN, A. P., AL-AYYOUB, M., GUPTA, H., DAS, S. R., AND BUDDHIKOT, M. M. Near-Optimal Dynamic Spectrum Allocation in Cellular Networks. In *2008 3rd IEEE Symposium on New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks* (Oct. 2008), pp. 1–11.
- [85] ALI, S. H., AND LEUNG, V. C. M. Dynamic frequency allocation in fractional frequency reused OFDMA networks. *IEEE Transactions on Wireless Communications* 8, 8 (2009), pp. 4286–4295.
- [86] KIM, H. Y., KIM, H., CHO, Y. H., AND LEE, S. H. Self-Organizing Spectrum Breathing and User Association for Load Balancing in Wireless Networks. *IEEE Transactions on Wireless Communications* 15, 5 (May 2016), pp. 3409–3421.

- [87] SHAHSAVARI, S., AKAR, N., AND KHALAJ, B. H. Joint Cell Muting and User Scheduling in Multi-Cell Networks with Temporal Fairness. *arXiv preprint arXiv :1609.08476* (Sept. 2016).
- [88] ALOUF, S., ALTMAN, E., GALTIER, J., LALANDE, J.-F., AND TOUATI, C. Quasi-optimal bandwidth allocation for multi-spot MFTDMA satellites. In *2005 Proceedings IEEE INFOCOM* (2005), vol. 1, IEEE, pp. 560–571.
- [89] ALBERTI, X., CEBRIAN, J. M., BIANCO, A. D., KATONA, Z., LEI, J., VAZQUEZ-CASTRO, M. A., ZANUS, A., GILBERT, L., AND ALAGHA, N. System capacity optimization in time and frequency for multibeam multi-media satellite systems. In *2010 5th Advanced Satellite Multimedia Systems Conference and the 11th Signal Processing for Space Communications Workshop* (2010), pp. 226–233.
- [90] QI, F., GUANGXIA, L., SHAODONG, F., AND QIAN, G. Optimum power allocation based on traffic demand for multi-beam satellite communication systems. In *2011 IEEE 13th International Conference on Communication Technology* (Sept. 2011), pp. 873–876.
- [91] CHOI, J. P., AND CHAN, V. W. S. Optimum power and beam allocation based on traffic demands and channel conditions over satellite downlinks. *IEEE Transactions on Wireless Communications* 4, 6 (Nov. 2005), pp. 2983–2993.
- [92] ARAVANIS, A. I., SHANKAR, B., ARAPOGLOU, P. D., DANNOY, G., COTTIS, P. G., AND OTTERSTEN, B. Power Allocation in Multibeam Satellite Systems : A Two-Stage Multi-Objective Optimization. *IEEE Transactions on Wireless Communications* 14, 6 (June 2015), pp. 3171–3182.
- [93] QI, T., AND WANG, Y. Energy-efficient power allocation over multibeam satellite downlinks with imperfect CSI. In *2015 International Conference on Wireless Communications Signal Processing* (Oct. 2015), pp. 1–5.
- [94] SON, K., CHONG, S., AND DE VECIANA, G. Dynamic Association for Load Balancing and Interference Avoidance in Multi-cell Networks. In *2007 5th International Symposium on Modeling and Optimization in Mobile, Ad Hoc and Wireless Networks and Workshops* (Apr. 2007), pp. 1–10.
- [95] FOOLADIVANDA, D., AND ROSENBERG, C. Joint Resource Allocation and User Association for Heterogeneous Wireless Cellular Networks. *IEEE Transactions on Wireless Communications* 12, 1 (2013), pp. 248–257.
- [96] EGUIZÁBAL, M., AND HERNÁNDEZ, Á. Joint dynamic resource allocation and load balancing-cell selection in LTE-A HetNet scenarios based on Type 1 inband relay deployments. *Computer Networks* 100 (May 2016), pp. 90–109.
- [97] LAHOUD, S., KHAWAM, K., MARTIN, S., FENG, G., LIANG, Z., AND NASREDDINE, J. Energy-Efficient Joint Scheduling and Power Control in Multi-Cell Wireless Networks. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications* 34, 12 (Dec. 2016), pp. 3409–3426.
- [98] DOUIK, A., DAHROUJ, H., AL-NAFFOURI, T. Y., AND ALOUINI, M. S. Coordinated Scheduling and Power Control in Cloud-Radio Access Networks. *IEEE Transactions on Wireless Communications* 15, 4 (Apr. 2016), pp. 2523–2536.
- [99] KWAN, R., LEUNG, C., AND ZHANG, J. Multiuser Scheduling on the Downlink of an LTE Cellular System. *Research Letters in Communications* 2008 (Jan. 2008).

