



## De la coordination optimale d'interférence sur le lien montant

Yoann Couble, Emmanuel Chaput, Thibault Deleu, Cédric Baudoin,  
Jean-Baptiste Dupé, Caroline Bès, André-Luc Beylot

### ► To cite this version:

Yoann Couble, Emmanuel Chaput, Thibault Deleu, Cédric Baudoin, Jean-Baptiste Dupé, et al.. De la coordination optimale d'interférence sur le lien montant. Rencontres Francophones sur la Conception de Protocoles, l'Évaluation de Performance et l'Expérimentation des Réseaux de Communication, May 2017, Quiberon, France. hal-01515190

**HAL Id: hal-01515190**

**<https://hal.science/hal-01515190>**

Submitted on 2 May 2017

**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.

# *De la coordination optimale d'interférence sur le lien montant*

Y. Couble<sup>1</sup>, E. Chaput<sup>1</sup>, T. Deleu<sup>2</sup>, C. Baudoin<sup>2</sup>, J-B. Dupé<sup>3</sup>, C. Bès<sup>3</sup> and A-L. Beylot<sup>1</sup>

<sup>1</sup>{yoann.couple,chaput,beylot}@enseeiht.fr, TésA/Université de Toulouse; INP; IRIT; F-31017 Toulouse, France

<sup>2</sup>{thibault.deleu,cedric.baudoin}@thalesaleniaspace.com, Thales Alenia Space, France

<sup>3</sup>{jean-baptiste.dupe,caroline.bes}@cnes.fr, CNES, France

---

L'augmentation continue de la demande en bande passante pousse les opérateurs à déployer toujours plus d'antennes, et les force à une réutilisation plus agressive des ressources spectrales. Allouer ces ressources aux utilisateurs devient alors une opération délicate, où les interférences jouent un rôle central. Sur le lien montant, le problème est d'autant plus difficile que le niveau d'interférence est fortement lié aux utilisateurs à qui les ressources sont allouées.

Cet article traite de l'affectation des ressources (spectrales et temporelles) pour les satellites multi-faisceaux. Cette thématique a été largement étudiée dans le contexte des réseaux cellulaires terrestres, le contexte satellitaire s'en distingue notamment par sa méthode d'accès, ce qui implique des modifications dans le modèle et dans sa méthode de résolution.

Une modélisation spécifique du problème est alors présentée, sous la forme d'un problème d'optimisation linéaire en nombres entiers, cherchant à maximiser l'efficacité spectrale du système. Puis l'impact de simplifications exploitant la structure du problème est étudié, permettant de calculer une borne supérieure pour des scénarios réalistes.

**Mots-clefs :** réutilisation de fréquences, optimisation, coordination d'interférences, uplink

---

## 1 Introduction

L'arrivée des antennes multi-faisceaux a permis d'augmenter drastiquement le nombre d'utilisateurs servis par un satellite. Cependant, il reste encore de nombreux défis à relever avant de pouvoir profiter pleinement de ce potentiel, en particulier au niveau de la couche MAC pour éviter ou résoudre les collisions dues à l'utilisation simultanée d'un même canal par plusieurs utilisateurs.

Les réseaux cellulaires ont répondu depuis de nombreuses années à ce problème, d'abord par la planification et l'utilisation des schémas statiques de réutilisation de fréquence tels que les schémas 3, 4 et 7 couleurs (cf. figure 1) ou encore FFR et ses dérivées, bien résumés dans [NKE14]. En LTE, des méthodes plus avancées de gestion d'interférences sont utilisées, alliant beamforming, precoding et ordonnancement coordonné [DG12].

Cependant, les réseaux cellulaires actuels utilisent l'OFDMA ou le SC-FDMA pour l'uplink, donnant la possibilité à un utilisateur de transmettre sur plusieurs sous-porteuses simultanément. En satellite, c'est le MF-TDMA qui a été retenu par l'ETSI pour le standard de la voie retour : le DVB-RCS2 [ETS12]. Pour cette méthode d'accès, les terminaux sont limités à une seule porteuse à la fois, ce qui comme nous le verrons en partie 2 change la nature du problème, et donc la manière de le résoudre.

