

Ordonnancement et gestion des ressources pour un système de Télécommunications haut débit : Optimisation de la bande passante satellite

Jean-Baptiste DUPÉ¹

Directeur de Thèse : Professeur André-Luc BEYLOT²

¹Université de Toulouse; INP; TésA

²Université de Toulouse; INP; IRIT

Soutenance de Thèse – jeudi 1^{er} octobre – ENSEEIHT



- 1 Contexte de la Thèse
 - Motivations
 - Caractéristiques des systèmes de télécommunications par satellite
 - Architecture système retenue
- 2 Ordonnancement sur la voie Aller
 - Architecture de l'ordonnanceur
 - Techniques d'ordonnancement
 - Algorithme d'ordonnancement optimisé
 - Évaluation de performances
 - Conclusion intermédiaire
- 3 Allocation de Ressources sur la voie Retour
 - Architecture de la voie retour
 - Algorithme d'allocation de ressources
 - Évaluation de performances
 - Conclusion intermédiaire
- 4 Conclusion

Plan

- 1 Contexte de la Thèse
 - Motivations
 - Caractéristiques des systèmes de télécommunications par satellite
 - Architecture système retenue
- 2 Ordonnancement sur la voie Aller
- 3 Allocation de Ressources sur la voie Retour
- 4 Conclusion

Internet Partout ?

Quelques chiffres ...

- Accès à Internet fixe :
 - Horizon 2020 : 30 Mbits/s pour tous (Commission Européenne)
 - Taux de pénétration maximal du FTTH estimé : 80%¹
 - Longueur maximale cuivre pour 30 Mbits/s : 1.5 km
- Accès à Internet dans les transports :
 - Solution satellite encore coûteuses :
 - Aérien : ≈ 10 € par heure
 - Ferroviaire : ≈ 10 € par trajet
 - Solutions terrestres : capacité faible (quelques centaines de kbits/s²) et intermittente

Conséquence

Une des solutions est l'utilisation de satellites en orbite géostationnaire de grande capacité pour l'accès à Internet fixe et dans les transports.

1. Rapport Champsaur, 2014
2. GoGo Inflight Internet

Le satellite, une réponse adaptée ?

Avantages des satellites de télécommunications :

- Couverture très large (3 satellites pour une couverture quasi-mondiale)



Figure: Couverture Ka-Sat ©Eutelsat

Le satellite, une réponse adaptée ?

Avantages des satellites de télécommunications :

- Couverture très large (3 satellites pour une couverture quasi-mondiale)
- Coût limité de l'infrastructure au sol

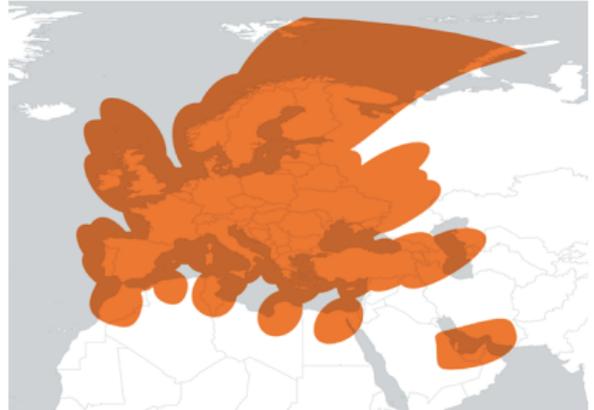


Figure: Couverture Ka-Sat ©Eutelsat

Le satellite, une réponse adaptée ?

Avantages des satellites de télécommunications :

- Couverture très large (3 satellites pour une couverture quasi-mondiale)
- Coût limité de l'infrastructure au sol
- Facilité de déploiement de nouveaux clients



Figure: Couverture Ka-Sat ©Eutelsat

Le satellite, une réponse adaptée ?

Avantages des satellites de télécommunications :

- Couverture très large (3 satellites pour une couverture quasi-mondiale)
- Coût limité de l'infrastructure au sol
- Facilité de déploiement de nouveaux clients
- Capacité importante (objectif 100Mbit/s par client pro pour THD-SAT)

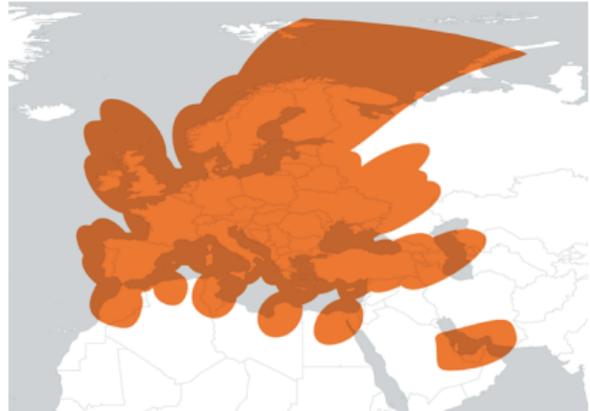


Figure: Couverture Ka-Sat ©Eutelsat

Le satellite, une réponse adaptée ?

Avantages des satellites de télécommunications :

- Couverture très large (3 satellites pour une couverture quasi-mondiale)
- Coût limité de l'infrastructure au sol
- Facilité de déploiement de nouveaux clients
- Capacité importante (objectif 100Mbit/s par client pro pour THD-SAT)

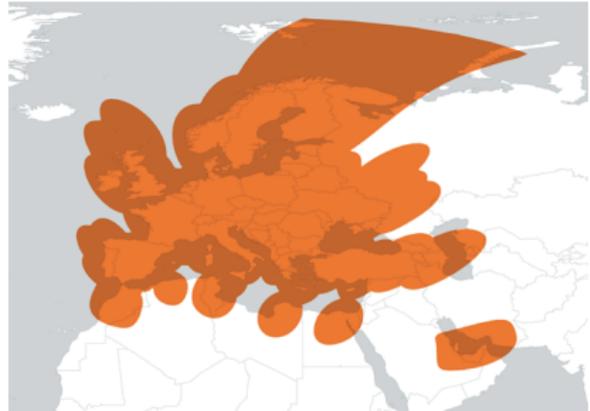


Figure: Couverture Ka-Sat ©Eutelsat

Le satellite, une réponse adaptée ?

Avantages des satellites de télécommunications :

- Couverture très large (3 satellites pour une couverture quasi-mondiale)
- Coût limité de l'infrastructure au sol
- Facilité de déploiement de nouveaux clients
- Capacité importante (objectif 100Mbit/s par client pro pour THD-SAT)

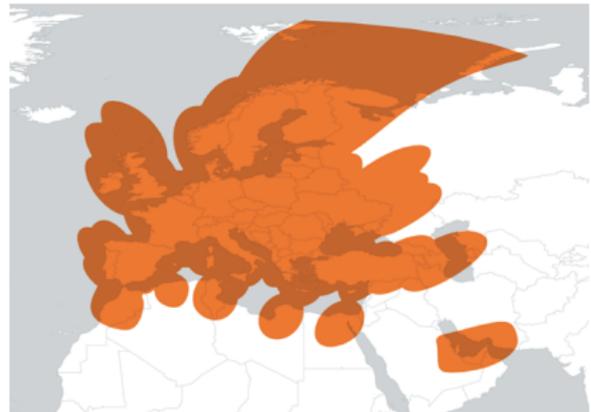


Figure: Couverture Ka-Sat ©Eutelsat

Sous quelles conditions, et avec quelles contraintes, peut-on utiliser le satellite pour l'accès à Internet haut débit ?

Systèmes de diffusion de télévision numérique

- Application majoritaire des télécommunications par satellite : diffusion de télévision.

Systèmes de diffusion de télévision numérique

- Application majoritaire des télécommunications par satellite : diffusion de télévision.
 - Analogique (TV-Recieve-Only, TVRO, 1980).

Systèmes de diffusion de télévision numérique

- Application majoritaire des télécommunications par satellite : diffusion de télévision.
 - Analogique (TV-Recieve-Only, TVRO, 1980).
 - Numérique (DVB-S, 1994).