- [100] KWAN, R., LEUNG, C., AND ZHANG, J. Proportional Fair Multiuser Scheduling in LTE. *IEEE Signal Processing Letters* 16, 6 (June 2009), pp. 461–464.
- [101] AYDIN, M. E., KWAN, R., WU, J., AND ZHANG, J. Multiuser Scheduling on the LTE Downlink with Simulated Annealing. In *2011 IEEE 73rd Vehicular Technology Conference* (May 2011), pp. 1–5.
- [102] VENTURINO, L., ZAPPONE, A., RISI, C., AND BUZZI, S. Energy-Efficient Scheduling and Power Allocation in Downlink OFDMA Networks With Base Station Coordination. *IEEE Transactions on Wireless Communications* 14, 1 (Jan. 2015), pp. 1–14.
- [103] NGUYEN, T.-D., AND HAN, Y. A Proportional Fairness Algorithm with QoS Provision in Downlink OFDMA Systems. *IEEE Communications Letters* 10, 11 (Nov. 2006), pp. 760–762.
- [104] MAKKI, B., SVENSSON, T., COCCO, G., DE COLA, T., AND ERL, S. On the throughput of the return-link multi-beam satellite systems using genetic algorithm-based schedulers. In *2015 IEEE International Conference on Communications* (June 2015), pp. 838–843.
- [105] CHRISTOPOULOS, D., CHATZINOTAS, S., AND OTTERSTEN, B. Multicast Multi-group Precoding and User Scheduling for Frame-Based Satellite Communications. *IEEE Transactions on Wireless Communications* 14, 9 (Sept. 2015), pp. 4695–4707.
- [106] LÓPEZ-PÉREZ, D., CHU, X., VASILAKOS, A. V., AND CLAUSSEN, H. On Distributed and Coordinated Resource Allocation for Interference Mitigation in Self-Organizing LTE Networks. *IEEE/ACM Transactions on Networking* 21, 4 (Aug. 2013), pp. 1145–1158.
- [107] LÓPEZ-PÉREZ, D., LADÁNYI, Á., JÜTTNER, A., RIVANO, H., AND ZHANG, J. Optimization method for the joint allocation of modulation schemes, coding rates, resource blocks and power in self-organizing LTE networks. In *2011 Proceedings IEEE INFOCOM* (Apr. 2011), pp. 111–115.
- [108] ZHANG, H., VENTURINO, L., PRASAD, N., LI, P., RANGARAJAN, S., AND WANG, X. Weighted Sum-Rate Maximization in Multi-Cell Networks via Coordinated Scheduling and Discrete Power Control. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications* 29, 6 (June 2011), pp. 1214–1224.
- [109] CHEN, H., JIANG, Y., XU, J., AND HU, H. Energy-Efficient Coordinated Scheduling Mechanism for Cellular Communication Systems with Multiple Component Carriers. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications* 31, 5 (May 2013), pp. 959–968.
- [110] SEDIQ, A. B., SCHOENEN, R., YANIKOMEROGLU, H., AND SENARATH, G. Optimized Distributed Inter-Cell Interference Coordination (ICIC) Scheme Using Projected Subgradient and Network Flow Optimization. *IEEE Transactions on Communications* 63, 1 (Jan. 2015), pp. 107–124.
- [111] GARCIA, V., CHEN, C. S., ZHOU, Y., AND SHI, J. Gibbs Sampling Based Distributed OFDMA Resource Allocation. *Science China Information Sciences* (2014).
- [112] W CHO, J., MO, J., AND CHONG, S. Joint network-wide opportunistic scheduling and power control in multi-cell networks. *IEEE Transactions on Wireless Communications* 8, 3 (Mar. 2009), pp. 1520–1531.

