HAL
open science

Vers la Dématérialisation des Réseaux Hybrides Satellites et Terrestres

Pascal Berthou

To cite this version:

Pascal Berthou. Vers la Dématérialisation des Réseaux Hybrides Satellites et Terrestres. Réseaux et télécommunications [cs.NI]. Université Toulouse 3 Paul Sabatier (UT3 Paul Sabatier), 2018. tel-02197481

HAL Id: tel-02197481

https://laas.hal.science/tel-02197481

Submitted on 30 Jul 2019

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.

HABILITATION
A DIRIGER DES RECHERCHES

de l'Université Paul Sabatier de Toulouse

Préparée au
Laboratoire d'Analyse et d'Architecture des systèmes du C.N.R.S.

Par

Pascal BERTHOU
Docteur en Informatique et Télécommunications de l'Institut National Polytechnique de Toulouse, spécialité Réseaux et Télécommunications
Maître de Conférences à l'Université Paul Sabatier

Vers la Dématérialisation des Réseaux Hybrides Satellites et Terrestres

---

Soutenue le 14 Décembre devant le jury :

M. Thierry Gayraud	Professeur à Université de Toulouse 3	Président
M. Damien Magoni	Professeur à l'Université de Bordeaux	Rapporteurs
Philippe Owezarski	Directeur de Recherche au LAAS-CNRS	Garant
Mme. Véronique Vèque	Professeur à l'Université Paris 11	Rapporteurs
M. Fabrice Valois	Professeur à l'INSA de Lyon	Rapporteurs

Rapport LAAS N°18663

TABLE DES MATIERES

Table des matières 1
Liste des illustrations 3
Introduction 5
Les réseaux par satellite 9
1. Introduction 9
2. Hybridation des systèmes de communication par satellite 10
2.1. Architecture réseau : intégration des réseaux hybrides 11
2.2. Intégration à fort couplage : une approche intégrée 11
2.3. Intégration relai 12
2.4. Intégration à faible couplage 13
2.5. Discussion 14
3. La qualité de service dans les systèmes satellite DVB-RCS 14
3.1. Evaluation de la qualité de service des systèmes satellite 14
3.2. Architectures de QoS pour systèmes satellite 19
3.3. Moyens d'expérimentations 22
4. Intégration horizontale dans une architecture de QoS NGN 24
4.1. Intégration dans une architecture IMS 24
4.2. Intégration dans l'architecture EuQoS 27
4.3. Conclusion 33
5. La mobilité inter systèmes 34
5.1. Solutions de mobilité IP 34
5.2. Gestion de mobilité et de QoS par SIP 37
5.3. Conclusion 39
6. La couche transport dans les réseaux hybrides 39
6.1. Les protocoles de transports pour les réseaux satellite 39
6.2. Diminuer les files d'attente par le contrôle du transport 49
6.3. Les performances applicatives 54
7. Conclusion générale sur les systèmes de communication par satellite 55
8. Bibliographie du chapitre 56
Les réseaux sans fil Terrestres 59
1. Introduction 59
2. Réseaux de capteurs à faible consommation d'énergie 59
2.1. Une architecture 802.15.4 avec des antennes agiles 60
2.2. La QoS pour la synchronisation des capteurs 63
3. Métrologie des réseaux sans fil 70
3.1. Simulation des réseaux sans fil 71
3.2. Prédiction dans les réseaux sans fil 77
4. Supervision des réseaux sans fil 81
4.1. Métrique 82
4.2. Partage 84
4.3. Analyse 87
5. Conclusion générale du chapitre 88
6. Bibliographie du chapitre 89
Perspectives et Conclusion 91
1. Introduction 91

2. Technologies facilitatrices 91
2.1. SDR – Software Defined Radio 91
2.2. SDN – Software Defined Networking 92
2.3. NFV – Network Function Virtualization 94
2.4. Composition 94
3. Architectures phares et perspectives de recherche 95
3.1. Dans les réseaux mobiles 95
3.2. Dans les réseaux par satellite 97
3.3. Dans les réseaux hybrides 101
4. Conclusion 105
5. Bibliographie du chapitre 106
SIGLES & ACRONYMES 109

LISTE DES ILLUSTRATIONS

Figure 1. Architecture à fort couplage 12
Figure 2. Architecture relai LTE 13
Figure 3. Intégration à faible couplage LTE/satellite 13
Figure 4. Débit et délai pour une Vidéo basée sur le codec DIVX 17
Figure 5. Fonction de densité cumulative des délais de bout en bout 18
Figure 6. Ensemble des modcods disponibles dans DVB-S2 (source ETSI) 19
Figure 7. QoS architecture 20
Figure 8. Réservation de ressources dans un système satellite par SIP 21
Figure 9. Réservation de ressources par SIP. a) classique; b) optimisé 22
Figure 10. Plateforme de test DVB-S2/RCS du projet Ourses 24
Figure 11. Architecture IMS dans le scénario transparent 26
Figure 12. Mise en œuvre générale de la QoS pour l'intégration transparente 26
Figure 13. Architecture EuQoS 27
Figure 14. Architecture EuQoS pour un accès satellite dans le cas d'un système étoilé 30
Figure 15. Architecture EuQoS pour un accès satellite dans le cas d'un système maillé 31
Figure 16. Mise en relation des CdS EuQoS avec les classes d'accès satellite 32
Figure 17. Échanges dans EuQoS pour la réservation dans un système satellite (cas étoilé) 33
Figure 18. Les principaux types de déplacement dans un système satellite 35
Figure 19. Gestion de la mobilité nomade par SIP 37
Figure 20. Temps d'interruption ressenti par le MN en tant que récepteur 38
Figure 21. Comparaison de débits TCP sur un lien satellite (a) 512 kbps (b) 2 Mbpbs 45
Figure 22. Evolution des numéros de séquence, débits et RTT durant un handover 46
Figure 23. Fenêtre de congestion de SCTP lors de changements de réseau (satellite/Wi-Fi) 48
Figure 24. Fenêtres d'émission (Cwnd de TCP a) Drop Tail b) contrôleur PI 52
Figure 25. Etat de la file d'attende a) Drop tail, b) PI, c) prédictif 52
Figure 26. Délai de bout en bout 53
Figure 27. Taux de perte sur les flux UDP 53
Figure 28. Méthode d'interrogation d'un MTR centralisé 54
Figure 29. Interrogations de MTR distribués lors d'une session SIP 55
Figure 30. Temps moyen d'interrogation du MTR 55
Figure 31. Concept des antennes agiles 60
Figure 32. Exemples de topologies problématiques (linéaire, quadrillage) 62
Figure 33. Topologies avantageuses pour D802.15.4 (a) quadrillage (b) aléatoire 62
Figure 34. Débits moyens et délais de bout en bout pour la topologie (b) 63
Figure 35. Architecture hiérarchique du réseau SACER 65
Figure 36. Banc de mesure IEEE 1588 sur WiMedia 66
Figure 37 -Topologie du réseau et fonctionnement du protocole hybride IEEE1588-PBS 68
Figure 38 - Synchronisation mesurée pour le protocole IEEE15888-PBS Hybride 69
Figure 39 - Consommation énergétique des nœuds PBS avec antenne directionnelle 70
Figure 40 -Approche de travail 71
Figure 41 -Salle anéchoïque du LAAS-CNRS 72
Figure 42 - Description complète du banc de test 73
Figure 43 - Configuration du scénario dans les deux environnements 74
Figure 44 -Mesure du FER (a)expérimentation - (b) simulation 75
Figure 45 -Modèle de Gilbert-Eliott 75
Figure 46 -Traces de FER appariées 75
Figure 47 -Mesure du débit reçu 76

Figure 48 -Arbre de causes pour la comparaison de traces WiFi 77
Figure 49 - Exemple d'estimation obtenues avec SVR pour les métriques SNR et RSS 79
Figure 50 - Précision moyenne des estimations en fonction des algorithmes 80
Figure 51 - Architecture de supervision dans un nœud 82
Figure 52 - Réseau adhoc considéré (état initial) 83
Figure 53 - Type de statistiques partagées (a) moyenne, (b) distribution, (c) densité 84
Figure 54 - Exemple simple de calcul de la moyenne 85
Figure 55 - Comparaison des performances (graphes déterministes) 86
Figure 56 - Topologies aléatoires 87
Figure 57 - Architecture réseau traditionnelle vs Software Defined 92
Figure 58 - Architecture SDN vue par l'ONF (@ONF) 93
Figure 59 - C-RAN physical architecture (@T. Ratnarajah) 95
Figure 60 - Architecture SDN du réseau sol d'un système multi-gateway 98
Figure 61 - Virtualisation du HUB 99
Figure 62 - Conception du HUB virtuel 99
Figure 63 - Architecture de référence de la gateway (Projet VITAL) 101
Figure 64 - Architecture multi-contrôleurs horizontale 102
Figure 65 - Architecture multi-contrôleurs verticale 103

INTRODUCTION

Ce manuscrit, rédigé en vue de l'obtention de l'Habilitation à Diriger des Recherches, constitue une synthèse de mes travaux et perspectives de recherche effectués au Laboratoire d'Analyse et d'Architecture des Systèmes du CNRS au sein de l'équipe SARA (Services et Architectures pour Réseaux Avancés).

L'équipe SARA est issue du groupe OLC (Outils et Logiciels pour la Communication) fondé par Michel Diaz en 1994 et qui a pour objet l'étude les systèmes de communication. Depuis mon recrutement en tant que doctorant dans l'équipe en 1998, ses thématiques de recherche ont évolué en même temps que les technologies et les infrastructures réseaux disponibles. Pour mémoire, l'année 1994 vit l'ouverture du premier véritable fournisseur d'accès Internet grand public (WorldNet aux US, puis FranceNet), le taux de pénétration du téléphone mobile dans la société Française n'était que de 0,4% et la téléphonie sur IP (VoIP) n'apparaitra qu'au début du siècle suivant ! Quand on observe l'offre actuelle en termes de moyens de communication et notre dépendance aux technologies connectées, peu de domaines peuvent s'enorgueillir d'une telle transformation en si peu de temps. Les thèmes de recherche abordés par le groupe OLC portaient essentiellement sur la conception formelle de protocoles de communication, puis se sont enrichis à la fin des années 90 par une contribution aux systèmes multimédias et hypermédias, en particulier dans le cadre d'un projet de recherche sur la conception formelle de systèmes distribués coopératifs (CESAME) financé par France-Telecom. Les travaux ont ensuite focalisé « sur la communication dans l'Internet nouvelle générations pour la réalisation d'applications distribuées avancées qui peuvent être à la fois hauts débits, mobiles, multimédias et coopératives », avec une structuration en trois thèmes que sont la modélisation et vérification par méthodes formelles, la définition d'architectures et protocoles, ainsi que la définition de services coopératifs. Au fil des années, les thématiques de recherche ont évolué pour aboutir à une structuration adressant la modélisation et le contrôle de systèmes dynamiques à grande échelle, la conception de systèmes à fortes exigences, la continuité de service et la qualité dans les systèmes mobiles, ainsi que les architectures logicielles dynamiques et autonomiques. C'est donc dans ce contexte en constante évolution qu'ont eu lieu les travaux présentés dans la suite de ce manuscrit.

La thématique de recherche développée est en continuité avec les perspectives ouvertes par les travaux effectués dans le cadre de la thèse de doctorat que j'ai soutenue en décembre 2001. Cette thèse avait pour thématique ce que nous avions appelé la problématique « multi réseaux » et proposait une architecture qui visait à offrir des garanties de Qualité de Service (QdS) dans un environnement réseau hautement hétérogène. Nous nous sommes intéressés de fait aux topologies de réseaux intégrant des composantes filaires et sans fil, ce qui induit une forte hétérogénéité du support et nuit au fonctionnement des protocoles

classiques. Ainsi, ces dernières années ont été consacrées plus particulièrement aux architectures et aux protocoles de communication qui permettent d'offrir des garanties de qualité de service dans les réseaux particuliers que sont les réseaux sans fil.

Cette problématique traite directement :

- de la QdS dans les réseaux par satellites,
- de la QdS dans les réseaux sans fil et mobiles,
- de la QdS à l'interconnexion de réseaux hétérogènes,
- Mais aussi des réseaux de capteurs.

Ce manuscrit se décompose donc en quatre chapitres.

Le premier chapitre adresse spécifiquement les réseaux de communication par satellite. Leur succès est principalement motivé par leur large couverture et un temps de mise sur le marché réduit. Même si les marchés de niche, comme la couverture des océans ou des espaces aériens, persisteront, l'avenir des systèmes satellites est aujourd'hui ailleurs. L'intégration du satellite aux systèmes terrestres est aujourd'hui le meilleur moyen de compléter une offre existante de services fixes, mobiles, avec ou sans diffusion. Nos travaux menés ces vingt dernières années ont visé à sortir les systèmes satellites d'un marché de niche pour les rendre incontournables au cœur d'un réseau hybride fixe et mobile. La garantie de la qualité de service est la pierre angulaire des architectures des futurs réseaux incluant le satellite, pour être compétitifs et générateurs de revenus. Nos premières contributions ont adressé ce sujet, en particulier avec le standard DVB-S2/RCS qui est l'une des architectures de communication par satellite qui offre le plus de puissance et de flexibilité dans sa gestion. Nous nous sommes ensuite intéressés à l'intégration de cette architecture dans les systèmes terrestres, et en particulier par l'intégration dans l'architecture IMS (IP Multimedia Subsystem). Ces travaux ont été étendus à la continuité de qualité de service dans les systèmes mobiles où différentes approches ont été comparées. Durant toutes ces années, la couche transport a suscité de nombreuses discussions dans les systèmes satellites, même si aujourd'hui un consensus existe autour des solutions de proxies (PEP) pour l'amélioration des performances. L'hybridation des réseaux génère de nouveaux problèmes, comme une variation brutale du délai et du débit quand un mobile change de type de réseau, ce qui impacte fortement les performances de la couche transport. Nous avons abordé le problème selon plusieurs angles, de l'aspect purement protocolaire à l'optimisation et au contrôle de bout en bout. Aujourd'hui encore ce débat n'est pas clos.

Le deuxième chapitre adresse la problématique des réseaux sans fil qui se sont démocratisés ces 20 dernières années, avec comme point de départ la première norme WiFi publiée en 1997 et permettant des échanges

à 2 Mbps. Dans ce domaine aussi les technologies ont beaucoup évolué pour offrir les réseaux sans fil très haut débit que nous connaissons aujourd'hui, les réseaux cellulaires offrant une connectivité presque permanente, mais également des systèmes permettant d'interconnecter véhicules et objets afin d'offrir un support à l'informatique ubiquitaire. Dessiner une problématique générale à l'ensemble de ces travaux serait illusoire tant l'évolution fût rapide. Toutefois, l'idée maitresse que nous avons suivie réside dans le constat que, puisque dans les réseaux sans fil les ressources physiques de transmissions sont limitées, le système de communication doit être optimisé afin d'offrir la meilleure qualité de service possible. Ainsi, à l'inverse des réseaux filaires qui gagnent en performance avec leur simplification, l'optimisation de ces réseaux nécessite une constante recherche. Nos premiers travaux, non présentés dans ce manuscrit car plus anecdotiques, ont adressé la couche liaison des réseaux WiFi et WiMax. La proximité des mécanismes du WiMax avec ceux des systèmes satellite permettait d'envisager une continuité de service naturelle entre les deux systèmes. Nos travaux ont ensuite bénéficié d'une collaboration fructueuse avec les équipes d'électronique du laboratoire en incluant dans nos réflexions les couches basses des réseaux sans fil. Un premier projet sur les réseaux de capteurs sans fil a permis d'élaborer un ensemble de contributions sur les réseaux de capteurs intelligents, puis nous nous sommes intéressés à de nouveaux services, tels que la gestion d'énergie et de la synchronisation dans ces réseaux. L'évolution des technologies offre de plus en plus de contrôle sur les couches basses du système de communication. Nous profitons de cette opportunité pour développer des systèmes de métrologie de réseaux sans fil qui, à terme, visent la prédiction des conditions de transmission afin d'en préparer l'adaptation. Cette adaptation peut être une adaptation locale du système de communication (changement de fréquence, codage, modulation, protocoles, etc.), mais aussi l'adaptation globale d'un réseau nécessitant alors une supervision plus large. Ces différents points seront abordés dans ce chapitre en les resituant dans leur contexte.

Le dernier chapitre est consacré aux perspectives de recherche. Depuis quelques années s'est enclenchée une tendance de transformation de fond des réseaux de communication par le remplacement des matériels par des éléments logiciels. On parle de « softwarization » des réseaux, que l'on peut traduire par une dématérialisation des réseaux. C'est une formidable opportunité car, outre le fait de diminuer les coûts des réseaux, elle en permet un plus grand contrôle, rendant possible le déploiement de solutions que nous avions envisagées sans pouvoir réellement les mettre en œuvre. En revanche, les architectures, les technologies et les limites de cette approche ne sont pas encore clairement définies. Elle soulève de nombreuses questions quant aux possibilités, mais aussi aux risques qu'elle suscite. C'est ce que nous aborderons dans ce dernier chapitre, dans la continuité des travaux sur les systèmes de communication par satellite et sans fil. Des perspectives à court terme présenteront des travaux déjà lancés, au travers de projets industriels ou d'encadrement de stages. Les travaux qui aujourd'hui sont l'objet de thèses en cours de démarrage ou proposés pour le montage de projet de recherche européen sont des perspectives à l'échelle

de trois à cinq ans. Enfin, nous aborderons des défis plus généraux et dont les échéances ne sont pas encore connues, que suscite la dématérialisation des réseaux.

Pour finir, un dernier chapitre présente un curriculum détaillé explicitant le déroulement de ma carrière d'enseignant-chercheur.

Chapitre 1

LES RESEAUX PAR SATELLITE

1. Introduction

Les systèmes satellites possèdent d'indéniables qualités, principalement une couverture géographique étendue pour un coût d'infrastructure réduit, avec des stations fixes ou mobiles et une capacité à effectuer de la diffusion à large échelle. Les nombreuses avancées en codage et en antennes offrent aujourd'hui des débits élevés. Toutefois, il n'est plus aujourd'hui d'actualité de considérer les systèmes de communication par satellite comme des concurrents aux systèmes de communications terrestres. Le modèle économique envisagé est aujourd'hui dans l'hybridation des réseaux terrestres avec des liaisons par satellite pour les compléter là où ils ne sont pas rentables ou efficaces : les zones reculées et la mobilité à large échelle. Aussi, le satellite s'avère être un médium adapté pour la résorption des zones blanches et offre un des rares moyens de communication qui tolère une mobilité à large échelle et grande vitesse (typiquement adapté aux services avioniques, ferroviaires, etc.).

La convergence est l'un des enjeux majeurs des futurs réseaux de télécommunication (NGN). Elle est aussi l'un des fondements de la 4G ou 3G-LTE car elle comprend à la fois la convergence des services et la convergence fixe-mobile.

Cette tendance lourde implique un changement de paradigme afin de mettre en œuvre une politique de qualité de service (QoS) dans un contexte où les utilisateurs peuvent utiliser des applications multimédias aux contraintes variées et ceci par l'intermédiaire de différents réseaux d'accès. Cette politique de QoS doit ainsi fédérer des gestions de QoS très largement différentes suivant les réseaux considérés (d'accès ou de cœur) tout en permettant une optimisation adaptée à chacun de ces réseaux et à des services aux contraintes variées. Il faut rappeler que la situation actuelle est une prise en compte extrêmement partielle de la QoS de bout en bout et que les solutions mises en œuvre au niveau des différents segments sont largement sous-optimales.

Les travaux que j'ai menés au cours de ces quinze dernières années ont eu pour objectif l'intégration réussie des systèmes satellites dans les prochaines générations de réseaux terrestres. Les systèmes de la famille DVB-S/RCS (S2, RCS2, etc.), qui sont les systèmes de communication par satellite qui aujourd'hui offrent

l'architecture et les services les plus évolués, seront utilisés pour illustrer les verrous qui devront être levés pour garantir une intégration réussie. Bien sûr, les concepts abordés sont génériques et dépassent le cadre de cette architecture. Ils trouveront écho auprès d'autres systèmes de communication par satellite concurrents.

L'intégration des systèmes satellites dans les réseaux terrestres a été abordée aux travers des exigences amenées par ces derniers. Le plan de ce chapitre suit naturellement l'ordre chronologique de ces travaux. D'abord une présentation générale des réseaux hybrides avec liens terrestres et par satellite introduira le chapitre. Les problématiques de gestion de la qualité de service dans les réseaux terrestres et satellites ainsi que les solutions permettant une interopérabilité ont été une de nos premières préoccupations et sont présentées après cette introduction. Les architectures de mobilité et la question de leurs performances seront ensuite traitées. Les couches hautes ne seront pas oubliées non plus, avec un focus sur le rôle de la couche transport dans un réseau hybride. Toutes les solutions proposées ont été développées et testées au cours de plusieurs projets de recherche européens et français. Les résultats ont été obtenus soit par la mesure de systèmes réels, soit par des plates-formes d'émulation réalistes ou par l'utilisation de simulateurs quand cela n'était pas possible autrement.

2. Hybridation des systèmes de communication par satellite

Le satellite s'avère être un médium adapté pour la résorption des zones blanches et grises grâce à sa large couverture et son accessibilité depuis des zones non couvertes par les infrastructures terrestres.

Le développement du très haut débit (THD) conduit à l'émergence de nouveaux services et usages, en particulier de plus en plus basés sur des médias audiovisuels très contraignants pour les supports de communication. A court et moyen terme, dans un contexte où les technologies de l'information et de la communication prennent une importance croissante dans tous les secteurs et dans le quotidien des citoyens, la prise en compte des améliorations des services existants sur les réseaux et la flexibilité à intégrer rapidement de nouveaux services, permises par le très haut débit, deviennent un enjeu majeur pour les opérateurs de télécommunication. Les enjeux de ces efforts se traduisent, pour les opérateurs de télécommunications par satellite, par la nécessité d'hybrider pour faire converger, d'une part les réseaux broadcast et bidirectionnels satellites (pour les services fixe et mobile) et d'autre part, les réseaux terrestres, afin de fournir un accès plus performant, transparent et globalisé, aux applications et services de plus en plus gourmands en ressources réseaux.

L'offre d'un service ubiquitaire (always on) est aujourd'hui une des exigences pour la conception des nouvelles infrastructures réseau. Les concepts NGN et 4G sont totalement en phase avec cette approche :

les services ou applications sont conçus indépendamment d'un type de réseau d'accès particulier (sans fil, cellulaire, filaire, optique, etc.) mais sont basés sur un cœur de technologie IP, qui est aujourd'hui la pierre angulaire de la convergence des services téléphoniques et données. Dans les NGN ou les réseaux 4G, le paradigme du « toujours connecté » est conçu comme une généralisation de la mobilité pour les services utilisateurs, avec un changement de réseau d'accès complètement transparent tant qu'il est compatible. Les applications, ainsi que les protocoles sous-jacents, doivent être persistantes aux changements de réseaux. Cette exigence reste néanmoins très ambitieuse car les réseaux sont hétérogènes et potentiellement opérés par une grande variété d'acteurs.

2.1. ARCHITECTURE RESEAU : INTEGRATION DES RESEAUX HYBRIDES

L'intégration des réseaux par satellite dans les réseaux terrestres peut être faite de plusieurs manières. De nombreuses solutions techniques peuvent être envisagées à ce propos mais le critère principal d'intégration sera principalement dicté par les modèles de rôle et de business qui en découlent.

Il est toutefois possible de définir trois types d'intégrations génériques :

1. une **intégration à fort couplage**, dans laquelle le système mobile (3G, LTE, WIMAX) est étendu pour prendre en charge le media satellite comme un canal d'accès alternatif, de manière complétement transparente ;
2. une **intégration relai**, dans laquelle le satellite est intégré à l'infrastructure du réseau mobile, non pas directement au niveau de l'interface air mais à travers un relai spécifique (gateway) permettant l'accès au cœur de l'infrastructure mobile ;
3. une **intégration à faible couplage**, où une interface spécifique au système satellite est ajoutée au terminal mobile satellite afin de permettre aussi l'accès à un réseau IP terrestre par cette interface. Des terminaux multimodaux et multitechnologies capables de gérer plusieurs interfaces et leurs protocoles spécifiques (par exemple DVB-RCS+M) sont donc nécessaires.

2.2. INTEGRATION A FORT COUPLAGE : UNE APPROCHE INTEGREE

Avec l'approche « Intégration à fort couplage », le satellite est complètement fusionné dans le système mobile ciblé (3G, LTE, WIMAX), de manière transparente pour l'utilisateur mobile. L'interface d'accès radio est étendue (infrastructure et protocoles) pour intégrer un canal satellite comme interface alternative d'accès pour l'utilisateur mobile.

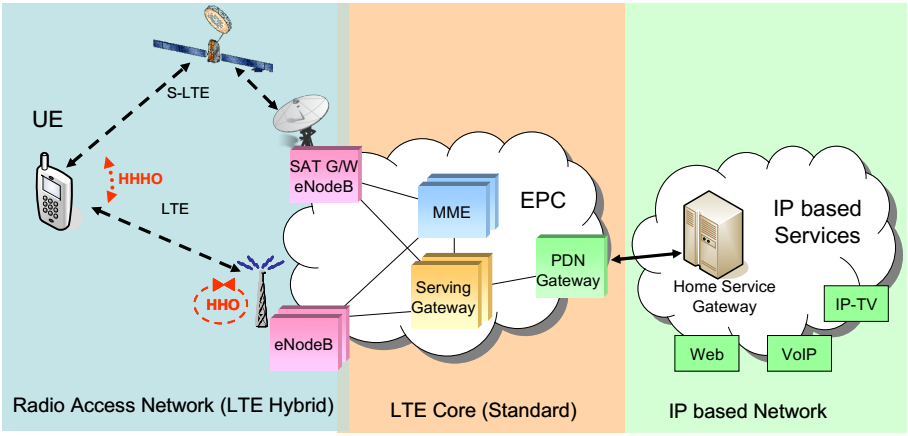


Figure 1. Architecture à fort couplage

Cette approche est considérée comme l'étape ultime dans l'intégration du satellite dans le réseau hybride. Le système satellite est conçu pour être totalement compatible avec les protocoles mobiles et est complètement intégré dans le cœur du réseau, au travers de l'interface standard eNodeB. C'est également l'approche la plus puissante du point de vue de l'utilisateur. Malheureusement, c'est aussi la plus complexe car elle requiert de très grandes performances du matériel, au niveau du terminal mais aussi au niveau du satellite, afin de conserver des équipements portatifs de petite taille.

Le terminal est un terminal hybride car il peut interagir avec le satellite ou une antenne terrestre en utilisant la même pile de protocoles (LTE voire WIMAX). La gestion de la mobilité est prise en charge par ces protocoles, au niveau de la couche accès, comme dans un réseau cellulaire terrestre classique.

2.3. INTEGRATION RELAI

Avec le modèle « Intégration relai », le satellite est intégré dans le réseau mobile en tant que relai. De fait, il n'est pas positionné à l'interface radio avec le mobile mais en tant que relai spécifique pour permettre l'accès au cœur du réseau mobile. Ainsi, le terminal mobile est un terminal classique, respectant le standard du réseau mobile visé (par exemple LTE ou Wimax). Ce n'est plus un équipement dual et l'interface satellite reste aussi une interface satellite fixe classique (*Fixed Satellite Service*). Le mobile est connecté à un eNodeB classique, lui-même interconnecté au réseau de cœur par une liaison satellite. C'est au réseau satellite de s'interfacer avec le cœur du réseau mobile terrestre. Dans un modèle LTE, il pourrait jouer le rôle de eNodeB ou de *Serving Gateway* (SGW).

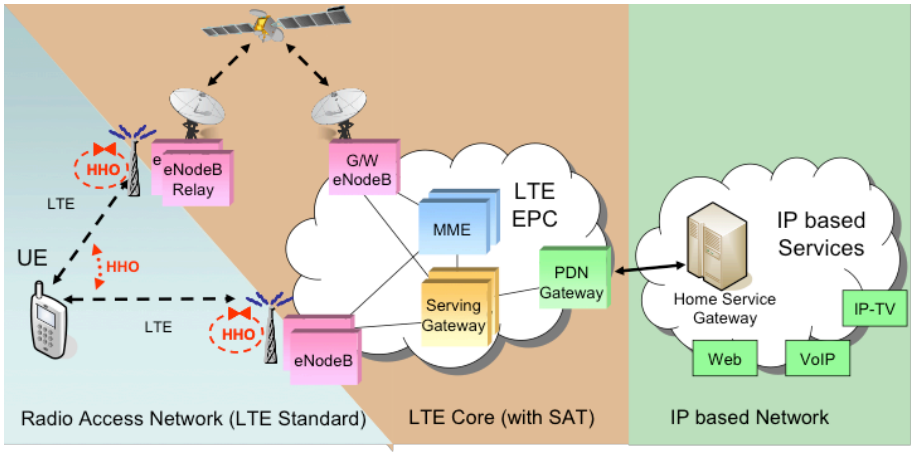


Figure 2. Architecture relai LTE

2.4. INTEGRATION A FAIBLE COUPLAGE

Avec « l'intégration à faible couplage », une interface spécifique au satellite est ajoutée au terminal pour s'interconnecter au réseau IP par un réseau d'accès spécifique. Elle est à différentier de la première approche, par le fait que cette fois-ci l'interface supplémentaire respecte les standards d'un réseau mobile satellite classique (MSS). Il n'y a pas d'intégration par un protocole spécifique au système mobile terrestre comme dans les approches précédentes. Cette approche met en œuvre des terminaux mobiles multitechnologies, gérant des interfaces classiques avec des protocoles dédiés (pour le satellite une architecture DVB-RCS+M peut être utilisée).

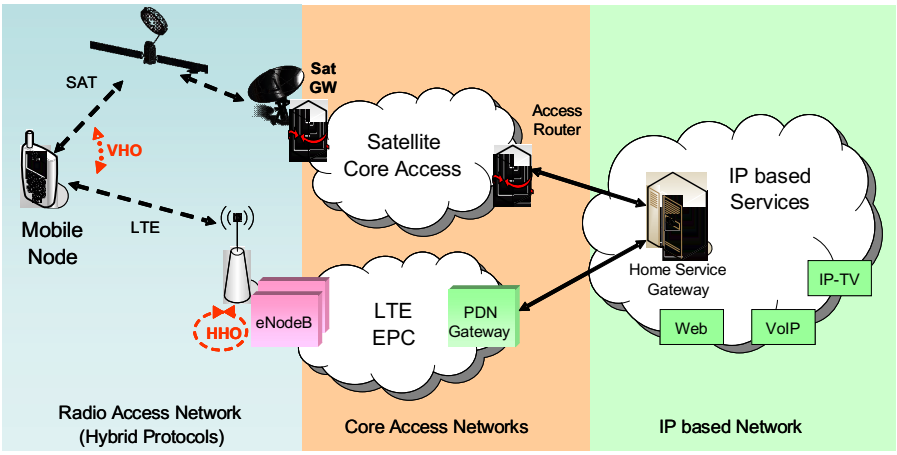


Figure 3. Intégration à faible couplage LTE/satellite

Cette architecture peut être généralisée à toutes les technologies, non limitées à LTE. Le terminal mobile s'interconnecte à un réseau IP à travers des réseaux d'accès hétérogènes.

2.5. DISCUSSION

Après cette présentation succincte des enjeux de l'hybridation des réseaux, il apparaît que le marché ainsi que les technologies ont accepté la démarche d'intégration et d'hybridation des réseaux. De fait, dictés par la volonté des utilisateurs, des embryons de réseaux hybrides existent aujourd'hui grâce à la complémentarité qu'offrent les réseaux WiFi et les réseaux mobiles 3G/4G. Toutefois, ces approches peuvent être considérées comme complètement découplées puisque même si certains opérateurs offrent des services pour les deux types de réseaux (WiFi ou 3G/4G), rares sont les cas où ces deux réseaux sont interopérables, à minima par une authentification commune et plus généralement par une offre de service généralisée sur les deux technologies. Il est difficile de prédire quel sera l'avenir des réseaux mobiles, même si certaines tendances se dégagent. La généralisation des femtocells, intégrées aux box ADSL, milite pour une généralisation de l'accès 3G/4G au détriment des réseaux d'accès sans fil classique. Toutefois, l'évolution des architectures de mobilité de l'Internet et des protocoles d'accès sans fil très haut débit, pourrait laisser envisager, au contraire, une concentration de l'accès par ces réseaux. A l'inverse, dans une démarche plus pragmatique, considérant les spécificités de chaque technologie d'accès en termes de couvertures, de débits et de services, il est fortement probable que ces technologies continuent de cohabiter longtemps. Il faudra toutefois, comme cela a été évoqué dans ce chapitre, proposer des solutions d'intégration de ces réseaux et cela malgré les forts défis techniques à lever.

Les paragraphes suivants montreront comment nous avons proposé des solutions répondant aux principaux verrous existants aujourd'hui pour l'intégration du satellite dans ces futurs réseaux hybrides. Le premier s'intéresse à la gestion de la qualité de service (QdS), au travers des architectures de gestion de la QdS des réseaux terrestres et satellites et aussi au travers des architectures et normes pour les réseaux hybrides de nouvelle génération. Le second concernera l'intégration horizontale des réseaux, c'est à dire l'interopération des solutions de gestion de QdS entre plusieurs réseaux. Enfin, la problématique de la performance des services de bout en bout sera abordée au travers des mécanismes de mobilité et de transport.

3. La qualité de service dans les systèmes satellite DVB-RCS

3.1. EVALUATION DE LA QUALITE DE SERVICE DES SYSTEMES SATELLITE

Nos travaux sur les systèmes de communication par satellite ont débuté dès le début de ma thèse par une collaboration avec Thales Alenia Space dans le cadre du projet européen GCAP [GCAP00] sur un protocole

de transport à fiabilité partielle adapté aux longs délais [BER99]. Par ce biais nous nous sommes intéressés à la qualité de service dans les réseaux par satellites émergents à cette époque : DVB-S/RCS.

Avec la norme DVB-S de diffusion de paquets IP par satellite disponible depuis la fin des années 90, les terminaux sont uniquement en mesure de recevoir du trafic provenant du satellite. Au fur et à mesure que les services IP (accès Internet large bande, voix sur IP, vidéo à la demande, etc.) ont pris de l'envergure dans les réseaux terrestres, l'idée de supporter un canal interactif entre le terminal utilisateur, les serveurs et les utilisateurs d'Internet est apparue. Ainsi, le standard UDLR (UniDirectional Link Routing) [RFC 3077] a permis d'émuler à moindre coût une solution bidirectionnelle à travers un lien de retour terrestre, généralement un lien modem RTC classique.

Cependant, le réseau satellite alors lié à une infrastructure terrestre n'est plus complètement autonome, d'où la nécessité d'une voie de retour par satellite. La norme DVB-RCS (Digital Video Broadcast Return Channel over Satellite) spécifiée dans [ETSI 301790][ETSI 101790] standardise cette voie de retour via satellite pour les terminaux satellites. Couplée avec la voie aller s'appuyant sur la norme DVB-S, DVB-RCS introduit l'interactivité nécessaire à la définition d'une architecture d'un système multimédia large bande de nouvelle génération. Ainsi, début des années 2000 se trouve spécifié un protocole d'accès de type MF-TDMA. Les systèmes satellites ayant nativement une large couverture, surtout à l'époque avec des spots de plusieurs milliers de km^2, rapidement la question de la gestion de la qualité de service dans un réseau couvrant potentiellement plusieurs milliers d'abonnés s'est faite sentir.

C'est dans ce contexte que nos premiers travaux ont débuté sur l'évaluation de la qualité de service offerte par ces premiers systèmes DVB-S/RCS.

3.1.1. Évaluation des services multimédia

Début 2000, les applications multimédia commencent à émerger et à devenir populaires dans l'Internet. Des outils de diffusion de vidéo, de téléconférence, de travail collaboratif, comme PLATINE développé au LAAS/CNRS [VIL98], font leur apparition, en même temps que de nouveaux codec permettant un échange optimisé sur des supports de communication encore très limités. Les codecs vidéo, historiquement basés sur des standards de concaténation d'images comme AVI ou MJPEG évoluent vers des codages différentiels (MPEG-2) beaucoup moins gourmands en débit, mais produisant en contre partie, non plus un flux de débit fixe, mais un flux très variable (de quelques centaines de kbps à plusieurs mbps). Il en est de même pour les codec audio, avec de nouveaux codecs de type GSM ou G723.1, qui remplacent les historiques codecs G711 à 64 kbps, pour des techniques dites à suppression de silence, plus compressées, mais à débit variable car ne produisant pas de données pendant les périodes de silence. Ces débits permettent la transmission de la voix à des débits de 5.6/6.3 kbps pour G711.3 et 13 kbps pour GSM. Il

était donc légitime d'étudier comment les nouveaux systèmes de communication par satellite pourraient supporter ces nouveaux médias.

L'un des principaux intérêts de la norme DVB-RCS est d'offrir un canal retour dont les capacités peuvent varier au cours du temps. Chaque station, aussi appelée ST (Satellite Terminal), peut demander dynamiquement des « capacités de transmission » auprès du contrôleur de réseau NCC (Network Control Center) qui les lui alloue en fonction des besoins et des ressources. Ainsi, si à un instant donné, quand une accumulation de trafic à émettre est observée dans un ST (remplissage de ses buffers d'émission), celui-ci peut requérir plus de bande passante auprès du NCC. L'algorithme correspondant est le DAMA (Demand Assigned Multiple Access), implanté dans un protocole de type Client/Serveur et permettant, dans un système DVB-RCS, d'allouer à la demande des ressources de niveau MAC. Le client et le serveur sont respectivement localisés dans chaque ST et dans le NCC. La signalisation des STs vers le NCC peut être une signalisation hors-bande ou directement intégrée dans DVB. Le NCC quant à lui répond par la diffusion de la table TBTP (Terminal Time Burst Time Plan) à chaque supertrame qui indique périodiquement (généralement fixé à 50 ms ou moins) les slots d'émission pour chacune des stations requérant des capacités d'émission. Les allocations peuvent être de 5 types dans DVB-RCS : statiques et non sujettes à des allocations dynamiques (CRA - Continuous Rate Assignment), dynamiques (RBDC - Rate-Based Dynamic Capacity) exprimées en slots par trame ou (A-VBDC – Absolute - Volume-Based Dynamic Capacity) exprimées en slot pour coller au mieux à l'évolution des files d'attente du terminal, et une surcapacité (FCA-Free Capacity Allocation) quand le réseau et peu chargé.

Une des particularités des systèmes de communication par satellite, outre une capacité spectrale limitée qu'il faut exploiter au mieux, réside dans des délais de propagation relativement longs. En effet, pour communiquer avec un satellite géostationnaire localisé sur l'orbite géostationnaire à près de 36000 km de la terre, il faut environ 128 ms pour que le signal se propage de la terre au satellite. Ainsi, en ne considérant que les temps de propagation, il faut à minima 4 fois 128 ms, soit plus de 500 ms, pour qu'un terminal puisse requérir et obtenir le droit d'émettre sur le réseau. Dans la réalité ces temps sont plus importants du fait de la gestion du protocole mac synchronisé sur les supertrames et difficilement prédictibles, ce qui justifie de travailler en simulation pour obtenir des résultats significatifs. Ainsi, pour qu'un terminal puisse émettre correctement de la vidéo ou de l'audio, il devra être capable « d'anticiper » quels seront ses besoins en termes de débits pour les 500 ms (plus généralement 700 ms) à venir. Toute sous-estimation du débit requis se traduira par un remplissage du buffer de transmission et donc par un délai pour l'application, ce qui est très pénalisant pour les applications interactives. Toute surestimation engendrera un gaspillage de la capacité du système.