Systèmes de diffusion de télévision numérique

- Application majoritaire des télécommunications par satellite : diffusion de télévision.
 - Analogique (TV-Recieve-Only, TVRO, 1980).
 - Numérique (DVB-S, 1994).
- Caractéristiques principales :

Systèmes de diffusion de télévision numérique

- Application majoritaire des télécommunications par satellite : diffusion de télévision.
 - Analogique (TV-Recieve-Only, TVRO, 1980).
 - Numérique (DVB-S, 1994).
- Caractéristiques principales :
 - Communication unidirectionnelle sur la voie Aller

Systèmes de diffusion de télévision numérique

- Application majoritaire des télécommunications par satellite : diffusion de télévision.
 - Analogique (TV-Recieve-Only, TVRO, 1980).
 - Numérique (DVB-S, 1994).
- Caractéristiques principales :
 - Communication unidirectionnelle sur la voie Aller
 - Partage *statique* des ressources

Systèmes de diffusion de télévision numérique

- Application majoritaire des télécommunications par satellite : diffusion de télévision.
 - Analogique (TV-Recieve-Only, TVRO, 1980).
 - Numérique (DVB-S, 1994).
- Caractéristiques principales :
 - Communication unidirectionnelle sur la voie Aller
 - Partage *statique* des ressources
- Ressources fréquentielles allouées au système :

Systèmes de diffusion de télévision numérique

- Application majoritaire des télécommunications par satellite : diffusion de télévision.
 - Analogique (TV-Recieve-Only, TVRO, 1980).
 - Numérique (DVB-S, 1994).
- Caractéristiques principales :
 - Communication unidirectionnelle sur la voie Aller
 - Partage *statique* des ressources
- Ressources fréquentielles allouées au système :
 - Bande C (4-8 GHz)

Systèmes de diffusion de télévision numérique

- Application majoritaire des télécommunications par satellite : diffusion de télévision.
 - Analogique (TV-Recieve-Only, TVRO, 1980).
 - Numérique (DVB-S, 1994).
- Caractéristiques principales :
 - Communication unidirectionnelle sur la voie Aller
 - Partage *statique* des ressources
- Ressources fréquentielles allouées au système :
 - Bande C (4-8 GHz)
 - Bande Ku (10-12 GHz)

Capacité, Demande et Partage des ressources

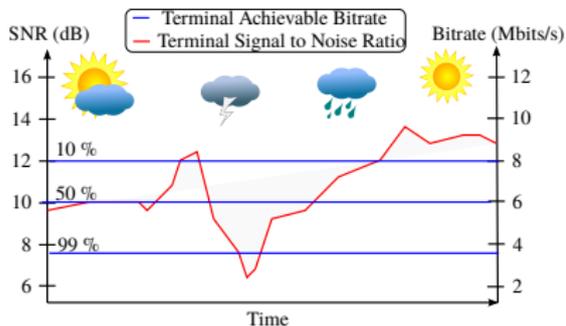


Figure: Modulation et Codage variables

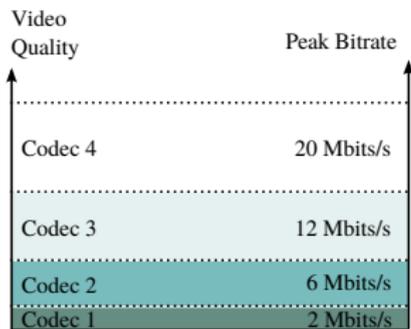


Figure: Débit en fonction du codec

Capacité, Demande et Partage des ressources

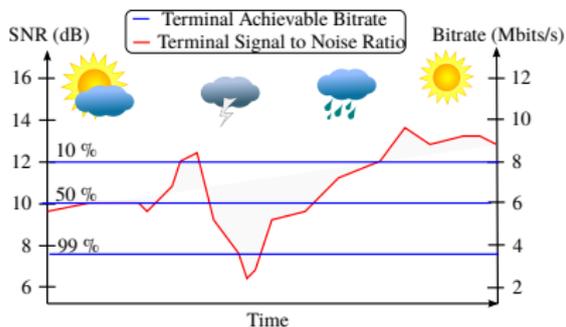


Figure: Modulation et Codage variables

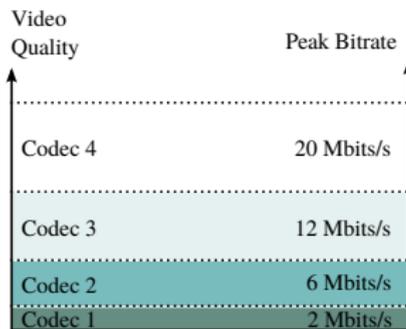


Figure: Débit en fonction du codec

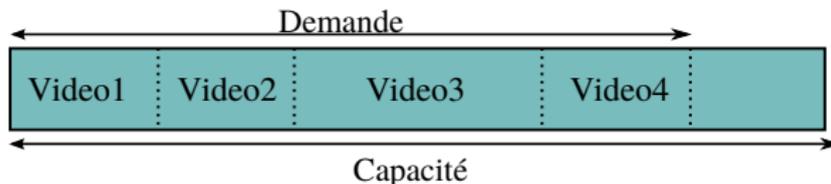


Figure: Répartition des ressources

Dernière génération de systèmes de télécommunications par satellite

- Voie retour satellite : DVB-RCS (1999)

Dernière génération de systèmes de télécommunications par satellite

- Voie retour satellite : DVB-RCS (1999)
 - Permet des communications bidirectionnelles satellite

Dernière génération de systèmes de télécommunications par satellite

- Voie retour satellite : DVB-RCS (1999)
 - Permet des communications bidirectionnelles satellite
 - Partage semi-statique des ressources (Capacité offerte fixe, adaptation à la demande).

Dernière génération de systèmes de télécommunications par satellite

- Voie retour satellite : DVB-RCS (1999)
 - Permet des communications bidirectionnelles satellite
 - Partage semi-statique des ressources (Capacité offerte fixe, adaptation à la demande).
- DVB-S2 (2003) et DVB-RCS2 (2012)

Dernière génération de systèmes de télécommunications par satellite

- Voie retour satellite : DVB-RCS (1999)
 - Permet des communications bidirectionnelles satellite
 - Partage semi-statique des ressources (Capacité offerte fixe, adaptation à la demande).
- DVB-S2 (2003) et DVB-RCS2 (2012)
 - Bande Ka (22-40 GHz)

Dernière génération de systèmes de télécommunications par satellite

- Voie retour satellite : DVB-RCS (1999)
 - Permet des communications bidirectionnelles satellite
 - Partage semi-statique des ressources (Capacité offerte fixe, adaptation à la demande).
- DVB-S2 (2003) et DVB-RCS2 (2012)
 - Bande Ka (22-40 GHz)
 - Adaptive Coding and Modulation (ACM)

Dernière génération de systèmes de télécommunications par satellite

- Voie retour satellite : DVB-RCS (1999)
 - Permet des communications bidirectionnelles satellite
 - Partage semi-statique des ressources (Capacité offerte fixe, adaptation à la demande).
- DVB-S2 (2003) et DVB-RCS2 (2012)
 - Bande Ka (22-40 GHz)
 - Adaptive Coding and Modulation (ACM)
 - Optimisation pour le trafic IP bidirectionnel (GSE/RLE)

Dernière génération de systèmes de télécommunications par satellite

- Voie retour satellite : DVB-RCS (1999)
 - Permet des communications bidirectionnelles satellite
 - Partage semi-statique des ressources (Capacité offerte fixe, adaptation à la demande).
- DVB-S2 (2003) et DVB-RCS2 (2012)
 - Bande Ka (22-40 GHz)
 - Adaptive Coding and Modulation (ACM)
 - Optimisation pour le trafic IP bidirectionnel (GSE/RLE)
- On observe une dynamique de la capacité et de la demande.

Dynamique de la Capacité

- ACM : Adaptive Coding and Modulation
- Principe : Adapter le taux de codage et la modulation aux conditions de propagation, dans le but de fournir un taux d'erreur binaire (TEB) constant.
- Suppose une voie retour pour la mesure de la qualité du lien.