Nous nous concentrerons donc ici uniquement sur le problème en MF-TDMA dans le contexte satellite, même si une grande partie de la modélisation peut être réutilisée pour les différents cas terrestres. L'essor de l'accès à internet par satellite étant assez récent, les travaux sur le lien retour (RL) d'un satellite sont assez rares. Parmi ceux-là [NKE14] tend à maximiser le  $C/I$  (*Signal-to-Interference Ratio*) minimal d'un faisceau à l'aide d'une heuristique gloutonne, mais sans considérer l'impact réel sur les débits. [BBR11] en revanche, propose d'utiliser de l'annulation successive d'interférences pour isoler une grappe de faisceaux et ne traiter le problème que localement à cette grappe.

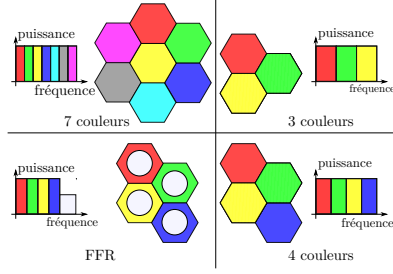


FIGURE 1: Plans de fréquences classiques

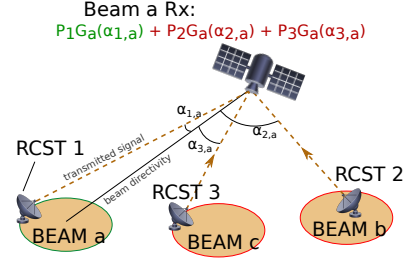


FIGURE 2: Principes des interférences voie retour

Aucun travail à la connaissance des auteurs ne formule le problème complet, ni ne prend en compte la flexibilité du DVB-RCS2 pour le choix des schémas de modulation et codage. C'est ce que nous proposons de faire dans cet article, en commençant par modéliser le problème d'allocation de ressources coordonné globalement sous la forme d'un problème d'optimisation, que nous analyserons et résoudrons dans la partie 2, avant d'en commenter les résultats dans la partie 3. Enfin, nous concluons l'étude en présentant des pistes d'extension de ce travail.

## 2 Modèle

Nous considérons ici un système satellite multi-faisceau comme illustré sur la figure 2, où un seul satellite sert un certain nombre de faisceaux, organisés selon une grille hexagonale. Nous supposons l'utilisation des deux polarisations circulaires, formant ainsi une base de réutilisation de fréquence de FRF = 1/2. Dans la suite nous ne nous intéressons qu'à l'une des deux polarisations, servant  $K$  faisceaux, chacun contenant  $N_{users}(k)$  utilisateurs, indicés par  $i_k$ . La trame MF-TDMA est composée de  $N_{tti}$  intervalles de transmissions (indiqués par  $t$ ) et  $N_{carriers}$  porteuses, indicées par  $c$ . Toutes les porteuses sont supposées identiques.

Un des apports du DVB-RCS2 est d'autoriser le choix d'un schéma de modulation et de codage (MCS) *juste-à-temps*, c'est à dire au moment de l'ordonnancement et non plus statiquement par porteuse. C'est ce nouveau degré de liberté que nous cherchons à exploiter ici pour pallier des niveaux d'interférences variables et déterminés à la volée.