- [113] WENGERTER, C., OHLHORST, J., AND VON ELBWART, A. G. E. Fairness and throughput analysis for generalized proportional fair frequency scheduling in OFDMA. In *2005 IEEE 61st Vehicular Technology Conference* (May 2005), vol. 3, pp. 1903–1907.
- [114] FRANK, P., MÜLLER, A., DROSTE, H., AND SPEIDEL, J. Cooperative interference-aware joint scheduling for the 3GPP LTE uplink. In *21st Annual IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications* (Sept. 2010), pp. 2216–2221.
- [115] NARAYANAN, L. Channel assignment and graph multicoloring. *Handbook of wireless networks and mobile computing* 8 (2002), pp. 71–94.
- [116] YANG, Q., JIANG, T., JIANG, C., HAN, Z., AND ZHOU, Z. Joint Optimization of User Grouping and Transmitter Connection on Multi-Cell SNR Blind Interference Alignment. *IEEE Access* 4 (2016), pp. 4974–4988.
- [117] SARKAR, S., AND STVARAJAN, K. N. Channel assignment algorithms satisfying cochannel and adjacent channel reuse constraints in cellular mobile networks. In *Proceedings of the IEEE Computer and Communications Societies*. (Mar. 1998), vol. 1, pp. 59–68.
- [118] SARKAR, S., AND SIVARAJAN, K. N. Hypergraph models for cellular mobile communication systems. *IEEE Transactions on Vehicular Technology* 47, 2 (May 1998), pp. 460–471.
- [119] ZHANG, H., SONG, L., AND HAN, Z. Radio Resource Allocation for Device-to-Device Underlay Communication Using Hypergraph Theory. *IEEE Transactions on Wireless Communications* 15, 7 (July 2016), pp. 4852–4861.
- [120] ZHANG, H., SONG, L., LI, Y., AND LI, G. Y. Hypergraph Theory : Applications in 5G Heterogeneous Ultra-Dense Networks. *IEEE Communications Magazine* 55, 12 (Decembre 2017), pp. 70–76.
- [121] LI, H., ZHU, Z., GAO, Z., WANG, J., AND UMEHIRA, M. Dynamic channel assignment scheme with cooperative beam forming for multi-beam mobile satellite networks. In *2014 Sixth International Conference on Wireless Communications and Signal Processing* (Oct. 2014), pp. 1–5.
- [122] LU, X., NI, Q., LI, W., AND ZHANG, H. Dynamic User Grouping and Joint Resource Allocation With Multi-Cell Cooperation for Uplink Virtual MIMO Systems. *IEEE Transactions on Wireless Communications* 16, 6 (June 2017), pp. 3854–3869.
- [123] BRANDT, R., AND BENGTTSSON, M. Joint Coordinated Precoding and Discrete Rate Selection in Multicell MIMO Networks. *Submitted to IEEE Signal Processing Letters* (Apr. 2016).
- [124] LOPEZ-PEREZ, D. *Practical Models and Optimisation Methods for Inter-Cell Interference Coordination in Self-Organising Cellular Networks*. Thèse de doctorat, University of Bedfordshire, 2013.
- [125] BARCELO-LLADO, J. E., VAZQUEZ-CASTRO, M. A., LEI, J., AND HJORUNGNES, A. Distributed Power and Carrier Allocation in Multibeam Satellite Uplink with Individual SINR Constraints. In *2009 IEEE Global Telecommunications Conference* (Nov. 2009), pp. 1–6.
- [126] ÖZCAN, Y., AND ROSENBERG, C. Efficient Loss-Aware Uplink Scheduling. In *2018 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)* (2018, apr), pp. 1–6.