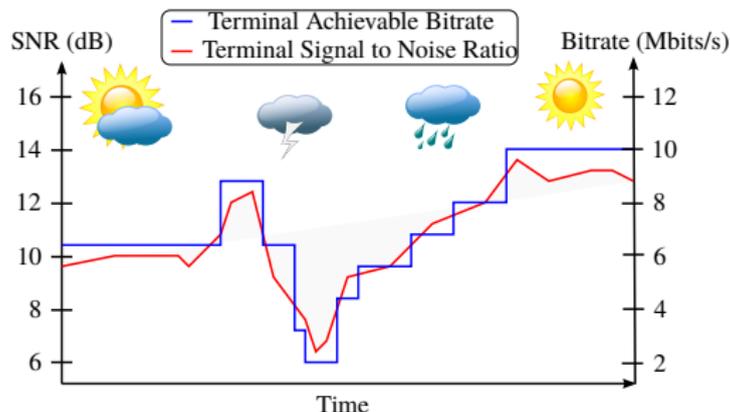
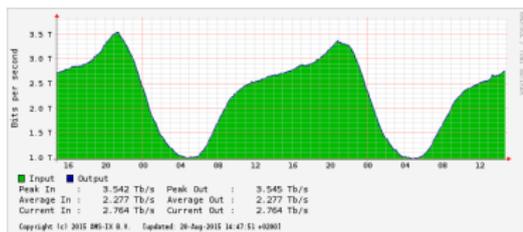
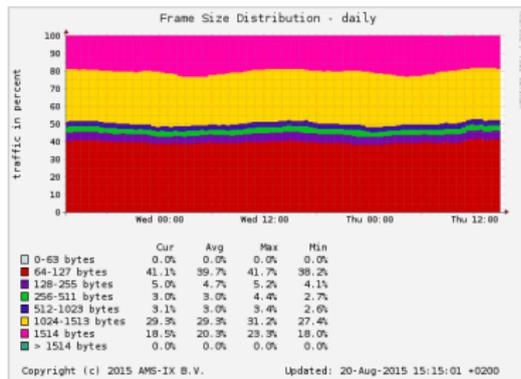


Figure: Influence de l'ACM sur le débit

Dynamique de la Demande



(a) Trafic cumulé



(b) Tailles de trames

Figure: Données statistiques dans un IX (©AMS-IX)

- Trafic Best Effort (be) peu prédictible à court terme
- Pas d'échelle temporelle caractéristique (multiples échelles)

Conséquences de la dynamique du système

- Les systèmes pour l'accès à Internet par satellite sont soumis à une dynamique nouvelle

Conséquences de la dynamique du système

- Les systèmes pour l'accès à Internet par satellite sont soumis à une dynamique nouvelle
- Le dimensionnement «pire cas» adopté précédemment n'est plus applicable

Conséquences de la dynamique du système

- Les systèmes pour l'accès à Internet par satellite sont soumis à une dynamique nouvelle
- Le dimensionnement «pire cas» adopté précédemment n'est plus applicable
- Il est nécessaire de prendre en compte la dynamique dans le partage des ressources

Conséquences de la dynamique du système

- Les systèmes pour l'accès à Internet par satellite sont soumis à une dynamique nouvelle
- Le dimensionnement «pire cas» adopté précédemment n'est plus applicable
- Il est nécessaire de prendre en compte la dynamique dans le partage des ressources

Conséquences de la dynamique du système

- Les systèmes pour l'accès à Internet par satellite sont soumis à une dynamique nouvelle
- Le dimensionnement «pire cas» adopté précédemment n'est plus applicable
- Il est nécessaire de prendre en compte la dynamique dans le partage des ressources

Problématique générale

Comment adapter le partage des ressources, en prenant en compte la variabilité de la demande et de la capacité, afin d'offrir un service le meilleur possible ?

Architecture physique

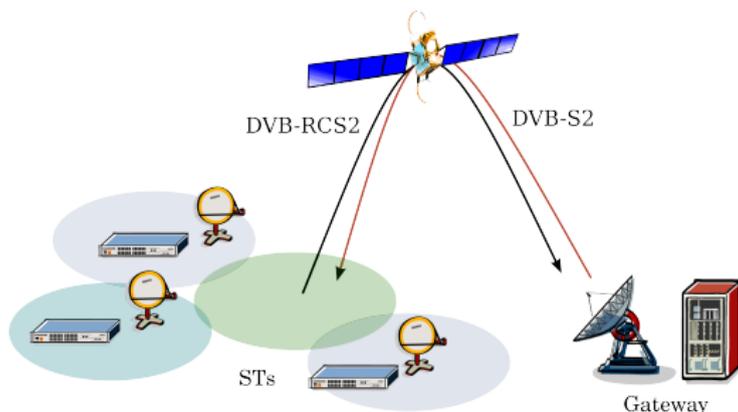


Figure: Système de télécommunications par satellite

- Passerelle (Gateway) : Gestion des ressources radio, interconnexion avec Internet, Services (VoIP, Vidéo)
- Terminal : Accès à la ressource radio, débit et capacité limitées (≈ 10000 Terminaux)
- Satellite : orbite géostationnaire, type « bent-pipe »

Architecture protocolaire

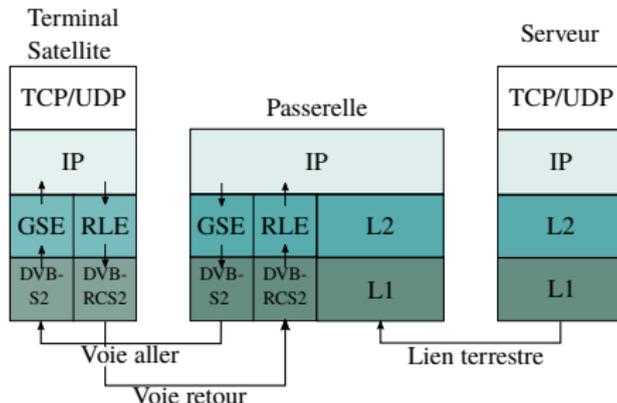


Figure: Architecture protocolaire DVB-S2/RCS2

- Voie aller : Ordonnement
- Voie retour : Allocation de ressources

Plan

- 1 Contexte de la Thèse
- 2 **Ordonnement sur la voie Aller**
 - Architecture de l'ordonnanceur
 - Techniques d'ordonnement
 - Algorithme d'ordonnement optimisé
 - Évaluation de performances
 - Conclusion intermédiaire
- 3 Allocation de Ressources sur la voie Retour
- 4 Conclusion

Base Band Frames (BBFrames)

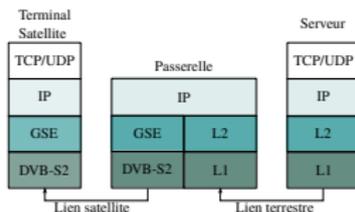
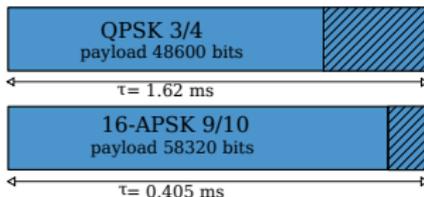


Figure: Architecture voie aller DVB-S2

- Une BBFrame est définie par :
 - l'ordre de sa *Modulation* (nombre de bits par symbole) ;
 - le taux de *Codage* (proportion de d'information utile par rapport à la redondance).
- On parle de ModCod pour désigner l'association d'une modulation et d'un codage.
- Le rythme symbole et la longueur après codage sont fixés.



Ordonnancement des BBFrames

- Chaque paquet possède un ModCod optimal, et une certaine Qualité de Service (QoS DiffServ)

Ordonnement des BBFrames

- Chaque paquet possède un ModCod optimal, et une certaine Qualité de Service (QoS DiffServ)
- Décision d'ordonnement : 1 BBFrame et son remplissage



Ordonnement des BBFrames

- Chaque paquet possède un ModCod optimal, et une certaine Qualité de Service (QoS DiffServ)
- Décision d'ordonnement : 1 BBFrame et son remplissage



Ordonnement des BBFrames

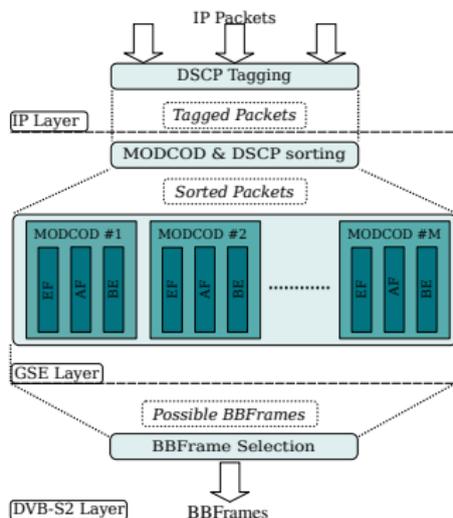
- Chaque paquet possède un ModCod optimal, et une certaine Qualité de Service (QoS DiffServ)
- Décision d'ordonnement : 1 BBFrame et son remplissage



Conséquences du choix d'architecture

L'ordonnement des BBFrames nécessite une décision prenant en compte la QoS et l'efficacité spectrale (ACM) de manière conjointe.

