



Université
de Toulouse

THÈSE

En vue de l'obtention du

DOCTORAT DE L'UNIVERSITÉ DE TOULOUSE

Délivré par :

Institut National Polytechnique de Toulouse (INP Toulouse)

Discipline ou spécialité :

Réseaux, Télécommunications, Systèmes et Architecture

Présentée et soutenue par :

M. PATRICE RAVENEAU

le vendredi 20 juin 2014

Titre :

SATELLITES D'OBSERVATION ET RESEAUX DE CAPTEURS
AUTONOMES AU SERVICE DE L'ENVIRONNEMENT

Ecole doctorale :

Mathématiques, Informatique, Télécommunications de Toulouse (MITT)

Unité de recherche :

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

Directeur(s) de Thèse :

M. ANDRE LUC BEYLOT

Rapporteurs :

M. BERNARD TOURANCHEAU, UNIVERSITE JOSPEH FOURIER

M. TOUFIK AHMED, ENSEIRB-MATMECA

Membre(s) du jury :

Mme VÉRONIQUE VEQUE, UNIVERSITE PARIS 11, Président

M. ANDRE LUC BEYLOT, INP TOULOUSE, Membre

M. CÉDRIC BAUDOIN, THALES ALENIA SPACE, Membre

M. EMMANUEL CHAPUT, INP TOULOUSE, Membre

M. EMMANUEL DUBOIS, CENTRE NATIONAL D'ETUDES SPATIALES CNES, Membre

M. RIADH DHAOU, INP TOULOUSE, Membre

"Astérix a dû manger un sanglier qui avait mangé quelque chose..."
Agecanonix, supporter Gaulois, *Astérix aux Jeux Olympiques*

"Pour reconnaître que l'on n'est pas intelligent, il faudrait l'être"
Georges Brassens

Remerciements

Enfin ! C'est bien le sentiment que je ressens lors de la rédaction de ces remerciements. Dès le début de ce doctorat, je n'ai cessé de songer à ces phrases que j'écrirai une fois ce diplôme acquis. En effet, ce sont ces quelques lignes qui sont les premières lues et qui permettent au jeune docteur de retranscrire ce qu'il a vécu pendant ces dernières années.

Je commencerai tout d'abord par remercier mon directeur de thèse, André-Luc Beylot qui, comme chacun sait, n'a pas sa langue dans sa poche. Je le remercie tout d'abord de m'avoir proposé un sujet de stage en fin de deuxième année, ce qui a motivé mes choix futurs. Je le remercie également de m'avoir proposé ce sujet de thèse. La qualité de son encadrement et de sa gestion, aussi bien sur le plan scientifique qu'humain, font de lui le meilleur directeur de thèse que je connais.

Je remercie mes deux co-encadrants Emmanuel Chaput et Riadh Dhaou. Ils ont su, chacun à leur manière, m'apporter de la confiance quand c'était nécessaire et soulever des questions pour me faire avancer.

Je remercie donc mes trois encadrants ALB, Manu et Riadh à la fois pour l'aide dans le travail et pour leur participation aux divertissements et défis.

Je remercie également Emmanuel Dubois et Patrick Gélard pour leur collaboration et les nombreuses documentations fournies, m'ayant permis d'élargir mes connaissances dans le domaine du spatial.

Je remercie Toufik Ahmed et Bernard Tourancheau d'avoir accepté de rapporter ma thèse et pour l'intérêt qu'ils ont manifesté lors de la soutenance.

J'exprime ma gratitude à Véronique Vèque pour m'avoir fait l'honneur de présider mon jury de thèse.

Je remercie également Cédric Baudoin pour sa présence dans le jury et son intérêt pour mes travaux.

Au cours de ma thèse, j'ai eu l'occasion de voyager et je souhaite exprimer mes sincères remerciements aux Brésiliens qui m'ont accueilli en particulier Jesse, Luiz, Ítalo, José Marcos, Daniel, Vinícius, Vinícius, Ewerton, Henrique et Samuel et Alessandro mes colocos pour deux semaines. Muito obrigado por sua hospitalidade.

J'ai également eu l'occasion de dispenser différents cours durant ces années de thèse et pour cela je souhaite remercier Martial, dernier grand chef du département TR, ainsi

que les enseignants qui m'ont fait confiance et m'ont donné la possibilité d'assurer des enseignements : ALB, Manu, Riadh, Xavier, Béa, Jérôme et Carlos.

Je remercie également les collègues de couloirs, anciens enseignants de mon département de formation et ancienne voisine pour les salutations amicales et échanges cordiaux. Merci donc à Nathalie, Benoît, Marie-Laure, Jean-Yves, Corinne, Sandrine, Ronan, Martial et Marie.

Je remercie les secrétaires de l'IRIT pour l'aide fournie et les services rendus. Un grand merci à SAM, Sylvie et Audrey.

Je remercie les membres de l'équipe IRT, pour l'accueil que l'on m'a réservé, les discussions plus ou moins enflammées avec plus ou moins de tintements de clochettes : Jean-Luc, le chef d'équipe, Christian, le premier chef du département TR, Maaïke et son sourire, Fabrice et ses poignées de main chaleureuses ; Béa et sa grande sympathie, Jérôme et ses connaissances au quizz, Julien pour ses avis assez tranchés et sa très grande gentillesse, Katia pour sa bonne humeur, Gentian pour ses goûts vestimentaires et son sens de l'humour, Riadh et son calme même si ce n'est pas sa faute, Manu, hôte merveilleux qui a sacrifié son dos et ALB qui apprécie à sa juste valeur la terre irlandaise.

Je remercie également les thésards avec qui j'ai eu le plus d'interactions. Ceci signifie des échanges sur le travail, sur l'avenir, mais aussi avec qui j'ai participé à des pauses, des repas, des week-ends, des entraînements et des soirées : Renaud, Clément, Mika, Gabriel, Mauro, GAG, JB, Razvan, Nesrine, JGK, Farouk, Vincent, Aziz, Tony, Fabian, Émilie, Mohammed, Xiaoting.

Je remercie mes amis aussi bien de longue date et les plus récents. Je leur suis reconnaissant pour leur soutien mais surtout pour leur comportement, leur manière particulière de s'amuser et leurs marques d'affection. Merci à Clément, Pasca, Renaud, Ségo, Mika, Alex, Anna, Basile, Laurie, Béa, JM, Marie, Loulou, Germain.

Merci à ceux qui me supportent depuis plusieurs années et qui ont fait le déplacement ou qui ont suivi ma soutenance et le petit raté à distance : Fred, Pimpam, MeV, Rémaïe, Mouette, Lina, Zib, La Truche, Mat, Amrando, Ksenia, Momo A, Amrei, Céline, Noémie, Alex, Étienne Laurens, Manu, Momo B, Spinou, Clément, Dji, Hugo, NJ, Alban, Laura, Flo, David, Vioulac, Bertrand.

Une mention spéciale à mes deux co-bureaux Mauro et Carlos qui ont partagé le bureau avec moi pendant la même durée et dont j'ai toujours apprécié la présence.

Et le meilleur pour la fin ! Je finirai par remercier ma famille pour leur soutien, leur présence, leur patience, leur compréhension ... bref pour tout ce qu'ils ont pu faire dans mon intérêt. On ne choisit peut-être pas sa famille, mais je ne voudrais en changer pour rien au monde.

Merci.

Résumé

La collecte d'informations et leur transmission au travers d'un réseau de communications peut être effectuée par des réseaux de capteurs autonomes ainsi que par des satellites d'observation. L'utilisation conjointe de ces réseaux fournirait des données complémentaires et permettrait à l'Humanité de pérenniser son avenir en comprenant les mécanismes du monde qui l'entoure. Ces dernières années, le secteur spatial a montré une volonté d'unifier et de faciliter la réutilisation des développements réalisés avec la création de filières de plateformes multi-missions ainsi que la définition de protocoles applicables à différents contextes. L'objectif de cette thèse est d'étudier les caractéristiques des différentes technologies d'observation afin d'en exploiter les points communs. À ces fins, nous nous intéressons aux technologies et aux architectures utilisées dans de tels contextes. Nous proposons alors une architecture de réseau répondant aux contraintes des systèmes les plus communément utilisés dans un tel cadre. Les principales contraintes des scénarios d'observation sont liées à la forte intermittence des liens et donc au manque de connectivité du réseau. Nous nous orientons donc vers une solution ayant recours au concept de réseaux tolérants au délai. Dans un tel contexte, l'existence d'une route entre la source et la destination n'est pas garantie. C'est pourquoi les protocoles de communication utilisés propagent généralement plusieurs exemplaires d'un même message vers plusieurs entités afin d'augmenter le taux de délivrance. Nous avons souhaité diminuer l'utilisation des ressources du réseau tout en conservant des performances similaires afin d'augmenter l'efficacité du réseau. Après avoir proposé une architecture commune, nous nous sommes focalisés sur les spécificités des différents segments de notre réseau afin de répondre localement à ces problèmes. Pour le segment satellite, nous nous sommes plus spécialement concentrés sur les techniques de gestion de mémoire. Nous considérons un satellite défilant avec une mémoire embarquée limitée, collectant des données en provenance de passerelles. Il s'agit alors de sélectionner les messages les plus urgents quitte à déposer sur une autre passerelle les messages moins contraints. Sur le réseau de capteurs terrestre, nous nous sommes focalisés sur la diminution de l'utilisation des ressources du réseau. Pour cela nous avons utilisé l'historique des rencontres entre les nœuds et analysé l'influence de la quantité de mémoire allouée aux accusés de réception sur les performances du réseau. Nous sommes parvenus à atteindre des performances supérieures aux solutions existantes à moindre frais. Les solutions proposées peuvent être mises en œuvre et appliquées dans différents contextes applicatifs.

Abstract

Data gathering and transmission through a communicating network can be obtained thanks to wireless sensor networks and observation satellites. Using both these technologies will allow mankind to build a sustainable future by understanding the world around. In recent years, space actors have demonstrated a will to reuse the developed technologies by creating multiple programs platforms and defining context-agnostic protocols. The goal of this thesis is to study the characteristics of several observation technologies to exploit their similarities. We analyse the existing technologies and architectures in several contexts. Then, we propose a networking architecture handling constraints of most commonly used systems in such a context. The main constraints of observation scenarios are due to the links intermittence and lack of network connectivity. We focus on a solution using the delay tolerant networking concept. In such a context, a path between source and destination might not exist at all time. That is why most proposed protocols send multiple copies of a message to increase the delivery ratio. We wanted to decrease network resource use while keeping a similar performance to increase network efficiency. After having proposed a common architecture, we focused on particularities of each network segment to solve problems locally. Concerning the satellite part, we focused specifically on memory management techniques. We considered a low earth orbit satellite with a limited on-board buffer, gathering data from gateways. The goal is then to select the most urgent messages even though the least urgent ones are sent back to the ground. On the terrestrial sensor network part, we focused on the decrease of network resource use. We used the history of encounters between nodes and analysed the influence of the proportion of memory allocated to acknowledgements on network performance. We achieved better performance than existing solutions and at lower cost. The proposed solutions can be deployed and applied in several applications.

Table des matières

Résumé	v
Abstract	vii
Table des matières	ix
Table des figures	xiii
Liste des tableaux	xv
Liste des acronymes	xvii
1 Introduction	1
1.1 Contributions	2
1.2 Plan	3
2 Présentation des systèmes d’observation	5
2.1 Le contexte d’observation	5
2.1.1 Suivi de systèmes	5
2.1.1.1 Suivi de l’environnement	6
2.1.1.2 Exploration de planètes	6
2.1.1.3 Suivi de populations	7
2.1.2 Surveillance prévisionnelle	8
2.1.2.1 Aide au secours	8
2.1.2.2 Prévisions de catastrophes	8
2.1.3 Situation d’urgence	9
2.1.3.1 La santé	9
2.1.3.2 Militaires	10
2.1.4 Synthèse	10
2.2 Les systèmes utilisés pour l’observation	12
2.2.1 Les réseaux de capteurs sans fil	12
2.2.1.1 Les contextes de surveillance	12

TABLE DES MATIÈRES

2.2.1.2	L'architecture protocolaire	13
2.2.1.3	L'interconnexion	14
2.2.2	Les satellites d'observation	14
2.2.2.1	Motivations et applications	14
2.2.2.2	Les caractéristiques du réseau	14
2.2.2.3	Les satellites multi-missions	15
2.3	Conclusion	16
3	Les réseaux tolérants au délai	17
3.1	Depuis les débuts : un réseau interplanétaire	17
3.1.1	La tolérance au délai	17
3.1.2	L'architecture Delay/Disruption Tolerant Networks (DTN)	17
3.1.2.1	Un réseau d'overlay	17
3.1.2.2	Le Bundle Protocol	18
3.2	... jusqu'à nos jours : les réseaux opportunistes	19
3.2.1	La tolérance aux interruptions	19
3.2.2	L'indéterminisme des contacts	19
3.3	Le routage DTN	20
3.3.1	Le routage prédictible	20
3.3.2	Le routage non-déterministe	21
3.3.2.1	Les routages fondés sur la réplication	21
3.3.2.2	Les routages fondés sur le quota	23
3.3.2.3	La gestion de la mémoire	24
3.3.2.4	Dans les réseaux de capteurs	25
3.4	Conclusion	26
4	Architectures proposées	27
4.1	Introduction	27
4.2	Scénario retenu	28
4.2.1	Contexte	28
4.2.2	Trafic	28
4.3	Contraintes	29
4.3.1	Contraintes liées à l'environnement	29
4.3.2	Contraintes liées au matériel	30
4.4	Solutions retenues	31
4.4.1	Topologie	31
4.4.1.1	Le segment sol	32
4.4.1.2	Le segment satellite	33
4.4.2	Choix technologiques	34
4.4.3	Architecture protocolaire	35

4.4.3.1	Segment satellite classique	35
4.4.3.2	Satellite intégré	36
4.4.3.3	Un seul réseau	37
4.4.4	Implantation du Bundle Protocol sur capteur	39
4.4.4.1	ION	39
4.4.4.2	DTN2	39
4.4.4.3	IBR-DTN	40
4.4.4.4	μ DTN	40
4.4.4.5	nanoDTN	41
4.5	Conclusion	43
5	Maximisation de la délivrance avec des crises intermittentes	45
5.1	Introduction	45
5.2	Contraintes du scénario	45
5.2.1	Hausse du trafic sporadique	45
5.2.2	Réseau à connexité intermittente	46
5.3	Amélioration des performances en redéposant le trafic	47
5.3.1	Utilisation des stations statiques comme salle d'attente	47
5.3.1.1	Modélisation du problème de priorité	48
5.3.1.2	Pertes pendant la crise	49
5.3.1.3	Pertes sur le trafic résiduel	50
5.3.1.4	Exemple	50
5.3.2	Équité entre les stations	52
5.3.2.1	Modélisation du problème d'équité	53
5.3.2.2	Étude de l'équité	55
5.3.2.3	Équité face aux pertes	57
5.3.2.4	Spécification de Martinet	60
5.4	Expérimentations	63
5.4.1	Simulations	63
5.4.1.1	Scénario pour Carreau	63
5.4.1.2	Scénario pour Martinet	64
5.4.2	Implantation	65
5.5	Analyse des résultats	65
5.6	Conclusion	69
6	Connaissance du passé pour imaginer l'avenir dans les réseaux de capteurs mobiles	71
6.1	Introduction	71
6.2	Scénario retenu	71
6.2.1	Sporadicité des contacts	72

TABLE DES MATIÈRES

6.2.2	Limites de capacité de traitement	72
6.2.3	Limites de mémoire	72
6.3	Amélioration des performances grâce aux événements passés	73
6.3.1	Gestion de la mémoire avec accusés de réception	73
6.3.1.1	Modèle de distribution des messages	74
6.3.2	Utilisation des rencontres avec une passerelle = FREAK	79
6.4	Validations	80
6.4.1	Traces	81
6.4.2	Modèles	82
6.4.2.1	Random Walk	82
6.4.2.2	Gauss-Markov	82
6.4.2.3	Lévy Walk	82
6.4.3	Scénarios simulés	83
6.5	Analyse des résultats	83
6.5.1	Sans ACKs	83
6.5.2	Avec ACKs	86
6.5.3	Variation de la mémoire des ACKs	90
6.6	Conclusion	93
7	Conclusion et Perspectives	95
7.1	Conclusion	95
7.2	Perspectives	97
	Liste des communications	99
	Conférences internationales avec comité de lecture	99
	Rapports	99
	Bibliographie	101

Table des figures

2.1	Représentation du fonctionnement d'Argos (image tirée de [1])	7
2.2	Présentation de la pile protocolaire ZigBee tirée de [2]	13
2.3	Piles protocolaires utilisables pour les communications spatiales tirées de [3]	15
3.1	Le Bundle Protocol comme réseau d'overlay [4]	18
4.1	Topologie du scénario	32
4.2	Architecture gérant l'interconnexion avec le satellite	36
4.3	Architecture permettant de contrôler tout le segment satellite	37
4.4	Architecture gérant tous les segments	38
4.5	Architecture de μ DTN tirée de [5]	40
4.6	Architecture de nanoDTN	42
5.1	Représentation de l'évolution du trafic cumulé des différentes sources en fonction du temps	46
5.2	Évolution des pertes en fonction de la durée de la crise	51
5.3	Évolution des pertes par classe de trafic en fonction de la durée de la crise	52
5.4	Représentation du réseau de files d'attente	54
5.5	Trafic présent dans le satellite avec débits d'entrée égaux	56
5.6	Trafic présent dans le satellite avec débits d'entrée différents	57
5.7	Comportement de Martinet en fonction de la place disponible dans le satellite	60
5.8	Encapsulation des UDPs de Martinet dans un Bundle	61
5.9	Comportement de nœuds implantant Martinet	62
5.10	Taux de délivrance global	66
5.11	Taux de délivrance du trafic prioritaire	67
5.12	Taux d'overhead	67
5.13	Équité en fonction du nombre de satellites	68
6.1	Topologie du scénario avec capteurs uniquement mobiles	72
6.2	Chaîne de Markov pour les calculs avec <i>DirectDelivery</i>	74
6.3	Chaîne de Markov pour le calcul du délai de délivrance avec <i>Epidemic</i>	75

TABLE DES FIGURES

6.4	Chaîne de Markov pour le calcul du temps de séjour avec <i>Epidemic</i>	76
6.5	Chaîne de Markov pour les calculs des temps de délivrance et de séjour avec ACKs	77
6.6	Délais de délivrance et temps de séjour avec et sans ACKs pour $\lambda = 0.1$	78
6.7	Temps de séjour pour <i>Epidemic</i> sans ACKs pour $\lambda = 0.1$	79
6.8	Taux de délivrance en Random Walk sans ACKs	84
6.9	Délai en Random Walk sans ACKs	85
6.10	Overhead en Random Walk sans ACKs	85
6.11	Taux de délivrance en Random Walk avec ACKs	86
6.12	Délai en Random Walk avec ACKs	87
6.13	Overhead en Random Walk avec ACKs	87
6.14	Taux de délivrance sur les traces de San Francisco avec ACKs	88
6.15	Délai sur les traces de San Francisco avec ACKs	89
6.16	Overhead sur les traces de San Francisco avec ACKs	89
6.17	Taux de délivrance avec 1,6 Ko et 16 Ko de mémoire sans ACK	90
6.18	Taux de délivrance avec 1,6 Ko de mémoire avec ACK	91
6.19	Délai avec 1,6 Ko de mémoire avec ACK	91
6.20	Overhead avec 1,6 Ko de mémoire avec ACK	92
6.21	Temps de séjour avec 1,6 Ko de mémoire avec ACK	93

Liste des tableaux

- 2.1 Classification des différentes applications en fonction de leurs contraintes 11

- 4.1 Tableau résumant les caractéristiques du scénario 29
- 4.2 Tableau résumant les contraintes du scénario 31
- 4.3 Paramètres retenus 35
- 4.4 Avantages et inconvénients de la première architecture 36
- 4.5 Avantages et inconvénients de la deuxième architecture 37
- 4.6 Avantages et inconvénients de la troisième architecture 38
- 4.7 Comparaison des différentes implantations pour déploiement sur MicaZ 41

- 5.1 Paramètres des simulations pour Carreau 64
- 5.2 Comparaison de la distribution des taux de délivrance 68

- 6.1 Paramètres des simulations pour le segment sol 83

Liste des acronymes

6LoWPAN	IPv6 Low power Wireless Personal Area Networks
AODV	Ad-hoc On-demand Distance Vector
ATAQ	Answer To Access the Queue
CCSDS	Consultative Committee for Space Data Systems
CFDP	CCSDS File Delivery Protocol
CLEO	Cisco router in Low Earth Orbit
CGR	Contact Graph Routing
CMI	Commandement et Maîtrise de l'Information
CNES	Centre National d'Études Spatiales
DSDV	Destination Sequenced Distance Vector
DSN	Deep Space Network
DSR	Dynamic Source Routing
DTN	Delay/Disruption Tolerant Networks
EBR	Encounter-Based Routing
EO-1	Earth Observing-1
ESA	European Space Agency
EUMETSAT	European organisation for the exploitation of METeorological SATellites
FIFO	First In First Out
GPS	Global Positioning System
ICOS	Integrated Carbon Observation System
IETF	Internet Engineering Task Force
ION	Interplanetary Overlay Network
IP	Internet Protocol
JPL	Jet Propulsion Laboratory
LAN	Local Area Network

LISTE DES ACRONYMES

LEO Low Earth Orbit
LTP Licklider Transmission Protocol
MEDES MEDEcine Spatiale
MOFO Most Forwarded
mule Mobile Ubiquitous LAN Extension
NASA National Aeronautics and Space Administration
NOAA National Oceanic & Atmospheric Administration
OLSR Optimized Link-State Routing
ORWAR Opportunistic Routing with Window-Aware Replication
PEP Performance Enhancing Proxy
POES Polar Orbiting Environmental Satellites
PRoPHET Probabilistic Routing Protocol using History of Encounters and Transitivity
RAM Request About Memory
RAPID Resource Allocation Protocol for Intentional DTN
RFC Request For Comments
RTT Round-Trip Time
SDNV Self-Delimiting Numeric Value
SHLI Shortest Lifetime
SWIPE Space Wireless sensor networks for Planetary Exploration
TCP Transmission Control Protocol
UDP User Datagram Protocol
UHF Ultra Haute Fréquence
URI Uniform Resource Identifier
WSN Wireless Sensor Network

1 Introduction

L'avenir de l'Humanité dépend de sa capacité à comprendre les mécanismes régissant le monde qui l'entoure ainsi que les résultats de ses actions sur l'environnement. Il est donc primordial de pouvoir recueillir des informations permettant de faire le suivi des métriques utiles à l'amélioration de la biosphère. Cette observation est désormais possible à grande échelle, que ce soit par exemple au moyen de satellites d'observation, ou de réseaux de capteurs sans fil déployés sur le terrain.

Imaginons un agriculteur souhaitant optimiser son utilisation d'eau et d'engrais pour ses champs [6]. Pour cela, il pourrait avoir recours à un réseau de capteurs afin de récolter des données sur les taux d'humidité et d'azote du sol par exemple. La collecte de ces données pourrait être réalisée au moyen d'une station de base que l'exploitant agricole pourrait positionner sur une machine agricole ou sur un vélo [7]. Les observations satellitaires permettent de surveiller l'état des parcelles ainsi que de prévoir la quantité des récoltes. Ceci prouve l'intérêt du recours au satellite pour l'agriculture [8]. Les visites sur les terrains éloignés peuvent donc être réduites grâce à ces mécanismes de télédétection. Après une étude des projets existants dans le domaine de l'agriculture, on constate que l'utilisation conjointe de données provenant à la fois de réseaux de capteurs au sol et de satellites d'observation permettrait de réduire les coûts d'exploitation. Il est également possible d'hybrider ces deux technologies dans un même réseau afin de diminuer le nombre d'équipements mis en œuvre pour la collecte de données.

L'utilisation de systèmes satellite pour le suivi de représentants d'espèces animales [9] ainsi que l'utilisation de réseaux de capteurs sans fil [10] ne sont pas récentes. Les avancées technologiques réalisées dans le domaine des réseaux d'observation ont amené une grande diversité de solutions hétérogènes. Ces solutions ont les moyens de suivre différentes grandeurs et leur complémentarité permettrait d'obtenir des observations à la fois plus étendues et plus fines des systèmes étudiés. Les domaines d'observations sont divers. Il est ainsi possible d'observer des animaux, de détecter des désastres ou de suivre un écosystème à l'aide de différentes sources d'information. L'utilisation de ces technologies hétérogènes dans un même but se traduit par une solution hybride. C'est pourquoi nous allons nous intéresser à l'adaptabilité d'un tel réseau face à des trafics, relais, sources et contraintes différents.

Les réseaux permettant l'observation de systèmes présentent des contraintes proches. Ces réseaux doivent avoir une durée de vie longue sans intervention extérieure pour reconfigurer les

1. INTRODUCTION

équipements du réseau. De par leur nature, ces réseaux introduisent de longs délais provenant soit de la mobilité des systèmes observés, soit des technologies employées. Les longs délais ne sont pas le seul problème. Les liens peuvent être indisponibles pour une durée indéterminée. Ce faisant, il n’y a aucune garantie de connexité sur le réseau à un instant donné. Il est donc nécessaire que les solutions retenues pour l’observation de systèmes soient en mesure de tolérer ces contraintes de délais et d’interruptions.

Dans plusieurs domaines, et en particulier celui du spatial, la volonté de réduire les coûts existe depuis plusieurs années. À titre d’exemple, nous citons la filière MYRIADE de plateformes de micro-satellites [11]. Cette dernière permet d’avoir un accès à l’espace à moindre coût. Cette contrainte de réduction des coûts s’exprime par la volonté de développer des composants pris sur étagère. Ces composants sont très adaptés à un contexte hybride dans le sens où ils peuvent facilement s’adapter à différentes technologies indépendamment du contexte.

La communauté de la recherche a proposé un grand nombre de protocoles agnostiques vis-à-vis des technologies utilisées ainsi que des applications visées. Néanmoins, tous ces protocoles ne répondent pas aux exigences des applications d’observation. Des protocoles comme Internet Protocol (IP), Transmission Control Protocol (TCP) ou User Datagram Protocol (UDP) ne sont pas en mesure de fonctionner avec des liens intermittents. La plupart des protocoles de routage reposent sur des algorithmes qui nécessitent une connexité permanente pour fonctionner [12, 13, 14, 15].

Notre objectif est de proposer des solutions pouvant s’adapter à différents scénarios avec différents niveaux d’hétérogénéité : des équipements, des protocoles de bas niveau, des types et volumes de données, de la mobilité, etc. En effet, nous visons à ce que nos solutions soient utilisables dans différents contextes. Les domaines que nous considérons pour notre étude, présentent des contraintes fortes. Ces contraintes requièrent des solutions spécifiques [3, 16]. Afin de proposer, dans l’avenir, des systèmes hybrides permettant de répondre aux mêmes besoins, il est impératif que les solutions proposées soient le plus indépendantes possible des technologies, tout en veillant à ce qu’elles soient adaptées à un large panel d’applications. Afin de cerner les principales contraintes, nous analysons différents scénarios d’observation. Une fois ces contraintes identifiées, nous proposerons des solutions adaptées.

1.1 Contributions

Dans un premier temps, nous définissons un contexte applicatif précis et nous proposons une architecture protocolaire en accord avec les contraintes des différentes technologies employées. Le contexte retenu est l’observation de l’environnement. Les principales contraintes qui ressortent de l’étude des scénarios d’observation et de la littérature sont des contraintes de forts délais et de nombreuses interruptions. Nous considérons un scénario d’observation dans lequel des données critiques pourraient apparaître sporadiquement. Les technologies considérées pour notre scénario d’étude sont des satellites d’observation à orbite basse Low Earth Orbit (LEO) et des

réseaux de capteurs statiques et mobiles. Des études ont déjà été menées pour proposer des systèmes hybrides terrestre - basse altitude [17] ainsi que des systèmes hybridant différents types de plateformes satellite dans un contexte de trafic urgent [18]. L'hybridation est effectivement recherchée à plusieurs niveaux et une étude dans le cadre de l'observation se justifie.

Dans un deuxième temps, nous proposons des solutions protocolaires utilisables sur le segment satellite de notre architecture. Les satellites utilisés pour l'observation sont majoritairement des satellites à orbite basse. Ceci implique donc de longues interruptions. De plus, les satellites ont des mémoires embarquées limitées et ne peuvent pas nécessairement servir de relais direct vers une station au sol. C'est pourquoi les solutions proposées s'intéressent à la gestion de la mémoire du satellite et permettent de gérer les priorités entre divers trafics ainsi que l'équité entre les sources.

Dans un troisième temps, nous nous concentrons sur la partie réseau de capteurs autonomes de l'architecture étudiée. Les contraintes existantes sur les réseaux de capteurs mobiles sont le manque de connexité ainsi que l'indéterminisme de l'évolution de la topologie. Ces contraintes sont liées au caractère mobile des équipements. Le contexte capteurs ajoute également des limitations de mémoire et de capacité de calcul. Nous simplifions le fonctionnement d'un protocole de la littérature et proposons un nouveau protocole de routage adapté au contexte de capteurs mobiles. L'impact du mécanisme d'accusés de réception dans un contexte opportuniste a également été évalué.

1.2 Plan

Ce manuscrit est organisé en sept chapitres. Dans le chapitre 2, nous présentons une classification des missions d'observation ainsi que des projets représentatifs de ces missions. Nous poursuivons avec un état de l'art sur les réseaux DTN dans le chapitre 3, en analysant les concepts utilisés pour le routage en fonction de l'indéterminisme des contacts.

Le chapitre 4 présente l'étude de l'hybridation de technologies satellite et de réseaux de capteurs sans fil dans un contexte d'observation. Nous présentons les architectures proposées pour mettre en œuvre l'hybridation et exposons les contraintes qui en découlent. C'est dans ce chapitre que nous définissons un scénario permettant de mettre en avant l'intérêt d'une solution d'hybridation. Nous terminons ce chapitre en présentant les contraintes rencontrées lors de l'implantation du Bundle Protocol sur capteurs.

Dans le chapitre 5, nous concentrons notre analyse sur la partie satellite du réseau considéré. Malgré le déterminisme des contacts entre les terminaux, nous proposons des mécanismes applicables dans d'autres contextes. Le trafic n'est pas déterministe, et la charge du satellite n'est pas connue. De plus, nos propositions doivent pouvoir s'adapter à d'autres contextes que celui du satellite. Nous proposons deux protocoles permettant de gérer la priorité entre les trafics ainsi que l'équité entre les sources.

Le dernier axe de nos travaux se concentre sur la partie capteurs du réseau considéré. L'archi-

1. INTRODUCTION

tecture proposée présente un plus grand intérêt lorsque les nœuds sont mobiles. La difficulté réside dans les faibles capacités des dispositifs utilisés. Le chapitre 6 présente les solutions proposées qui doivent être simples, tolérer le passage à l'échelle et tirer profit des meilleures opportunités de contacts. Nous proposons un protocole reposant sur une métrique et un algorithme simples. Nous analysons également l'impact des accusés de réception ainsi que la capacité mémoire sur les performances.

Le chapitre 7 conclut cette thèse et ouvre sur les perspectives de nos travaux.

2 Présentation des systèmes d'observation

2.1 Le contexte d'observation

Les applications et scénarios d'observation sont vastes et variés. Nous proposons de les regrouper en différentes classes afin de mieux identifier les architectures réseau adaptées à ces contextes. Suite à l'analyse de différents projets d'observation dans la suite de ce chapitre, nous notons que les contraintes principales de ces projets nous permettent de les répartir en 3 catégories :

- suivi de systèmes, où les communications ne requièrent pas de fortes contraintes temporelles et le volume de données transmis est important ;
- surveillance prévisionnelle, où le système suivi peut présenter des risques pour les populations avoisinantes, il faut donc que les transmissions soient effectuées de manière périodique ou lors de certains événements ;
- situation d'urgence, où les contraintes temporelles sont très fortes et le volume d'informations transmis grand.

La principale contrainte, à laquelle les projets sont plus ou moins sensibles, est le délai. La classification que nous avons établie est similaire à celle faite dans [19]. Les deux classifications peuvent être mises en parallèle. Le suivi de systèmes se rapproche du *Time-Insensitive Scientific Data Delivery*, la surveillance prévisionnelle du *Mission Status Telemetry* et le contrôle de situation d'urgence du *Time-Sensitive Scientific Data Delivery*. Les paragraphes qui suivent présentent les caractéristiques et contraintes de ces classes d'applications. Pour chacune, nous présentons différents domaines d'applications.

2.1.1 Suivi de systèmes

Cette catégorie d'applications regroupe les missions qui possèdent des contraintes temporelles faibles, voire inexistantes. Toutes les activités de type surveillance de l'environnement, suivi de populations ou exploration de planètes peuvent entrer dans cette catégorie. En effet, ce type d'applications est confronté à un système dont l'évolution est relativement lente.

La principale contrainte qui peut permettre d'identifier la technologie à utiliser est la superficie

2. PRÉSENTATION DES SYSTÈMES D'OBSERVATION

de la zone à couvrir. Les liens ne semblent pas nécessiter de débits importants dans ce cadre d'applications. En effet, un débit important peut présenter un intérêt lorsque le délai est une contrainte forte, or ce n'est pas le cas ici. Si un important volume de données se fait ressentir, alors la transmission durera plus longtemps.

Nous présentons des projets représentatifs des enjeux des applications de suivi de systèmes.

2.1.1.1 Suivi de l'environnement

Plusieurs projets d'observation se concentrent sur le suivi de l'environnement [20, 21, 22, 23]. Nous présentons Integrated Carbon Observation System (ICOS) afin de comprendre les enjeux de ce domaine et l'architecture mise en œuvre. Le projet ICOS [23] doit créer un réseau permettant d'analyser et de comprendre le cycle du carbone et des émissions de gaz à effet de serre afin de connaître l'état actuel et de prévoir son comportement futur. L'observation est réalisée au moyen d'un réseau de stations de mesure permettant d'analyser les concentrations atmosphériques et les flux échangés. Les données sont acquises grâce au traitement d'une vingtaine d'observatoires atmosphériques chargés de mesurer les concentrations en gaz à effet de serre comme le dioxyde de carbone, le méthane ou le dioxyde d'azote. Une vingtaine de tours de mesures de flux permettront également de connaître les échanges entre ces différents gaz [24]. Ces systèmes doivent couvrir la totalité de la planète.

2.1.1.2 Exploration de planètes

Nous avons étudié des projets d'exploration de la planète Mars [25, 26]. Nous présentons le projet de la National Aeronautics and Space Administration (NASA), Mars Science Laboratory [25]. Ce projet consiste à envoyer un astromobile sur Mars afin qu'il puisse récolter toutes sortes d'informations sur la planète. Les informations sont soit relayées par un satellite en orbite autour de Mars, celui de la mission Mars Reconnaissance Orbiter, soit en utilisant une des deux autres antennes présentes sur l'astromobile pour communiquer directement avec la Terre. Le vaisseau Odyssey de la NASA fera office de lien de secours et le programme Mars-Express de l'European Space Agency (ESA) sera utilisé occasionnellement.

Le système de communication présent sur le Mars Reconnaissance Orbiter est un lien bidirectionnel servant pour l'envoi de commandes et de données. Ce système de télécommunications communique avec le Deep Space Network (DSN) de la NASA.

L'astromobile est équipé de trois antennes. Le premier système de communication de l'astromobile utilise la bande Ultra Haute Fréquence (UHF). C'est dans ce cas un satellite en orbite qui fera office de relais. Parmi les deux autres antennes, se trouvent une antenne à faible gain et une antenne à fort gain. Les deux fonctionnent dans la bande X et sont prévues pour communiquer directement avec la Terre.

Le but de cette mission est d'étudier l'habitabilité de Mars. La couverture n'a pas à être mondiale et la période de rafraîchissement est encore moins contraignante que dans les exemples précédents. Cependant, contrairement à ceux-ci, il faut gérer la mobilité de certains terminaux.

2.1.1.3 Suivi de populations

Les projets de suivi de populations se concentrent sur l'observation de représentants d'une ou plusieurs espèces animales [9, 27].

Les utilisations d'Argos ne se limitent pas au suivi de populations, cependant la présentation de ce système permet de décrire comment fonctionnent les projets qui appartiennent à cette famille.

Les balises ayant des tailles relativement faibles, il est possible d'en munir des représentants d'espèces à suivre. Le système Argos est capable de localiser ces stations et de collecter les informations émises par ces dernières n'importe où dans le monde. Les informations reçues sont retransmises par le système Argos aux utilisateurs. Il est donc possible d'avoir recours à ce système pour suivre des migrations d'espèces animales.

Le fonctionnement d'Argos repose sur l'émission de messages par les balises, messages qui sont relayés par des satellites, placés sur une orbite polaire héliosynchrone entre 830 et 870 kilomètres d'altitude, vers des stations de réception sur Terre qui transmettent les informations à un centre de traitement. Les messages sont émis régulièrement par les balises.