### 2.1 Formulation

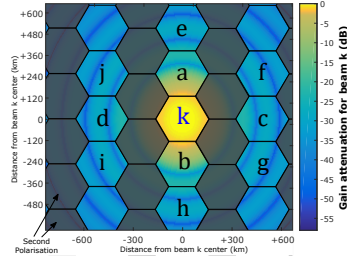
On note  $x_{i_k,m}^{t,c} \in \{0, 1\}$  la variable de décision indiquant si l'utilisateur  $i_k$  du faisceau  $k$  utilise le MCS  $m$  sur le slot temps/fréquence  $(t, c)$ . On peut alors exprimer le bilan de liaison de l'utilisateur  $i_k$  du faisceau  $k$  en fonction des  $x_{j_{k'},m'}^{t,c}$ . Puis, en s'inspirant de [LPLJ<sup>+</sup>11], on peut reformuler le bilan de liaison comme une condition à remplir pour qu'une transmission soit réussie, i.e. le SNIR (*Signal-to-Noise-plus-Interference Ratio*) de l'utilisateur doit être supérieur au SNIR seuil  $\Gamma_m^{thresh}$  du MCS :

$$x_{i,m}^{t,c} \frac{P_{i_k} G_k(i_k)}{\Gamma_m^{thresh}} \geq x_{i,m}^{t,c} (N + \sum_{k' \neq k} \sum_{j_{k'}, m'} x_{j_{k'}, m'}^{t,c} P_{j_{k'}} G_k(j_{k'})) \quad (1)$$

avec  $P_{i_k}$  la puissance d'émission de l'utilisateur  $i_k$ ,  $G_k(i_k)$  son gain par rapport au faisceau  $k$ , et  $N$  la puissance de bruit reçue sur une porteuse, incluant les autres types d'interférence (cross-polarisation, inter-canaux). Notons que c'est bien le gain de l'antenne  $k$  en réception de l'interfèrent  $j_{k'}$  qui nous importe et pas celui du beam  $k'$  car nous sommes en uplink.

La contrainte du MF-TDMA donnée en introduction s'exprime ainsi :  $\sum_{i_k, m} x_{i_k, m}^{t,c} \leq 1, \forall k, t, c$ . On peut noter que pour de l'OFDMA ou du SC-FDMA, il suffirait de remplacer cette contrainte par une contrainte sur la puissance à partager entre les sous-porteuses. Dans la suite, on supposera donc que la puissance d'émission d'un utilisateur est constante à l'échelle de la trame. D'autre part, on n'autorise évidemment qu'un seul utilisateur d'un même faisceau à émettre sur un slot temps/fréquence :  $\sum_{c, m} x_{i_k, m}^{t,c} \leq 1, \forall k, i_k, t$ .

Enfin, nous considérons ici seulement la maximisation de la capacité du système, sans se préoccuper d'équité, que nous laissons à de futurs travaux intégrant la demande des utilisateurs et une gestion temporelle. On obtient donc le problème d'optimisation linéaire en nombre entiers suivant :



| Portée $s$       | Ensemble $\Omega_s(k)$                               | $I_{est}(s)/N$ |
|------------------|------------------------------------------------------|----------------|
| ordre 1          | $\{a, b\}^\dagger$                                   | -7.5 dB        |
| ordre $\leq 1.5$ | $\{a, b, c, d\}$                                     | -12 dB         |
| ordre $\leq 2$   | $\{a, b, c, d, e, f, g, h, i, j\}$                   | -15 dB         |
| global           | $\llbracket 1, N_{beams} \rrbracket \setminus \{k\}$ | -inf dB        |

$^\dagger$  Beam letters refer to Fig. 3

FIGURE 3: Interférence subie par le faisceau  $k$

TABLE 1: Portées de coordination et estimation résiduelle

$$\text{Maximize}_{\mathbf{x}} \sum_{k, i_k} \sum_{t, c, m} x_{i_k, m}^{t, c} r_m \quad (2a)$$

$$\forall k, t, c \quad \sum_{i_k, m} x_{i_k, m}^{t, c} \leq 1 \quad (2b)$$

$$\forall k, i_k, t \quad \sum_{c, m} x_{i_k, m}^{t, c} \leq 1 \quad (2c)$$

$$\forall k, i_k, m, t, c \quad x_{i_k, m}^{t, c} \cdot \frac{P_{i_k} G_k(i_k)}{\Gamma_m^{thresh}} \geq (x_{i_k, m}^{t, c} - 1) \cdot \mathbf{B} + N + \sum_{k' \neq k} \sum_{j_{k'}, m'} x_{j_{k'}, m'}^{t, c} P_{j_{k'}} G_k(j_{k'}) \quad (2d)$$