Proposition d'architecture



- QoS de type DiffServ (3 files par ModCod, EF, AF, BE)
- Architecture Cross-Layer : informations couches 1 (ModCod) et 3 (DSCP) utilisées

Approches existantes

Littérature très abondante, on distingue deux approches :

① *Critère explicite et règles d'ordonnancement* :

- Conception d'un critère reposant sur plusieurs métriques : Proportional Fairness, Latest Deadline First, Weighted Round Robin, etc. . .
- Définition simple, bonnes performances (délai, taux de perte), faible complexité
- Performance complexe à évaluer (simulations uniquement)

② *Ordonnancement optimisé* :

- Ordonnancement défini comme un problème d'optimisation
- Utilisation de la théorie des jeux, de fonctions d'utilité, de théorie des files d'attente
- Complexité importante, performance comparable aux règles d'ordonnancement
- Avantages de la définition mathématique : preuves indépendantes du scénario

Approches existantes

Littérature très abondante, on distingue deux approches :

① Critère explicite et règles d'ordonnancement :

- Conception d'un critère reposant sur plusieurs métriques : Proportional Fairness, Latest Deadline First, Weighted Round Robin, etc. . .
- Définition simple, bonnes performances (délai, taux de perte), faible complexité
- Performance complexe à évaluer (simulations uniquement)

② Ordonnancement optimisé :

- Ordonnancement défini comme un problème d'optimisation
- Utilisation de la théorie des jeux, de fonctions d'utilité, de théorie des files d'attente
- Complexité importante, performance comparable aux règles d'ordonnancement
- Avantages de la définition mathématique : preuves indépendantes du scénario

Quel compromis peut être fait entre ces deux approches ?

Approche choisie

- Ordonnement par fonctions d'utilité :
 - Définition de la satisfaction d'un utilisateur
 - L'objectif optimal est de maximiser la satisfaction globale
 - Conception d'un algorithme menant à cet optimal
- Fonctions d'utilité choisies :
 - Reposent sur le délai, le débit
 - Utilisation de métriques moyennes (moyenne exponentielle)
 - Fonctions paramétrées par la QoS de l'utilisateur

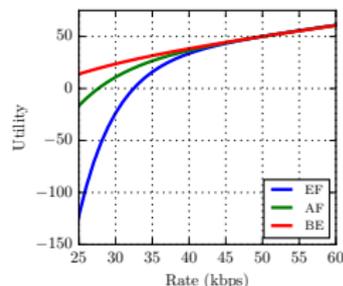
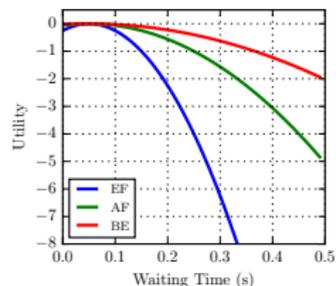


Figure: Exemples de fonctions d'utilité

Problème d'optimisation

- On définit :
 - M ModCods, Q classes de QoS
 - Métrique générique \bar{x} , valeur moyenne par *utilisateur*, $X = (\bar{x}_1, \dots, \bar{x}_N)^T$
 - Utilité associée à l'utilisateur k : $u_k(\bar{x}_k)$, paramétrée par la QoS
- L'objectif du système s'écrit :

$$\underset{X}{\text{maximiser}} \quad U(X) = \sum_k u_k(\bar{x}_k)$$

$$\text{Avec} \quad X \in C$$

- C représente les ressources limitées du système

Problème d'optimisation

- On définit :
 - M ModCods, Q classes de QoS
 - Métrique générique \bar{x} , valeur moyenne par *utilisateur*, $X = (\bar{x}_1, \dots, \bar{x}_N)^T$
 - Utilité associée à l'utilisateur k : $u_k(\bar{x}_k)$, paramétrée par la QoS
- L'objectif du système s'écrit :

$$\underset{X}{\text{maximiser}} \quad U(X) = \sum_k u_k(\bar{x}_k)$$

$$\text{Avec} \quad X \in C$$

- C représente les ressources limitées du système

Deux remarques importantes :

- 1 C évolue avec le temps, on peut donc remplacer C par $C(n)$, il en résulte que **la solution optimale évolue avec le temps**
- 2 A chaque décision d'ordonnancement (par ex. chaque BBFrame), l'optimal **ne peut être atteint immédiatement**

Ainsi, la meilleure solution possible est de suivre l'optimal d'aussi près que possible (tracking)

Méthode de résolution

- On suppose que la direction de la solution optimale reste fixe pendant une durée de T_s



$$T_s = \sum_{n=0}^{N_{T_s}-1} \tau(n) \quad (1)$$

avec :

- N_{T_s} est le nombre de BBFrames équivalent
 - $\tau(n)$ est la durée de la BBFrame n
- Le problème d'optimisation à résoudre devient alors :

$$\max_{X(n+N_{T_s})} U(X(n+N_{T_s})) - U(X(n)) \quad (2)$$

Avec $X \in \mathcal{C}$

- En supposant que u est \mathcal{L}^2 et concave, et que l'ensemble des solutions possibles est convexe, on montre que ce problème admet une unique solution (conditions KKT)
- Reste à déterminer la valeur de T_s

BBFrame-By-BBFrame Scheduling (BBS)

- On choisit $N_{T_s} = 1$ (T_s variable)
- On pose ν_m l'ensemble des utilisateurs ayant accès au ModCod m , et X_m les métriques associées
- La durée étant très courte, on peut faire l'approximation suivante :

$$U(X(n+1)) \approx U(X(n)) + U'(X(n))dX_m$$

- dX_m correspond au changement (infinitésimal) produit par l'émission d'une BBFrame de ModCod m
- $U(X(n))$ étant connu, le problème d'ordonnement s'écrit donc :

$$m^* = \arg \max_{dX_m} U'(X(n))dX_m \quad (3)$$

- Cette valeur est appelée utilité marginale
- Il faut donner une expression de U et choisir X pour résoudre

BBFrame-By-BBFrame Scheduling - suite

- Le délai moyen w est choisi comme métrique (pour N utilisateurs) :

$$w = (\bar{w}_1, \dots, \bar{w}_N)$$

- La fonction d'utilité sélectionnée est de la forme :

$$u_k(\bar{w}_k) = -\frac{1}{\delta_{k,max}^2} \left(\frac{w_{k,max}}{2} - \bar{w}_k \right)^2$$

Avec $(\delta_{k,max}, w_{k,max})$ le paramétrage de QoS pour l'utilisateur k .

- On montre que la solution est de la forme :

$$m^* = \arg \max_m \sum_{k \in \nu_m} A_k s_k$$

Sous la contrainte :

$$\sum_{k \in \nu_m} s_k \leq C_m$$

Où :

- A_k est une constante déterminée à chaque instant d'ordonnement
- s_k est un volume de données de l'utilisateur k , correspondant à dw_k
- m^* est le ModCod optimal de la prochaine BBFrame
- C_m est la taille de la charge utile d'une BBFrame de ModCod m

BBFrame Periodic Scheduling (BPS)

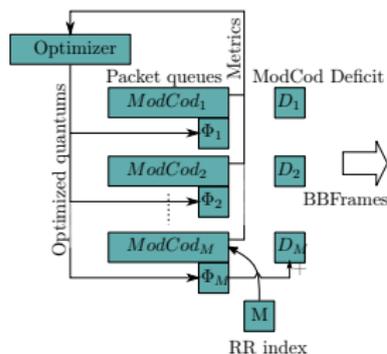
- On relâche la contrainte sur N_{T_s} en choisissant T_s constant (N_{T_s} variable)
- On suppose T_s trop grand pour faire l'approximation au premier ordre
- Le problème d'ordonnancement peut alors s'écrire (directement en fonction du délai) :

$$\begin{aligned} & \underset{S}{\text{maximiser}} && \sum_m \sum_{k \in \nu_m} u_k(\bar{w}_k(n + N_{T_s})) \\ & \text{avec} && \sum_m \sum_{k \in \nu_m} \frac{s_k}{R_m} = T_s \end{aligned} \quad (4)$$

- Un algorithme d'optimisation dédié est nécessaire
- Cet algorithme donne S^* , un volume optimal par utilisateur, à écouler pendant T_s secondes.