Les satellites de la famille des Polar Orbiting Environmental Satellites (POES) de la National Oceanic & Atmospheric Administration (NOAA) ainsi que ceux de la famille MetOp de l'European organisation for the exploitation of METeorological SATellites (EUMETSAT) accueillent des équipements Argos. Lorsque le satellite reçoit un message, il réalise deux opérations. Il stocke le message reçu pour pouvoir le transmettre quand il passera au-dessus d'une station de réception et il retransmet vers le sol le message reçu. Les stations en visibilité pourront le recevoir [9, 28]. La figure 2.1 présente comment les données sont recueillies par un satellite embarquant une charge Argos avant de les transmettre vers une station de réception.

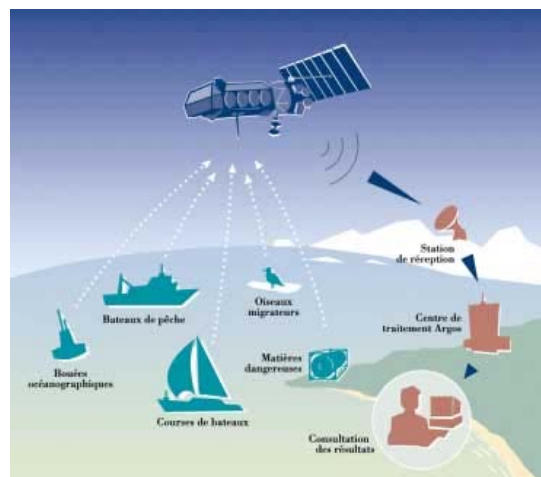


FIGURE 2.1 – Représentation du fonctionnement d'Argos (image tirée de [1])

2. PRÉSENTATION DES SYSTÈMES D'OBSERVATION

Les contraintes temporelles sont toujours assez faibles avec une zone de couverture locale. La vitesse de déplacement des animaux est élevée. Les technologies employées doivent être adaptées à la mobilité.

2.1.2 Surveillance prévisionnelle

Les applications des projets entrant dans cette catégorie possèdent des contraintes temporelles plus importantes que celles de la première catégorie. Cependant ce ne sont pas des applications temps réel. En revanche, les systèmes suivis peuvent représenter un danger pour les populations environnantes, dans le cas de séismes, d'éruptions volcaniques, de feux de forêts, ou d'autres cataclysmes, où il faut être en mesure d'identifier rapidement la source du problème. Pour ces raisons, la période de rafraîchissement des informations doit être relativement faible afin de fournir une réponse adaptée dans les plus brefs délais. Ce sont pour ces raisons qu'il est nécessaire que les données soient transmises périodiquement et/ou lors de l'occurrence d'événements prédéfinis.

Cette catégorie d'applications est une sorte d'hybride entre le suivi de systèmes et les applications de situation d'urgence. Les applications sont amenées à analyser des zones relativement importantes avec de fortes contraintes sur le délai de transmission.

Des missions représentatives de surveillance prévisionnelle sont présentées ci-dessous.

2.1.2.1 Aide au secours

Les projets d'aide au secours présentent souvent une phase de surveillance et une phase critique [29, 30, 31]

Le projet représentant le mieux le thème d'assistance aux services de secours est Safer [29]. Le principal intérêt de ce projet est de diminuer le temps de réponse des secours dans une situation de crise comme un feu de forêt, un tremblement de terre ou une éruption volcanique.

Safer doit être en mesure de fournir peu de temps après qu'une crise survient, des cartes de la zone touchée. Les données seront recueillies de différentes manières, que ce soit par l'utilisation de satellites ou de capteurs situés sur place ou dans des appareils mobiles. Les données sont ensuite transmises à un centre de contrôle qui combine les informations reçues avec une base de données mondiale permettant de délivrer des cartes de référence et d'autres informations utiles aux services d'urgence sur le terrain.

La durée de fonctionnement de tels systèmes est grande afin de garantir à l'avenir une réponse des secouristes plus rapide et plus adaptée.

2.1.2.2 Prévisions de catastrophes

L'objectif de Demeter [32] est de rechercher l'existence dans la haute atmosphère de signaux électriques et magnétiques reliés à des crises sismiques et/ou volcaniques. La mission doit également être en mesure de déterminer les caractéristiques des perturbations de l'atmosphère liées à l'activité sismique aussi bien après qu'avant que les événements ne se produisent.

2.1. LE CONTEXTE D'OBSERVATION

Le satellite a été positionné sur une orbite circulaire quasi héliosynchrone avec une inclinaison de 98.23° à 715 kilomètres puis ramenée à 660 kilomètres d'altitude.

Le satellite est composé de deux parties principales : la plateforme microsatellite et la charge utile constituée d'une partie technologique et d'une partie scientifique.

La composante sol possède trois entités :

- la composante sol de commande et contrôle, composée d'un centre de commande et contrôle, de deux stations de réception, d'une station de réception et d'un réseau de communication ;
- un centre de mission scientifique regroupant toutes les fonctions nécessaires au traitement des données scientifiques ;
- un centre de mission technologique exploitant les données de la charge utile technologique.

La mission a été en mesure de relever des liens entre l'activité sismique et les perturbations électromagnétiques. Demeter a repéré une anomalie électromagnétique au-dessus de la position du futur épïcentre, trois jours avant le séisme du 12 janvier 2010 à Haïti.

La mission Demeter ne possède peut-être pas l'infrastructure permettant de traiter les données récoltées suffisamment vite pour prévoir des catastrophes, mais les informations reçues semblent mettre en évidence que la prévision de catastrophes comme les séismes est possible.

Les missions de ce domaine doivent posséder une couverture mondiale afin d'assurer la sécurité de toute la population. Ces projets doivent être mis en parallèle des missions d'aide au secours qui possèdent une couverture plus localisée.

2.1.3 Situation d'urgence

Les applications de secours aux populations en détresse, de surveillance et d'endigement de certaines activités illégales et enfin les applications militaires rentrent dans cette dernière catégorie à fortes contraintes temporelles.

Il est évident que pour ces applications, le facteur le plus important réside dans les délais de transmission. Il faut également être en mesure de couvrir des zones potentiellement grandes dépendant de la nature du système qui est surveillé.

Les thèmes rentrant dans la catégorie situation d'urgence sont présentés dans les paragraphes suivants.

2.1.3.1 La santé

Les applications utilisant le satellite au service de la santé peuvent être présentées au moyen de la description de la station portable de télémédecine développée par la MEDEcine Spatiale (MEDES). Le but de cette station est d'améliorer la prise en charge des malades dans des sites isolés. Pour cela, il faut recueillir et transmettre des informations médicales objectives vers un centre de régulation médicale.

Une téléconsultation peut se décomposer en quatre étapes :

2. PRÉSENTATION DES SYSTÈMES D'OBSERVATION

- les informations enregistrées par les capteurs et l'entrevue avec le patient constituent un dossier médical ;
- ce dossier médical est transmis via un moyen de télécommunications, pouvant être le satellite, à un centre de régulation médicale ;
- le médecin de ce centre est chargé d'établir un diagnostic, il peut éventuellement demander des examens complémentaires si les données sont insuffisantes ;
- enfin, le médecin définit la conduite à tenir.

Comme l'utilisation de ce genre de technologies peut être aussi variée qu'il existe de cas d'enclavement (désert, forêt, plateforme en mer, mine, etc.), la solution proposée doit être adaptable et évolutive. Pour cela, les appareils utilisés sont des éléments disponibles dans l'industrie [33].

2.1.3.2 Militaires

Les systèmes militaires sont ceux présentant les contraintes temporelles les plus élevées [34, 35].

Le système Hélios II [35] doit compléter les capteurs du système de forces Commandement et Maîtrise de l'Information (CMI), destinés davantage à une observation régionale ou locale. En effet, Hélios apporte une couverture mondiale. Son utilisation entre dans le cadre du renseignement stratégique. Ses principales missions sont la vérification du respect des traités de désarmement ainsi que l'identification de signes précurseurs de crise.

Ce système est constitué de deux satellites et d'une composante sol, comprenant une partie utilisateur et un centre de maintien. Les évolutions par rapport à son prédécesseur sont l'amélioration de la résolution, une meilleure agilité du télescope en orbite entraînant des prises de vue plus rapides et des capteurs infrarouges permettant la détection d'activités de jour comme de nuit.

Ces systèmes ne nécessitent pas de grande couverture, ni une grande durée de fonctionnement. En revanche, les besoins en bande passante et les contraintes temporelles sont très élevés.

2.1.4 Synthèse

Les paragraphes précédents présentent la grande diversité des missions d'observation. Parmi les hétérogénéités que l'on peut recenser, il en existe au niveau des contraintes temporelles, des équipements utilisés, de la topologie des réseaux de communication, des protocoles de bas niveau, des types et volume de données et de la mobilité.

L'intégration de réseaux de capteurs et de satellites d'observation présente un réel intérêt [17, 36]. Cette intégration se fera au moyen d'une hybridation. L'intégration pourrait être réalisée par une interconnexion via une passerelle, mais nous souhaitons aller plus loin. En effet, les réseaux de capteurs et les satellites d'observation recueillent des données complémentaires. C'est pourquoi nous souhaitons que les observations puissent provenir de deux types de sources et donc envisager un réseau hybride pouvant fonctionner avec un réseau de capteurs, des satellites

2.1. LE CONTEXTE D'OBSERVATION

TABLEAU 2.1 – Classification des différentes applications en fonction de leurs contraintes

But	Période	Couverture	Mobilité	Lien montant	Lien descendant	Bande Passante	Exemples
Diminuer Temps Réponse Secours	min.	locale	moyenne	permanence	si crise détectée	faible	SAFER GARNET-E GEO Pictures
Surveillance Activités illégales	min.	locale	grande	permanence	à la demande	grande	G-MOSAIC
Surveillance Champ de bataille	min.	locale	moyenne	à la demande	à la demande	grande	SYSTEM-F6
Télé médecine	min.	régionale	grande	à la demande	à la demande	grande	TéléSanté
Surveillance Tremblements de Terre	min.	mondiale	nulle	permanence	jamais	faible	DEMETER
Surveillance Maritime	heure	régionale	nulle	permanence	changement conditions navigation	grande	LIMES EAMNet JASON
Suivi Populations	jour	locale	moyenne	permanence	jamais	grande	EELIAD
Surveillance Environnement	jour	mondiale	nulle	permanence	jamais	grande	CARBONES EURO4
Exploration Extra-terrestre	mois	locale	faible	occasionnel	à la demande	faible	MARS-EXPRESS

2. PRÉSENTATION DES SYSTÈMES D'OBSERVATION

d'observation ou avec les deux technologies. Les paragraphes précédents ont permis de mettre en exergue les différences mais également les similitudes des différentes missions d'observation.

La connectivité n'est pas systématiquement garantie. Plusieurs passerelles peuvent relier deux segments du réseau. Des nœuds mobiles peuvent changer de segment de réseau et ne plus être reliés à la même passerelle. Toutes ces contraintes font en sorte qu'une interconnexion ne serait pas suffisante. Il est nécessaire de penser à une architecture aussi bien protocolaire que topologique pour garantir les communications.

L'hybridation ne devra pas se limiter aux deux seules technologies de satellites d'observation et de réseaux de capteurs. Toute technologie permettant de réaliser simplement et à bas coût des observations pourra être considérée comme une source hétérogène supplémentaire et que l'on pourra hybrider avec celles considérées dans cette thèse. Les solutions proposées devront être adaptables en fonction des contraintes des missions. Le fonctionnement devra rester le même, mais les paramètres seront modifiés pour répondre au mieux aux besoins de l'application.

Nous synthétisons les résultats de l'étude des contraintes liées aux contextes applicatifs dans le tableau 2.1.

Les colonnes de ce tableau recensent les différentes grandeurs analysées lors de l'étude des contextes applicatifs. Nous notons que la métrique la plus importante est la période de rafraîchissement. C'est en effet cette dernière qui nous permet de classer les projets selon 3 catégories. Les autres métriques permettent de différencier les projets en sous-catégories. Cependant, on constate que des projets de classes différentes peuvent avoir les mêmes exigences sur d'autres métriques que le temps de réponse.

Nous présentons les technologies, utilisées dans un contexte d'observation, qui vont être étudiées.

2.2 Les systèmes utilisés pour l'observation

2.2.1 Les réseaux de capteurs sans fil

Les réseaux de capteurs sans fil, Wireless Sensor Network (**WSN**), utilisent des éléments communicants miniatures dotés d'un ou plusieurs capteurs capables d'effectuer une mesure d'une grandeur physique. Ces réseaux sont très simples à déployer car auto-configurables. Nous présentons les situations dans lesquelles ce type de réseaux présente un intérêt.

2.2.1.1 Les contextes de surveillance

Les **WSN** permettent de surveiller en continu des entrepôts [37], des personnes [38], des animaux [10], des champs [6], des zones sous-marines, des zones difficiles d'accès et d'autres astres. Ces réseaux diffèrent essentiellement en fonction de l'application. En effet, lorsque le système étudié est un individu, un animal ou un groupe, les nœuds-capteurs sont disposés sur des éléments mobiles. Ce genre de déploiement est fastidieux car il faut passer du temps pour

2.2. LES SYSTÈMES UTILISÉS POUR L'OBSERVATION

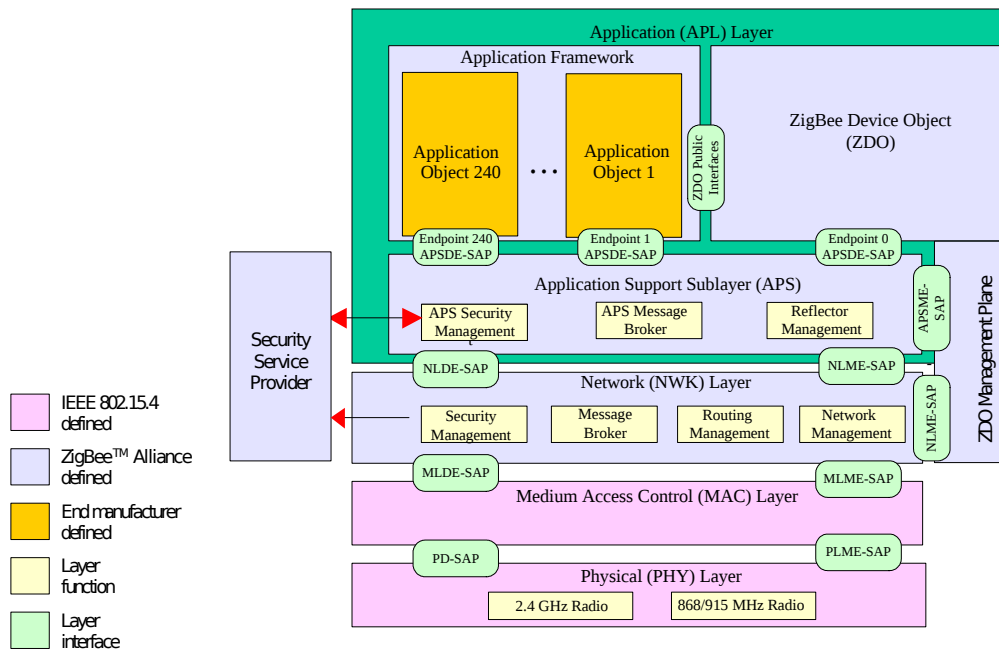


FIGURE 2.2 – Présentation de la pile protocolaire ZigBee tirée de [2]

installer chaque équipement. Cette contrainte de déploiement est beaucoup moins présente quand on veut étudier une zone. Les éléments communicants peuvent être jetés sur la zone facilitant ainsi cette phase.

La mobilité des nœuds rajoute une autre contrainte que le déploiement. Le mouvement des sujets observés n'est pas nécessairement connu. Par conséquent, la topologie du réseau est inconnue. Dans le contexte des capteurs, on différencie les applications *mostly-off*, où les capteurs se réveillent, récupèrent leur mesure, reçoivent éventuellement des données, transmettent et se rendorment, des applications *mostly-on*, où les nœuds restent éveillés en permanence pour capter des mesures ou pour découvrir des voisins potentiels. On conçoit que les réseaux mobiles vont avoir recours à des protocoles *mostly-on*.

2.2.1.2 L'architecture protocolaire

La principale contrainte dans les réseaux de capteurs sans fil est la consommation énergétique. Une fois que le réseau est déployé et configuré, ce dernier doit durer des mois voire des années. Dans cette optique a été défini le standard IEEE 802.15.4 [16] qui spécifie les mécanismes utilisés par les protocoles de bas niveau.

Différentes piles protocolaires existent et reposent sur l'IEEE 802.15.4. C'est le cas du standard ZigBee défini par la ZigBee Alliance, dont la pile protocolaire est représentée sur la figure 2.2, et de la technologie IPv6 Low power Wireless Personal Area Networks (6LoWPAN) définie

2. PRÉSENTATION DES SYSTÈMES D'OBSERVATION

par l'Internet Engineering Task Force (IETF) [39]. Le principal objectif de ces protocoles est d'utiliser au mieux l'énergie pour faire durer le plus longtemps possible l'activité d'un réseau de capteurs.

2.2.1.3 L'interconnexion

Les WSN transmettent le plus souvent leurs données vers des nœuds particuliers qui jouent un rôle de puits. Ceux-ci servent de passerelle d'interconnexion entre le réseau de capteurs et un autre réseau. De la même manière que les terminaux d'un WSN peuvent être statiques ou mobiles, les puits peuvent rester à un endroit précis, se déplacer dans une certaine zone ou visiter successivement différents capteurs.

2.2.2 Les satellites d'observation

Les satellites d'observation sont pour la plupart situés sur des orbites basses. Avoir recours à des satellite à orbite basse permet de diminuer la puissance nécessaire à la transmission vers ces derniers depuis le sol.

2.2.2.1 Motivations et applications

Les satellites utilisés pour l'observation de la Terre captent des images au moyen de différents dispositifs, les stockent sur une mémoire embarquée puis déversent la totalité des données lorsqu'un centre de contrôle est à portée. Les applications de télédétection ne présentent pas de fortes contraintes de délai. En effet, le réseau n'est jamais connexe et une station sur Terre doit attendre le passage d'un satellite afin de lui transmettre les informations. De la même manière, le satellite n'est pas en permanence en vision directe avec un centre de contrôle.

Les missions d'observation utilisant des satellites sont majoritairement des missions scientifiques. Leur intérêt est de récolter un maximum d'information sur un milieu, ou une population afin de réaliser un suivi de l'évolution des paramètres observés.

2.2.2.2 Les caractéristiques du réseau

Les missions de surveillance ayant recours à des satellites partagent des caractéristiques communes d'un point de vue réseau.

En plus des satellites à orbite basse, les réseaux utilisés comportent des stations au sol, les stations de réception et les centres de contrôle. Certaines missions peuvent également avoir recours à des stations émettrices sur Terre. C'est le cas de la mission Argos, où les satellites réceptionnent les messages émis par les balises. Les satellites d'observation peuvent également faire partie de constellations de satellites de communication ou bien s'interconnecter avec constellations ou des satellites géostationnaires.

Le Consultative Committee for Space Data Systems (CCSDS) a défini une architecture protocolaire récapitulant les protocoles qui pouvaient être utilisés dans le cadre de transferts de

2.2. LES SYSTÈMES UTILISÉS POUR L'OBSERVATION

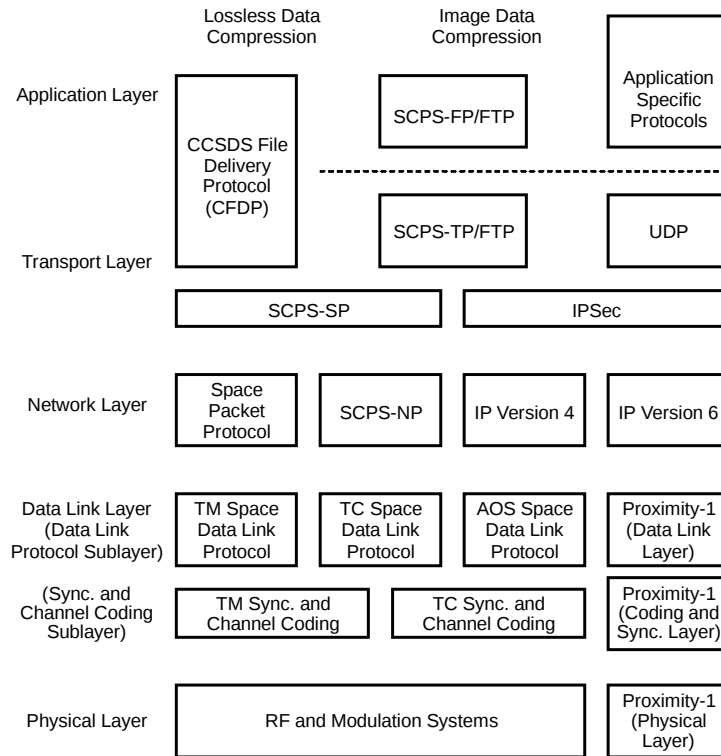


FIGURE 2.3 – Piles protocolaires utilisables pour les communications spatiales tirées de [3]

données dans un contexte spatial. Les piles protocolaires utilisables sont représentées sur la figure 2.3 [3]. Les protocoles de bas niveau sont spécifiques au contexte spatial, alors qu'à partir de la couche réseau, des protocoles plus répandus tels qu'[IP](#) ou [UDP](#) peuvent être utilisés. Le [CCSDS](#) a également défini ses propres protocoles de haut niveau, adaptés au contexte satellite pour la transmission de fichiers, comme le Space Packet Protocol qui peut être utilisé comme protocole de niveau réseau ou de niveau applicatif [40, 41]. Le principal objectif des protocoles définis par le [CCSDS](#) est d'utiliser au mieux la bande passante.

2.2.2.3 Les satellites multi-missions

Des satellites comme UK-DMC ou Earth Observing-1 ([EO-1](#)) sont des satellites qui ont embarqué plusieurs charges utiles. Le premier était doté de dispositifs de télédétection, qui constituaient sa charge principale, ainsi que d'une charge secondaire connue sous le nom de Cisco router in Low Earth Orbit ([CLEO](#)) [42, 43]. Le but de cette seconde charge était de tester la faisabilité d'étendre [IP](#) et en particulier la commutation bord dans l'espace. [EO-1](#), dont la charge utile principale est constituée d'un spectromètre, a embarqué pour mission secondaire, une charge [DTN](#) afin de tester les performances des [DTN](#) pour les missions scientifiques d'observation de la

Terre [44].

2.3 Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre les grandes familles de missions d'observation. Nous avons également montré que leur regroupement pouvait être réalisé en fonction des contraintes applicatives qui, de plus, correspondent à des problématiques réseau, comme par exemple, le délai, la bidirectionnalité des liens, le besoin en bande passante, etc. Les principales technologies utilisées pour ce genre de missions ont été rappelées afin de mettre en évidence les contraintes liées au scénario d'étude. Nous allons maintenant analyser la littérature des propositions correspondant à notre contexte.

3 Les réseaux tolérants au délai

3.1 Depuis les débuts : un réseau interplanétaire ...

L'observation de l'environnement ne cesse de croître et elle peut s'effectuer au moyen de satellites d'observation et autres sondes spatiales. Il est nécessaire de comprendre les enjeux de ces missions. Lorsqu'une sonde d'exploration est envoyée dans l'espace pour étudier un astre lointain, le temps de propagation est très important et les protocoles utilisés doivent être adaptés à ce délai.

3.1.1 La tolérance au délai

Le recours à des protocoles utilisés à grande échelle permettrait de simplifier la conception et le déploiement de nouvelles missions. Les protocoles classiques de l'Internet ne sont pas en mesure de répondre aux exigences imposées par des scénarios tels que ceux évoqués précédemment [45, 46]. Par exemple, les communications avec des sondes comme Rosetta ont des Round-Trip Time (RTT) supérieurs à 1H30. Des solutions pour pallier ces longs délais sont apparues comme le recours aux Performance Enhancing Proxy (PEP) [47], qui découpent une connexion TCP en plusieurs segments et ne respectent pas la sémantique bout-en-bout des connexions TCP. C'est ainsi que l'InterPlanetary Network Research Group fut créé, dans le but d'apporter des solutions aux problèmes rencontrés lorsque l'on veut déployer un réseau interplanétaire. Ce groupe proposa un Internet Draft [48], définissant l'architecture DTN. Un nouveau groupe fut alors créé, le Delay Tolerant Networking Research Group, et la Request For Comments (RFC) qui fut acceptée était écrite par ce groupe [49]. L'architecture DTN est parfaitement adaptée aux infrastructures pâtissant de longs délais et de longues interruptions. C'est pourquoi nous nous concentrons sur l'étude des protocoles appartenant à cette architecture.

3.1.2 L'architecture DTN

3.1.2.1 Un réseau d'overlay

Dans une architecture DTN, contrairement à une architecture Internet classique, certaines hypothèses ne sont pas nécessaires pour garantir que la communication fonctionne. Par exemple,

3. LES RÉSEAUX TOLÉRANTS AU DÉLAI

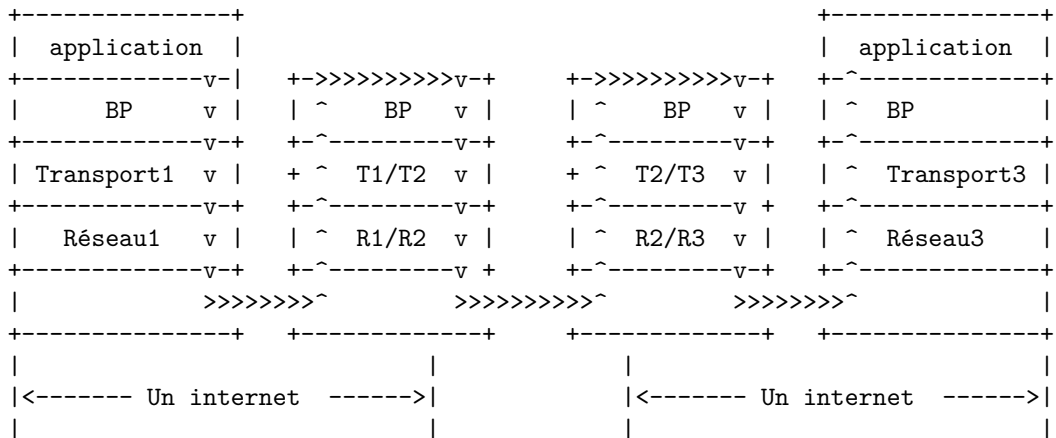


FIGURE 3.1 – Le Bundle Protocol comme réseau d’overlay [4]

le temps d’aller-retour peut être grand ; il se peut qu’à un instant donné, il n’y ait pas de route entre la source et la destination ; tous les nœuds n’ont pas à implanter la pile [TCP/IP](#). Le fonctionnement d’une architecture [DTN](#) repose sur le principe de commutation virtuelle de messages en s’appuyant sur un mécanisme de Store and Forward. Le stockage des données peut durer plus longtemps que dans les réseaux classiques et la mémoire utilisée doit être adaptée à ces longues périodes de stockage. Ces opérations sont réalisées au moyen d’un protocole d’overlay, le Bundle Protocol [4]. De la même manière que l’Internet interconnecte plusieurs réseaux, le Bundle Protocol vise à interconnecter plusieurs internets. Ceci signifie que les seuls besoins pour permettre à un tel réseau de fonctionner est de s’assurer que le Bundle Protocol est présent à la source et à la destination, ainsi qu’au niveau des nœuds jouant le rôle de passerelle entre deux réseaux aux piles protocolaires distinctes. La figure 3.1 résume cette caractéristique du Bundle Protocol.

3.1.2.2 Le Bundle Protocol

Les champs des Bundle Protocol Data Units (Bundles) utilisent la notion de Self-Delimiting Numeric Value ([SDNV](#)) [50]. La majorité des champs, y compris les identifiants source et destination, ont donc une taille variable. Ceci permet de ne pas avoir des champs trop courts ou au contraire des champs remplis de valeurs inutiles. Les Bundles sont estampillés avec une date de création ainsi qu’une date d’expiration, permettant ainsi de retirer du réseau un Bundle pour lequel on n’aurait pas reçu d’accusé de réception avant la fin de sa durée de vie. Le *late binding* consiste à ne pas imposer l’interprétation de l’identifiant d’un terminal dès la source. En effet, certaines portions de l’Uniform Resource Identifier ([URI](#)) [51], pourraient être interprétées à plusieurs reprises et différemment sur les divers nœuds du parcours. La fiabilisation est possible

grâce à l'utilisation de la notion de *custodian*. La fiabilité n'a pas à être mise en œuvre de bout-en-bout. De la même manière que les Bundles sont échangés, les *custody* peuvent être transférés [52]. La notion de *custodian* et *custody* vient du fait qu'un nœud devenant un *custodian* pour un Bundle doit prendre soin de ce dernier. Le transfert de *custody* signifie qu'un nœud ne devient un *custodian* que s'il est capable de conserver le *custody* jusqu'à ce qu'un autre nœud ne prenne le *custody* ou que le Bundle ne soit délivré. Ainsi, la fiabilisation est faite bond par bond. Les nœuds implantant le Bundle Protocol sont en mesure de tolérer de longs délais ainsi que de longues interruptions de liens. Cette capacité est utile pour les applications de type interplanétaire ou ayant recours à des liens intermittents, comme avec les satellites à Orbite Basse LEO [53].

3.2 ...jusqu'à nos jours : les réseaux opportunistes

Les liens intermittents ne sont pas réservés exclusivement aux satellites LEO. Les applications avec des terminaux mobiles comme dans ZebraNet, réseau pour la surveillance des zèbres, souffrent également d'interruptions [10].

3.2.1 La tolérance aux interruptions

Dans un contexte où la majorité des nœuds sont mobiles, l'utilisation du Bundle Protocol comme un overlay n'est plus suffisant. En effet, il n'est pas garanti qu'il y ait, à l'intérieur d'un même réseau, une connectivité suffisante permettant de se passer du Bundle Protocol. Il est possible d'utiliser d'autres solutions pour parvenir au même résultat [54]. Cependant, dans un contexte où les informations peuvent provenir de différentes sources et de différents types de réseaux, le recours à des protocoles ubiquitaires permet de créer un réseau plus simple à gérer que si une multitude de solutions spécifiques étaient mises ensemble. Désormais, le Bundle Protocol se retrouve sur la majorité des nœuds d'un même réseau, car les interruptions ne se produisent plus sur quelques liens critiques, mais sur la quasi-totalité du réseau.

3.2.2 L'indéterminisme des contacts

Les réseaux DTN mobiles, par opposition aux réseaux DTN à long délai dû au temps de propagation, doivent faire face à des contacts aléatoires. Non seulement l'existence d'une route entre la source et la destination n'est pas garantie à tout moment, mais lorsqu'un chemin permet, suite à une série de contacts, de transférer des données entre une source et une destination, il n'existe aucune garantie permettant d'affirmer que ce chemin existera dans le futur [55]. De plus, contrairement au contexte satellite, il n'existe pas de formule permettant de calculer le délai séparant deux contacts consécutifs avec le même nœud ou avec un autre.

Dans un tel contexte, les métriques analysées sont le taux de délivrance, le délai de délivrance et l'overhead. La métrique principale est le taux de délivrance. Si le taux de délivrance est trop

faible pour être représentatif, alors les deux autres métriques ne présentent aucun intérêt. Ainsi, afin d'augmenter le taux de délivrance, plusieurs protocoles utilisent la réplication. Ce mécanisme consiste à créer une copie d'un message plutôt que de commuter le Bundle. Le délai de délivrance est le temps mis par la première copie du message pour atteindre la destination. L'overhead est le rapport entre le nombre de copies de Bundles et le nombre de Bundles délivrés.

3.3 Le routage DTN

Le routage DTN est le garant de la connectivité du réseau. Le choix du routage est donc un facteur important sur les performances. Il faut analyser, en fonction du contexte, le routage le plus adapté en regardant les différentes métriques évoquées précédemment. Les protocoles de routage traditionnels, qu'ils soient proactifs, comme Destination Sequenced Distance Vector (DSDV) [13] ou Optimized Link-State Routing (OLSR) [12], ou réactifs, comme Ad-hoc On-demand Distance Vector (AODV) [15] ou Dynamic Source Routing (DSR) [14], permettent de calculer des routes sur des sous-parties d'un réseau DTN. Malheureusement ces protocoles ne s'appliquent que sur les sous-composantes connexes du réseau [56]. Il est donc nécessaire d'analyser des protocoles et algorithmes de routage capables de prendre en compte ces discontinuités temporelles afin d'obtenir des routes rendant connexe l'ensemble du réseau. Nous présentons ici les différents types de routage qui présentent un intérêt pour cette thèse.

3.3.1 Le routage prédictible

Dans un contexte de réseau interplanétaire, les orbites étant connues, les dates et durées de chaque contact peuvent être prédéterminées. Ainsi, en chargeant les tables de contacts dans chaque entité appartenant au réseau, un algorithme de routage est capable de déterminer la meilleure route à emprunter. Avec le Contact Graph Routing (CGR) [57], il est possible d'établir une route en minimisant les opportunités de transmissions perdues. CGR s'applique également à toute topologie où le mouvement des nœuds est déterministe. CGR s'adapte aux applications utilisant des satellites LEO [53]. En effet, on peut aisément déterminer la durée de contact d'un satellite LEO depuis n'importe quel endroit sur Terre [58]. CGR utilise un algorithme qui sélectionne comme prochain bond celui qui possède sur sa route le contact qui finira le plus tôt. Cependant, une telle méthode peut amener à des boucles de routage. En appliquant l'algorithme à la date d'arrivée du contact, les boucles de routage disparaissent [59].

Le routage fondé sur des tables de contacts peut également servir à sélectionner une route dont le délai de bout en bout est minimal. En associant des structures algébriques aux graphes représentant l'évolution de la connectivité d'un réseau, il est possible de déterminer la route optimale dans une constellation de satellites LEO Store And Forward [60]. Les réseaux ne se résument pas à des graphes statiques ou dynamiques ; il faut également prendre en compte les contraintes liées à la qualité de service et aux congestions.

Ce n'est pas parce que le contexte permet de calculer les routes à l'avance, qu'on ne peut pas utiliser d'algorithmes de routage dynamiques. Imaginons que dans une constellation de satellites à orbite basse, un lien soit indisponible. Le routage devant emprunter ce lien ne fonctionnera pas tant que le lien restera inutilisable ou jusqu'à ce que le routage soit recalculé et propagé à tous les terminaux. Afin d'éviter les pertes pendant cette période de reconfiguration, les auteurs de [61] ont proposé un algorithme de routage qui n'utilise pas le fait que les contacts sont déterministes. Sur une constellation de type Orbcomm, ils ne transmettent des Bundles que si la prochaine passerelle est plus proche de la destination que la courante. Ils comparent leur proposition à des solutions DTN classiques utilisées dans des contextes opportunistes.

Ces solutions fondées sur un routage prédictible, présentent une contrainte, les contacts doivent être déterministes. Nous allons donc maintenant nous intéresser aux routages dans des contextes non-déterministes.

3.3.2 Le routage non-déterministe

Dans un contexte où les contacts sont opportunistes, les routages présentés précédemment ne s'appliquent pas. Il faut donc utiliser d'autres types de routage. Une classification de ces routages est proposée dans [62]. Les trois catégories de routages sont celles reposant sur la réplication, le quota et la transmission. Les routages utilisant la transmission s'opposent aux deux autres catégories car aucune copie de Bundle n'est effectuée. La différence entre ceux fondés sur la réplication et ceux fondés sur le quota est que dans les premiers le nombre de répliques est influencé par le nombre de terminaux dans le réseau.

3.3.2.1 Les routages fondés sur la réplication

Nous commençons par les routages reposant sur la réplication. Le plus connu d'entre eux est le routage épidémique [63]. Ce protocole, au travers de l'utilisation de vecteurs résumant les messages véhiculés par un nœud parvient à délivrer des messages dans un contexte où il n'existe pas de route entre la source et la destination. En cas de contact, un nœud reçoit les messages qu'il n'a pas et que l'autre possède. Ce protocole est gourmand en termes de ressources, même si le nombre maximum d'échanges peut être limité par un champ. La durée des contacts n'étant pas infinie, l'ordonnancement des messages a une influence sur les résultats.

C'est le cœur du fonctionnement de MaxProp [64], où chaque nœud conserve un vecteur de vraisemblance des rencontres avec chacun des autres.

À chaque contact, les deux vecteurs sont échangés. Ainsi, chaque terminal calcule le coût du chemin en passant par l'autre nœud impliqué dans le contact pour rejoindre la destination et ordonne ses messages pour faire en sorte que les premiers transmis soient ceux ayant le meilleur coût. Le but de MaxProp est bien de maximiser la rentabilité d'un contact. En effet, si un contact dure assez longtemps pour échanger tous les Bundles, alors la première étape n'apporte rien. Des améliorations peuvent enrichir MaxProp comme le recours aux accusés de réception qui permet

3. LES RÉSEAUX TOLÉRANTS AU DÉLAI

de libérer la mémoire utilisée par des Bundles déjà délivrés. Cependant, MaxProp a besoin de connaître *a priori* le nombre de nœuds dans le réseau.