Dans [COM05] nous réalisons donc l'évaluation de services audio et vidéo sur un système de type DVB-S/RCS. Les résultats montrent une inadéquation des méthodes de calcul de la capacité requise par le DAMA qui effectue une prévision totalement proportionnelle à la taille de la file de transmission. En effet, ces premiers algorithmes étaient dimensionnés pour des flux à débit constants. En collaboration avec l'université de Rome la Sapienza, nous proposons une nouvelle formule de calcul de l'allocation DAMA (Équation 1) qui intègre l'anticipation des besoins du terminal.

$$r_{REQ}[k] = \left\lceil r_{IN}[k] + \max\left\{0, \frac{1}{2}\left[q[k] - \left(r_{IN}[k] + (\alpha-1)r_{IN}[k-1] + (\alpha-1)r_{IN}[k-2] + r_{REQ}[k-1] + r_{REQ}[k-2]\right)\right]\right\}\right\rceil$$

Équation 1 - Algorithme de DAMA anticipatif

où $r_{REQ}[k]$ est la capacité requise à la k^{ième} supertrame, $r_{IN}[k]$ est la capacité correspondant aux nombres de cellules reçues durant la (k-1)^{ième} supertrame, $q[k]$ est la taille de la file MAC DVB-NRT mesurée au début de la k^{ième} supertrame et α le coefficient d'anticipation.

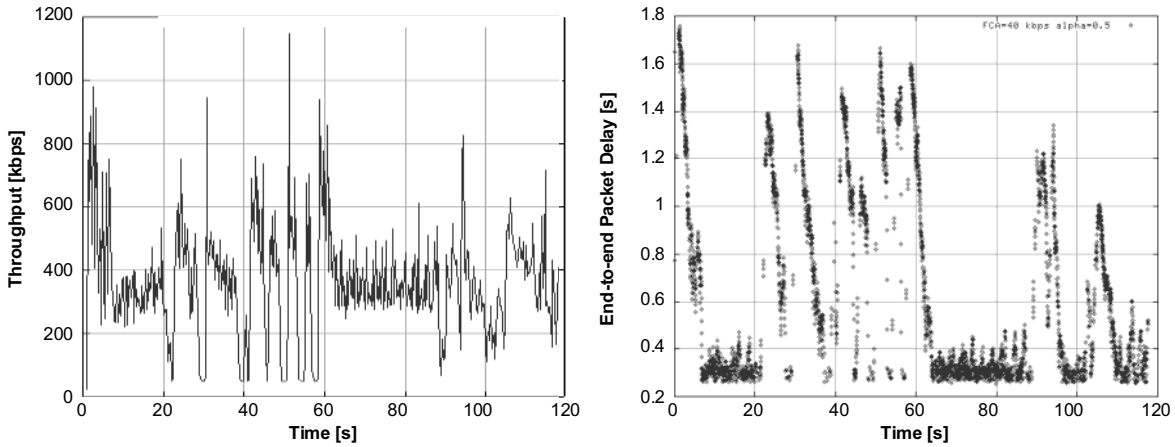


Figure 4. Débit et délai pour une Vidéo basée sur le codec DIVX

Dans la Figure 4, la courbe de gauche représente le débit d'une vidéo à la demande, basée sur le codec DIVX (Débit moyen = 400 kbps), et celle de droite le délai de bout en bout mesuré par paquet avec α=0.5 et FCA=40 kbps.

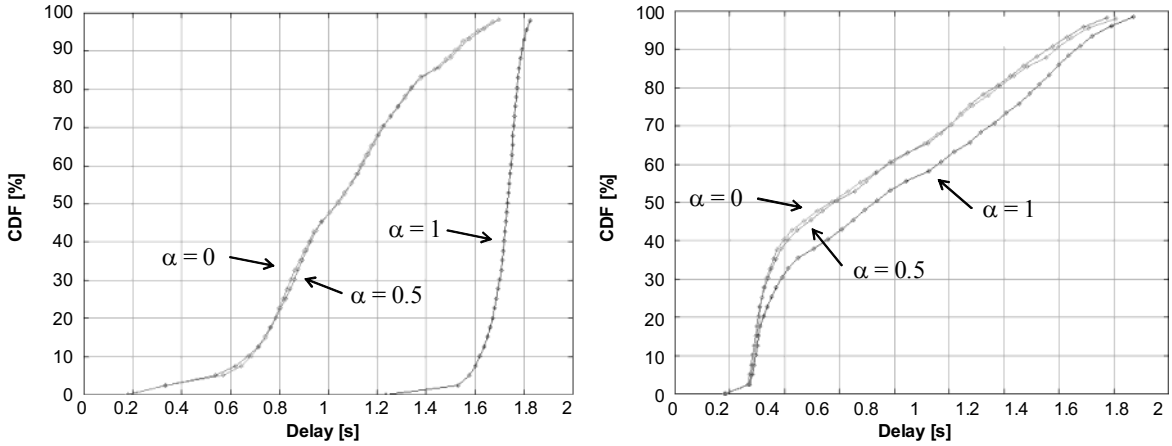


Figure 5. Fonction de densité cumulative des délais de bout en bout

Dans la Figure 5, la courbe de gauche représente la fonction de densité cumulative des délais de bout en bout avec un FCA de 0 kbps et celle de droite avec un FCA de 40 kbps.

La Figure 5 montre l'efficacité de ce nouvel algorithme en termes de réduction des délais de bouts en bouts lors de la transmission d'un flux vidéo variable dont le profil de débit est donné Figure 4. Sur la Figure 5 a) ont peut remarquer qu'un DAMA classique, sans anticipation (α=1), produit un délai de près de 1,8 secondes. Avec de l'anticipation, ce délai sera réduit pour une majorité des paquets. Un mécanisme de fiabilité partielle peut éliminer les rares paquets en retard. Dans [NIV06] nous avons proposé une méthode permettant de calculer automatiquement ce facteur d'anticipation. Le gain d'une sur-allocation (Free Capacity Assignment) sur le délai mesuré est immédiat.

3.1.2. Évaluation d'un système DVB-S2 en bande Ka

Normalisé par l'ETSI en 2005 [ETSI EN 302 307], DVB-S2 introduit des nouveautés permettant des gains de performances notables, par rapport à son prédécesseur et ce à plusieurs niveaux, principalement par un codage et une modulation adaptés mais aussi par une encapsulation optimisée.

Un problème majeur des systèmes de transmission par satellite réside dans la qualité du canal qui est très sensible aux perturbations météorologiques. Les variations du canal de propagation obligent souvent à dimensionner le système de transmission dans le pire cas ou du moins un cas non favorable. Cela induit par conséquent une sous-utilisation du lien du fait d'un codage inadapté lorsque les conditions sont bonnes. L'introduction d'un système de transmission variable et/ou adaptatif apporte de meilleures performances de transmission, une plus grande souplesse ainsi qu'une complexité raisonnable du récepteur.

Dans le cas de codages et modulations variables (VCM – Variable Coding and Modulation) il est possible de choisir le mode de transmission parmi l'ensemble des modulations dont dispose DVB-S2 (QPSK, 8PSK,

16APSK, 32APSK) ainsi que le type de codage (code en bloc et code LDPC). Ainsi est formé un « ModCod » parmi 28 disponibles (Figure 6), qui doit être adapté à la qualité de la liaision (C/N). Ainsi le ModCod QPSK 1/4 permettra la transmission sur une liaison dégradée (C/N = -2,35 dB) avec une faible efficacité (0,36 d'efficacité spectrale) et à l'inverse le modcod 32APSK 9/10 sera le plus efficace (3,3 d'efficacité spectrale) sur une liaison de très bonne qualité (C/N = 16,05 dB).

Mode	MOD COD	Mode	MOD COD	Mode	MOD COD	Mode	MOD COD
QPSK 1/4	1_D	QPSK 5/6	9_D	8PSK 9/10	17_D	32APSK 4/5	25_D
QPSK 1/3	2_D	QPSK 8/9	10_D	16APSK 2/3	18_D	32APSK 5/6	26_D
QPSK 2/5	3_D	QPSK 9/10	11_D	16APSK 3/4	19_D	32APSK 8/9	27_D
QPSK 1/2	4_D	8PSK 3/5	12_D	16APSK 4/5	20_D	32APSK 9/10	28_D
QPSK 3/5	5_D	8PSK 2/3	13_D	16APSK 5/6	21_D	Reserved	29_D
QPSK 2/3	6_D	8PSK 3/4	14_D	16APSK 8/9	22_D	Reserved	30_D
QPSK 3/4	7_D	8PSK 5/6	15_D	16APSK 9/10	23_D	Reserved	31_D
QPSK 4/5	8_D	8PSK 8/9	16_D	32APSK 3/4	24_D	DUMMY PLFRAME	0_D

Figure 6. Ensemble des modcods disponibles dans DVB-S2 (source ETSI)

La norme prévoit une adaptation dynamique des modcod en fonction du C/N mesuré par le terminal satellite et d'un dialogue avec la gateway. Ce type de transmission est appelé ACM (Adaptative Coding and Modulation) car elle permet une adaptation continue du modcod afin d'offrir la meilleure efficacité. Compte tenu des différents codages et modulations utilisés pour chaque lien, la bande passante attribuée à chaque terminal peut donc varier selon le taux d'erreur et donc selon une modulation et un codage donné.

Au travers du projet [OURSES07], en collaboration avec Astrium (Airbus Defense) et le CNES nous avons eu l'opportunité de mettre en œuvre nos techniques d'évaluation de la qualité de service sur un lien satellite réel. Outre un émulateur de canal et des terminaux DVB-S2/RCS, nous disposions d'un canal descendant de 10 MHz et de 1 MHz montant sur le satellite Astra 1L. Ce fût une des premières expérimentations DVB - S2 avec boucle de retour ACM en bande Ka. Au travers de la mise en œuvre d'un banc d'expérimentation, nous nous sommes intéressés aux applications multimédia mais aussi au fonctionnement du protocole TCP. Les résultats détaillés de ces expérimentations sont disponibles dans la thèse [TOU12].

3.2. ARCHITECTURES DE QOS POUR SYSTEMES SATELLITE

Ces travaux sur l'évaluation de la qualité de service nous ont naturellement amené à contribuer au développement de nouvelles architectures de communication pour les réseaux par satellite. En effet, ces travaux réalisés dans les projets européens [SATIP6-02] et [SATSIX06] rassemblaient les acteurs majeurs européens autour de la construction des futurs standards de communication par satellite de type DVB-

S/RCS. Les connexions entre ces projets et les organismes de normalisation, que ce soit l'ETSI avec le groupe BSM (Broadband Satellite Multimedia) ou le SATLABS, étaient nombreuses. De par le matériel exclusif d'émulation que nous développions, nous avons pu proposer, tester et comparer différentes architectures de qualité de service pour ces futurs systèmes.

Ces travaux ont abouti à une architecture aujourd'hui classique [GAY07] et déployée dans les systèmes DVB-S/RCS actuels. La Figure 7 décrit cette architecture IP multi couche. Des interactions inter-couches, entre la couche liaison et la couche IP sont mises en œuvre pour anticiper l'allocation dynamique de ressources. Une architecture de type diffserv est utilisée pour la couche 3 avec une correspondance directe des files IP EF (Expedited Forwarding) et DVB-RT (Real Time). Les files AF (Assured Forwarding) et BE (Best Effort) sont quant à elles soumises à l'allocation dynamique du DAMA au travers de la file DVB-NRT (Non Real Time).

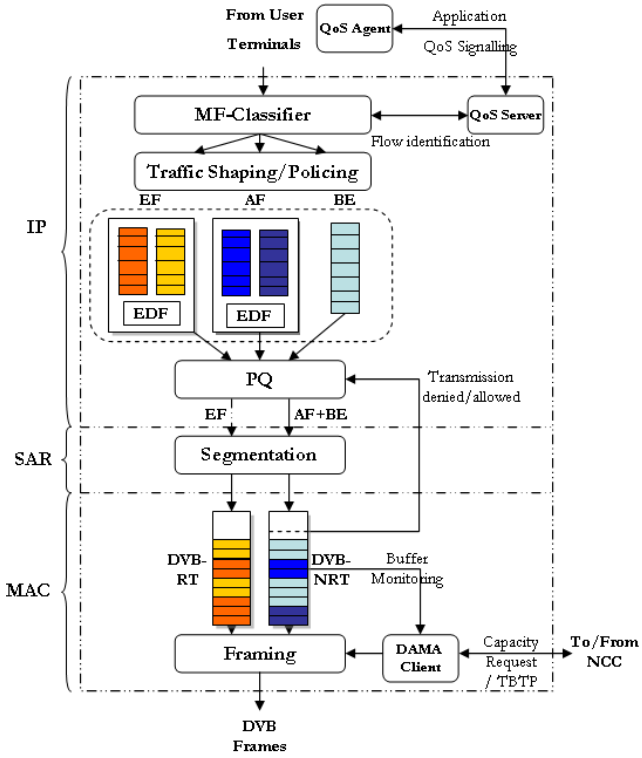


Figure 7. QoS architecture

Bénéficiant d'une architecture de QoS évoluée, les applications devaient disposer d'un moyen pratique pour utiliser ces services. Notons que du fait d'un spectre limité, la prise en compte de la qualité de service est indispensable dans les réseaux satellite, plus que dans les réseaux terrestres, car les ressources doivent être allouées à près de 100% pour être rentables. Nos travaux se sont donc orientés vers deux mécanismes permettant à l'application de signaler ses besoins [COM05]. Le premier appelé QoSAgent permet à l'utilisateur de définir quelles applications il souhaite voir utiliser prioritairement les ressources du réseau.

Le second [ALP05B], pour que cette gestion soit transparente à l'utilisateur, se propose d'automatiser la sélection du service IP en se reposant sur les mécanismes de gestion de session que propose le protocole SIP [RFC 3262] [RFC 3312]. La Figure 8 en schématise le principe sur une architecture satellite maillée : le terminal intègre un SIP proxy qui interceptera les demandes d'ouverture et de fermeture de session et traduira cela par des requêtes propriétaires au système satellite. Il faut noter que ce scénario est un cas particulier car rares sont les architectures satellites maillées où les deux correspondants se trouvent sur un même réseau par satellite. Ce scénario est typique des communications militaires. Souvent, les utilisateurs se trouvent sur des réseaux différents, ce qui nous mènera à la notion d'hybridation.

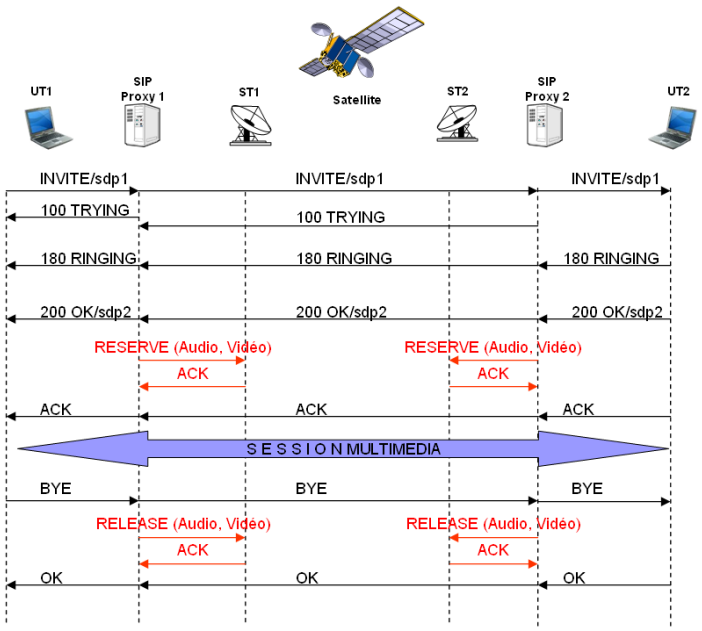


Figure 8. Réservation de ressources dans un système satellite par SIP

Ce mécanisme a été par la suite optimisé en reposant sur les mécanismes internes de DVB-RCS. L'idée générale consistait à intercepter directement dans la gateway du système satellite l'ouverture de session SIP et de pré-réserver les ressources dans le système afin que dès que le correspondant confirme, il puisse transmettre, sans attendre le mécanisme d'allocation dynamique DAMA. Ce mécanisme peu coûteux à implanter permet d'économiser de précieuses secondes à l'ouverture de connexion. La Figure 9 compare les moments d'émission de données entre le mode de réservation classique et optimisé.

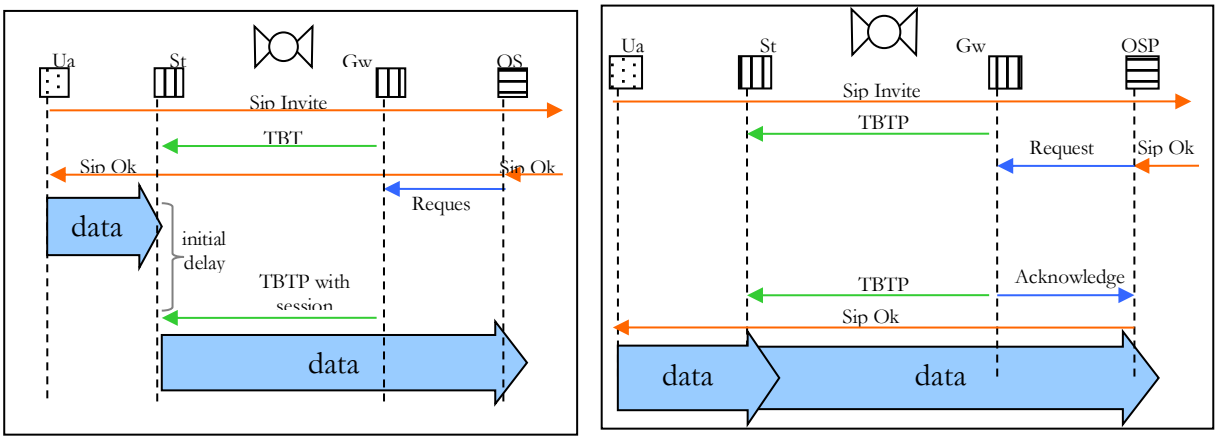


Figure 9. Réservation de ressources par SIP. a) classique; b) optimisé

3.3. MOYENS D'EXPERIMENTATIONS

3.3.1. La plateforme d'émulation OpenSand

L'expérimentation de nouvelles solutions dans un système satellite est quelque chose de complexe car il n'est pas possible de déployer un système complet (satellite et segment sol) répondant aux besoins d'une expérimentation. Il faut toutefois noter une tradition qui consiste à embarquer des systèmes de test dans les nouvelles plateformes (par exemple un émetteur sigfox sur le dernier spot 7), voire de profiter d'un lancement pour y adjoindre des nano satellites, mais dans tous les cas cela ne concerne pas une architecture entière.

Afin de prouver la validité de nos propositions, nous avons contribué au développement d'un émulateur de système DVB-S/RCS [OPENSAND]. Initialement débuté dans le projet BRAHMS, c'est avec le projet [SATIP6-02] qu'on été ajoutées les couches DVB-RCS et IP [ALP04A]. [SATSIX06] a permis d'intégrer les architectures de QoS complexes [ALP06] ainsi que le support de DVB-S2.

Aujourd'hui industrialisée par le CNES, avec de soutien de THALES ALENIA SPACE, cette plateforme est devenue la référence pour l'émulation de système de communication par satellite. Utilisée comme support pour les nouveaux projets CNES elle s'est vue adjoindre au fil du temps de nombreuses fonctionnalités, comme des moyens d'introspections évolués, l'émulation de système Métro Ethernet, l'interfaçage NGN (Next Generation Networks), etc. Aujourd'hui projet OpenSource, OpenSand est toujours le support des nouveaux projets que nous lançons dans le domaine.

3.3.2. La simulation par NS-2

Parfois plus simple à mettre en œuvre que l'émulation qui nécessite des ressources conséquentes : une dizaine de postes pour simuler un système complet avec 3 stations, la simulation peut permettre, par un niveau d'abstraction plus important, d'obtenir des résultats sur des scénarios plus complexes. Bien sûr sans bénéficier de la précision de l'émulation et la capacité à mettre en œuvre des applications réelles.

Mus par des besoins de passage à l'échelle, un modèle NS-2 pour la simulation de système satellite à QoS a été proposé par [GAY09]. Basé sur le modèle proposé par R. Secchi [Got06] nous sommes venus y ajouter la gestion de différentes files MAC (DVB-RT et DVB-NRT) ainsi que la gestion des files IP diffserv, conformément à l'architecture proposée dans [GAY07].

3.3.3. L'expérimentation réelle

Dans le projet [OURSES07] nous avons pu bénéficier d'un lien bidirectionnel en bande Ka sur ASTRA 1L (très sensible aux perturbations météorologiques). Une liaison seule ne permettant pas l'expérimentation du système, nous avons du y adjoindre des terminaux satellite (marque STM Satlink 1000 dans notre cas) ainsi qu'une gateway (Gateway Thales A9780 R2) qui est un équipement rare. Associé à cela, les antennes paraboliques et des LNB adaptés permettent de compléter le banc. Pour palier les défaillances éventuelles du système et créer un point de référence des mesures, un émulateur de canal a été utilisé. Cet instrument est très utile par exemple pour générer du fading. La Figure 10 résume cette plateforme.

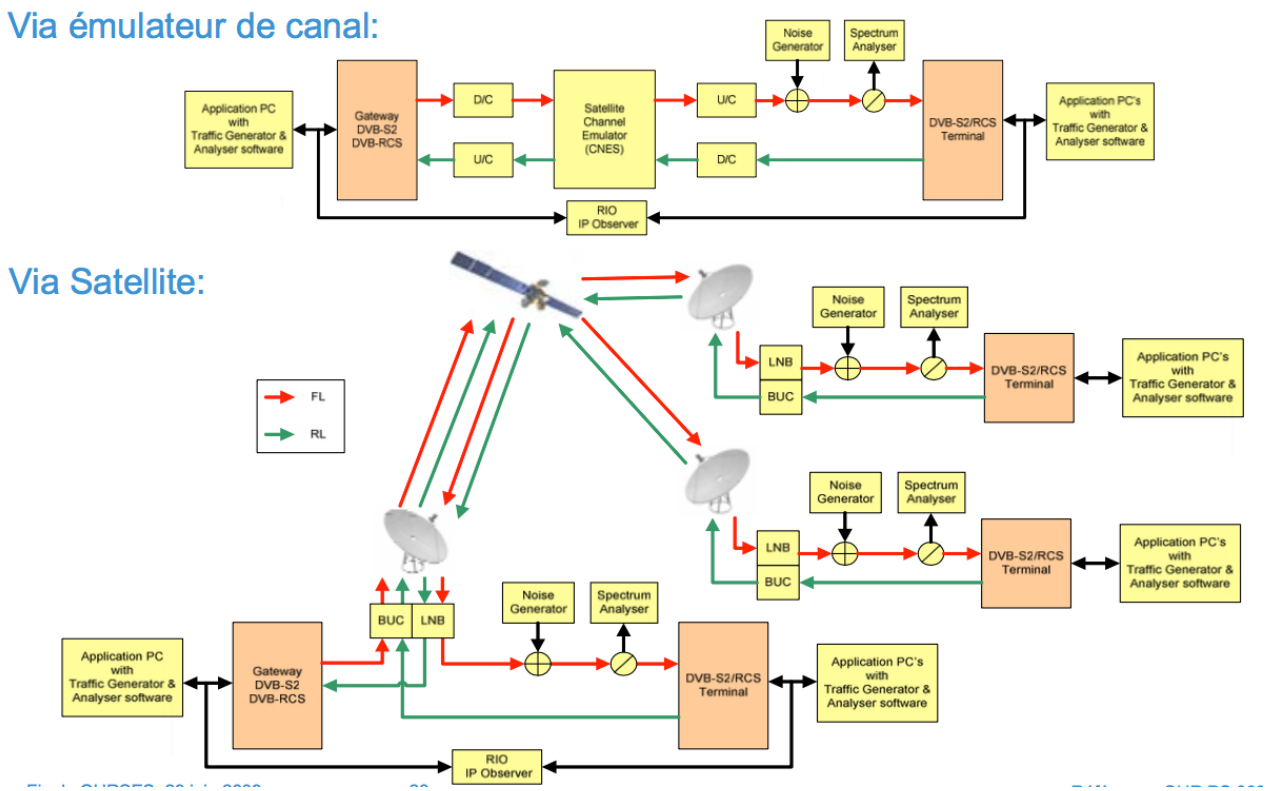


Figure 10. Plateforme de test DVB-S2/RCS du projet Ourses

3.3.4. Autres plateformes

Pour conclure cette section sur les moyens d'expérimentations, il est parfois possible de recourir à d'autres alternatives, moins fidèles mais parfois plus efficaces. En effet, comprendre des mécanismes complexes comme ceux mis en œuvre dans le protocole TCP, par l'utilisation de moyens d'expérimentations qui ajoutent eux aussi une forte complexité peut s'avérer contre productif. Pour comprendre les mécanismes induits par un basculement de réseau terrestre à satellite dans TCP nous avons préféré avoir recours à un simple émulateur de délai (Linux Network Emulation - NetEm - et Traffic Control - TC -), avec des délais fixes, plutôt que des délais rendus variables par les mécanismes d'allocation de ressources. Nous avons pu ainsi mettre en évidence le comportement du contrôle de congestion de TCP face à un changement de réseau.

Il est donc essentiel d'adapter les moyens d'expérimentations aux besoins des expérimentations. Cela peut se faire relativement simplement par de l'émulation de niveau IP sous Linux, en simulation sous NS, ou plus fidèlement par l'émulation avec OpenSand. Hormis les tests réels réservés à des cas très particuliers, tous ces moyens sont disponibles en accès libre (opensource) et on ne peut qu'inciter la communauté à les utiliser.

4. Intégration horizontale dans une architecture de QoS NGN

L'un des éléments-clés pour la réussite de l'intégration d'un système satellite dans les réseaux terrestres est la possibilité d'offrir de bout en bout des mécanismes de garantie de qualité de service. Ce point est essentiel puisque de cela dépendra la satisfaction des utilisateurs finaux et la garantie de la bonne utilisation des ressources du réseau. Suite aux travaux réalisés sur l'intégration verticale des mécanismes de QoS à travers le protocole SIP, nous nous sommes intéressés à l'intégration horizontale, c'est-à-dire la mise en place de bout en bout de la QoS entre utilisateurs (par exemple lors de l'établissement d'une session de VoIP) dans le projet [NGNQOS08]. Pour cela, nous avons étudié comment une architecture de système de communication par satellite pourrait s'intégrer dans les architectures de référence à cette époque : IMS (*IP Multimedia Subsystem*) [ETSI TS 123.228] et l'architecture du projet EuQoS [BRA08].

4.1. INTEGRATION DANS UNE ARCHITECTURE IMS

L'architecture IMS (*IP Multimedia Subsystem*), initialement développée par le 3GPP (*3rd Generation Partnership Project*) pour les réseaux UMTS, propose une architecture de QoS de bout-en-bout qui se focalise sur la

partie réseaux d'accès. Cette architecture a pour but de permettre la convergence fixe-mobile, c'est-à-dire la possibilité d'utiliser une infrastructure commune pour les réseaux filaires et sans fil. IMS a choisi, entre autres, SIP comme protocole de contrôle de session, COPS comme protocole pour transférer les politiques et DIAMETER pour l'authentification. Ces trois protocoles sont donc très importants dans la mise en place de la QoS.

Ainsi, l'intégration horizontale de la QoS dans une architecture satellite de type DVB-RCS doit répondre à différentes exigences :

- tout d'abord, cette intégration doit se baser sur la signalisation de session de bout en bout SIP ;
- ensuite, l'architecture de QoS doit s'appuyer sur les éléments propres à IMS d'une part (P-CSCF, PDF principalement) et à des composants de QoS spécifiques au segment d'accès. Il s'agit notamment d'implémenter les points de mise en œuvre et de contrôle de la QoS (« Enforcement Point ») ;
- le segment satellite doit respecter les différentes procédures de QoS définies, si elles ont un sens pour ce segment.

Plusieurs scénarios seront envisagés :

- Un unique segment accès satellite transparent (type DVB-RCS) raccordé à un réseau de cœur IMS
- Un unique segment accès satellite régénératif (type DVB-RCS maillé) raccordé à un réseau de cœur IMS
- Différent segments accès dont un satellite (type DVB-RCS) raccordés à un réseau de cœur IMS

La Figure 12 représente par exemple les mécanismes d'ouverture d'une session dans le scénario avec un accès transparent (Figure 11). L'ouverture de session est déclenchée par le message SIP invite qui est intercepté par le P-CSCF (Proxy - Call Session Control Function) localisé dans la gateway du réseau satellite. Diameter est utilisé par le point de décision (PDF), qui peut-être dans la gateway ou hors du réseau satellite, pour gérer l'authentification de l'abonné. A la confirmation du flux (SIP 200 OK), les fonctions de mise œuvre de la QoS (PEF) sont sollicitées par COPS pour réserver les ressources. Le routeur de bordure du réseau satellite, la gateway et le terminal satellite de l'abonné implantent cette fonction. Pour respecter les procédures définies dans le cadre GPRS/UMTS où l'établissement de connexion est réalisé par le nœud terminal, la mise en place de la qualité de service s'appuie sur l'établissement de connexion C2P par le terminal satellite. Cette approche offre une architecture indépendante de la topologie du système en contrepartie d'une moindre optimisation du délai d'ouverture de session dans le cas transparent (double bond). Cela peut s'optimiser si l'on s'autorise une implémentation spécifique.

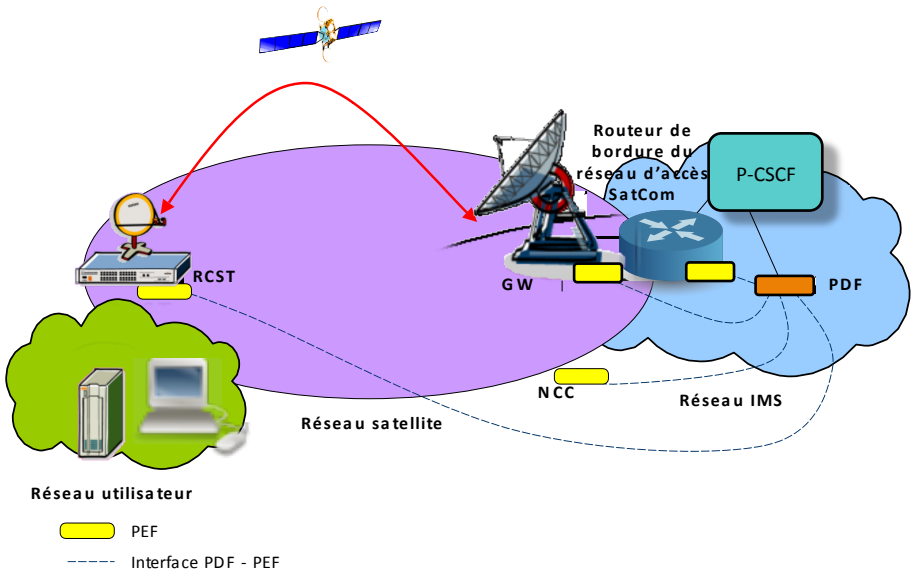


Figure 11. Architecture IMS dans le scénario transparent

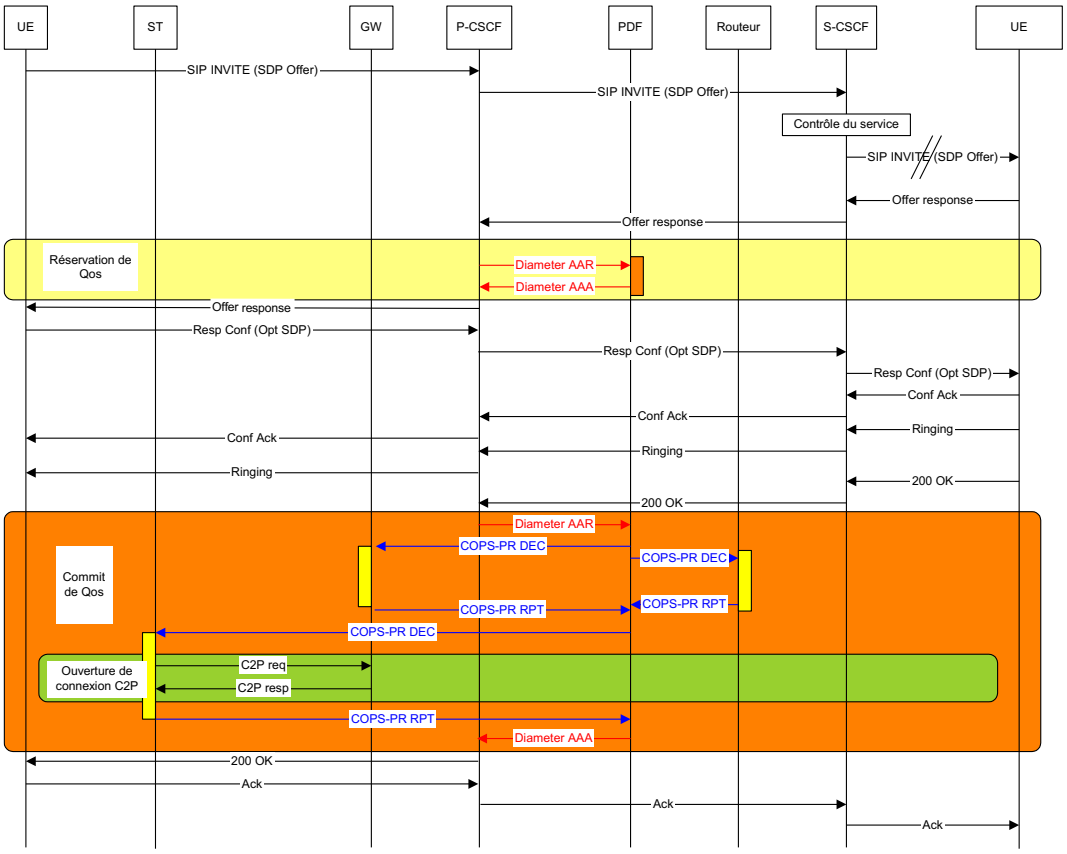


Figure 12. Mise en œuvre générale de la QoS pour l'intégration transparente

L'ensemble des scénarios et le détail des interactions sont disponibles dans l'ouvrage [BER15A].

4.2. INTEGRATION DANS L'ARCHITECTURE EUQOS

4.2.1. Principes

L'architecture EuQoS a été conçue pour fournir une Qualité de Service garantie de bout en bout à travers des réseaux utilisant des technologies potentiellement différentes. Pour ce faire, l'architecture EuQoS utilise et contrôle des chemins orientés Qualité de Service de bout en bout au travers de domaines administratifs distincts impliquant des réseaux hétérogènes.

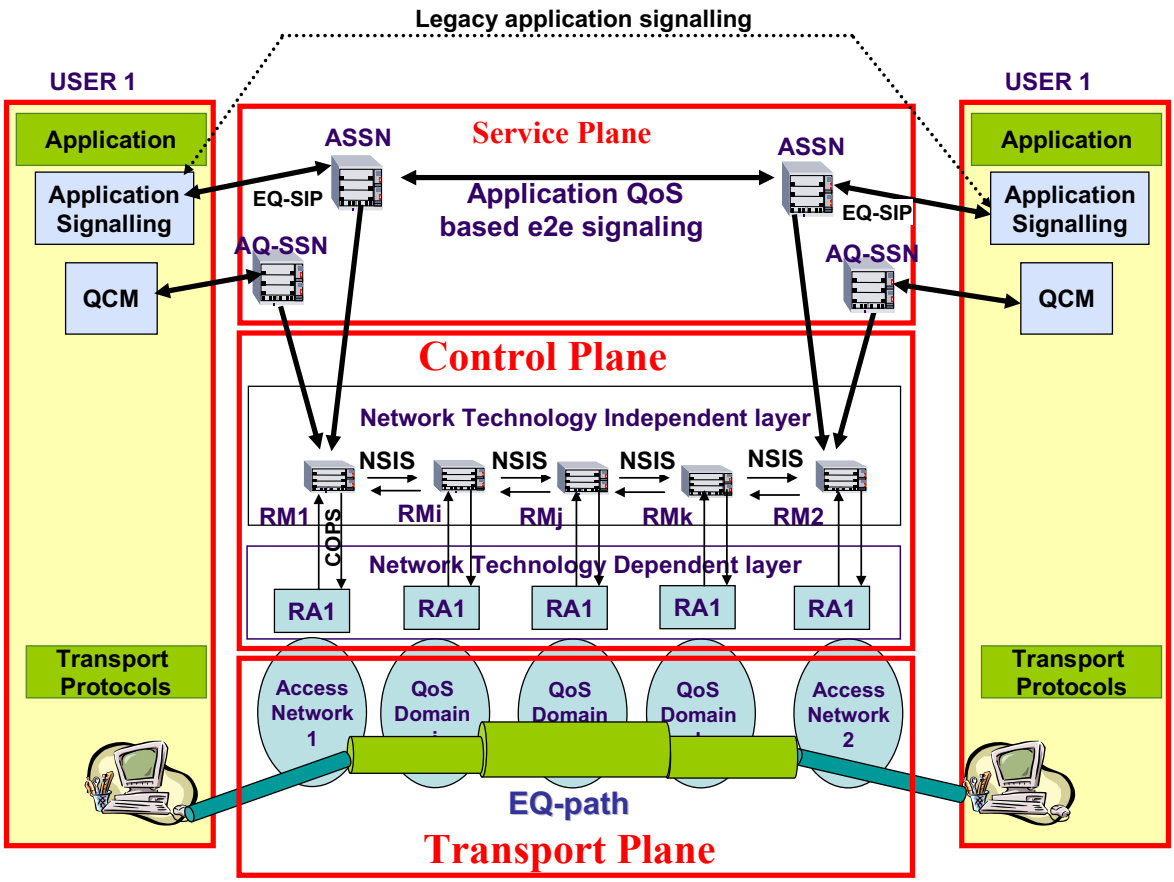


Figure 13. Architecture EuQoS

Une des spécificités de cette architecture est de décomposer le plan de contrôle (voir Figure 13) en deux couches : l'une dépendante du type de réseau géré (Network Technology Dependent) et l'autre indépendante du support sous-jacent (Network Technology Independent). Deux entités sont ainsi définies : Le Resource Allocator (RA) est une entité dépendant de la technologie sous-jacente qui est en charge de gérer et de fournir la Qualité de Service dans les réseaux. Le RA met en application les règles qui permettent d'implémenter les différentes Classes de Services EuQoS de bout-en-bout en fonction des caractéristiques et des spécificités de chaque technologie ; Le Resource Manager (RM) est une entité indépendante des

technologies réseaux sous jacentes en charge de gérer les fonctions d'invocation et de provisionnement. Il a pour rôle de prendre la décision finale concernant l'admission ou le rejet des nouvelles connexions. Cette architecture n'est pas sans rappeler les couches SD (Satellite Dependent) accessibles par les SI-SAP (Satellite Independent – Service Access Point) de l'architecture SATLABS.

Dans le projet [NGNQOS08] nous avons donc étudié la transposition d'un RA et des scénarios associés à une architecture DVB-S/RCS.