BBFrame Periodic Scheduling - suite

- Déterminer les BBFrames à partir de S^* est complexe
- On propose l'utilisation d'un ordonnanceur intermédiaire de type Deficit Round Robin (DRR) :



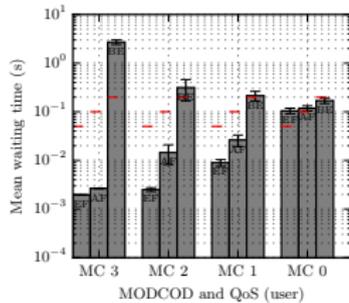
- On met à jour le quantum périodiquement, en fonction du s_k calculé
- Une BBFrame de ModCod m peut être émise à l'instant n si :

$$\sum_{k \in \nu_m} d_k(n) \geq C_m$$

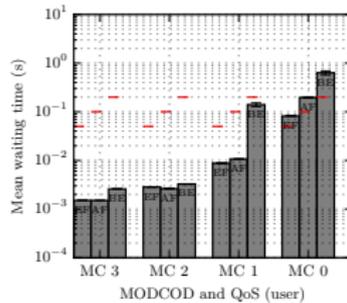
Mise en place des simulations

- Paramètres de QoS (DiffServ Per Hop Behaviour) :
 - Classes EF, AF, BE
 - Délai maximal w_{max} gigue δ_{max}
 - Répartition typique accès «triple play»
- Répartition des ModCods :
 - Scénario ciel clair : la plupart des utilisateurs ont un bon ModCod
 - Scénario forte pluie : la plupart des utilisateurs ont un mauvais ModCod
- Étude à forte charge (0.9) afin d'observer des différences significatives
- Mesure du temps d'attente moyen

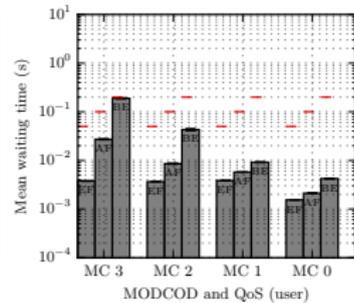
Résultats - Ciel Clair



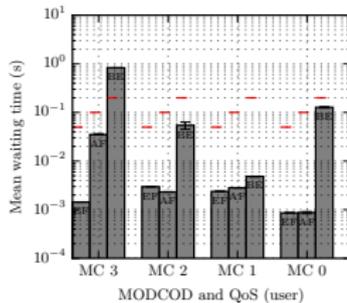
(a) WRR



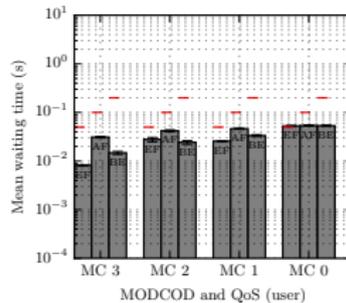
(b) UBMT



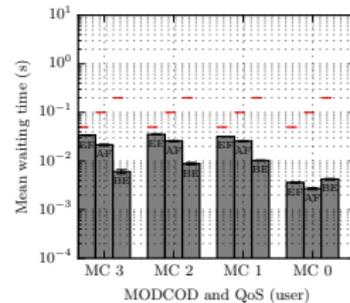
(c) M-LWDF



(d) EXP



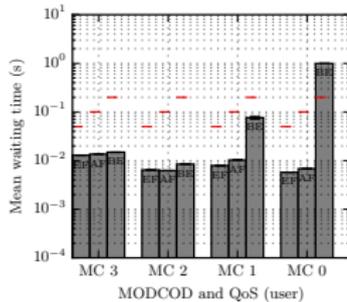
(e) BPS (délai)



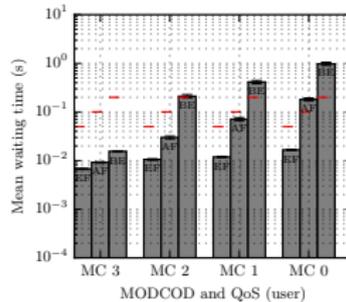
(f) BBS (délai)

Figure: Temps d'attente moyen pour plusieurs algorithmes de référence

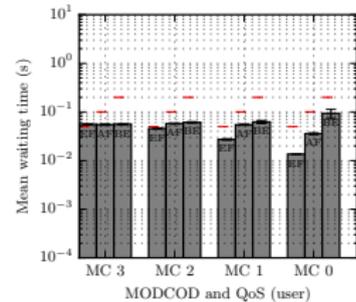
Résultats - Forte pluie



(a) UBMT



(b) M-LWDF



(c) BPS

Figure: Temps d'attente moyen, scénario forte pluie

- L'ordonnement voie aller nécessite une prise en compte de la dynamique (Demande, Capacité)

- L'ordonnement voie aller nécessite une prise en compte de la dynamique (Demande, Capacité)
- Les contraintes système sont particulières (Ordonnement de BBFrames et non de paquets)

- L'ordonnement voie aller nécessite une prise en compte de la dynamique (Demande, Capacité)
- Les contraintes système sont particulières (Ordonnement de BBFrames et non de paquets)
- La décision d'ordonnement doit conjointement prendre en compte QoS et efficacité spectrale (ModCod)

- L'ordonnement voie aller nécessite une prise en compte de la dynamique (Demande, Capacité)
- Les contraintes système sont particulières (Ordonnement de BBFrames et non de paquets)
- La décision d'ordonnement doit conjointement prendre en compte QoS et efficacité spectrale (ModCod)

- L'ordonnement voie aller nécessite une prise en compte de la dynamique (Demande, Capacité)
- Les contraintes système sont particulières (Ordonnement de BBFrames et non de paquets)
- La décision d'ordonnement doit conjointement prendre en compte QoS et efficacité spectrale (ModCod)

La solution **BPS** est la seule présentant toutes les caractéristiques suivantes :

- L'ordonnement voie aller nécessite une prise en compte de la dynamique (Demande, Capacité)
- Les contraintes système sont particulières (Ordonnement de BBFrames et non de paquets)
- La décision d'ordonnement doit conjointement prendre en compte QoS et efficacité spectrale (ModCod)

La solution **BPS** est la seule présentant toutes les caractéristiques suivantes :

- Une définition mathématique de l'optimal

- L'ordonnement voie aller nécessite une prise en compte de la dynamique (Demande, Capacité)
- Les contraintes système sont particulières (Ordonnement de BBFrames et non de paquets)
- La décision d'ordonnement doit conjointement prendre en compte QoS et efficacité spectrale (ModCod)

La solution **BPS** est la seule présentant toutes les caractéristiques suivantes :

- Une définition mathématique de l'optimal
- Une prise en compte explicite de la dynamique (flexibilité de T_s)

- L'ordonnancement voie aller nécessite une prise en compte de la dynamique (Demande, Capacité)
- Les contraintes système sont particulières (Ordonnancement de BBFrames et non de paquets)
- La décision d'ordonnancement doit conjointement prendre en compte QoS et efficacité spectrale (ModCod)

La solution **BPS** est la seule présentant toutes les caractéristiques suivantes :

- Une définition mathématique de l'optimal
- Une prise en compte explicite de la dynamique (flexibilité de T_s)
- Des performances équivalentes dans des scénarios très différents

- L'ordonnancement voie aller nécessite une prise en compte de la dynamique (Demande, Capacité)
- Les contraintes système sont particulières (Ordonnancement de BBFrames et non de paquets)
- La décision d'ordonnancement doit conjointement prendre en compte QoS et efficacité spectrale (ModCod)

La solution **BPS** est la seule présentant toutes les caractéristiques suivantes :

- Une définition mathématique de l'optimal
- Une prise en compte explicite de la dynamique (flexibilité de T_s)
- Des performances équivalentes dans des scénarios très différents
- Une faible complexité (grâce au DRR) et un temps de calcul par BBFrame faible

Plan

- 1 Contexte de la Thèse
- 2 Ordonnancement sur la voie Aller
- 3 Allocation de Ressources sur la voie Retour**
 - Architecture de la voie retour
 - Algorithme d'allocation de ressources
 - Évaluation de performances
 - Conclusion intermédiaire
- 4 Conclusion

Mécanisme de requêtes

- Allocation déterministe, à l'aide de requêtes de trafic :
 - RBDC : requêtes en débit
 - VBDC : requêtes en volume
 - CRA : allocation non sollicitée
- Requêtes envoyées ($x_{req}(n)$) périodiquement, ainsi que le ModCod optimal ($m(n)$)
- Coloration possible des requêtes par QoS (rc_index)
- Durée importante entre l'envoi d'une requête et la réception de l'allocation correspondante (minimum 0.5s)