$$\forall k, i_k, m, t, c \quad x_{i_k, m}^{t, c} \in \{0, 1\} \quad (2e)$$

où  $r_m$  est le débit du MCS  $m$ . Afin de linéariser la contrainte 1, on a utilisé en 2d une reformulation classique, consistant à utiliser un réel  $\mathbf{B}$  suffisamment grand, permettant de valider la contrainte quand  $x_{i_k, m}^{t, c} = 0$ .

## 2.2 Décompositions et Simplifications

Ce problème présente de nombreuses symétries (temporelles et fréquentielles), rendant le problème très long à résoudre sans le décomposer. Dans le cas de l'objectif de maximisation de capacité, le problème est décomposable en  $N_{tti}$  sous-problèmes identiques et indépendants. Du point de vue des porteuses, il est nécessaire de respecter la contrainte d'une seule chaîne de transmission. On désignera le problème correspondant à cette formulation TimeSlot Optimisation (TSO).

Un autre angle d'attaque est d'essayer de réduire les dépendances entre les faisceaux. Pour cela, on se propose d'assimiler l'interférence générée par les faisceaux "lointains" angulairement à un bruit constant, estimé. On peut pour se persuader de la pertinence de cette approximation regarder la figure 3. La table 1 présente différents schémas de coordination : seules les variables décisionnelles des utilisateurs d'un faisceau "à portée" du faisceau  $k$  sont prises en compte dans le bilan de liaison d'un utilisateur du faisceau  $k$ . L'interférence générée par les autres faisceaux est considérée constante et égale à  $I_{est}(s)$  pour la portée  $s$ , la valeur indiquée correspondant à la valeur maximisant la capacité, déterminée expérimentalement. La contrainte 2d est alors remplacée pour chacun des schémas de coordination par :

$$x_{i_k, m}^{t, c} \frac{P_{i_k} G_k(i_k)}{\Gamma_m^{thresh}} \geq (x_{i_k, m}^{t, c} - 1) \cdot \mathbf{B} + N + I_{est}(s) + \sum_{k' \in \Omega_s(k)} \sum_{j_{k'}, m'} x_{j_{k'}, m'}^{t, c} P_{j_{k'}} G_k(j_{k'}) \quad (3)$$

On peut remarquer que dans le cas  $s = \text{ordre} \leq 1$ , chaque colonne de faisceaux est décorrélée des autres, ce qui a pour effet de transformer le problème en plusieurs sous-problèmes de plus petite taille indépendants, accélérant encore une fois la résolution du problème initial.

Enfin, on définit une seconde famille d'heuristique pour résoudre le problème, qui traite séquentiellement chacune des porteuses, et retire temporairement de la liste des utilisateurs ceux qui ont déjà été servis sur une porteuse pour l'intervalle de transmission courant. De cette manière, on supprime la symétrie fréquentielle et l'on réduit grandement la complexité due au nombre de porteuses, tout en respectant toujours la contrainte 2c. On désigne par seqC-TSO cette seconde famille de problème.

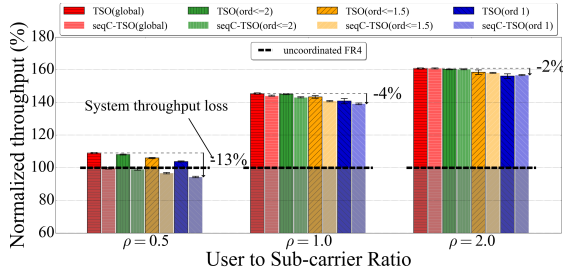


FIGURE 4: Performance des différentes solutions. Le nombre de porteuses est ici fixée à 8. ( $N_{tests} = 200$ )