4.2.2. Positionnement des éléments de l'architecture EuQoS dans un domaine satellite

Une première étape concernant l'intégration d'un système satellite dans l'architecture EuQoS consiste à définir la localisation des entités définies par l'architecture et les liens nécessaires avec les entités du système satellite.

Concernant le RM, compte tenu de son besoin de centralisation et de sa communication importante avec le reste du système EuQoS, sa localisation est nécessairement proche du cœur du réseau et proche des informations relatives à la Qualité de Service dans le système satellite. La position privilégiée du RM correspond donc à une connexion entre la passerelle satellite et le reste du système EuQoS. L'autre possibilité correspond à sa mise en œuvre du côté ST et sachant que la mise en place du RM du côté ST aurait pour double inconvénient de multiplier le nombre de RM dans le système EuQoS, ce qui va à l'encontre de la scalabilité du système, et d'augmenter considérablement le temps d'initialisation des connexions dans le système EuQoS du fait de la communication entre les RMs au cours de cette phase d'invocation (en plus de l'overhead de signalisation qui serait engendré de ce fait dans le système satellitaire).

Concernant le RA, la question de son positionnement est plus complexe car il doit à la fois communiquer avec le NCC, qui a une vision globale des ressources dans le système satellite, avec le RM, qui est l'initiateur de ses opérations, et avec les divers éléments, distribués dans le domaine satellite, qui mettent effectivement en œuvre la Qualité de Service. Ces entités correspondent aux Terminaux Satellite, à la Gateway et éventuellement aux autres routeurs du domaine satellite.

Potentiellement plusieurs possibilités de positionnement du RA et des divers modules le composant sont envisageables :

i. le RA est totalement distribué et chaque ST dispose de son propre RA, en plus d'un RA du côté gateway, pour la mise en œuvre de la Qualité de Service sur la voie aller.

ii. le RA est partiellement distribué : un RA central est situé du côté de la Gateway, incluant le module général de contrôle d'admission et le module UN pour la mise en œuvre de QdS sur la voie aller, les modules UN pour la mise œuvre de QdS sur la voie retour étant distribués sur chaque ST.

iii. Le RA est totalement centralisé, il est unique pour le domaine et se situe du côté de la passerelle, à côté du RM.

Les avantages et les inconvénients de ces diverses possibilités sont les suivants :

i. Le premier inconvénient de distribuer complètement le RA derrière chaque ST correspond à la délocalisation du RM et des RA qui communiquent lors de l'initialisation des sessions concernant le contrôle d'admission des flux puis la réservation effective de QdS. Cela va donc impliquer un plus grand nombre de traversées du lien satellite et compte tenu du délai de traversée importants, cela peut être pénalisant au moment de la phase d'initialisation de la session. Le deuxième inconvénient majeur correspond au fait que le RA n'a pas une vision globale des admissions dans le système satellite sur la voie retour, puisqu'il ne traite que les admissions des flux initiés derrière un ST. Par conséquent, il ne peut avoir une vision globale des ressources disponibles et des ressources en cours d'utilisation dans le système satellite. On pourrait penser à une synchronisation entre les RA et le NCC au moment du contrôle d'admission de chaque flux. Cependant, étant donné qu'ils sont également séparés par le lien satellite dans ce cas, cela va encore augmenter le nombre de traversée du lien. De plus, la vision du NCC ne donne qu'un instantané de l'utilisation des ressources et ne permet pas de déterminer précisément les sessions effectivement admises. La solution serait d'avoir un RA du côté Gateway qui centralise l'ensemble des informations sur les admissions et avec lequel les RA décentralisés se synchronisent. Cela rend le système plus complexe (une signalisation doit être proposée entre les RAs) et limite fortement l'intérêt d'avoir un RA décentralisé du côté ST, puisque les RA devraient se synchroniser avec lui avant chaque décision ; leur utilité dans ce cas n'est plus réellement justifiée, si ce n'est pour le gain de temps au moment de la configuration effective des STs.

ii. L'inconvénient principal de la configuration partiellement distribuée correspond au fait qu'aucune signalisation n'est normalisée entre le module de contrôle du RA et les modules UN (Underlying Network), en charges de configurer les équipements réseaux au cours des phases de provisionnement et d'invocation de manière à garantir la Qualité de Service, s'ils ne se situent pas dans le RA. De plus, le nombre de traversées du lien satellite ne sont pas diminuées par rapport à une configuration centralisée.

iii. La configuration centralisée offre le plus d'avantages concernant le nombre de traversées du lien et le respect de l'architecture EuQoS. Il reste cependant à définir la signalisation entre le RA (le module UN) et les entités qui mettent en œuvre la QdS dans le système satellite (ST et gateway et éventuels routeurs supplémentaires).

La Figure 14 résume la proposition de positionnement des éléments de l'architecture EuQoS dans un domaine satellite défini comme un réseau d'accès pour une communication étoilée.

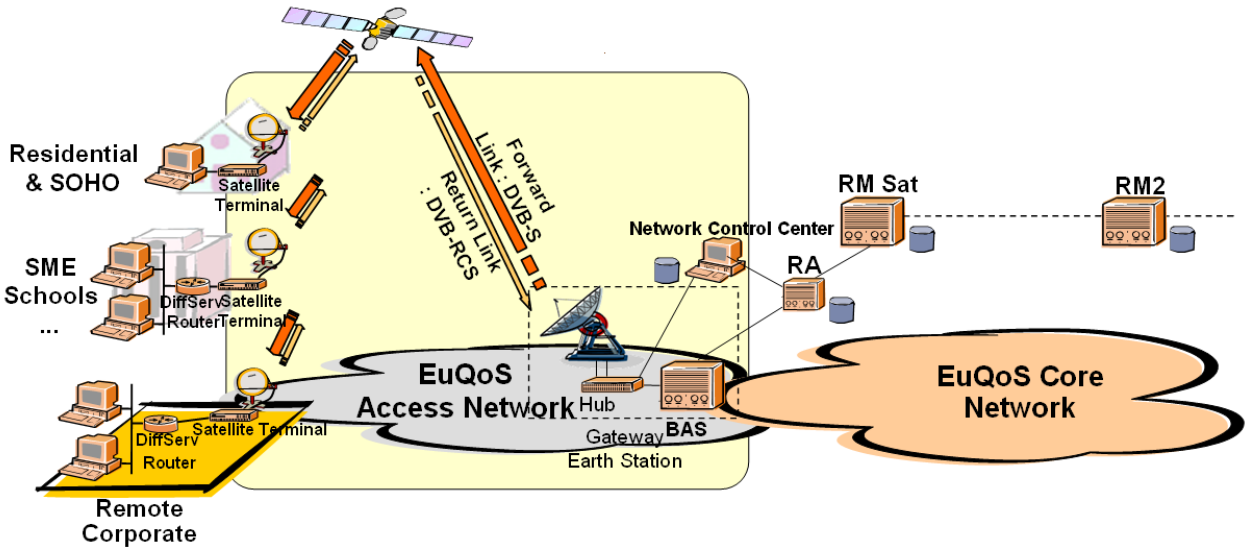


Figure 14. Architecture EuQoS pour un accès satellite dans le cas d'un système étoilé

Dans le cas d'une communication maillée, la différence par rapport au cas étoilé est l'absence de la gateway et le positionnement du NCC (Network Control Center) dans le système satellite qui ne peut donc pas être situé derrière celle-ci. Dans ce cas, le positionnement des éléments de l'architecture EuQoS est dicté par la proximité nécessaire du RA avec l'élément du système satellite en charge de l'attribution des ressources aux divers ST, le NCC, qui a donc une vision globale de la disponibilité de celles-ci.

Dans cette configuration, les différents cas de distribution du RA sont possibles et conduisent aux mêmes avantages et inconvénients que ceux précédemment cités. Une co-localisation du RA avec le RM et le NCC, est la solution qui amène le plus d'avantages en termes de réduction de messages de signalisation à travers le système satellite. La Figure 15 correspond à la proposition de positionnement des éléments de l'architecture EuQoS dans un domaine satellite mettant en œuvre une communication maillée.

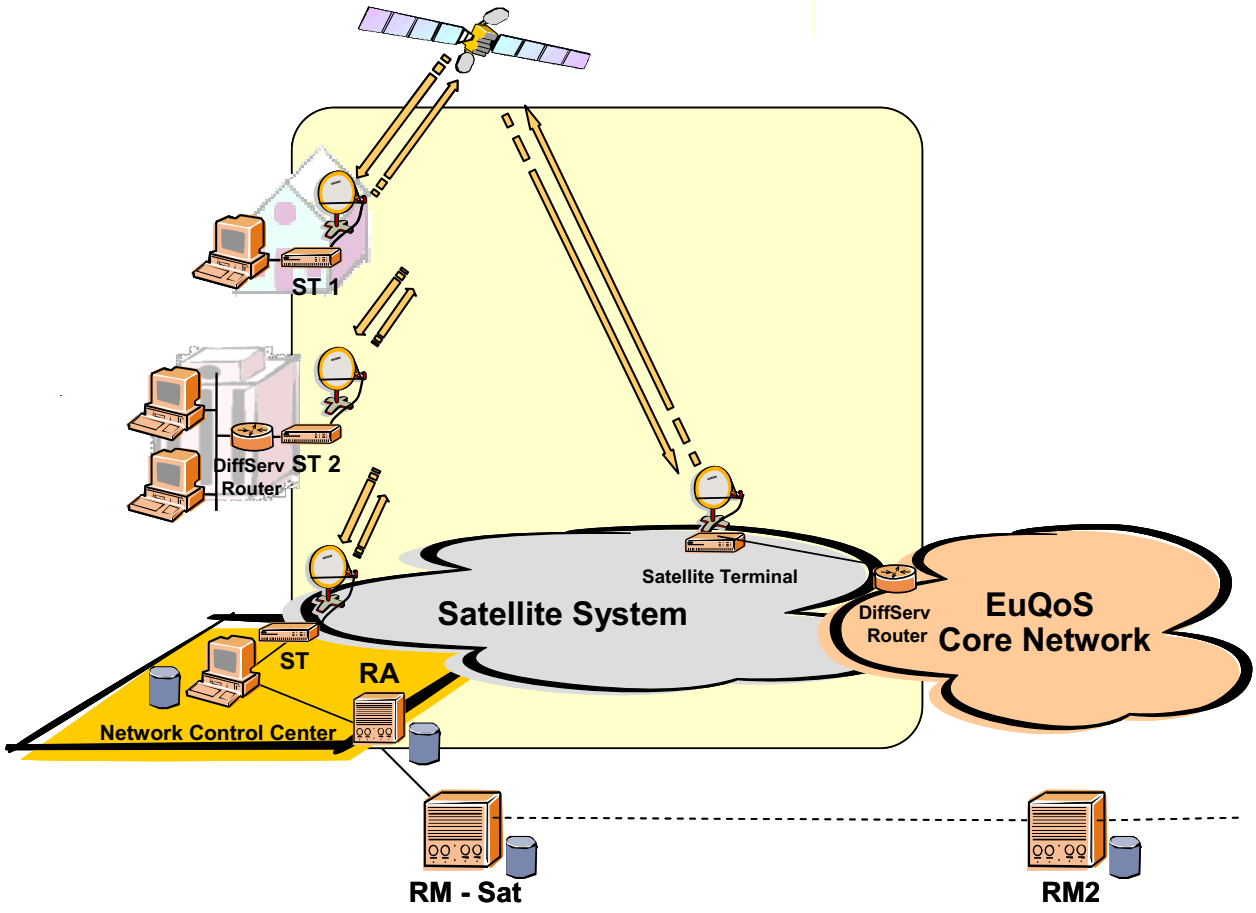


Figure 15. Architecture EuQoS pour un accès satellite dans le cas d'un système maillé

4.2.3. Mise en relation des Classes de Service EuQoS avec les classes d'accès du satellite (DVB-RCS)

Pour respecter les caractéristiques spécifiées par l'architecture EuQoS pour les classes de service de niveau IP, une mise en relation vers les classes MAC puis vers les catégories de trafic proposées par l'Ordonnanceur du NCC est nécessaire. La différenciation entre les classes sera réalisée en ajoutant des attributs aux files d'attente de niveau MAC et IP. Compte tenu de caractéristiques des catégories de capacité définies par DVB-RCS et les Classes de Service EuQoS (de niveau réseau et de bout en bout) la mise en relation proposée est donnée Figure 16.

	Real Time			Non-Real Time		Elastic
EuQoS e2e CoS / DAMA Classes	Telephony	RT Interactive	Signaling	MM Streaming	High Throughput Data	Standard
CRA	✓	✓	✓			
RBDC				✓	✓	
VBDC						✓

Figure 16. Mise en relation des CdS EuQoS avec les classes d'accès satellite

4.2.4. Proposition de communication normalisée entre le RA et les entités satellite pour la mise en œuvre de QdS

Dans l'architecture EuQoS, rien n'est précisé, ni normalisé, concernant la phase effective de gestion et de réservation de ressources dans les réseaux sous-jacents (composés de technologies hétérogènes) et en particulier dans le système satellite. EuQoS recommande l'utilisation de COPS pour les RA et de NSIS pour les RM. C'est ce qui sera fait dans notre proposition.

Sans rentrer dans les détails des scénarios définis, la Figure 17 montre la séquence complète des échanges de messages SIP, des messages définis par l'architecture EuQoS et des messages spécifiques à la gestion et la mise en œuvre de la Qualité de Service dans le satellite pour une architecture étoilée.

Le scénario considéré correspond à une mise en œuvre de Qualité de Service lors le l'initialisation d'une session entre un appelant situé derrière un ST et un appelé situé dans un réseau d'accès terrestre qui accède également au cœur du réseau EuQoS.

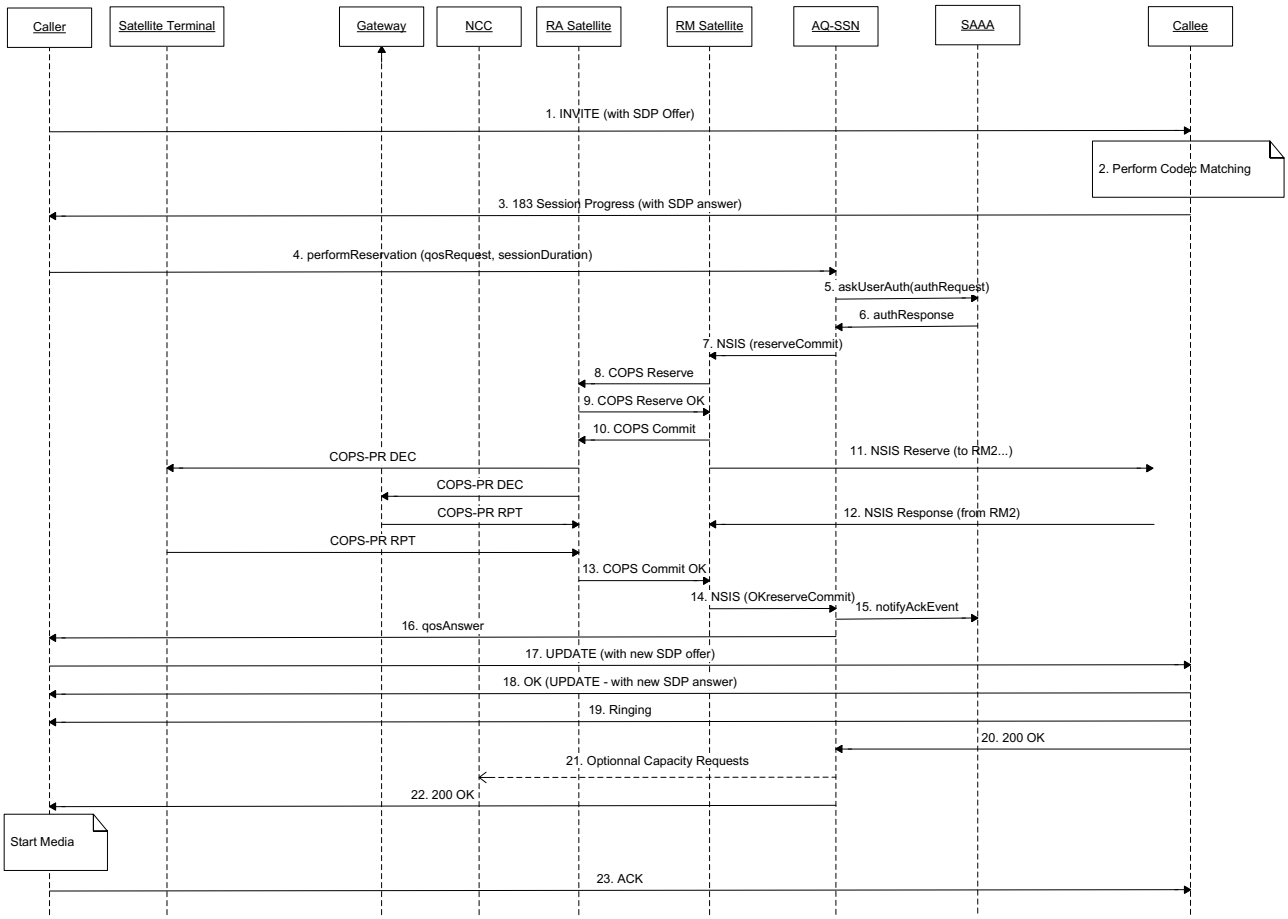


Figure 17. Échanges dans EuQoS pour la réservation dans un système satellite (cas étoilé)

4.3. CONCLUSION

Comme nous avons pu le constater, la mise en œuvre d'architectures à qualité de service dans les réseaux NGN repose sur de nombreux concepts, protocoles et éléments fonctionnels communs. Cependant, la plupart de ces architectures diffèrent d'une façon ou d'une autre, soit par des spécificités en terme de signalisation, soit par leurs fonctionnalités (gestion du routage en fonction des contraintes de QoS, authentification et accès aux services, …).

Néanmoins, certains dénominateurs communs peuvent être déterminés. Un des éléments fédérateurs est l'architecture à politique de services sous tendant le protocole COPS. Nous avons démontré la faisabilité et la pertinence (ainsi que l'interopérabilité) en ce qui concerne la QoS des approches IMS ou EuQoS qui permettent, dans un environnement hétérogène, de mettre en œuvre et d'optimiser la qualité de service au sein des réseaux d'accès. Cette architecture permet ainsi d'étendre les concepts qui avaient été notamment définis et mis en œuvre dans le cadre du projet européen SATSIX tout en pouvant facilement s'intégrer à

l'architecture de QoS BSM. Outre la généralisation des 2 précédentes architectures, la QoS IMS permet une intégration horizontale de segments hétérogènes, qui n'est pas ou peu traitée dans les architectures SATSIX et BSM. Enfin, elle intègre des fonctions, notamment d'authentification et de contrôle d'accès aux services, qui sont absentes (SATSIX) ou partiellement traitées (Service Control dans l'architecture BSM).

5. La mobilité inter systèmes

Les systèmes satellites DVB-S/RCS ont, depuis quelques années, réalisé des avancées importantes dans le domaine des transmissions et des techniques de codage, ainsi que dans la mise en œuvre d'une voie de retour par satellite, offrant ainsi un accès bidirectionnel aux utilisateurs. Cela leur a permis de devenir compétitifs en tant que réseaux d'accès pour les régions isolées ou à faible densité et pour les réseaux d'entreprise car ils ne nécessitent pas d'infrastructures lourdes et coûteuses. Toutefois, il devient important pour ce type de réseaux de pouvoir offrir à leurs utilisateurs les mêmes services que ceux proposés par les réseaux terrestres. En effet, l'apparition de nombreuses applications multimédias et la mobilité de plus en plus grande des utilisateurs ont soulevé de nouvelles contraintes.

De nombreuses études ont alors été entreprises pour faire face à cette demande croissante. Cependant, les solutions proposées pour les réseaux terrestres ne se révèlent pas toujours appropriées aux contraintes spécifiques des systèmes satellites qui souffrent de longs délais de propagation, d'une bande passante limitée et d'erreurs de transmissions plus fréquentes. La mise en œuvre d'une architecture adaptée devient alors cruciale au développement de ces réseaux et cela particulièrement en termes de qualité de service car les contraintes de temps imposées par les applications multimédias ajoutées aux difficultés soulevées par la gestion de la mobilité doivent être prises en compte.

Nous avons étudié et proposé des architectures de mobilité permettant d'offrir un service de mobilité dans les réseaux par satellite [JAC10] compatible avec les solutions terrestres. Les performances de ces solutions ont été analysées afin d'en cerner les différences et les services qu'elles peuvent rendre. Enfin, une architecture, plus prospective, proposera une solution pour l'offre d'un service mobile à qualité de service garantie, compatible avec l'approche IMS du 3GPP.

5.1. SOLUTIONS DE MOBILITE IP

L'implémentation la plus largement répandue de la couche réseau correspond au protocole IP (Internet Protocol). La mobilité n'étant pas incluse dans IPv4, il semble peu probable que les modifications

nécessaires pour sa mise en place soient réalisées sur ce protocole, en tout cas, pas à grande échelle. C'est pourquoi, nous nous sommes concentrés sur les protocoles de mobilité fonctionnant avec IPv6.

Un grand nombre de protocoles de gestion de la mobilité ont été proposés au niveau de la couche réseau. En effet, sa position dans le modèle en couche permet d'une part de conserver la connectivité d'un utilisateur mobile indépendamment de la technologie qu'il utilise et d'autre part de faire basculer les communications de façon transparente pour les couches supérieures. Mobile IPv6 [RFC 3775] souffre nativement de plusieurs problèmes qui en ralentissent le fonctionnement (temps de détection d'un nouveau réseau et association, temps de configuration d'une nouvelle adresse IP unique, multiplicité des messages échangés entre entités). Différentes améliorations ont été proposées par la suite. FMIPv6 [RFC 5568] permet de limiter le temps de handover en améliorant les mécanismes de détection de mouvement et d'enregistrement de la nouvelle adresse. HMIPv6 [RFC 5380] limite la signalisation de mobilité à des domaines réduits en définissant le concept d'agent de mobilité local MAP (Mobility Anchor Point). Une gestion orientée réseau (PMIPv6) [RFC 5213] est aussi proposée pour permettre à des nœuds mobiles de ne pas implémenter eux-mêmes les mécanismes de mobilité, c'est à dire n'implanter de fonctions spécifiques à la mobilité seulement dans les éléments internes du réseau.

Pour évaluer les comportements et les performances de ces protocoles, nous avons défini un ensemble de scénarios de référence basés sur des déplacements typiques dans un système hybride satellite/terrestre. La Figure 18 résume ceux-ci : le déplacement n°1 permet de quitter le réseau d'appartenance du mobile, le deuxième est une micro-mobilité interne au réseau visité (terrestre), le troisième consiste à changer de réseau visité et le dernier (non représenté sur le schéma) permet de retourner au réseau d'appartenance.

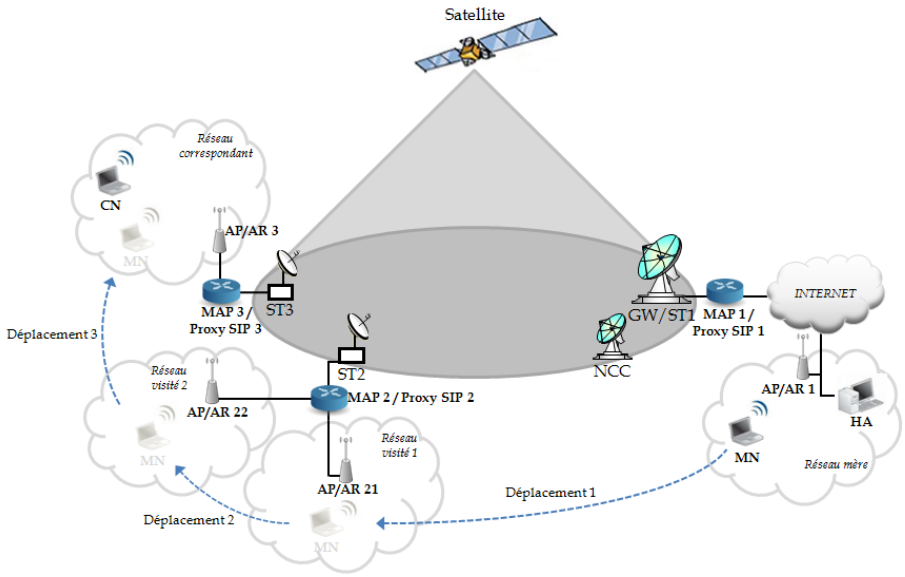


Figure 18. Les principaux types de déplacement dans un système satellite

La première constatation concernant Mobile IPv6 et ses extensions est que, dans le cadre d'un système satellite, il est indispensable que la procédure d'optimisation de route (RO) soit réalisées pour permettre des délais de bouts en bouts compatibles avec les recommandations [ITU G.1010] concernant les applications multimédias. Sans cette optimisation de route, toutes les communications vers le mobile passent obligatoirement par son réseau d'appartenance (ou réseau mère) ce qui peut être très pénalisant. De plus, la phase de tunnel bidirectionnel implique des encapsulations IPv6/IPv6 qui ajoutent un overhead important au système et le fait de devoir traverser 2 fois le système satellite au lieu d'une a aussi pour conséquence une consommation plus importante des ressources globales du système satellite, ce qui confirme le caractère indispensable des procédures de RO et RRT.

La deuxième constatation concernant Mobile IPv6 et HMIPv6 avec RO et RRT est que la phase de tunnel bidirectionnel n'est utilisable que pour un seul type de déplacement : lorsque le nœud mobile (MN) quitte son réseau mère. Cela signifie qu'aucune application (y compris celle n'ayant pas de contrainte sur le délai) ne peut profiter de la phase de tunnel bidirectionnel pour tous les autres types de déplacements, ce qui réduit fortement l'intérêt de cette solution pour un utilisateur se déplaçant entre différents réseaux visités.

On peut aussi constater que le temps nécessaire pour réaliser les mécanismes de détection d'adresse dupliquée (DAD) est bien trop long. Des mécanismes similaires à l'Optimistic DAD doivent donc être mis en place. Mobile IPv6 (avec Optimistic DAD) se révèle aussi efficace que ses extensions dans le cas des déplacements 1 et 3.

FMIPv6 se révèle très efficace pour les déplacements sans changement de ST (type déplacement 2) et les déplacements avec changement de ST depuis le réseau du CN vers un autre réseau (type déplacement 4) dès lors que le mode prédictif peut être réalisé. Cependant, cette solution est beaucoup moins efficace dans les autres types de déplacements principalement parce que les procédures de RO et RRT, nécessaires pour réduire le délai à un bond satellite, sont longues à réaliser. De plus, si le mode prédictif ne peut être réalisé, les temps d'interruption deviennent carrément prohibitifs et sont mêmes supérieurs dans tous les cas à ceux obtenus avec Mobile IPv6. L'utilisation de FMIPv6 doit donc être faite en s'assurant au maximum que les conditions soient réunies pour que le mode prédictif puisse avoir lieu.

HMIPv6 se révèle efficace dans les déplacements de micromobilité (type déplacement 2) pour lesquels il a d'ailleurs été conçu. Mais vu ses résultats pour les autres types de déplacements, HMIPv6 doit absolument être combiné avec un ou plusieurs autres protocoles de mobilité.

Cependant, ces solutions souffrent de désavantages dont les principaux sont la nécessité de modifier l'infrastructure réseau, l'ajout d'en-têtes supplémentaires à chaque paquet IP dès que le nœud mobile se

situe dans un réseau visité et le passage par une phase de tunnel bidirectionnel pénalisante en termes de délai d'acheminement de paquet et de temps d'interruption.

5.2. GESTION DE MOBILITE ET DE QOS PAR SIP

Une des fonctionnalités de base du protocole SIP, utilisé comme brique fondamentale de l'architecture 3GPP IMS, est de pouvoir gérer la localisation de ses utilisateurs. Il permet donc de gérer la mobilité nomade d'un client SIP mobile (mobilité sans communication en cours). Ceci est réalisé directement par les serveurs de redirection comme indiqué dans la Figure 19.

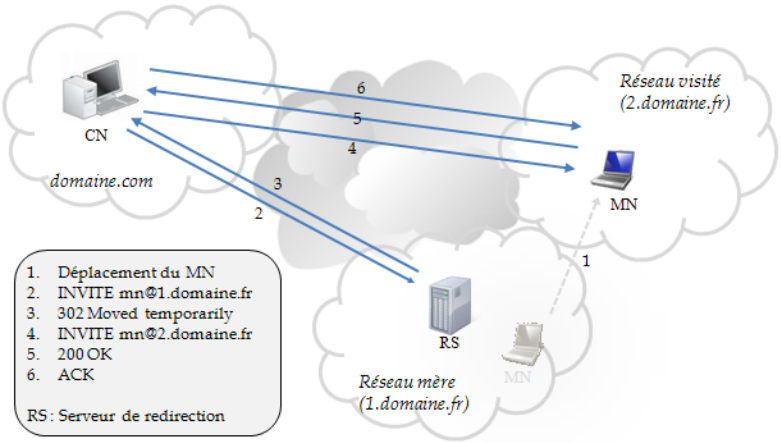


Figure 19. Gestion de la mobilité nomade par SIP

SIP permet la gestion du nomadisme mais pas de la mobilité continue, c'est à dire en cours de communication. Pour cela, la solution choisie consiste en l'envoi d'un re-INVITE par un MN qui a effectué un changement de réseau en cours de session avec la nouvelle adresse.

L'objet de ces travaux a donc consisté à la définition d'une architecture permettant la prise en compte de la mobilité continue dans un réseau satellite de type DVB-S/RCS par le protocole SIP étendu. Comme dans les travaux sur la gestion de qualité de service, cette architecture a cherché à être compatible avec les solutions IMS. La solution proposée consiste à généraliser l'utilisation de proxys SIP dans chaque terminal satellite pour, à la fois, permettre le traitement des messages de redirection et de « re-invitation » et la mise en place de la qualité de service comme proposé précédemment. Le rôle des différentes entités, qu'elles soient relatives au protocole SIP, ou à l'architecture DVB-S/RCS a été défini et implanté sur la plateforme d'émulation satellite Opensand.

Cette réalisation nous a permis de comparer les performances des différentes solutions de mobilité, comme représenté dans la Figure 20. Les différentes comparaisons montrent que les solutions basées sur Mobile IPv6, même si elles présentent l'incontestable avantage de pouvoir gérer la mobilité de façon transparente pour toutes les applications, sont globalement moins efficaces que les solutions basées sur SIP en ce qui concerne la gestion de la mobilité des applications multimédias. Les expériences réalisées sur la plateforme d'émulation satellite sont donc concordantes avec les évaluations théoriques que nous avions menées. En effet, l'efficacité des solutions basées sur Mobile IPv6 en termes de temps d'interruption est réduite à des cas particuliers de mobilité (essentiellement le retour au réseau mère et la micromobilité, non étudiée expérimentalement) tandis que la mobilité SIP reste plus constante dans la gestion globale des différents types de déplacements.

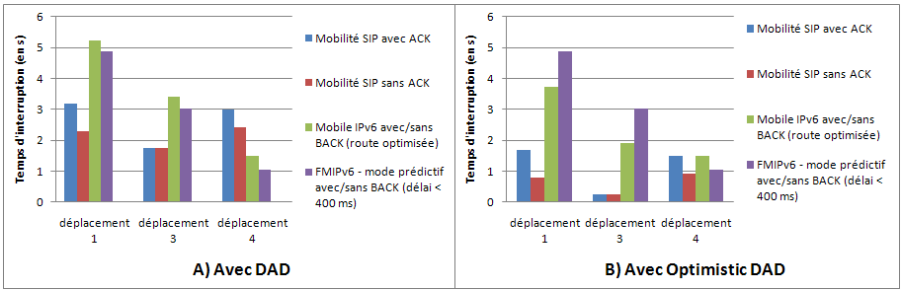


Figure 20. Temps d'interruption ressenti par le MN en tant que récepteur

La mobilité SIP se révèle être une solution particulièrement efficace pour la gestion de la mobilité des applications multimédias basées sur SIP dans un système satellite DVB-S2/RCS. En effet, elle présente l'énorme avantage de pouvoir rediriger la communication directement entre les deux entités concernées, sans nécessairement passer par un intermédiaire comme le HA de mobile IPv6, ce qui lui permet aussi de gérer efficacement tous les types de déplacements sans dépendre de topologie précise et même d'être la solution la plus efficace pour les déplacements 1 et 3. De plus, le fait de ne pas utiliser de ACK (ou du moins de relancer la communication juste après le OK) permet encore d'améliorer ses performances. Enfin, elle n'ajoute aucun overhead lorsque le MN se trouve dans un réseau visité.

Ceci est encore plus vrai dans le cas d'un réseau à ressources limitées, comme c'est le cas pour un système satellite, puisque les solutions basées sur Mobile IPv6 ajoutent un overhead qui peut s'avérer important dès lors que le MN n'est plus dans son réseau mère.

5.3. CONCLUSION

Comme les solutions de mobilité de niveau transport, la mobilité basée sur SIP permet seulement de gérer la mobilité des applications contrôlées par SIP lui-même. Toutefois, cette solution présente l'avantage de transporter des informations qui peuvent se révéler très utiles dans la gestion de la QoS des applications à fortes contraintes temporelles qu'elle permet d'initier. Cependant, elle doit impérativement être couplée à une autre solution pour permettre une gestion de la mobilité pour tous les autres types d'applications.

La mobilité SIP se révèle donc être une bonne alternative à Mobile IPv6 ou ses extensions dans le cas de la gestion de la mobilité dans un système satellite pour les applications multimédias ayant de fortes contraintes temporelles, pour ses performances purement liées à la mobilité mais aussi par son lien direct avec la configuration de la QoS. Par contre, Mobile IPv6 (ainsi que ses extensions) reste une solution efficace pour la gestion de la mobilité des applications ayant moins de contraintes, notamment sur le délai de transmission.

6. La couche transport dans les réseaux hybrides

Assurer un support de communication de qualité et offrant des services évolués comme la mobilité est une chose, en tirer parti avec les applications en est une autre. En effet, nous avons à plusieurs reprises mis en évidence l'importance de la couche transport dans les systèmes satellites. Première couche de bout en bout, donc théoriquement complètement indépendante de l'architecture offerte par l'opérateur de réseau ou du fournisseur de service, cette couche se révèle être limitante de la performances des systèmes satellite. Il est donc important d'en connaître son comportement et de proposer des solutions qui puissent s'insérer dans l'architecture que nous proposons. Cette section aborde la problématique du protocole transport, en particulier TCP, mais aussi propose des améliorations et des alternatives offrant de nouvelles opportunités. Ensuite est abordé le problème de gestion des files d'attente dans les routeurs, en particulier la gateway qui constitue souvent le premier goulot d'étranglement à l'entrée du réseau satellite. Finalement nous nous intéresserons aux performances des applications et en particulier aux web services, reposant sur TCP, dans les systèmes satellites.

6.1. LES PROTOCOLES DE TRANSPORTS POUR LES RESEAUX SATELLITE

Dans la panoplie des protocoles de transport de l'Internet, se trouvent les deux principaux protocoles qui sont TCP, principalement dédié aux communications fiables, et UDP pour le reste. TCP est, aujourd'hui, le protocole de transport majoritairement utilisé. Une étude datant de 2009 [LEE 09] montre que l'évolution de l'utilisation de TCP dans l'Internet est relativement stable sur la décennie passée. Plus de 90% des octets

transférés dans l'Internet l'ont été par TCP. Cela est un peu moins vrai en termes de flux, puisque un peu moins de 30% des flux de l'Internet ont utilisé UDP. TCP est majoritairement utilisé pour le transfert de gros volumes de données et UDP pour les petites connexions.

Dès l'avènement de l'Internet, le modèle TCP/IP (technologie issue des réseaux locaux) s'est montré peu optimal, en termes de performance protocolaire, dans certains réseaux WAN et particulièrement en environnements contraints, tels que les réseaux satellites. Ainsi, de nombreuses solutions ont été développées pour permettre un fonctionnement correct de TCP sur les réseaux satellites. L'IETF a créé en 1997 un groupe de travail nommé « TCP Over Satellite » qui à produit en 1999 deux documents résumant les solutions standard d'optimisation de TCP pour les environnement satellite [RFC 2488] et précisant les futures voies d'amélioration [RFC 2760]. De la même manière, le CCSDS (Consultative Committee on Space Data Systems) a jugé nécessaire de prendre part à la standardisation de protocoles de communication, afin de couvrir des besoins spécifiques de transmission de données dans les missions spatiales. Une première version d'une pile protocolaire nommée Space Communications Protocol Specifications [SCPS], a été proposée en 1999, et elle fut révisée, jusqu'à la version 2006.

Ainsi sont apparues des souches du protocole TCP dédiées aux réseaux satellite, maximisant les performances de TCP dans cet environnement, mais qui furent confrontées au problème de leur déploiement sur les terminaux utilisateurs. La solution qui fut trouvée et qui est toujours d'actualité, fût d'insérer des équipements, aux bornes du réseau satellite, pour transformer le fonctionnement du protocole TCP utilisé en une version compatible satellite. Ces équipements appelés serveurs mandataires pour l'optimisation de performances (Performance Enhancing Proxies – PEP), dont le principe fût standardisé par l'IETF [RFC 3135] en 2001 puis adapté par l'ETSI en 2009 [ETSI TR 102.676], se sont répandus dans les réseaux par satellite, offrant par la même occasion des services évolués comme du cache web.

Les solutions de niveau transport exploitées aujourd'hui, qu'elles soient des dérivés de TCP, d'UDP, ou qu'elles soient basées sur l'emploi de PEPs, apparaissent de plus en plus limitantes pour les systèmes satellites ou sont au contraire trop agressives pour le réseau. Notamment, l'avancée en terme de performances qu'offrent les PEPs actuels est peu compatible avec plusieurs scénarios de déploiement, notamment dans le contexte militaire ou dans le contexte des services aéronautiques, en raison des contraintes de sécurité ou de mobilité qui pourraient se généraliser rapidement au contexte de communication par satellite civil classique. En effet les solutions d'optimisation protocolaire (typiquement les PEPs), communément utilisées sur des liaisons satellites, ne sont pas suffisamment « transparentes » dans le contexte d'hybridation de réseaux satellites/terrestres. Ainsi, elles constituent un réel obstacle à

l'approche de « convergence », visant l'intégration du satellite dans les réseaux terrestres pour des services de mobilité.

6.1.1. Des protocoles de transports adaptés aux liaisons satellitaires au proxys

De nombreuses versions de TCP on été proposées afin de l'adapter spécifiquement à un environnement ou un medium particulier, en général sans fil ou par satellite. Il serait inutile de passer en revue toutes ces versions, et donc ne seront citées que les plus marquantes et récentes concernant l'environnement satellite.

- SCPS-TP [SCPS] : Ce protocole est le seul du CCSDS à avoir recueilli un succès commercial, car il fut utilisé comme base aux développements de PEP (Performance Enhancing Proxy) pour améliorer la performance de TCP sur des liens satellites géostationnaires. SCPS-TP est un ensemble d'options modifiant TCP du côté de l'expéditeur afin d'améliorer l'efficacité de TCP en environnements contraints (long délai, haut taux d'erreur binaire, ou asymétries). Les options SCPS-TP sont des options TCP enregistrées auprès de l'IANA et donc SCPS-TP est compatible avec d'autres implémentations TCP. On citera les plus importantes comme : Window scaling [RFC 1323], Round Trip Time Measurement [RFC 1323], « Wrapped Sequence Numbers» [RFC 1323], Selective acknowledgement [RFC 2018], Compression de Header (adapté de la [RFC 1144]).