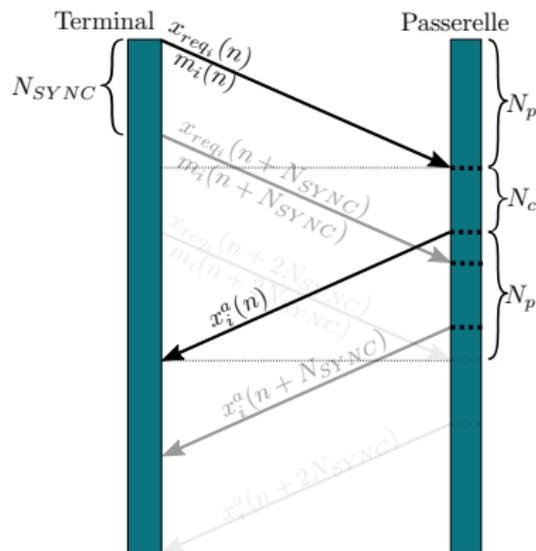


Figure: Boucle d'allocation RCS2

Structure de la trame RCS2

- Structure temps-fréquence périodique (Supertrame/Trame)
- Composée de sous-éléments temps-fréquence de même dimensions : Bandwidth-Time Unit (BTU)
- Un timeslot est composé de une ou plusieurs BTU
- Un timeslot est alloué à un seul Terminal
- Le débit par timeslot dépend du nombre de BTU et du ModCod

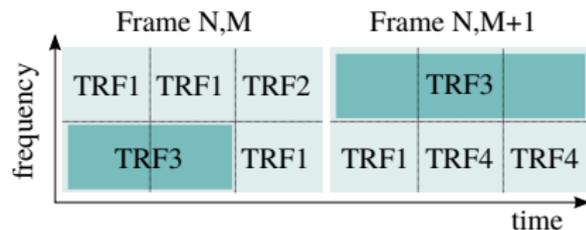


Figure: Structure de la trame RCS2

Choix de la méthode d'allocation de ressources

Résumé du problème :

- L'allocation pour chaque Terminal doit se faire en fonction du triplet (requête, ModCod, QoS)

Choix de la méthode d'allocation de ressources

Résumé du problème :

- L'allocation pour chaque Terminal doit se faire en fonction du triplet (requête, ModCod, QoS)
- Celle-ci sera effective 0.5 s plus tard (GEO), *a minima*

Choix de la méthode d'allocation de ressources

Résumé du problème :

- L'allocation pour chaque Terminal doit se faire en fonction du triplet (requête, ModCod, QoS)
- Celle-ci sera effective 0.5 s plus tard (GEO), *a minima*
- Trafic moyen par Terminal faible (\approx quelques kbps) mais très variable

Choix de la méthode d'allocation de ressources

Résumé du problème :

- L'allocation pour chaque Terminal doit se faire en fonction du triplet (requête, ModCod, QoS)
- Celle-ci sera effective 0.5 s plus tard (GEO), *a minima*
- Trafic moyen par Terminal faible (\approx quelques kbps) mais très variable

Choix de la méthode d'allocation de ressources

Résumé du problème :

- L'allocation pour chaque Terminal doit se faire en fonction du triplet (requête, ModCod, QoS)
- Celle-ci sera effective 0.5 s plus tard (GEO), *a minima*
- Trafic moyen par Terminal faible (\approx quelques kbps) mais très variable

Conséquences :

- L'allocation résulte d'un compromis entre demande, QoS et efficacité spectrale : utilisation de fonctions d'utilité

Choix de la méthode d'allocation de ressources

Résumé du problème :

- L'allocation pour chaque Terminal doit se faire en fonction du triplet (requête, ModCod, QoS)
- Celle-ci sera effective 0.5 s plus tard (GEO), *a minima*
- Trafic moyen par Terminal faible (\approx quelques kbps) mais très variable

Conséquences :

- L'allocation résulte d'un compromis entre demande, QoS et efficacité spectrale : utilisation de fonctions d'utilité
- La Passerelle n'a accès qu'à des informations « datées » : algorithme d'allocation sans mémoire

Choix de la méthode d'allocation de ressources

Résumé du problème :

- L'allocation pour chaque Terminal doit se faire en fonction du triplet (requête, ModCod, QoS)
- Celle-ci sera effective 0.5 s plus tard (GEO), *a minima*
- Trafic moyen par Terminal faible (\approx quelques kbps) mais très variable

Conséquences :

- L'allocation résulte d'un compromis entre demande, QoS et efficacité spectrale : utilisation de fonctions d'utilité
- La Passerelle n'a accès qu'à des informations « datées » : algorithme d'allocation sans mémoire
- Trafic très dynamique : redéfinition de la configuration à chaque Supertrame (contrairement à DVB-RCS)

Paramètres de l'algorithme

- À chaque triplet (utilisateur i , QoS j , pour la Supertrame n) :
 - la requête $x_{req_{i,j}}$;
 - le ModCod m_i ;
 - la QoS j .
- La solution d'ordonnancement est le nombre de BTU par Terminal x_i (allocation non colorée)
- On associe l'utilité $u(x_{i,j})$ à l'allocation $x_{i,j}$:

$$u(x_{i,j}) = f(x_{i,j}, x_{req_{i,j}}, m_i)$$

- On se concentre sur l'allocation RBDC
- On travaille en nombre de BTU équivalent

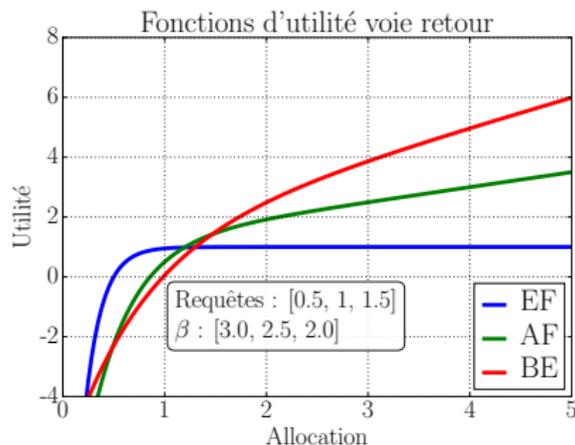


Figure: Exemple de fonctions d'utilité

Expression sous forme de problème d'optimisation

Soit :

- M le nombre total de BTU
- K le nombre de BTU par porteuse
- On peut alors poser ainsi le problème d'ordonnement :

$$\begin{aligned} &\text{maximiser}_X && U(X) = \sum_{i,j} u_{i,j}(x_{i,j}) \\ &\text{avec} && \sum_{i,j} x_{i,j} = M \\ &\text{et} && \forall i \sum_j x_{i,j} \leq K \\ &\text{et} && \forall i \forall j x_{\min_{i,j}} \leq x_{i,j} \leq x_{\max_{i,j}} \end{aligned} \tag{5}$$

Expression sous forme de problème d'optimisation

Soit :

- M le nombre total de BTU
- K le nombre de BTU par porteuse
- On peut alors poser ainsi le problème d'ordonnement :

$$\begin{aligned}
 &\underset{X}{\text{maximiser}} && U(X) = \sum_{i,j} u_{i,j}(x_{i,j}) \\
 &\text{avec} && \sum_{i,j} x_{i,j} = M \\
 &\text{et} && \forall i \sum_j x_{i,j} \leq K \\
 &\text{et} && \forall i \forall j x_{\min_{i,j}} \leq x_{i,j} \leq x_{\max_{i,j}}
 \end{aligned} \tag{5}$$

- Problème de programmation convexe non linéaire
- Nombreuses méthodes de résolution (descente de gradient, point intérieur, bisection)

Résolution : de l'optimisation continue à l'allocation discrète

- La solution optimale, X^* est réelle, calculée par Terminal et QoS

Résolution : de l'optimisation continue à l'allocation discrète

- La solution optimale, X^* est réelle, calculée par Terminal et QoS
- L'allocation résultante doit être entière et globale par Terminal

Résolution : de l'optimisation continue à l'allocation discrète

- La solution optimale, X^* est réelle, calculée par Terminal et QoS
- L'allocation résultante doit être entière et globale par Terminal
- Un algorithme de discrétisation de la solution est nécessaire :

$$X^* \in \mathbb{R}^N \times \mathbb{R}^Q \rightarrow X^a \in \mathbb{N}^N$$

Résolution : de l'optimisation continue à l'allocation discrète

- La solution optimale, X^* est réelle, calculée par Terminal et QoS
- L'allocation résultante doit être entière et globale par Terminal
- Un algorithme de discrétisation de la solution est nécessaire :

$$X^* \in \mathbb{R}^N \times \mathbb{R}^Q \rightarrow X^a \in \mathbb{N}^N$$

- Objectif : compromis entre précision de X^* et complexité

Résolution : de l'optimisation continue à l'allocation discrète

- La solution optimale, X^* est réelle, calculée par Terminal et QoS
- L'allocation résultante doit être entière et globale par Terminal
- Un algorithme de discrétisation de la solution est nécessaire :

$$X^* \in \mathbb{R}^N \times \mathbb{R}^Q \rightarrow X^a \in \mathbb{N}^N$$

- Objectif : compromis entre précision de X^* et complexité
- «Petites» allocations : quelle différence entre 1.2 et 1.3 BTU ?