Le protocole Resource Allocation Protocol for Intentional DTN (**RAPID**), considère le routage DTN comme un problème d'allocation de ressources [65]. Pour cela, les auteurs ont recours à la notion d'utilité d'un Bundle. Cette utilité prend différentes expressions en fonction de la métrique qui doit être améliorée. Les problèmes considérés par les auteurs sont la minimisation du délai moyen, du nombre de Bundles dont la durée de vie arrive à échéance et du délai maximum. Pour chaque contact, des informations propres au nœud sont échangées avec son voisin. À l'aide de ces informations, on utilise l'amélioration de l'utilité d'un Bundle, répliqué vers ce voisin, divisé par la taille de ce Bundle. Les Bundles sont ensuite répliqués par ordre décroissant d'amélioration de l'utilité. Les performances de **RAPID** sont meilleures que celles de MaxProp mais la complexité des algorithmes mis en œuvre est plus grande.

Le protocole Probabilistic Routing Protocol using History of Encounters and Transitivity (**PRoPHET**), quant à lui, utilise une probabilité de rencontre avec chaque nœud ainsi qu'une fonction de vieillissement [66]. Ainsi, lors d'une rencontre, ce sera celui qui aura la plus forte probabilité de rencontrer une destination qui recevra les messages adressés à ce puits. À chaque rencontre, on met à jour les probabilités de rencontrer les nœuds impliqués lors de ce contact. Toutes les autres probabilités subissent la fonction de vieillissement puis sont échangées.

Ces premières solutions mettent en exergue l'utilisation de métriques reposant sur les relations entre les stations. Cette méthode est similaire aux techniques utilisées dans les réseaux sociaux [67]. Dans [68], une nouvelle métrique est introduite. Cette métrique est évaluée entre chaque couple de nœuds et est proportionnelle à la durée où ils sont en visibilité. Les terminaux sont ensuite regroupés en fonction de cette métrique. Pour chaque contact entre deux stations appartenant au même groupe, des probabilités de rencontres sont échangées. Ainsi chaque équipement estime la probabilité du groupe à délivrer le message. Les couples de rencontres n'étant pas nécessairement uniformément distribués, les nœuds n'ont pas la même valeur estimée. Ces valeurs sont échangées et le terminal ayant la plus grande valeur reçoit les messages de l'autre équipement. Leurs simulations réalisées sur des traces réelles de mobilité montrent que ce mécanisme fournit des taux de délivrance élevés et supérieurs à la littérature des réseaux sociaux avec un coût total meilleur ou de même niveau.

La réplication, utilisée à mauvais escient, gaspille des ressources réseau ; que ce soit la bande passante ou la mémoire des terminaux. Afin d'économiser ces ressources tout en conservant un taux de délivrance élevé, les auteurs de [69] proposent d'utiliser les caractéristiques sociales du réseau. En effet, ils utilisent le fait qu'un nœud puisse appartenir à plusieurs communautés. À chaque contact, les terminaux comparent les communautés auxquelles ils appartiennent. S'ils appartiennent à la même communauté et la destination également, les Bundles sont répliqués. Dans tous les cas contraires, les Bundles sont transmis vers le nœud ayant le poids de délivrance le plus élevé. Ces poids sont calculés sur l'historique des contacts avec l'ensemble des équipements du réseau.

Tous ces protocoles s'assurent de transmettre les Bundles dont la destination est le nœud rencontré et de ne pas transmettre des Bundles que le voisin posséderait déjà. Cette stratégie permet de maximiser l'utilité d'un contact. Ces différents protocoles utilisent des mécanismes qui sont consommateurs en ressources, soit en transmission soit en calculs et en stockage d'informations. Ils ne s'adaptent donc pas bien au contexte des capteurs. Il faut donc poursuivre notre panorama.

3.3.2.2 Les routages fondés sur le quota

Comme nous l'avons indiqué précédemment, les protocoles de routage fondés sur le quota limitent le nombre de copies d'un Bundle dans le réseau. C'est par exemple le cas avec le protocole Spray And Wait [70]. Comme son nom l'indique, son fonctionnement repose sur deux phases. Dans la première, les copies sont disséminées dans le réseau au fur et à mesure que les contacts se produisent ; la seconde est une phase d'attente avant de rencontrer la destination. Concernant la première phase, deux méthodes existent : soit le porteur du message transmet une copie à chaque contact, soit ce dernier transmet la moitié des copies qu'il véhicule. Dans les deux cas, la phase d'attente apparaît localement pour chaque porteur, lorsqu'il ne possède plus qu'une copie du Bundle. Ce choix de transmission des copies dans l'ordre des rencontres n'est certainement pas optimal.

La volonté de ne pas gaspiller des ressources se retrouve également dans l'algorithme Opportunistic Routing with Window-Aware Replication (ORWAR) [71]. Il s'utilise avec un protocole Spray And Wait. Les améliorations, par rapport à ce dernier, sont l'ordonnancement des Bundles à la fois pour l'échange et la suppression, et l'estimation du volume maximal de données échangeables lors des contacts. De ce fait, les Bundles plus volumineux que la capacité maximale d'un contact ne seront pas transmis, diminuant ainsi l'overhead. Les messages sont ordonnés par utilité par bit ; ceux avec la plus grande valeur étant les premiers transmis et ceux avec la plus faible étant les premiers supprimés. Les trois classes de priorités définies dans le Bundle Protocol ont été utilisées comme valeurs de l'utilité. Cet algorithme améliore les performances du protocole Spray And Wait. Cependant, le fait d'augmenter le nombre de répliques pour les Bundles ayant une plus forte priorité introduit un biais et rend plus difficile la comparaison. De plus, l'hypothèse considérant que chaque classe de priorité est uniformément distribuée paraît difficilement réaliste.

Les auteurs de [72] ont proposé une méthode pour analyser le délai dans un réseau DTN ayant recours au Binary Spray And Wait. Ils font l'hypothèse que les temps inter-contact entre les nœuds suivent une loi exponentielle. Ils ne considèrent pas les pertes dues à une mémoire pleine. Ils sont ainsi en mesure de modéliser leur réseau par une chaîne de Markov. Les auteurs se concentrent sur le temps moyen mis par un message pour se rendre de la source à la destination. Le fait d'utiliser un protocole tel que le Binary Spray And Wait simplifie les probabilités de transition en comparaison avec un protocole comme PRoPHET. De plus, la non-gestion de l'occupation de la mémoire permet de conserver une chaîne de Markov.

3. LES RÉSEAUX TOLÉRANTS AU DÉLAI

[62] propose d'utiliser une métrique s'apparentant à un taux de rencontre avec tous les autres nœuds du réseau. Cette métrique est calculée localement. Lors d'un contact, les terminaux s'échangent leur "valeur" de rencontre et appliquent un algorithme dont la finalité est de transmettre un nombre de répliques proportionnel au rapport entre leur propre valeur et la somme des valeurs respectives de la métrique. La notion de vieillissement est également utilisée dans la mise à jour de la métrique.

Plusieurs des protocoles présentés utilisent le fait qu'un comportement sans mémoire n'existe pas dans le monde réel et qu'on peut tirer du passé des informations importantes pour l'avenir. Cette hypothèse est importante et nous devons la prendre en considération. L'inconvénient des protocoles à quota est qu'ils peuvent manquer des contacts utiles à cause de la limitation du nombre de répliques.

3.3.2.3 La gestion de la mémoire

Le routage n'est pas le seul paramètre sur lequel on peut jouer pour obtenir de meilleures performances. La gestion de la mémoire est un paramètre important modifiant considérablement le comportement d'un réseau. La politique d'ordonnancement ainsi que la stratégie de transmission permettent de modifier la gestion de la mémoire. Les auteurs de [73] ont proposé plusieurs de ces mécanismes et nous rappelons les principaux ici. Les politiques d'ordonnancement orientées priorité face à la perte sont les suivantes :

- First In First Out (**FIFO**) où les Bundles sont stockés dans l'ordre dans lequel ils arrivent. Cette politique est très simple.
- Most Forwarded (**MOFO**) qui supprime les Bundles ayant été transférés le plus souvent. Cette technique vise à augmenter la dispersion dans le réseau.
- Shortest Lifetime (**SHLI**) qui rejette les Bundles ayant la durée de vie la plus faible. Ces Bundles ont une probabilité de délivrance relativement faible, c'est pourquoi on peut se permettre de les supprimer.

Les stratégies de transmission proposées dans cette thèse font appel à la notion de probabilité de délivrance. Ce concept n'est pas utilisé par tous les protocoles de routage et n'est donc pas applicable tout le temps. Cette étude montre naturellement que le recours à des mécanismes utilisant la prédictibilité des rencontres fournit de meilleurs résultats qu'un mécanisme de type inondation.

Les auteurs de [74] proposent une méthode pour sélectionner les meilleurs Bundles à supprimer pour améliorer le taux de délivrance ou le délai moyen. En fonction de la métrique qu'ils cherchent à améliorer, ils obtiennent une formule permettant de déterminer, lorsqu'une congestion survient, le Bundle à supprimer. Ces formules reposent sur l'hypothèse que la distribution des inter-contacts est exponentielle. Cette hypothèse a été vérifiée sur des modèles de mobilité simples comme le RandomWalk ou le RandomWayPoint et remise en question sur des traces réelles. Dans [75], les auteurs montrent de manière empirique que la distribution des inter-contacts sur des traces réelles suit une loi de puissance pendant un certain temps avant de suivre une décroissance

exponentielle. Afin de choisir quel Bundle devrait être détruit, les nœuds congestionnés ont besoin de connaître, ou *a minima* d'estimer, le nombre d'entités qui ont vu un Bundle ainsi que le nombre de terminaux qui le possèdent encore. Leur politique de suppression des Bundles fournit de meilleurs résultats que les solutions classiques supprimant la fin de la file, le début de la file, le plus frais ou le plus ancien.

La gestion de la mémoire peut servir de mécanisme de contrôle de congestion. Dans les réseaux DTN, certains équipements ont moins de mémoire que d'autres et risquent de saturer plus vite. Les auteurs de [76] proposent un jeu d'algorithmes de sélection de voisins, ainsi que de sélection de Bundles à transférer aux nœuds voisins en cas de congestion. Les Bundles sélectionnés pour être transférés jouent un rôle équivalent aux paquets supprimés lors d'une congestion dans les réseaux classiques. Les différentes politiques considérées pour la sélection des Bundles sont justifiées par des contextes applicatifs. Par exemple, sélectionner le Bundle le plus ancien est utile pour les applications où les données les plus importantes sont les plus fraîches alors que sélectionner ceux placés en tête de file sera utile pour les applications qui mettent en cache des informations. Les auteurs proposent également qu'un terminal puisse faire une requête de *custody* lorsque sa mémoire est libre. Ces mécanismes ne sont satisfaisants que lorsque l'intermittence des liens est faible, ce qui ne correspond pas aux applications considérées.

3.3.2.4 Dans les réseaux de capteurs

Les concepts DTN s'appliquent également aux réseaux de capteurs. Néanmoins, ces concepts présentent un réel intérêt essentiellement dans un contexte de capteurs mobiles.

Dans le cas de réseaux de capteurs statiques, les mécanismes DTN permettent de résoudre les problèmes liés à des réveils aléatoires [77]. Les propositions de réveils coordonnés [37] diminuent l'intérêt d'une solution DTN résolvant les problèmes de réveils aléatoires.

Les réseaux de capteurs mobiles ont une connexité intermittente et très faible. Des modèles analytiques ont été proposés pour des réseaux utilisant la délivrance directe à la destination, le routage par inondation, Spray And Wait et l'historique des rencontres dans ZebraNet [78]. Tous ces modèles ont recours à des simplifications, ainsi qu'à un modèle générique considérant le réseau de capteurs comme un réseau de files d'attente M/M/1/K. Les problèmes liés à la mobilité réelle des nœuds et à une gestion efficace de la mémoire ne sont pas traités par ces modèles.

De tels réseaux de capteurs sont dits opportunistes car les contacts entre les nœuds le sont. Lorsque la mobilité n'est pas complètement aléatoire, les déplacements antérieurs aident à déterminer les meilleures positions et dates pour y placer un point de collecte. Des stations de base mobiles peuvent se rendre en ces points afin d'augmenter le taux de délivrance et diminuer le nombre de transmissions [79]. Lorsque la station de base n'est pas mobile, ces mécanismes ne s'appliquent pas. Un mécanisme tel qu'*Epidemic* avec des extinctions et des réveils périodiques de nœuds permet de collecter les données en diminuant la consommation énergétique [80]. Un compromis doit être réalisé entre les informations sur l'évolution du réseau qui peuvent être collectées et les limitations imposées par les équipements utilisés.

3.4 Conclusion

L'architecture [DTN](#) répond à certains problèmes posés par l'utilisation de technologies hétérogènes. De plus, elle permet de s'affranchir des intermittences sur les liens de communication. Le Bundle Protocol permet d'interconnecter des réseaux distincts mais aussi d'assurer des communications avec des liens intermittents dans des contextes opportunistes.

Les protocoles et algorithmes de routage proposés dans la littérature tirent profit des nombreux contacts entre les nœuds. Certains d'entre eux sont très simples et reposent sur de l'inondation contrôlée alors que d'autres sont très complexes et tirent des rencontres passées, une décision de transmission lors des contacts avec d'autres nœuds.

4 Architectures proposées

4.1 Introduction

Le contexte de cette thèse est l'utilisation conjointe de différentes technologies d'observation pour servir un même but. Ces technologies peuvent réaliser de la télédétection, comme les satellites d'observation ou les ballons stratosphériques, ou réaliser des mesures *in-situ* grâce à l'utilisation de réseaux de capteurs déployés sur la zone à surveiller.

Nous souhaitons qu'à l'avenir les missions d'observation puissent toutes s'interconnecter. Cette volonté diminuera leurs coûts de développement et augmentera la qualité des observations réalisées. En effet, les informations proviendront de diverses sources et se complèteront. Les solutions que nous proposons sont donc envisagées dans un contexte de généralisation. Dans les architectures proposées, nous limiterons autant que possible l'utilisation de propriétés spécifiques à un scénario qui ne se retrouveraient pas dans d'autres scénarios d'observation.

L'objectif de ce chapitre sera donc de définir des architectures protocolaires pour répondre à cette hétérogénéité. Pour faire comprendre nos propositions, nous allons tout d'abord définir un scénario d'étude dont nous justifierons le choix. Son analyse permettra de déterminer les types de contraintes et de problèmes à résoudre.

Les différentes architectures que nous proposerons pourront fonctionner les unes avec les autres. Certaines fonctionnalités ne pourront pas être utilisées en fonction de l'architecture déployée, mais les communications seront toujours être effectuées.

Nous avons étudié un grand nombre de missions et projets d'observation et avons pu en déduire les caractéristiques communes. Les scénarios d'observation présentent tous des contraintes liées à l'environnement considéré et au matériel utilisé pour réaliser les observations. Afin d'apporter des solutions aux problèmes liés à ce contexte, nous restreignons notre étude à un scénario.

Nous décrivons les caractéristiques de notre scénario et soulevons les difficultés liées à ce contexte d'observation. Par la suite, nous proposons des architectures de réseaux prenant en considération les contraintes relevées. Une fois ce cadre de travail défini, nous serons en mesure d'apporter des améliorations aux performances de ce réseau.

4.2 Scénario retenu

Nous sélectionnons un scénario qui permette de couvrir l'ensemble des contraintes qui pourraient survenir sur un tel réseau. Les contraintes rencontrées dans les réseaux de capteurs ne sont pas de la même nature que celles d'un réseau de télédétection. C'est pourquoi le scénario d'étude doit comporter ces diverses contraintes.

4.2.1 Contexte

Le scénario que nous proposons d'étudier ici consiste en la surveillance d'une forêt. Il n'est pas simple d'obtenir des informations sur un tel milieu et c'est pourquoi nous avons choisi de le retenir. Une forêt est peuplée de diverses espèces animales et végétales. Il est possible de suivre l'évolution de ce qui compose une forêt grâce à des satellites ou des réseaux de capteurs.

Dans une forêt, des événements critiques comme les feux de forêt peuvent survenir. En suivant son évolution, on peut détecter ce type d'événements afin d'apporter une réponse rapide et appropriée à la situation. De plus, les informations collectées avant que la crise ne survienne aideront à prévenir à l'avenir le départ de futurs incendies. Les informations collectées après l'incident permettent de suivre la réadaptation de la forêt après une crise.

4.2.2 Trafic

Lors de notre surveillance de la forêt, nous considérons que les capteurs sur place sont équipés de divers éléments captants. Ceux utiles à notre scénario sont des capteurs de température, de taux d'humidité, des anémomètres et des puces Global Positioning System (GPS). Les mesures effectuées par ces équipements fournissent les données essentielles au suivi d'une forêt. Ces informations sont importantes pour les préventions de crise ainsi que pour l'analyse de la vie de certaines espèces.

Nous faisons le choix de considérer que les messages véhiculant les données captées sur le terrain ont une taille d'une dizaine d'octets. Les données captées par le satellite sont des images avec un volume compris entre 27 et 417 Mégaoctets pour SPOT [81]. Il ne fait aucun doute que les données captées par le satellite sont bien plus volumineuses que celles provenant du sol.

Les mesures sont réalisées périodiquement. L'étendue des zones surveillées est grande. Il faudra que le réseau soit en mesure de traiter les données provenant des différentes sources.

Les capteurs disposés sur place peuvent être statiques ou mobiles s'ils sont disposés sur des animaux. De même, à l'intérieur d'une forêt, les évolutions peuvent être lentes, comme la pousse d'arbres, ou au contraire rapides, comme la propagation d'un feu de forêt.

La durée de vie de ces données n'est pas la même selon qu'elles véhiculent des informations critiques ou non. Si un feu se déclare, les messages colportant cette information risquent de se retrouver bloqués suite à un problème survenant sur le réseau, tel un manque de connectivité. Une fois le feu éteint et la connectivité rétablie, il n'est plus utile de relayer ces messages. C'est pourquoi

TABLEAU 4.1 – Tableau résumant les caractéristiques du scénario

Renouvellement du trafic	Périodique
Nombre de trafics	Plusieurs (différentes priorités)
Durée de vie	un jour / une semaine
Types de capteurs au sol	Statiques et mobiles
Volume des données	10 octets (sol) / 100Mo (sat)

nous considérons des durées de vie différentes en fonction du type de trafic.

Dans notre scénario, nous faisons le choix d'avoir recours à plusieurs trafics. Certains d'entre eux seront présents en permanence et permettent de relever des informations sur la forêt afin de réaliser des études sur son évolution. Les données de ces trafics ont des durées de vie longues. D'autres trafics n'apparaîtront que lors de crises comme un feu de forêt. Ces données ont des durées de vie plus limitées.

Nous définissons également plusieurs niveaux de priorité. Un trafic plus prioritaire sera systématiquement servi avant un trafic ayant une priorité inférieure, et ce indépendamment de sa durée de vie résiduelle. Le Bundle Protocol définit actuellement trois niveaux de priorité allant de la plus faible à la plus forte : *Bulk*, *Normal* et *Expedited*.

Les périodes de mesures ne seront pas égales pour les différents types de trafic. Les informations, lorsqu'il n'y a pas de crise, seront collectées moins fréquemment.

Nous synthétisons les choix retenus dans le tableau 4.1.

Notre scénario est double. Il permet de considérer les phases critiques nécessitant une réponse rapide ainsi que la surveillance à long terme. L'intérêt de ce scénario est d'être aisément compréhensible et de regrouper différentes caractéristiques des diverses applications d'observation

Nous allons donc faire l'analyse des situations potentielles et en déduire des contraintes d'un point de vue réseau.

4.3 Contraintes

4.3.1 Contraintes liées à l'environnement

Dans le cas d'une situation de crise, nous risquons de perdre définitivement la connectivité sur certains segments du réseau. Par exemple, si le feu détruit plusieurs capteurs, il ne sera plus possible de récupérer d'informations sur cette zone jusqu'à un prochain redéploiement. Si un nœud critique est détruit, toutes les informations qui devaient transiter par ce nœud sont perdues. Afin de diminuer ces pertes, les données doivent pouvoir être engendrées et transmises plus rapidement en cas de crise. Le réseau doit donc être intelligent et être en mesure d'adapter son trafic aux conditions.

Afin de se prémunir contre la disparition de segments du réseau, la période séparant deux mesures de données diminue en cas de crise. Ce mécanisme induit une hausse sporadique du

volume de données à transmettre. Ce phénomène est susceptible d'engendrer de la congestion sur certains éléments du réseau.

4.3.2 Contraintes liées au matériel

Les satellites d'observation sont situés sur des orbites basses [32, 82, 83]. Les objets situés sur une telle orbite ne sont pas en permanence à la verticale d'un même point sur Terre. De ce fait, le lien entre une station au sol et un satellite LEO n'est pas continu. D'un point de vue réseau, cela signifie que le réseau ne sera pas connexe en permanence. De plus, ces périodes d'interruption sont longues et durent plusieurs heures.

Cette contrainte des satellites à orbite basse soulève la question de l'utilisation de satellites géostationnaires. Cependant, l'orbite géostationnaire étant bien plus lointaine que l'orbite des satellites LEO, la puissance nécessaire pour transmettre serait augmentée de manière considérable. De plus, le nombre de stations sol étant important, afin de garantir la connexité partielle des réseaux de capteurs avec les satellites, l'utilisation d'une orbite géostationnaire induirait une augmentation des coûts. Or nous cherchons à minimiser les coûts de développement et de déploiement. Nous ne retiendrons donc pas le recours à des satellites géostationnaires.

Les satellites n'ayant pas une connexité permanente avec un centre capable de réceptionner les données, devront stocker les données récupérées avant de les retransmettre. Ceci implique que les satellites possèdent des capacités de stockage. Les volumes consacrés aux charges utiles sont de l'ordre de 2 Gigaoctets [83]. La durée de contact entre le satellite et une station au sol varie en fonction de la valeur de l'angle d'inclinaison de ce dernier. Les plateformes telles que Myriade et Proteus ne considèrent que les contacts ayant un angle supérieur à 20° . Les contacts ayant des angles supérieurs à 20° ont une durée supérieure à dix minutes et dépassant peu les 15 minutes [84].

Les satellites LEO ont une période de l'ordre de la centaine de minutes. En revanche, pendant cette durée la planète aura tourné sur elle-même et le satellite ne se situe pas à la verticale de son point d'origine. Étant donné qu'un satellite à orbite basse observe la totalité de la surface de la Terre en 24 heures, il faudrait avoir au minimum 6 satellites afin que les données des réseaux de capteurs soient récoltées toutes les 4 heures, afin de diminuer la période d'indisponibilité des stations sol.

Dans le réseau de capteurs terrestres, les nœuds pourront être statiques ou mobiles. Nous faisons l'hypothèse que les capteurs sont autonomes en énergie. Dans le cas où les capteurs seraient mobiles, cela signifierait qu'ils seraient disposés sur des animaux ou des véhicules. N'ayant pas de connaissance *a priori* sur la fréquence de rencontres de ces éléments, nous ne pouvons pas programmer de réveils de manière adéquate. Afin de ne pas rater des contacts avec d'autres terminaux, nous choisissons de laisser les équipements radio allumés en permanence. Ces équipements constituent la partie la plus consommatrice en énergie.

Dans un contexte où les capteurs seraient statiques, on utilise des réveils groupés afin de diminuer la consommation énergétique. Les problèmes qui pourraient survenir sont une connexité

TABLEAU 4.2 – Tableau résumant les contraintes du scénario

Contraintes	Conséquences
Satellites LEO	Interruptions sur les liens
Possibilité de crise	Diminution de la connectivité, Hausse du trafic
Connectivité partielle	Stockage à bord des satellites
Nœuds mobiles	Contacts sporadiques, Radio allumée en permanence

partielle en cas de crise. On imagine très facilement qu'un désastre tel qu'un feu de forêt ou un tremblement de terre peut endommager certains nœuds. Les terminaux endommagés ne pourront pas être récupérés. En revanche, les capteurs qui utilisaient ces nœuds pour rapatrier leurs données devront soit attendre que la connectivité soit rétablie, soit rerouter leur trafic afin de limiter les pertes par congestion.

Nous synthétisons les contraintes susceptibles d'apparaître dans le tableau 4.2.

4.4 Solutions retenues

Ayant exposé les différentes contraintes liées au scénario, nous allons désormais présenter les choix réalisés pour répondre à ces contraintes. Ceci permettra de justifier le contexte dans lequel nos propositions s'inscrivent.

Le scénario que nous avons retenu présente des spécificités telles que la répétitivité et la périodicité des passages des satellites. Cependant, notre étude appartient à un environnement plus vaste, l'observation. À cette fin, les solutions que nous envisageons n'auront pas recours à des spécificités qui ne se retrouveraient pas dans d'autres contextes. Elles seront ainsi indépendantes des technologies utilisées mais s'adapteront à toutes leurs contraintes.

Les propositions que nous faisons sont adaptées à un contexte d'observation à grande échelle. Comme nous l'avons vu précédemment, les réseaux permettant de réaliser ce type d'observations souffrent principalement d'interruptions et d'un manque de connectivité.

Les architectures que nous proposons s'inscrivent dans la continuité de la volonté du secteur spatial de rompre avec l'ancienne méthode, qui consistait à créer un système optimisé pour une application. Cependant, une telle stratégie présente peu de réutilisabilité en particulier d'un point de vue réseau avec une faible interopérabilité. La définition de protocoles du CCSDS [3, 40] ainsi que la création de mini et micro plateformes satellites [11, 85], dont seule la charge utile diffère, illustre cette volonté d'unification.

4.4.1 Topologie

Afin d'intégrer les différentes contraintes liées aux scénarios d'observation, nous proposons une topologie pour le réseau de notre scénario d'étude. Cette topologie est représentée sur le schéma de la figure 4.1.

4. ARCHITECTURES PROPOSÉES

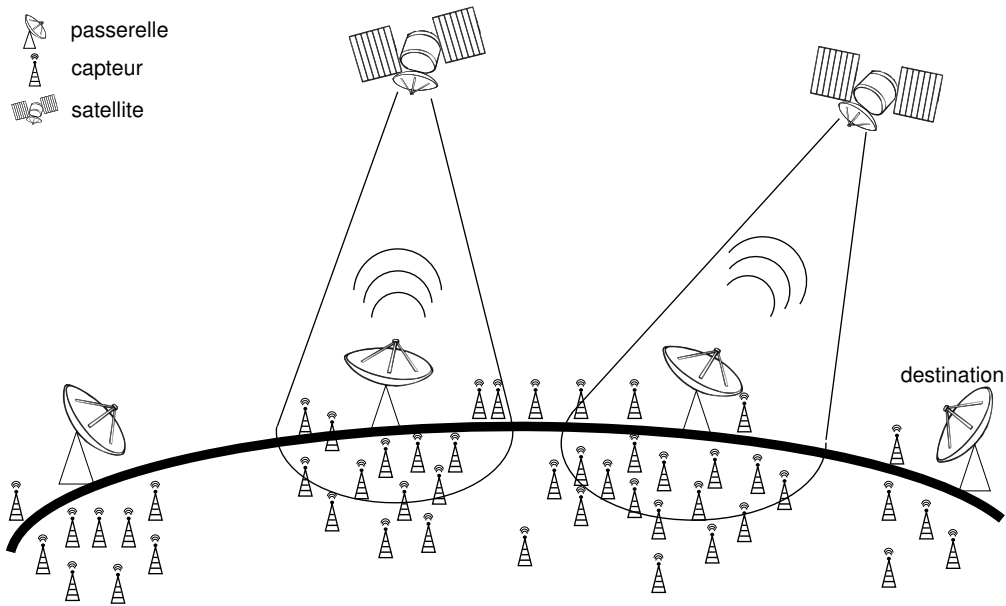


FIGURE 4.1 – Topologie du scénario

Sur le schéma nous représentons les segments sol et spatial de notre architecture réseau. Sur la partie sol du réseau nous considérons plusieurs réseaux de capteurs. Ces réseaux sont reliés au segment satellite via des passerelles qui servent de puits pour la partie sol. Les passerelles peuvent à la fois transmettre et recevoir des données depuis le sol ou le satellite. La station la plus à droite sur le schéma représente la destination. C'est un centre de contrôle pour le satellite.

4.4.1.1 Le segment sol

Les capteurs considérés seront statiques ou mobiles en fonction des besoins de l'application visée. Dans le cas de nœuds statiques, leur répartition pourra être régulière telle une grille ou aléatoire car effectuée suite à un lâcher. Ces deux types de distribution présentent des avantages et des inconvénients. La distribution régulière simplifie les problèmes de configuration, de routage mais augmente le coût de déploiement. En revanche, les lâchers sont très simples, rapides et peu coûteux mais certains capteurs peuvent se retrouver esseulés ou au contraire avec une concentration très forte de voisins. Selon que l'on souhaite avoir la garantie de couvrir la totalité d'une zone ou déployer un réseau très rapidement, on s'orientera vers une distribution régulière ou aléatoire. Cependant, la littérature est abondante sur les réseaux de capteurs statiques et aborde plusieurs problèmes. Les problèmes majeurs sont liés à la gestion de l'énergie [86]. Les solutions proposées pour régler ce problème reposent sur des algorithmes et protocoles de routage qui utilisent la répartition géographique des nœuds [87]. Des techniques de distribution de la charge dans le réseau [88] et de sélection d'arbres de routage minimisant la durée de collecte

des données [89] permettent également de réduire la consommation énergétique. L'énergie peut également être économisée en utilisant une portée de transmission optimale [90] et en découpant le réseau en un nombre de groupes optimal [91].

Si l'on souhaite surveiller une zone de la taille de la forêt des Landes de Gascogne, il faudrait un très grand nombre de capteurs. Plus la portée maximale des capteurs est grande et plus faible sera le nombre de capteurs utiles. Pour la forêt évoquée précédemment, il faudrait près d'un million de capteurs pour couvrir toute sa superficie. Nous considérons que ce nombre sera diminué en ne déployant les capteurs que sur des zones à risque élevé ou difficiles d'accès. Nous choisissons de déployer des réseaux de capteurs dotés de plusieurs milliers d'éléments. Les capteurs seront capables de transmettre leurs données vers une ou plusieurs passerelles satellite. Ainsi, si une passerelle n'est plus disponible, les algorithmes de routage pourront s'adapter afin que les données ne soient pas perdues. Lorsqu'une passerelle n'est plus joignable, alors le réseau peut le détecter car la dernière date à laquelle les données ont pu être transmises vers cette passerelle est antérieure à la date du dernier relevé de mesures. Néanmoins, le déploiement de plusieurs passerelles par réseau de capteurs en augmenterait considérablement le coût. Cependant, on peut envisager que des capteurs mobiles puissent collecter les données de capteurs fixes dont le puits ne serait plus opérationnel. Les meilleurs capteurs mobiles seront choisis en fonction de la durée moyenne qui leur est nécessaire pour joindre une passerelle.

Pour notre étude, nous considérons que les capteurs statiques et mobiles communiquent vers une unique passerelle. L'adaptation des mécanismes proposés sur la partie capteurs du réseau peut s'envisager aisément. En effet, ces stations ne sont pas les destinations des données. Nous considérons des capteurs statiques qui permettent de surveiller les environnements à risque [92] et des capteurs mobiles avec lesquels la surveillance d'animaux est réalisable [10]. Nous pourrions utiliser les capteurs mobiles comme relais entre deux segments non connexes d'un réseau de capteurs. Les capteurs statiques pourront également servir de relais vers la station de base afin d'augmenter le taux de délivrance.

4.4.1.2 Le segment satellite

Concernant la partie satellite, nous considérons plusieurs satellites LEO d'observation. Ces satellites sont en mesure d'échanger des données avec les passerelles et de capter des données via leurs instruments de mesure. Nous ne considérons pas de satellites de télécommunications pour faire en sorte que notre architecture soit autonome.

Les informations échangées sur le réseau sont des messages de contrôle et de données. On inclut dans le contrôle, la signalisation permettant de déterminer les routes entre les nœuds et les accusés de réception des données. Les données sont des relevés de température, d'humidité, etc. Ces informations ne représentent pas un important volume. Cependant, il faut considérer qu'il y aura plusieurs milliers de ces données présentes dans le réseau. À ces données s'ajoutent les images satellite, qui sont plus volumineuses mais moins nombreuses que les données précédentes.

4.4.2 Choix technologiques

Les capteurs que nous utiliserons au sol seront de type MicaZ. Nous les avons choisis pour leur portée de 100 mètres en extérieur [93]. Ces éléments ont une mémoire de 512 kilooctets réservés pour les mesures. Avec nos données contenues sur 10 octets, ces terminaux pourront stocker plusieurs dizaines de milliers de données.

Ces terminaux ont des capacités mémoire limitées, avec 128 kilooctets pour implanter les piles protocolaires. Les transmissions s'effectuent avec une fréquence comprise entre 2400 MHz et 2483,5 MHz. Le débit de transmission est de 250 kbits/s. Nous avons à notre disposition quelques capteurs de ce type, que nous pourrions utiliser afin de réaliser des implantations et des expérimentations.

Pour les satellites, nous avons choisi d'utiliser des satellites d'observation. Ces derniers sont situés sur des orbites basses et sont donc en mesure de réaliser des clichés de meilleure qualité que des satellites sur des orbites plus lointaines. Ces satellites LEO possèdent un segment sol composé de plusieurs stations. Nous nous inspirons des technologies utilisées par les satellites Spot 5 [94], Pléiades 1 [82], SAC-D et EO-1 [95]. Leurs orbites se situent entre 650 et 850 kilomètres.

Dans le cas d'une réutilisation future avec une plateforme commune, nous donnons les caractéristiques importantes de Myriade. Les transmissions s'effectuent principalement dans la bande S. La chaîne de télécommande possède un débit utile de 20 kbits/s alors que la chaîne de télémétrie a un débit bien supérieur à 625 kbits/s. Cette plateforme possède également une télémétrie à haut débit fonctionnant en bande X à 16,8 Mbits/s. La mémoire embarquée est de 16 Gbits [11].

Les stations au sol pouvant dialoguer avec les satellites utilisant des plateformes Proteus ou Myriade utilisent la bande S. Seule une station de réception utilise la bande X et cette station est dédiée à Myriade. Concernant les autres stations, elles sont composées [96] :

- du réseau Icones, constitué de deux stations en bande S ;
- de six stations du réseau fonctionnant à la fréquence de 2 GHz ;
- des centres de contrôle multission et d'essai.

Avec un satellite comme Pléiades, le débit de la télémétrie est très grand, de l'ordre de 450 Mbits/s. Il en va de même pour la capacité mémoire qui est bien plus élevée que dans le contexte des capteurs. Étant donné que les satellites doivent contenir des données propres à leurs missions et représentant un volume considérable, nous choisissons de ne retenir qu'une faible portion de la mémoire du satellite pour stocker les données collectées par les réseaux de capteurs.

Nous effectuons un choix sur ces différents paramètres que nous résumons dans le tableau 4.3.

Un des inconvénients dans l'utilisation conjointe de satellites LEO et d'un nombre limité de stations est le manque de connexité. Les dates de passage des satellites ainsi que leur capacité sont connues. Cependant, dans un contexte où un trafic prioritaire est présent sporadiquement, il est possible qu'un satellite soit saturé par une station. Ainsi, les stations suivantes sur le chemin du satellite, n'auront pas l'opportunité de transmettre leurs données. Le fait d'avoir recours à

TABLEAU 4.3 – Paramètres retenus

Débit capteurs	250 kbits/s
Débit lien satellite	100 Mbits/s
Capacité mémoire capteurs	500 ko
Capacité mémoire satellites	50 Mo
Nombre de capteurs par réseau	1000-10000
Nombre de passerelles satellites	5
Nombre de satellites	5

plusieurs satellites ne résout pas le problème car le prochain satellite peut également ne plus avoir de mémoire disponible. De plus, des données prioritaires pourraient ne pas être servies si le satellite a rencontré auparavant une station qui aurait saturé sa mémoire.

Il apparaît donc un problème d'accès aux ressources du satellite. De plus, lorsque le volume de trafic augmente, on ne peut garantir que les stations y accèdent de manière équitable. Il faut donc envisager de traiter ces problèmes d'accès aux satellites, lorsque le volume des données à transmettre augmente.

4.4.3 Architecture protocolaire

Nous présentons désormais les protocoles utilisés sur une ou plusieurs parties du réseau.

Nous avons mis en exergue les principales contraintes du réseau de notre scénario, le manque de connectivité et les longues interruptions de liens. Des protocoles comme [IP](#) ne sont pas en mesure de les gérer. Si un lien est indisponible, alors le datagramme est perdu. Un protocole fiable tel que [TCP](#) se chargera des retransmissions. Mais les durées de ces interruptions sont trop grandes pour que [TCP](#) soit efficace. C'est pourquoi nous avons décidé de nous concentrer sur les réseaux [DTN](#).