- Noordwijk [KRI 08] : Ce protocole, développé par l'ESA (Agence Spatiale Européenne), a été conçu et mis en œuvre pour optimiser le transfert des petits paquets (par exemple HTTP) sur une liaison satellite, tout en assurant des performances correctes pour le transfert des gros paquets (par exemple FTP). Son scénario cible est un environnement de communication adoptant la norme DVB-RCS avec DAMA entre deux entités PEPs.

- TCP FIT [WEN 10] : TCP FIT est basé sur l'idée d'utiliser plusieurs connexions TCP, comme certaines applications le font, pour atteindre un meilleur débit. Cette version effectue une estimation de paquets en sortie et de la taille moyenne de la fenêtre de la dernière période, afin de décider d'augmenter ou diminuer le nombre de connexions virtuelles. La fenêtre de congestion évolue donc de la sorte. Les expériences présentent un comportement TCP Friendly de TCP FIT et montrent une amélioration de débit jusqu'au double par rapport à Cubic dans des réseaux LTE simulés.

- Hybla [FIR 04] : TCP Hybla est une amélioration de TCP qui lutte contre les détériorations des performances causées par les longs RTTs typiques des réseaux satellite. Dans un contexte d'un réseau hétérogène contenant un segment à grande latence (satellite par exemple), Hybla vise à éliminer la pénalisation des segments à grande latence par rapport aux segments avec des petits RTTs. Il se compose d'un ensemble de procédures qui comprend : l'algorithme Hoe [FIR04] pour

l'estimation de la capacité du canal ; le marquage temporel timestamps ; une adoption de la politique SACK et des techniques d'espacement de paquet. TCP Hybla implique seulement une modification du côté émetteur. Cela permet une entière compatibilité avec les récepteurs standard.

Ces versions, qui doivent-être installées sur les serveurs ou dans les terminaux utilisateurs pour être fonctionnelles, n'ont une diffusion que très confidentielle. Ainsi la solution de PEP a été utilisée comme un service qu'offre l'opérateur satellite pour permettre, de manière transparente, d'améliorer les performances des connexions TCP de ses clients. Les PEPs sont une réalité dans les offres satellite. Ils sont largement utilisés dans les architectures de réseaux par satellite, d'une part pour l'optimisation de performance qu'ils apportent, mais aussi pour les accélérations applicatives qu'ils peuvent offrir (accélérations HTTP, DNS). Les PEPs ont ainsi largement dépassé leurs objectifs initiaux, en offrant des solutions plus larges et meilleures que celles possibles sur les contraintes initiales du fonctionnement de TCP sur satellite.

Le consortium Satlabs soutenu par l'ETSI, a repris le protocole SCPS-TP [SCPS], comme base pour la spécification de I-PEP ([ETSI TR 102.676]). I-PEP a été proposé afin de favoriser l'implémentation de PEP interopérables entre équipementiers du spatial (solutions DVB-RCS, principalement). PEPSal [Cai06] est une implémentation très répandue de PEP sous Linux, qui scinde en deux la connexion TCP, et utilise Hybla sur la partie Satellite.

Les PEPs imposent de nombreuses contraintes, qui rendent problématique leur utilisation dans les architectures de réseau moderne (NGN). La première concerne la sécurisation des réseaux. Les PEPs ont besoin d'analyser les entêtes des segments TCP et des paquets IP échangés entre les entités d'extrémités, afin d'initier si nécessaire une connexion adaptée pour le réseau à traverser. Les offres de réseaux privés virtuels (VPN), par satellite ou non, utilisent généralement des tunnels IPsec pour sécuriser les communications, masquant ainsi le contenu des paquets IP et en particulier la source et la destination des données. Il est ainsi impossible de mettre en place un PEP au travers du tunnel. La seconde concerne la mobilité. Le cas le plus problématique est celui d'un déplacement hybride, c'est à dire d'un réseau satellite nécessitant une accélération par PEP à un réseau où cette accélération n'est plus nécessaire, voire contraignante (l'inverse est tout aussi un problème). Il n'y a pas de solution standard à ce problème. De ce fait, l'utilisation de PEP dans les scénarios militaires est un problème et il serait bien de pouvoir se passer de PEP pour des communications mobiles sécurisées, quitte à accepter des débits de transmission un peu plus limités que les systèmes dits « large bande ».

6.1.2. L'impact des récentes évolutions de TCP sur les performances

TCP est en constante évolution pour s'adapter aux nouveaux paradigmes de communication offerts par les nouveaux supports (sans fil, …) et les nouveaux usages (haut débit, vidéo, …). Toutefois, l'utilisation

d'une version de TCP dépend surtout de sa capacité à être déployée rapidement dans les hôtes d'extrémité du réseau. Aujourd'hui, cela n'est possible qu'au travers la diffusion dans les nouveaux systèmes d'exploitation ou éventuellement des PEP spécifiques. De fait, malgré une activité de recherche foisonnante, le protocole TCP ne peut évoluer que par faibles incréments et assez peu fréquemment.

Toutefois, la situation a beaucoup changé ces dernières années avec l'apparition de deux nouveaux modes de contrôle de congestion de TCP, promus par d'un côté la communauté Linux (CUBIC) et de l'autre le monde Windows (Compound). Par leur diffusion mondiale et les mises à jours fréquentes des OS, ces versions sont aujourd'hui largement utilisées.

Cubic [RHE09]: dans ce cas, la fenêtre de congestion évolue selon une formule cubique en fonction du temps depuis le dernier évènement de congestion. Cubic n'attend pas les ACKs pour augmenter la taille de la fenêtre de congestion. La Cwnd de Cubic dépendant seulement du dernier évènement de congestion. Cubic est la version par défaut sur les systèmes d'exploitation Linux avec un noyau supérieur ou égal à 2.6.19.

La fenêtre d'émission est contrôlée par l'équation :

$$W_{cubic}=C\,(t-K)^3+W_{max}$$

Équation 2. Contrôle de la fenêtre de congestion de TCP Cubic

Où, C est un paramètre de CUBIC, t le délai passé depuis la dernière réduction de la fenêtre, et K le délai pour accroitre W à Wmax quand il n'y a pas eu de pertes.

Compound TCP [ZHA06a][ZHA06b] : CTCP a été conçu pour s'adapter rapidement à la bande passante disponible tout en étant TCP friendly. La grande particularité de sa gestion de la Cwnd est d'être basée à la fois sur les pertes et les délais. CTCP gère donc une double fenêtre de congestion ; une classique comme c'est le cas pour TCP Reno et une autre basée sur le délai appelée Dwnd (Delay Congestion Window). Cette dernière est utilisée uniquement durant la phase de Congestion Avoidance. Dans un réseau satellite par exemple, l'important délai de propagation peut fausser les timers de retransmission et causer des pertes. La fenêtre de congestion basée sur le délai permet d'estimer le délai de bout en bout et de le prendre en considération. CTCP est actuellement implémenté sur les systèmes d'exploitation Windows Vista, Seven, Server 2008. Un patch est disponible aussi pour les systèmes Windows Server 2003 et Windows XP 64 bits. Un contrôle de congestion basé sur le délai a surtout l'avantage d'anticiper les congestions par la mesure de l'évolution du délai, et donc de limiter les pertes qui sont très pénalisantes sur les réseaux satellite.

$$win = min\ (cwnd + dwnd, Awnd)$$

Équation 3. Equation d'évolution de la fenêtre de congestion de CTCP

Où *cwnd* est la fenêtre de congestion basé sur les pertes (comme celle de TCP Reno), *dwnd* celle basée sur les délais et *Awnd* est la fenêtre de réception. *Dwnd* est calculé comme présenté ci-dessous :

$$dwnd(t+1) = \begin{cases} dwnd(t) + (\alpha \cdot win(t)^k - 1)^+, \text{ if } diff < \gamma \\ \left(dwnd(t) - \zeta \cdot diff\right)^+, \text{ if } diff \geq \gamma \\ \left(win(t) \cdot (1-\beta) - cwnd/2\right)^+, \text{ si une perte est détectée} \end{cases}$$

Équation 4. Équation d'évolution de la fenêtre de congestion de CTCP basée sur les délais

Où *diff* est la différence entre le débit estimé et le débit mesuré, multiplié par le RTT. Cela correspond au nombre de paquets injectés dans le réseau, mais n'ayant pu être reçus, donc en transit dans le réseau. γ est un seuil de déclenchement, et les valeurs α, β et ζ sont des constantes.

Nous nous sommes intéressés à l'impact des liaisons satellite sur ces protocoles, mais aussi à l'impact de l'hybridation du réseau.

6.1.3. Trouver de nouvelles solutions de transport pour les réseaux hybrides satellites terrestres

L'hybridation des réseaux peut causer d'autres problèmes aux protocoles de transport. Lors d'un changement de réseau le protocole de transport va utiliser d'anciens paramètres (taille de la fenêtre de congestion, timers) sur un nouveau réseau (par exemple une connexion TCP initialisée pour un réseau terrestre utilise un réseau par satellite avec une bande passante limitée et un long délai).

De plus, selon les spécifications des réseaux sous-jacents, le basculement entre les deux réseaux peut générer une interruption de service qui peut varier de plusieurs pertes de paquets (soft handover), à une courte interruption (quelques secondes), voire à une longue pause avec renégociation d'adresse tel que mobile IP peut le gérer. Bien évidement tout cela aura un impact important sur la couche transport.

Considérant les problèmes posés par les proxys, l'importance d'une version de TCP performante sur lien satellite, son déploiement complexe et les problèmes soulevés par un changement de réseau nous avons cherché quelle pourrait-être la meilleure solution de transport pour un réseau hybride. Pour cela, l'ensemble

des options de TCP a été analysé et un banc de tests, développé par nos soins, permettant de simuler un basculement dans un réseau hybride.

La Figure 21 montre un exemple de comparaison des débits maximum obtenus pour une connexion TCP sur un lien satellite (sans basculement). Nous avons comparé les souches les plus communes (Reno, Cubic, Compound TCP) à une souche spécialisée pour les liens satellite (Hybla). Il apparaît que les souches modernes (Cubic , Compound TCP) permettent d'atteindre un débit maximal proche de celui obtenu par une souche dédiée, que ce soit sur un lien limité à 512 Kbps ou 2 Mbps. Des débits supérieurs n'ont pas été évalués car jugés peu réalistes pour des réseaux hybrides. Ainsi, l'utilisation de PEP TCP, pour ce qui concerne les performances pures, dans un environnement à débits limités, n'est plus indispensable.

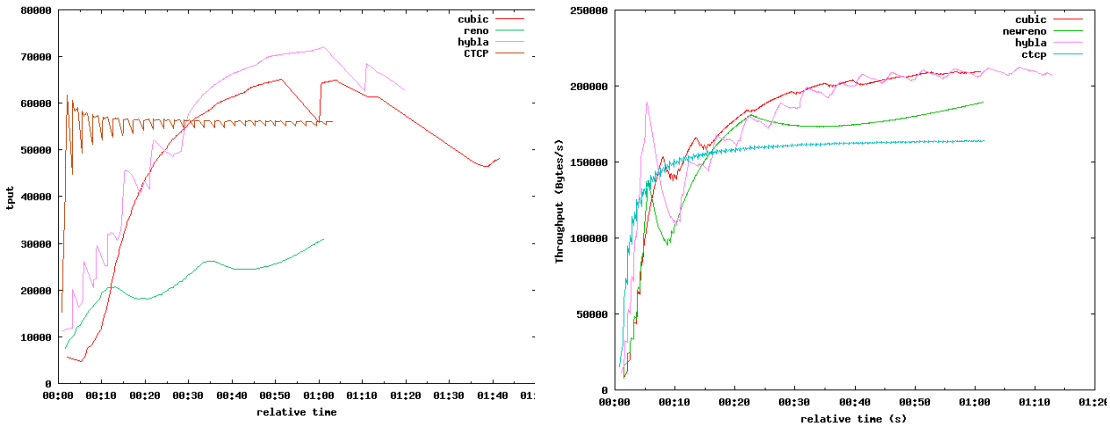


Figure 21. Comparaison de débits TCP sur un lien satellite (a) 512 kbps (b) 2 Mbpbs

Une autre chose intéressante à remarquer, est la capacité du protocole compound TCP à exploiter très rapidement la bande passante disponible pendant la phase de slow start, connue pour être lente dans les réseaux longs délais. Ceci est très important pour l'interactivité du système où les connexions TCP très courtes sont généralement liées à des transactions http.

De manière générale, il est rare, dans l'Internet, que les versions de la souche TCP d'un client et d'un serveur soient identiques. Après avoir montré l'intérêt de CTCP (Compound TCP) dans un contexte satellite, nous résumons dans le Tableau 1 le résultat expérimental du croisement des couples client-serveur avec différentes versions de souches TCP. Le comportement des combinaisons hétérogènes client/serveur semble être principalement influencé par l'émetteur, à l'exception de CTCP. En effet, qu'il soit utilisé côté émetteur ou récepteur, son utilisation influence le comportement global de la connexion qui se rapproche d'un comportement classique d'une connexion CTCP homogène. Ceci est un argument supplémentaire en faveur de ce protocole car son déploiement n'en sera que facilité.

Receiver / Sender	New Reno	Hybla	Cubic	CTCP
New Reno	x	Hybla +-	cubic +-	Ctcp +-
Hybla	Reno ++	x	cubic +-	Ctcp +-
Cubic	Cubic +-	Hybla --	x	Ctcp +-
CTCP	Ctcp +-	Ctcp +-	Ctcp +-	x
Legend : "--" worse , "+-" similar, "++" better				

Tableau 1. Combinaison des différentes versions de TCP (client/server hétérogènes)

Les basculements de réseau, autre typicité des réseaux hybrides ont montré des caractéristiques tout aussi intéressantes des nouvelles versions de TCP. La Figure 22 montre les numéros de séquences des segments TCP échangés lors de changements de réseau. Pendant les 20 premières secondes l'utilisateur utilise un réseau par satellite, bascule ensuite sur un réseau terrestre pendant 20 secondes, puis revient sur le réseau satellite. Le basculement est un « soft handover », c'est à dire sans interruption de service.

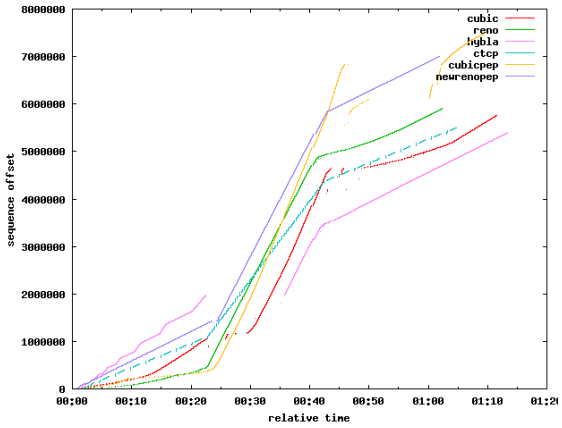


Figure 22. Evolution des numéros de séquence, débits et RTT durant un handover

On retrouve les résultats précédents sur la liaison satellite, avec toujours Hybla offrant un meilleur débit. Lors du changement de réseau, toutes les versions ne résistent pas identiquement à la modification des paramètres : Les versions agressives de TCP comme hybla ou cubic subissent une interruption de connexion pendant quelques secondes, induites par les paquets désordonnés reçus. Certaines versions comme reno exploitent très bien la capacité du réseau terrestre mais de sont pas performantes sur les réseaux satellite. A nouveau, TCP compound, malgré une plus faible exploitation du réseau terrestre, affiche une continuité de service et un comportement moyen plutôt bon.

L'ensemble des expérimentations menées [TOU12] confirme ces hypothèses. Par contre, une augmentation du délai applicatif a pu être observée lors des changements et s'explique par un soudain surplus de

bufferisation sur le routeur d'accès. Des solutions de gestions active de files, comme ECN, permettent de limiter ces effets liés à l'agressivité de certaines versions comme Cubic et Hybla.

Des scénarios de type "Break-Before-Make" ont été étudiés. Quand la coupure de connexion au moment du changement de réseau dure 500 ms, CTCP confirme sa robustesse En effet, CTCP est plus réactif à la reprise d'exploitation du lien que Cubic et Hybla. Quand la coupure de connexion au moment du changement de réseau dure 1000 ms, la difficulté s'amplifie pour Cubic, conséquence de son agressivité.

A la vue de ce qui précède, nous avons montré les qualité générales du protocole TCP en version Compound (CTCP). CTCP constitue une solution de niveau Transport performante pour les réseaux hybrides. Non seulement, nous avons démontré son adaptation aux réseaux satellites mais nous démontrons aussi ici sa capacité à supporter les changements de réseaux incontournables dans un réseau hybride satellite/terrestre. Dans l'état actuel de nos connaissances, il semble tout à fait opportun d'utiliser une telle version dans ce contexte d'hybridation.

6.1.4. Les protocoles de transport multi-domiciliés

Même si des solutions sur étagère et utilisables à courte échéance existent, comme nous venons de le montrer, les nœuds finaux perçoivent néanmoins les changements de réseaux au travers d'évènements et de changement dans la condition du réseau : Réception de paquets non-ordonnée ; Modification du délai et/ou de la bande passante. Certaines versions de TCP réagissent mieux que d'autres, mais le fonctionnement de TCP n'est néanmoins pas optimal lors des changements de réseaux. En effet, TCP évalue l'état du réseau et garde un historique dans plusieurs paramètres réseau : SRTT, RTO, fenêtre de congestion… Quand un événement se produit, il se base sur leurs évaluations pour prendre les décisions adaptées ; Comme le changement de réseau modifie l'état, les paramètres ne sont plus valides et peuvent induire en erreur le protocole de Transport : la livraison non-ordonnée de paquets est interprétée comme des pertes, l'augmentation du délai est perçu comme de la congestion… Les actions effectuées par le protocole de Transport après le changement de réseau peuvent donc être inappropriées : Retransmissions inutiles ; mauvaise adaptation du taux d'émission…

Stream Control Transmission Protocol (SCTP) [RFC 4960] a été initialement développé pour faire de la signalisation mais ces fonctionnalités modernes en ont fait un protocole de Transport à part entière. Les services fournis aux applications sont similaires à TCP : fiabilité, livraison ordonnée, contrôle du flux et évitement de la congestion. En plus de cela, SCTP supporte la multi domiciliation : plusieurs interfaces réseaux peuvent être utilisées dans une même association et sont référencées comme des chemins. Le support pour la modification dynamique de ces chemins a été ajouté au travers d'extensions [RFC 5061], [RFC 4895] et sont regroupées sous le label mobile SCTP (mSCTP). La mobilité peut alors être gérée en

ajoutant/supprimant des chemins et en choisissant un chemin prioritaire (celui utilisé pour transmettre les données. Afin d'éviter les problèmes d'adaptation lors du changement de réseau, SCTP définit différents ensembles de paramètres pour chaque chemin : le SRTT, le RTO et la fenêtre de congestion sont calculés indépendamment par chemin. Les performances du protocole sur un nouveau réseau ne sont donc pas influencées par les caractéristiques de l'ancien réseau ; les valeurs initiales sont utilisées lors de la connexion à un réseau pour la première fois. Si le chemin est déjà connu, les précédentes valeurs sur ce réseau sont utilisées.

SCTP est ainsi capable de supporter la mobilité au niveau Transport et de s'adapter facilement aux nouvelles conditions.

Reprenant le banc de test développé précédemment, nous avons évalué la capacité de ce protocole à permettre un fonctionnement optimal dans les réseaux hybrides. Le scénario est ici : 20 secondes sur le réseau terrestre, 20 secondes sur le réseau satellite et retour au réseau terrestre.

La Figure 23 illustre le comportement de la fenêtre de congestion de SCTP dans deux configurations différentes : un réseau hybride avec changement de réseau transparent et un réseau en multi domiciliation comme solution de mobilité. Deux différences sont visibles entre ces deux fenêtres de congestion : la valeur optimale sur le lien Wi-Fi et le comportement après le second changement de réseau.

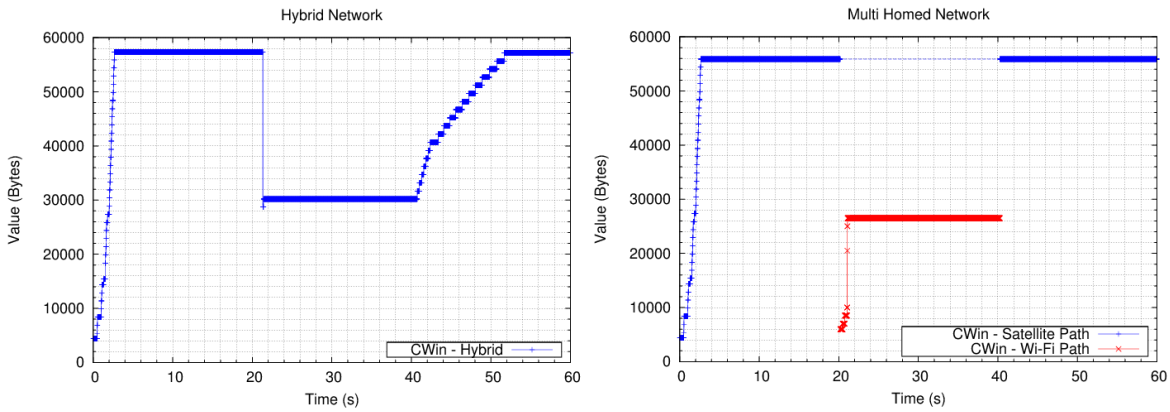


Figure 23. Fenêtre de congestion de SCTP lors de changements de réseau (satellite/Wi-Fi)

Tout d'abord, il est important de noter que le comportement des deux fenêtres est similaire avant le premier changement de réseau, c.-à-d. avant 20s. Pour effectuer le changement de réseau, l'association SCTP en multi domiciliation (à droite) change de chemin primaire et utilise donc une nouvelle fenêtre de congestion qui se stabilise autour de 26000 octets. L'ancienne fenêtre est réutilisée lors du retour sur le lien satellite.

Sur le réseau hybride, le premier changement de réseau est suivi immédiatement par une diminution de moitié de la fenêtre de congestion puis une légère augmentation jusqu'à 30000 octets. Cette chute est due à la réception de données non-ordonnées lors du changement entre satellite et Wi-Fi. Le délai sur le lien satellite étant élevé, les données envoyées sur le lien Wi-Fi arrivent plus vite à destination et les acquittements rapportent des données encore en vol comme des trous dans la communication. L'algorithme Fast Retransmit est alors utilisé par l'émetteur : la fenêtre de congestion est diminuée de moitié et les données signalées sont retransmises. En quittant l'état Fast Retransmit, la fenêtre de congestion en « congestion avoidance » se stabilise quand elle est suffisamment grande pour envoyer toute la quantité de données générées par l'application.

Après le changement de réseau entre satellite et Wi-Fi, le délai grandit et la fenêtre de congestion doit s'adapter. L'utilisation de l'algorithme « congestion avoidance » sur un lien satellite conduit à une période d'adaptation de plusieurs secondes. L'adaptation sur un réseau hybride est conduit en erreur par des mécanismes internes aux protocoles de Transport comme les algorithmes « Fast Retransmit/Fast Recovery » ou « congestion avoidance ». Dans le contexte multi domicilié, l'adaptation se fait naturellement, des paramètres indépendants étant utilisés. L'impact sur les communications est détaillé dans la section suivante.

Ainsi les protocoles de transport multi-domiciliés sont plus adaptés à supporter les changements de réseau, mais imposent une contrainte importante qui est la disponibilité de plusieurs interfaces sur le terminal utilisateur. Dans [BER13] nous avons développé une architecture multi-domiciliée étendant ces concepts et permettant des changements de réseau génériques. Ces solutions sont envisageables à plus long terme quand ce type de protocole sera nativement disponible dans les systèmes d'exploitations.

6.2. DIMINUER LES FILES D'ATTENTE PAR LE CONTROLE DU TRANSPORT

Nous avons rapidement évoqué dans le chapitre précédent l'influence de la taille des buffers, en particulier ceux d'extrémités contenus dans les terminaux satellite (ST) et la gateway, ainsi que l'agressivité du protocole transport sur les délais de bouts en bouts. En effet, le principe du contrôle de congestion de TCP (additive increase/multiplicative decrease), qui cherche à exploiter le maximum de capacité disponible dans le réseau en augmentant progressivement son débit de transmission, et le réduisant en cas de détection de congestion par l'observation des pertes subies sur la connexion, produit nécessairement la saturation de certains buffers du chemin de données. Cette saturation des buffers, en général à l'interconnexion de réseaux et en particulier à l'entrée des réseaux par satellite, si ces buffers sont grands, impacte très négativement le délai de bout en bout subi par l'application. Le dernier paquet entré en queue de cette file d'attente devra voir cette file totalement vidée avant d'être relayé vers le prochain routeur. Les débordements de ces buffers

provoquent de la même manière des pertes en rafales. Plus un algorithme TCP est agressif, plus fréquemment auront lieu ces débordements.

Il existe des solutions qui visent à limiter ce mode de fonctionnement, sans modifier les entités d'extrémités (les souches TCP), en les informant d'un risque de congestion par suppression préventive de certains paquets lorsque le buffer dépasse certains seuils. Ainsi ces dernières réagissent naturellement à une perte en diminuant leur débit de transmission, limitant de fait le risque de congestion qui induirait délais et pertes en rafales. Ces solutions, connues sous le nom d'AQM (Active Queue Management), et dont il existe de très nombreuses versions dont la plus connue est RED (Random Early Detection), sont en règle général très complexes à paramétrer pour un fonctionnement optimal. Des techniques non destructives, comme ECN (Explicit Congestion Notification), qui utilise une signalisation spécifique (bit ECN), permet de notifier les entités d'extrémités d'un risque de congestion sans déclencher de perte, mais nécessite une modification de TCP. Le paramétrage d'ECN est aussi une chose complexe.

Nous nous sommes intéressés à ces techniques d'AQM pour améliorer l'interactivité dans les réseaux par satellite à qualité de service. En effet, du fait de buffers importants, les flux empruntant les files AF d'un tel réseau (voir architecture à QoS présentée auparavant) peuvent subir des délais de bout en bout relativement importants. Il existe de nombreuses applications qui ne nécessitent par un traitement garanti comme celui offert par la file EF, ni ne supportent un traitement best-effort. De fait, de nombreux flux se partagent cette (ou ces) file(s), comme la navigation web par TCP ou la voix sur IP avec UDP.

Nous avons donc proposé une technique basée sur un AQM autorégulé [DEL09], c'est à dire que sa configuration est minimale et s'adapte aux conditions, en se basant sur les techniques de l'automatique. Nous avons donc proposé un correcteur de type PI (Proportionnel Intégral), puis un correcteur prédictif, qui permet de réguler autour d'un seuil la quantité de trafic TCP dans le buffer AF du ST. Ainsi, la quantité de paquets en attente de type TCP ne dépasse, en moyenne, pas une certaine valeur et donc un certain délai d'attente. La place restante étant à disposition d'applications voix sur IP, utilisant UDP, et dont nous connaissons les caractéristiques par la signalisation SIP.

Pour fonctionner, un contrôleur doit posséder un modèle du système contrôlé, donc du trafic TCP dans notre cas, afin de déterminer l'action à appliquer. Pour cela, nous nous sommes basés sur les travaux [HOL02] qui proposent un modèle fluide de TCP défini par l'Équation 5. Cette équation modélise l'algorithme AIMD de TCP, et en particulier la phase de « congestion avoidance ». $dW(t)$ représente l'évolution de la taille de la fenêtre de congestion d'un flux TCP, définie comme augmentant de 1 segment à chaque RTT et divisé par 2 à chaque perte $dN(t)$.

$$dW(t) = \frac{dt}{RTT} - \frac{W(t)}{2} dN(t)$$

Équation 5. Modèle TCP fluide

Considérant la taille de la file dans le routeur et dénoté *q(t)*, celle ci peut-être calculée par la quantité d'information émise, considérant de produit « bande passante par délai », multiplié par l'ensemble *N(t)* des flux TCP qui émettent auquel est retranché la capacité de sortie du lien *C(t)*. En notant *R(t)* le retard, c'est à dire le délai de propagation ajouté au délai d'attente dans la file *q/C,* le modèle s'écrit (Équation 6) :

$$\begin{cases} \dot{W}(t) = \frac{1}{R(t)} - \frac{W(t)}{2} \frac{W(t-R(t))}{R(t-R(t))} p(t - R(t)) \\ \dot{q}(t) = -C(t) + \frac{N(t)}{R(t)} W(t) \end{cases}$$

Équation 6. Modèle dynamique d'un routeur

Deux contrôleurs ont été définis. Le premier est un contrôleur proportionnel intégral (PI) défini ainsi, où *e(t) = débit_limite – débit_TCP* :

$$p(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t) d(t)$$

Équation 7. Contrôleur PI

Le second est un contrôleur prédictif, plus apte à réagir correctement avec le retard de la liaison :

$$p(t) = F \begin{bmatrix} \delta W(t + R_0) \\ \delta q(t + R_0) \end{bmatrix} = F\Big(e^{AR_0} \begin{bmatrix} \delta W(t) \\ \delta q(t) \end{bmatrix} + \int_0^{R_0} e^{A\theta} B p(t - \theta)\, d\theta \Big).$$

Équation 8. Contrôleur prédictif

Ces contrôleurs ont été évalués en simulation (NS-2) dans une configuration représentant un goulet d'étranglement à l'accès d'un réseau par satellite sur la voie retour. La Figure 24 représente l'état des différentes fenêtres de congestion de 6 flux TCP face à un goulet d'étrangement dans le ST. La figure 'a)' montre le classique effet de synchronisation des fenêtres d'émission de différents flux TCP par le

mécanisme Drop Tail. Ce phénomène conduit inévitablement à de fortes variations de la taille de file dans le routeur et donc une forte gigue. Avec le contrôleur PI (figure b) qui cherche à stabiliser la taille de file du routeur autour d'une valeur moyenne, des pertes sont déclenchées plus régulièrement par notre AQM évitant ainsi la synchronisation des flux. Le débit moyen d'entrée du routeur sera beaucoup moins variable ainsi que la gigue résultante.

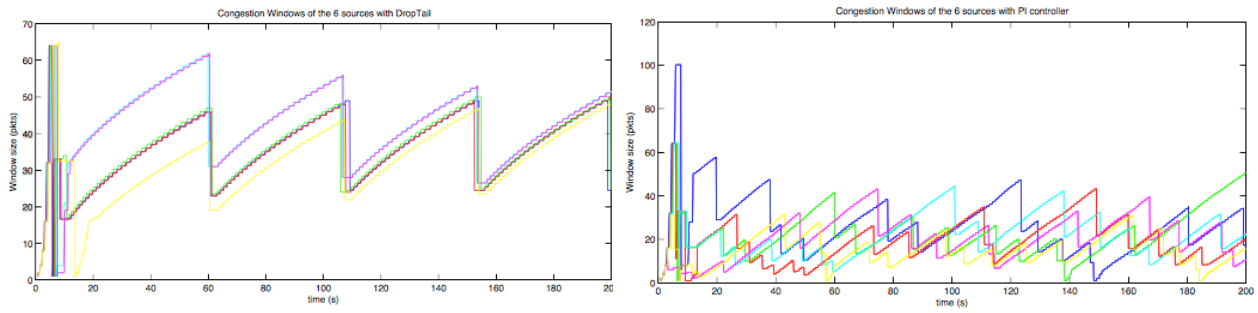


Figure 24. Fenêtres d'émission (Cwnd de TCP a) Drop Tail b) contrôleur PI

La Figure 25 montre les valeurs de la file d'attente dans le ST pour les différents contrôleurs. L'objectif étant de réguler autour de 35 paquets.

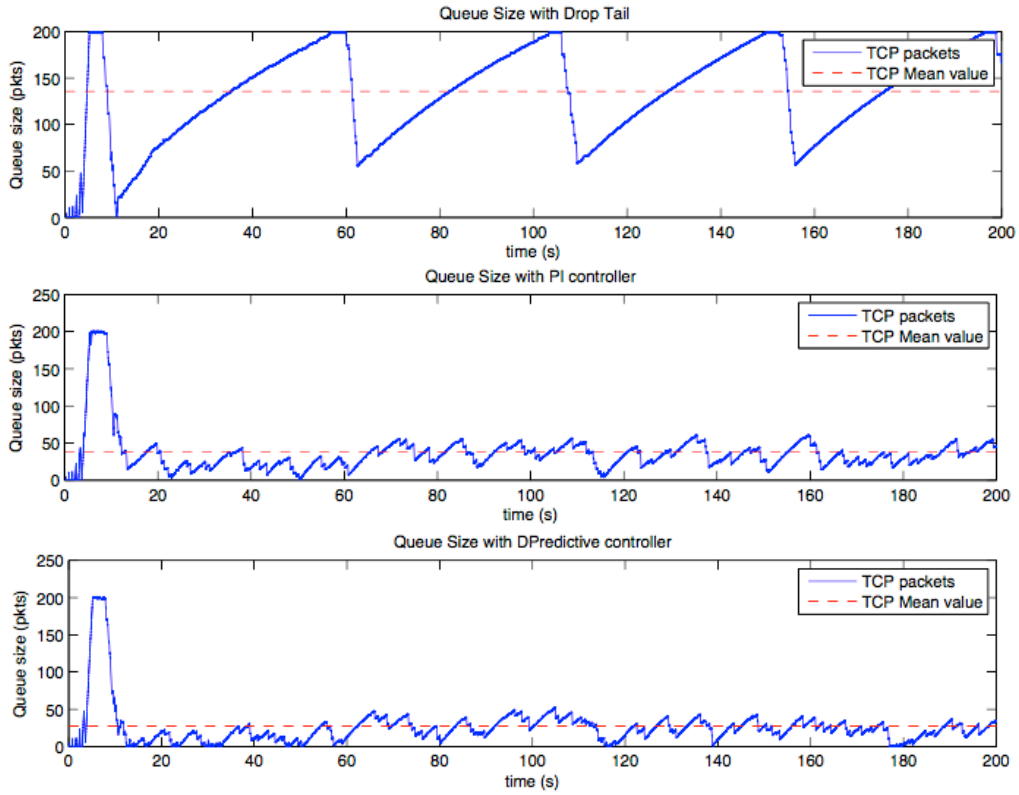


Figure 25. Etat de la file d'attende a) Drop tail, b) PI, c) prédictif

L'impact sur le délai de bout en bout est donné Figure 26.

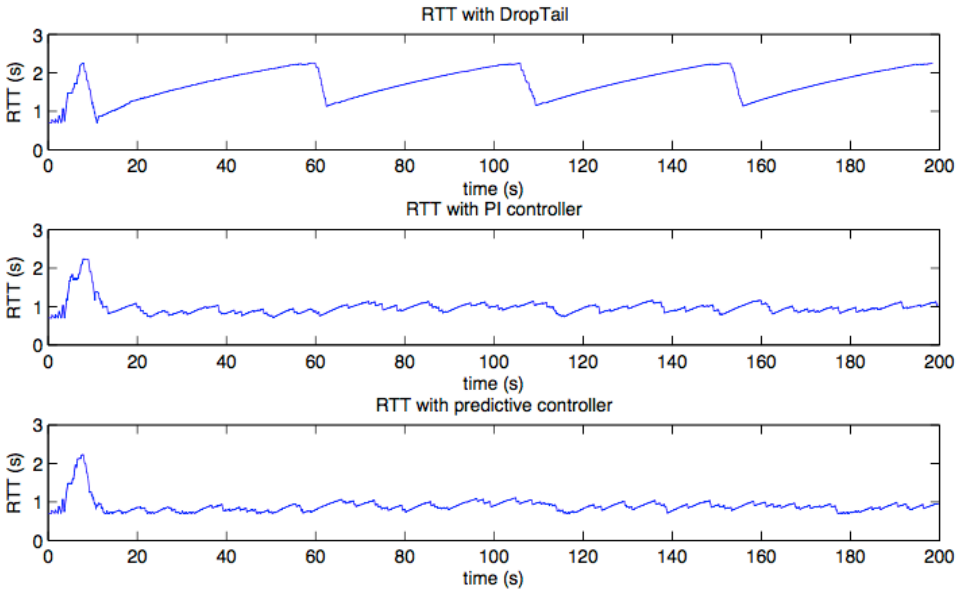


Figure 26. Délai de bout en bout

Nous montrons dans l'article [Del09] la robustesse des contrôleurs en ajoutant une perturbation par l'injection de flux UDP perturbateurs, l'objectif étant, rappelons-le, que ces flux soient protégés et subissent le moins de pertes possibles. La Figure 27 montre le taux de perte sur ces flux UDP en fonction des différents contrôleurs.

AQM	DT	PI	PC
$Transmitted(pkts)$	5120	5120	5120
$Dropped(pkts)$	29	23	0
$Percentage(\%)$	0.57	0.45	0

Figure 27. Taux de perte sur les flux UDP

En conclusion, ces deux contrôleurs fonctionnent bien, sans autre configuration que des valeurs spécifiques calculables en fonction du seuil souhaité dans la file. On peut apercevoir au démarrage des flux un dépassement non géré par le contrôleur, ceci est naturel car le modèle ne représente pas « la phase de slow start » de l'algorithme. Cette solution est donc tout à fait utilisable dans les ST pour compenser les défauts relevés dans de précédentes expériences.

6.3. LES PERFORMANCES APPLICATIVES

Pour conclure cette section sur les performances des couches hautes dans les systèmes de communication par satellite, nous citerons la proposition d'architecture développée dans [Gin08b]. Cette proposition, reposant sur l'architecture à QoS SIP précédemment présentée, visait à découvrir, par l'intermédiaire de web services, les caractéristiques des nouveaux types de flux multimédia (codec) qui ne seraient pas connus par le système. En effet, les réservations reposant sur les caractéristiques (débit, latence tolérée, etc.) des flux multimédias, il est essentiel de fournir un moyen de découverte de celles-ci pour les nouveaux codecs. Les différents types de codecs sont décrits dans une base de donnée centrale, le MTR (Media Type Repository), décrit dans le projet EuQoS.

L'originalité de ce travail reposait principalement sur l'utilisation de web services dans et pour un système satellite. Les web services utilisent comme support de communication HTTP, lui-même basé sur TCP. La réputation de TCP n'étant pas très bonne à l'époque dans le contexte satellitaire, une telle proposition, à notre connaissance, n'avait jamais vu le jour auparavant.

Nous avons défini deux architectures concurrentes, l'une centralisée où le MTR se trouve dans le réseau de l'opérateur satellite, l'autre décentralisée où une copie du MTR se trouve dans chaque ST. Les mises à jour de ces copies se font par un mécanisme de cache après interrogation du central si l'information n'est pas présente. La Figure 28 montre l'interrogation du MTR central permettant d'obtenir les caractéristiques du codec RTP/AVP 3 (GSM). Chaque requête SOAP (Simple Object Access Protocol) est véhiculée au travers d'une requête HTTP. La Figure 29 montre l'initiation d'une session SIP à QoS avec l'interrogation de deux MTR distribués dans chacun des ST (architecture satellite maillée).