Résolution : de l'optimisation continue à l'allocation discrète

- La solution optimale, X^* est réelle, calculée par Terminal et QoS
- L'allocation résultante doit être entière et globale par Terminal
- Un algorithme de discrétisation de la solution est nécessaire :

$$X^* \in \mathbb{R}^N \times \mathbb{R}^Q \rightarrow X^a \in \mathbb{N}^N$$

- Objectif : compromis entre précision de X^* et complexité
- «Petites» allocations : quelle différence entre 1.2 et 1.3 BTU ?

Résolution : de l'optimisation continue à l'allocation discrète

- La solution optimale, X^* est réelle, calculée par Terminal et QoS
- L'allocation résultante doit être entière et globale par Terminal
- Un algorithme de discrétisation de la solution est nécessaire :

$$X^* \in \mathbb{R}^N \times \mathbb{R}^Q \rightarrow X^a \in \mathbb{N}^N$$

- Objectif : compromis entre précision de X^* et complexité
- «Petites» allocations : quelle différence entre 1.2 et 1.3 BTU ?

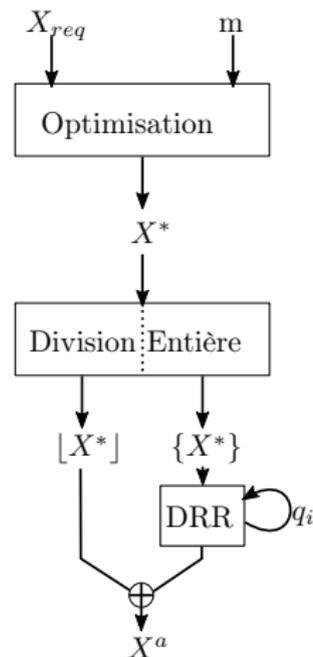


Figure: Algorithme d'allocation de ressources

Paramétrage des simulations

- 3 types de trafic par Terminal (Modèles 3GPP) :

Paramétrage des simulations

- 3 types de trafic par Terminal (Modèles 3GPP) :
 - 10 sessions HTTP

Paramétrage des simulations

- 3 types de trafic par Terminal (Modèles 3GPP) :
 - 10 sessions HTTP
 - 10 sessions IPTV

Paramétrage des simulations

- 3 types de trafic par Terminal (Modèles 3GPP) :
 - 10 sessions HTTP
 - 10 sessions IPTV
 - 1 session VoIP

Paramétrage des simulations

- 3 types de trafic par Terminal (Modèles 3GPP) :
 - 10 sessions HTTP
 - 10 sessions IPTV
 - 1 session VoIP
- Profil très particulier :

Application	VoIP	IPTV	HTTP
débit moyen (kbps)	8	0.6585	1.1735

Table: Profil de trafic voie retour

Paramétrage des simulations

- 3 types de trafic par Terminal (Modèles 3GPP) :
 - 10 sessions HTTP
 - 10 sessions IPTV
 - 1 session VoIP
- Profil très particulier :

Application	VoIP	IPTV	HTTP
débit moyen (kbps)	8	0.6585	1.1735

Table: Profil de trafic voie retour

- charge moyenne de 0.8

Paramétrage des simulations

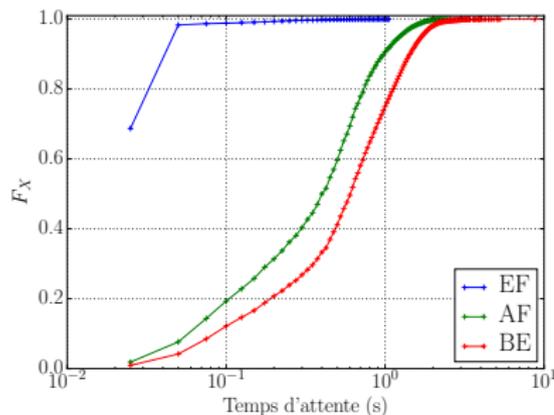
- 3 types de trafic par Terminal (Modèles 3GPP) :
 - 10 sessions HTTP
 - 10 sessions IPTV
 - 1 session VoIP
- Profil très particulier :

Application	VoIP	IPTV	HTTP
débit moyen (kbps)	8	0.6585	1.1735

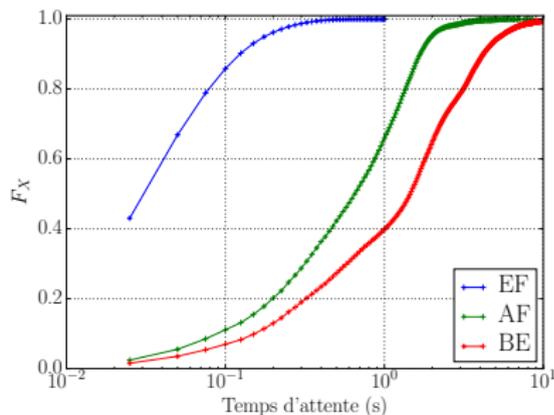
Table: Profil de trafic voie retour

- charge moyenne de 0.8
- Comparaison avec un algorithme à priorité stricte (standard), appelé linéaire

Résultats de simulations - temps d'attente



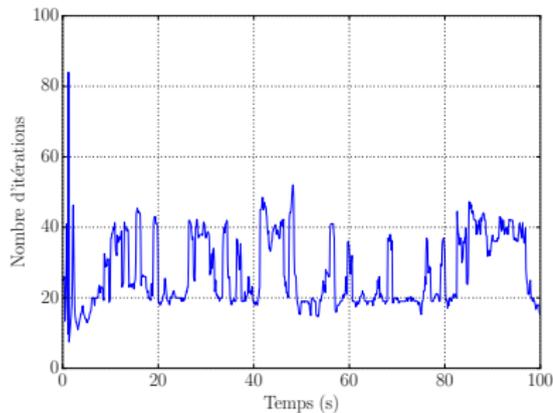
(a) Algorithme optimal



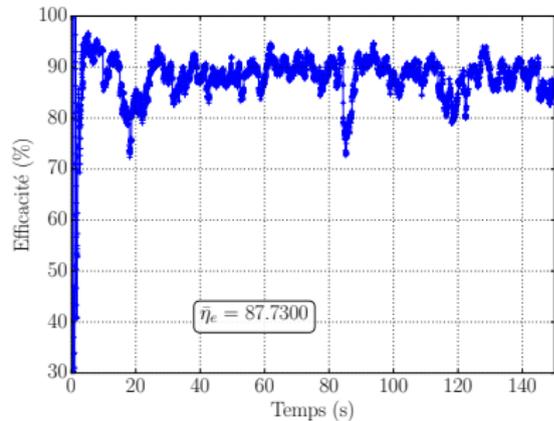
(b) Algorithme linéaire

Figure: Fonction de répartition empirique du temps d'attente

Résultats de simulations - performances de l'algorithme



(a) Nombre d'itérations



(b) Efficacité de l'allocation

Figure: Indicateurs de performance de l'algorithme d'allocation de ressources

Conclusions sur l'allocation de ressources voie retour

- L'allocation de ressources voie retour dépend de très nombreux paramètres

Conclusions sur l'allocation de ressources voie retour

- L'allocation de ressources voie retour dépend de très nombreux paramètres
- RCS2 permet une grande flexibilité, au prix d'une complexité accrue

Conclusions sur l'allocation de ressources voie retour

- L'allocation de ressources voie retour dépend de très nombreux paramètres
- RCS2 permet une grande flexibilité, au prix d'une complexité accrue
- Les fonctions d'utilité permettent de bien représenter le compromis entre QoS et ModCod

Conclusions sur l'allocation de ressources voie retour

- L'allocation de ressources voie retour dépend de très nombreux paramètres
- RCS2 permet une grande flexibilité, au prix d'une complexité accrue
- Les fonctions d'utilité permettent de bien représenter le compromis entre QoS et ModCod
- Les algorithmes d'optimisation présentés ici sont matures pour une utilisation en temps réel

Conclusions sur l'allocation de ressources voie retour

- L'allocation de ressources voie retour dépend de très nombreux paramètres
- RCS2 permet une grande flexibilité, au prix d'une complexité accrue
- Les fonctions d'utilité permettent de bien représenter le compromis entre QoS et ModCod
- Les algorithmes d'optimisation présentés ici sont matures pour une utilisation en temps réel
- Le calcul de la requête (RBDC ou VBDC) influence fortement les résultats

Plan

- 1 Contexte de la Thèse
- 2 Ordonnancement sur la voie Aller
- 3 Allocation de Ressources sur la voie Retour
- 4 Conclusion**

Conclusion générale

- Le passage aux nouvelles générations de standards (DVB-S2, DVB-RCS2) influence la gestion des ressources.