Le Bundle Protocol qui répond aux exigences des réseaux [DTN](#) est en mesure de gérer les principales contraintes énoncées. De plus, ce dernier permet d'interconnecter des réseaux aux architectures protocolaires distinctes.

4.4.3.1 Segment satellite classique

Dans un premier temps, nous avons envisagé une architecture protocolaire capable de traiter les intermittences des liens avec les satellites. Nous représentons les piles protocolaires des divers équipements importants sur la figure [4.2](#).

La pile du capteur utilise la norme IEEE 802.15.4 pour les couches basses puis la couche réseau du standard ZigBee et enfin une couche applicative. Ensuite la passerelle satellite réalise l'interconnexion au niveau applicatif et encapsule les données dans un Bundle (Unité de Donnée Protocolaire du Bundle Protocol). Les applications que nous considérons ne nécessitent pas forcément de fiabilité dans l'échange de données ; ce sont essentiellement des mesures renouvelées. C'est pourquoi les Bundles sont encapsulés dans des datagrammes [UDP](#) puis [IP](#). Les

4. ARCHITECTURES PROPOSÉES

Application	Application	Application	Application	CFDP	CFDP
	Bundle Protocol	Bundle Protocol	Bundle Protocol		
	UDP	UDP	UDP		
Réseau ZigBee	Réseau ZigBee	IP	IP	Space Packet Protocol	Space Packet Protocol
802.15.4 MAC	802.15.4 MAC	TM/TC	TM/TC	TM/TC	TM/TC
802.15.4 Phy	802.15.4 Phy	RF	RF	RF	RF
capteur	passerelle		satellite		destination

FIGURE 4.2 – Architecture gérant l’interconnexion avec le satellite

TABLEAU 4.4 – Avantages et inconvénients de la première architecture

Avantages	Inconvénients
Adressage simple	Destination dépendant du satellite
Interruptions prises en charge	Impossibilité de contacter passerelle depuis satellite
Peu d’impacts sur l’architecture classique	Satellite sert de passerelle applicative

couches basses du segment satellite sont des protocoles définis par le [CCSDS \[3\]](#) et adaptés aux transmissions de données.

Nous considérons que la charge utile du satellite lui permet de récupérer les données contenues dans les Bundles. Ces données sont ensuite transmises grâce à l’utilisation du CCSDS File Delivery Protocol ([CFDP](#)) pour transmettre les fichiers vers le centre de contrôle.

Cette première architecture constitue un compromis ; elle ajoute peu de fonctionnalités aux satellites d’observation et ne se révèle pas trop envahissante. En effet, les segments traditionnels capteur – puits et satellite – centre de contrôle sont inchangés. Cependant, cette architecture limite les utilisations possibles d’un tel réseau et il est nécessaire que la charge utile du satellite soit capable de traiter les données des Bundles afin de les stocker comme des fichiers. Cette architecture présente l’avantage d’ajouter une pile protocolaire uniquement sur le lien entre les passerelles et les satellites. Cela simplifie les problèmes d’adressage et de routage. En revanche, les données ne pourront être délivrées qu’au centre de contrôle du satellite. Il n’est pas possible d’indiquer une autre destination pour ces données. Nous résumons les avantages et inconvénients de cette architecture dans le [tableau 4.4](#).

4.4.3.2 Satellite intégré

Nous envisageons une deuxième architecture protocolaire permettant de résoudre certains inconvénients de la première. Cette architecture est représentée sur la [figure 4.3](#).

La différence entre cette deuxième architecture et la précédente est la présence du Bundle Protocol sur tous les équipements du segment satellite. Contrairement à la solution précédente, le satellite n’a pas à désencapsuler les informations contenues dans les Bundles. Il stocke directement

Application	Application	Application	Application	Application	Application
	Bundle Protocol	Bundle Protocol	Bundle Protocol	Bundle Protocol	Bundle Protocol
	UDP	UDP	UDP	UDP	UDP
Réseau ZigBee	Réseau ZigBee	IP	IP	IP	IP
802.15.4 MAC	802.15.4 MAC	TM/TC	TM/TC	TM/TC	TM/TC
802.15.4 Phy	802.15.4 Phy	RF	RF	RF	RF
capteur	passerelle	satellite		destination	

FIGURE 4.3 – Architecture permettant de contrôler tout le segment satellite

TABLEAU 4.5 – Avantages et inconvénients de la deuxième architecture

Avantages	Inconvénients
Réseau satellite DTN	Implantation de fonctionnalités supplémentaires dans le satellite
Passerelles joignables	Impossibilité de contacter les capteurs depuis l'extérieur

les Bundles. De ce fait le satellite est désormais en mesure de retransmettre ces Bundles vers d'autres entités. Auparavant, l'engin spatial ne pouvait transmettre les données qu'à une seule destination, le centre de contrôle. Il est désormais possible de considérer le satellite comme un nœud DTN à part entière. Cette architecture modifie la pile protocolaire classique ainsi que le fonctionnement du satellite. Nous résumons les avantages et inconvénients de cette deuxième architecture dans le tableau 4.5.

Les deux premières architectures présentent toutes deux le même inconvénient. N'ayant pas d'adressage commun de bout-en-bout, les capteurs doivent explicitement transmettre leurs informations à une passerelle. Cette passerelle se chargera de retransmettre les informations vers le centre de contrôle d'un satellite ou vers une destination spécifiée grâce au Bundle Protocol.

4.4.3.3 Un seul réseau

Concernant le segment capteurs, il est nécessaire de limiter les niveaux protocolaires afin de minimiser l'utilisation de ressources mémoire. C'est pourquoi nous n'avons pas considéré dans un premier temps utile d'ajouter le Bundle Protocol sur cette portion du réseau. Cependant, les applications présentant un contexte de capteurs mobiles épars souffrent également de longues interruptions. C'est ainsi que nous sommes arrivés à la définition de l'architecture protocolaire de la figure 4.4.

Sur cette dernière architecture protocolaire nous avons ajouté le Bundle Protocol aux capteurs. Les capteurs sont désormais en mesure de stocker des données qu'ils n'ont pas eux-mêmes captées. Nous avons précisé qu'étant donné la faible capacité mémoire des capteurs, il fallait limiter le nombre de protocoles utilisés sur ces équipements. C'est pourquoi nous ne proposons pas d'utiliser de couche réseau telle que 6LoWPAN. En effet, le protocole 6LoWPAN [39] n'apporte

4. ARCHITECTURES PROPOSÉES

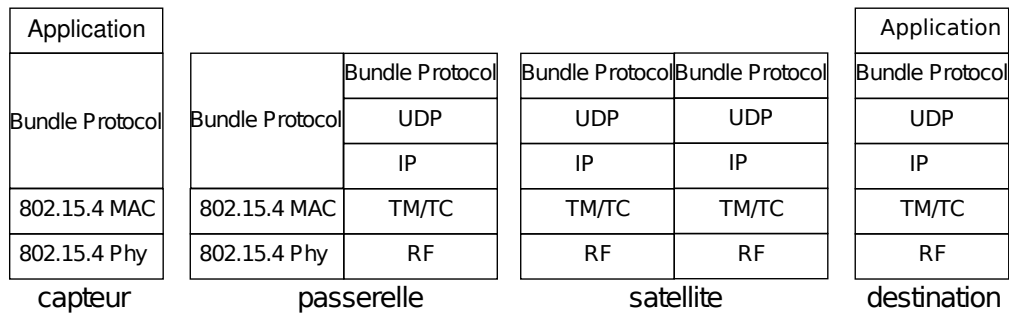


FIGURE 4.4 – Architecture gérant tous les segments

TABLEAU 4.6 – Avantages et inconvénients de la troisième architecture

Avantages	Inconvénients
Réseau DTN	Overhead sur satellite
Tout équipement joignable	Limite mémoire sur capteurs

rien de plus à notre architecture et ne permet pas de gérer les longues discontinuités. Le Bundle Protocol permet effectivement de nommer toutes les entités d'un réseau. De plus, les champs indiquant la source et la destination sont des SDNV. Leur taille peut donc être faible afin de réduire l'overhead sur la partie capteurs.

L'inconvénient principal de cette architecture est qu'elle consomme une partie de la capacité mémoire des capteurs. L'ajout d'un niveau protocolaire utilisant plusieurs mécanismes comme la gestion des *custody*, du stockage ou des rapports consomme des ressources mémoire. Cependant dans un contexte où les nœuds sont mobiles, il est nécessaire que les terminaux puissent stocker des données en provenance d'autres sources afin d'augmenter la probabilité de délivrance.

Il sera utile d'être en mesure de sélectionner les meilleures données à échanger et à stocker. Une telle solution permet de mieux utiliser les ressources. De même, l'utilisation de mécanismes d'accusés de réception augmente l'utilisation de la mémoire ; en revanche elle permet de diminuer les transmissions de Bundles qui ont déjà rejoint une passerelle.

Avec la troisième architecture nous considérons que le Bundle Protocol est déployé sur tous les équipements faisant partie du réseau. Nous ne l'envisageons plus comme un protocole d'*overlay*, reliant des réseaux très différents, mais comme un moyen de s'affranchir des contraintes engendrées par les scénarios à longues interruptions.

L'utilisation du Bundle Protocol sur la totalité du réseau permet de considérer les passerelles comme un relais et non plus comme la destination des données en provenance du réseau de capteurs. Ce relais joue néanmoins un rôle de *custodian* et permet de diminuer la charge dans le réseau de capteurs en indiquant que les Bundles ont rejoint la partie satellite du réseau. Le dernier nœud à avoir véhiculé les Bundles remis à la passerelle les retire de sa mémoire.

Les architectures que nous avons proposées se veulent génériques. Nous ne souhaitons pas

fournir des architectures qui soient adaptées à un seul scénario spécifique. Nos différentes architectures et en particulier la troisième s'adaptent à d'autres scénarios. On pourrait par exemple remplacer le satellite par une Mobile Ubiquitous LAN Extension ([mule](#)), les passerelles pourraient devenir mobiles sans que l'architecture ait besoin d'être modifiée. Nous allons évaluer cette architecture dans un scénario particulier regroupant des contraintes communes à plusieurs missions d'observation.

4.4.4 Implantation du Bundle Protocol sur capteur

Nous avons souhaité prouver que le Bundle Protocol pouvait être implanté sur capteurs. Pour cela, nous avons étudié les implantations existantes avant de réaliser la nôtre.

4.4.4.1 ION

La première implantation que nous présentons est Interplanetary Overlay Network ([ION](#)) développée par le Jet Propulsion Laboratory ([JPL](#)). Cette implantation a été réalisée avec pour objectif d'être déployée dans un contexte de communications interplanétaires. Afin de garantir la robustesse de leurs systèmes, les missions du [JPL](#) n'utilisent pas d'allocation de mémoire dynamique. De plus, lors des missions interplanétaires, il est primordial de récupérer des données, même partielles, c'est pourquoi l'overhead induit par le Bundle Protocol doit être minimal [[97](#)]. [ION](#) est une implantation très complète car elle propose des couches d'adaptation avec [TCP](#), [UDP](#) et Licklider Transmission Protocol ([LTP](#)). Une implantation de [LTP](#) est également fournie.

Cette implantation bien que complète et limitant l'utilisation de mécanismes de mémoire dynamique n'est pas appropriée à notre contexte capteur. L'utilisation de mécanismes de pré-allocation de mémoire convient parfaitement. Néanmoins, l'existence de diverses bibliothèques alourdit le code et ne permet pas de respecter une des contraintes majeures de l'implantation sur capteur, la faible mémoire.

Nous nous concentrons maintenant sur l'implantation de référence du Bundle Protocol.

4.4.4.2 DTN2

DTN2 est l'implantation du Groupe de Recherche [DTN](#) et est conforme aux exigences de [[4](#)]. Cette implantation propose plusieurs couches de convergence parmi lesquelles [IP](#) et Ethernet [[98](#)]. Des couches de convergence vers des protocoles de niveau 3 et 2 prouvent qu'il est possible de déployer le Bundle Protocol sur des protocoles de bas niveau et ainsi limiter l'overhead, ce qui est un aspect important dans le contexte capteurs.

Cette implantation présente cependant d'importants inconvénients pour une adaptation sur capteurs. Contrairement à [ION](#), l'utilisation de la mémoire dynamique n'est pas restreinte. De plus, le langage de programmation utilisé est le C++ qui est trop gourmand en ressources pour un déploiement sur capteurs.

Nous orientons notre étude vers des implantations orientées petits systèmes.

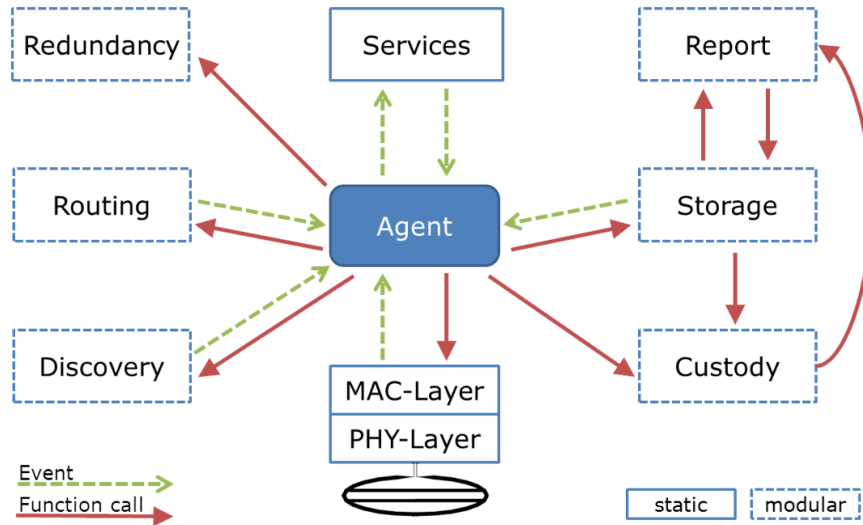


FIGURE 4.5 – Architecture de μ DTN tirée de [5]

4.4.4.3 IBR-DTN

IBR-DTN est une implantation destinée aux systèmes embarqués [99]. Contrairement à d'autres solutions conçues pour les petits systèmes, IBR-DTN peut fonctionner avec des équipements utilisant d'autres implantations du Bundle Protocol [100]. En plus de couches de convergence vers UDP et TCP, cette implantation intègre également une couche de convergence vers le protocole IEEE 802.15.4. Cette implantation est donc adaptée à un contexte capteur.

Le problème est que le code de cette implantation est avec ses 2 Mo toujours plus volumineux que les 128 Ko que nous avons à notre disposition. Nous continuons notre recherche d'implantations qui conviendraient à nos équipements.

4.4.4.4 μ DTN

L'implantation μ DTN est conçue pour convenir aux réseaux de capteurs [5]. Contrairement à DTNLite [101] qui utilise le concept DTN sans implanter le Bundle Protocol et ContikiDTN [102] qui utilise le Bundle Protocol au-dessus d'une couche de convergence vers TCP, μ DTN fonctionne directement au-dessus d'une couche de convergence vers le protocole IEEE 802.15.4. Nous présentons sur la figure 4.5 l'architecture de l'implantation μ DTN.

Cependant, bien que μ DTN diminue à son strict minimum la pile protocolaire, le code reste toujours trop volumineux pour être déployé sur les capteurs que nous possédons. Nous faisons donc le choix de proposer une version allégée et diminuée de μ DTN que nous nommons nanoDTN.

Nous synthétisons dans le tableau 4.7 les résultats de l'analyse des implantations existantes par rapport aux métriques qui nous intéressent pour notre déploiement.

TABLEAU 4.7 – Comparaison des différentes implantations pour déploiement sur MicaZ

Implantation	Langage adapté	Mémoire pré-allouée	Taille du code	Bundle Protocol interopérable	Couche de convergence basse
ION [97]	✓	✓	✗	✓	✗
DTN2 [98]	✗	✗	✗	✓	✗
IBR-DTN [99]	✓	✓	✗	✓	✗
μ DTN [5]	✓	✓	✗	✓	✓
DTNLite [101]	✓	✓	✓	✗	✓
ContikiDTN [102]	✓	✓	✓	✓	✗

4.4.4.5 nanoDTN

Nous avons nommé notre architecture nanoDTN car elle repose sur l'architecture de μ DTN à laquelle nous retirons des fonctionnalités tout en conservant l'interopérabilité basique fournie par μ DTN. Cette implantation étant trop volumineuse pour être portée sur MicaZ, nous l'avons allégée afin de la déployer. Nous avons conservé le système d'exploitation Contiki [103] qui utilise le langage C et permet donc l'utilisation de multiples bibliothèques standard.

Dans un premier temps, nous avons essayé d'utiliser la mémoire la plus volumineuse disponible sur les capteurs. Il s'est avéré que cette mémoire ne pouvait stocker que les mesures réalisées par le capteur. Ainsi, il nous était impossible de déployer le code sur cette mémoire ainsi que d'y stocker les Bundles. Nous avons dû nous résoudre à utiliser la mémoire de 128 ko. Constatant que le dépassement de mémoire était trop important pour espérer optimiser le code, nous avons opté pour une diminution des fonctionnalités.

Nous avons commencé par supprimer les fonctionnalités de rapports. Ces fonctionnalités sont essentiellement utiles à la fonctionnalité de *custody*. De ce fait, nous avons également choisi de retirer la gestion des *custody* qui ne pouvait plus exister sans les rapports. Nous précisons que ce n'est pas parce que nous supprimons la fonctionnalité de *custody* que les nœuds ne pourront plus transporter des Bundles en provenance d'autres sources. La différence est que désormais, un nœud véhiculant un Bundle ne pourra plus le retirer de sa mémoire suite à la prise de *custody* pour ce Bundle par un autre. Un Bundle sera retiré parce que remis à la destination, réception d'accusé de réception pour ce Bundle ou expiration de sa durée de vie.

De la même manière, la fonction de stockage proposait des stockages de Bundles sur deux types de mémoire. Sur notre capteur, nous n'avons qu'un type de mémoire utilisable par le programme. Ainsi, nous avons décidé de supprimer cette possibilité de gestion de la mémoire. Il a par la suite été nécessaire de modifier le code pour allouer la mémoire uniquement avec un type de mémoire. Cela permettait de réduire le volume du code mais limitait les possibilités de stockage des Bundles. Nous avons également diminué la taille de la file d'émission, étant donné que le nombre de Bundles stockés est très faible.

Dans le but de réduire l'empreinte sur la mémoire, nous avons également choisi de supprimer la fonction de *redundancy* qui permettait de ne pas véhiculer de nouveau un Bundle que l'on

4. ARCHITECTURES PROPOSÉES

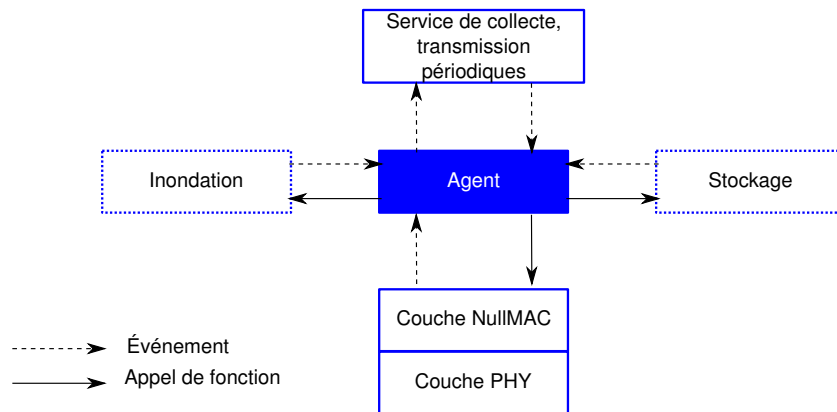


FIGURE 4.6 – Architecture de nanoDTN

aurait déjà délivré.

Nous avons continué notre diminution de fonctionnalités en supprimant la découverte de voisins. Nous optons donc pour des transmissions périodiques de données. Nous avons fait le choix de conserver la radio allumée en permanence pour les capteurs afin de détecter les éventuelles données transmises par d'autres nœuds.

Notre domaine d'applications ne requière pas de fiabilisation. Nous avons donc décidé de n'utiliser qu'une seule couche MAC, qui ne réalise aucune écoute du support et ne fournit aucune fiabilité. Cette couche MAC transmet les données vers le niveau supérieur et le niveau inférieur. Nous avons également considéré que ces capteurs ne pourraient avoir d'autres fonctionnalités que la collecte et la transmission de données. Nous avons donc restreint à un service composé de captage, transmissions périodiques et collecte. Finalement, nous avons restreint la fonctionnalité de routage au routage le plus simple qui soit, un routage par inondation. Ce routage est simple, robuste, gourmand en communications mais très peu en ressources, et donc adapté à notre contexte.

Le schéma 4.6 présente l'architecture de l'implantation nanoDTN.

Après avoir limité toutes les fonctionnalités présentées et adapté le fonctionnement aux capteurs que nous avons à notre disposition nous avons déployé une version allégée du Bundle Protocol sur nos capteurs. Nous n'avons jamais modifié des fonctionnalités inhérentes aux en-têtes des Bundles afin de conserver l'interopérabilité avec d'autres implantations du Bundle Protocol.

Nous avons testé si la formation, la transmission et la réception de Bundles fonctionnaient. Nous avons utilisé deux capteurs et avons constaté que les émissions se faisaient bien de manière périodique. La destination recevait bien les Bundles.

Nous sommes donc en mesure de proposer un Bundle Protocol orienté capteur dans un contexte d'observation. Nous avons transformé une architecture configurable en une architecture modulaire. L'architecture est ainsi adaptée à un contexte précis, et pourra être modifiée si elle doit être utilisée dans un contexte avec plus de mémoire.

De simples modifications permettraient aux nœuds d'avoir accès à des versions allégées des fonctionnalités supprimées. Ainsi, il serait possible d'utiliser des Bundles destinés à toutes les entités pour récupérer la fonction *discovery*. Ces Bundles seraient ceux envoyés de façon périodique et sur réception d'un tel Bundle, un nœud renverrait une réponse contenant une métrique simple permettant à l'émetteur de faire un choix quant à la transmission vers ce nœud voisin.

4.5 Conclusion

Nous avons ici analysé les contraintes inhérentes aux scénarios d'observation. Pour cela, nous avons sélectionné un scénario présentant un maximum de ces contraintes. Après avoir défini les paramètres du scénario, nous avons analysé ses spécificités afin d'en déduire les problèmes réseaux qu'il allait falloir résoudre. La topologie proposée est en accord avec celles existantes dans les missions utilisant des satellites d'observation. Nous proposons différentes architectures novatrices et ayant recours au Bundle Protocol afin de se prémunir des longues interruptions.

Nous avons également proposé une implantation réelle allégée du Bundle Protocol interopérable. Lors de cette implantation, nous nous sommes rendus compte du problème de la limitation mémoire des capteurs. Nous en avons donc déduit pour la suite qu'il faudrait avoir recours à des mécanismes simples ayant besoin de stocker peu d'informations pour fonctionner.

Maintenant que les principaux problèmes du scénario d'étude ont été mis en exergue, nous allons pouvoir proposer des solutions s'appuyant sur les architectures que nous avons définies.

5 Maximisation de la délivrance avec des crises intermittentes

5.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous nous concentrons sur les problèmes liés à la partie satellite du réseau. Nous allons analyser les contraintes engendrées par le scénario ainsi que par les technologies choisies et proposer des solutions qui répondent à ces contraintes.

Nous considérons un scénario de surveillance dans lequel des crises pourraient survenir. Nous ne dimensionnons pas les équipements pour être capables de véhiculer tout le trafic généré lors d'une phase de crise. En effet, dans le cas contraire le réseau serait sous-utilisé la majorité du temps. Nous devons donc être en mesure de contrer les problèmes liés à ces crises.

Nous apportons des solutions adaptées à ce scénario qui peuvent néanmoins être réutilisées dans d'autres contextes. Nous présentons les conditions nécessaires à l'application de nos solutions.

Nous présentons les contraintes existantes sur le segment satellite pour le scénario considéré. Nous proposons de répondre à deux problèmes : donner la priorité à un trafic plus prioritaire en limitant les pertes sur les moins prioritaires et garantir l'équité aux données provenant de différentes stations ayant le même niveau de priorité.

5.2 Contraintes du scénario

Nous rappelons que notre scénario repose sur la surveillance de forêts. À l'intérieur de ces forêts, le risque qu'un feu se déclare est non nul avec des conséquences désastreuses sur l'environnement.

5.2.1 Hausse du trafic sporadique

Afin d'observer l'évolution de la forêt, les capteurs déployés dans la forêt réalisent des mesures périodiques. Nous faisons l'hypothèse que ces équipements sont dotés d'une faculté de

5. MAXIMISATION DE LA DÉLIVRANCE AVEC DES CRISES INTERMITTENTES

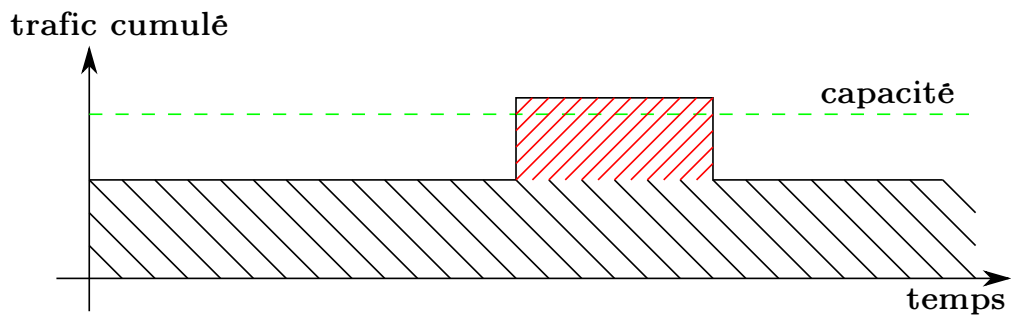


FIGURE 5.1 – Représentation de l'évolution du trafic cumulé des différentes sources en fonction du temps

traitement des informations captées. Ainsi, si une ou plusieurs de ces informations dépassent un seuil enregistré dans la mémoire des terminaux alors ces derniers remontent une alarme.

Lorsqu'une alarme est envoyée, les nœuds vont continuer à capter et transmettre le même type d'informations mais plus fréquemment que lorsque la crise n'est pas présente. Cette augmentation de la fréquence de captage et de transmission a été décidée pour faire en sorte que les données captées pendant la phase critique aient une plus grande probabilité d'arriver à destination. Durant une telle crise, plusieurs éléments du réseau peuvent être endommagés. Des portions du réseau seraient alors dans l'incapacité de communiquer.

Les crises ont une durée très inférieure à la période d'observation du système. Les données transmises durant une crise sont décisives. Ces dernières peuvent en effet indiquer la nature et le lieu d'une crise ainsi que d'autres détails propres à chaque crise, facilitant ainsi le travail des équipes d'intervention. Nous choisissons donc de limiter la durée de vie de ces données et de leur affecter une priorité supérieure à celle des données hors crise. Nous matérialisons cette notion de priorité par la définition de plusieurs classes de Bundles de priorités différentes. Lorsqu'un Bundle a une priorité plus élevée qu'un autre, il doit être servi en premier.

Ces phases de crise sont donc la cause de hausses sporadiques du trafic auxquelles il va falloir faire face. La figure 5.1 présente cette hausse de trafic qui dépasse la capacité du satellite lors de la présence d'une crise.

5.2.2 Réseau à connectivité intermittente

La nature des satellites utilisés ainsi que la topologie de notre réseau font que les passerelles souffriront de longues interruptions. De plus, les stations terrestres sont trop éloignées les unes des autres pour que le satellite puisse relayer directement les informations d'une passerelle vers une autre ou vers la destination.

Les satellites stockeront donc à bord les données et les retransmettront ultérieurement. De ce fait, des passerelles peuvent voir passer des satellites qui n'ont plus de place en mémoire pour accepter leurs données. Si elles contiennent des données prioritaires, alors ces données devront

attendre un prochain passage de satellite pour espérer être véhiculées.

5.3 Amélioration des performances en redéposant le trafic

Une des particularités de notre scénario, propre à toutes les applications utilisant des satellites d'observation, est le défilement des satellites. Nous avons déjà souligné le fait que la mémoire embarquée par ces équipements n'est pas très grande, ou du moins plus précisément la partie réservée aux missions secondaires des satellites dont fait partie notre type d'applications. Ces contraintes sont en revanche négligeables au niveau des passerelles. De ce constat, et de l'analyse du risque de famine pouvant survenir sur certaines stations en cas de crise, nous proposons une solution consistant à utiliser les passerelles au sol comme une mémoire additionnelle des satellites, gérée par ces derniers.

5.3.1 Utilisation des stations statiques comme salle d'attente

Nous proposons ici une politique d'ordonnancement favorisant la transmission des données critiques. Nous souhaitons améliorer le taux de délivrance de ces données dans notre réseau. Notre mécanisme va jouer sur le délai afin de limiter les pertes.

Nous avons baptisé le mécanisme proposé Carreau, à la fois pour CARrier REsource Access for mUle, ainsi que pour le rapprochement avec un coup spécial d'un célèbre jeu. Les conditions pour que Carreau soit utile sont :

- une connexité intermittente ;
- des terminaux mobiles assurant la connexité. Dans notre scénario, ce sont le ou les satellites qui jouent le rôle de mobiles ;
- des passerelles statiques avec des mémoires supérieures ou égales à celles des terminaux mobiles ;
- une répétitivité des passages des mobiles ;
- différentes classes de trafic avec des niveaux de priorité différents.

Carreau ne s'applique que lorsque la mémoire d'un satellite a franchi un seuil lui interdisant d'accepter plus d'un Bundle. Dans ce cas, si une passerelle souhaite transmettre des données plus prioritaires ou avec une durée de vie plus faible que celles qui sont dans le satellite, alors le satellite redépose des données sur la passerelle afin de collecter les données de cette dernière. L'utilisation de ce mécanisme n'est pas restreinte au satellite. Carreau fonctionne avec n'importe quel type de [mule](#). Par la suite, nous désignerons les terminaux mobiles indifféremment satellites ou mules.

Les transmissions vers et depuis le satellite sont coûteuses. C'est pourquoi nous nous efforçons de diminuer le nombre de transmissions.

L'algorithme 1 synthétise la politique d'ordonnancement gérée par le satellite sur les données en provenance des différentes passerelles.

5. MAXIMISATION DE LA DÉLIVRANCE AVEC DES CRISES INTERMITTENTES

Algorithme 1 Politique d'ordonnement de Carreau

Pour chaque réception de Bundle **Faire**

Si mémoire Libre $>$ taille d'un Bundle **Alors**

 stocker Bundle # *stockage du Bundle par ordre décroissant de priorité puis par ordre croissant d'échéance*

Sinon

 Transmettre à la passerelle le Bundle en fin de file # *ce Bundle a la priorité la plus faible et l'échéance la plus grande*

Fin Si

Fin Pour

Le satellite donne ainsi la priorité aux données de la classe la plus prioritaire. À niveau de priorité égal, le satellite favorisera les données ayant la plus faible durée de vie. Les données avec la plus faible durée de vie sont moins à même d'attendre un prochain passage de satellite. C'est pourquoi le satellite redépose les données possédant la plus grande durée de vie car elles ont une probabilité plus grande de ne pas avoir expiré au prochain passage de satellite.

Nous allons maintenant évaluer les performances de Carreau.

5.3.1.1 Modélisation du problème de priorité

Nous considérons que le satellite, ou la *mule*, récupère les données de plusieurs stations terrestres. Nous supposons l'utilisation de plusieurs classes de trafic. Voici les notations que nous utiliserons :

- N , le nombre de Bundles que la *mule* peut transporter.
- m , le nombre de stations terrestres.
- T , la durée d'un cycle de la *mule*.
- $A_{i,j}$, le nombre d'arrivées de la classe de trafic i à la station j pour un cycle donné.
- θ_i , la durée de vie de chaque Bundle de la classe de trafic i .
- C , le nombre total de cycles où une crise est présente.

Nous définissons la durée d'un cycle de la *mule* comme étant la durée séparant deux passages successifs de la *mule* au-dessus de la même station. L'analyse peut se généraliser à un nombre quelconque de mules.

Pour analyser les pertes éventuelles, nous découpons le scénario en deux étapes représentatives. La première étape est l'étude des pertes pendant la crise. La seconde consiste en l'étude des pertes liées au trafic résiduel.

Afin de mieux se représenter le fonctionnement de Carreau, nous définissons deux mécanismes simples de transmission entre les passerelles et la *mule* :

- Transmission Totale (TT), où toutes les stations envoient toutes leurs données quand la *mule* est visible.
- Chargement Total (CT), où chaque station essaie de transmettre ses données tant que la *mule* n'est pas pleine.

- Carreau, où les données non prioritaires à bord de la **mule** peuvent être parquées sur des stations afin que ces dernières puissent transmettre leurs données critiques.

Nous analysons les pertes en fonction du mécanisme utilisé.

5.3.1.2 Pertes pendant la crise

Transmission Totale (TT) Le mécanisme Transmission Totale est le plus simple des trois considérés. Les pertes sont les Bundles excédant la capacité de la **mule**. Le nombre de pertes pour un cycle est n_{TT} :

$$n_{TT} = \max \left(0, \left(\sum_i \sum_{j=1}^m (A_{i,j}) - N \right) \right)$$

Il est évident que ce mécanisme fournit une borne supérieure des pertes pouvant survenir à cause d'une crise. Tout le trafic excédentaire est envoyé vers une **mule** dont la mémoire est pleine.

Chargement Total (CT) Chaque station envoie ses données ordonnées par ordre de priorité puis par date d'expiration. Les données avec l'expiration la plus proche sont transmises en priorité. À partir d'une station d'indice j_p , la **mule** ne peut plus recevoir de données car sa mémoire est saturée. Les pertes se produiront sur les stations après j_p . Ce seront les données dont la durée de vie aura expiré qui disparaîtront. Nous notons $n_{i,j}(r)$, la variable aléatoire du nombre de Bundles appartenant à une classe i restants sur une station j après le passage r de la **mule**. Les Bundles prioritaires ayant une durée de vie plus faible seront les premiers à être retirés du réseau. Nous calculons le nombre de Bundles perdus pendant la crise, n_{CT} .

$$n_{CT} = \sum_i \sum_{j=j_p}^m \sum_{r=1}^C \left[n_{i,j}(r) \times \min \left(1, \sum_{l=r}^C \left\lfloor \frac{\theta_i}{l \cdot T} \right\rfloor \right) \right]$$

Le terme

$$\min \left(1, \sum_{l=r}^C \left\lfloor \frac{\theta_i}{l \cdot T} \right\rfloor \right)$$

permet de déterminer si un Bundle de la classe i présent à partir du passage r de la **mule** a expiré.

Carreau Avec Carreau, nous sommes en mesure de transmettre en premier tout le trafic prioritaire. La **mule** prend depuis chaque station tout le trafic que cette dernière doit lui remettre jusqu'à atteindre j_p . Une fois que j_p a rempli la **mule**, Carreau sélectionne les Bundles ayant la plus grande durée de vie, les renvoie sur la station afin de les y parquer. Ces Bundles restent parqués sur la station jusqu'à un prochain passage de la **mule** ou jusqu'à ce que leur durée de vie expire. Nous notons $n_{parq_{i,j}}(r)$ la variable aléatoire du nombre de Bundles de la classe i arrivés sur la station j parqués au cycle r de la **mule**.

5. MAXIMISATION DE LA DÉLIVRANCE AVEC DES CRISES INTERMITTENTES

Nous calculons le nombre n_{car} de Bundles perdus pendant la crise.

$$n_{car} = \sum_i \sum_j \sum_{r=1}^C \left[n_{parq_{i,j}}(r) \times \min \left(1, \sum_{l=r}^C \left\lfloor \frac{\theta_i}{l \cdot T} \right\rfloor \right) \right]$$

Il nous reste à déterminer les pertes survenant une fois que la crise est résolue.

Nous sommes en mesure de déterminer les pertes lorsque nous connaissons les réalisations des différentes variables aléatoires.

5.3.1.3 Pertes sur le trafic résiduel

Seuls CT et Carreau peuvent avoir des pertes survenant après qu'une crise est terminée. En effet, avec TT, tout le trafic qui excédait la capacité de la **mule** a été perdu. En revanche, les deux autres mécanismes ont laissé une certaine quantité de Bundles sur les stations après j_p dans le sens de parcours de la **mule**.

Dans le cas de CT, à chaque cycle, les premières stations après j_p transmettent au plus $\left(N - \sum_{j=1}^{j_p} A_{i,j}\right)$ Bundles résiduels et frais. S'il ne reste plus de Bundles, sur j_p , nous l'incrémentons et essayons de transmettre à nouveau tous les Bundles présents sur j_p , et ce jusqu'à ce qu'on ne puisse plus l'incrémenter. Quand j_p atteint la valeur de m , le réseau ne souffrira plus de pertes liées à la précédente crise.