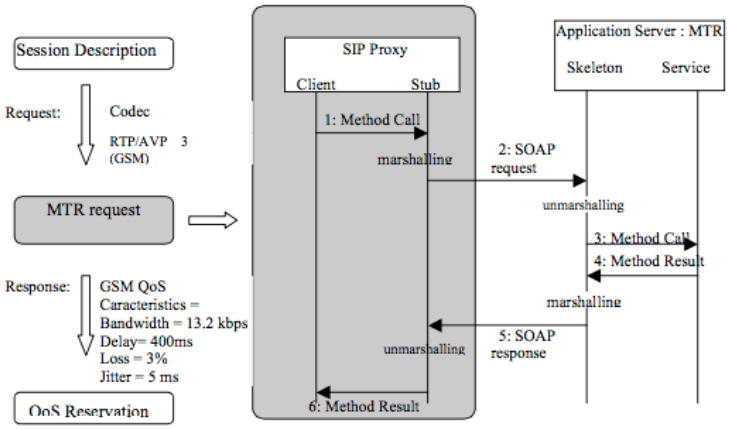


Figure 28. Méthode d'interrogation d'un MTR centralisé

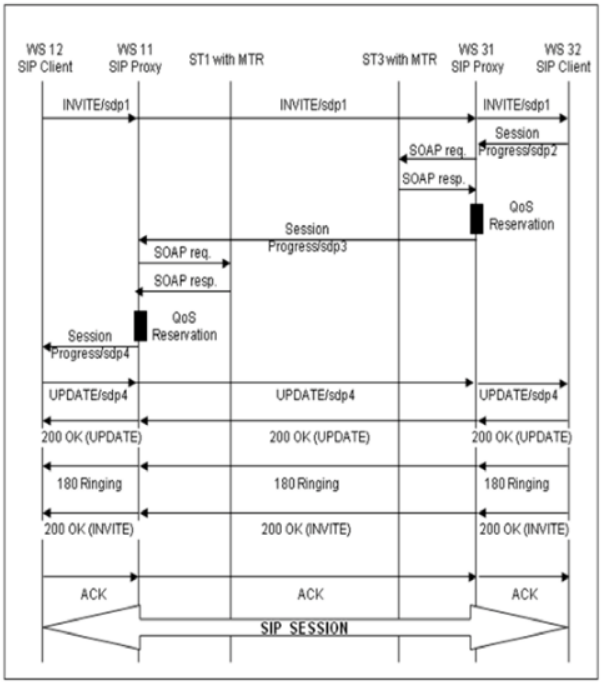


Figure 29. Interrogations de MTR distribués lors d'une session SIP

La Figure 30 représente le temps d'interrogation moyen du MTR selon les deux architectures. Un des résultats les plus intéressants est que la latence de la version centralisée « n'est que » d'une seconde, contrairement à ce qui aurait pu être présagé. Suite à ces travaux les web services se sont vus déployés dans les architectures de notre partenaire industriel.

	Mean time of response	Minimum time of response	Maximum time of response
Scenario 1	1270 ms	1229 ms	1335 ms
Scenario 2	17.75 ms	12 ms	29 ms

Figure 30. Temps moyen d'interrogation du MTR

7. Conclusion générale sur les systèmes de communication par satellite

Au travers de l'encadrement de cinq thèses en co-financement, d'un post-doctorat et de 6 stages de fin d'étude, nous avons contribué au développement et à l'implantation d'une architecture pour les réseaux par satellite de type DVB-S/RCS, compatible avec les réseaux de nouvelle génération, qui permet de satisfaire les besoins des utilisateurs en terme de qualité de service. Cette architecture a été développée en forte

collaboration avec la société Thales Alénia Space et soutenue par le groupe BSM (Broadband Satellite Multimedia) de l'ETSI (European Telecommunications Standards Institute).

Ces travaux ont été financés par les projets Européen (Satip6, SatSix), le projet régional (Ourses) et quatre études commandées par le CNES. De plus, nous avons organisé trois workshops regroupant de nombreux acteurs internationaux du domaine des réseaux par satellite dans le cadre des conférences internationales WCC'2004, INNSS'2006 et IWSSC'2008.

Ces travaux ont permis la publication de deux ouvrages [BER15A][BER15B] abordant les principes de conception des réseaux hybrides terrestres-satellite ainsi que contribué à trois ouvrages collectifs [GAY04][FAN07][JAC10]. Notre contribution aux projets a aussi permis le développement d'une plateforme opensource d'émulation de réseaux par satellite : OpenSand aujourd'hui maintenue par le CNES et Thales Alenia Space. (http://www.opensand.org/presentation/references.php).

Durant les 10 années au cours desquelles se sont déroulés ces travaux, les systèmes satellites ont beaucoup évolué, parfois dans le sens de nos propositions (cas de DVB-S2/RCS2), parfois dans un sens opposé. C'est le cas par exemple d'architectures commerciales du type de tooway qui utilisent une méthode d'accès DOCSIS, beaucoup moins avancée que DVB-RCS, mais moins complexe à déployer. Dans tous les cas, cette architecture est toujours d'actualité, répondant à un des nombreux besoins (accès haut débit, communications militaires, trunking, etc.) auxquels peuvent répondre les systèmes par satellite. Nous aborderons dans les perspectives les futures opportunités pour ces systèmes.

8. Bibliographie du chapitre

[BRA08] Braun, T., Diaz, M., Gabeiras, J.E., Staub, Th., « End-to-End Quality of Service Over Heterogeneous Networks », livre, springe, 248p, 2008, ISBN 978-3-540-79120-1.

[CAI06] Caini, C.; Firrincieli, R.; Lacamera, D., « PEPsal: a Performance Enhancing Proxy designed for TCP satellite connections, » in Vehicular Technology Conference, 2006. VTC 2006-Spring. IEEE 63rd , vol.6, no., pp.2607-2611, 7-10 May 2006.

[ETSI 101790] ETSI TR 101 790 v1.4.1 : « Digital Video Broadcast (DVB) ; Interaction channel for satellite distribution systems ; Guidelines for the use of EN 301 790 », ETSI, Juil 2009.

[ETSI TR 102.676] ETSI TR 102 676, « Satellite Earth Stations and Systems (SES); Broadband Satellite Multimedia (BSM); Performance Enhancing Proxies (PEPs) », V1.1.1., Nov. 2009.

[ETSI TS 123.228] ETSI TS 123 228, « IP Multimedia Subsystem (IMS) ; Stage 2 », ETSI 3GPP, Avril 2008.

[ETSI 301790] ETSI EN 301 790 v1.5.1 : « Digital Video Broadcast (DVB) ; Interaction channel for satellite distribution systems », Norme ETSI, Mai 2009.

[ETSI 302307] ETSI EN 302 307 v1.2.1 « Digital Video Broadcasting, Second Generation Framing Structure, Channel Coding And Modulation Systems For Broadcasting, Interactive Services, News Gathering And Other Broadband Satellite Application », Norme ETSI, Août 2009.

[FIR04] R. Firrincieli C. Caini, « TCP Hybla: a TCP enhancement for heterogeneous networks », International Journal of Satellite Communications and Networking, 2004.

[GOT06] Alberto Gotta, Francesco Potorti, Raffaello Secchi. « Simulating Dynamic Bandwidth Allocation on Satellite Links », WNS2 '06 Proceeding from the 2006 workshop on ns-2: the IP network simulator, 2006.

[HOL02] C. V. Hollot, V. Misra, D. Towsley, and W. Gong. « Analysis and design of controllers for aqm routers supporting tcp flows. », IEEE Trans. on Automat. Control, 47:945–959, jun 2002.

[ITU G.1010] ITU-T Recommendation G.1010: « End-user multimedia QoS categories», URL: http://www.itu-t.org.

[KRI08] E. Kristiansen C. Roseti, « TCP Noordwijk: optimize TCP-based transport over DAMA in satellite networks », International Communications Satellite Systems Conference., 2008.

[LEE 09] D. Lee, B. E. Carpenter, N. Brownlee, « Observations of UDP to TCP Ratio and Port Numbers », Department of Computer Science The University of Auckland, Technical Report, 03-Dec-2009.

[RFC 1323] V. Jacobson, R. Braden, D. Borman, « TCP Extensions for High Performance », IETF RFC 1323, May 1992.

[RFC 2018] M. Mathis, J. Mahdavi, S. Floyd, A. Romanow, « TCP Selective Acknowledgment Options », IETF RFC 2018, Oct. 1996.

[RFC 1144] V. Jacobson, « Compressing TCP/IP Header for Low-Speed Serial Links », IETF RFC 1144, Feb. 1990.

[RFC 2488] M. Allman, D. Glover, L. Sanchez, « Enhancing TCP Over Satellite Channels using Standard Mechanisms», IETF RFC 2488, Jan. 1999.

[RFC 2760] M. Allman et al, « Ongoing TCP Research Related to Satellites», IETF 2760, Fev. 2000.

[RFC 3077] E. Duros, H. Izumiyama, N. Fujii ,Y. Zhang, « RFC 3077 : A Link-Layer Tunneling Mechanism for Unidirectional Links », IETF, Mars 2001.

[RFC 3135] J. Border, M. Kojo, J. Griner, G. Montenegro, Z. Shelby, « Performance Enhancing Proxies Intended to Mitigate Link-Related Degradations », IETF 3135, June 2001.

[RFC 3262] J. Rosenberg, H. Schulzrinne, G. Camarillo, A. Johnston, J. Peterson, R.Sparks, M. Handley, E. Schooler , « RFC 3262 - SIP: Session Initiation Protocol », Juin 2002.

[RFC 3312] G. Camarillo, W. Marshall, J. Rosenberg, « RFC 3312 - Integration of Resource Management and Session Initiation Protocol (SIP) », Oct. 2002

[RFC 3775] D. Johnson, C. Perkins and J. Arkko, « RFC 3775 : Mobility Support in IPv6 », IETF RFC 3775, June 2004.

[RFC 4960] R. Stewart, « RFC 4960, Stream Control Transmission Protocol », September 2007.

[RFC 4895] M. Tuexen, R. Stewart, P. Lei and E. Rescorla, « RFC 4895 : Authenticated Chunks for the SCTP », August 2007.

[RFC 5061] R. Stewart, Q. Xie, M. Tuexen, S. Maruyama and M. Kozuka, « RFC 5061 : SCTP Dynamic Address Reconfiguration », September 2007.

[RFC 5213] S. Gundavelli, K. Lung, V. Devarapalli, K. Chowdhury and B. Patil, « RFC 5213 : Proxy Mobile IPv6 », IETF RFC 5213, August 2008.

[RFC 5568] R. Koodli, « RFC 5568 : Mobile IPv6 Fast Handovers », IETF RFC 5568, July 2009.

[RFC 5380] H. Soliman, C. Castelluccia, K. El Malki and L. Bellier, « RFC 5380 : Hierarchical Mobile IPv6 (HMIPv6) Mobility Management », IETF RFC 5380, October 2008.

[RHE09] I. Rhee, L. Xu S. Ha, « CUBIC: a new TCP-friendly high-speed TCP variant », ACM SIGOPS Operating Systems Review, 2008.

[SCPS] CCSDS 714.0-B-2 « SPCS Transport Protocol », Issue 2, October 2006.

[VIL98] T.Villemur, V.Baudin, S.Owezaski, M.Diaz, « An integrated platform for cooperative teleteaching », 5th International Workshop on Interactive Distributed Multimedia Systems and Telecommunication Services (IDMS'98), Oslo (Norvège), 8-11 Septembre 1998.

[WEN10] J. Wen, J. Zhang, Y. Han – J. Wang, « TCP-FIT: An Improved TCP Congestion Control Algorithm and its Performance », Infocom'2011, October 2010.

[ZHA06A] Q. Zhang, M. Sridharan K.T. Jingmin Song, « A Compound TCP approach for High-speed and Long Distance Networks », Infocom, 2006.

[ZHA06B] Q. Zhang, M. Sridharan K.T. Jingmin Song, « Compound TCP: A Scalable and TCP-Friendly Congestion Control for High-speed Networks - Protocols for Fast Long-Distance Networks », PFLDNet, 2006.

Chapitre 2

LES RESEAUX SANS FIL TERRESTRES

1. Introduction

Le titre de ce chapitre peut être trompeur, car il va de soi que les réseaux par satellite traités au chapitre précédent sont aussi des réseaux sans fil ! Néanmoins, nous nous sommes beaucoup intéressés à l'infrastructure des réseaux satellite qui elle est bien matérielle. La dénomination de réseaux sans fil dans ce chapitre couvre les travaux que nous avons menés sur des réseaux de courte portée que sont généralement les réseaux de capteurs, les réseaux ad-hoc ou les réseaux locaux sans fil.

La première partie adresse un ensemble de travaux appliqués aux réseaux de capteurs. L'impact de l'utilisation d'antennes actives dans un tel réseau est d'abord abordé, puis le cas particulier d'une application aéronautique de réseaux de capteurs est présenté au travers du prisme des problèmes de synchronisation. La seconde partie, plus générique, est appliquée aux réseaux locaux sans fil et réseaux ad-hoc, mais peut-être transposée aisément à cette première problématique. Seront traités les problèmes de la prédiction de la qualité de service, par une approche temporelle basée sur la mesure et une approche spatiale utilisant la coopération de nœuds voisins.

2. Réseaux de capteurs à faible consommation d'énergie

Nos travaux ont réellement débuté au travers de la plateforme nationale RECAP (REseaux de CAPteurs) financée par le CNRS en 2005. Composée de 9 sites français, elle mettait à disposition, entre autres, un ensemble de capteurs communicants sans fil basés sur la plateforme Motes de crossbow. Utilisant des systèmes de communication 802.15.4, ces nœuds ont été utilisés pendant deux stages d'étudiants [Lan05][Lay05] pour réaliser une plateforme d'évaluation. Rapidement ont été mis en évidence les limites de ces systèmes concernant la gestion de la qualité de service et la possibilité de construire des réseaux denses du fait de nombreuses interférences. De fait, de par notre culture liée à la gestion de la qualité de service dans les réseaux multimédia, nos travaux se sont orientés vers les réseaux de capteurs haute-fidélité, à l'opposé de l'existant qui visait à optimiser la connectivité du réseau. Notre proposition est relative à l'utilisation de réseaux de capteurs assurant des propriétés garanties, comme le débit ou la latence, à destination d'applications spécifiques, le plus souvent industrielles. Au travers d'une coopération naissante

avec une équipe d'électronicien du laboratoire, grâce à un projet interne financé par le LAAS, nous avons mis en évidence la nécessité de mettre en œuvre le concept d'antennes agiles, en cours de développement au laboratoire, dans les réseaux de capteurs haute-fidélité.

2.1. UNE ARCHITECTURE 802.15.4 AVEC DES ANTENNES AGILES

Les antennes directives (smart antenna) offrent une solution pour réduire les interférences et améliorer la capacité du système. Comme montré dans la Figure 31, ces antennes sont constituées d'un vecteur d'antennes pour former un faisceau qui émet et reçoit le signal dans la direction désirée.

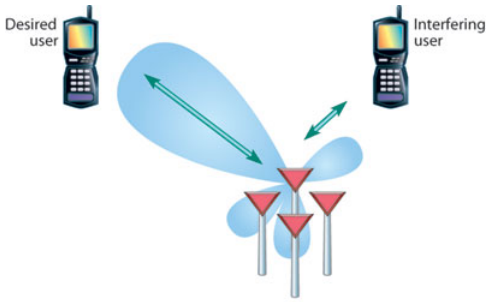


Figure 31. Concept des antennes agiles

Un vecteur d'antennes linéairement ordonnées forme la structure de base d'un formateur de faisceau. Pour former un faisceau, chaque signal est multiplié par un ensemble de poids complexes (où le nombre de poids est égal au nombre d'antennes) définis dans le vecteur. Le signal émis dans les différentes antennes dans le vecteur diffère en phase (qui est déterminée par la distance entre les éléments de l'antenne) et en amplitude (déterminée par le poids associé à cette antenne). Changer la direction du faisceau entraîne le changement de l'ensemble des poids et l'espacement entre les éléments de l'antenne. Si les poids utilisés sont sélectionnés parmi une librairie de poids qui forment les faisceaux dans une direction prédéfinie, le processus est appelé « Switched beam forming ». Si les poids sont calculés et mis à jour en temps réel, le processus est connu sous le nom de « adaptive beam forming ». Grâce aux récentes avancées des commutateurs MEMS, ces adaptations ne prennent aujourd'hui que quelques microsecondes.

Des études avaient déjà proposé l'utilisation d'antennes directives dans les réseaux wifi. [CHO02] avait identifié les problèmes liés à la non diffusion des RTS/CTS et l'apparition d'une variante du problème des nœuds cachés. Un risque de famine lié à l'augmentation de la période de backoff sur perte consécutive de RTS est aussi identifié. Des architectures ont ensuite été proposées. Circular-DMac [KOR03] propose d'émettre les RTS/CTS successivement sur chaque antenne pour simuler l'effet d'une émission omnidirectionnelle.

DNAV (Directional Network Allocation vector) est une adaptation du NAV utilisée dans le 802.11 de base. Chaque entrée de la table DNAV est associée à une direction, et détermine l'état du canal dans cette direction (libre, occupé, durée d'occupation). [TAK02] propose de mémoriser sur quelle antenne est reçu un message. Il constitue ainsi une table associant chaque voisin avec l'antenne qui permet de l'atteindre. Quand un nœud a un paquet à transmettre, le paquet est transmis en mode directionnel si l'angle d'arrivée du voisin a été enregistré dans le cache. [CHO02] [CHO04] proposeront des variantes de ces mécanismes au sein des protocoles MMAC (Multi-Hop RTS MAC) et DMAC (Directional MAC). [RAM05] réalisera la première implémentation.

Pour notre part, nous avons proposé une extension du protocole 802.15.4 intégrant un ensemble de mécanismes similaires mais adaptés à ce protocole [BOU06]. Les mécanismes de sélection multiple d'antennes et de mémorisation des angles d'arrivées ont été particulièrement utiles. Une implémentation dans NS-2 a été faite.

La couche physique a été augmentée par l'ajout de 4 antennes par nœud. La nouvelle couche physique est la responsable de l'émission et la réception des trames sur le canal radio. Nous avons ajouté au modèle NS-2 les rôles suivants :

- Activation/déactivation des antennes
- Détermination de l'angle d'arrivée du signal
- Détermination de la puissance de réception du signal en fonction du gain d'émission, du gain de réception et de la puissance d'émission.

La puissance de réception est déterminée comme suit :

$$\Pr(d) = \frac{Pt.\lambda^2.dref^2.Gt.Gr}{4\prod^2.d^2}$$

Équation 9 - Modèle de calcul de la puissance reçue

où : *Pt, Pr* : puissance d'émission et de réception respectivement.

Gt, Gr : Gain d'émission et de réception respectivement.

λ : la longueur d'onde

d : la distance entre les nœuds

dref : distance de référence donnée par *dref* = 2D/λ2

La nouvelle couche Mac a les nouveaux rôles suivants :

- Gestion d'accès au canal (contention, slotting CSMA-CA)
- Association/désassociation
- Synchronisation
- Switching parmi les 4 antennes directives et l'antenne isotrope en fonction de la position du nœud destinataire
- Enregistrement de l'angle d'arrivée des paquets.

Cette architecture a été testée dans de nombreux scénarios, dont des topologies réputées complexes (un train de nœud, un quadrillage, …).

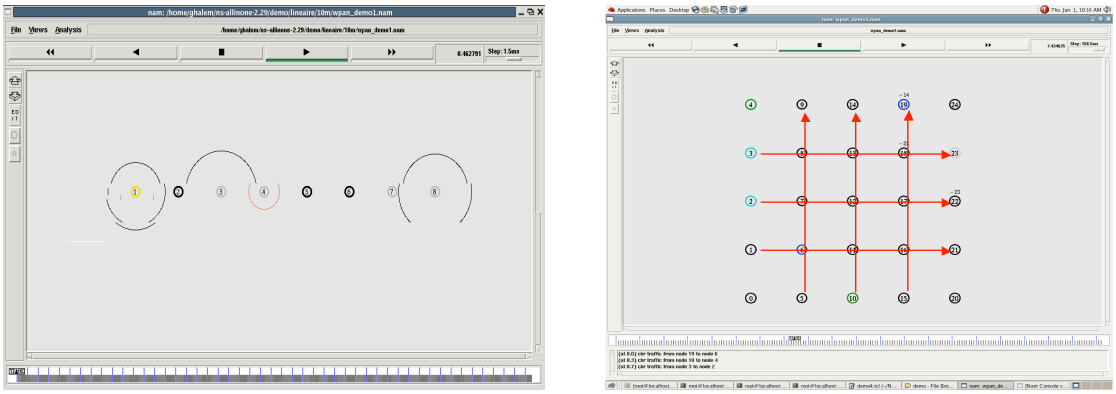


Figure 32. Exemples de topologies problématiques (linéaire, quadrillage)

Dans les deux topologies présentées Figure 32 le protocole D802.15.4 n'apporte aucun gain par rapport à sa version originelle. En effet, les chemins étant alignés, le choix d'antenne est nul. En revanche il ne fonctionne pas moins bien.

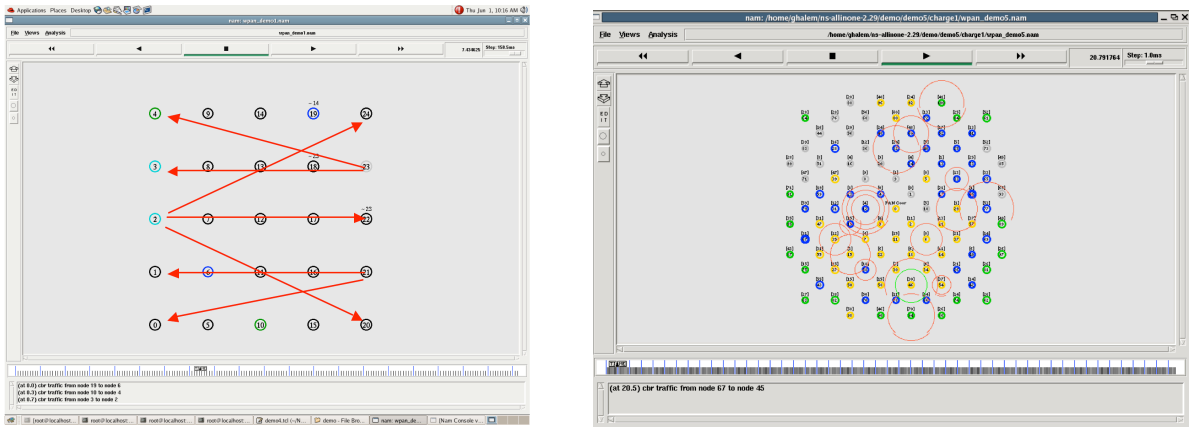


Figure 33. Topologies avantageuses pour D802.15.4 (a) quadrillage (b) aléatoire

La Figure 33 présente des topologies moins régulières, où la sélection d'antenne est possible. Ici le protocole offre rapidement des gains importants. La Tableau 2 montre les gains pour une topologie en quadrillage ou des flux transversaux sont activés. Dans une telle configuration des interférences sont produites par un protocole omnidirectionnel alors qu'elles sont plus limitées par une version directionnelle.

	Délai moyen (s)	% Paquets perdus
802.15.4	0.052	10.2%
D802.15.4	0.039	5.3%

Tableau 2. Résultats obtenus pour la topologie (a) quadrillage

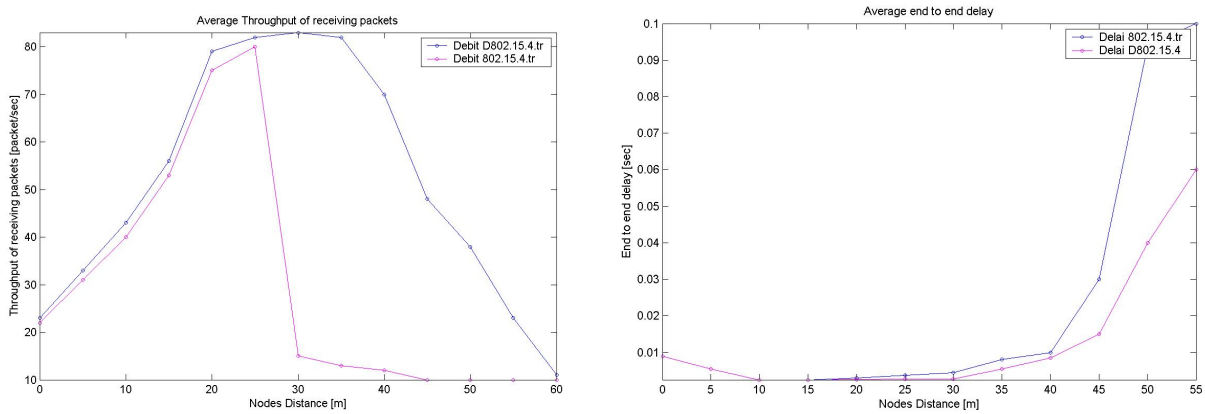


Figure 34. Débits moyens et délais de bout en bout pour la topologie (b)

La Figure 34 montre les gains en termes de débit moyen par nœud et de délais de bout en bout pour la topologie où les couples communicants sont désignés aléatoirement (b). Les performances sont évaluées en faisant varier la distance entre les nœuds. C'est quand les nœuds se rapprochent (25m avec les paramètres utilisés) que les gains de l'architecture sont particulièrement visibles.

Sans donner tous les détails des résultats, ces travaux ouvrent la voie à de nombreuses optimisations dans les réseaux de capteurs sans fil permettant d'imaginer des réseaux plus denses, de meilleure qualité, voire plus économes en énergie, puisqu'il y est possible de baisser la puissance pour des résultats comparables.

2.2. LA QOS POUR LA SYNCHRONISATION DES CAPTEURS

Les applications des réseaux de capteurs sont très différentes de celles utilisant des réseaux filaires hauts débits. De fait, les besoins en qualité de service sont aussi très différents. Bien sûr, les besoins en termes de débit, de délai de bout en bout, de gigue, sont toujours présents, mais moins pour assurer de la diffusion

vidéo que pour de nouvelles applications comme la synchronisation temporelle des nœuds. En effet les protocoles qui assurent ce service nécessitent une certaine performance du réseau pour garantir des bornes acceptables. De nouveaux critères apparaissent aussi, comme la connectivité du réseau, où les protocoles sont optimisés afin de permettre à un maximum de nœuds d'être attachés au réseau, ou des critères de consommation énergétique pour prolonger la durée de vie des nœuds. Ce ne sont pas à proprement parler des paramètres de qualité de service, mais ils y sont très liés, car souvent leur optimisation est contradictoire avec l'amélioration de la QoS. De nombreux articles opposent aujourd'hui ces critères et cherchent à obtenir un compromis acceptable en fonction du type d'application visée.

Nous nous sommes intéressés à développer une solution de synchronisation temporelle des nœuds d'un réseau, d'une grande précision, mais aussi efficace en termes de consommation énergétique. L'application visée était l'instrumentation des essais aéronautiques en vol dans le projet [SACER07] (Système Autonome Communicant Embarqué en Réseau) qui avait pour but principal de mettre au point un réseau de capteurs sans fil collé sur les profils des ailes d'un avion. Pendant la période des essais en vol, les avions sont aujourd'hui instrumentés par un ensemble de capteurs de pression et de température filaires permettant d'établir une cartographie des écoulements d'air sur les ailes. Ces capteurs doivent être packagés dans des sortes de « gants » collés à l'aile et reliés à la cabine par des torons de câbles. Ainsi les ailes sont percées afin de faire circuler ces câbles, avec tous les risques de modification de la structure que cela entraine. Le projet visait donc à construire un réseau de capteur sans fil permettant de remonter ces mesures pendant les phases d'essais. Les contraintes découlent principalement de cette application, c'est à dire une densité de nœud importante (147 nœuds par face d'aile), des débits d'environ 1 Mbps par capteur, un faible encombrement (moins de 2mm d'épaisseur), une résistance à des températures extrêmes, une autonomie énergétique pour les nœuds d'extrémité et la contrainte de synchronisation des nœuds entre 500 ns et 1µs. Pour cela, nous avons proposé et évalué un protocole de synchronisation de haute précision, économe en énergie. Les premiers prototypes développés dans le projet se sont basés sur un système de transmission UWB MB-OFDM qui était en cours de développement : WiMedia. Les performances de ce protocole ont pu être évaluées dans le cadre de cette application [Hen09] et mettre en évidence ses forces et faiblesses. Pour les prototypes suivants, une version sur mesure a été préférée garantissant toutes les propriétés dont nous avions besoin : architecture à deux niveaux, délais bornés et symétriques, débits garantis. La Figure 35 décrit cette hiérarchie, avec des nœuds capteurs qui remontent les mesures à des routeurs (8 nœuds par routeur), et les routeurs qui relaient cette information aux concentrateurs (8 routeurs par concentrateur), avec 4 concentrateurs (1 par profil d'aile). Notre protocole est donc défini dans ce contexte.

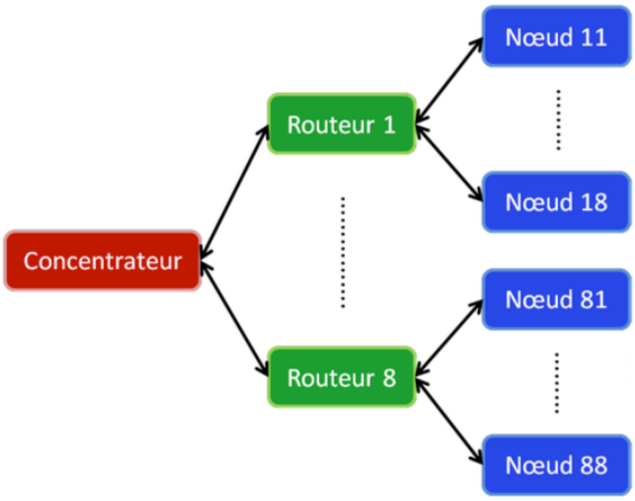


Figure 35. Architecture hiérarchique du réseau SACER

2.2.1. Les protocoles de synchronisation de réseau

Il existe de nombreux protocoles de synchronisation d'horloge, mais seulement certains sont capables de garantir une précision suffisante en adéquation avec les contraintes industrielles. IEEE-1588 est le plus connu d'entre eux avec une précision d'une dizaine de nanoseconde (10ns – 75ns) sur des réseaux de type Ethernet (avec des commutateurs particuliers). Mais, comme les réseaux sans fil sont limités en termes de puissance et présentent une grande complexité, la plupart des implémentations de l'IEEE-1588 utilisées sur les réseaux câblés ne s'adaptent pas aux WSNs. Par conséquent, des travaux pour adapter ce protocole aux réseaux de capteurs sans fil ont été réalisés. Ainsi, [Cho53] présente des expérimentations et une évaluation de performances pour un protocole de synchronisation basé sur le standard IEEE-1588 pour des réseaux de capteurs sans fil. Les résultats montrent que la synchronisation entre l'horloge maître et les horloges esclaves des nœuds du réseau se réalise avec une précision de quelques centaines de nanosecondes (200ns).

Nous réaliserons une étude similaire, analysant les performances de IEEE 1588 sur réseaux sans fil WiMedia. Les résultats obtenus sont de l'ordre de la dizaine de µs, imputables après analyse plus approfondie, à une dissymétrie des délais de transferts sur le réseau WiMedia. En effet IEEE 1588 fait l'hypothèse de délais symétriques (5 µs mesurées sur notre banc - Figure 36) contre 40 ms pour WiMedia. Ce dernier implante un protocole de type maître-esclave, où le maître subit des temps d'accès beaucoup plus courts que l'esclave. Il est à noter la difficulté de réaliser des mesures à l'échelle de temps de la nanoseconde, où un oscilloscope numérique à 6 GHz a été nécessaire.

Figure 36. Banc de mesure IEEE 1588 sur WiMedia

Plusieurs protocoles de synchronisation d'horloges ont été proposés pour les réseaux de capteurs sans fil, avec des performances plus ou moins bonnes. Le RBS (Reference Broadcast Synchronization) [Els02] est le protocole le plus représentatif. En exploitant la propriété de diffusion de la communication sans fil, ce protocole est capable de réaliser la synchronisation d'un groupe de nœuds qui se trouvent à portée de communication d'un émetteur de référence. Les nœuds qui reçoivent le message de synchronisation, enregistrent l'heure de son arrivée et échangent cette information avec les autres. La précision pour la synchronisation de RBS, en présence de la technologie 802.11 et avec un estampillage du temps réalisé au niveau du noyau du système d'exploitation, est de l'ordre de la dizaine de microseconde [Els02].

Le protocole TPSN (Timing-sync Protocol for Sensor Networks) est une implémentation de la méthode de synchronisation « émetteur-récepteur ». Dans [Hu03], les auteurs implémentent le principe de TPSN sur une architecture de capteurs de type Berkeley Motes et proposent une procédure d'horodatage au niveau de la couche MAC. Cette méthode est capable de réduire efficacement le temps moyen d'accès au medium (l'erreur moyenne pour la précision de la synchronisation est de 16,9 μs).

Le protocole FTSP (Flooding Time Synchronization Protocol) proposé dans [Mar04a] est un autre protocole de synchronisation qu'utilise la stratégie traditionnelle de synchronisation « émetteur-récepteur ». Ce protocole est similaire à TPSN, dans la mesure où il réalise également une synchronisation de tous les nœuds du réseau à travers un nœud « root », mais améliore un certain nombre des défauts. Le nœud « root » est responsable de fournir le temps global dans le réseau et il est régulièrement élu d'une manière dynamique. La topologie du réseau est de type mesh, contrairement à TPSN où l'organisation du réseau est de type hiérarchique.

Dans [Mar04b], les auteurs ont évalué le protocole FTSP dans un réseau de 64 éléments organisé dans une grille de 8x8, ce qui correspond à un réseau avec 7 sauts. Après environ 10 minutes, la synchronisation du

réseau est réalisée avec une précision moyenne inférieure à 11.7µs, d'où une erreur moyenne de 1.7µs par saut si nous divisons par le nombre de sauts.

Enfin, le protocole PBS (Pairwise Broadcast Synchronization) proposé dans [Noh08] décrit une nouvelle approche de synchronisation, appelé Receiver-Only Synchronization (ROS). La précision est similaire à celle obtenue pour le RBS (29,1 µs) sur la technologie Berkeley Motes. PBS nécessite un nombre réduit de messages pour chaque cycle de synchronisation, ce qui est un avantage en terme d'économie d'énergie.

Protocole	Paramètres de performance				
	Schéma utilisé	Nombre messages/ cycles	Précision d'horloge	Couche	Consommation en énergie
IEEE-1588	Saut unique	4*N*L	50-200 ns	Application / Physique	Elevée
RBS	Récepteur-Récepteur	N*L2	29.1 µs	Application	Elevée
TPSN	Emetteur-Récepteur	2*N*L	16.9 µs	MAC	Moyenne
FTSP	Emetteur-Récepteur	N*L	1.7µs	MAC	Faible
PBS	Multi sauts/ saut unique	2*N	29.1 µs	Application	Faible

Tableau 3. Comparaison des protocoles de synchronisation

2.2.2. Proposition d'architecture hybride IEEE 1588-PBS

En tenant compte de la conception de chacun des protocoles présentés ci-dessus et en prenant en considération la spécificité des applications visées, nous sommes arrivés à la conclusion qu'il était nécessaire d'élaborer un protocole de synchronisation mixte, tirant profit de la capacité énergétique des routeurs (alimentés) et respectant les faibles ressources des nœuds. L'objectif est l'amélioration du rendement énergétique, tout en gardant les performances pour la précision de la synchronisation. Adaptée à l'architecture hiérarchique développée pour le projet [SACER07] et décrite dans Figure 35, cette solution [ALBU10] met en œuvre une synchronisation de type IEEE 1588 entre les parties alimentées du réseau (concentrateurs et routeurs) et de type PBS entre les routeurs et les nœuds où la conservation de l'énergie est un critère important.

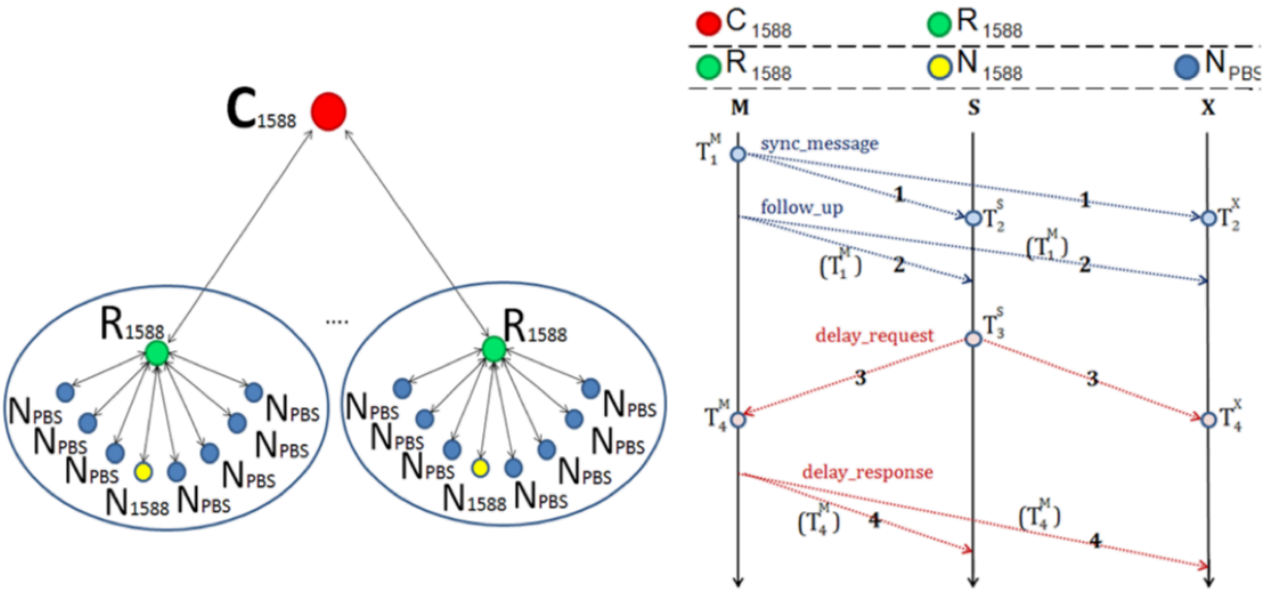


Figure 37 -Topologie du réseau et fonctionnement du protocole hybride IEEE1588-PBS

Dans un tel groupe, le nœud maître (M) et le nœud esclave (S) se synchronisent en utilisant l'algorithme d'IEEE-1588, tandis que le troisième nœud (X) va utiliser la synchronisation déjà établie entre le maître et l'esclave en écoutant les messages d'une paire de nœuds Maître-Esclave (M-S) tel que le protocole PBS le propose. Ceci va permettre au nœud X de synchroniser son horloge interne avec celle du nœud M à moindre coût énergétique. La Figure 37 (diagramme de séquence) résume ces échanges.

La performance de ce protocole a été étudiée en simulation après réalisation d'un modèle dans l'environnement de simulation NS-2. La Figure 38 met en évidence les deux niveaux de synchronisation, avec une précision inférieure à 200 ns pour la partie IEEE1588 (ce qui est conforme à la littérature sur liaison sans fil) et entre 600ns et 5µs pour la partie PBS. Ces résultats classent ce protocole parmi les plus efficaces de la littérature pour un réseau sans fil.