- [127] CHIANG, M., HANDE, P., LAN, T., AND TAN, C. W. *Power Control in Wireless Cellular Networks*. 2008.
- [128] NASH, J. Non-Cooperative Games. *Annals of Mathematics* 54, 2 (1951), pp. 286–295.
- [129] VON NEUMANN, J., AND MORGENSTERN, O. *Theory of Games and Economic Behavior*. Princeton University Press, 1944.
- [130] SHI, Y., ZHU, G., LIN, S., DING, J., AND XU, S. Coalitional Game Theory for Cooperative Interference Management in Femtocell Networks. <https://www.hindawi.com/journals/mpe/2015/767649/>, 2015.
- [131] ZHANG, Z., SONG, L., HAN, Z., AND SAAD, W. Coalitional Games with Overlapping Coalitions for Interference Management in Small Cell Networks. *IEEE Transactions on Wireless Communications* 13, 5 (May 2014), pp. 2659–2669.
- [132] SUN, C., PENG, M., ZHANG, B., SUN, Y., LI, Y., AND WANG, C. A Coalitional Game Scheme for Cooperative Interference Management in Cloud Radio Access Networks. *Trans. Emerg. Telecommun. Technol.* 25, 9 (Sept. 2014), pp. 954–964.
- [133] NASH, J. F. Equilibrium points in n-person games. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 36, 1 (1950), pp. 48–49.
- [134] CHIANG, M. An Axiomatic Theory of Fairness, 2011.
- [135] DANIEL, L., AND NARAYANAN, K. Congestion Control 2 : Utility, Fairness and Optimization in Resource Allocation. In *Mathematical Modelling for Computer Networks- Part I*. 2013.
- [136] LE BOUDEC, J.-Y. *Rate Adaptation, Congestion Control and Fairness : A Tutorial*. Citeseer, 2005.
- [137] JAIN, R., CHIU, D., AND HAWE, W. A Quantitative Measure Of Fairness And Discrimination For Resource Allocation In Shared Computer Systems. *EC Research Report TR-301* (Sept. 1998).
- [138] JOE-WONG, C., SEN, S., LAN, T., AND CHIANG, M. Multiresource Allocation : Fairness-efficiency Tradeoffs in a Unifying Framework. *IEEE/ACM Transactions on Networking* 21, 6 (Dec. 2013), pp. 1785–1798.
- [139] KELLY, F. Charging and rate control for elastic traffic. *Transactions on Emerging Telecommunications Technologies* 8, 1 (1997), pp. 33–37.
- [140] KUSHNER, H., AND WHITING, P. Convergence of Proportional-Fair Sharing Algorithms Under General Conditions. *IEEE Transactions on Wireless Communications* 3, 4 (July 2004), pp. 1250–1259.
- [141] LAN, T., KAO, D., CHIANG, M., AND SABHARWAL, A. An Axiomatic Theory of Fairness in Network Resource Allocation. In *2010 Proceedings IEEE INFOCOM* (Mar. 2010).
- [142] LU, S., BHARGHAVAN, V., AND SRIKANT, R. Fair scheduling in wireless packet networks. *IEEE/ACM Transactions on Networking* 7, 4 (Aug. 1999), pp. 473–489.
- [143] YANG, J., YIFAN, Z., YING, W., AND PING, Z. Average rate updating mechanism in proportional fair scheduler for HDR. In *IEEE Global Telecommunications Conference, 2004.* (Nov. 2004), vol. 6, pp. 3464–3466.
- [144] SHI, H., PRASAD, R. V., ONUR, E., AND NIEMEGERES, I. G. M. M. Fairness in Wireless Networks :Issues, Measures and Challenges. *IEEE Communications Surveys Tutorials* 16, 1 (2014), pp. 5–24.