Tant qu'il reste des Bundles appartenant à d'autres classes que la classe la moins prioritaire, le réseau peut encore perdre des Bundles lorsque Carreau est utilisé. Ainsi, à chaque cycle, les Bundles les plus anciens de la classe la plus prioritaire sont transmis. Et ainsi de suite jusqu'à ce que la **mule** soit pleine ou qu'il ne reste plus que des Bundles de la classe la moins prioritaire. Lorsqu'il ne reste plus que des Bundles de la classe avec la plus faible priorité, ce sont également les Bundles avec la plus courte échéance qui sont véhiculés. Une fois que le trafic résiduel a été délivré, la crise précédente ne sera plus cause de pertes.

La plupart du temps dans les réseaux DTN, plus un trafic est prioritaire et plus son obsolescence est rapide [104]. Ainsi, afin de ne pas surcharger le réseau inutilement, plus un trafic est prioritaire et plus sa durée de vie est faible. Dans le cas particulier de notre scénario de feu de forêt, les informations relatives à la détection et au suivi de ce feu doivent être reçues rapidement. Recevoir une telle information plusieurs jours après que le feu a eu lieu ne présente aucun intérêt. La durée de vie de ce trafic sera donc inférieure à celle d'un trafic de suivi de la forêt.

5.3.1.4 Exemple

Pour notre scénario, nous considérons deux classes de trafic. Le trafic permanent de suivi de forêt et le trafic critique prioritaire relatif aux feux de forêt. Le trafic permanent est comme son nom l'indique présent durant toute la durée d'opération alors que le trafic prioritaire n'est présent que pendant la durée d'une crise. Aucun de ces deux trafics ne surcharge le réseau. En revanche, la somme de ces deux trafics est susceptible d'engendrer des pertes. Nous considérons

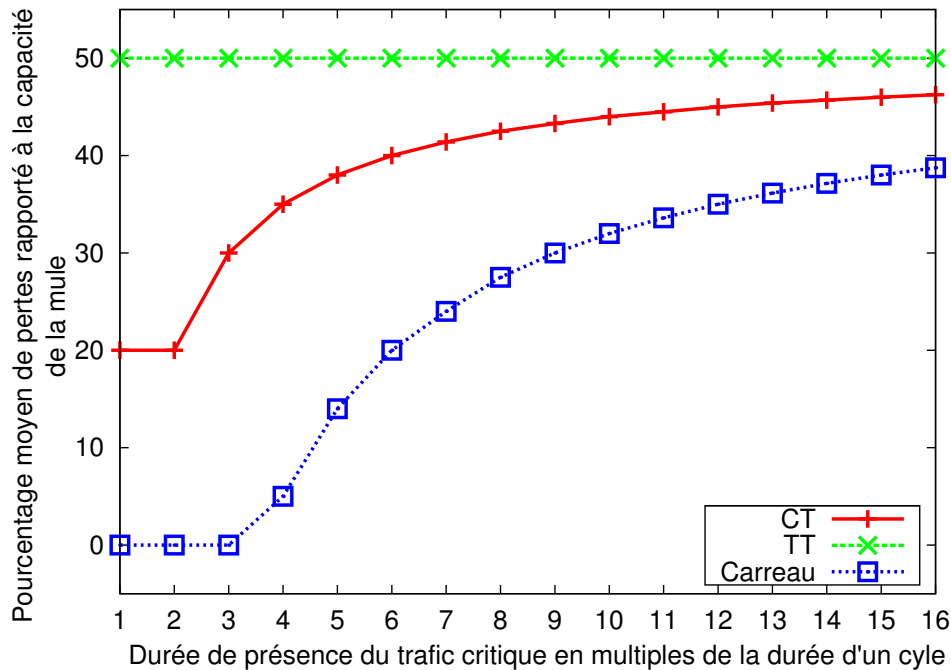


FIGURE 5.2 – Évolution des pertes en fonction de la durée de la crise

dans un premier temps que les trafics sont régulièrement distribués entre toutes les stations. Nous faisons également l'hypothèse que les trafics sont périodiques pour la résolution numérique.

Nous appliquons notre algorithme sur le choix de paramètres suivants. La durée de vie des Bundles de la classe la moins prioritaire est de trois cycles alors que celle des Bundles de la classe la plus prioritaire est de un cycle. La période d'activité de ces derniers est limitée à la durée de la crise. Nous appliquons les formules et algorithmes précédents afin de comparer les résultats des trois mécanismes de transmission.

La figure 5.2 représente le nombre moyen de Bundles perdus par cycle de mule pour les trois mécanismes présentés précédemment. Nous représentons l'évolution de ces pertes en fonction de la durée de la crise. Le trafic le moins prioritaire occupe 90% de la capacité de la mule et le trafic critique 60%. Pendant la durée de la crise nous avons donc un trafic représentant la moitié de la capacité de la mule qui sera soit perdu soit stocké au sol.

Les résultats de la figure 5.2 prouvent que TT est bien le pire mécanisme en termes de pertes. CT améliore cette performance mais présente dès le premier cycle des pertes à cause d'expiration de Bundles de la classe prioritaire. Nous rappelons que tous les trafics sont distribués équitablement sur chaque station sol. Carreau fournit de meilleurs résultats que les deux autres mécanismes car les Bundles de la classe prioritaire sont les premiers à être servis par la mule ; or ces Bundles sont ceux avec la durée de vie la plus faible. Plus la crise dure et plus le nombre de pertes augmente. Des pertes apparaissent sur la classe la moins prioritaire.

5. MAXIMISATION DE LA DÉLIVRANCE AVEC DES CRISES INTERMITTENTES

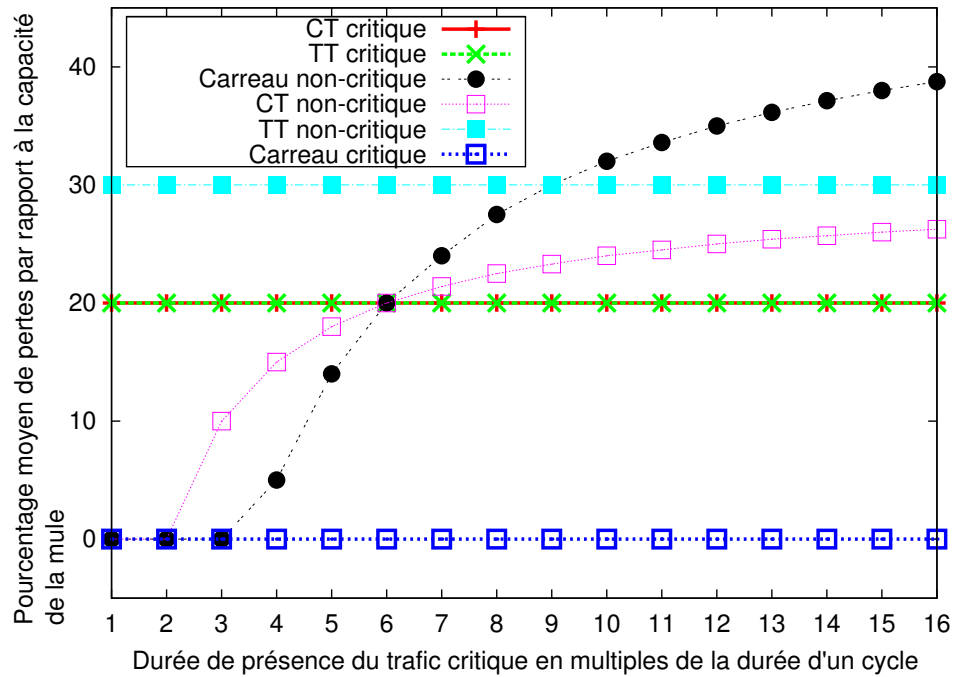


FIGURE 5.3 – Évolution des pertes par classe de trafic en fonction de la durée de la crise

Nous observons les pertes survenant sur les différentes classes de trafic avec la figure 5.3. Nous y constatons qu'ici, Carreau parvient à n'obtenir aucune perte sur le trafic critique et qu'il parvient à retarder au maximum les premières pertes sur le trafic non-critique. Comme nous nous y attendons, nous avons vérifié qu'avec les stratégies TT et CT, les pertes affectent les trafics arrivant sur les passerelles trouvant la mémoire du satellite pleine (non représenté) ; alors que Carreau répartit plus équitablement les pertes entre les passerelles.

Maintenant que nous avons analysé les performances dans le cas d'une *mule* avec différentes classes de trafic, nous allons nous concentrer sur le problème de l'équité des stations sur l'accès aux ressources de la *mule*.

5.3.2 Équité entre les stations

Carreau permet de servir les données prioritaires avant les données classiques, tant qu'il reste des données à faible priorité dans la *mule*. Cependant, dès lors qu'il ne reste plus que des données prioritaires dans la *mule*, Carreau ne permet pas de servir les données prioritaires appartenant aux stations suivantes. L'accès aux ressources n'est donc pas équitable entre les stations au sol. Ceci présente un problème si plusieurs stations détectent une crise et que certaines d'entre elles ne sont pas en mesure de transmettre cette information. Nous modélisons ce problème à l'aide de deux thématiques classiques de théorie de files d'attente : l'impatience des clients et l'ouverture

d'une porte.

5.3.2.1 Modélisation du problème d'équité

Un des principaux problèmes à traiter est la discontinuité du lien satellite. Dans la théorie des files d'attente, ce type de problèmes est représenté par une porte [105]. Les clients arrivent devant une porte qui s'ouvre périodiquement ou aléatoirement. Lorsque la porte est fermée, les clients restent devant la porte jusqu'à ce que celle-ci s'ouvre. Hébuterne a analysé le comportement d'une file avec une porte la séparant du serveur. La condition de stabilité d'un tel système est donnée par la relation suivante : le taux moyen d'arrivée multiplié par la durée moyenne séparant deux ouvertures doit être inférieure au nombre maximal de clients servis durant une ouverture.

Dans notre contexte, les mesures sont réalisées périodiquement. Nous avons donc des messages qui arrivent en grumeau au niveau de la passerelle qui joue le rôle de file d'attente devant la porte. Dans notre système, les arrivées et départs sont considérés comme groupés. Cela revient à dire que nous ne modélisons pas finement la remontée des mesures vers les passerelles, mais supposons simplement que les valeurs collectées pendant la période sont bien présentes au niveau de la passerelle quand la *mule* passe. Les départs peuvent être considérés comme groupés, car dès que la porte est ouverte, la passerelle transmet la quantité maximale possible. Le taux d'occupation de la file dépend des vacances du serveur [106, 107, 108]; dans notre cas, de la période de discontinuité du lien satellite.

Le second problème à traiter provient du choix de ne pas conserver de trop vieux messages afin de ne pas surcharger le réseau avec des données obsolètes. C'est cette obsolescence qui sera modélisée par l'impatience des clients. Movaghar a traité ce problème en considérant à la fois l'impatience jusqu'au début du service et l'impatience jusqu'à la fin de celui-ci [109, 110]. Dans le cas de l'impatience jusqu'au début de service, dès qu'un client commence à être servi, il ne peut plus être perdu par expiration. Nous considérons la *mule* comme un serveur ayant un temps de service différent et fonction de la distance de la passerelle à la destination. Ce sont donc les résultats sur la probabilité d'expirer avant délivrance avec une impatience jusqu'à la fin du service qui s'appliquent dans notre cas.

Nous représentons notre système par un réseau de files d'attente décrit sur la figure 5.4. Nous considérons une unique *mule* afin de simplifier le raisonnement. Nous prouverons par la suite que cette hypothèse n'est responsable d'aucune perte de généralité. Nous modélisons la *mule* par une file intermédiaire par laquelle les Bundles doivent passer avant d'atteindre la destination, jouant le rôle de serveur. Étant donné que notre mécanisme pourra redéposer des Bundles sur les stations, nous avons choisi de représenter un serveur après la *mule* afin de pouvoir modéliser notre proposition Martinet, un protocole autoritaire prêt à sacrifier des trafics au profit d'autres ayant le même niveau de priorité. Les passerelles sont représentées par des files d'attente avec une capacité bien supérieure à celle de la *mule*. Nous considérons que les stations au sol ont uniquement un trafic critique en entrée. Nous représentons les interruptions du lien satellite au moyen de portes dont l'ouverture est périodique. Le nombre de portes est donc égal à la somme

5. MAXIMISATION DE LA DÉLIVRANCE AVEC DES CRISES INTERMITTENTES

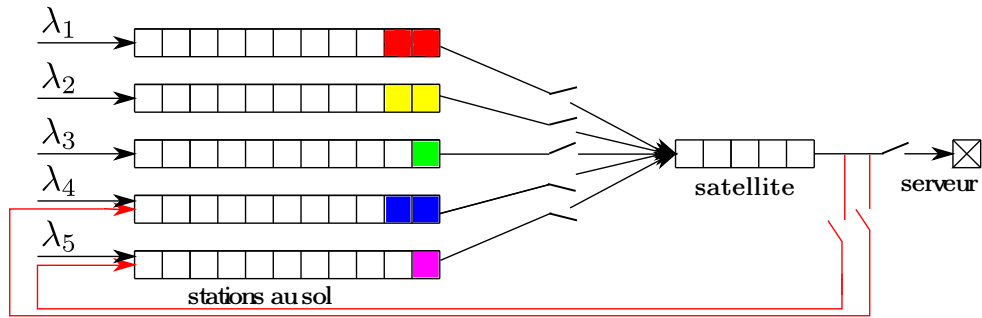


FIGURE 5.4 – Représentation du réseau de files d'attente

du nombre de passerelles et de destinations. Les périodes d'ouverture et de fermeture sont les mêmes pour toutes les portes.

Nous nous concentrons sur la phase de crise et pour cela, les terminaux vont uniquement transmettre du trafic critique. La durée de vie initiale est la même pour chaque Bundle. L'impatience est donc constante. Afin de respecter la condition de stabilité énoncée dans [105], le volume moyen de données entrant sur chaque station entre deux ouvertures de porte est inférieur à la capacité du satellite. Cependant, lors de certains passages du satellite, la somme des trafics entrants sur toutes les stations peut être supérieure à la capacité du satellite. Nous sommes donc en présence d'un système en surcharge ponctuelle.

Nous représentons sur la figure 5.4 le réseau avec la modélisation décrite dans le cas où le nombre de passerelles est de 5, avec un satellite et une destination. Dans ce cas, le trafic transmis par les trois premières stations est suffisant pour saturer la mémoire de la *mule*. La *mule* visite les stations dans le même ordre à chaque passage. Ainsi, pour la durée de la crise, les deux derniers terminaux n'auront pas l'opportunité de transférer leurs données. L'accès aux ressources est donc inéquitable pour les stations et pour les sources de trafic. Dans un contexte de crise, il est nécessaire de circonscrire la zone exacte de la crise. Nous proposons de garantir de l'équité aux stations dans leur accès à la *mule* afin de fournir de l'équité parmi les sources de trafic.

Notre proposition repose sur l'envoi d'un volume de trafic représentant la même portion de mémoire de la *mule* pour chaque source à chaque passage de la *mule*. En agissant de la sorte, nous pouvons affirmer qu'une portion de chaque trafic sera servie pendant une tournée de la *mule*. Sur la figure 5.4, les portes sont représentées par des interrupteurs. Les flèches du bas de la figure représentent les liens entre le satellite et les passerelles. Une fois que la mémoire du satellite est pleine, une négociation est effectuée entre le satellite et les stations restantes afin que le satellite puisse libérer une partie de sa mémoire en redéposant une partie du trafic véhiculé sur les stations au sol afin qu'une partie du trafic présent sur ces dernières puisse être transmis au satellite. Comme le montre la figure 5.4, une boucle permet au satellite de remplacer une partie de son trafic. Dans l'exemple présenté, trois passerelles peuvent transmettre leurs données sans avoir recours à des mécanismes particuliers alors que les deux dernières doivent partiellement

vider la mémoire du satellite avant de la remplir de nouveau avec leurs propres données.

Afin de minimiser les pertes dues au vieillissement du trafic, les Bundles qui seront redéposés en premiers sont ceux avec les durées de vie résiduelles les plus longues. Dans le cas du Storage Routing [76], une telle politique serait nommée *PushFreshetNetworkAge*, car ce sont les Bundles les plus récents qui sont stockés sur les nœuds afin de diminuer la congestion sur le satellite. Cette proposition diminue le nombre d'expirations d'échéances de Bundles.

5.3.2.2 Étude de l'équité

Pour étudier l'équité de notre scénario, nous définissons les paramètres suivants :

- m , le nombre de passerelles ;
- N , la capacité de la mémoire du satellite ;
- C , la capacité de la mémoire d'une passerelle ;
- λ_i , le taux d'arrivée du trafic critique sur une passerelle i ;
- $D_d(i)$, le temps mis par un Bundle pour rejoindre la destination depuis une passerelle i ;
- T , la période entre deux passages du satellite ;
- $A_i(r)$, le nombre d'arrivées sur une passerelle i entre les passages $r - 1$ et r du satellite ;
- θ , l'impatience initiale de chaque Bundle ;
- $i_p(r)$, l'indice de la station où le satellite est saturé à son passage r ;
- $S_n(r)$, le temps de séjour d'un Bundle trouvant n Bundles à son arrivée dans le système ;
- $P_{i,j,t}(r)$, le volume de Bundles arrivés à la station i au passage t lorsque le satellite survole la station j à son passage r ;
- $D_{i,j}(r)$, le volume de Bundles provenant de la station i redéposé au niveau de la station j à son passage r ;
- $D_i(r)$, le volume de Bundles redéposé au niveau de la station i à son passage r ;
- $R_{i,j}(r)$, le volume de Bundles provenant de la station i restant à bord lors du survol de la station j à son passage r ;
- $V_{i,j,t}(r)$, le volume de Bundles arrivés sur i au passage numéro t du satellite et stockés sur j au passage r du satellite.

Nous précisons que $V_{i,j,t}(r)$ est potentiellement modifié après chaque passage du satellite.

Nous supposons que m est inférieur à N , autrement, il serait impossible que chaque station puisse envoyer un Bundle et les $m - N$ dernières stations ne pourraient jamais accéder aux satellites. Si θ est inférieur à $D_d(i)$, aucun Bundle n'atteindra la destination. Tous les Bundles expirent avant de rejoindre la destination. Si θ est compris entre $D_d(i)$ et $T + D_d(i)$, la date d'arrivée des Bundles affecte le nombre de Bundles expirant avant d'atteindre la destination. Afin de simplifier, nous faisons l'hypothèse que θ est supérieur à $T + D_d(i)$.

Si les passerelles avaient la possibilité de s'échanger la quantité de trafic qu'elles génèrent, il serait simple de déterminer si un Bundle peut accéder à la destination. Le problème est qu'avec les variations de trafic et la non connexité du réseau, les passerelles ne peuvent pas s'échanger ce type d'informations. La capacité, pour un nouveau Bundle qui arrive sur une passerelle, d'atteindre

5. MAXIMISATION DE LA DÉLIVRANCE AVEC DES CRISES INTERMITTENTES

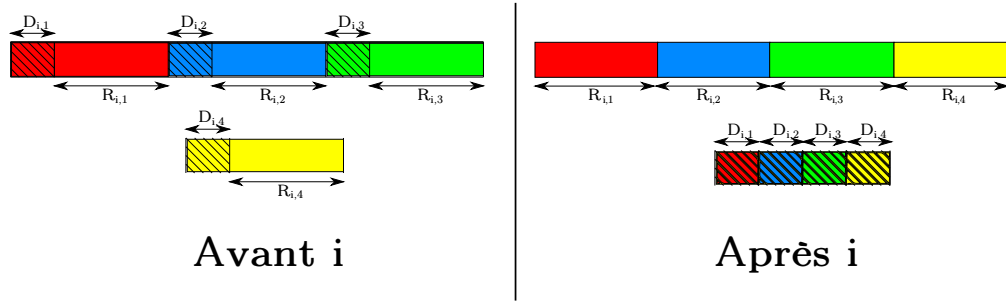


FIGURE 5.5 – Trafic présent dans le satellite avec débits d'entrée égaux

la destination avant que son échéance n'expire dépend de $n(r)$, le volume des Bundles présents dans l'ensemble des files d'attente lors de son arrivée. Nous calculons le volume $n(r)$ de Bundles présents sur l'ensemble des passerelles avant le passage r du satellite :

$$n(r) = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m \sum_{l=1}^{r-1} V_{i,j,t}(r)$$

Nous notons S_n le temps de séjour d'un Bundle trouvant n Bundles à son arrivée dans le système :

$$S_n(r) = \frac{n(r)}{N} \cdot T$$

Si S_n est supérieur à θ , le Bundle ne pourra pas rejoindre la destination. Comme les passerelles ne peuvent s'échanger d'informations sur leur charge, les Bundles ne peuvent être retirés dès leur arrivée. Notre protocole, Martinet présenté par la suite, propose une solution qui fournit de l'équité aux stations sans avoir recours aux informations de charge de toutes les passerelles.

Ces résultats sont indépendants de la distribution des source de trafic, des stations servies, et la date d'arrivée de Bundles.

Le nombre $i_p(r)$ est l'indice de la passerelle qui remplit la mémoire du satellite au passage r du satellite. Le mécanisme proposé s'applique à partir de cette station. Avant la station $i_p(r)$, chaque station terrestre envoie ses données lors du contact avec le satellite. Une fois que le satellite la dépasse, notre protocole Martinet permet aux stations suivantes d'accéder aux ressources du satellite.

La figure 5.5 décrit l'évolution de la mémoire du satellite quand ce dernier survole un nœud i où i est supérieur à $i_p(r)$. Des Bundles en provenance de trois sources distinctes sont présents sur le satellite. Le trafic en bas est celui situé sur la station i . Comme chaque trafic occupe la même proportion de la mémoire, nous retirons la même quantité de chaque trafic présent sur le satellite.

Le trafic redéposé total est D_i . La place libre dans le satellite au passage r est $R_{i,i}$.

Cette mémoire est remplie par les Bundles de la station i . La nouvelle répartition des données est représentée sur la droite de la figure 5.5.

5.3. AMÉLIORATION DES PERFORMANCES EN REDÉPOSANT LE TRAFIC

Si chaque station a un taux d'arrivée différent, λ_i , alors le mécanisme de redépôt est modifié pour conserver l'équité entre les sources tel qu'expliqué dans le paragraphe suivant.

Nous considérons que l'équité dans une telle situation n'est plus de permettre à chaque station d'envoyer le même volume de données à chaque passage du satellite; mais que chaque source puisse transmettre la même proportion de données. Nous avons fait ce choix car si une source a des données plus volumineuses qu'une autre ou un volume de données plus important, alors il nous semble légitime que cette dernière transmette un volume plus important, tant que la proportion d'utilisation de la mémoire du satellite est la même pour toutes les stations. Ce mécanisme repose sur la date d'expiration des Bundles pour un même niveau de priorité. Les Bundles avec la plus grande durée de vie sont les premiers à être redéposés.

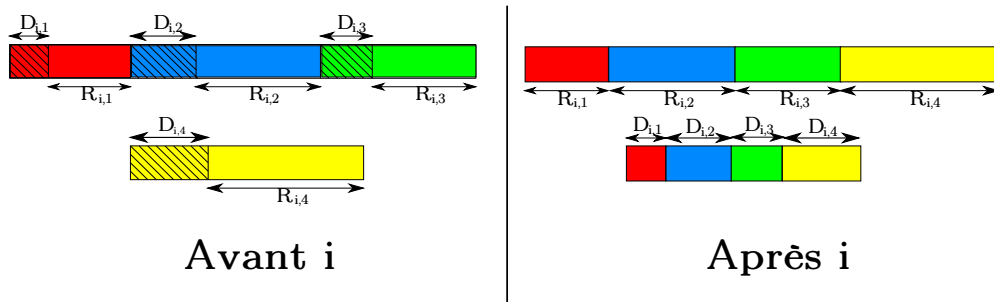


FIGURE 5.6 – Trafic présent dans le satellite avec débits d'entrée différents

La figure 5.6 représente l'évolution de la mémoire d'un satellite lorsque les sources ont des débits d'entrée différents.

La partie retirée, notée $D_i(r)$ dépend de la valeur de $A_i(r)$ et de $V_{i,j,t}(r)$. Chaque station i voit un satellite avec sa mémoire remplie de Bundles présents sur les stations précédentes. Le nombre de Bundles présents sur les stations antérieures à i lors d'un passage r du satellite est :

$$B_i(r) = \sum_{z=1}^{i-1} \sum_{j=1}^{i-1} \sum_{l=1}^{r-1} V_{l,j,t}(r) + \sum_{z=1}^{i-1} A_z(r)$$

Un satellite applique l'algorithme 2 afin de fournir de l'équité aux trafics arrivés sur chaque passerelle. Nous nommons cet algorithme EthiKable, car il permet de conserver l'équité entre des passerelles satellite.

5.3.2.3 Équité face aux pertes

Nous allons nous concentrer ici sur l'étude des pertes. Pour cela, nous allons considérer deux hypothèses. Dans un premier temps, nous supposons que les mémoires des passerelles sont suffisamment volumineuses pour être considérées comme infinies. Dans ce cas, la perte de Bundles sera entièrement causée par des expirations d'échéances. Dans un second temps, nous considérons

5. MAXIMISATION DE LA DÉLIVRANCE AVEC DES CRISES INTERMITTENTES

les capacités des stations finies et les durées de vie des Bundles infinies, pour étudier l'influence des pertes par débordement.

Algorithme 2 EthiKable : Équité pour chaque passerelle

Pour chaque Requête de transmission d'un volume $\sum_{i,t} V_{i,j,t}$ de Bundles d'une passerelle j

Faire

Si $\sum_{i,t} (P_{i,j,t}(r) + V_{i,j,t}(r)) + A_i(r) \leq N$ **Alors**

Accepter la transmission

Sinon

Répéter

Pour $t \leftarrow 1; t \leq r; t++$ **Faire**

Pour $l \leftarrow 1; l \leq j; l++$ **Faire**

Si $t == r$ **Alors**

Déposer $N \times \frac{P_{l,j,t}(r)}{\sum_{i=1}^j (P_{i,j,t}(r) + A_i(r))}$ Bundles appartenant à $P_{l,j,t}(r)$

Sinon

Déposer $N \times \frac{P_{l,j,t}(r)}{\sum_{i=1}^j (P_{i,j,t}(r) + V_{i,j,t}(r))}$ Bundles appartenant à $P_{l,j,t}(r)$

Fin Si

Fin Pour

Si $t == r$ **Alors**

Accepter $N \times \frac{A_i(r)}{\sum_{i=1}^j (P_{i,j,t}(r) + A_i(r))}$ Bundles appartenant à $A_i(r)$

Sinon

Accepter $N \times \frac{V_{i,j,t}(r)}{\sum_{i=1}^j (P_{i,j,t}(r) + V_{i,j,t}(r))}$ Bundles appartenant à $V_{i,j,t}(r)$

Fin Si

Équité atteinte pour trafic créé à t

Fin Pour

Jusqu'à Équité atteinte pour le trafic le plus récent à bord

Fin Si

Fin Pour

Mémoires infinies : Nous faisons l'hypothèse que les mémoires au niveau des passerelles sont suffisamment importantes pour ne pas perdre de Bundles pour la durée de la crise. Afin de simplifier les opérations, nous considérons que les contacts durent assez longtemps pour ne pas limiter la quantité de données transmises.

Tout d'abord, les i_p premières stations ne recevront pas de Bundles redéposés, car la mémoire du satellite ne sera pas saturée, et Martinet n'aura pas à redéposer du trafic. Afin de garantir l'équité entre les trafics, les Bundles redéposés sont ceux avec la plus grande durée de vie résiduelle. Cependant, au prochain passage du satellite, les Bundles redéposés présents sur les stations après i_p ont une durée de vie inférieure aux Bundles véhiculés par le satellite. Donc le satellite redépose tous les Bundles dont la durée de vie est supérieure aux Bundles présents sur les stations au sol.

Durée de vie infinie : Désormais nous supposons que les durées de vie des Bundles sont grandes devant la taille des files d'attente. Nous considérons des mémoires finies. Les pertes seront désormais le résultat d'un débordement de mémoire. Pour toutes les stations situées après i_p , le volume de données ne fait que croître, et des pertes apparaîtront sur ces stations lorsque leur mémoire sera saturée.

Avec une stratégie consistant à se débarrasser des Bundles entrants lorsqu'il y a congestion, le trafic des i_p premières stations n'arrivera jamais à destination. Cela s'explique par le fait que les Bundles devant être redéposés seront perdus car les stations au sol auront leur mémoire saturée. Afin de conserver l'équité entre les stations le plus longtemps possible, nous proposons un algorithme sélectionnant sur chaque passerelle les meilleurs Bundles à perdre en se fondant sur les dates d'échéance de ces derniers.

Afin de simplifier le raisonnement, nous avons considéré un unique satellite. Cependant, l'utilisation de plusieurs satellites ne modifierait pas les résultats précédents, les valeurs des paramètres seraient modifiées, mais pas leur expression. En effet, la période d'indisponibilité du satellite est plus faible avec plusieurs satellites. Le sens de déplacement des satellites ne change pas non plus les résultats. L'ordonnement fondé sur la date d'expiration et le partage des trafics entre les passerelles sont indépendants du nombre de satellites.

Algorithme 3 Sélection des Bundles à perdre pour conserver l'équité

```

 $d_f = 0$ 
 $d_l = d_f$ 
 $t_i =$  Date d'arrivée du premier Bundle
 $t_l = t_i$ 
Pour chaque Arrivée de Bundle Faire
  Si le satellite n'est pas à portée de la station Alors
     $Bdle_{cur} = Bundles.premier()$ 
    Si mémoire saturée Alors
      Si ( $d_l == 0$ ) ou ( $d_l \geq 2 \cdot (t_l - t_i)$ ) Alors
         $d_f = Bundles.dernier().expiration()$ 
         $d_l = d_f$ 
        Si  $t_l == t_i$  Alors
           $t_l = Bundles.dernier().DateArrivée()$ 
        Fin Si
        Supprimer  $Bundles.dernier()$ 
      Fin Si
      Si ( $Bdle_{cur}.expiration() \in [d_f, d_l]$  ou  $Bdle_{cur}.expiration() > d_l$ ) Alors
        Supprimer  $Bdle_{cur}$ 
         $d_l = Bdle_{cur}.expiration()$ 
      Fin Si
       $Bdle_{cur} = Bdle_{cur}.suivant()$ 
    Fin Si
  Fin Si
Fin Pour

```

5. MAXIMISATION DE LA DÉLIVRANCE AVEC DES CRISES INTERMITTENTES

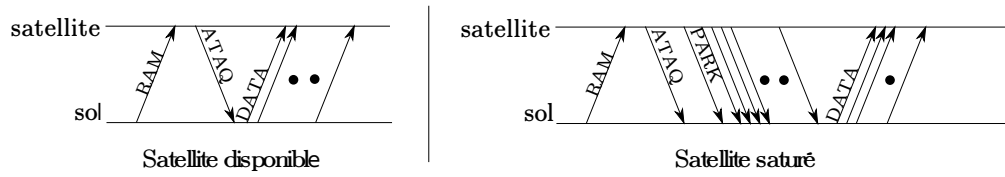


FIGURE 5.7 – Comportement de Martinet en fonction de la place disponible dans le satellite

Notre algorithme 3 consiste à retirer de chaque station congestionnée les Bundles dont la date d'expiration était directement supérieure à celle des derniers Bundles retirés. L'algorithme 3 présente ces derniers mécanismes. Cet algorithme doit être implanté sur chaque passerelle. Nous expliquons ici les principales variables utilisées par l'algorithme 3 :

- Soient d_i et d_l les échéances respectives des premiers et derniers Bundles supprimés.
- Soient t_i et t_l les dates respectives d'arrivée du premier Bundle et de suppression du premier Bundle.
- Soit $Bdle_{cur}$ le Bundle actuellement inspecté et $Bundles$ la file de Bundles telle que le premier Bundle est celui avec l'échéance la plus courte.

5.3.2.4 Spécification de Martinet

Afin de réaliser les différents mécanismes décrits précédemment, nous proposons le protocole Martinet ; ainsi nommé car tel un martinet, il s'emploie à faire travailler dur ceux qui l'entourent pour atteindre un but précis. Ce but, consistant à fournir un accès équitable aux ressources pour chaque trafic, ne peut être géré localement. Lorsque le système est instable (le trafic entrant est supérieur à la capacité du satellite), Martinet doit distribuer les Bundles entre les stations de manière à ce que chaque terminal puisse émettre des données. Martinet demande que les stations au sol consultent la disponibilité du satellite afin que le satellite indique s'il peut accepter les données de cette station ou s'il doit en premier lieu se délester de certains Bundles avant d'accepter ceux de la passerelle.

Pour réaliser cet échange, nous utilisons deux Unités de Données Protocolaires. Une permettant au sol de demander l'accès aux ressources du satellite que nous baptisons Request About Memory (**RAM**) ; et une seconde nommée Answer To Access the Queue (**ATAQ**). La figure 5.7 décrit comment les Bundles sont échangés entre le sol et le satellite en fonction de la place disponible à bord du satellite.

Lorsque le satellite a suffisamment de places libres en mémoire, ce dernier l'indique au sol, qui transmet à son tour toutes les données. Dans le cas contraire, le satellite ne peut accepter le trafic entrant sans redéposer une partie du trafic à son bord. Le satellite indique alors le nombre de Bundles qui vont être redéposés ainsi que le nombre de Bundles qu'il est prêt à accueillir.

Nous avons fait le choix de concevoir le protocole Martinet au-dessus du Bundle Protocol. Les mécanismes utilisés par Martinet requièrent des informations contenues dans les champs des Bundles, telles que les dates de création et d'expiration. Les Unités de Données Protocolaires

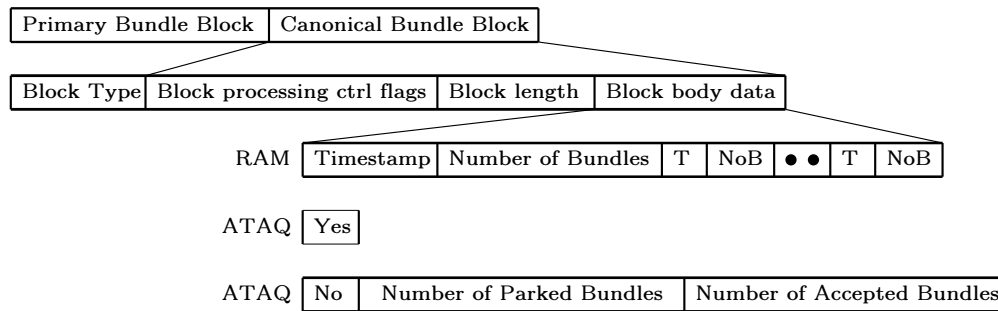


FIGURE 5.8 – Encapsulation des UDPs de Martinet dans un Bundle

utilisées par Martinet sont représentées sur la figure 5.8.

Nous utilisons une valeur pour le *block type* comprise entre 192 et 255. Il est indiqué dans [4] que cet intervalle est prévu pour un usage privé et expérimental. Nous choisissons la valeur 251 afin que les terminaux déployant Martinet sachent à quelle entité remettre ces Bundles. Le *Block body data* contient soit un RAM, soit un ATAQ.

Un RAM est composé d'au moins deux champs :

- *Timestamp* qui indique une date d'échéance ;
- *Number of Bundles* qui fournit le nombre de Bundles qui devraient être transmis avec pour échéance la précédente valeur.

Ces deux champs vont par paire. Un RAM en possède autant que nécessaire pour indiquer chaque groupe de Bundles devant être transmis par rapport à leur date d'expiration.

Un ATAQ est composé d'au moins un champ et d'au plus trois :

- *Answer* indique si Oui ou Non le satellite peut accepter des Bundles sans en redéposer d'autres ;
- *Number of Parked Bundles* indique le nombre de Bundles que le satellite envoie à la passerelle ;
- *Number of Accepted Bundles* indique le nombre de Bundles que la passerelle enverra vers le satellite.

Si le champ *Answer* possède la valeur "Yes", alors le satellite n'a pas à redéposer de Bundles pour accepter ceux que la passerelle souhaite transmettre. En revanche, si la valeur est "No", alors le satellite doit déposer des Bundles sur la passerelle pour en accepter de nouveaux. Ce dernier indiquera alors le nombre de Bundles que la station sol devra recevoir pour qu'il puisse libérer de la mémoire. La passerelle pourra alors transmettre le nombre de Bundles spécifié dans le dernier champ. Lorsque le terminal au sol aura reçu le dernier Bundle devant être déposé, cette dernière commencera la transmission de ses Bundles.

La figure 5.9 présente l'algorithme sur des nœuds implantant Martinet : la passerelle terrestre, à gauche, et le satellite, à droite.