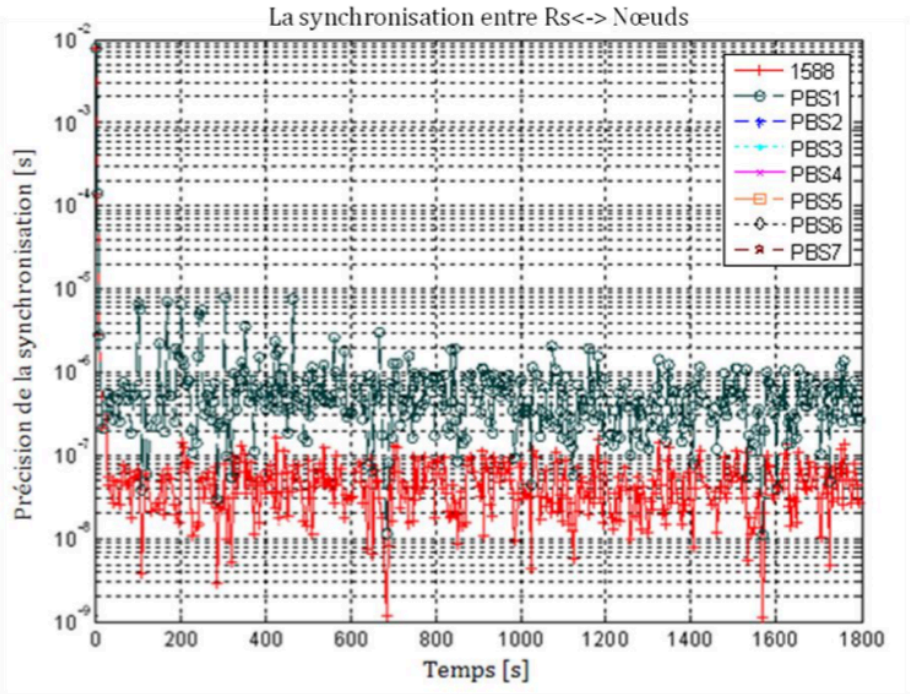


Figure 38 - Synchronisation mesurée pour le protocole IEEE15888-PBS Hybride

Avec un nombre de 24 messages par cycle pour le niveau PBS, contre 120 messages par cycle pour le niveau IEEE 1588, des simulations de la consommation énergétique des nœuds montrent une augmentation de 75% de la durée de vie du nœud PBS comparativement au cas où une synchronisation IEEE 1588 intégrale aurait été utilisée.

Ces résultats ont pu être encore améliorés en intégrant les travaux précédents sur les antennes directives. Des antennes omnidirectionnelles sont utilisées pour la partie IEEE1588 qui n'a pas de contrainte énergétique et des antennes directives sont utilisées pour les nœuds, en direction de leur routeur (qui est fixe). Comme représenté dans la Figure 39, la consommation énergétique est à nouveau réduite et la durée de vie des nœuds augmentée de 64% lorsque des antennes directionnelles sont utilisées.

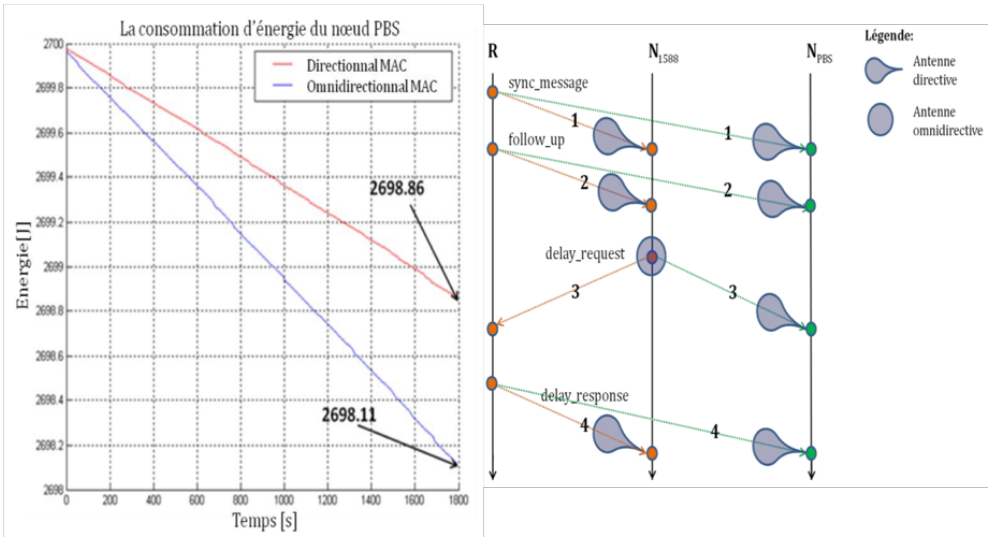


Figure 39 - Consommation énergétique des nœuds PBS avec antenne directionnelle

3. Métrologie des réseaux sans fil

Une des remarques qui peut être portée sur les travaux précédents est relative à l'utilisation de logiciels de simulation pour valider les différentes approches. Plus simple que l'expérimentation réelle qui nécessite des moyens de tests reproductibles (ce qui est extrêmement compliqué pour des transmissions sans fil) et bien plus souple que la modélisation d'un mécanisme particulier qui bute parfois sur la complexité des mécanismes sous-jacents et des interactions possibles avec d'autres, les outils de simulation sont toutefois contestables sur certains points et leur utilisation parfois polémique. Les outils de simulation sont très utilisés dans la littérature scientifique et dans l'industrie alors qu'ils sont régulièrement critiqués pour leur manque de réalisme [KOT03], en partie à cause des abstractions qu'ils utilisent pour mettre en œuvre les couches physiques et MAC. De plus, de nombreux travaux insistent sur le besoin de mener des études comparatives entre résultats de simulations et expérimentaux afin de valider les modèles et le fonctionnement des simulateurs ainsi que de les améliorer. Est-il préférable de travailler sur des expérimentations réelles au prix d'une instrumentation complexe et du risque d'une faible reproductivité des résultats, où vaut-il mieux travailler en simulation au prix d'abstractions qui peuvent fausser les résultats ?

Dans les travaux développés dans la thèse [KRE14] nous avons essayé de trouver des réponses à cette problématique en proposant une méthode d'amélioration des modèles de transmission d'un logiciel de simulation par couplage et comparaison avec des expérimentations en environnement réel contrôlé.

3.1. SIMULATION DES RESEAUX SANS FIL

L'approche adoptée a été de développer un banc de test pour l'expérimentation des réseaux sans-fil qui permette d'obtenir des mesures, reproductibles, à différents niveaux du système de communication (de la couche transport à la couche physique) et de les comparer à des simulations réalisées par le logiciel NS. Il est ainsi possible de générer du trafic, générer des perturbations, et capturer le trafic reçu sous formes de traces, sur le banc et dans le simulateur. Une méthode d'appairage des traces, ainsi qu'un modèle de recherche des causes de différences a été mis en œuvre et a permis de détecter et corriger le modèle de simulation. La Figure 40 résume cette approche. Pour des raisons d'accessibilité du matériel, un réseau de type WiFi a été choisi car de nombreux matériels et logiciels existent en version ouverte et sont exploitables de manière libre.

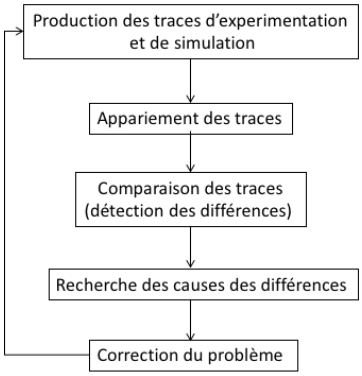


Figure 40 -Approche de travail

3.1.1. Banc de Laboratoire

L'environnement choisi pour implémenter le banc de test est celui d'une chambre anéchoïque (Figure 41). Cette solution permet de garantir la reproductivité des mesures, sans interférence extérieure, ni effets incontrôlables de multi-trajet et se rapproche du modèle de diffusion en espace libre du simulateur NS. La complexité de cette tâche a résidé dans la sélection des composants permettant de travailler à la fois sur le signal (oscilloscope large bande et équipements RF), sur le matériel (matériel WiFi ouvert et pilotes opensource), et de l'informatique (machines de génération et capture de trafic). Les équipements et logiciels utilisés sur le banc ont été choisis pour respecter les contraintes de non-intrusivité et d'introspection nécessaires sur un tel banc. Du bruit AWGN peut-être généré artificiellement et injecté à l'intérieur de l'environnement à l'aide d'une antenne directionnelle afin de perturber la réception des communications sans-fil effectuées dans la chambre. Une attention particulière a été nécessaire afin de garantir la synchronisation des équipements et la datation des mesures à l'aide du protocole NTP.

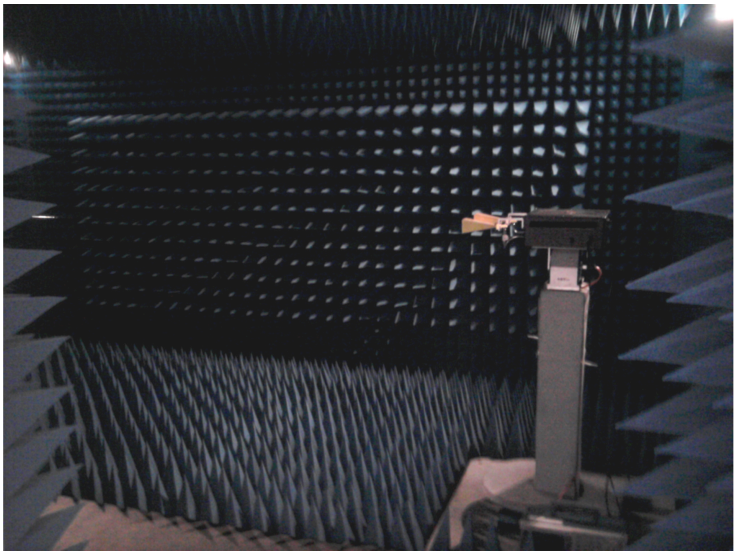


Figure 41 -Salle anéchoïque du LAAS-CNRS

La Figure 42 décrit cette plateforme où P1 et P2 sont les cartes WiFi (Atheros 802.11g) reliées à des boitiers d'écoute passifs connectés aux antennes d'émission et de réception par un diviseur de puissance (nœuds S1 et S2). De manière similaire, le signal dupliqué par le diviseur de puissance de l'antenne de réception est également redirigé vers l'instrumentation de mesure physique (oscilloscope). La génération du trafic exogène est réalisée par une machine tierce afin de ne pas perturber la mesure.

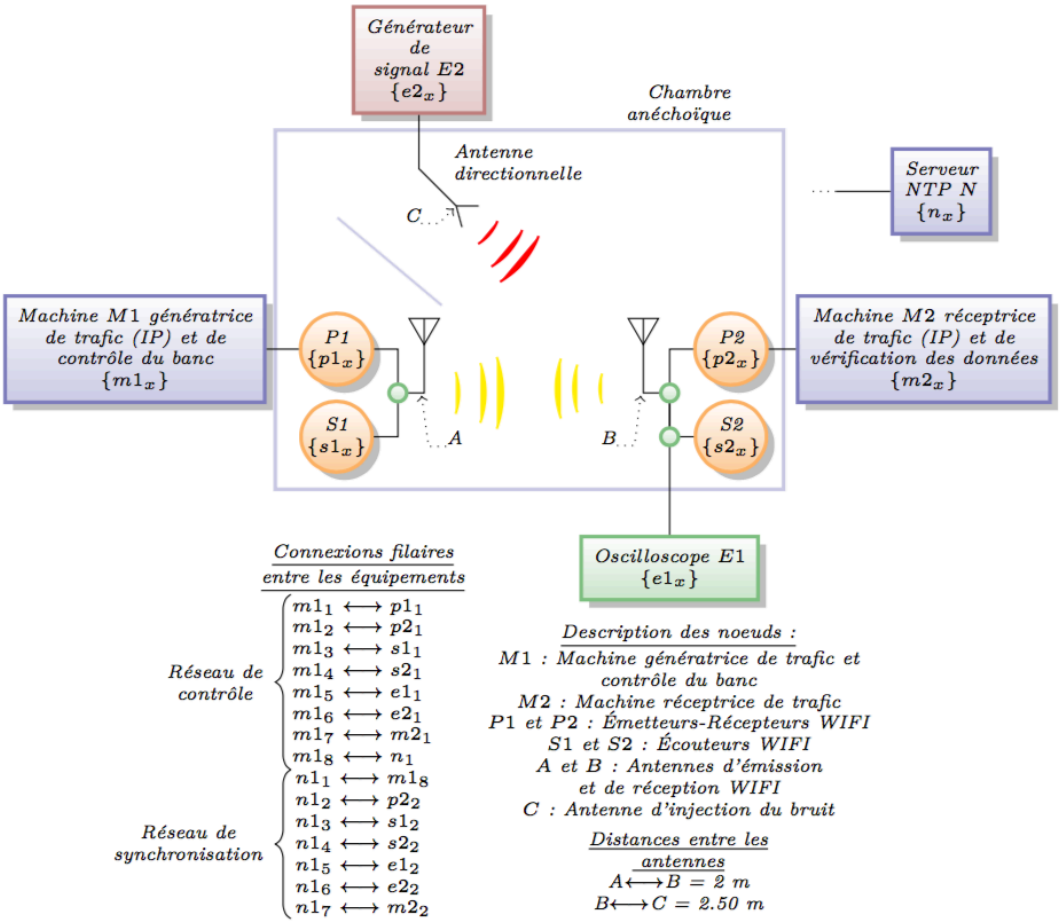


Figure 42 - Description complète du banc de test

Les traces générées sont composées de mesures sur la couche physique données par l'oscilloscope et les pilotes des cartes WiFi (Bruit, SNR, erreurs, …), d'informations de niveau MAC données par les pilotes (compteurs de trames envoyées, reçues, retransmises, etc., statistiques de l'algorithme d'adaptation) et les captures informatiques (tcpdump : type de trame, adresse MAC, débit physique, canaux, …), ainsi que d'informations de niveau Réseau et Transport données par les logiciels de génération et capture de trafic (débit utile, etc …).

3.1.2. Comparaison Experimentation et Simulation

Afin de rendre possible une simulation de type évènement discret, de nombreuses simplifications sont réalisées, en particulier au niveau de la couche physique. Par exemple, le simulateur NS précédemment utilisé, modélise le canal de propagation et la couche physique du protocole 802.11 par le modèle YANS décrit dans [Lac06] en prenant l'hypothèse d'une transmission en environnement libre et en calculant l'affaiblissement de propagation par l'équation de Friis. Ce modèle est néanmoins suffisamment représentatif pour être comparable à l'expérimentation en chambre anéchoïque. Par contre, il n'était pas

prévu pour intégrer un signal perturbateur tel que nous l'avons défini et ce modèle YANS a dû être étendu pour prendre en compte le bruit additif. L'équation (Équation 10) de calcul du ratio signal-sur-bruit-plus-interférences SNIR(p,t) a été modifiée par l'ajout d'une composante Ng(t). L'amplitude du bruit Ng est tirée aléatoirement selon une densité de probabilité gaussienne de moyenne 0 et de variance N_0 similaire au bruit AWGN généré expérimentalement. La valeur de N_0 est fixée par l'utilisateur et correspond à la valeur du niveau de bruit du banc.

$$SNIR_B(p,t) = \frac{S_p t}{N_i(p,t) + N_f + N_g(t)}$$

Équation 10 - Modification du modèle YANS

Ainsi configuré, il est possible de jouer des scénarios dans les deux environnements et de comparer les traces obtenues. La Figure 43 montre la configuration d'un tel scénario où le niveau de bruit injecté varie de [-24 ; -18] dBm et la Figure 44 un exemple de résultat qui est la mesure du FER (Frame Error Ratio) en fonction de ce bruit.

Setting	*Notation*	*Experimentations*	*Simulations*
Transmit power	P_{ptr}	10 dBm	
UDP Throughput	P_{DUDP}	7 Mbps	
Packets size	P_{TP}	1472 B	
Noise power range (linear)	P_{BR}	[-24.00;-18.00] dBm	[-67.7;-65.5] dBm
Corresponding generated FER range		[0%;100%]	
Data frame rate	P_{DT}	fixed to 54 Mbps	
Control frame rate	P_{DC}	fixed to 24 Mbps	
802.11 standard	P_{MAC}	802.11g-DCF-No-QoS-Long Slot (20 μSec)	
Maximum number of consecutive 802.11 retries	P_{RETR}	14	
Distance between sender and receptor	P_{DIST}	2 m (= 6.562 ft)	
Propagation environment	P_{ENV}	Anechoic room	Free space (Friis model)

Figure 43 - Configuration du scénario dans les deux environnements

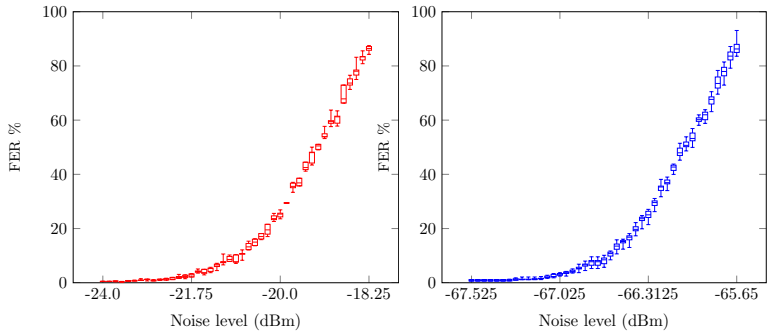


Figure 44 -Mesure du FER (a)expérimentation - (b) simulation

On observe deux courbes similaires avec un net décalage des valeurs en abscisse. Cette différence provient des différences de configuration entre le monde réel et simulé et en particulier de l'atténuation du bruit lui-même. Afin de comparer ces traces, un appairage doit être réalisé. Pour cela les traces obtenues dans chacun des mondes seront appariées en fonction de leur FER moyen. En effet chaque point correspond à une trace de plusieurs centaines de trames échangées quand un bruit donné est injecté. Une deuxième vérification est réalisée entre ces traces afin de vérifier si les modèles de perte correspondent. Malgré des taux de perte moyen similaires, des motifs de pertes totalement différents peuvent mener à des scénarios complètement différents. L'algorithme BEB (Binary Exponential Backoff) va se comporter différemment en cas de pertes sporadiques ou par burst et influencer différemment les échanges. Pour cela, une validation supplémentaire par comparaison des coefficients d'un modèle Gilbert-Eliott (Figure 45) permet de vérifier que ces traces sont aussi similaires en termes de répartition des pertes.

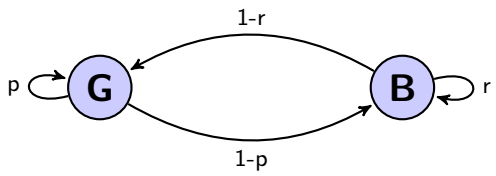


Figure 45 -Modèle de Gilbert-Eliott

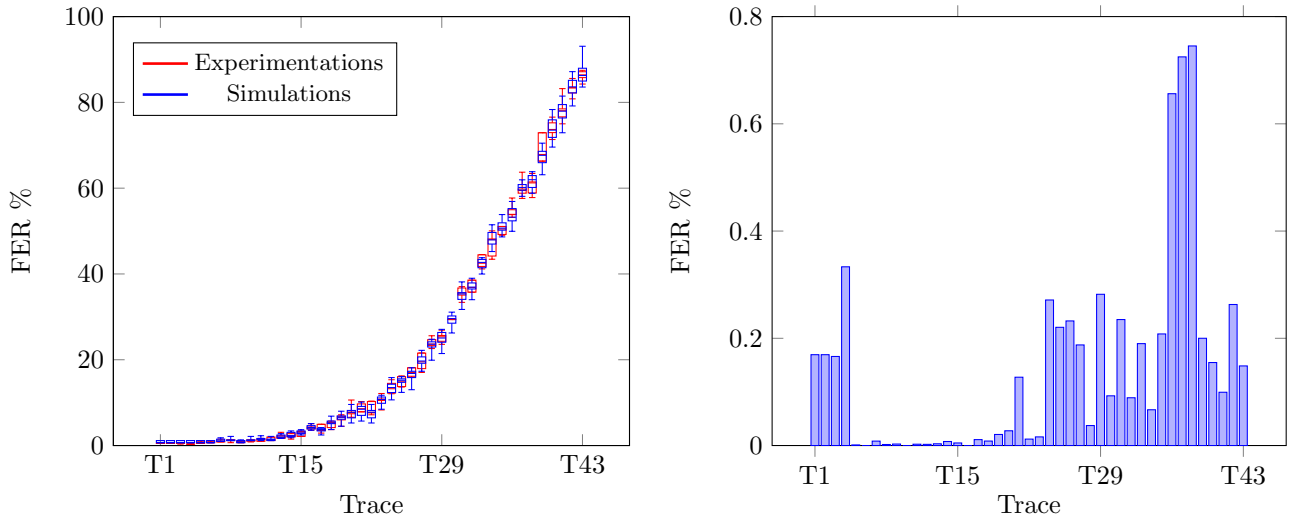


Figure 46 -Traces de FER appariées

La Figure 46 montre les deux traces appariées et une différence du FER moyen inférieur à 1%, ce qui pour cette métrique montre une bonne adéquation entre le modèle et l'expérimentation. Cela ne signifie pas pour

autant que cela est vrai pour l'ensemble des métriques mesurées. Pour cette même expérience, la Figure 47 montre une différence sur une autre métrique qui est le débit reçu (malgré un FER comparable). Cela indique donc un défaut du modèle de simulation qu'il faut rechercher.

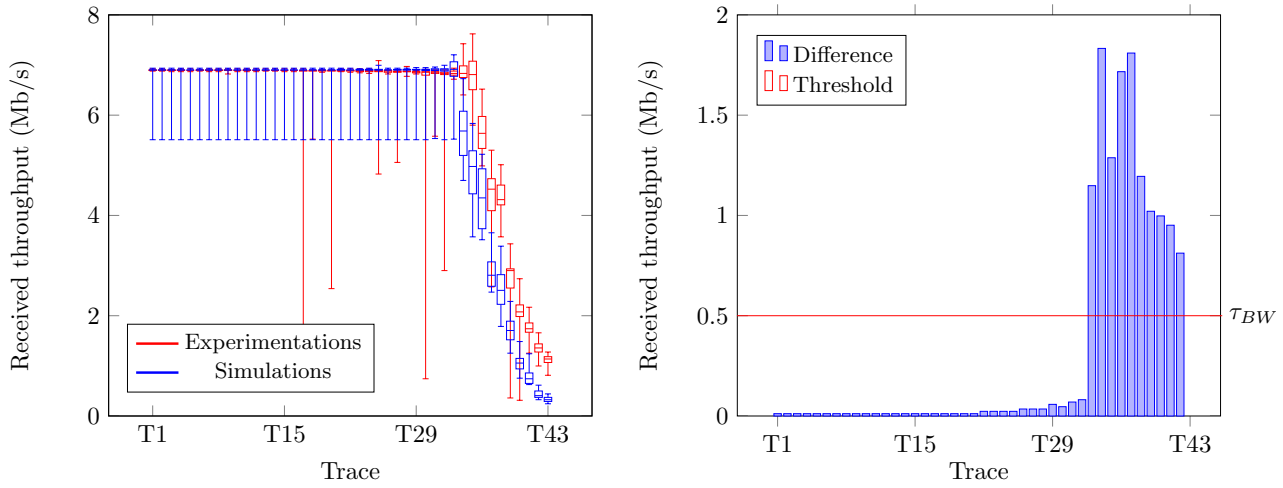


Figure 47 -Mesure du débit reçu

Pour cela un modèle logique RCA (Root Cause Analysis) [Sie05] conçu pour retrouver les causes originelles d'un évènement détecté dans un système de mesure a été développé et utilisé. L'idée générale consiste à établir un arbre logique de symptômes issus des valeurs de métriques et d'en associer les causes. Si pour une métrique particulière une différence existe (valeur de seuil à déterminer), cela peut être dû à une cause bien identifiée, ou être lié à d'autres symptômes qui de même seront liés à d'autres causes possibles, etc. Ainsi, par évaluation de l'arbre logique, il est possible de déterminer automatiquement la cause du problème.

Dans [KRE17] a été conçu un arbre de cause dédié à la recherche d'anomalies dans les traces de notre environnement. La Figure 48, sans rentrer dans les détails, montre qu'une différence de débit IP (nœud S1, métrique *BandWidth*) peut être due à une différence de configuration du générateur de trafic UDP (cause C1) ou être reliée à deux autres symptômes : une différence du nombre de paquets UDP reçus (S1, *métrique Packet Error Rate*) ou de paquets UDP non émis (S2, métrique *Drop*).

L'application de cet arbre à l'anomalie détectée, nous a permis de mettre en évidence une différence dans l'implémentation du modèle de BEB de NS-3 où les valeurs de configuration initiales sont différentes de la version théorique.

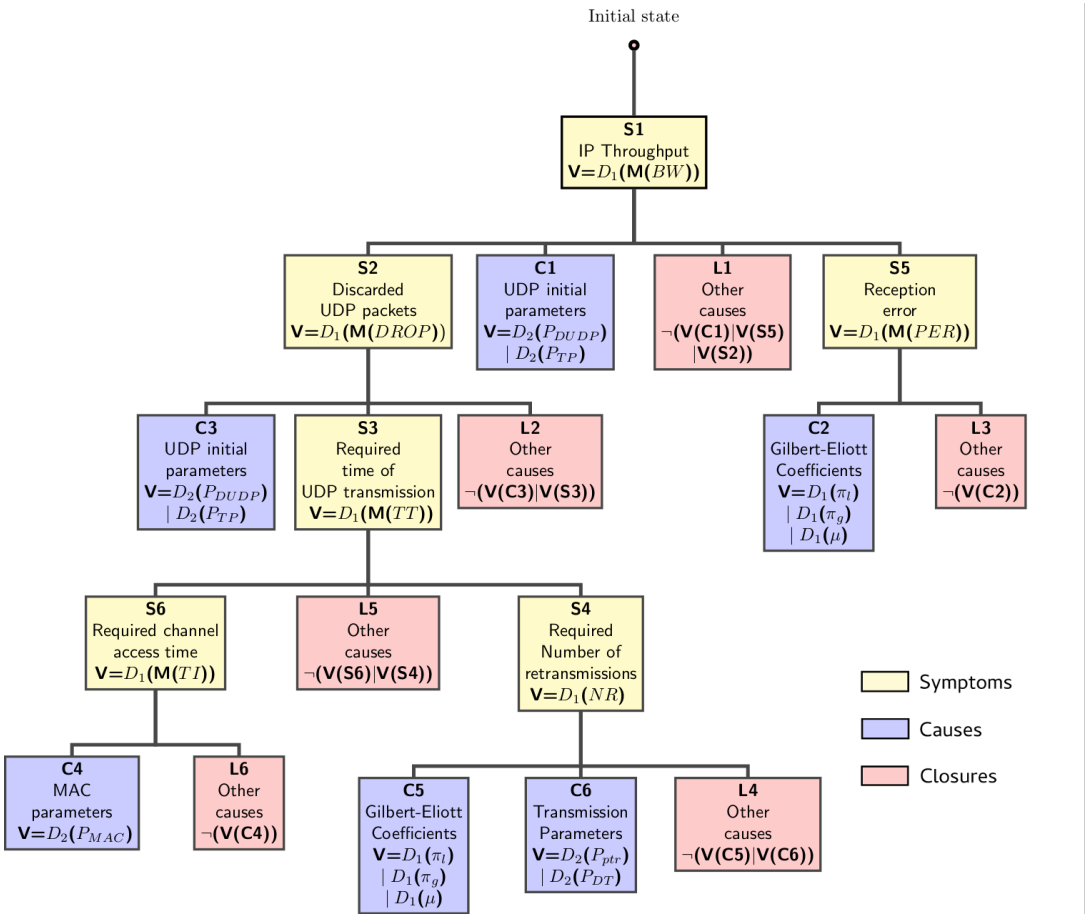


Figure 48 -Arbre de causes pour la comparaison de traces WiFi

Cette approche a prouvé son efficacité sur un réseau WiFi et est tout à fait adaptable à d'autres types de réseaux afin d'améliorer la qualité des modèles. Les arbres RCA sont efficaces pour ce type de problème mais doivent être construits et calibrés. Une approche plus automatisée est une piste d'extension de ces travaux, pour la calibration par exemple. Une station de base 4G émulée par le logiciel OpenAirInterface [Nik14] est aujourd'hui installée dans la chambre anéchoïque pour la poursuite de ces travaux.

3.2. PREDICTION DANS LES RESEAUX SANS FIL

Les travaux menés sur l'utilisation d'antennes agiles, où nous avons cherché à optimiser le système de communication afin qu'il réagisse à des évènements externes comme une perturbation ou la mobilité d'un nœud, se sont confrontés à la limite du temps d'adaptation du système. En effet, un changement de fréquence, une commutation d'antenne ou un renforcement du codage n'est pas immédiat et peut-être contreproductif si le système subit une perturbation qui n'est que de très courte durée. Il serait donc

intéressant de prédire l'état futur du système de communication afin d'anticiper une adaptation, voire de choisir de conserver les paramètres actuels, même sur une courte durée (quelques secondes).

Fort de l'expérience acquise avec la plateforme de métrologie de réseaux sans fil et des mesures dont nous disposions, nous avons cherché à savoir s'il était possible de réaliser cette prédiction. Dans cette optique, l'application de méthodes d'apprentissage pour l'estimation de la qualité de service à partir de mesures effectuées sur le nœud récepteur a été proposé.

Ces travaux sont originaux, car ils visent à prédire la capacité du réseau en utilisant des métriques disponibles à différents niveaux du système de communication et à l'aide d'une méthode d'apprentissage. La majorité des travaux de caractérisation comme [Zha03, Wat10] utilisant des méthodes statistiques ne mettent pas en œuvre le principe d'apprentissage. [Dan11, War07] proposent l'utilisation de machine learning mais uniquement sur la couche physique pour la prédiction de l'occupation du spectre et [Wan07] utilise principalement des informations de niveau MAC.

3.2.1. Approche

Notre approche a consisté à comparer les performances de trois algorithmes fréquemment rencontrés dans la littérature pour la prédiction du débit IP en fonction des mesures issues de la couche physique : la régression par support vecteur SVR [Bas07], la méthode des plus proches voisins k-nn [Alt92] et les arbres de décision DT [Bre84]. Les données utilisées sont produites à partir du banc de test, sur un lien TCP dont la réception est perturbée par du bruit généré. Pour effectuer les estimations, les différentes métriques de niveau physique sont extraites des données enregistrées sur le nœud récepteur et sur l'oscilloscope et sont le RSS (Received Signal Strength) , le SNR (Signal to Noise Ratio) et le bruit.

Afin d'évaluer l'efficacité des différents algorithmes, leurs performances respectives sont comparées selon différents critères. Le premier est la précision des estimations, il est mesuré selon deux méthodes : l'erreur quadratique moyenne (MSE) et le pourcentage de bonnes estimations. Le deuxième critère est l'efficacité des algorithmes en termes de calcul, évalué par le ratio temps/précision. Enfin, le troisième critère est l'efficacité mémoire caractérisée par le ratio taille du modèle/précision.

Différents échantillons de données sont assemblés en faisant varier l'amplitude du bruit généré (dBm) et la puissance d'émission (dBm). Le débit IP est calculé à partir des traces de capture PCAP et représente l'ensemble des paquets reçus sans erreur (Mbps). Ces échantillons constituent les ensembles d'apprentissage. Trois jeux d'apprentissage de tailles différentes sont ainsi constitués : le *Dataset1* contient toutes les mesures du jeu d'apprentissage, le *Dataset2* en contient 50% tandis que le Dataset3 possède

seulement 25% des données. Un jeu de test (*Dataset4*) est constitué en utilisant les mêmes paramètres d'amplitude du bruit et de puissance d'émission, à partir d'une deuxième série d'échantillons.

La calibration des algorithmes est une tâche complexe pour un domaine non connu comme la prédiction de qualité de service d'un réseau. L'algorithme SVR a été configuré avec une méthode empirique appelée aussi méthode par quadrillage. L'algorithme k-NN a été quant à lui paramétré par des valeurs recommandées dans [Alt92].

3.2.2. Résultats

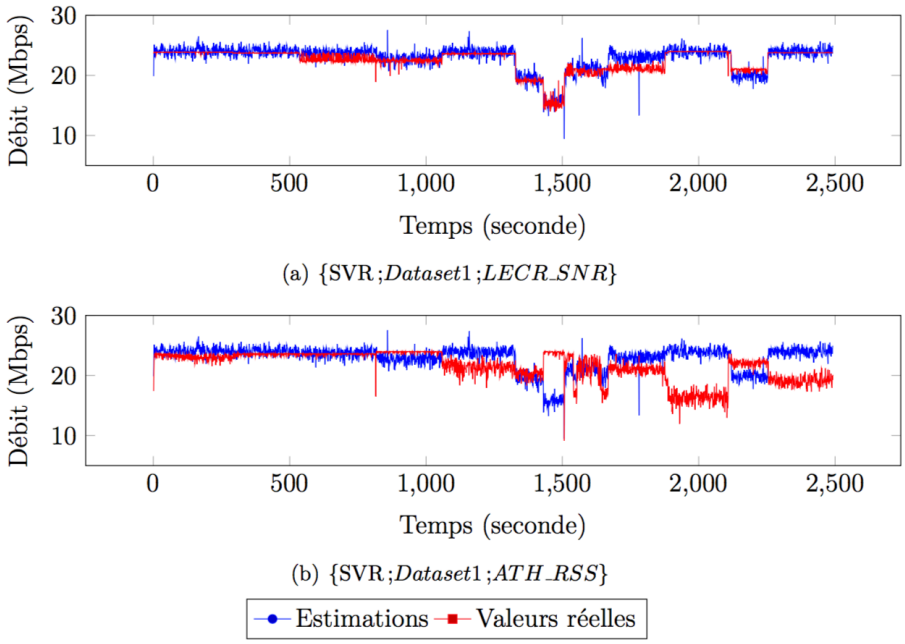


Figure 49 - Exemple d'estimation obtenues avec SVR pour les métriques SNR et RSS

La Figure 49 présente les résultats obtenus avec le set de données le plus complet pour la méthode SVR. Elle compare l'estimation obtenue à partir de deux métriques : le RSS et le SNR. Sans surprise, une métrique combinant une mesure du signal et du bruit comme le SNR donne de meilleurs résultats qu'une mesure de niveau de signal seule. En revanche, la capacité de l'algorithme à prédire le débit IP est remarquable.

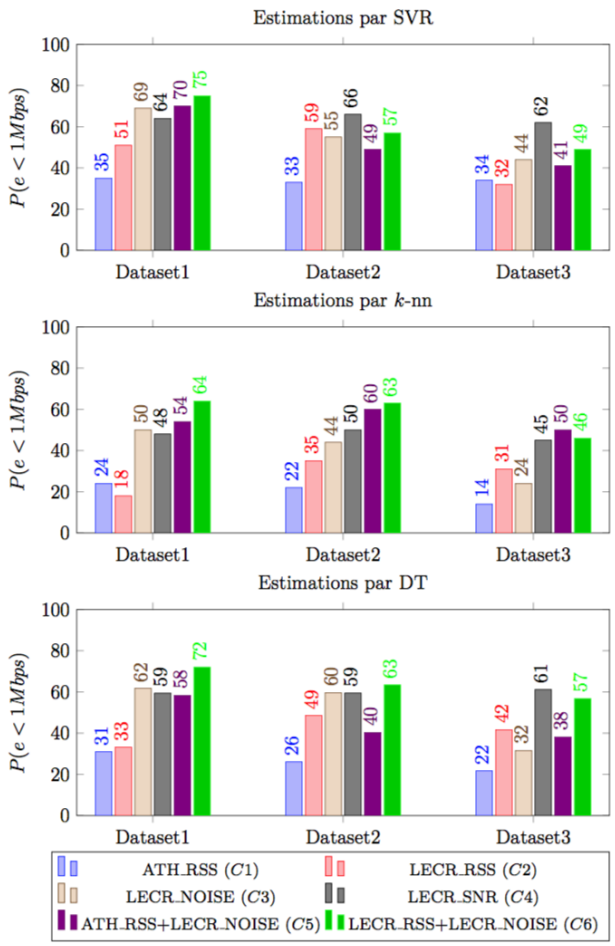


Figure 50 - Précision moyenne des estimations en fonction des algorithmes

La précision de prédiction des algorithmes est comparée dans la Figure 50. Le critère de comparaison est un pourcentage d'erreur par rapport à un seuil de 1 Mbps, ce qui représente environ une marge inférieure à 3% d'erreur. Cette figure montre, entre autres, la performance des différents algorithmes face à une réduction du niveau d'apprentissage (de 100% des situations rencontrées et apprises dans le *DataSet1* à 25% dans le *DataSet3*).

Plusieurs conclusions peuvent être tirées des résultats obtenus et présentés en détails dans [Kre14, Kre16]:

• Les différents algorithmes présentent de très bons résultats d'estimation. Les meilleurs résultats sont obtenus par les algorithmes SVR et DT peu importe la métrique de performance utilisée. L'algorithme k-NN semble avoir des performances plus aléatoires, surement à cause de la simplicité de son processus d'apprentissage et d'estimation. SVR et DT supportent aisément la diminution du jeu d'apprentissage et obtiennent des scores élevés : jusqu'à 60% de bonnes estimations avec le jeu le moins complet.

• Les meilleurs résultats sont obtenus avec les caractéristiques composées de deux métriques (RSS + bruit) et le SNR qui est une mesure intégrant ces deux facteurs.

• Le temps d'apprentissage de SVR est long comparé à ceux de k-NN et DT. Des résultats similaires sont atteints avec k-NN. Les délais d'estimation les plus courts sont atteints pour DT qui produit une estimation dans des délais inférieurs à la ms. Le plus long processus d'apprentissage n'offre pas à SVR une efficacité décisive sur DT.

• En termes de mémoire SVR et k-NN sont les meilleurs candidats quel que soit le jeu d'apprentissage. L'algorithme DT a en revanche de mauvaises performances avec un facteur multiplicatif proche de 20.

Ces résultats nous permettent d'affirmer qu'il est possible d'estimer le débit IP d'un lien sans-fil à partir de caractéristiques de niveau physique dans les conditions testées. L'algorithme d'apprentissage utilisé a son importance, néanmoins les résultats démontrent qu'il n'est pas forcément nécessaire d'utiliser des algorithmes complexes au temps de calcul important, comme c'est le cas pour SVR, si une caractéristique adaptée est utilisée.

Ces travaux ont montré la capacité à prédire une qualité de service pour l'utilisateur avec des métriques de bas niveau, facilement mesurables, y compris sur des systèmes mobiles où embarqués (SNR par exemple). De nombreux travaux sont néanmoins encore nécessaire pour valider ces approches dans un contexte mobile, où la calibration des algorithmes devrait être automatique et les protocoles testés multiples (WiFi, 2/3/4/5G, etc …).

4. Supervision des réseaux sans fil

Dans un réseau, les caractéristiques physiques (niveau de bruit, signal, etc.) ou la qualité de service peuvent être obtenues localement par la mesure sur un nœud donné. Elles peuvent être anticipées par les méthodes de prédiction temporelles abordées précédemment. Mais elles doivent aussi être déduites par les estimations obtenues du voisinage. En effet, un nœud peut décider localement que les caractéristiques de communication sont bonnes alors que le réseau peut au même moment souffrir de congestion et impacter

négativement la communication. Ainsi, les nœuds du réseau possèdent tous un ensemble d'informations qui peut contribuer à caractériser le réseau dans son ensemble et permettre l'adaptation des nœuds de communication plus pertinemment et de manière complémentaire à celle reposant uniquement sur des informations locales. En plus d'une approche temporelle de caractérisation du système de communication, une approche spatiale doit être réalisée.