- [145] SAWANT, U., AND AKL, R. A novel metric to study the performance of sectorized fractional frequency reuse techniques in LTE. In *Wireless Telecommunications Symposium (WTS), 2017* (2017), IEEE, pp. 1–7.
- [146] VISWANATH, P., TSE, D. N. C., AND LAROIA, R. Opportunistic beamforming using dumb antennas. *IEEE Transactions on Information Theory* 48, 6 (June 2002), pp. 1277–1294.
- [147] LI, L., PAL, M., AND YANG, Y. R. Proportional fairness in multi-rate wireless LANs. In *2008 Proceedings IEEE INFOCOM* (Apr. 2008), pp. 1004–1012.
- [148] HAN, Z., JI, Z., AND LIU, K. J. R. Fair multiuser channel allocation for OFDMA networks using Nash bargaining solutions and coalitions. *IEEE Transactions on Communications* 53, 8 (Aug. 2005), pp. 1366–1376.
- [149] GUROBI OPTIMIZATION, I. *Gurobi Optimizer Reference Manual*. 2016.
- [150] COUBLE, Y., CHAPUT, E., DELEU, T., BAUDOIN, C., DUPÉ, J.-B., BÈS, C., AND BEYLOT, A.-L. Interference-aware frame optimization for the return link of a multi-beam satellite. In *2017 IEEE International Conference on Communications* (Paris, May 2017), pp. 1–6.
- [151] COUBLE, Y., CHAPUT, E., DELEU, T., BAUDOIN, C., DUPÉ, J.-B., BÈS, C., AND BEYLOT, A.-L. De la coordination optimale d’interférence sur le lien montant. In *Rencontres Francophones Sur La Conception de Protocoles, l’Évaluation de Performance et l’Expérimentation Des Réseaux de Communication* (Quiberon, France, May 2017), pp. 1–4.
- [152] COUBLE, Y., ROSENBERG, C., CHAPUT, E., DUPÉ, J.-B., BAUDOIN, C., AND BEYLOT, A.-L. Two-Color Scheme For A Multi-Beam Satellite Return Link : Impact Of Interference Coordination. *IEEE Journal on Selected Area in Communications* 36, 4 (May 2018), pp. 1–11.
- [153] ETSI. DVB-RCS2 (TR101 545-4) : Guidelines for Implementation and Use of EN301 545-2. In *Digital Video Broadcasting (DVB); Second Generation DVB Interactive Satellite System (DVB-RCS2)*, v1.1.1 ed. ETSI, 2014.
- [154] DIMITROV, S., ERL, S., BARTH, B., JAECKEL, S., KYRGAZOS, A., AND EVANS, B. G. Radio resource management techniques for high throughput satellite communication systems. In *2015 European Conference on Networks and Communications (EuCNC)* (2015), pp. 175–179.
- [155] KATONA, Z., CLAZZER, F., SHORTT, K., WATTS, S., LEXOW, H. P., AND WINDURATNA, R. Performance, cost analysis, and ground segment design of ultra high throughput multi-spot beam satellite networks applying different capacity enhancing techniques. *International Journal of Satellite Communications and Networking* 34, 4 (July 2016), pp. 547–573.
- [156] HAÏT, A. *Programmation Linéaire*, 2015. Support de cours.
- [157] GENDRON, B., AND GOUVEIA, L. Reformulations by Discretization for Piecewise Linear Integer Multicommodity Network Flow Problems. *Transportation Science* 51, 2 (June 2016), pp. 629–649.
- [158] YANG, Y., AND GAO, X. Proportional fair scheduling for dual-polarized multi-beam mobile satellite communications. In *2014 IEEE/CIC International Conference on Communications in China (ICCC)* (Oct. 2014), pp. 753–757.