Le minuteur T_0 de la passerelle, à gauche sur la figure 5.9, est utilisé pour n'envoyer des RAM que lorsqu'un nœud capable d'envoyer des ATAQ est joignable. Le minuteur T_1 de la passerelle

5. MAXIMISATION DE LA DÉLIVRANCE AVEC DES CRISES INTERMITTENTES

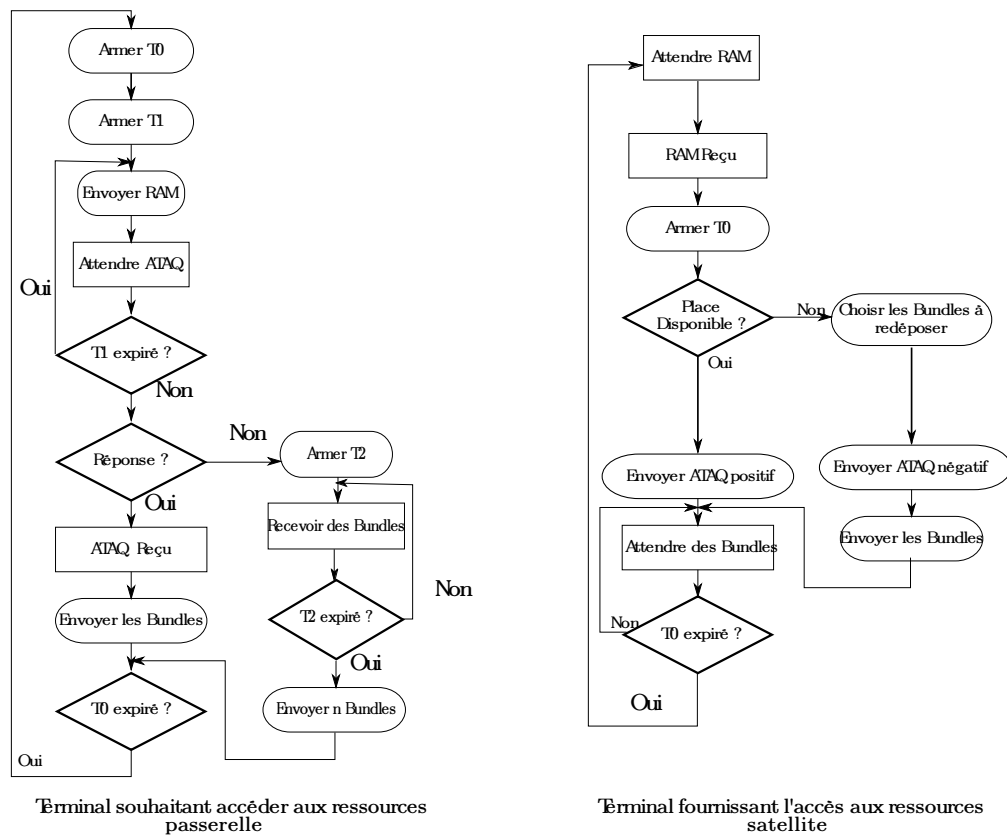


FIGURE 5.9 – Comportement de nœuds implantant Martinet

permet de réenvoyer un **RAM** lorsqu'on ne reçoit pas d'**ATAQ**. En fonction de la valeur du premier champ d'**ATAQ**, le nœud attendra une durée T_2 , correspondant au temps requis pour recevoir les Bundles en provenance du nœud envoyant les **ATAQ** avant d'envoyer ses données ou les enverra directement.

Lors de la réception d'un **RAM**, le satellite vérifie si sa mémoire disponible lui permet d'accepter les Bundles dont le **RAM** fait la requête. Si ce nœud manque de mémoire, il sélectionne les Bundles à redéposer en suivant les mécanismes présentés précédemment pour fournir de l'équité aux différentes sources, puis envoie un **ATAQ** négatif. Après cette émission, le terminal transmet les Bundles sélectionnés vers la station ayant envoyé le **RAM**. Si la mémoire disponible est suffisante, le nœud envoie un **ATAQ** positif et s'apprête à recevoir les Bundles. Un minuteur T_0 est initialisé, pour représenter la durée du contact, juste avant la transmission de l'**ATAQ**.

5.4 Expérimentations

Nous allons maintenant présenter les résultats des tests que nous avons effectués. Ces expérimentations comportent deux parties : des simulations et un banc de test avec des applications réelles et un satellite émulé.

5.4.1 Simulations

Afin de valider nos propositions Carreau, EthiKable et Martinet, nous avons eu recours à des simulations. Le simulateur que nous avons choisi d'utiliser est *The One* [111]. Ce simulateur est adapté pour tester les algorithmes de routage et d'ordonnancement et plus particulièrement dans le cadre de réseaux **DTN**. Un des inconvénients majeurs de ce simulateur est l'abstraction complète des mécanismes et protocoles de bas niveau. Néanmoins, pour notre contexte, nous pouvons considérer que des protocoles de bas niveau traitent les problèmes liés à la contention, aux collisions et autres interférences. Ce simulateur présente l'avantage de permettre l'utilisation de différents modèles de mobilité dont certains reposent sur le parcours de cartes. Il est également possible d'avoir recours à des traces réelles.

5.4.1.1 Scénario pour Carreau

Dans le cadre de la validation de Carreau, nous faisons le choix d'un réseau composé de 5 passerelles et de 5 satellites. Les passerelles relaient le trafic en provenance de réseaux de capteurs. Afin de simuler le trafic des réseaux de capteurs, les passerelles collectent chacune des Bundles de 1 Mo. La taille de ces Bundles est justifiée comme étant la somme des données de 100 octets collectées par dix mille capteurs. Nous avons choisi ces valeurs pour la taille du réseau de capteurs et pour les messages que ces derniers véhiculent car au-delà le réseau de capteurs présenterait des problèmes de collecte des données. Pour modéliser les deux classes de trafic, nous créons un trafic périodique sur chacune des passerelles, présent en permanence ainsi qu'un

5. MAXIMISATION DE LA DÉLIVRANCE AVEC DES CRISES INTERMITTENTES

TABLEAU 5.1 – Paramètres des simulations pour Carreau

Nombre de satellites	5
Mémoire des satellites	50 Mo
Mémoire des passerelles	500 Mo
Nombre de passerelles	5
Durée des simulations	5 jours
Taille des Bundles	1Mo
Période inter-arrivée trafic permanent (s)	[600, 900, 3600]
Période inter-arrivée trafic critique (s)	600
Durée de vie des données critiques	30 h

trafic prioritaire apparaissant de manière aléatoire sur une ou plusieurs stations. Concernant la mobilité des satellites, nous avons analysé les traces de 5 satellites d'observation : Spot 4 et 5, Pleiades-1, SAC-D et EO-1. Nous avons étudié les traces de ces satellites car ils sont opérationnels et peuvent embarquer d'autres missions que leurs missions d'observation.

Nous synthétisons les paramètres de nos simulations dans le tableau 5.1.

Nous observons un scénario sur une durée de 5 jours et considérons donc la durée de vie du trafic permanent infinie. Lors de chaque simulation, les passerelles sont en état normal et peuvent se retrouver en situation de crise de manière aléatoire. Dans l'état normal, le réseau ne crée que des Bundles à faible priorité alors que durant la phase critique des Bundles à faible et à forte priorités sont créés.

Les métriques auxquelles nous nous intéresserons sont classiques dans le contexte des réseaux DTN :

- Le taux de délivrance qui est la proportion de Bundles arrivés à destination sur le nombre de Bundles créés. Si plusieurs copies du même Bundle arrivent à destination, cela ne compte que pour une arrivée.
- L'overhead qui représente le nombre de copies de Bundles transmises divisé par le nombre de Bundles créés.
- Le délai moyen qui est la durée séparant la date de création d'un Bundle de l'instant de l'arrivée à destination de la première copie de ce Bundle.

5.4.1.2 Scénario pour Martinet

Les simulations permettant de valider Martinet s'appuient sur le même scénario à la différence que nous nous concentrons sur les périodes de crise. Nous faisons ici l'hypothèse que le trafic critique sature à lui seul la mémoire des satellites. Nous souhaitons en effet vérifier que Martinet parvient à fournir un accès équitable aux ressources pour chaque passerelle. Nous utilisons donc

le critère de Jain pour calculer l'équité [112] :

$$\frac{(\sum_{i=1}^n x_i)^2}{n \cdot \sum_{i=1}^n x_i^2}$$

x_i est le nombre de messages délivrés, générés à la station i divisé par le nombre de messages générés à la station i .

Afin d'observer le comportement de Martinet avec plusieurs satellites, nous faisons ici varier le nombre de satellites dans le réseau de 1 à 6. Lorsque l'on ajoute des satellites, nous modifions le débit de création des Bundles pour conserver une charge équivalente au cas avec un seul satellite.

5.4.2 Implantation

Nous avons également implanté le protocole Martinet sur des machines Unix sur lesquelles nous avons installé DTN2, l'implantation référence du Bundle Protocol [98]. Pour réaliser les tests, nous avons eu recours aux *linux containers*. Chaque container émule le comportement d'une passerelle ou du satellite. Nous relient les terminaux émulés au moyen d'un pont. L'intermittence des liens est réalisée au moyen de liens programmés s'ouvrant lorsque le satellite est à portée d'une passerelle et se fermant à la fin du contact. Nous considérons que les transmissions n'ont pas à être fiables et utilisons la couche d'adaptation avec UDP.

Le test que nous effectuons est une démonstration de faisabilité. Nous utilisons 2 stations génératrices de trafic, une destination et un satellite LEO. Les Bundles sont générés juste avant le passage du satellite au-dessus de la première station. Nous utilisons des grumeaux de pings DTN. Nous laissons la voie retour entre la destination et le satellite fermée afin de compter le nombre de Bundles arrivés à destination et de déterminer la provenance de ces Bundles. Nous utilisons des routes statiques étant donné qu'un seul nœud assure la connexité du réseau.

5.5 Analyse des résultats

Nous analysons maintenant les résultats de nos simulations. Dans le cas de Carreau, nous analysons à la fois le taux de délivrance global ainsi que le taux de délivrance du trafic prioritaire. Nous observons également la quantité nécessaire de Bundles transmis pour atteindre de telles performances.

Nous comparons les résultats de Carreau avec des protocoles DTN standards tels que Epidemic [63], MaxProp [64], PRoPHET [66] et SprayAndWait [70] ainsi qu'un protocole qui ne fait qu'une transmission vers la *mule* qui se charge ensuite de la délivrer à la destination, nommé DirectDelivery.

La figure 5.10 présente les résultats de ces différents protocoles pour la métrique de taux de délivrance global. On y constate que tous les protocoles offrent un taux de délivrance du même ordre de grandeur. Lorsque nous augmentons la période inter-arrivée du trafic non-prioritaire,

5. MAXIMISATION DE LA DÉLIVRANCE AVEC DES CRISES INTERMITTENTES

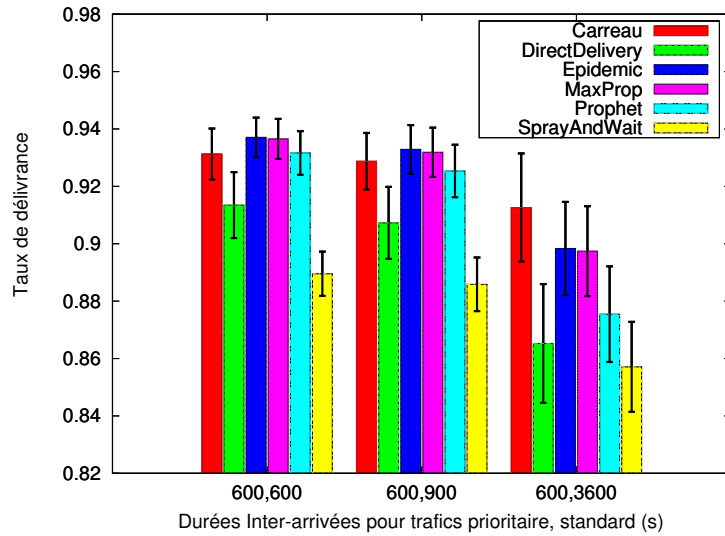


FIGURE 5.10 – Taux de délivrance global

le taux de délivrance de Carreau dépasse celui des autres protocoles. Ce sont donc pour les scénarios les plus proches de la réalité que notre proposition est meilleure que les protocoles DTN classiques. En effet, il n'y a pas lieu d'avoir une fréquence de mesure très élevée pour les données non-critiques.

Lorsque l'on observe la figure 5.11, on note que les taux de délivrance du trafic prioritaire de Carreau sont nettement supérieurs à ceux des protocoles DTN. Le taux de délivrance du trafic critique est ainsi au moins amélioré de 15% par rapport à la solution la plus proche.

Nous pouvons déduire de ces résultats qu'en redéposant les Bundles avec la plus grande date d'expiration afin de permettre aux Bundles prioritaires d'avoir accès aux satellites, Carreau parvient à améliorer le taux de délivrance d'un flux sans sacrifier le second.

Nous ajoutons à ces résultats l'analyse du taux d'overhead avec la figure 5.12. Nous sommes donc en mesure de dire que notre solution propose de meilleures performances que les solutions classiques des DTN à moindre coût. En effet, exceptée la solution *Direct Delivery* qui propose l'overhead le plus faible possible, Carreau présente également un overhead faible. L'overhead est légèrement supérieur à celui du *Direct Delivery*, car les redépôts de Bundles augmentent le nombre de transmissions. Les autres protocoles DTN ont recours à des répliques de Bundles et ainsi augmentent considérablement l'overhead pour parvenir à un taux de délivrance inférieur à celui de Carreau.

Concernant l'évaluation de Martinet, qui garantit l'équité entre les stations, les résultats de nos simulations sont présentés sur la figure 5.13. Nous y constatons que nous ne parvenons pas à atteindre la valeur optimale de 1. Cela s'explique car nous avons réalisé notre analyse dans le cas d'un modèle fluide, or nous avons considéré pour les simulations que les Bundles ne pouvaient être subdivisés. Dans la réalité, il serait possible de segmenter les Bundles afin d'augmenter

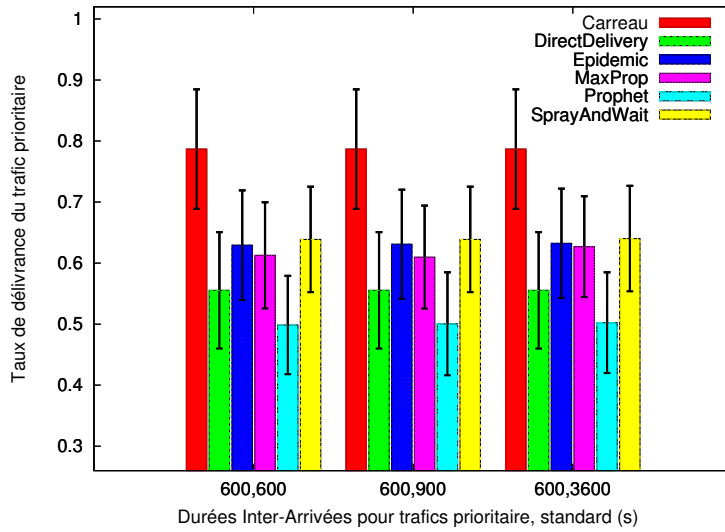


FIGURE 5.11 – Taux de délivrance du trafic prioritaire

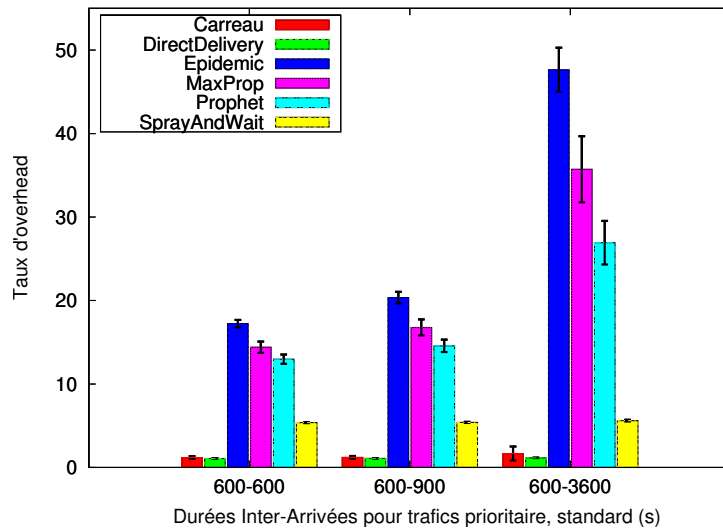


FIGURE 5.12 – Taux d'overhead

5. MAXIMISATION DE LA DÉLIVRANCE AVEC DES CRISES INTERMITTENTES

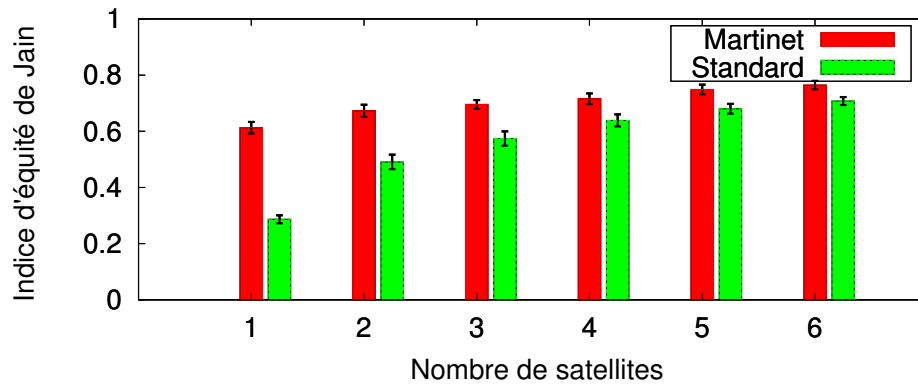


FIGURE 5.13 – Équité en fonction du nombre de satellites

TABLEAU 5.2 – Comparaison de la distribution des taux de délivrance

	Standard	Martinet
Taux de délivrance	0.75	0.75
Distribution des taux de délivrance par source	0.66 / 0.33	0.55 / 0.44

l'équité, mais cela augmenterait le nombre d'en-têtes et gaspillerait les ressources du réseau. Étant donné que Martinet assure l'équité pour chaque satellite, l'ajout de satellites n'améliore que très peu l'équité. En effet, à l'intérieur de chaque satellite, il y aura nécessairement des Bundles en provenance d'une source en très léger sur-nombre ou sous-nombre par rapport aux Bundles provenant d'autres sources.

Nous remarquons néanmoins que Martinet propose une équité plus élevée qu'une solution standard et ce, même avec un seul satellite. La progression la plus importante dans l'équité dans le cas standard est réalisée lors du passage de un à deux satellites. Les deux satellites n'ont pas le même ordre de parcours des stations et c'est pourquoi les stations qui ne pouvaient pas accéder aux ressources lorsqu'il n'y avait qu'un satellite peuvent désormais accéder au deuxième.

Concernant les tests réalisés sur notre banc, nous répertorions les résultats dans le tableau 5.2.

Nous vérifions que Martinet ne détériore pas les performances du réseau mais répartit différemment la provenance des données. Dans le scénario standard, qui n'utilise pas Martinet, la mémoire du satellite est remplie à 66% de sa capacité par le premier nœud puis le second complète à hauteur de 33%, ce qui est le maximum disponible. Lorsque Martinet est utilisé, la mémoire du premier satellite est remplie à hauteur de 66% également. En revanche, lors de son passage au-dessus du second nœud, 11% sont redéposés, permettant ainsi à la seconde station de transmettre des Bundles correspondant à 44% de la mémoire du satellite.

5.6 Conclusion

Nous nous sommes intéressés dans ce chapitre aux problèmes liés aux surcharges momentanées du réseau que nous avons défini. Du fait de la faible connexité de ce réseau, les différents équipements ne peuvent pas savoir l'état de congestion des autres nœuds. Il fallait donc proposer des mécanismes capables de fournir de bonnes performances sans avoir accès aux informations de congestion de l'ensemble du réseau.

Nous avons proposé Carreau, qui permet d'augmenter la délivrance des Bundles critiques avec un faible overhead grâce à la possibilité de redéposer les Bundles moins prioritaires et ayant une plus grande durée de vie. C'est au final en utilisant les stations au sol comme une mémoire additionnelle du satellite et pas uniquement comme des sources que nous avons réussi cette amélioration.

Nous avons alors constaté que dans le cas où plusieurs stations auraient du trafic critique à transmettre, leur accès au satellite ne serait pas équitable. Afin de rétablir l'équité nous avons proposé un protocole, Martinet, qui fait en sorte que les stations au sol demandent un certain volume de la mémoire du satellite, qui va déterminer si ce dernier est capable de le véhiculer. Dans le cas contraire, grâce à la connaissance des dates d'expiration des Bundles, Martinet indiquera au satellite les Bundles à redéposer et aux stations les Bundles à transmettre.

Nous allons désormais nous concentrer sur l'autre segment de notre réseau, qui alimente en Bundles nos passerelles, les réseaux de capteurs autonomes.

6 Connaissance du passé pour imaginer l'avenir dans les réseaux de capteurs mobiles

6.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous nous concentrons sur les problèmes liés à la partie réseau de capteurs. Nous allons analyser les contraintes engendrées par le scénario que nous avons retenu afin de couvrir un spectre d'applications le plus large possible.

Le scénario que nous considérons est un suivi d'individus. Nous plaçons au préalable des capteurs communicants sur chaque individu dont on souhaite réaliser un suivi. Les terminaux pourront échanger entre eux ainsi qu'avec des stations de base jouant le rôle de passerelles vers d'autres segments du réseau. Ces passerelles sont choisies statiques afin de faciliter les considérations d'alimentation énergétique. Ces dernières doivent communiquer avec des satellites et présentent donc une forte consommation énergétique. Ce scénario est une extension de celui considéré précédemment. En plus de capteurs statiques, nous ajoutons des capteurs mobiles afin d'élargir le spectre d'applications d'observation couvertes.

Nous apporterons des solutions répondant aux problèmes d'un tel scénario et adaptables à des scénarios ayant une faible connexité et une topologie dynamique. Nous proposons des simulations et modèles théoriques pour valider ces solutions.

6.2 Scénario retenu

Notre scénario repose sur le suivi continu de plusieurs individus d'une ou plusieurs espèces. Ces individus sont mobiles. Les capteurs étant fixés à ces individus, les terminaux seront mobiles et la topologie du réseau dynamique. Cela engendre des contraintes avec lesquelles il va falloir composer. Une représentation du réseau est fournie sur la figure [6.1](#).

6. CONNAISSANCE DU PASSÉ POUR IMAGINER L'AVENIR DANS LES RÉSEAUX DE CAPTEURS MOBILES

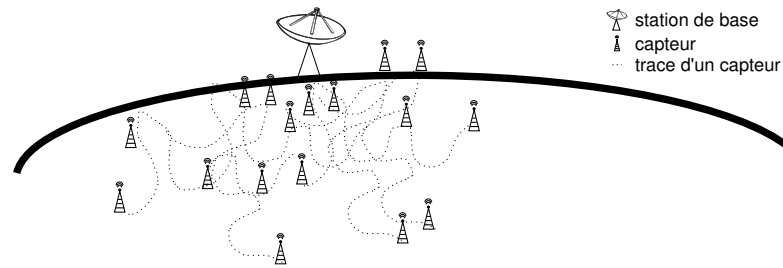


FIGURE 6.1 – Topologie du scénario avec capteurs uniquement mobiles

6.2.1 Sporadicité des contacts

Que les individus observés soient des humains ou des animaux, la nature de leurs déplacements est similaire. Les uns comme les autres vont répéter des opérations comme se rendre à un point d'eau, au travail, au domicile [113]. Cependant, ces déplacements ne se répètent pas nécessairement tous les jours ni aux mêmes heures d'un jour à l'autre. De ce fait, les contacts réalisés avec d'autres individus sont sporadiques.

Afin de ne pas manquer des contacts avec des relais éventuels, nous faisons le choix de conserver la radio des capteurs allumée en permanence. La radio étant l'élément le plus consommateur sur un capteur, nous faisons l'hypothèse que ces derniers sont autonomes en énergie.

6.2.2 Limites de capacité de traitement

Nous supposons que les équipements retenus sont de petits terminaux de type MicaZ Crossbow. Nous avons déjà évoqué la faible mémoire disponible pour implanter du code sur ces dispositifs. Les algorithmes utilisés devront rester relativement simples afin de pouvoir être implantés sur la mémoire.

Les mécanismes proposés devront également permettre le passage à l'échelle. Chaque nœud est susceptible de rencontrer plusieurs centaines de capteurs. Si les algorithmes de routage nécessitent des informations sur chaque voisin rencontré, la mémoire nécessaire au stockage de ces données sera considérable. De ce fait, les solutions proposées devront à la fois avoir recours à des algorithmes simples et stocker peu d'informations pour fonctionner.

6.2.3 Limites de mémoire

Les contraintes de mémoire sont également présentes en ce qui concerne le stockage des données. Nous ne nous intéressons pas au traitement des données qui pourrait permettre de constater que plusieurs Bundles contiennent la même information et qui permettrait de diminuer la charge. Les solutions proposées devront tenir compte du fait que la capacité disponible pour stocker les messages de données ou de signalisation est limitée. On s'emploiera à utiliser des mécanismes qui permettront de diminuer la charge des nœuds du réseau tout en limitant la

dégradation des performances.

Les applications qui rentrent dans le contexte du scénario retenu sont le suivi d'animaux, le suivi de la santé ainsi que l'analyse de l'environnement au moyen d'engins mobiles tels que des drones.

6.3 Amélioration des performances grâce aux événements passés

Nous faisons le choix d'utiliser l'architecture présentée dans le paragraphe 4.4.3.3. De ce fait, les capteurs implantent le Bundle Protocol et peuvent tolérer de longues interruptions sur le lien de communication. Les protocoles de routage des DTN peuvent être utilisés dans ce contexte.

6.3.1 Gestion de la mémoire avec accusés de réception

Le concept d'accusés de réception n'est pas récent, cependant dans les DTN, ce mécanisme est légèrement différent de ce qui est utilisé dans les réseaux classiques. Traditionnellement, un accusé de réception est envoyé par une entité recevant une information en provenance d'une source et cette source devient la destination de cet accusé de réception. Dans le contexte des DTN, plusieurs chemins peuvent avoir été empruntés par un Bundle et ses copies. Si on utilise des accusés de réception et qu'on ne possède pas d'information sur les relais visités par les répliques d'un Bundle alors on envoie un accusé de réception en broadcast dans le réseau afin de diminuer la charge à l'intérieur de ce réseau [64]. Ces accusés de réception sont forgés au niveau de la destination, mais sont envoyés à tous les possesseurs éventuels d'une copie du Bundle arrivé à destination.

L'utilisation d'accusés de réception, que nous noterons ACKs par la suite, a déjà été proposée dans le cadre des DTN ; par exemple avec MaxProp [64]. Cependant, nous trouvons que ce mécanisme n'a pas été étudié à sa juste valeur, en particulier dans un contexte où la mémoire est limitée ou saturée. De plus, leur impact sur les performances d'un réseau n'a pas été suffisamment étudié.

Nous proposons d'analyser cette influence sur plusieurs protocoles DTN. Nous souhaitons toujours que les mécanismes proposés puissent être implantés sur des équipements à faible capacité mémoire. Notre analyse portera à la fois sur des protocoles simples et d'autres plus complexes, afin de vérifier si l'influence des ACKs est indépendante du protocole utilisé.

Concernant la propagation des ACKs, nous faisons le choix de les transmettre de manière épidémique. Ainsi lorsque deux nœuds se rencontrent, chacun fournit les ACKs que l'autre ne possède pas. Les ACKs sont engendrés par la destination à chaque fois qu'un Bundle lui est remis. Peu importe que ce Bundle ait déjà été délivré au préalable, la destination ne conserve pas d'informations sur les Bundles déjà remis. De plus, le but des ACKs est qu'ils se propagent le plus possible et le plus rapidement possible dans le réseau afin de retirer les Bundles déjà

6. CONNAISSANCE DU PASSÉ POUR IMAGINER L'AVENIR DANS LES RÉSEaux DE CAPTEURS MOBILES

délivrés. Plus on crée d'ACKs et plus vite on retirera des Bundles déjà délivrés.

Nous allons nous concentrer sur deux points :

- Est-ce que l'utilisation d'ACKs apporte une amélioration dans un environnement limité en mémoire ?
- Comment la charge des nœuds est-elle touchée par l'utilisation d'une gestion de la quantité de mémoire allouée aux ACKs ?

Nous proposons un modèle pour observer l'influence des accusés de réception dans le cas d'une mémoire infinie.

6.3.1.1 Modèle de distribution des messages

Nous considérons un réseau composé de N mobiles avec des capacités mémoire infinies. Nous les désignerons indifféremment relais, sources ou transporteurs. Nous considérons un nœud statique qui fait office de station de base et récolte tous les Bundles du réseau. Nous faisons également l'hypothèse que les contacts entre tout couple de nœuds sont distribués exponentiellement avec une fréquence moyenne λ [74, 75].

Nous nous concentrons sur le délai de délivrance et le temps de séjour d'un message. Le délai de délivrance est le temps requis pour que la première copie d'un Bundle atteigne la destination. Le temps de séjour est le temps nécessaire pour retirer la dernière copie du réseau. Nous ne considérons pas les pertes. Nous analysons les performances de deux protocoles :

- *Direct Delivery*, où les sources transmettent uniquement à la destination.
- *Epidemic*[63], où les messages échangés à chaque contact n'étaient présents que sur un des deux transporteurs.

En considérant des mémoires infinies, le taux d'occupation des files n'influe pas sur les performances de délivrance d'un Bundle. Nous choisissons de représenter le nombre de répliques d'un Bundle dans le réseau à l'aide d'une chaîne de Markov.

Version sans ACKs Dans un premier temps, nous étudions les performances sans avoir recours aux ACKs.

La chaîne de Markov pour le *DirectDelivery* est triviale. Elle contient uniquement deux états. L'état d'origine quand un message est créé sur une source et l'état final absorbant lorsque le Bundle est délivré à la destination. La probabilité de transition est évidemment le taux moyen de contact λ entre les nœuds. Dans ce contexte, le temps moyen de séjour est strictement égal au délai moyen et vaut $\frac{1}{\lambda}$. À des fins de compréhension, nous représentons cette chaîne sur la figure 6.2.

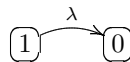


FIGURE 6.2 – Chaîne de Markov pour les calculs avec *DirectDelivery*

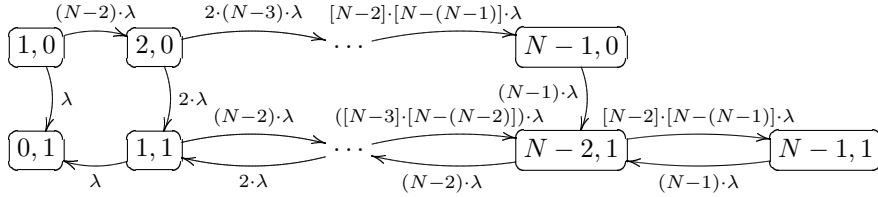


FIGURE 6.3 – Chaîne de Markov pour le calcul du délai de délivrance avec *Epidemic*

Pour l'étude d'*Epidemic*, la chaîne de Markov est légèrement plus complexe comme en atteste la figure 6.3. Un état contient deux informations : le nombre de nœuds transportant une copie du Bundle considéré, ainsi que le fait qu'au moins une réplique ait atteint la destination. Quand les ACKs ne sont pas utilisés, un relais ayant délivré un Bundle peut le transporter de nouveau, car il n'a aucun moyen de savoir que ce Bundle a déjà été délivré et que lui-même l'a délivré. La chaîne possède donc un nombre d'états égal au double du nombre de relais plus un. Nous avons également plusieurs cycles dans cette chaîne. Lorsque l'on cherche à déterminer le délai de délivrance, tous les états de la deuxième ligne de la chaîne sur la figure 6.3 correspondent à des états où la destination a reçu le message. On s'intéresse alors au temps moyen séparant l'instant initial où l'on est dans l'état $[1, 0]$ de l'instant où l'on rentre dans n'importe lequel des états de la seconde ligne. Lorsque l'on s'intéresse au calcul du temps de séjour, cela correspondra à l'instant où il n'y a plus de copie du Bundle dans le réseau à l'exception de la destination $[0, 1]$. On peut donc regrouper les états de la chaîne de la figure 6.3 deux par deux en perdant l'information de première délivrance qui ne nous concerne plus afin d'obtenir la chaîne de la figure 6.4.

Pour le délai moyen, nous calculons la probabilité que partant de $[1, 0]$, le message soit reçu en passant de $[k, 0]$ à $[k - 1, 1]$. En normalisant les taux de transition et en parcourant la chaîne, on détermine par une récurrence immédiate que la probabilité de rejoindre l'état $[k, 1]$ en provenance de la ligne supérieure est :

$$P[k, 1] = \frac{1}{N - 1} \quad (6.1)$$

Nous pouvons déterminer le délai moyen pour atteindre cet état $[k, 1]$:

$$D[k, 1] = \sum_{i=1}^{k+1} \frac{1}{i \times \lambda \times (N - i)} \quad (6.2)$$

Ainsi, nous obtenons le délai moyen de délivrance :

$$D_d[N] = \sum_{k=0}^{N-2} P[k, 1] \times D[k, 1] = \frac{1}{N - 1} \times \sum_{k=0}^{N-2} D[k, 1] \quad (6.3)$$

L'expression 6.3 peut se simplifier si avant de calculer la probabilité d'un chemin, on parcourt ce chemin. Nous obtenons alors :

6. CONNAISSANCE DU PASSÉ POUR IMAGINER L'AVENIR DANS LES RÉSEAUX DE CAPTEURS MOBILES

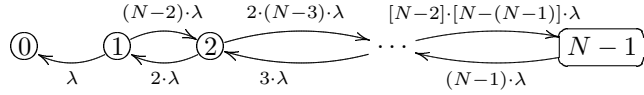


FIGURE 6.4 – Chaîne de Markov pour le calcul du temps de séjour avec *Epidemic*

$$\begin{aligned}
 D_d[N] &= \frac{1}{(N-1) \times \lambda} + \frac{(N-2)}{(N-1)} \times \frac{1}{2 \times (N-2) \times \lambda} \\
 &\quad + \frac{(N-2)}{(N-1)} \times \frac{(N-3)}{(N-2)} \times \frac{1}{3 \times (N-3) \times \lambda} \\
 &\quad + \dots + \frac{1}{(N-1) \times \lambda}
 \end{aligned}$$

Il vient :

$$D_d[N] = \frac{1}{(N-1) \times \lambda} \times \sum_{k=1}^{N-1} \frac{1}{k} \tag{6.4}$$

Maintenant que nous avons déterminé l'expression du délai moyen de délivrance, nous nous concentrons sur le temps moyen de séjour des copies dans le réseau ; en d'autres termes, le temps moyen pour délivrer chaque réplique à la destination. La chaîne de Markov de la figure 6.4 représente l'évolution du même réseau considéré par la chaîne de la figure 6.3, si ce n'est que nous regardons uniquement le nombre de répliques ; et plus l'instant d'arrivée de la première copie.

Afin de calculer le temps moyen de séjour d'un Bundle dans le réseau nous déterminons le temps nécessaire pour rejoindre l'état 0 de la chaîne 6.4 en partant de l'état 1. La chaîne comportant des cycles, il est possible d'avoir des chemins de longueur infinie entre l'état initial et l'état absorbant. La chaîne étant finie et contenant un état absorbant, le temps moyen pour rejoindre l'état absorbant depuis l'état initial converge.

Nous notons \bar{t}_i , le temps moyen pour rejoindre l'état 0 depuis l'état i . À partir de l'étude de la chaîne, nous obtenons le système d'équations suivant :

$$\bar{t}_1 = \frac{1}{(N-1) \times \lambda} + \frac{N-2}{N-1} \times \bar{t}_2 \tag{6.5}$$

$$\bar{t}_2 = \frac{1}{2 \times (N-2) \times \lambda} + \frac{1}{N-2} \times \bar{t}_1 + \frac{N-3}{N-2} \times \bar{t}_3 \tag{6.6}$$

⋮

$$\bar{t}_{N-1} = \frac{1}{(N-1) \times \lambda} + \bar{t}_{N-2} \tag{6.7}$$

6.3. AMÉLIORATION DES PERFORMANCES GRÂCE AUX ÉVÉNEMENTS PASSÉS

Ce système est linéaire et nous le résolvons pour différentes valeurs de tailles de réseau afin de comparer les résultats avec et sans ACKs.

Version avec ACKs Nous supposons désormais que le mécanisme des ACKs est utilisé. Nous devons modifier les chaînes précédentes pour y intégrer cette information. Chaque fois qu'une copie d'un Bundle arrive à destination, un ACK est créé. Chaque fois que deux nœuds se rencontrent, ils s'échangent les ACKs qu'ils possèdent. La figure 6.5 présente la nouvelle chaîne de Markov.