Pour cela, des travaux menés par [CAR15] ont permis le développement d'une architecture pour la mesure distribuée des réseaux de communication. Son principe repose sur l'utilisation et l'exploitation de l'information fournie sur la qualité du réseau par un maximum de sources. Dans un contexte IoT, ceci se traduirait, par exemple, par la participation des objets communicants, dont les ressources peuvent être très différentes et les informations très variées, à la mesure du niveau de bruit électromagnétique sur une zone donnée. Face à cette complexité, la démarche suivie a été de décomposer le problème en différentes tâches qui sont : l'acquisition d'une mesure ou d'un contexte, sa représentation, son partage, et son analyse. L'acquisition ayant été approfondie dans les précédents travaux, les contributions se sont focalisées sur les trois derniers points. L'architecture élaborée est présentée dans la Figure 51. Un bloc synchronisation, non détaillé car comparable aux solutions abordées en début de chapitre est ici aussi nécessaire afin de dater les évènements et les caractéristiques du réseau.

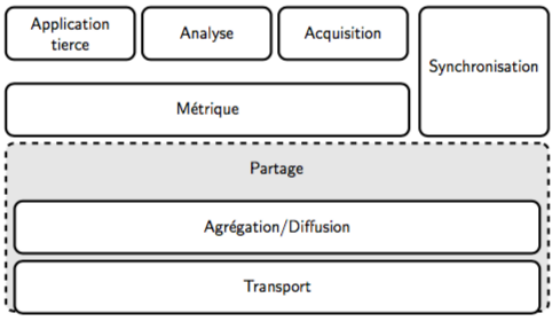


Figure 51 - Architecture de supervision dans un nœud

4.1. METRIQUE

L'optique première de ces travaux était de calculer et partager une métrique de l'état de satisfaction des utilisateurs sur un réseau afin de planifier une éventuelle adaptation. Il existe de nombreux travaux sur la supervision et la métrologie des réseaux qui offrent des méthodes de mesures plus ou moins complexes et intrusives. Nous souhaitions quelque chose d'extrêmement simple, capable d'être implanté dans les nœuds les moins puissants. Ces derniers étant sur le terrain, les informations qu'ils peuvent mesurer (niveau de bruit, etc.) sont pertinentes.

Afin de limiter le stockage d'informations plus ou moins pertinentes, l'idée a été de partager une valeur moyenne calculée sur un index de satisfaction des nœuds du réseau. Cet index peut être calculé, par exemple, par un ratio paquets transmis et reçus correctement sur l'ensemble des paquets manipulés, comme présenté dans l'Équation 11 et utilisé dans les résultats de simulation.

$$sat = \frac{sent + fwd}{sent + fwd + dropped}$$

Équation 11 - Index de satisfaction

L'intérêt de cette approche, outre son extrême simplicité est de ne mobiliser que peu de ressources de calcul et de stockage, chaque nœud étant responsable du calcul de son propre index, de sa diffusion et de l'estimation de la valeur moyenne. Le calcul de la moyenne par un algorithme distribué de type FODAC (First Order Dynamic Average Consensus) a été utilisé et présenté au paragraphe suivant.

Bien sûr, une valeur moyenne seule peut ne pas être représentative et il peut être intéressant de partager une information plus complexe. En suivant le même principe de diffusion et de calcul, ces informations ont été étendues à des distributions, puis à des ensembles de distributions. Bien évidemment les coûts de calcul, de mémorisation et de transmission sont supérieurs.

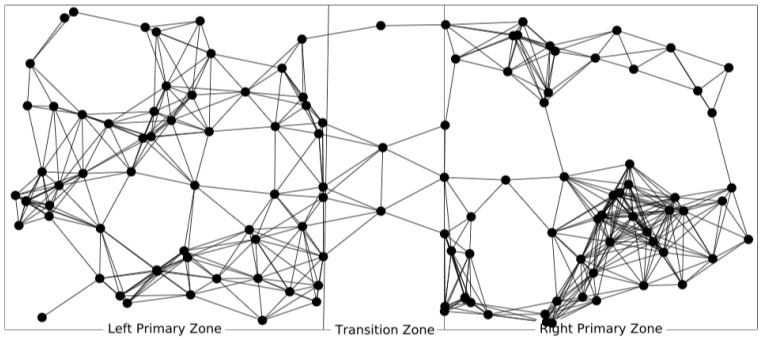


Figure 52 - Réseau adhoc considéré (état initial)

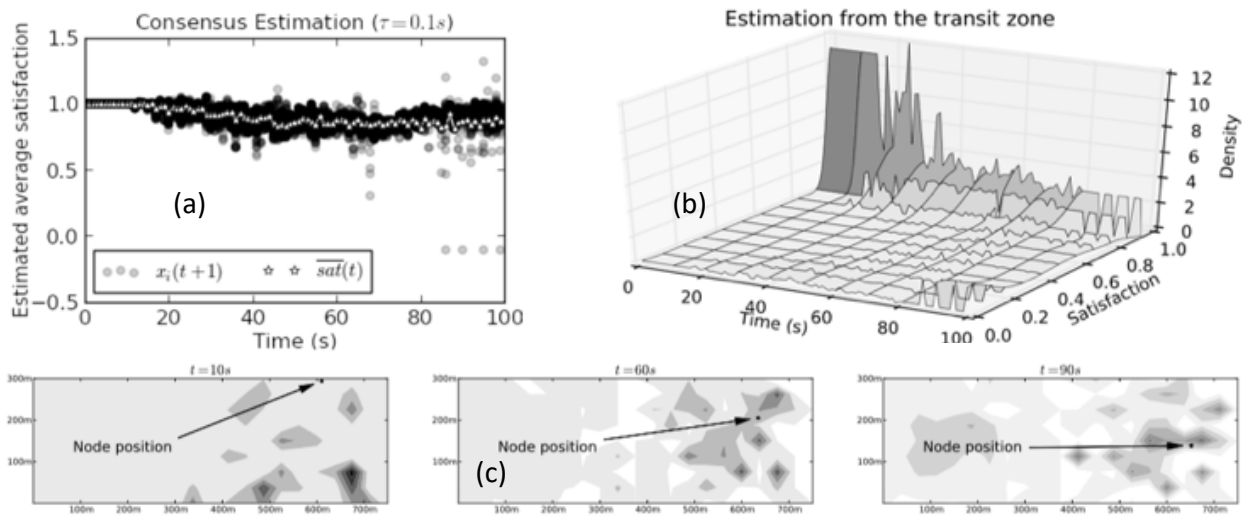


Figure 53 - Type de statistiques partagées (a) moyenne, (b) distribution, (c) densité

Les Figure 52 et Figure 53 donne un exemple qui a été obtenu par simulation d'un réseau adhoc mobile, où la connexité du réseau sera rompue dans les 20 dernières secondes de simulation. La courbe (a) donne la valeur moyenne de l'index de satisfaction (Équation 11) exacte ainsi que les valeurs estimées par chacun des nœuds, avec une granularité d'échange de 10Hz. Les points excentrés de la moyenne à partir de *t+80* correspondent aux estimations des nœuds qui se trouvent isolés. La courbe (b) donne l'évolution pour un nœud de la distribution de l'index de satisfaction. On retrouve les estimations des nœuds isolés de la même manière. Les courbes (c) montrent l'évolution de l'estimation de la densité géographique au cours du temps pour un nœud situé dans la partie droite du réseau. On observe sa découverte de la topologie au fil des échanges.

4.2. PARTAGE

Un système de mesure distribué repose sur la distribution efficace de l'information. Il existe pour cela, différentes techniques issues des domaines de l'algorithmique ou encore du contrôle distribué et qui ont été notamment développées pour le monitoring réseau ou la fusion de données dans les réseaux de capteurs. Nos travaux ont porté sur la définition d'un cadre algébrique permettant de formaliser et de comparer diverses techniques de supervision et de mesure distribuées [CAR14]. Nous avons modélisé une opération de mesure distribuée par une fonction $f : In \rightarrow In$ qui pour chaque nœud i du réseau fournit une image $f_i(x)$ dépendant de la totalité du vecteur de mesure. Nous nous sommes consacrés aux cas ou f est linéaire, qui peuvent être traités comme un produit de matrices pour lesquelles chaque coefficient représente un échange sur le réseau.

Dans le cas de topologies fixes, il a été montré la supériorité des approches de type arbre de communication pour qu'un ensemble de nœuds partagent une information et arrivent à un consensus sur sa valeur. Un superviseur, ou plusieurs, interrogent périodiquement les nœuds pour centraliser les valeurs et calculer une valeur exacte. Les topologies rencontrées dans les réseaux sans fil étant dynamiques et les méthodes de calcul exact étant complexes, nous avons opté pour l'utilisation d'un calcul de type consensus (FODAC) pour lequel nous avons proposé un heuristique permettant la propagation plus rapide d'une moyenne de valeurs.

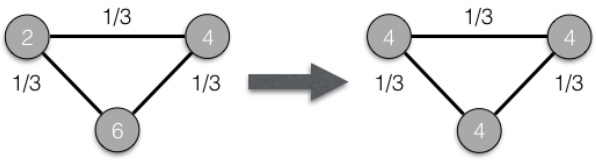


Figure 54 - Exemple simple de calcul de la moyenne

Dans le cas d'un consensus linéaire synchrone, un nœud met à jour sa valeur en utilisant une moyenne pondérée des valeurs de ses voisins. Les nœuds vont simultanément prendre en compte l'ensemble de leurs voisins. Toute la difficulté est de définir une politique de pondération permettant de converger rapidement vers la moyenne. La Figure 54 illustre sur une topologie simple, l'évolution du calcul de la moyenne en deux itérations avec les pondérations données. Il existe des heuristiques définies dans la littérature, dont les propriétés sont connues et dont le taux de convergence (appelé pouvoir de contraction) peut varier. Le Tableau 4 compare ces heuristiques en fonction du degré de connaissance de la topologie nécessaire à leur établissement, du plus contraignant en haut au moins contraignant.

Heuristique	Hypothèse sur la connaissance d'un nœud
BCW (Best Constant Weight)	Topologie connue
MDW (Maximum Degree Weight)	Degré maximum connu
NW (Neighbor Weight)	Voisins de rang 2 connus
MW (Metropolis Weight)	Voisins de rangs 1 connus
SOS* (Star Optimal Symmetric)	Voisins de rangs 1 connus (notre heuristique)

Tableau 4 - Comparaison des heuristiques

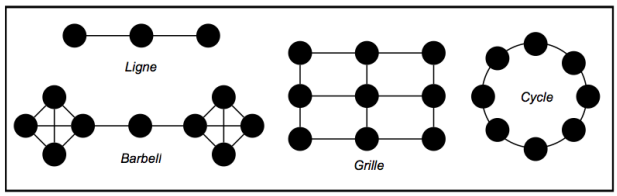
L'Équation 12 présente l'heuristique qui a été proposée et adaptée de l'heuristique Metropolis. Celle-ci a été modifiée afin de lui éviter le problème appelé paradoxe de l'étoile qui ne donne pas assez de poids à un

nœud central. Il a été nommé SOS (Star Optimal Symmetric). Comme on peut le remarquer, cette heuristique, comme MW, ne nécessite qu'une connaissance de la topologie limitée aux voisins directs.

$$w_{ij} = \begin{cases} \frac{2}{1+d_i+d_j} & \forall j \in V(i) \\ 1 - \sum_{j \neq i} w_{ij} & \text{si } i = j \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$$

Équation 12 – Définition des pondérations pour la politique SOS

Cette heuristique a été testée comparativement aux quatre autres heuristiques (MW, MDW, NW, BCW) pour des topologies fixes et pour 4 types de graphes aléatoires représentatifs de topologies réseau variées.



	1er	2ème	3ème	4ème	5ème
Étoile	SOS	BCW	MDW	NW	MW
Barbell	SOS	NW	MW	BCW	MDW
Ligne	MDW	BCW	NW	SOS	MW
Grille	NW	BCW	MDW	SOS	MW
Cycle	BCW	SOS	MW		
COUT	SOS	MW	NW	MDW	BCW

Figure 55 - Comparaison des performances (graphes déterministes)

La Figure 55 montre la supériorité de SOS sur MW dans tous les cas, et malgré une plus faible connaissance de la topologie, des résultats parfois meilleurs que les 3 autres heuristiques. Pour les topologies aléatoires dont certaines formes sont représentées Figure 56, le Tableau 5 montre le gain moyen de l'heuristique avec ses références, sur l'ensemble des tests réalisés (4 modèles, 6 tailles et 100 graphes par taille et modèle).

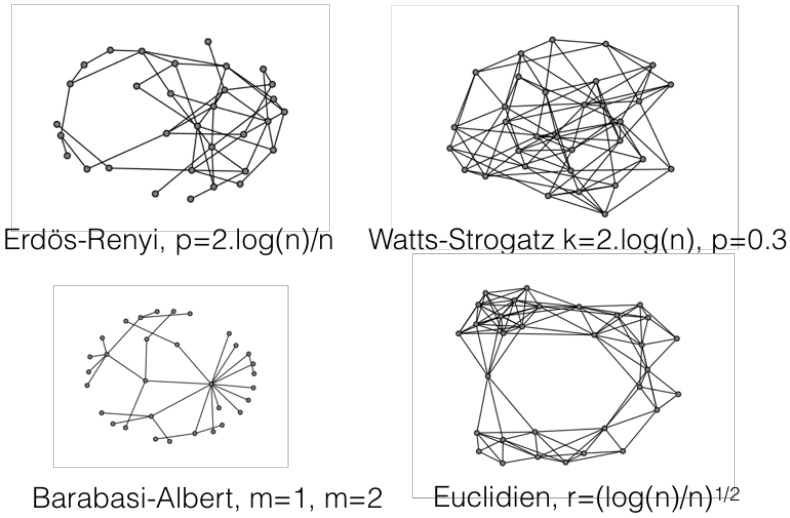


Figure 56 - Topologies aléatoires

Heuristique	MW	MDW	NW	BCW
% Cas favorables	100	100	99.7	52.2
Gain(*) moyen	0.25	0.48	0.18	0.09

Tableau 5 - Gains sur topologies aléatoires

Dans la quasi-totalité des cas que nous avons testés, la politique SOS montre un pouvoir de contraction supérieur à celui des politiques MW, NW et MDW. Dans le cas d'une topologie dynamique, à chaque itération une matrice SOS offre des propriétés supérieures à celles de ses concurrentes, menant plus rapidement vers un vecteur de consensus pour des conditions identiques de connectivité dans le temps et ceci avec moins de connaissances à priori sur la topologie du réseau.

4.3. ANALYSE

Afin de mettre en relation la valeur de cet index de satisfaction moyen et un ensemble de métriques plus classiques (taux de paquets reçus, taux d'erreurs, etc.), une méthode d'analyse a été développée [CAR13]. Cette méthode se base sur la construction de séries temporelles en agrégeant les observations par propriété et exploite la distance entre séries temporelles afin de permettre aux éléments du système de déterminer les faits paraissant les plus liés à la performance globale. Ces analyses nous ont permis, par exemple, de montrer, que des erreurs subies dans le cas particulier d'un réseau adhoc simulé, n'étaient pas dues, comme nous le pensions de prime abord à des erreurs de transmission (liées à la couche physique), mais à des erreurs de routage dans le réseau.

5. Conclusion générale du chapitre

Ce chapitre est une sélection des principales contributions qui ont été développées durant 3 thèses et 16 stages. De nombreux travaux, principalement ceux qui avaient pour objectif le développement de plateformes expérimentales, n'ont pas été cités explicitement, mais ont souvent contribué la réalisation des expérimentations qui ont permis de valider les propositions de ce chapitre.

Les contributions présentées sont multiples, mais suivent une ligne directrice qui est la motivation de nos recherches : l'amélioration de la qualité de service dans les réseaux sans fil. Pour cela, un des critères originaux est de toujours considérer le rôle des couches basses. Bien sûr des abstractions doivent être faites afin de diminuer la complexité des systèmes considérés, mais nous pensons néanmoins que ces couches doivent être toujours présentes dans les modèles au risque de résultats irréalistes sinon. L'autre critère consiste à mettre en place des expérimentations réelles sur des plateformes ou des bancs de test afin de s'approcher de la réalité et paramétrer et valider nos modèles. Cet effort conséquent en termes de ressources matérielles et humaines est d'une part une source d'amélioration des modèles, mais aussi d'autre part un moyen de communication vis-à-vis des partenaires industriels et académiques, et à terme, une voie pour développer de nouvelles collaborations.

L'apparition de nouvelles technologies de communication apporte aussi de nouveaux challenges. Si au début de nos travaux sur les réseaux de capteurs, les réseaux multi-sauts sans fil paraissaient être la solution d'avenir incontournable, ce sont finalement des réseaux tolérants au délai qui ont succédé car il était difficile de maintenir en permanence la connectivité. Aujourd'hui, l'approche émergente est beaucoup plus pragmatique en allongeant la portée de communication avec des techniques LPWAN (Low Power Wide Area Network) ou en s'appuyant sur un réseau d'infrastructure déjà déployé NB-IoT ou 5G. Les approches et l'expérience que nous avons développées restent utiles car les problématiques sont nombreuses. Nous nous intéressons aujourd'hui à poursuivre les travaux sur le WiFi avec des réseaux LTE et leurs successeurs. La chambre anéchoïque est aujourd'hui équipée d'une station de base logicielle et du système de mesure précédemment développé. Des travaux sont aussi en cours sur les technologies LPWAN et en particulier sur la technologie LoRa pour laquelle nous étudions de nouveaux modes de fonctionnement permettant d'améliorer la qualité de service des nœuds.

[Alt92] N. S. Altman. « An introduction to kernel and nearest-neighbor nonparametric regression. », The American Statistician, 46(3) :pp. 175–185, 1992.

[Bas07] D. Basak, S. Pal, and D. C. Patranabis. « Support Vector Regression. », Neural Information Processing – Letters and Reviews, 11, October 2007.

[Bre84] L. Breiman. « Classification and regression trees. », The Wadsworth and Brooks-Cole statistics-probability series. Chapman & Hall, 1984.

[CHO02] R. R. Choudhury, X. Yang, R. Ramanathan, and N. H. Vaidya. 2002. « Using directional antennas for medium access control in ad hoc networks. », In Proceedings of the 8th annual international conference on Mobile computing and networking (MobiCom '02) , Atlanta, GA, Feb. 2002, 59-70.

[CHO04] Choudhury, R.R.; Vaidya, N.F., « Deafness: a MAC problem in ad hoc networks when using directional antennas », in Network Protocols, 2004. ICNP 2004. Proceedings of the 12th IEEE International Conference on , vol., no., pp.283-292, 5-8 Oct. 2004.

[Cho09] H. Cho, J. Jung, B. Cho, Y. Jin, S.-W. Lee and Y. Baek, « Precision time synchronization using IEEE 1588 for wireless sensor networks », International Conference on Computational Science and Engineering, Vol. 2, pp. 579-586, 2009.

[Dan11] Robert C. Daniels. Thèse: « Machine Learning for Link Adaptation in Wireless Networks. », 2011.

[Els02] J. Elson, L. Girod and D. Estrin, « Fine-grained network time synchronization using reference broadcasts », Proc. Fifth Symp. Operating Systèmes Design and Implementation (OSDI ’02), Vol. 36, pp. 147 – 163, 2002.

[KOR03] T. Korakis, G. Jakllari, and L. Tassiulas. 2003. « A MAC protocol for full exploitation of directional antennas in ad-hoc wireless networks. », In Proceedings of the 4th ACM international symposium on Mobile ad hoc networking & computing (MobiHoc '03). ACM, 98-107.

[Hu03] A. Hu and S.D. Servetto, « Algorithmic aspects of the time synchronization problem in large-scale sensor networks, » ACM/Kluwer J. Mobile Networks and Applications, special issue on wireless sensor networks, Vol. 10, pp. 491 – 503, 2003.

[Kot03] D. Kotz, C. Newport, and Chip Elliott, « The mistaken axioms of wireless-network research », Dartmouth College Computer Science Technical Report TR2003 -467. July 18, 2003.

[Lac06] M. Lacage and T. R. Henderson. « Yet another network simulator », In Proceeding from the 2006 Workshop on Ns-2 : The IP Network Simulator, WNS2 ’06, Pisa, Italy, 2006.

[Mar04a] M. Maroti, B. Kusy, G. Simon and A. Ledeczi, « The flooding time synchronization protocol », Second ACM Conf. Embedded Networked Sensor Systems (SenSys ’04), pp. 39-49, 2004.

[Mar04b] M. Maroti, B. Kusy, G. Simon and Á. Lédeczi, « Robust multi-hop time synchronization in sensor networks », International Conference on Wireless Networks, pp. 454-460, 2004.

[Nik14] N. Nikaein, M. K. Marina, S. Manickam, A. Dawson, R. Knopp, and C. Bonnet. 2014. « OpenAirInterface: A Flexible Platform for 5G Research ». SIGCOMM Comput Commun. Rev. 44, 5 (October 2014).

[Noh08] K.-L. Noh, E. Serpedin and K. Qaraqe, « A new approach for time synchronization in wireless sensor networks: Pairwise Broadcast Synchronization », IEEE Transaction on Wireless Communication, Vol. 7, no. 9, pp. 3318-3322, 2008.

[RAM05] Ramanathan, Ram; Redi, J.; Santivanez, Cesar; Wiggins, D.; Polit, S., « Ad hoc networking with directional antennas: a complete system solution », in Selected Areas in Communications, IEEE Journal on , vol.23, no.3, pp.496-506, March 2005.

[Sie05] M. Siekkinen, G. Urvoy-Keller, E. W. Biersack, and T. En-Najjary. « Root cause analysis for long-lived tcp connections ». In Proceedings of the 2005 ACM Conference on Emerging Network Experiment and Technology, CoNEXT ’05, pages 200–210, Heidelberg, Germany, 2005.

[TAK02] M. Takai, J. Martin, R. Bagrodia, and A. Ren. 2002. « Directional virtual carrier sensing for directional antennas in mobile ad hoc networks. », In Proceedings of the 3rd ACM international symposium on Mobile ad hoc networking & computing (MobiHoc '02). ACM, Lausanne, Switzerland, 183-193.

[Wan07] Y. Wang, M. Martonosi, and L. Peh. « Predicting link quality using supervised learning in wireless sensor networks. » SIGMOBILE Mob. Comput. Commun. Rev., 11(3) :71–83, July 2007.

[War07] T. Warren Rondeau. Thèse: « Application of Artificial Intelligence to Wireless Communications. », 2007, September 20, 2007, Blacksburg, Virginia

[Wat10] T. Watteyne, S. Lanzisera, A. Mehta, and K.S.J. Pister. « Mitigating multi- path fading through channel hopping in wireless sensor networks. », In Communications (ICC), 2010 IEEE International Conference on, pages 1–5, 2010.

[Zha03] J. Zhao and R. Govindan. « Understanding packet delivery performance in dense wireless sensor networks. » In Proceedings of the 1st International Conference on Embedded Networked Sensor Systems, SenSys ’03, pages 1–13, Los Angeles, USA, 2003.

Chapitre 3

PERSPECTIVES ET CONCLUSION

1. Introduction

Depuis quelques années s'est enclenchée une tendance de transformation de fond des réseaux de communication par le remplacement des matériels par des éléments logiciels. On parle de « softwarization » des réseaux, que l'on peut traduire par une dématérialisation des réseaux. Les motivations qui poussent cette transformation sont multiples, principalement financières, avec une réduction attendue des coûts d'investissement (CAPEX) et des coûts d'exploitation (OPEX), le logiciel étant facilement évolutif contrairement au matériel qui doit être remplacé à chaque évolution du réseau. Il est de plus maintenable à distance et de manière centralisée, réduisant ainsi les coûts de personnel. L'autre motivation est technique, car le logiciel est versatile et rend le réseau beaucoup plus agile et adaptable aux besoins des utilisateurs et de l'exploitant. S'ouvre ainsi de très nombreuses possibilités qui seront à la base des perspectives de recherche présentées dans ce chapitre. Longtemps les volontés de déploiement automatique de services, d'adaptation du réseau aux besoins de l'utilisateur, de virtualisation des réseaux sont restées à l'état embryonnaire faute d'un cadre technologique le permettant. Aujourd'hui, poussé par l'augmentation de la puissance des processeurs, de l'apparition du cloud computing tout ceci devient possible et reste à définir. Cependant, de nombreux écueils seront aussi à éviter pour garantir le dimensionnement, la fiabilité et la sécurité des futurs réseaux de communication.

Ce chapitre décrit très succinctement les concepts à la base de cette révolution, présentera quelques architectures phares et décrira les perspectives de recherche qui en découlent.

2. Technologies facilitatrices

2.1. SDR – SOFTWARE DEFINED RADIO

La radio logicielle, ou Software Defined Radio (SDR) a été développée depuis les années 70 par l'armée américaine, mais les premiers démonstrateurs ont été rendus possibles par le développement des calculateurs DSP dans les années 90 avec le projet speakeasy [LAC95]. Son principe consiste à effectuer le maximum de traitements d'une chaine de transmission par du logiciel. Dans le sens de la réception, seule une partie matérielle subsiste pour numériser directement le signal par un convertisseur analogique-

numérique (CAN), et éventuellement pour le convertir dans une bande de fréquence inférieure avant sa numérisation. Les traitements classiques de filtrage, démodulation, décodage sont ensuite réalisés par des composants DSP, ASIC, FPGA ou microprocesseurs qui exécutent du code informatique.

L'augmentation de la puissance de traitement des processeurs a permis le développement de ces technologies, rendant possibles des traitements à haute fréquence ainsi qu'une haute adaptabilité des systèmes radio. Ainsi, par exemple, l'évolution de la norme radio utilisée dans un réseau mobile peut être envisagée à moindres coûts car n'impliquant principalement qu'une évolution de logiciel. En ajoutant des capacités supplémentaires de découverte de l'environnement radio à proximité, la configuration du système peut être automatique, en cherchant à utiliser les meilleures conditions de transmission et de réception. Ce concept a été introduit par [MIL99] sous le nom de radio cognitive.

2.2. SDN – SOFTWARE DEFINED NETWORKING

Dans un réseau classique, les fonctions de contrôle du réseau et d'acheminement des données sont effectuées au sein des équipements réseau (tels que les routeurs). Cette architecture monolithique est considérée comme un frein et des efforts ont été faits pour définir des architectures cherchant à introduire plus de flexibilité et de simplicité dans la gestion et le contrôle du réseau. La notion de "Software-Defined Networking" (SDN) [SDN12] regroupe les architectures visant à séparer l'acheminement des données et son contrôle, principalement en retirant l'intelligence des équipements réseaux matériels et en la disposant dans des composants logiciels sur des équipements dédiés.

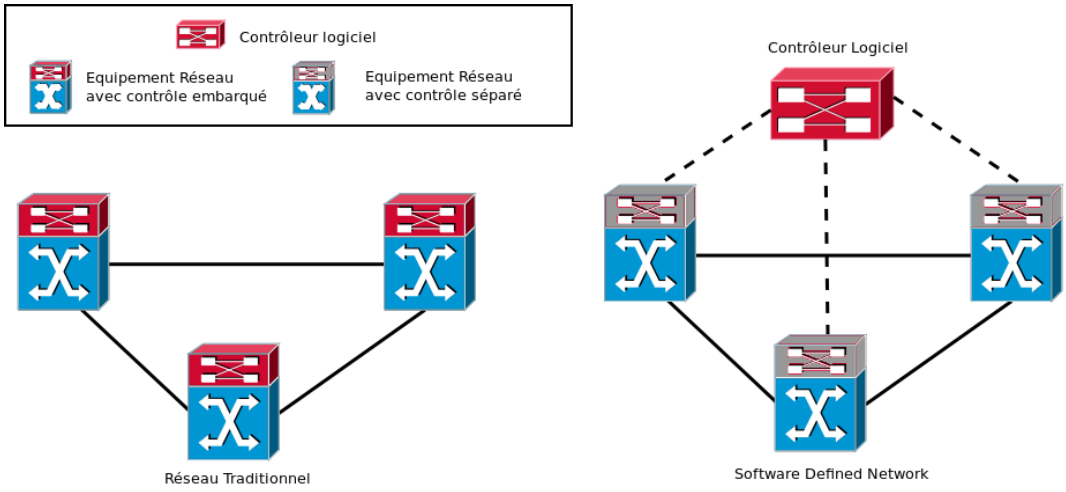


Figure 57 - Architecture réseau traditionnelle vs Software Defined

La Figure 57 illustre l'architecture SDN et la compare avec l'architecture d'un réseau classique. La séparation du plan de données du plan de contrôle permet une visualisation et une gestion plus globale du réseau. Le déploiement de nouveaux protocoles ou de nouvelles applications est alors facilité, l'intelligence du réseau étant logiquement regroupée dans une entité spécifique, appelée le contrôleur SDN. Comme on peut le voir sur la Figure 57, le contrôleur devient le point central de l'architecture SDN. La partie supérieure englobe les applications agissant sur le réseau telles que le routage, le contrôle d'accès, la gestion du réseau... L'interaction avec le contrôleur se fait via des API et les applications obtiennent ainsi une vision simplifiée du réseau sous-jacent. Le plan inférieur est composé d'éléments physiques chargés de l'acheminement des données, typiquement des commutateurs. Le contrôleur situé entre les applications et les équipements physiques peut alors, au travers de différents services, interpréter les consignes des applications et les répercuter sur le réseau. Idéalement, les interfaces Nord (Application-Contrôleur) et Sud (Contrôleur-Routeur) proposent des API ouvertes afin de permettre une meilleure interopérabilité entre les systèmes et matériels de différents constructeurs. La Figure 58 présente la vision de l'Open Networking Foundation (ONF), principal promoteur des réseaux SDN.

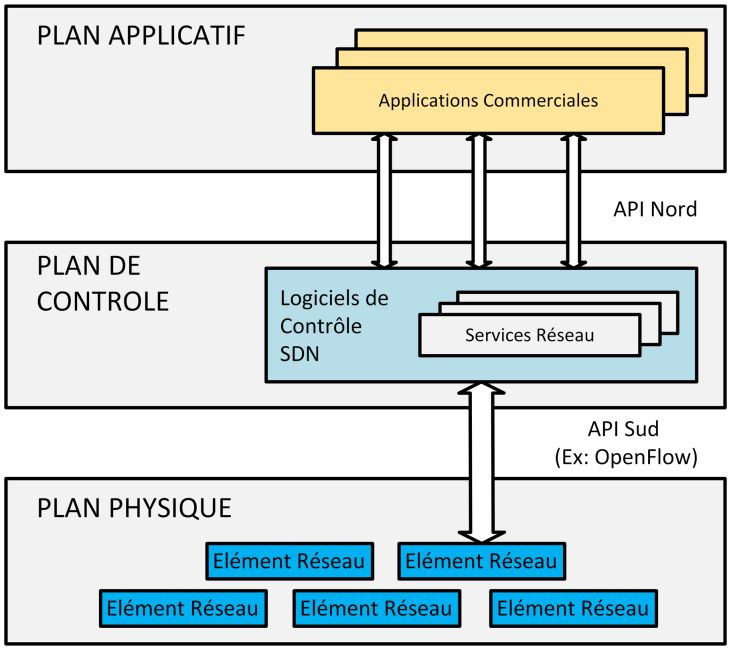


Figure 58 - Architecture SDN vue par l'ONF (@ONF)

Les changements amenés par ce nouveau paradigme sont très nombreux et une activité de recherche intense est en cours pour définir les contours des futures architectures basées sur les concepts SDN. La flexibilité amenée par la centralisation du contrôle et l'indépendance au matériel peut être comparée à l'arrivée de l'IBM PC qui proposait une séparation complète du système d'exploitation et du matériel, révolutionnant

ainsi le monde de l'informatique et faisait naitre de nouveaux acteurs comme Microsoft ! Un état de l'art complet peut être trouvé dans [ADN14L1.1].

2.3. NFV – NETWORK FUNCTION VIRTUALIZATION

Historiquement, le monde des télécoms a toujours privilégié l'utilisation d'équipements dédiés pour assurer les fonctions du réseau. Toutefois, ce choix conduit inévitablement à des délais longs de mise sur le marché et d'installation et implique des coûts d'investissements et opérationnels importants, ce qui est devenu handicapant dans un monde des télécoms en perpétuelle mutation et sujet à une compétition accrue. Ce modèle est remis en question par le concept de virtualisation des fonctions réseau (Network Function Virtualization - NFV) qui plaide pour la virtualisation des fonctionnalités réseau sous forme de modules logiciels qui s'exécutent sur des infrastructures informatiques conventionnelles (par exemple, des serveurs de centres de données) et qu'il est possible d'assembler, de chainer, pour déployer les services offerts par le réseau. Cette approche est connexe aux techniques de virtualisation connues dans l'industrie informatique dans le sens ou une fonction virtuelle peut-être implémentée dans une ou plusieurs machines virtuelles. Les progrès dans ce domaine et dans celui du cloud computing plus généralement, ont été clairement la rupture qui a permis l'émergence de la virtualisation des fonctions réseau.

L'approche NFV a initialement été proposée par un groupe d'opérateurs proches de l'ETSI lors de la conférence « SDN and Openflow World Congress » de 2012 [CHIO12]. Depuis, l'approche est portée par l'ETSI au travers d'un groupe (SIG) NFV. Depuis, cette approche suscite un engouement grandissant, puisque la virtualisation du réseau est aussi poussée au travers des futurs réseaux 5G et sera un des concepts clés de la 5G. Le Broadband Forum mène à son tour une initiative nommée « Flexible Service Chaining ». Un état de l'art complet peut être trouvé dans [VIRT16L1].

2.4. COMPOSITION

Biens que développés successivement, poussés par des raisons techniques variées et implantés dans des couches différentes du systèmes de communication, ces concepts sont néanmoins interdépendants. Par exemple, la virtualisation de fonction (NFV) peut être utilisée pour supporter des fonctions de traitement du signal développées en radio logicielle (SDR). Ces fonctions radio seront hébergées sur des calculateurs standard et seront remplaçables en cas d'évolution de la partie radio, comme des fonctions virtuelles classiques. Autre exemple, le chainage de fonctions virtuelles, en particulier les fonctions de haut niveau (au-dessus de la couche 2) peut être réalisé de manière souple par l'intermédiaire d'un contrôle centralisé.

Chaque fonction logicielle est associée à un port d'entrée et de sortie, le contrôleur SDN ayant en charge la redirection des paquets d'un port à l'autre pour réaliser le chainage. Dernier exemple, la reconfigurabilité radio peut exploiter la vision centralisée d'un réseau SDN. En effet, un contrôleur ayant une vision globale des caractéristiques de l'ensemble des nœuds qu'il gère, moyennant certaines extensions discutées ultérieurement, peut décider une reconfiguration de la radio de certains nœuds afin que ceux-ci bénéficient d'une meilleure adaptation à leur environnement et profitent d'une meilleure qualité de service.

Ainsi, ces trois concepts s'enrichissent mutuellement et les futures architectures de communication devront les intégrer pleinement.

3. *Architectures phares et perspectives de recherche*

3.1. DANS LES RESEAUX MOBILES

3.1.1. Architectures

Ces approches logicielles des réseaux sont en train d'émerger et seront au centre des réseaux de la cinquième génération de réseaux mobiles (5G). L'une des architectures actuelles les plus citées, mais aussi l'une des pionnières est l'architecture CloudRAN ou C-RAN [Wu15]. Elle peut être vue comme une extension des architectures de station de base (BTS) distribuées par l'intermédiaire de l'interface CPRI (Common Public Radio Interface) sur fibre optique. Ici aussi les parties radio RRH (Remote Radio Head) sont éloignées de la partie traitement en bande de base (BBU) par une fibre optique, mais sur de plus longues distances pour permettre une implémentation centralisée et logicielle de ce traitement sur des serveurs. La Figure 59 présente cette séparation entre RRH, pools de BBU et cœur du réseau mobile.

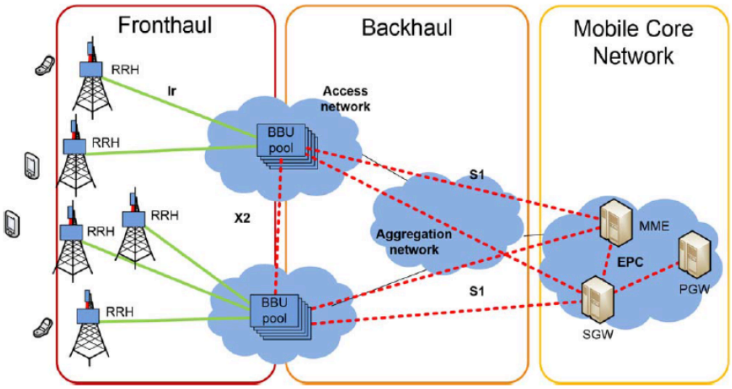


Figure 59 - C-RAN physical architecture (@T. Ratnarajah)

Tout l'intérêt de cette architecture réside dans sa capacité à mutualiser et optimiser les traitements en bande de base grâce à l'élasticité offerte par la gestion logicielle centralisée. L'augmentation de capacité ou l'évolution des normes de codage se simplifie. Il est de plus possible de réaliser de l'équilibrage de charge et du traitement de signal coopératif entre plusieurs stations de base afin d'optimiser la capacité du réseau.

Dans la lignée de C-RAN, d'autres architectures ont été proposées. OpenRAN [Yan13] étend cette architecture en virtualisant ce qui peut l'être de la partie radio. Il est possible d'instancier plusieurs vRRU (virtualized Remote Radio Unit) de technologies différentes (UMTS, GSM, LTE, etc.) et un orchestrateur assure le déploiement des différents éléments virtualisés. SoftRAN [Gud13] et RadioVisor [Gud14] ont été proposés par les mêmes auteurs dans le but d'offrir plus de flexibilité dans la gestion du réseau d'accès (RAN), en particulier par une gestion orientée SDN des ressources radio, c'est-à-dire avec une vision et un contrôle centralisé. MobileVisor [Ngu14] est une tentative d'unification des concepts SDN et NFV au sein des composantes du cœur des réseaux mobiles, avec comme objectif la simplification du partage de l'infrastructure réseau de cœur entre plusieurs opérateurs virtuels.

Parallèlement au développement d'infrastructures informatiques pour la virtualisation du réseau d'accès, l'idée a germé de profiter de ces ressources en bordure de réseau (Edge) pour les ouvrir à des développeurs d'applications et aux fournisseurs de contenu. Avec une latence extrêmement réduite, une large capacité réseau, et l'accès en temps-réel aux informations du réseau radio, cet environnement offre un cadre idéal pour le développement de nouvelles applications. Apparenté à ce que l'on appelle le « Edge Computing » dans l'Internet des Objets (IoT), ce concept nommé MEC (Mobile Edge Computing) est en cours de standardisation par l'ETSI [ETSI GSMEC 003] dans le groupe « Multi-access Edge Computing ». Dans un article récent [Rez18], l'ETSI montre l'intérêt du couplage des architectures C-RAN / MEC et définit un ensemble de scénarios et les challenges d'une telle association.

3.1.2. Perspectives

Cette évolution des réseaux mobiles est dans l'axe de nos prospectives de recherche et se situe clairement dans la continuité des travaux présentés. Ces nouvelles architectures logicielles seront un cadre idéal, car extrêmement agile, pour déployer des solutions proposées tout au long de ce manuscrit. Nous veillerons néanmoins à rester proche des organismes de normalisation afin de suivre et d'influer les futurs standards, d'où l'importance d'une recherche accompagnée par une forte coopération industrielle.