-
- [159] NGUYEN, D., AND LE, L. B. Resource allocation for multibeam MISO satellite systems : Sum rate versus proportional fair optimization. In *2016 IEEE Wireless Communications and Networking Conference* (Apr. 2016), pp. 1–6.
- [160] MAGISTER. Satellite Network Simulator 3. <http://satellite-ns3.com/>, 2014.
- [161] BAUDOIN, C., COUBLE, Y., DELEU, T., DUPÉ, J.-B., AND CHAPUT, E. Procédé d'allocation de fréquences dans un système de radiocommunication satellitaire multifaisceaux, et système associé, 2018.
- [162] COUBLE, Y., CHAPUT, E., DUPÉ, J.-B., BÉS, C., DELEU, T., BAUDOIN, C., AND BEYLOT, A.-L. Performance Evaluation of Aggressive Frequency Reuse Schemes in the Return Link of Multi-Beam Satellites. In *en soumission*.

RÉDUCTION DU NOMBRE DE CONTRAINTES DE TSO-CAPA

Dans le chapitre 4, nous avons défini le problème TSO-CAPA suivant :

Problème TSO-CAPA :

$$\text{Maximiser}_{\mathbf{x}} \sum_{k,i \in \mathcal{U}_k} \sum_{c,m} x_{im}^{kc} r_m \quad (\text{A.1a})$$

s. t.

$$\forall c, \forall k \sum_{i \in \mathcal{U}_k} \sum_m x_{im}^{kc} \leq 1 \quad (\text{A.1b})$$

$$\forall k, \forall i \in \mathcal{U}_k \sum_c \sum_m x_{im}^{kc} \leq 1 \quad (\text{A.1c})$$

$$\forall c, \forall k, \forall i \in \mathcal{U}_k, \forall m \frac{P_i G_k(i)}{\gamma_m} \geq \mu + \sum_{\substack{k' \neq k \\ j \in \mathcal{U}_{k'}}} \sum_{m'} x_{jm'}^{k'c} P_j G_k(j) + (x_{im}^{kc} - 1)B \quad (\text{A.1d})$$

$$\forall c, \forall k, \forall i \in \mathcal{U}, \forall m \begin{cases} x_{im}^{kc} \in \{0, 1\} & \text{si } i \in \mathcal{U}_k \\ x_{im}^{kc} = 0 & \text{sinon} \end{cases} \quad (\text{A.1e})$$

Afin de diminuer le nombre de contraintes de ce problème (et des suivants), il est possible de regrouper toutes les contraintes A.1d d'un même faisceau k et d'une même porteuse c sous une seule contrainte.

$$\sum_{i,m} x_{im}^{kc} \frac{P_i G_k(i)}{\gamma_m} \geq \mu + \sum_{\substack{k' \neq k \\ j \in \mathcal{U}_{k'}}} \sum_{m'} x_{jm'}^{k'c} P_j G_k(j) + \left(\sum_{i,m} x_{im}^{kc} - 1 \right) B \quad (\text{A.2})$$

Il ne s'agit pas ici de la somme des contraintes A.1d, mais d'une équivalence logique, qui tient en particulier grâce à la contrainte A.1b. En effet, puisqu'il n'y a qu'un seul utilisateur qui est sélectionné pour transmettre sur le RB (t, c) (on rappelle que le TTI n'est pas précisé car le problème n'est défini que sur un seul TTI) et avec un unique

$N_U(k)$	Form. étendue	Form. compacte	Note
6	9.74s	3.02s	Gap* : 0.5%
6	5.98s	1.35s	Gap : 0.5%
7	150.1s	240s	Gap : 1%
7	65s	54s	Gap : 2%
8	166s	63s	Gap : 4.3%
8	297s	12s	Gap : 5%
10	99.1s	92s	Gap : 4.3%
10	52s	22s	Gap : 4.7%
12	19.79s	0.59s	Solution triviale (Gap 0.5%)
12	173s	35.6s	Gap : 0.9%
16	38.4s	0.76s	Solution triviale (Gap 0%)
16	44.8s	0.74s	Solution triviale (Gap 0%)

* : Écart entre *incumbent* (meilleure solution trouvée) et *best bound* (borne supérieure de l'optimal) au moment de l'interruption de la résolution.