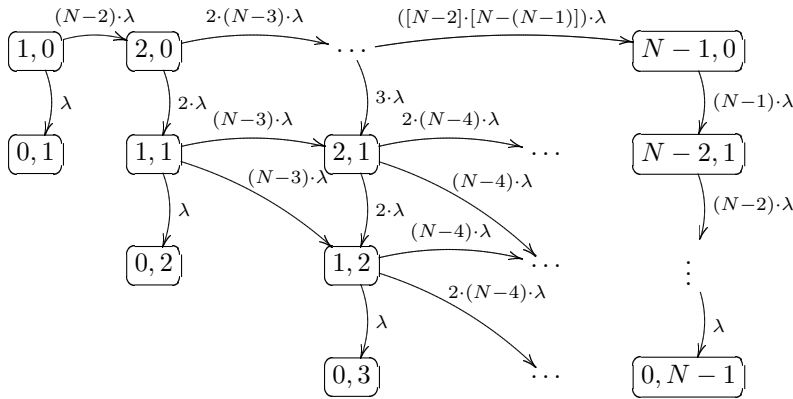


FIGURE 6.5 – Chaîne de Markov pour les calculs des temps de délivrance et de séjour avec ACKs

Les états de la chaîne représentent le nombre de répliques du Bundle et le nombre d'ACKs de ce Bundle présents dans le réseau. Ces deux grandeurs ne peuvent dépasser $N - 1$, tout comme la somme de ces deux grandeurs. En effet, dès lors qu'un relais reçoit un ACK correspondant à un Bundle qu'il possède, il supprime ce Bundle. Le nombre d'états de cette chaîne est fini et cette dernière ne contient pas de cycles donc tous les temps sont bornés. Les transitions sont uniquement possibles d'un état vers un autre ayant une copie de plus, d'un état vers un second ayant un ACK de plus et d'un état vers un autre ayant une réplique de moins et un ACK de plus.

Le délai moyen est la somme pondérée des délais pour atteindre un état possédant un ACK, car cela signifie que la destination a reçu une réplique pour la première fois. Nous remarquons que les calculs nous fournissent la même formule pour ce délai que dans le cas sans ACK. Ce résultat est logique car les ACKs n'améliorent ni ne détériorent le délai.

Le temps de séjour moyen est la somme des délais de chaque chemin démarrant à l'état initial et finissant sur un état possédant zéro Bundle. Cette grandeur est obtenue en parcourant exhaustivement tous les chemins possibles.

Nous présentons les résultats de ces calculs sur un exemple où la fréquence moyenne inter-contact est de 0.1 sur la figure 6.6. Cette figure présente l'évolution des délais et temps de séjour avec et sans ACKs pour *Epidemic*. Nous faisons également apparaître les résultats pour

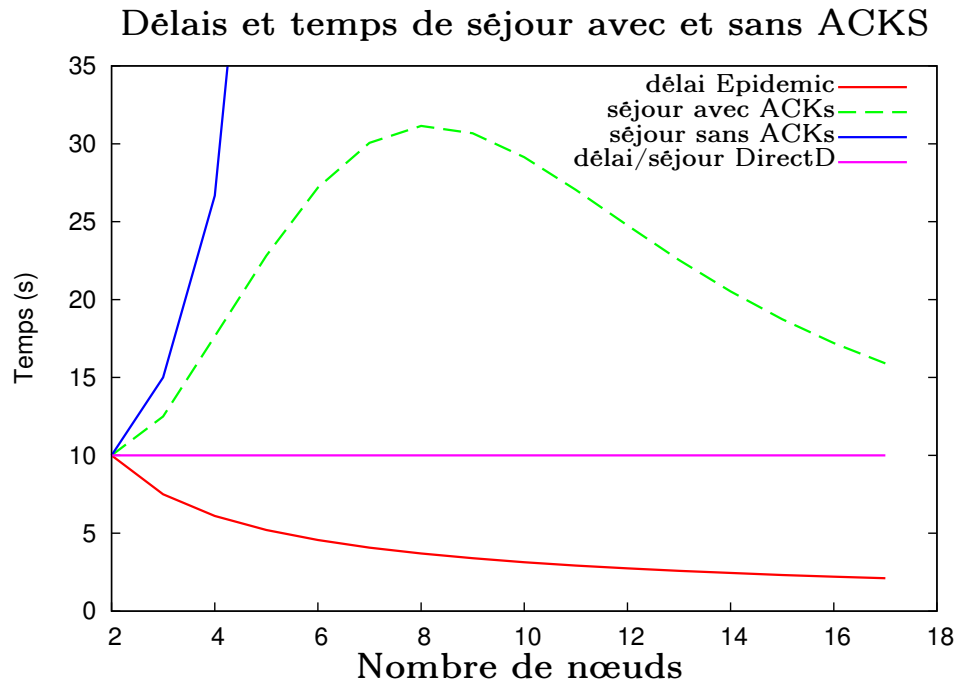


FIGURE 6.6 – Délais de délivrance et temps de séjour avec et sans ACKs pour $\lambda = 0.1$

DirectDelivery pour avoir un point de comparaison.

Le délai offert avec *DirectDelivery* est le pire possible. En effet, celui-ci reste constant et ne profite pas de l'opportunité des rencontres que fait la source au cours de ses déplacements. On constate que dans le cas d'*Epidemic*, le délai de délivrance diminue avec l'augmentation de la taille du réseau. *Epidemic* profite de tous les contacts réalisés par chaque nœud, ainsi le délai obtenu est minimal.

DirectDelivery fournit le meilleur temps de séjour possible pour *Epidemic*. On vérifie que les courbes du temps de séjour avec et sans ACKs sont toujours au-dessus de la droite constante de *DirectDelivery*. Dans le cas avec ACKs, le temps de séjour augmente avant de décroître quand la taille du réseau augmente. Cette évolution s'explique car dans un premier temps la probabilité de propager des ACKs est plus faible que la probabilité de propager des répliques. Plus le nombre de nœuds augmente et plus vite le premier ACK sera généré. Plus la taille du réseau augmente et plus l'avance prise par les répliques réduit. De plus les ACKs étant conservés, ce sont autant de nœuds qui ne recevront plus de copies en plus de ne pas en transmettre.

Concernant la courbe du temps de séjour sans les ACKs, nous observons que la pente est bien plus forte que celle avec les ACKs. Nous représentons cette courbe sur la figure 6.7 afin de mieux constater son évolution à l'aide d'une échelle logarithmique.

Nous constatons que le temps de séjour augmente exponentiellement avec la taille du réseau. Cela s'explique par une augmentation du nombre de contacts et la possibilité pour chaque relais

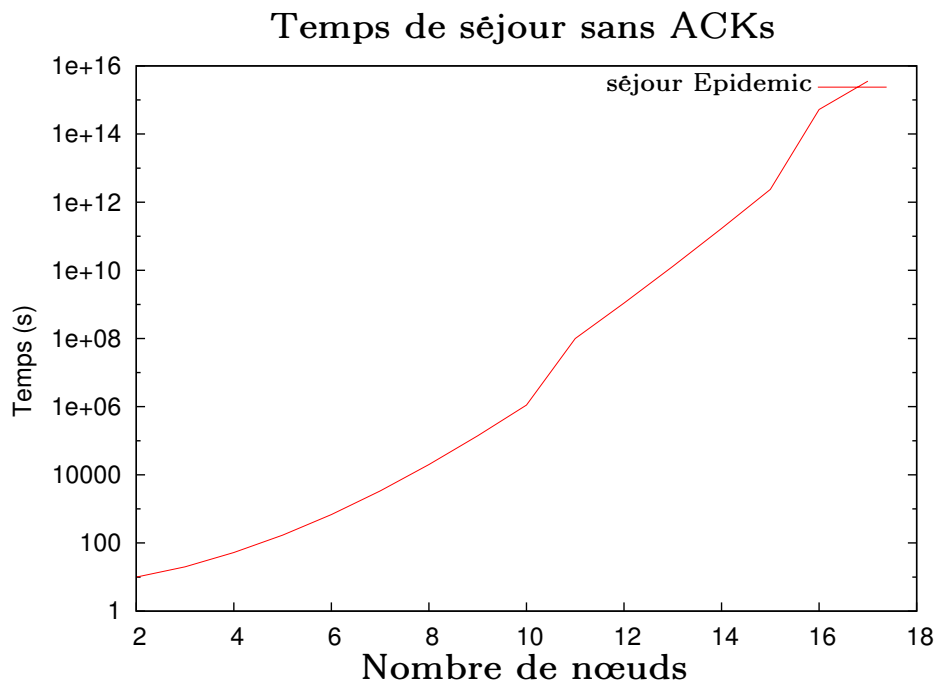


FIGURE 6.7 – Temps de séjour pour *Epidemic* sans ACKs pour $\lambda = 0.1$

de transporter à plusieurs reprises différentes copies d'un même Bundle.

Il apparaît très clairement que dans un cas où la mémoire est infinie, l'utilisation des ACKs permet de diminuer l'empreinte d'un Bundle sur un réseau. Il faut désormais vérifier que ce résultat reste valide lorsque les nœuds possèdent des mémoires limitées. En effet, lorsque les mémoires ont des tailles faibles, des pertes apparaîtront sur les ACKs diminuant ainsi leur efficacité.

6.3.2 Utilisation des rencontres avec une passerelle = FREAK

Lorsque l'on considère un scénario avec des terminaux mobiles, une question fondamentale est la modélisation de la mobilité. De nombreux modèles de mobilité existent. Cependant, plusieurs de ces modèles ne prennent pas en compte l'influence du passé sur l'avenir.

Nous avons évoqué le fait que dans diverses populations des comportements répétitifs se rencontraient. Par exemple, les animaux ont un territoire de chasse, divers points d'eau où ils peuvent se désaltérer et les humains ont un foyer d'où ils partent chaque jour pour y rentrer le soir en se rendant au travail dans la journée. Nous constatons que de telles mobilités ne sont pas complètement erratiques.

Avant de réfléchir au modèle de mobilité à utiliser pour représenter le réseau, nous en tirons une première constatation qui sera utile pour la conception d'un algorithme de routage. Dans [62], les auteurs énoncent une hypothèse consistant à dire que *le futur taux de rencontre des nœuds*

6. CONNAISSANCE DU PASSÉ POUR IMAGINER L'AVENIR DANS LES RÉSEaux DE CAPTEURS MOBILES

peut être grossièrement prédit par le taux passé. Nous prenons en considération cette hypothèse et proposons un mécanisme que nous nommons FREAK.

FREAK (Frequency Routing, Encounters And Keeness) est ainsi nommé car il propose un routage fondé sur la fréquence de rencontre et est optimiste. Notre proposition est optimiste car contrairement à des solutions comme Encounter-Based Routing (EBR) [62], MaxProp [64] ou PRoPHET [66] qui utilisent des informations de rencontre sur l'ensemble des nœuds du réseau, notre algorithme n'utilise que la fréquence de rencontre avec l'ensemble des nœuds destination. Cette restriction permet de respecter la contrainte sur la mémoire des nœuds que nous avons constatée très faible suite à notre implantation du Bundle Protocol.

On pourrait s'attendre à ce que la réplication ne convienne pas dans un contexte où les limitations mémoire sont fortes. Cependant, en se privant de ce mécanisme, nous diminuons le nombre de contacts par message. Avec la réplication, un message a autant d'opportunités de rencontres que chaque nœud porteur du message. Dans le cas de transmissions sans réplication, il n'y a qu'un seul porteur de message. La transmission diminue la charge mais elle diminue également le nombre de contacts utiles par message et fournit de moins bons résultats que des mécanismes utilisant la réplication, d'autant plus dans un contexte opportuniste.

Notre idée consiste à supposer que certains terminaux rencontreront plus souvent la destination que d'autres. Plutôt que de déterminer le nombre de rencontres avec chaque nœud [62], nous calculons la fréquence moyenne de rencontre avec la station de base. Les meilleurs relais sont ceux rencontrant le plus souvent la destination. En conclusion, plus la fréquence de rencontre avec la destination est élevée et meilleur est ce relais. Le fonctionnement de FREAK est simple. Quand deux nœuds se rencontrent, le nœud qui voit le moins souvent la station de base envoie des copies de ses Bundles à l'autre. L'algorithme de FREAK décrit avec l'algorithme 4 résume ce fonctionnement.

La métrique n'est actualisée que lorsqu'un nœud rencontre la station de base en possession de Bundles à lui remettre. Ceci a pour but de limiter la progression de la métrique d'un nœud qui serait en permanence à portée radio de la station de base, mais qui ne se déplacerait pas suffisamment pour collecter des Bundles en provenance d'autres nœuds.

Après avoir étudié l'impact des ACKs sur un réseau avec deux protocoles simples et des nœuds avec des mémoires infinies, nous réalisons des simulations afin d'observer les performances de notre mécanisme FREAK ainsi que l'influence des ACKs lorsque la mémoire est finie.

6.4 Validations

Pour valider notre étude nous avons effectué des simulations avec The ONE [111]. Un des principaux problèmes auxquels il faut répondre lorsque l'on souhaite modéliser un réseau composé de mobiles, est la modélisation de la mobilité. Pour cela deux options se présentent :

- l'utilisation de modèles de mobilité censés être fidèles à un comportement réel ;
- l'utilisation de traces réelles censées être représentatives de la mobilité en général.

Algorithme 4 Le mécanisme FREAK

Soit A le nœud local
 $nbrContacts = 0$
 $freq = 0$
Pour chaque nœud rencontré (nommé B) **Faire**
 Si B est la destination **Alors**
 $nbrContacts++$ # Si c'est la destination on met à jour la métrique
 $freq = \frac{nbrContacts}{CurrentTime}$
 Envoyer tous les Bundles # et on lui transmet tous les Bundles
 Supprimer les Bundles délivrés
 Sinon
 Si $contact_{freq}(A) < contact_{freq}(B)$ **Alors** # Si le nœud rencontré voit la destination plus souvent
 envoyer Bundles à B # alors on lui transmet tous les Bundles
 Sinon
 attendre les Bundles de B # sinon on attend les siens
 Fin Si
Fin Pour

Pour les simulations que nous avons effectuées, nous avons utilisé ces deux moyens afin d'obtenir des résultats proches de la réalité.

6.4.1 Traces

Concernant les traces récupérées dans un contexte réel, nous en avons utilisé deux, mais exploité une seule. Nous avons récupéré les traces de la conférence Infocom en 2006 [114] ainsi que les traces des taxis de San Francisco [115].

Nous n'avons conservé que les résultats obtenus avec les traces des taxis de San Francisco. Les résultats obtenus avec les traces d'Infocom ne sont pas suffisamment significatifs pour être analysés. La densité des nœuds est trop élevée par rapport au scénario que nous nous sommes fixés.

Les traces des taxis de San Francisco durent plus de trente jours. Les taxis ne représentent peut-être qu'un même type de véhicules et de service, néanmoins les clients qui demandent une destination ainsi que les chauffeurs de taxis ont des habitudes différentes. Ainsi la mobilité des taxis est plus générale que celle de participants à une conférence.

Nous avons souhaité déterminer des intervalles de confiance sur nos simulations. Pour cela nous avons choisi de segmenter le fichier de traces en plusieurs fichiers. Afin de limiter la corrélation temporelle, nous avons créé des traces durant trois jours. Ceci limite l'influence des comportements liés à une journée ou à une journée précise de la semaine. Nous considérons que les simulations réalisées avec les taxis de San Francisco sont représentatives d'un comportement réel.

Les simulations réalisées avec des traces réelles sont très longues. C'est pourquoi nous avons

6. CONNAISSANCE DU PASSÉ POUR IMAGINER L'AVENIR DANS LES RÉSEAUX DE CAPTEURS MOBILES

également décidé d'utiliser des modèles de mobilité en essayant de se rapprocher des contraintes nécessaires à la représentation de notre contexte.

6.4.2 Modèles

Nous avons choisi d'utiliser trois modèles et exposons ici les raisons ayant motivé ce choix.

6.4.2.1 Random Walk

Nous avons utilisé le modèle de mobilité Random Walk car ce modèle est très simple et très largement utilisé dans la littérature [116, 117]. Un tel modèle de mobilité ne tient pas compte des événements passés pour déterminer le comportement futur d'un mobile. Notre proposition FREAK, qui utilise l'historique des rencontres entre les nœuds pour déterminer comment réaliser les échanges, ne devrait donc pas tirer profit d'un historique complètement erratique et n'influençant pas les contacts futurs. Nous allons néanmoins observer si FREAK dégrade les performances obtenues par d'autres protocoles ou si notre mécanisme fournit des résultats du même ordre de grandeur que les protocoles de la littérature.

De plus, nous souhaitons également analyser l'influence des ACKs sur les performances d'un réseau. Les ACKs peuvent s'appliquer à différents contextes applicatifs, n'ayant pas nécessairement la même relation entre les contacts passés et les futures rencontres. Nous observerons donc l'utilité des ACKs dans un contexte quelconque.

6.4.2.2 Gauss-Markov

Le modèle de mobilité Gauss-Markov est un modèle de mobilité avec une dépendance temporelle [118]. La valeur du vecteur vitesse à un instant donné est obtenue à partir d'un processus aléatoire gaussien et de la valeur du vecteur vitesse à l'instant précédent. Un paramètre permet de contrôler la dépendance temporelle. Ainsi la mobilité peut être complètement aléatoire, déterministe ou avoir une influence des deux.

Un tel modèle de mobilité se rapproche plus de comportements réels, dans le sens où l'évolution du vecteur vitesse n'est pas complètement aléatoire et est liée à l'ancienne valeur de ce vecteur. Nous utilisons ce modèle afin d'obtenir des résultats de simulations plus significatifs.

6.4.2.3 Lévy Walk

Le modèle de mobilité Lévy Walk est un Random Walk dont les points de décision de changements de direction sont associés à un vol de Lévy [113]. La distribution des longueurs des vols suit une distribution à queue lourde.

Nous avons sélectionné ce modèle de mobilité car il est simple et bien qu'il soit aléatoire, les auteurs de [113] ont montré que les résultats de ce modèle étaient similaires à ceux de traces de mobilité humaine en extérieur. Les nœuds que nous considérons dans notre scénario vont se déplacer en extérieur.

TABLEAU 6.1 – Paramètres des simulations pour le segment sol

Nombre de nœuds	100 - 539
Modèles de mobilité	Random Walk - Gauss Markov
Traces réelles	Taxi San Francisco
Durées des simulations	1 - 3 jours
Capacité mémoire	[1 - 9], 16, 40, 80, 160 Bundles
Proportion allouée aux ACKs	[0 - 90%]
Période moyenne d'inter-arrivées (s)	1600

Nous avons constaté lors de nos simulations que les taux de délivrance avec tous les protocoles étaient similaires à ceux obtenus avec le Random Walk. Nous n'incluons donc pas les résultats obtenus avec le modèle Lévy Walk.

6.4.3 Scénarios simulés

Nous présentons les paramètres des scénarios de nos simulations. Nous considérons que les terminaux sont en extérieur et que leurs mouvements ne sont pas limités par des obstacles. Les simulations ayant recours aux traces des taxis contiennent 539 éléments alors que nous considérons 100 nœuds lors de l'utilisation de modèles de mobilité. Les durées de simulations sont d'un jour dans le cas des modèles et de 3 jours lors de l'utilisation des traces réelles.

En plus de comparer notre proposition, FREAK, à des protocoles de la littérature, nous analysons l'influence des ACKs sur chacune de ces solutions. Pour cela, nous observons les performances du réseau alors que nous faisons varier la capacité de la mémoire ainsi que la proportion de la mémoire allouée aux ACKs. Afin de ne pas avoir des pertes liées à une expiration de la durée de vie des messages, nous supposons qu'ils ont une durée de vie infinie.

Notre contexte applicatif est l'observation de populations, nous faisons donc l'hypothèse de créations de messages périodiques.

Les paramètres des simulations sont synthétisés dans le tableau 6.1

6.5 Analyse des résultats

Nous étudions en parallèle les performances de FREAK ainsi que celles liées à l'utilisation d'ACKs. Nous nous concentrons sur les trois métriques que sont le taux de délivrance, le délai et l'overhead.

6.5.1 Sans ACKs

Nous considérons tout d'abord des scénarios où les terminaux ont de très faibles capacités de stockage. Nous présentons les résultats obtenus dans le cas du modèle de mobilité Random Walk

6. CONNAISSANCE DU PASSÉ POUR IMAGINER L'AVENIR DANS LES RÉSEAUX DE CAPTEURS MOBILES

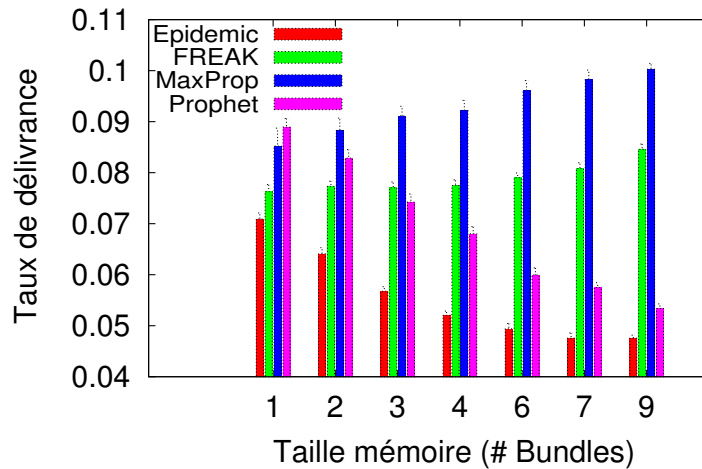


FIGURE 6.8 – Taux de délivrance en Random Walk sans ACKs

sur les figures 6.8, 6.9 et 6.10.

On constate avec la figure 6.8 qu'avec très peu de mémoire, aucun mécanisme ne parvient à fournir des performances satisfaisantes. Nous ne pouvons donc pas envisager un déploiement réel. Les taux de délivrance sont de l'ordre de 10%. Certains protocoles fournissent des performances très légèrement meilleures que les autres. Nous remarquons qu'*Epidemic* fournit les pires résultats. C'est un résultat que nous attendions car contrairement aux autres protocoles qui s'appuient sur l'historique des transmissions lors d'un nouveau contact, *Epidemic* transmet tout ce qu'il peut dans l'ordre où les messages sont arrivés. Les taux de délivrance de *PRoPHET* et *Epidemic* diminuent alors que la taille des mémoires augmente. Ce résultat s'explique par le fait que le gain en mémoire est faible comparé à la charge des nœuds. Les nœuds sont en mesure de transporter plus de messages, mais ce sont potentiellement des messages qui ont déjà été délivrés. Les décisions prises lors de l'arrivée d'un message pour déterminer les messages à supprimer ne reposent pas sur l'historique des transmissions. *MaxProp* et *FREAK* voient leur taux de délivrance légèrement augmenter avec de la mémoire supplémentaire. Néanmoins, nous ne pouvons pas tirer de conclusions significatives du fait du très faible taux de délivrance.

Les délais obtenus lors des simulations sont présentés sur la figure 6.9. *FREAK* ne fournit pas le meilleur délai, cependant ce n'est pas son but. Notre mécanisme tente d'atteindre un bon taux de délivrance en exploitant la répétition des trajectoires des nœuds en conservant une complexité faible. Plus la répétition de ces déplacements est vérifiée et plus le délai sera faible dans le cas de *FREAK*, car les nœuds ne transmettent les copies des Bundles qu'à des voisins voyant la destination plus souvent qu'eux. Il apparaît que dans le cas d'une mobilité complètement erratique de type marche aléatoire, il n'y a pas de corrélation entre les déplacements passés et futurs. Le délai augmente avec la taille des mémoires car plus de messages étant stockés, ces

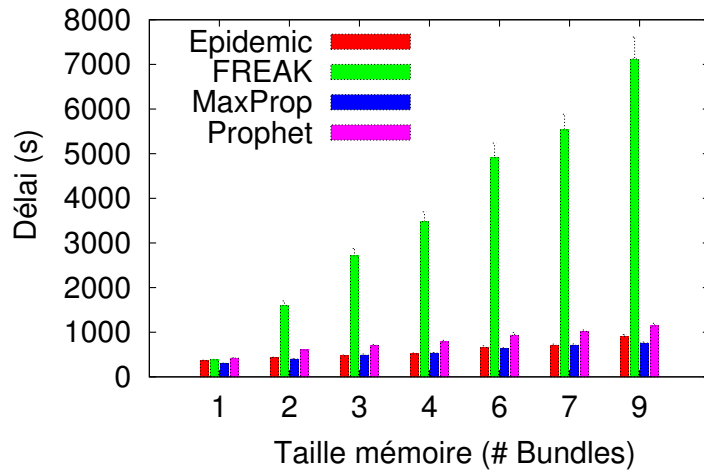


FIGURE 6.9 – Délai en Random Walk sans ACKs

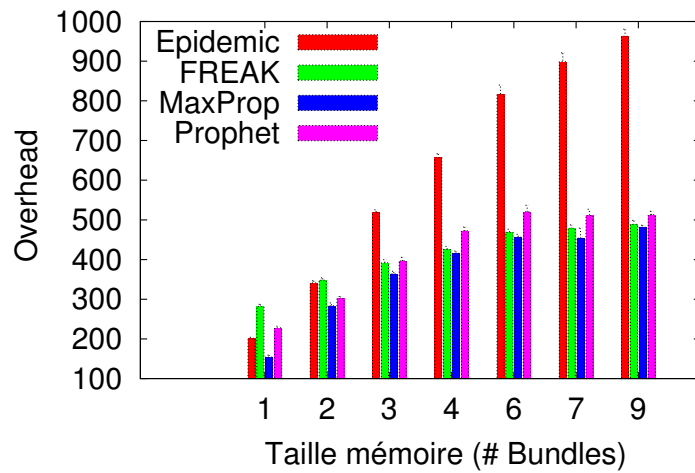


FIGURE 6.10 – Overhead en Random Walk sans ACKs

6. CONNAISSANCE DU PASSÉ POUR IMAGINER L'AVENIR DANS LES RÉSEAUX DE CAPTEURS MOBILES

derniers sont conservés plus longtemps et ceci augmente le délai moyen de délivrance. Notre contexte applicatif ne présente pas de fortes contraintes sur le délai, c'est donc une métrique que nous sommes prêts à sacrifier si cela permet d'augmenter le taux de délivrance.

L'overhead est représenté sur la figure 6.10. Les pires résultats sont évidemment ceux d'*Epidemic* où tous les nœuds s'échangent la totalité des Bundles qu'ils transportent. L'overhead augmente avec la taille des mémoires car plus de Bundles sont disponibles pour être transmis à chaque contact.

Nous allons désormais analyser les résultats dans les mêmes conditions en rajoutant l'utilisation des ACKs.

6.5.2 Avec ACKs

Nous avons décidé d'allouer une faible partie de la mémoire aux ACKs. Nous considérons que les ACKs sont dix fois moins volumineux que les Bundles. Nous allouons 10% de la mémoire aux ACKs de manière arbitraire. Ainsi un nœud peut contenir autant d'ACKs que de Bundles. Nous analyserons par la suite l'influence de la proportion de la mémoire allouée aux ACKs sur les performances.

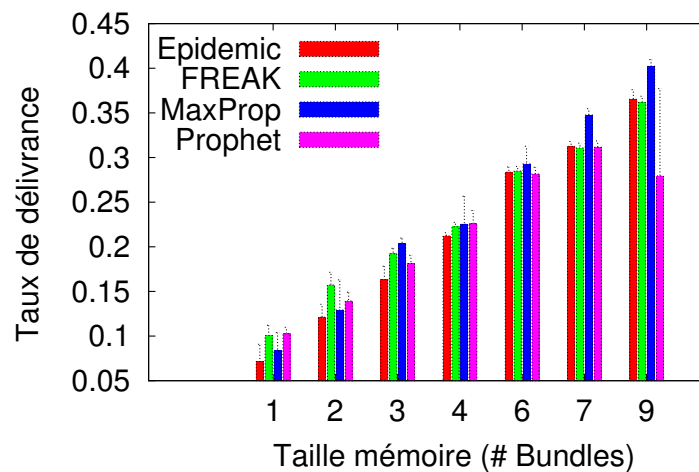


FIGURE 6.11 – Taux de délivrance en Random Walk avec ACKs

Nous constatons sur la figure 6.11 que l'utilisation des ACKs permet d'augmenter les performances du réseau. De plus, la mémoire est mieux utilisée car désormais le taux de délivrance augmente avec la mémoire. Les ACKs permettent de retirer des copies de Bundles déjà délivrés. La mémoire utilisée par les ACKs est bien rentabilisée. Nous remarquons sur la figure 6.12 également que le délai augmente avec la mémoire. Une raison permettant d'expliquer cette augmentation réside dans le fait que la délivrance augmente. Étant donné que plus de Bundles sont

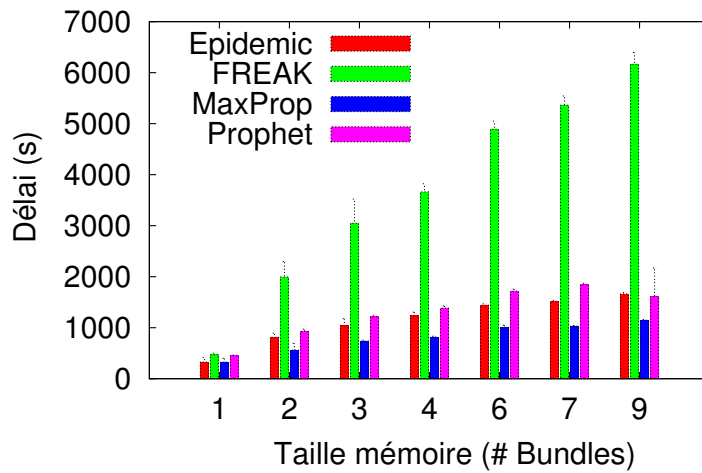


FIGURE 6.12 – Délai en Random Walk avec ACKs

délivrés, certains Bundles qui n'auraient pas été remis vont l'être mais en restant plus longtemps dans le réseau. C'est donc parce que la délivrance augmente que le délai augmente également.

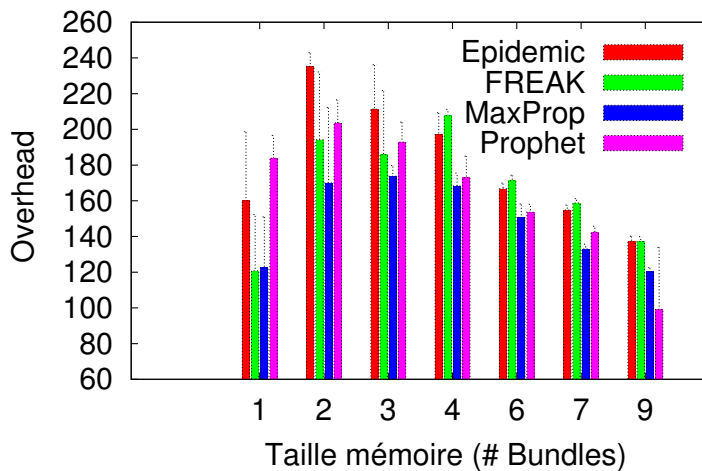


FIGURE 6.13 – Overhead en Random Walk avec ACKs

Sur la figure 6.13, nous observons l'évolution de l'overhead qui augmente avant de décroître avec l'augmentation de la mémoire. Cette amélioration résulte de l'utilisation des ACKs. Les nœuds suppriment des répliques de Bundles déjà délivrés grâce aux ACKs. Tous ces Bundles qui auraient été échangés sans améliorer la délivrance sont retirés du réseau avec la propagation des

6. CONNAISSANCE DU PASSÉ POUR IMAGINER L'AVENIR DANS LES RÉSEaux DE CAPTEURS MOBILES

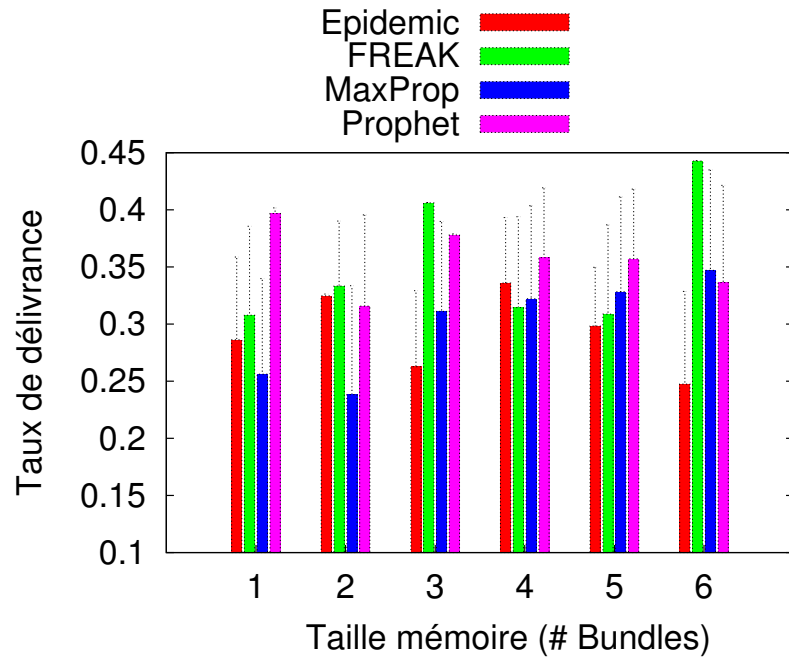


FIGURE 6.14 – Taux de délivrance sur les traces de San Francisco avec ACKs

ACKs.

Dans un scénario opportuniste, les ACKs sont conservés le plus longtemps possible. Chaque terminal est susceptible de transporter une réplique d'un Bundle déjà délivré, il faut donc propager les ACKs dans tout le réseau afin d'éradiquer les copies d'un Bundle déjà remis. Des pertes peuvent se produire sur les ACKs. Nous faisons le choix de remplacer les ACKs de manière premier arrivé premier servi. Plus un ACK est ancien plus le nœud a eu l'occasion de le propager. Il semble donc plus approprié de sacrifier les anciens au profit des nouveaux.

Nous observons désormais les résultats de nos simulations avec les ACKs dans un contexte plus réaliste avec l'utilisation des traces des taxis de San Francisco.

Nous constatons sur la figure 6.14, que FREAK propose des taux de délivrance du même ordre de grandeur voire supérieurs aux autres protocoles. Nous ne pouvons pas conclure sur une influence de l'augmentation de la mémoire sur les résultats. Il semblerait qu'en fonction du nombre de places en mémoire, les pertes se produisent sur des copies d'un même Bundle. Ainsi, les taux de délivrance fluctuent entre 30 et 45%.

Le même constat est réalisé sur le délai et l'overhead sur les figures 6.15 et 6.16. Le délai proposé par FREAK est bien meilleur que dans le cas d'une mobilité aléatoire. Cela prouve qu'il y a bien une répétitivité dans les trajectoires des mobiles et que FREAK parvient à l'exploiter pour améliorer les performances du réseau. L'overhead ne varie pas non plus avec la mémoire. Certaines différences sont présentes, mais il n'y a pas de tendance notable pour aucun protocole.