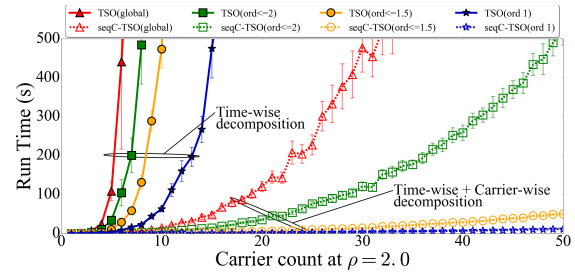


FIGURE 5: Temps de résolution du problème, en fonction de sa taille. ( $N_{tests} = 50$ )

### 3 Résultats et Conclusion

La résolution des différents problèmes exposés dans la section précédente a été réalisée à l'aide du solveur Gurobi [GO16], sur des scénarios à 30 faisceaux, générés aléatoirement en répartissant uniformément les utilisateurs sur l'ensemble des faisceaux, et 5 MCS. A chaque fois, les scénarios sont résolus pour chacun des schémas de coordination, pour TSO et seqC-TSO et comparés avec un schéma 4 couleurs non coordonné sur ce scénario particulier, donnant ensuite les valeurs moyennes que nous présentons ici avec leurs intervalles de confiances respectifs, à 95%. Toutes les puissances d'émission des utilisateurs sont considérées égales à 1 W. Le paramètre  $B$  est fixé à 50.

Sur la figure 4, on peut remarquer que les gains potentiel par rapport à un schéma 4 couleurs d'un schéma 2 couleurs optimisé sont très importants (de l'ordre de +60% dans les meilleurs cas). On note cependant une certaine perte d'optimalité entre la formulation initiale TSO(global) et les différentes approximations, plus ou moins importante selon la charge. Comme on pouvait s'y attendre, le traitement séquentiel des porteuses n'est pas optimal dans un cas sous-chargé, mais donne de très bonnes performances dans les autres cas. La figure 5 vient en revanche tempérer cette dernière analyse avec les temps de calculs de la solution. En effet, les formulations TSO peinent à calculer cette borne pour des tailles de problèmes importantes, tandis que seqC-TSO(ord 1) les résout avec succès. Enfin, il est intéressant de noter que seqC-TSO alloue en moyenne plus de slots que TSO, ce qui laisse penser qu'il aura de bonnes propriétés en terme d'équité.

En déterminant une borne supérieure réalisable pour chaque scénario, nos résultats montrent qu'il y a un important gain apporté par la coordination d'interférences. Nos algorithmes ne peuvent évidemment pas être pris tels quels pour de l'ordonnancement en temps réel, mais ils peuvent inspirer d'autres heuristiques d'ordonnancement approchant les performances des algorithmes présentés ici.

### Références

- [BBR11] V. Boussemart, M. Berlioli, and F. Rossetto. User scheduling for large multi-beam satellite MIMO systems. In *ASILOMAR*, 2011.
- [CCD<sup>+</sup>17] Y. Couble, E. Chaput, T. Deleu, C. Baudoin, J-B. Dupé, C. Bès, and A-L. Beylot. Interference-aware frame optimization for the return link of a multi-beam satellite. In *IEEE ICC*, 2017.
- [DG12] Valeria D'Amico and Jochen Giese. ARTIST4G : Innovative scheduling and cross-layer design techniques for interference avoidance. Technical report, 2012.
- [ETS12] ETSI. EN301 545-2 v1.2.1 : Second Generation DVB Interactive Satellite System. 2012.
- [GO16] Inc. Gurobi Optimization. Gurobi optimizer reference manual, 2016.
- [LPLJ<sup>+</sup>11] D. Lopez-Perez, A. Ladanyi, A. Jüttner, H. Rivano, and J. Zhang. Optimization Method for the Joint Allocation of Modulation Schemes, Coding Rates, Resource Blocks and Power in Self-Organizing LTE Networks. In *IEEE INFOCOM*, 2011.
- [NKE14] U. Y. Ng, A. Kyrgiazos, and B. Evans. Interference coordination for the return link of a multi-beam satellite system. In *ASMS/SPSC*, 2014.