TABLE A.1 Temps de résolution du problème **TSO-CAPA** sur quelques exemples.

ModCod, $\sum_{i,m} x_{im}^{kc} \frac{P_i G_k(i)}{\gamma_m}$ est égal à $\frac{P_{i^*} G_k(i^*)}{\gamma_{m^*}}$ où (i^*, m^*) est le couple utilisateur, **ModCod** sélectionné dans une solution faisable. De même pour l'autre côté de la contrainte. En termes plus concrets, il s'agit sinon de constater que l'on ne regarde le SINR d'un utilisateur que s'il est retenu dans la solution.

Cette réduction du nombre de contraintes nous a permis de réduire le temps de résolution de **TSO-CAPA** dans la majorité des cas et a donc été adoptée dans notre modèle. Par exemple, sur quelques scénarios du chapitre 4, et un pavage carré (9 faisceaux, 8 porteuses), en faisant varier le nombre d'utilisateur par faisceau, on obtient les résultats du tableau A.1, et on peut constater que le temps de résolution de la version initiale est régulièrement plus grand que celui de la version où les contraintes sont regroupées, même si ce n'est pas systématiquement le cas et très variable selon la difficulté du scénario et d'une instance d'un scénario à l'autre.

ANNEXE B

RÉSULTATS DE LA DÉTERMINATION DU FACTEUR D'INTERFÉRENCE RÉSIDUEL POUR DIFFÉRENTS DEGRÉS DE COORDINATION

Pour chaque portée de coordination, une première étape consiste à déterminer expérimentalement la valeur du facteur d'interférence garantissant un $\text{PER} < 10^{-2}$ en moyenne. Ce facteur d'interférence ne concerne que les faisceaux hors de portée de coordination. Le tableau B.1 indique cette valeur $\eta^{1\%}$. Cette valeur n'étant pas très parlante, nous indiquons de plus la moyenne du rapport de l'interférence résiduelle moyenne¹ $\overline{I_{est}(k)}$ sur le bruit², ce qui permet de mieux appréhender l'importance de cette interférence résiduelle.

PAVAGE CARRÉ				PAVAGE HEXAGONAL			
Nature coordination	Portée	$\eta^{1\%}$	$\frac{\overline{I_{est}(k)}}{\mu}$	Nature coordination	Portée	$\eta^{1\%}$	$\frac{\overline{I_{est}(k)}}{\mu}$
RRR-4	$P = 2$	1.3	-11.9 dB	RRR-4	$P = 2$	1.3	-11.6 dB
RRR-2	$P = 2$	5.8	1.4 dB	RRR-2	$P = 2$	3.2	10. dB
COORDMCS-2	$P = 2$	1.2	-12.3 dB	COORDMCS-2	$P = 2$	1.5	-7.8 dB
COORDMCS-2	$P = 4$	1.2	-16.1 dB	COORDMCS-2	$P = 3$	1.3	-10.4 dB
RBO-PF-2	$P = 2$	0.85	-13.8 dB	COORDMCS-2	$P = 4$	1.3	-15.2 dB
RBO-PF-2	$P = 4$	1.0	-16.9 dB	RBO-PF-2	$P = 2$	1.5	-7.8 dB
				RBO-PF-2	$P = 3$	0.87	-12.1 dB
				RBO-PF-2	$P = 4$	0.87	-16.9 dB

TABLE B.1 Détermination du facteur d'interférence optimal pour un $\text{PER} \leq 10^{-2}$ pour toutes les portées de coordination considérées et les allocations de ressources **RRR**, **COORDMCS** et **RBO-PF**.