Les travaux amorcés dans le projet [ADN13] sur la virtualisation des réseaux sans fil et en particulier l'utilisation des concepts SDN pour les réseaux ad-hoc militaires tactiques serviront de base à nos réflexions. Le service que nous avons proposé dans [CHE17] offre une vision globale d'un tel réseau grâce à l'aide d'un mécanisme de découverte de réseau spécifiquement adapté du protocole OFDP (OpenFlow Discovery

Protocol). Nous nous appuierons sur ces résultats pour développer des algorithmes de routage pour les réseaux multi-sauts sans fil qui tirent profit de cette vision centralisée afin d'optimiser les ressources réseau et réduire les interférences. Les algorithmes d'optimisation, basés sur la programmation linéaire en nombres entiers, développés dans [CAP15] et visant à optimiser l'usage des ressources de bande passante et de commutation dans un réseau SDN filaire seront transposés au cadre des réseaux sans fil. Des nouvelles contraintes, telles que les réductions des interférences pourront être ajoutées à notre modèle.

Les travaux menés dans le cadre de la thèse [KRE14] qui proposent un cadre de métrologie des réseaux sans fil ainsi que des méthodes de prédiction de la qualité de service font l'objet d'une nouvelle thèse. Nous proposons d'étendre ce travail appliqué aux réseaux WiFi à des réseaux mobiles de nouvelle génération. L'intérêt de ce travail est multiple. Tout d'abord, ce nouveau contexte nous oblige de travailler avec de nouveaux outils, dont la radio logicielle (SDR). Le banc de laboratoire développé précédemment est en cours d'extension pour intégrer un réseau mobile 4G virtuel en se reposant sur la plateforme OpenAirInterface[1] ainsi que la plateforme SDR du fabricant National Instrument USRP. La quantification de la qualité du signal pourra être réalisée de manière beaucoup plus précise et impliquera le développement de nouveaux algorithmes de prédiction. L'objectif étant d'obtenir suffisamment d'informations fiables sur les futures conditions de communication pour déclencher une éventuelle reconfiguration de la radio. Ces travaux sont réalisés dans le cadre d'une coopération avec la société Continental pour permettre le développement des futurs véhicules connectés.

Enfin, à plus long terme, nous viserons une intégration des solutions basées sur la SDR dans les futures architectures de communication sans fil SDN afin d'accroitre l'agilité du système de communication. Ces idées seront appliquées dans le cadre de réseaux de communications sans fil tactiques.

La section suivante aborde avec la même approche le futur des architectures de communication par satellite et les perspectives de recherche que nous souhaitons développer.

3.2. DANS LES RESEAUX PAR SATELLITE

3.2.1. Architectures

Les réseaux par satellite sont aussi en pleine effervescence et cherchent à redéfinir leurs architectures pour dépasser le manque de flexibilité qui a souvent freiné leur utilisation. Tirant parti des travaux que nous

[1] http://www.openairinterface.org

menions sur le déploiement des concepts SDN dans les réseaux terrestres avec le projet [ADN13], nous avons proposé un cadre qui a servi de réflexion pour l'utilisation du SDN dans les réseaux par satellite.

Dans une première collaboration avec le CNES [VSAT13] sous avons étudié comment mettre en œuvre ces concepts. Une première approche, publiée dans [Ber15], montre comment au travers de quatre cas d'utilisations, un système satellite pourrait tirer parti de la centralisation du contrôle et de l'ouverture des interfaces. Le premier cas montrait comment le problème de re-routage de flux dans un réseau multi-gateway pouvait être résolu. La Figure 60 décrit la problématique qui consiste à réorienter les flux utilisateurs d'une gateway vers une autre en cas de dégradation météo, dont sont sujets les réseaux VHTS (Very High Throughput Satellite) du fait de bandes de fréquence très élevées.

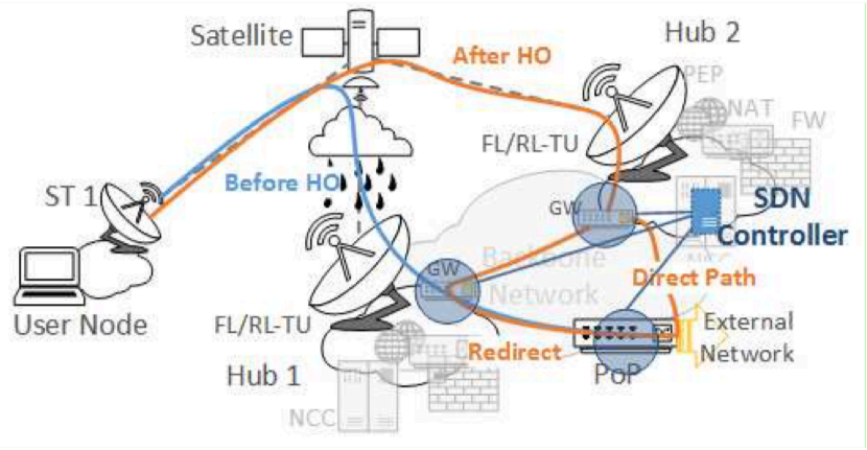


Figure 60 - Architecture SDN du réseau sol d'un système multi-gateway

Le concept de Hub virtuel a aussi été proposé pour offrir une solution de gestion flexible pour des opérateurs réseaux virtuels de satellite. Chaque SVNO (Satellite Virtual Network Operator) possédant un Hub virtuel qu'il peut administrer comme s'il était seul gestionnaire du système satellite (Figure 61). Cette problématique est encore toutefois ouverte, la virtualisation des ressources radio du système satellite n'étant à ce jour pas encore complètement résolue. Des approches de type RadioVisor [Gud14] pourront être adaptées pour réussir à isoler finement les trafics (slicing).

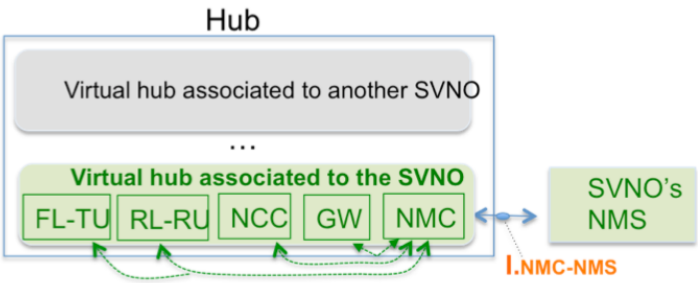


Figure 61 - Virtualisation du HUB

Le troisième scénario montrait comment réaliser l'hybridation d'un réseau terrestre ADSL et satellite en utilisant un contrôle des flux par des règles de matching. Encore aujourd'hui, dans certains cas, l'ADSL n'est pas en mesure de servir seul une offre « triple play » et il est nécessaire d'y adjoindre un service par satellite.

Enfin, nous avions adressé la problématique des middleboxes encore très présentes dans les architectures satellites à des fins d'optimisation en proposant leur virtualisation par des fonctions virtuelles.

3.2.2. Perspectives

Ces cas d'utilisations sont au centre de nos perspectives de recherche pour les réseaux par satellite.

Par exemple, dans [ABD16] nous avons proposé une architecture pour le second cas d'utilisation (Figure 62). L'originalité de cette proposition réside dans l'abstraction de l'interface offerte au SVNO qui peut considérer le réseau satellite comme un simple switch virtuel dans son système de gestion de réseau NMS (Network Management System) et appliquer un contrôle SDN unifié avec les réseaux terrestres qu'il opère. La spécificité du management des systèmes satellites actuels et son hétéroclisme face aux standards qui émergent des réseaux terrestres avaient été montrés au travers du projet [CVSIG15] en collaboration avec le fournisseur de service ALSATIS et le CNES.

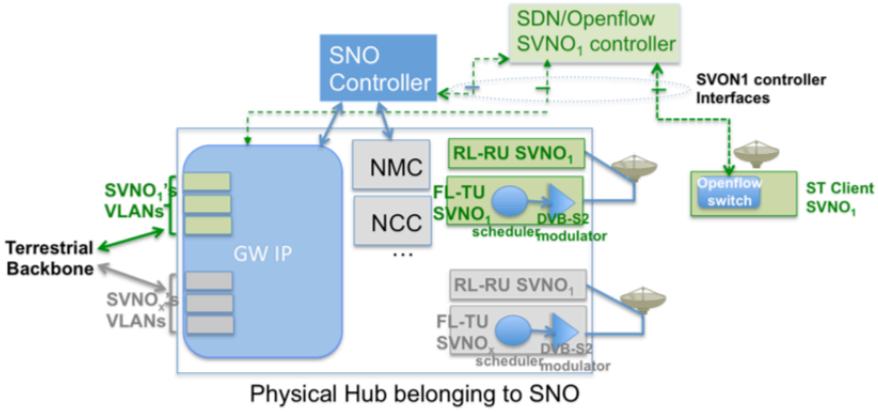
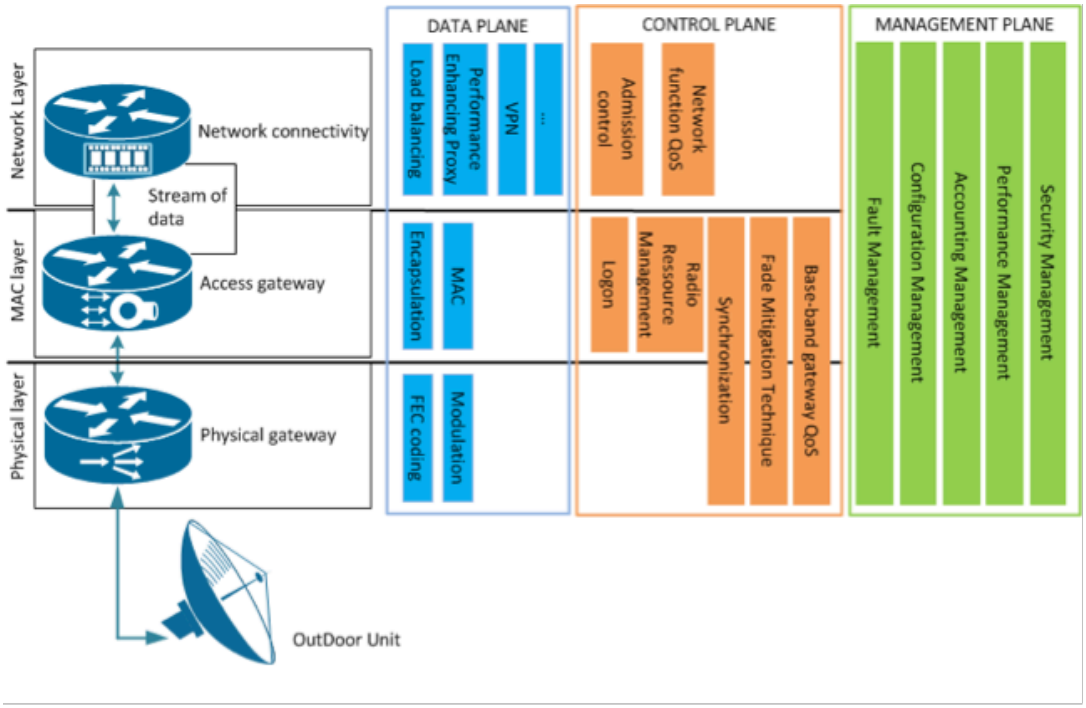


Figure 62 - Conception du HUB virtuel

Dans un second projet financé par le CNES [VIRT16] nous sommes en train d'affiner les solutions architecturales mettant en œuvre les concepts NFV et SDN pour les deuxième (SVNO) et quatrième uses cases (Middleboxes). Ce projet met en œuvre un PoC (Proof of Concept) qui vise à en montrer la faisabilité. Le choix a été fait d'une virtualisation des composants à deux niveaux. Une première virtualisation du cœur

de réseau satellite est réalisée sur la plateforme portée par la fondation Linux (OPNFV[2]) et supportée par de nombreux acteurs dont l'ETSI. Cette plateforme extrêmement complète et agile offre un cadre standard mais complexe et très lourd pour la gestion des fonctions virtuelles. Pour les middleboxes, dont celles qui pourront être implantées dans le terminal utilisateur, nous avons choisi une solution de virtualisation beaucoup plus légère basée sur la technologie « docker » du système Linux. Pour cela, nous avons développé dans le cadre du stage [DJE17] une solution basée sur la plateforme de virtualisation de fonction GNF (Glasgow Network Functions) [Czi15]. Nous avons montré comment cela pourrait être utilisé pour déployer des fonctions (Adaptation de codage vidéo, Firewall, AQM RED) dans un terminal satellite et les orchestrer. Les fonctions déployées sont des containers « docker » possédant un port d'entrée et un port de sortie (au sens interface réseau virtuelle) qui sont chainés par des règles openflow[3].

A moyen terme, ces architectures dématérialisées vont devenir une réalité que nous souhaitons accompagner. Parallèlement à nos travaux, les bases d'une architecture nommée SatCloudRan [Ahm18] ont été proposées dans le cadre du projet H2020 VITAL [VITAL]. Les différents blocs fonctionnels (Figure 63) d'un système satellite ont été positionnés dans une architecture de gateway virtualisée. C'est dans cette direction, et dans celle proposée par le projet H2020 SAT5G [SAT5G] qui vise à intégrer les systèmes satellite dans les réseaux 5G que devront se placer nos contributions.



[2] https://www.opnfv.org

[3] https://www.opennetworking.org

Figure 63 - Architecture de référence de la gateway (Projet VITAL)

Ainsi, nous allons étudier comment réaliser l'accélération de connexions TCP dans cette architecture au travers d'un projet collaboratif avec l'Institut de Recherche Technologique St Exupery de Toulouse (IRT saint exupery[4]). Un AQM tel que décrit dans le premier chapitre [DEL09] sera développé et déployé sous forme de fonction virtuelle. Outre l'aspect technologique, l'originalité de ce travail sera de développer un modèle continu des nouvelles versions de TCP (*tcp cubic et tcp compound*) qui sera adapté au contrôle d'un AQM utilisant la théorie de l'automatique continue. Ce travail sera un moyen de conforter la collaboration avec les équipes du thème DO (Décision et Optimisation) du LAAS/CNRS. Il se placera dans le cadre du nouvel l'axe stratégique « Espace » du Laboratoire[5].

Enfin, les recherches sur l'hybridation des réseaux terrestres et satellite [BER15A] seront poursuivies dans le cadre des architectures précédemment mentionnées. Nous nous intéresserons à développer les solutions qui permettront une parfaite coopération entre des réseaux militaires tactiques sans fil et des réseaux opérationnels par satellites. L'attention sera portée aux critères de fiabilité de la solution et d'optimisation des performances de communication indispensables dans un contexte militaire. Une coopération européenne est en train d'être mise en place pour cela dans le cadre de l'Europe de la Défense.

3.3. DANS LES RESEAUX HYBRIDES

Indépendamment des technologies de réseau utilisées, des problèmes plus généraux vont se poser pour la gestion de grands réseaux logiciels. Deux problèmes sont plus particulièrement au centre de nos recherches : l'orchestration des futurs réseaux et services et la fiabilité du réseau en tant qu'ensemble de composants logiciels.

3.3.1. L'orchestration des services et des réseaux

Initialement pensées avec un seul contrôleur, les architectures réseaux SDN ont rapidement montré l'intérêt d'un contrôle distribué, en particulier pour assurer la résilience du système en positionnant des contrôleurs redondants. Au-delà de cette problématique, la présence de plusieurs contrôleurs s'impose lorsque les réseaux sont :

- multi-domaines,

[4] http://www.irt-saintexupery.com

[5] https://www.laas.fr/public/fr/espace

- multi-technologies,
- multi-couches,
- multi-vendeurs,
- multi-opérateurs.

Pour des raisons d'échelle et de gouvernance, les grands réseaux d'opérateurs sont classiquement partitionnés en plusieurs domaines et chaque domaine SDN peut-être contrôlé par un contrôleur SDN logique. L'utilisation de technologies hétérogènes (OTN, WDM, Satellite, …) peut compliquer cette situation en ajoutant des contrôleurs spécialisés pour chaque technologie. De plus, comme le préconise l'architecture 5G, un contrôleur peut être responsable d'un slice de réseau qui offre des services différentiés. Tout ceci tend à complexifier une architecture qui se voulait plus centralisée que les architectures de réseaux classiques en définissant de nombreux centres de contrôle qu'il faudra faire inter-opérer. Il est donc nécessaire de définir des architectures multi-contrôlées en définissant le rôle et les interfaces de ces différents contrôleurs.

Aujourd'hui deux architectures émergent : des architectures horizontales (Figure 64) où les échanges ont lieu de pair-à-pair entre contrôleurs, c'est-à-dire par les interfaces Est/Ouest et verticales (Figure 65), où un contrôleur dédié centralise les informations échangées par les interfaces Nord/Sud. Mais au-delà de la structuration même des échanges, vient la notion d'abstraction des informations exposées d'un contrôleur à l'autre. Dans un contexte multi-opérateur, par exemple, il est normal que l'information échangée et les moyens de configuration offerts soient plus réduits que dans le cadre d'une échange inter-contrôleurs du même domaine. Apparait ainsi un besoin de multiples niveaux d'abstraction de ces interfaces.

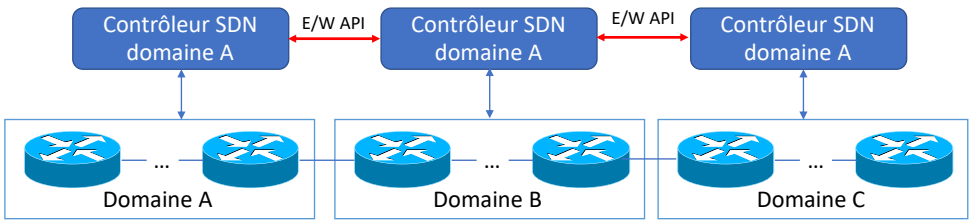


Figure 64 - Architecture multi-contrôleurs horizontale

Parmi les architectures horizontales, une des premières API développées fut celle du contrôleur OpenDayLight, nommée SDNi et dont l'objectif est d'échanger des informations telles que la topologie ou des statistiques réseau. Elle peut servir de base à l'implantation d'architectures comme celle proposée dans DISCO ([Phe14]).

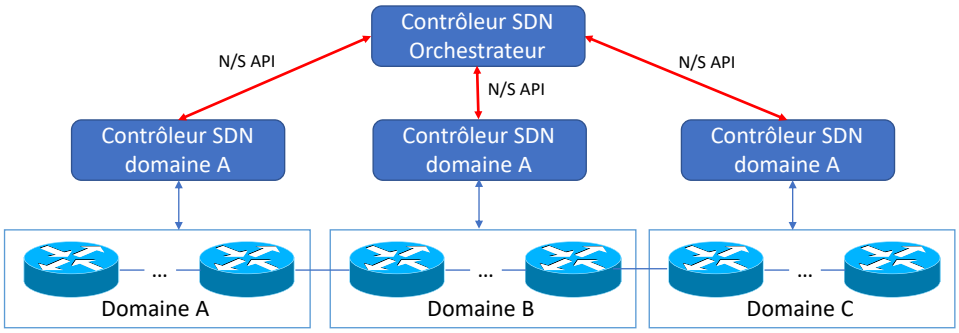


Figure 65 - Architecture multi-contrôleurs verticale

La notion d'abstraction est aussi au cœur des architectures verticales, comme celle proposée dans le projet H2020 ACINO ([Tom17]) dont l'objectif est d'offrir une architecture pratique pour contrôler les réseaux avec plusieurs domaines de transport (couches IP et optiques). Deux suggestions d'abstractions sont aujourd'hui en concurrence, une proposée par l'ONF ([TAPI]) et l'autre par l'IETF ([Gen18]). TAPI définit une interface de haut niveau indépendante de toute technologie, indépendante des fabricants, avec une prise en compte particulière du contexte multi-domaines, multi-opérateurs. L'API TAPI définit son modèle de données (décrit en UML et en langage YANG) des éléments à programmer, modèle extensible, englobant aussi bien des parties indépendantes que dépendantes des technologies. COMS s'intéresse à la gestion de "slice réseau" qui se veut aussi indépendante de toute technologie (multi-technologies), de tout fabricant (multi-vendeurs) et potentiellement multi-domaines et multi-opérateurs. A un "slice réseau" est associé des ressources de connectivité (liens physiques/longueur d'onde, services VPN de toute sorte), des ressources de calcul, des ressources de stockage et des fonctions réseau (DNS, firewall, contrôleur SDN, etc.). L'ensemble de ces caractéristiques peut être dynamique.

Ces approches similaires ont en commun la volonté de déterminer des modèles de données définissant un réseau et prenant en compte les différents aspects des réseaux modernes qui sont la multiplicité des acteurs et des technologies. Les problèmes qui nous intéressent sont à la fois sémantiques et liés à la performance. Dans un contexte de réseau par satellite, il sera intéressant de vérifier que les sémantiques de données aux interfaces soient suffisamment riches pour exprimer toute la finesse de tels systèmes et au cas échéant proposer des extensions à la fois précises et génériques. Les échanges de ces données entre acteurs, devant un besoin d'adaptation au niveau de confiance donné à l'autre, devront faire l'affaire d'un traitement spécifique. Pour ce faire, l'expérience de l'équipe SARA sur le web sémantique, ainsi que des travaux sur les ontologies de réseau que nous avions menés pourront être une base de réflexion. Le manque de visibilité actuel sur le rôle des échanges entre contrôleurs, orchestrateurs de contrôleurs et de fonctions, NMS,

montre aussi un besoin architectural de clarification. Enfin, les échanges inter-contrôleurs dans un environnement satellite posent la question des performances nécessaires du lien au maintien d'une cohérence globale. Quels délais, quelle fiabilité, quel besoin de qualité de service est nécessaire pour l'assurer ? Certaines solutions seront à chercher du côté de l'algorithmique distribuée et d'autres relatives à de l'évaluation de performances.

3.3.2. La fiabilisation des reseaux logiciels

La dématérialisation des réseaux soulève un problème de fond qui est celui du changement de paradigme pour la gestion de leur fiabilité. Historiquement cet aspect était principalement axé sur la fiabilité des composants électroniques d'une part, et sur la vérification du bon fonctionnement des protocoles d'autre part. Bien sûr, la part de logiciel installé sur les composants réseaux n'est pas négligeable et la complexité des systèmes d'exploitation des constructeurs est une réalité, mais cela est sans commune mesure avec l'évolution des futurs réseaux.

Le champ des recherches à mener dans ce domaine est très ouvert et aujourd'hui peu de propositions émergent, beaucoup étant accès sur la sécurité qui est un problème connexe tout aussi crucial. La fiabilité des logiciels n'est néanmoins pas un problème récent et de nombreuses solutions ont été proposées pour les domaines des systèmes embarqués (aéronautique, spatial, etc.), pour les systèmes informatiques distribués, etc. Nous nous intéresserons à l'application de ces solutions pour les réseaux logiciels dans un contexte automobile.

L'arrivée de la 5G est vue comme un catalyseur pour le développement des véhicules connectés car au-delà d'une connectivité importante, sont pris en compte les besoins spécifiques des applications pour véhicules connectés. Par exemple, la 5G vise une latence de l'ordre de la milliseconde contre la dizaine de milliseconde en 4G permettant le développement de solutions d'anticollision basées sur les informations du réseau. Pour cela, l'application ne pourra pas se reposer sur des informations centralisées au cœur du réseau, les délais d'acheminements étant trop grands, mais devra reposer sur des services offerts en bordure de réseau. Le Mobile Edge Computing (MEC) présenté rapidement dans le paragraphe 3.1.1 est une réponse à ce besoin en permettant le déploiement de composants de l'application au plus près de l'utilisateur. Bien que plus efficace, cette approche est aussi plus risquée qu'un déploiement d'une application monolithique au cœur d'un cloud car elle nécessite la garantie de la cohérence des composants déployés. Ceci est d'autant plus complexe que le réseau entre l'abonné et le cloud peut-être ni disponible, ni fiable.

L'approche que nous souhaitons développer pour assurer la sureté de fonctionnement de ces applications se situe dans le domaine du test de logiciel et plus particulièrement celui de la vérification automatique de traces de test par rapport à des scénarios spécifiés. Le développeur d'une application pourra spécifier son

scénario à l'aide du langage UML et modéliser les exigences qu'il souhaite vérifier (exigences positives et négatives, objectifs de test). Un simulateur de réseau permettra de générer un ensemble de traces possibles et des algorithmes d'appariement de graphes et de calculs d'ordres partiels d'événements permettront la vérification automatique de traces de test par rapport aux scénarios spécifiés.

Ce travail fait l'objet d'une thèse qui vient de débuter avec la société Continental Services et repose sur l'encadrement des équipes SARA et TSF du laboratoire. TSF est à la base de l'outil TERMOS [Wea10] qui est à la base de ces réflexions.

4. Conclusion

Pour conclure ce chapitre, nous aborderons des perspectives à long terme qui sont plus proches d'une vision de ce que seront les réseaux du futur qu'à une véritable démarche scientifique. Néanmoins, ces thématiques sont dans l'alignement des idées émergentes du début de la définition de ce qui allait devenir la 5G et sont donc partagées par une partie de la communauté scientifique.

Les réseaux mobiles sont aujourd'hui relativement peu flexibles, organisés autour d'un ensemble de normes (3/4/5G, WiFi, Blueetooth, etc.), chacune étanche à l'autre. Ceci est d'autant plus vrai sur les terminaux utilisateurs où différentes puces existent pour faire fonctionner chaque réseau, le terminal choisissant selon ses propres critères (par forcément les plus pertinents) le lien adapté. L'évolution des technologies nous amène à penser qu'il sera possible de pousser les idées de la radio-cognitive dans les systèmes portables ou mobiles, permettant ainsi une adaptation du système de communication au besoin de l'application et à l'environnement dans lequel elles s'exécutent. Le choix de la bande de fréquence, du codage, de la modulation, de la puissance d'émission, mais aussi de la méthode d'accès, de la structuration du réseau, pourrait être fait dynamiquement en fonction des évènements observés dans l'environnement et de ce qui peut être prévisible. Pour paraphraser l'ARCEP dans un document sur les enjeux de la 5G, les futurs réseaux mobiles seront « polymorphes, voire protéiformes, capables de s'adapter à tous les usages jusqu'aux plus exigeants ».

Autre hypothèse crédible, quand la dématérialisation des réseaux sera très avancée et leur flexibilité maximale, le contrôle des réseaux pourra être automatisé et la gestion des pannes reléguée à des algorithmes. Cette activité est aujourd'hui encore très manuelle et mobilise d'énormes coûts opérationnels. Lorsqu'il sera possible d'adapter une pile protocolaire instantanément à un nouveau paradigme de communication, quand les visions centralisées des réseaux de communication seront suffisantes, que les entités de contrôle pourront dialoguer sans risque, nous pourrons envisager de développer des algorithmes permettant un rétablissement immédiat des liaisons, y compris en cas de sinistre, de lutter efficacement contre les attaques

malveillantes du réseau, voire de détecter la propagation de fausses informations ou de tentatives de manipulation de l'opinion. Toutefois la frontière entre l'objet technique qui est le réseau de communication et l'information qui circule avec son utilité sociale est mince. Comme c'est actuellement le cas pour la défense de la neutralité de l'Internet, une réflexion sociétale devra prendre le relai sur ces considérations techniques.

5. Bibliographie du chapitre

[Arc17] « Les enjeux de la 5G », arcep, Mars 2017.

[Lac95] R. I. Lackey and D. W. Upmal, « Speakeasy: the military software radio », in IEEE Communications Magazine, vol. 33, no. 5, pp. 56-61, May 1995. doi: 10.1109/35.392998

[Mil99] J. Mitola and G. Q. Maguire, « Cognitive radio: making software radios more personal », in IEEE Personal Communications, vol. 6, no. 4, pp. 13-18, Aug 1999.

[SDN12] ONF Market Education Committee, « Software-Defined Networking: The New Norm for Networks », Open Networking Foundation, 2012.

[Chio12] M. Chiosi and all. « Network Functions Virtualisation— Introductory White Paper », SDN and Openflow World Congress, Oct. 2012, Darmstadt.

[Wu15] J. Wu, Z. Zhang, Y. Hong, and Y. Wen, « Cloud radio access network (C-RAN): a primer », Network, IEEE, vol. 29, no. 1, pp. 35–41, 2015.

[Gud14] A. Gudipati , L.E. Li , S. Katti, "RadioVisor: a slicing plane for radio access networks, Proceedings of the third workshop on Hot topics in software defined networking", August 22-22, 2014, Chicago, Illinois, USA

[Gud13] A. Gudipati , D. Perry ,L.E. Li , S. Katti, « SoftRAN: software defined radio access network », Proceedings of the second ACM SIGCOMM workshop on Hot topics in software defined networking, August 16-16, 2013, Hong Kong, China.

[Yan13] M. Yang , Y. Li , D. Jin , Li Su , S. Ma , L. Zeng, « OpenRAN: a software-defined ran architecture via virtualization », ACM SIGCOMM Computer Communication Review, v.43 n.4, October 2013

[Ngu14] Nguyen, V. G., & Kim, Y. H., « Slicing the next mobile packet core network. », In The 11th IEEE international symposium on wireless communication systems (ISWCS) (pp. 901---904).

[ETSI GSMEC 003] ETSI GS MEC 003 v1.1.1: « Mobile Edge Computing (MEC); Framework and Reference Architecture », ETSI, Mars 2016.

[Rez18] A. Reznik, L.M. Contreras Murillo, Y. Fang et al. « Cloud RAN and MEC: A Perfect Pairing », ETSI White Paper No. 23, Fevrier 2018, ISBN No. 979-10-92620-17-7.

[Czi15] R. Cziva, S. Jouet, K. J. S. White, and D. P. Pezaros. « Container-based Network Function Virtualization for Software-Defined Networks. », IEEE ISCC, 2015.

[Ahm18] Ahmed, T., Dubois, E., Dupé, J. B., Ferrús, R., Gélard, P., & Kuhn, N. (2018). « Software-defined satellite cloud RAN. », International Journal of Satellite Communications and Networking, 36(1), 108-133.

[SAT5G] Projet H2020, « SaT5G: Satellite and Terrestrial Network for 5G », H2020-ICT-2016-2.

[VITAL] Projet H2020, « VIrtualized hybrid satellite-TerrestriAl systems for resilient and fLexible future networks », H2020-EU.2.1.1.3.

[Phe14] Phemius K., Bouet M., Leguay J. « Disco: Distributed multi-domain sdn controllers. », Network Operations and Management Symposium (NOMS), IEEE, 2014.

[Tom17] Tomkos L. (2017), « The Role of SDN in Application Centric IP and Optical Networks. », Journal of Green Engineering. 10.13052/jge1904-4720.634.

[TAPI] ONF TR-527Functional Requirements for Transport API, Open networking foundation, 2016.

[Gen18] Geng, L., Qiang, L., Lucena, J., Ameigeiras, P., Lopez, D. and L. Contreras, « COMS Architecture », Internet-Draft draft-geng-coms-architecture-02, March 2018.

[Wea10] H. Weaselynck, Z. Micskei, N. Rivière, A.Hamvas, I. Nitu: « TERMOS: a formal language for scenarios in mobile computing systems, Proc. Int. ICST Conf. on Mobile and Ubiquitous Systems (MobiQuitous 2010), Sydney (Australia), December 2010. LNICST 73, Springer, pp. 285-296.

SIGLES & ACRONYMES

2G	second generation (GPRS, EDGE)
3G	third generation (UMTS, HSDPA, HSDPA+, LTE)
3GPP	3thd generation partnership project
4G	fourth generation (LTE-Advanced)
AAA	authentication, authorization, and accounting
ACM	adaptive coding modulation
ACQ	(dvb-rcs) acquisition
ADSL	asymmetric digital subscriber line
AF	assured forwarding
AF	(IMS) application function
AP	access point
AQM	active queue management
AR	access router
ARC	active resource controller
ARCEP	autorité de régulation des communications électroniques et des postes
ASIC	application specific integrated circuit
AVBDC	(dvb-rcs) absolute volume based dynamic assignment
AWGN	additive white gaussian noise
BACK	binding acknowledgement
AQM	Active Queue Management
BB	bandwidth broker
BBM	break-before-make
BBU	base band unit
BCW	best constant weight
BDP	bandwidth delay product
BE	best effort
BEB	Binary Exponential Backoff
BER	bit error rate
BU	binding update
C-BGF	core border gateway function
C2P	connection control protocol
CAPEX	Operational expenditure
CAN	convertisseur analogique numérique
CMT	(dvb-rcs) correction message table
CN	correspondant node
CNA	convertisseur numérique analogique
CoA	care-of address
COPS	common open policy service
CoT(i)	care-of test (init)
CPRI	common public radio interface
CRA	(dvb-rcs) continuous rate assignment
CSC	(dvb-rcs) common signaling channel
CSCF	(IMS) call/session control functions (P-proxy; S-server; I-interrogating)
CSMA-CA	carrier sense multiple access with collision avoidance
CTCP	compound TCP
CWND	congestion window
DAD	duplicate address detection

DAMA	demand assignment multiple access
DCCP	datagram congestion control protocol
DNS	domain name server
DSM-CC	(mpeg2) digital storage media - command & control
DSP	digital signal processor
DT	decision tree
DVB-RCS	digital video broadcasting - return channel via satellite
DVB-S	digital video broadcasting - satellite
ECN	explicit congestion notification
EF	expedited forwarding
eNodeB	evolved node B (LTE)
EPC	evolved packet core (LTE)
ETSI	european telecommunications standards institute
ES	(mpeg2) elementary stream
FBACK	(fmip) fast binding acknowledgement
FBU	(fmip) fast binding update
FCA	(dvb-rcs) free capacity assignment
FCT	(dvb-rcs) frame composition table
FEC	forwarding equivalence class
FER	frame error ratio
FMIP	fast handover mobile IP
FODAC	first Order Dynamic Average Consensus
FPGA	field-programmable gate array
FSS	fixed satellite service
FTSP	flooding time synchronization protocol
GEO	geostationary orbit
GGSN	gateway GPRS support node
GPRS	general packet radio service (2,5G)
GSE	generic stream encapsulation
GTP	GPRS tunnelling protocol
GW	Gateway
HA	home agent
HACK	(fmip) handover acknowledge
HDLB	hierarchical dual token bucket
HHO	horizontal hand-over
HI	handover initiate
HLS	(dvb-rcs2) higher layer satellite
HMIP	hierarchical mobile IP
HoA	home address
HoT(i)	home test (init)
HSS	(IMS) home subscriber server
HTB	hierarchical token bucket
HTTP	hypertext transfer protocol
I-PEP	Interoperable - performance enhancing proxies
IANA	internet assigned numbers authority
IMS	IP multimedia subsystem
INAP	interactive network access operator
INT	(mpeg2) IP/MAC notification table
IP-TV	IP television
LCoA	(hmip) on-link care-of address
LFN	long fat network

LLS	(dvb-rcs2) lower layer satellite
LMA	(pmip) local mobility anchor
LPWAN	Low Power Wide Area Network
LSP	label switching path
LSR	label switching router
LTE	long term evolution
MAG	(pmip) mobile access gateway
MAC	medium access control
MAP	mobility anchor point
MBB	make-before-break
MDW	maximum degree weight
MEC	mobile edge computing
MEMS	microelectromechanical systems
MF-TDMA	multiple frequency-time division multiplexing access
MIB	management information base
MIP	mobile IP
MME	mobility management entity
MMT	(mpeg2) multicast mapping table
MN	mobile node
MPE	multiple protocol encapsulation
MPEG	moving picture experts group
MPLS	multiprotocol label switching
MSE	mean squared error
MSS	mobile satellite service
MTR	media type repository
MW	metropolis weight
NAR	new access router
NAT	network address translation
NAC	network allocation vector
NB-IoT	Narrow band Internet of Things
NCC	network control center
NCR	(dvb-rcs) network clock reference
NFV	network function virtualization
NGN	next generation network
NIT	(mpeg2) network information table
NMC	network management/operation center
NRT	Non Real Time
NSIS	Next Steps in Signaling
NSLP	nsis signalling layer protocol
NTP	network time protocol
NW	neighbor weight
OBP	on board processing
OFDM	orthogonal frequency-division multiplexing
OFDP	openflow discovery protocol
ONF	open networking foundation
OPEX	operational expenditure
OTN	optical transport network
OWD	one way delay
PAR	previous access router
PAT	(mpeg2) program association table
PBA	(pmip) proxy binding acknowledgement

PBS	pairwise broadcast synchronization
PBU	(pmip) proxy binding update
PCoA	previous care-of address
PCRF	(LTE) policy and charging rules function
PDCP	packet data convergence protocol
PDF	policy decision function
PDN	packet data network
PDP	policy decision point
PEP	performance enhancing proxy
PEP	policy enforcement point
PES	(mpeg2) packet elementary stream
PHoA	previous home address
PID	(mpeg2) packet identifier
PMIP	proxy mobile IP
PMT	(mpeg2) program map table
PSI	(mpeg2) program & service information
PUSI	(mpe2) payload unit start indicator
QNF	qos nsis forwarder
QNI	qos nsis initiator
QNR	qos nsis responder
QoS	quality of service
RA	random access
RA	(ipv6) router advertisement
RA	resource allocator
RACS	resource and admission control system
RAN	radio access network
RBDC	(dvb-rcs) rate based dynamic assignment
RBS	reference broadcast synchronization
RCA	root cause analysis
RCoA	(hmip) regional care-of address
RCST	return channel satellite terminal
RED	random early discard
RLE	return link encapsulation
RM	resource manager
RNC	radio network controller
RO	route optimization
RRH	remote radio head
RRT	return routability test
RSVP	resource reservation protocol
RSS	received signal strength
RTO	retransmittion timeout
RTC	réseau téléphonique commuté
RTP	real time protocol
RTS/CTS	ready to send / clear to send
RTT	round time trip
SACK	selective acknowledgment
SCF	service control function
SCPS	space communications protocol specifications
SCT	(dvb-rcs) superframe composition table
SCTP	stream control transmission protocol
SDN	software defined networking

SDP	session description protocol
SDR	software defined radio
SGSN	serving GPRS support node
SGW	serving gateway
SIP	session initiation protocol
SLA	service level agreement
SLF	(IMS) subscriber location function
SLS	service level specification
SNACK	selective negative acknowledgment
SNDU	sub network data unit
SNR	signal to noise ratio
SNIR	signal to noise plus interference ratio
SNMP	simple network management protocol
SNO	satellite network operator
SVNO	satellite virtual network operator
SVR	séparateurs à vaste marge (support vector machine)
SO	satellite operator
SOS	star optimal symmetric
SP	service provider
SPT	(dvb-rcs) satellite position table
ST	satellite terminal
SVNO	satellite virtual network operator
SYN	synchronise
SYNC	(dvb-rcs) synchronisation
TBTP	(dvb-rcs) terminal time burst time plan
TCP	transmission control protocol
TCT	(dvb-rcs) timeslot composition table
TDM	time division multiplexing
TDH	Très haut débit
TIM	(dvb-rcs) terminal information message
TPSN	timing-sync protocol for sensor networks
TS	(mpeg2) transport stream
UDLR	unidirectional link routing
UDP	user datagram protocol
ULE	ultra lightweight encapsulation
ULTRAN	UMTS terrestrial radio access network
UNA	unsolicited neighbor advertisement
UTO	user timeout option
UWB	ultra wide band
VBDC	(dvb-rcs) volume based dynamic assignment
VCI	(atm) virtual channel identifier
VCM	variable coding modulation
VHTS	very high throughput satellite
VNF	virtual network function
VoIP	Voice over IP
VPI	(atm) virtual path identifier
VPN	virtual private network
WDM	wavelength division multiplexing
WLAN	wireless local area network