Conclusion générale

- Le passage aux nouvelles générations de standards (DVB-S2, DVB-RCS2) influence la gestion des ressources.
- Ordonnancement comme allocation de ressources nécessitent une prise en compte de la dynamique du système.

Conclusion générale

- Le passage aux nouvelles générations de standards (DVB-S2, DVB-RCS2) influence la gestion des ressources.
- Ordonnement comme allocation de ressources nécessitent une prise en compte de la dynamique du système.
- Contrairement aux architectures précédentes, il faut prendre en compte, dès la conception, cette dynamique.

Conclusion générale

- Le passage aux nouvelles générations de standards (DVB-S2, DVB-RCS2) influence la gestion des ressources.
- Ordonnancement comme allocation de ressources nécessitent une prise en compte de la dynamique du système.
- Contrairement aux architectures précédentes, il faut prendre en compte, dès la conception, cette dynamique.
- Nous avons proposé deux algorithmes, pour la voie aller et pour la voie retour

Conclusion générale

Sur la voie aller :

- L'ordonnancement DVB-S2 est particulier (BBFrame par BBFrame).

Conclusion générale

Sur la voie aller :

- L'ordonnancement DVB-S2 est particulier (BBFrame par BBFrame).
- Nous avons proposé une formulation fondée sur les fonctions d'utilité.

Conclusion générale

Sur la voie aller :

- L'ordonnancement DVB-S2 est particulier (BBFrame par BBFrame).
- Nous avons proposé une formulation fondée sur les fonctions d'utilité.
- Deux algorithmes découlent de cette formulation : BBS et BPS.

Conclusion générale

Sur la voie aller :

- L'ordonnancement DVB-S2 est particulier (BBFrame par BBFrame).
- Nous avons proposé une formulation fondée sur les fonctions d'utilité.
- Deux algorithmes découlent de cette formulation : BBS et BPS.
- Le choix repose sur un compromis entre performance, temps de calcul et implantation.

Conclusion générale

Sur la voie aller :

- L'ordonnancement DVB-S2 est particulier (BBFrame par BBFrame).
- Nous avons proposé une formulation fondée sur les fonctions d'utilité.
- Deux algorithmes découlent de cette formulation : BBS et BPS.
- Le choix repose sur un compromis entre performance, temps de calcul et implantation.
- Les simulations montrent une performance supérieure aux approches existantes.

Conclusion générale

Sur la voie aller :

- L'ordonnancement DVB-S2 est particulier (BBFrame par BBFrame).
- Nous avons proposé une formulation fondée sur les fonctions d'utilité.
- Deux algorithmes découlent de cette formulation : BBS et BPS.
- Le choix repose sur un compromis entre performance, temps de calcul et implantation.
- Les simulations montrent une performance supérieure aux approches existantes.

Conclusion générale

Sur la voie aller :

- L'ordonnancement DVB-S2 est particulier (BBFrame par BBFrame).
- Nous avons proposé une formulation fondée sur les fonctions d'utilité.
- Deux algorithmes découlent de cette formulation : BBS et BPS.
- Le choix repose sur un compromis entre performance, temps de calcul et implantation.
- Les simulations montrent une performance supérieure aux approches existantes.

Sur la voie retour :

- L'allocation DVB-RCS2 possède une granularité fine (BTU).

Conclusion générale

Sur la voie aller :

- L'ordonnement DVB-S2 est particulier (BBFrame par BBFrame).
- Nous avons proposé une formulation fondée sur les fonctions d'utilité.
- Deux algorithmes découlent de cette formulation : BBS et BPS.
- Le choix repose sur un compromis entre performance, temps de calcul et implantation.
- Les simulations montrent une performance supérieure aux approches existantes.

Sur la voie retour :

- L'allocation DVB-RCS2 possède une granularité fine (BTU).
- Nous avons formulé l'allocation comme un problème d'optimisation.

Conclusion générale

Sur la voie aller :

- L'ordonnancement DVB-S2 est particulier (BBFrame par BBFrame).
- Nous avons proposé une formulation fondée sur les fonctions d'utilité.
- Deux algorithmes découlent de cette formulation : BBS et BPS.
- Le choix repose sur un compromis entre performance, temps de calcul et implantation.
- Les simulations montrent une performance supérieure aux approches existantes.

Sur la voie retour :

- L'allocation DVB-RCS2 possède une granularité fine (BTU).
- Nous avons formulé l'allocation comme un problème d'optimisation.
- Nous avons proposé une méthode de résolution et un algorithme d'allocation.

Conclusion générale

Sur la voie aller :

- L'ordonnancement DVB-S2 est particulier (BBFrame par BBFrame).
- Nous avons proposé une formulation fondée sur les fonctions d'utilité.
- Deux algorithmes découlent de cette formulation : BBS et BPS.
- Le choix repose sur un compromis entre performance, temps de calcul et implantation.
- Les simulations montrent une performance supérieure aux approches existantes.

Sur la voie retour :

- L'allocation DVB-RCS2 possède une granularité fine (BTU).
- Nous avons formulé l'allocation comme un problème d'optimisation.
- Nous avons proposé une méthode de résolution et un algorithme d'allocation.
- Les résultats de simulations montrent la pertinence de notre approche, ainsi que la complexité du système.

Perspectives

Afin d'affiner les résultats obtenus, nous pouvons envisager :

- des modèles de trafic plus fins sur la voie aller (étude des performances applicatives) ;

Perspectives

Afin d'affiner les résultats obtenus, nous pouvons envisager :

- des modèles de trafic plus fins sur la voie aller (étude des performances applicatives) ;
- la simulation plus précise d'événements météorologiques ;

Perspectives

Afin d'affiner les résultats obtenus, nous pouvons envisager :

- des modèles de trafic plus fins sur la voie aller (étude des performances applicatives) ;
- la simulation plus précise d'événements météorologiques ;
- des profils de Terminaux différents (grand public, professionnel, institutionnel).

Perspectives

Afin d'affiner les résultats obtenus, nous pouvons envisager :

- des modèles de trafic plus fins sur la voie aller (étude des performances applicatives) ;
- la simulation plus précise d'événements météorologiques ;
- des profils de Terminaux différents (grand public, professionnel, institutionnel).

Perspectives

Afin d'affiner les résultats obtenus, nous pouvons envisager :

- des modèles de trafic plus fins sur la voie aller (étude des performances applicatives) ;
- la simulation plus précise d'événements météorologiques ;
- des profils de Terminaux différents (grand public, professionnel, institutionnel).

A plus long terme :

- l'utilisation conjointe (voire dynamique) de DAMA et de méthodes aléatoires (Slotted Aloha) ;

Perspectives

Afin d'affiner les résultats obtenus, nous pouvons envisager :

- des modèles de trafic plus fins sur la voie aller (étude des performances applicatives) ;
- la simulation plus précise d'événements météorologiques ;
- des profils de Terminaux différents (grand public, professionnel, institutionnel).

A plus long terme :

- l'utilisation conjointe (voire dynamique) de DAMA et de méthodes aléatoires (Slotted Aloha) ;
- la réutilisation dynamique des ressources fréquentielles sous l'ensemble de la couverture ;

Perspectives

Afin d'affiner les résultats obtenus, nous pouvons envisager :

- des modèles de trafic plus fins sur la voie aller (étude des performances applicatives) ;
- la simulation plus précise d'événements météorologiques ;
- des profils de Terminaux différents (grand public, professionnel, institutionnel).

A plus long terme :

- l'utilisation conjointe (voire dynamique) de DAMA et de méthodes aléatoires (Slotted Aloha) ;
- la réutilisation dynamique des ressources fréquentielles sous l'ensemble de la couverture ;
- l'expérimentation, avec un émulateur ou à petite échelle sur un système réel, des algorithmes.

Contributions

- J.-B. Dupé, E. Chaput, C. Baudoin, C. Bes, A. Deramecourt, and A.-L. Beylot, "Rule-based Packet Scheduling for DVB-S2 Through Generic Stream Encapsulation," in *IEEE International Conference on Communications (ICC)*, pp. 3582–3587, June 2014
- J.-B. Dupé, E. Chaput, C. Baudoin, C. Bes, A. Deramecourt, and A.-L. Beylot, "Optimized gse packet scheduling over dvb-s2," in *IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM)*, pp. 2856–2861, Dec 2014

Merci de votre attention !