1. $\overline{I_{est}(k)}$ est la moyenne de l'interférence résiduelle sur tous les faisceaux et toutes les couleurs utilisées dans le faisceau.

2. Bruit thermique + autres interférences considérées comme du bruit (par exemple CPI)

EXTENSION DU SCHÉMA 6HC AU CAS À UNE POLARISATION

Le schéma de réutilisation de fréquence 6HC présenté dans le chapitre 6 peut facilement être étendu à un contexte sans utilisation des 2 polarisations, et à une réutilisation plus agressive. La figure C.1 présente cette extension en deux version : avec et sans réutilisation universelle de la zone centrale. Dans un contexte satellite, il est probablement plus avisé de ne pas réutiliser en FR-1 la zone centrale, mais plutôt en FR-2 ou FR-3, car comme montré dans le chapitre 6 sur les schémas FFR, cette réutilisation est trop intense pour être profitable.

On peut voir ce nouveau schéma comme un schéma FR-7 inversé (toutes les couleurs sauf une sont utilisées dans un faisceau). De plus, on peut y voir une certaine ressemblance avec le schéma d'Alcatel présenté dans la section 2.2.3 du chapitre 3. Cependant, à la différence de ce dernier, notre proposition ne réutilise pas la couleur de bordure car elle serait contre productive.

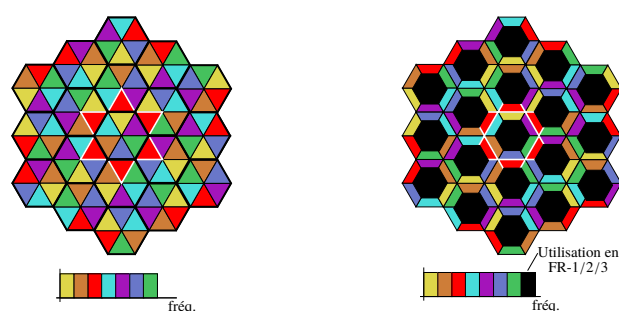


FIGURE C.1 Principe de l'extension du schéma 6HC, à un cas à une polarisation et à une réutilisation plus agressive sur un pavage hexagonal. Comme mis en évidence par les contours blancs on retrouve le principe du 6HC, où l'on concentre les pires interférents sur la même couleur, et en se privant d'utiliser cette couleur dans le faisceau.

Résumé

L'optimisation de l'utilisation des liens satellites est un enjeu majeur pour augmenter la rentabilité des systèmes satellites. L'augmentation de la réutilisation des fréquences est une des approches les plus prometteuses. La réutilisation des fréquences permet de transmettre plus d'informations sur une même fréquence, pour peu que les interférences entre les deux signaux ne soient pas trop importantes. Il est donc capital de contrôler l'impact de ces interférences, que ce soit via l'utilisation de schémas de réutilisation de fréquences, ou encore via des techniques de coordination dynamique des interférences, où la sélection des utilisateurs qui peuvent transmettre sur les mêmes fréquences est faite en prenant les interférences en compte.

Mots clés : Satellite, Télécommunications, Interférences, Optimisation, Allocation de ressources

Abstract

Optimizing satellite links is a major challenge to increase satellite systems profitability. Increasing the frequency reuse is one of the most promising approaches. Reusing multiple times the same frequency enables to transmit more information on the same frequency, as long as the two or more signals do not generate too high mutual interferences. It is therefore of capital importance to control these interference impacts, be it through the use of frequency reuse scheme or through the use of advanced dynamic interference coordination techniques, where the user selection is done with the knowledge of interference levels.

Keywords : Satellite, Telecommunications, Interferences, Optimization, Resource allocation