Nous nous concentrons sur l'influence de la proportion de mémoire allouée aux ACKs et

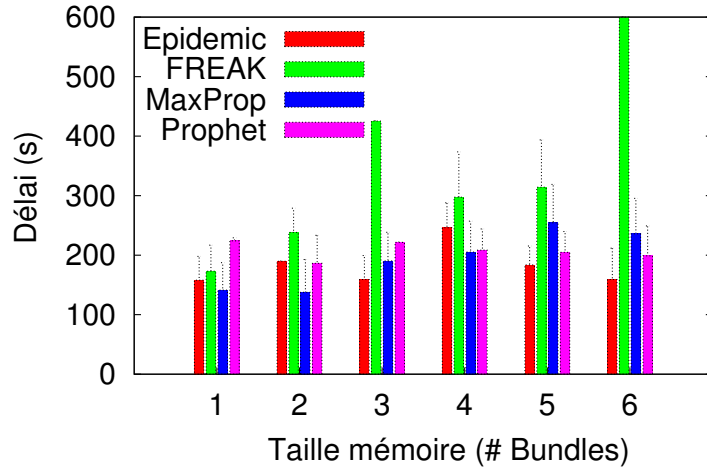


FIGURE 6.15 – Délai sur les traces de San Francisco avec ACKs

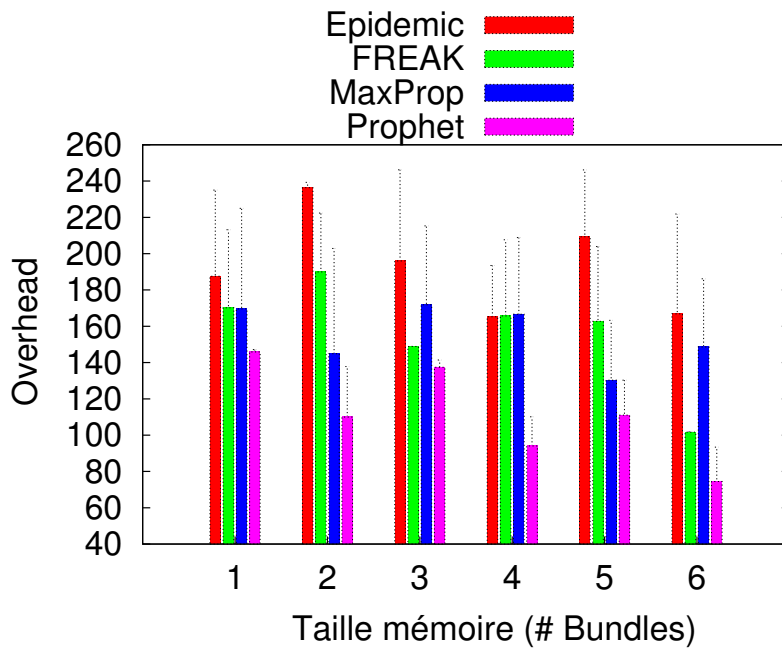


FIGURE 6.16 – Overhead sur les traces de San Francisco avec ACKs

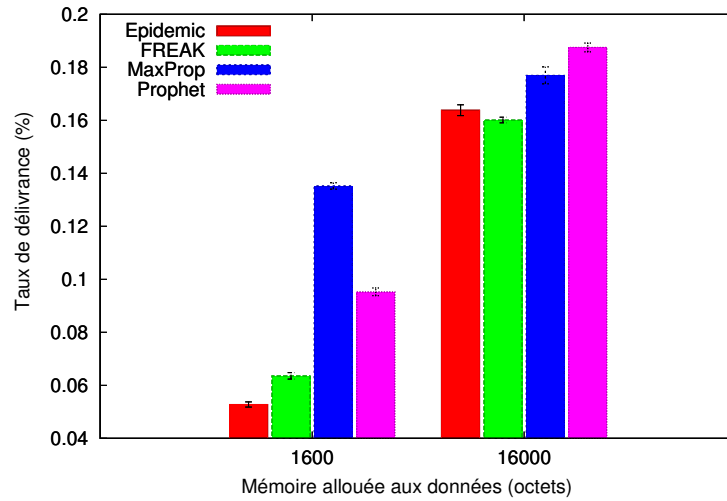


FIGURE 6.17 – Taux de délivrance avec 1,6 Ko et 16 Ko de mémoire sans ACK

observons l'influence de l'augmentation de la mémoire par rapport à l'utilisation d'ACKs.

6.5.3 Variation de la mémoire des ACKs

Dans un premier temps, nous comparons les taux de délivrance sans ACK afin d'observer l'influence de l'augmentation de la taille des mémoires.

Sur la figure 6.17, nous constatons que l'augmentation de la mémoire améliore les performances. Cependant, la capacité des mémoires a été multipliée par 10 alors que le taux de délivrance est au mieux multiplié par 3, pour *Epidemic*, et au pire progresse de 33%, pour *MaxProp*. De plus, les taux de délivrance sont tous très faibles. Nous en déduisons que, contrairement à ce que l'on pouvait attendre, lorsque les mémoires sont faibles, l'ajout de mémoire ne fournit pas une augmentation significative sur les performances du réseau.

Nous allons maintenant nous concentrer sur le taux de délivrance, le délai, le temps de séjour et l'overhead lorsque les ACKs sont utilisés et que nous faisons varier la quantité de mémoire réservée aux ACKs.

Nous constatons sur la figure 6.18 que le taux de délivrance augmente avec la proportion de mémoire allouée aux données. Lorsque nous augmentons la mémoire allouée aux ACKs, la délivrance chute car il n'y a plus assez de place en mémoire pour transporter les données. De plus, avec très peu d'ACKs — 10% de la mémoire disponible, soit 160 octets — nous obtenons des taux de délivrance proches de 100%. Nous en déduisons donc qu'il n'est pas nécessaire d'avoir beaucoup d'ACKs pour améliorer les performances. Nous faisons également le constat qu'il est pourtant bien plus intéressant de sacrifier un peu de mémoire pour utiliser les ACKs plutôt que d'augmenter la capacité des mémoires.

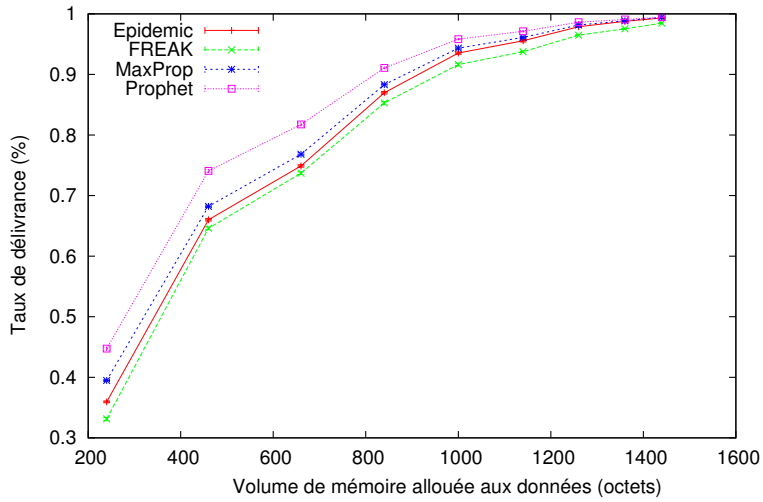


FIGURE 6.18 – Taux de délivrance avec 1,6 Ko de mémoire avec ACK

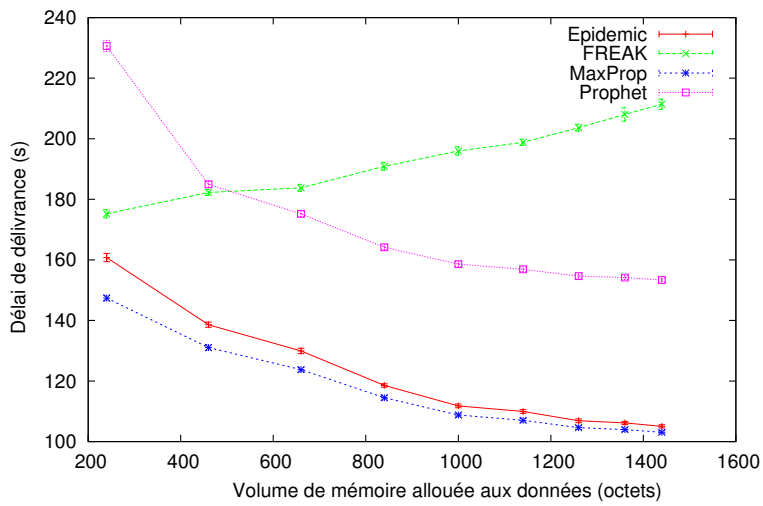


FIGURE 6.19 – Délai avec 1,6 Ko de mémoire avec ACK

6. CONNAISSANCE DU PASSÉ POUR IMAGINER L'AVENIR DANS LES RÉSEAUX DE CAPTEURS MOBILES

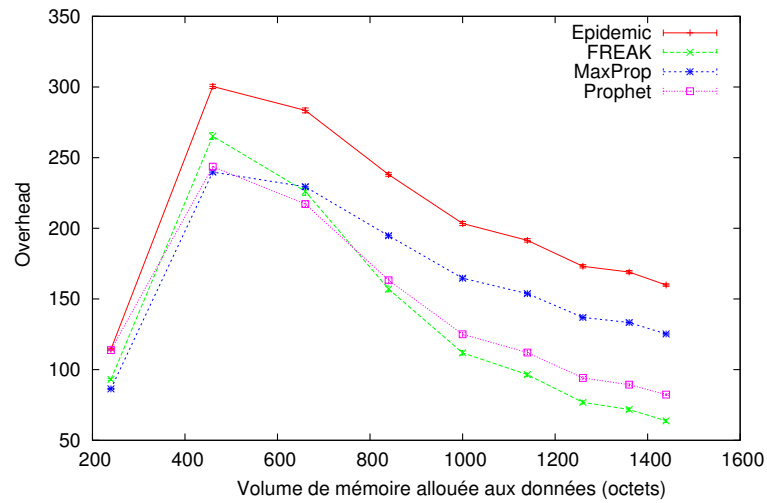


FIGURE 6.20 – Overhead avec 1,6 Ko de mémoire avec ACK

En observant la figure 6.20 en parallèle, nous constatons que FREAK parvient à améliorer les performances du réseau. En effet, le taux de délivrance est proche de solutions à inondation comme *Epidemic* alors que l'overhead est plus faible. FREAK utilise donc moins de transmissions pour atteindre les mêmes performances que les solutions de la littérature.

Sur la figure 6.19, nous remarquons que le délai diminue avec l'augmentation de la mémoire allouée aux données sauf pour FREAK. Le délai augmente pour FREAK car il favorise les données en provenance de nœuds peu susceptibles de rencontrer la destination. Lorsque la mémoire allouée aux données augmente, les Bundles en provenance de ces nœuds ont plus d'opportunités de rejoindre la destination et ainsi le temps de délivrance augmente.

La figure 6.21 présente les temps de séjours des Bundles. On constate que ce temps augmente avec la proportion de mémoire allouée aux données. Cela s'explique car plus on a de mémoire pour les données et plus de répliques sont stockées dans le réseau. Cela prend donc plus de temps pour les retirer. De plus, comme on diminue la proportion de mémoire allouée aux ACKs, ces derniers se propagent moins dans le réseau, et éliminent donc moins vite les répliques des Bundles déjà remis.

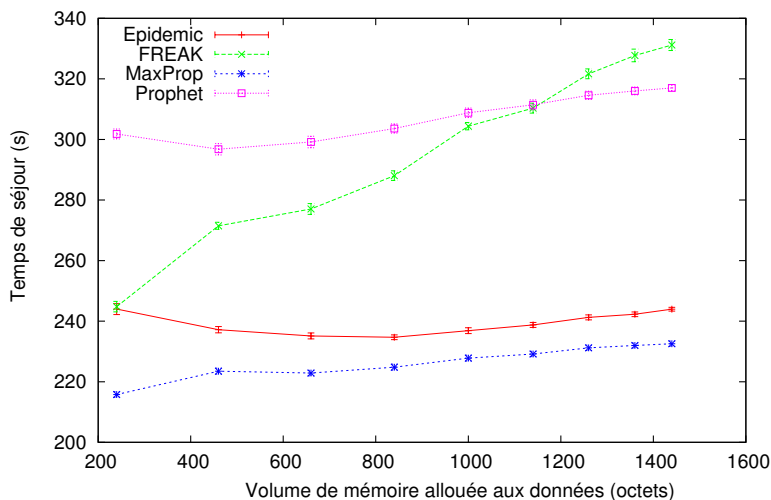


FIGURE 6.21 – Temps de séjour avec 1,6 Ko de mémoire avec ACK

6.6 Conclusion

Nous nous sommes intéressés aux problèmes liés à la collecte d’information dans un réseau de capteurs mobiles. La forte dynamique du réseau crée des intermittences sur les liens et ainsi une faible connectivité justifiant l’utilisation de mécanismes DTN. Néanmoins, les capteurs ont de faibles mémoires et capacités de traitement. Il fallait donc proposer des mécanismes simples, légers et engendrant peu de données sur le réseau.

Nous avons proposé FREAK, qui utilise les caractéristiques sociales du réseau pour fournir de bons taux de délivrance en limitant l’utilisation des ressources du réseau. Il repose sur l’hypothèse que la mobilité des nœuds n’est pas aléatoire et que les rencontres futures peuvent être estimées à partir de l’historique des contacts passés. Nous proposons que les nœuds qui rencontrent moins fréquemment la destination transmettent leurs données vers ceux qui la rencontrent plus souvent. Nous atteignons des performances similaires à celles des protocoles de la littérature avec moins d’informations que des protocoles comme PRoPHET ou MaxProp. De plus, contrairement aux protocoles de la littérature, notre protocole est suffisamment léger pour être implanté sur de petits équipements. Nous avons également constaté que les accusés de réception permettaient d’améliorer tous les protocoles DTN. Nous avons donc décidé d’étudier l’influence de ce mécanisme sur les performances du réseau. Il apparaît que l’utilisation d’ACKs est appropriée à un contexte avec des mémoires limitées. De plus, il est plus intéressant d’utiliser des ACKs plutôt que d’augmenter la mémoire et de ne pas utiliser d’accusés de réception. Enfin, la proportion de mémoire allouée aux ACKs peut rester faible et fournir de très bons résultats. Nous avons effectivement constaté que l’augmentation de la proportion de mémoire allouée aux ACKs n’entraînait

6. CONNAISSANCE DU PASSÉ POUR IMAGINER L'AVENIR DANS LES RÉSEAUX DE CAPTEURS MOBILES

pas une augmentation des performances.

7 Conclusion et Perspectives

7.1 Conclusion

Les systèmes d'observation reposent sur des technologies bien différentes en allant des satellites à orbite basse jusqu'aux réseaux de capteurs autonomes en passant par les drones et ballons stratosphériques. Malgré des caractéristiques propres à chacune, ces diverses technologies présentent des similarités telles que la non-connexité du réseau. Il existe donc un besoin d'un socle commun pour permettre l'utilisation de ces technologies dans un même système. Ce besoin se fait ressentir avec le développement de plateformes multi-missions et de la définition de la pile protocolaire du [CCSDS](#) côté satellite et l'évolution vers des piles protocolaires utilisant des standards de l'Internet avec [6LoWPAN](#) pour la partie réseaux de capteurs.

Dans ce contexte d'unification, nous avons étudié les contraintes liées aux applications et aux technologies afin de proposer une architecture adéquate et de l'utiliser comme socle pour nos propositions. Les problèmes principaux sont dus à la non-connexité du réseau résultant de l'intermittence de plusieurs liens. L'architecture [DTN](#) a été conçue pour faire face à ces problèmes. C'est pourquoi nous avons choisi d'avoir recours au Bundle Protocol défini par le Groupe de Recherche [DTN](#), capable de s'acclimater à de longs délais liés aux intermittences de liens.

Nous avons proposé une architecture réseau ayant recours à deux technologies aux contraintes distinctes, les satellites d'observation et les réseaux de capteurs. Les communications par satellite sont très gourmandes en puissance alors que les réseaux de capteurs minimisent leur consommation énergétique et présentent de très faibles mémoires. Nous avons proposé trois architectures permettant de réaliser le même objectif avec des spécificités différentes. Une est très peu envahissante en ne rajoutant le Bundle Protocol que sur la partie qui interconnecte le réseau de capteurs au satellite, une deuxième demande plus d'intelligence au niveau du satellite mais permet de fournir plus de services et une troisième enfin limite la capacité mémoire des capteurs en permettant à ce segment du réseau de s'affranchir des problèmes d'intermittence des liens grâce à une adaptation du Bundle Protocol sur capteur. Le but de ces architectures est d'être indépendante des technologies utilisées. En revanche, elles seront modulables en fonction des contraintes de l'application.

Après avoir proposé ces différentes architectures, nous nous sommes concentrés sur le segment satellite. Comme nous souhaitons proposer des solutions qui soient indépendantes des technolo-

7. CONCLUSION ET PERSPECTIVES

gies utilisées, nous définissons un cadre d'étude qui correspond à une application satellite mais qui peut être aisément étendu à un autre contexte. Ainsi, nous retenons le fait que le satellite collecte des données de plusieurs stations invisibles les unes des autres de façon répétée. Le scénario retenu compte deux classes de trafics. Un trafic présent en permanence qui effectue des relevés sur une zone et un trafic sporadique représentant des données transmises pendant une période de crise. Le trafic critique est plus prioritaire que le trafic permanent. Afin de ne pas conserver inutilement des données critiques obsolètes, leur durée de vie est inférieure à la durée de vie des données du trafic permanent.

Nous avons proposé un mécanisme, Carreau, implanté au niveau du satellite pour donner la priorité au trafic critique en limitant l'atteinte aux performances du trafic permanent. Le concept de Carreau est d'être prêt à retirer de la mémoire du satellite des données moins prioritaires au profit de données plus prioritaires. Afin de limiter l'impact de l'arrêt momentané du service de certains Bundles, ceux sélectionnés ont la plus grande durée de vie. Nous sommes parvenus à améliorer les performances du trafic prioritaire en limitant l'impact sur le trafic permanent. Suite à cela, nous avons constaté que des trafics de même niveau de priorité pouvaient ne pas accéder au satellite si la mémoire de ce dernier est pleine lors du passage au-dessus d'une passerelle. Nous avons donc proposé un protocole, Martinet, qui s'assure de l'équité entre les trafics en provenance des différentes passerelles. Le maintien de l'équité n'est pas réalisé aux dépens de la délivrance. C'est dans un contexte de surcharge de courte durée que l'équité est maintenue. C'est donc un choix sur les pertes qui est fait, afin de garantir l'équité.

Nous nous sommes ensuite concentrés sur le segment capteurs de notre réseau. La littérature étant abondante dans les contextes de capteurs fixes, nous avons souhaité proposer un réseau de capteurs mobiles. Les problèmes sont différents dans le sens où les capteurs doivent conserver leur équipement radio allumé en permanence. Nous faisons donc l'hypothèse que les capteurs n'ont pas de problèmes d'énergie, la radio étant la partie la plus consommatrice. Nous avons considéré et proposé des implantations interopérables du Bundle Protocol sur capteurs. Au-delà d'une validation fonctionnelle de cette proposition, sa mise en œuvre s'est révélée très riche en enseignements. En particulier, nous avons été confrontés aux limitations de la mémoire et de la taille du code. De plus, lorsque le code était déployable sur les capteurs à notre disposition, nous ne pouvions stocker qu'une dizaine de Bundles. Cela nous a conduit à orienter notre recherche et ainsi proposer des mécanismes adaptés au contexte considéré.

La plupart des protocoles de routage dans les DTN reposent sur l'utilisation du passé pour prédire l'avenir associée à la réplique des Bundles. Nous avons souhaité faire de même sur nos capteurs avec néanmoins des contraintes de mémoire et de capacités de traitement. C'est ainsi que nous avons proposé FREAK, un protocole de routage optimiste qui utilise la fréquence de rencontres avec la destination pour déterminer si une copie doit être transmise à un nœud rencontré. Ce protocole atteint des performances similaires à celles de protocoles ayant recours à plus d'informations pour leur décision de transmission. En réalisant l'étude de FREAK, nous avons constaté que le mécanisme des accusés de réception utilisés dans les DTN permettait

d'augmenter considérablement les performances d'un réseau. Nous avons donc étudié l'impact de la propagation des accusés de réception dans un réseau à l'aide d'un modèle analytique dans le cas d'une mémoire infinie. Lorsque les mémoires sont finies, le modèle ne peut plus être appliqué et nous avons eu recours à des simulations pour conclure qu'il était plus important d'utiliser même très peu d'accusés de réception plutôt que d'augmenter la mémoire sans utiliser les accusés de réception.

7.2 Perspectives

Les travaux que nous avons menés soulèvent de nouvelles questions auxquelles il faut apporter des réponses.

Nous envisageons de modifier le scénario en considérant l'ajout d'un satellite géostationnaire qui ne serait utilisé qu'en cas d'urgence, lorsque la capacité du satellite d'observation serait saturée. Il faudrait alors faire un choix entre les mécanismes proposés qui peuvent mener à des pertes de données et l'utilisation d'une autre technologie. Un mélange de ces deux solutions est également envisageable avec dans un premier temps le dépôt de données à longue durée de vie suivi de la transmission éventuelle de données ayant patienté trop longtemps.

Une perspective d'évolution sur le segment satellite consiste aussi à s'intéresser au cas où plusieurs passerelles verraient le satellite simultanément. Le satellite aurait alors les moyens de déterminer localement les données qu'il récupérerait et celles qu'il laisserait au sol sans même les avoir récupérées. Ceci diminuerait le nombre de transmissions par message reçu.

Sur le segment capteurs, les principales perspectives auxquelles nous pensons sont orientées vers le mécanisme d'accusés de réception et la diminution du nombre de transmissions de données et de signalisation. Ainsi, on pourrait estimer la durée moyenne pour un nœud de rejoindre la destination. On transmettrait uniquement à ceux améliorant cette métrique. Lorsque de la congestion surviendrait, on supprime en priorité les messages dont la durée de vie est inférieure à cette estimation. On pourrait même envisager que pour remplacer les accusés de réception, on supprimerait tous les messages présents depuis une certaine période dans le réseau, car ceux-ci possèderaient une vraisemblance élevée d'avoir atteint la destination.

Une autre évolution consisterait à faire en sorte qu'une décision soit prise lorsque plusieurs capteurs sont à portée. Il serait utile d'ordonnancer les transmissions en fonction du prochain relais, de la durée de vie du message, de son nombre de transmissions et de la durée estimée du contact entre les nœuds. Un tel mécanisme permettrait de sélectionner les meilleures transmissions possibles. De tels mécanismes existent déjà, mais avec deux nœuds. Il faudrait réfléchir à une adaptation à un contexte où lors d'un contact, plus de deux nœuds sont à portée.

Parmi les évolutions plus générales, nous pourrions rajouter plus d'hétérogénéité en considérant l'utilisation de drones, de ballons, de passerelles mobiles. Nous pourrions vérifier que l'architecture joue bien son rôle d'unification. Il faudrait alors observer le fonctionnement des mécanismes proposés avec de telles modifications ainsi que réfléchir à des solutions prenant en

7. CONCLUSION ET PERSPECTIVES

compte les contraintes imposées par les nouvelles technologies considérées.

Les expérimentations que nous avons menées ont été particulièrement instructives. Nous pouvons dorénavant envisager un déploiement en vraie grandeur et plus systématique des solutions que nous avons proposées. Par exemple, la diffusion d'ACKs dans un réseau de capteurs avec collecte d'informations est désormais tout à fait réaliste.

Des projets tels que Space WIreless sensor networks for Planetary Exploration ([SWIPE](#)), où la zone étudiée n'est pas en visibilité directe de la Terre [[119](#), [120](#)], pourraient tirer profit des architectures et solutions que nous avons proposées dans cette thèse. Ainsi les problèmes d'intermittence des liens seraient résolus, rendant la compréhension de l'Univers plus accessible.

Liste des communications

Conférences internationales avec comité de lecture

- [1] Patrice Raveneau, Emmanuel Chaput, Riadh Dhaou, Emmanuel Dubois, Patrick Gélard, and André-Luc Beylot. Hybridisation of WSN and satellite (regular paper). In *AIAA International Communications Satellite Systems Conference (ICSSC), Nara, 28/11/2011-01/12/2011*, pages 1–9, <http://www.aiaa.org>, Décembre 2011. American Institute of Aeronautics and Astronautics (AIAA).
- [2] Patrice Raveneau, Emmanuel Chaput, Riadh Dhaou, Emmanuel Dubois, Patrick Gélard, and André-Luc Beylot. Carreau: CARrier REsource Access for mUle, DTN applied to hybrid WSN / satellite system (regular paper). In *IEEE Vehicular Technology Conference (VTC), Las Vegas, 02/09/2013-05/09/2013*, pages 1–5, <http://www.ieee.org/>, 2013. IEEE.
- [3] Patrice Raveneau, Emmanuel Chaput, Riadh Dhaou, Emmanuel Dubois, Patrick Gélard, and André-Luc Beylot. Martinet: A Disciplinarian Protocol for Resource Access in DTN (poster). In *IFIP Wireless Days (WD), Valencia, 13/11/2013-15/11/2013*, pages 1–3, <http://www.ieee.org/>, Novembre 2013. IEEE.

Rapports

- [1] Patrice Raveneau, André-Luc Beylot, Emmanuel Chaput, and Riadh Dhaou. Hybridation du satellite avec les réseaux de capteurs sans fil. Rapport de contrat IRT-10-12-06, Institut National Polytechnique de Toulouse, Toulouse, France, Décembre 2010.
- [2] Patrice Raveneau, André-Luc Beylot, Emmanuel Chaput, and Riadh Dhaou. Étude de l'hybridation du satellite avec les réseaux de capteurs sans fil. Rapport de contrat IRT-11-04-01, Institut National Polytechnique de Toulouse, Toulouse, France, Avril 2011.

Bibliographie

- [1] “Argos,” Janvier 2014. [Online]. Available: <http://suivi-animal.u-strasbg.fr/technique.htm>
- [2] Z. A. B. of Directors, *ZigBee Specification*, Janvier 2008.
- [3] **CCSDS**, *Overview of space communications protocols*. **CCSDS** Secretariat, Décembre 2007.
- [4] K. Scott and S. Burleigh, “Bundle Protocol Specification,” RFC 5050 (Experimental), Internet Engineering Task Force, 2007. [Online]. Available: <http://www.ietf.org/rfc/rfc5050.txt>
- [5] G. von Zengen, F. Büsching, W.-B. Pöttner, and L. Wolf, “An Overview of μ DTN: Unifying DTNs and WSNs,” in *Proceedings of the 11th GI/ITG KuVS Fachgespräch Drahtlose Sensornetze (FGSN)*, Darmstadt, Germany, Septembre 2012. [Online]. Available: <http://www.ibr.cs.tu-bs.de/papers/buesching-fgsn2012.pdf>
- [6] Q. Vey, P. Berthou, and T. Gayraud, “Improvement of pear signaling in energy efficient delay tolerant wireless sensor network,” in *IFIP Wireless Days (WD)*, Novembre 2013, pp. 1–6.
- [7] T. V. Prabhakar, A. U. Nambi S.n, H. S. Jamadagni, K. Swaroop, R. V. Prasad, and I. I. Niemegeers, “A novel dtn based energy neutral transfer scheme for energy harvested wsn gateways,” *SIGMETRICS Perform. Eval. Rev.*, vol. 38, no. 3, pp. 71–75, 2011. [Online]. Available: <http://doi.acm.org/10.1145/1925019.1925034>
- [8] M. de l’Agriculture de l’Agroalimentaire et de la Forêt, “Le recours aux satellites en agriculture : évolutions récentes et perspectives,” Tech. Rep., Février 2014. [Online]. Available: <http://www.agreste.agriculture.gouv.fr/IMG/pdf/analyse671402.pdf>
- [9] “Système argos,” Janvier 2014, http://www.argos-system.org/welcome_fr.html.
- [10] P. Juang, H. Oki, Y. Wang, M. Martonosi, L. S. Peh, and D. Rubenstein, “Energy-efficient computing for wildlife tracking: Design tradeoffs and early experiences with zebranet,” *SIGARCH Comput. Archit. News*, vol. 30, no. 5, pp. 96–107, 2002. [Online]. Available: <http://doi.acm.org/10.1145/635506.605408>

BIBLIOGRAPHIE

- [11] “La filière myriade,” Février 2014. [Online]. Available: <http://smc.cnes.fr/MYRIADE/Fr/>
- [12] T. Clausen and P. Jacquet, “Optimized Link State Routing Protocol (OLSR),” RFC 3626 (Experimental), Internet Engineering Task Force, 2003. [Online]. Available: <http://www.ietf.org/rfc/rfc3626.txt>
- [13] C. E. Perkins and P. Bhagwat, “Highly dynamic destination-sequenced distance-vector routing (dsv) for mobile computers,” *SIGCOMM Comput. Commun. Rev.*, vol. 24, no. 4, pp. 234–244, 1994. [Online]. Available: <http://doi.acm.org/10.1145/190809.190336>
- [14] D. Johnson, Y. Hu, and D. Maltz, “The Dynamic Source Routing Protocol (DSR) for Mobile Ad Hoc Networks for IPv4,” RFC 4728 (Experimental), Internet Engineering Task Force, 2007. [Online]. Available: <http://www.ietf.org/rfc/rfc4728.txt>
- [15] C. Perkins and E. Royer, “Ad-hoc on-demand distance vector routing,” in *Proceedings of Second IEEE Workshop on Mobile Computing Systems and Applications*, Février 1999, pp. 90–100.
- [16] “IEEE Standard for Information Technology- Telecommunications and Information Exchange Between Systems- Local and Metropolitan Area Networks- Specific Requirements Part 15.4: Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Low-Rate Wireless Personal Area Networks (WPANs),” Tech. Rep., 2006. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1109/ieeestd.2006.232110>
- [17] L. Reynaud, K. Sithamparanathan, K. M. Gomez, and T. Rasheed, “Adaptive energy efficient communications for hybrid aerial-terrestrial systems,” *CoRR*, vol. abs/1208.2825, 2012.
- [18] L. Reynaud, T. Rasheed, and S. Kandeepan, “An integrated aerial telecommunications network that supports emergency traffic,” in *14th International Symposium on Wireless Personal Multimedia Communications (WPMC)*, 2011, pp. 1–5.
- [19] I. F. Akyildiz, B. Akan, C. Chen, J. Fang, and W. Su, “Interplanetary internet: State-of-the-art and research challenges,” *Computer Networks Journal (Elsevier)*, vol. 43, no. 2, pp. 75–113, Octobre 2003.
- [20] “Geo2,” Janvier 2014. [Online]. Available: <http://www.gmes-geoland.info/>
- [21] “Carbones,” Janvier 2014. [Online]. Available: <http://www.carbones.eu/>
- [22] “Euro4m,” Janvier 2014. [Online]. Available: <http://www.euro4m.eu/>
- [23] “Integrated carbon observation system,” Janvier 2014, <http://www.icos-infrastructure.eu/index.php?p=hom>.
- [24] P. Ciais, “Icos: Integrated carbon observation system, l’observatoire européen des gaz à effet de serre,” Janvier 2008.

-
- [25] “Mars science laboratory,” Janvier 2014, <http://marsprogram.jpl.nasa.gov/msl/>.
- [26] “Mars express,” Janvier 2014. [Online]. Available: http://www.esa.int/Our_Activities/Space_Science/Mars_Express
- [27] “Eeliad,” Janvier 2014. [Online]. Available: <http://www.eeliad.com/>
- [28] C. VASSAL, “Argos-3, la nouvelle génération,” Juin 2006, contributeurs: Sarthou, Michel and Woodward, Bill and Guigue, Michel and Coulon, Bruno and Planchou, Fabrice and Belbeoch, Matthieu.
- [29] “Safer,” Janvier 2014, http://www.emergencyresponse.eu/site/FO/scripts/myFO_accueil.php?lang=EN.
- [30] “Garnete,” Janvier 2014. [Online]. Available: <http://www.gmes-garnete.net/>
- [31] “Geopictures,” Janvier 2014. [Online]. Available: <http://www.geo-pictures.eu/index.html>
- [32] “Demeter,” Janvier 2014, <http://smc.cnes.fr/DEMETER/Fr>.
- [33] “Medes,” Janvier 2014, http://www.medes.fr/home_fr/telemedecine/equipements.html.
- [34] “Systemf6,” Janvier 2014. [Online]. Available: http://www.darpa.mil/Our_Work/TTO/Programs/System_F6.aspx
- [35] “Helios,” Janvier 2014, <http://www.defense.gouv.fr/dga/equipement/information-communication-espace/helios-ii/%28language%29/fre-FR>.
- [36] S. Medjiah, F. Krief, and T. Ahmed, “Scénarios d’hybridation des réseaux satellites avec des réseaux maillés de capteurs,” 2008, livrable 2. [Online]. Available: <http://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00411041>
- [37] R. Kacimi, “Techniques de conservation d’énergie pour les réseaux de capteurs sans fil,” Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse, Toulouse, France, Septembre 2009.
- [38] M. Quwaider, M. Taghizadeh, and S. Biswas, “Modeling on-body dtn packet routing delay in the presence of postural disconnections,” *EURASIP J. Wirel. Commun. Netw.*, vol. 2011, pp. 3:1–3:19, 2011. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1155/2011/280324>
- [39] N. Kushalnagar, G. Montenegro, and C. Schumacher, “IPv6 over Low-Power Wireless Personal Area Networks (6LoWPANs): Overview, Assumptions, Problem Statement, and Goals,” RFC 4919 (Informational), Internet Engineering Task Force, 2007. [Online]. Available: <http://www.ietf.org/rfc/rfc4919.txt>
- [40] *CCSDS, Space Packet Protocol*. CCSDS Secretariat, Septembre 2003.

BIBLIOGRAPHIE

- [41] —, *Space Packet Protocol*. CCSDS Secretariat, Avril 2004.
- [42] L. Wood, W. Ivancic, W. Eddy, D. Stewart, J. Northam, and C. Jackson, “Investigating operation of the internet in orbit: Five years of collaboration around cleo,” *arXiv preprint arXiv:1204.3261*, 2012.
- [43] L. Wood, W. Ivancic, D. Hodgson, E. Miller, B. Conner, S. Lynch, C. Jackson, A. da Silva Curiel, D. Cooke, D. Shell *et al.*, “Using internet nodes and routers onboard satellites,” *International Journal of Satellite Communications and Networking*, vol. 25, no. 2, pp. 195–216, 2007.
- [44] F. Davis, J. Marquart, and G. Menke, “Benefits of delay tolerant networking for earth science missions,” in *IEEE Aerospace Conference*, Mars 2012, pp. 1–11.
- [45] K. Fall, “A delay-tolerant network architecture for challenged internets,” in *Proceedings of the Conference on Applications, Technologies, Architectures, and Protocols for Computer Communications*, ser. SIGCOMM '03. New York, NY, USA: ACM, 2003, pp. 27–34. [Online]. Available: <http://doi.acm.org/10.1145/863955.863960>
- [46] C. Caini, R. Firrincieli, M. Marchese, T. de Cola, M. Luglio, C. Roseti, N. Celandroni, and F. Potorti, “Transport layer protocols and architectures for satellite networks,” *International Journal of Satellite Communications Networking*, vol. 25, no. 1, pp. 1–26, 2007. [Online]. Available: <http://dblp.uni-trier.de/db/journals/ijscn/ijscn25.html#CainiFMCLRCP07>
- [47] J. Border, M. Kojo, J. Griner, G. Montenegro, and Z. Shelby, “Performance Enhancing Proxies Intended to Mitigate Link-Related Degradations,” RFC 3135 (Informational), Internet Engineering Task Force, 2001. [Online]. Available: <http://www.ietf.org/rfc/rfc3135.txt>
- [48] V. Cerf, S. Burleigh, A. Hooke, L. Torgerson, R. Durst, K. Scott, K. Fall, and H. Weiss, “Delay-tolerant network architecture: The evolving interplanetary internet,” Internet Engineering Task Force, Internet-Draft, Août 2002. [Online]. Available: <http://tools.ietf.org/html/draft-irtf-ipnrg-arch-01>
- [49] —, “Delay-Tolerant Networking Architecture,” RFC 4838 (Informational), Internet Engineering Task Force, 2007. [Online]. Available: <http://www.ietf.org/rfc/rfc4838.txt>
- [50] W. Eddy and E. Davies, “Using Self-Delimiting Numeric Values in Protocols,” RFC 6256 (Informational), Internet Engineering Task Force, 2011. [Online]. Available: <http://www.ietf.org/rfc/rfc6256.txt>
- [51] T. Berners-Lee, R. Fielding, and L. Masinter, “Uniform Resource Identifier (URI): Generic Syntax,” RFC 3986 (INTERNET STANDARD), Internet Engineering Task Force, 2005, updated by RFC 6874. [Online]. Available: <http://www.ietf.org/rfc/rfc3986.txt>

- [52] K. Fall, W. Hong, and S. Madden, “Custody transfer for reliable delivery in delay tolerant networks.”
- [53] C. Caini and R. Firrincieli, “Application of contact graph routing to leo satellite dtn communications,” in *IEEE International Conference on Communications (ICC)*, 2012, pp. 3301–3305.
- [54] K. Hogie and R. Parise, “Using standard internet protocols and applications in space,” *Computer Networks*, vol. 47, pp. 603–650, 2005.
- [55] W.-Z. Lo, J.-S. Gao, and S.-C. Lo, “Distance-aware routing with copy control in vehicle-based dtns.” in *VTC Spring*. IEEE, 2012, pp. 1–5. [Online]. Available: <http://dblp.uni-trier.de/db/conf/vtc/vtc2012s.html#LoGL12>
- [56] S. Jain, K. Fall, and R. Patra, “Routing in a delay tolerant network,” *SIGCOMM Comput. Commun. Rev.*, vol. 34, no. 4, pp. 145–158, 2004. [Online]. Available: <http://doi.acm.org/10.1145/1030194.1015484>
- [57] S. Burleigh, “Contact graph routing,” Internet Engineering Task Force, Internet-Draft draft-burleigh-dtnrg-cgr-01, Juillet 2010, experimental. [Online]. Available: <http://tools.ietf.org/html/draft-burleigh-dtnrg-cgr-01>
- [58] I. Ali, N. Al-Dhahir, and J. Hershey, “Predicting the visibility of leo satellites,” *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 35, no. 4, pp. 1183–1190, 1999.
- [59] J. Segui, E. Jennings, and S. Burleigh, “Enhancing contact graph routing for delay tolerant space networking,” in *IEEE Global Telecommunications Conference (GLOBECOM)*, 2011, pp. 1–6.
- [60] H. Cruz-Sanchez, S. Staples, R. Schott, and Y. Song, “Operator Calculus Approach to Minimal Paths: Precomputed routing in a Store and Forward Satellite Constellation,” in *IEEE Globecom*, IEEE, Ed., IEEE. Anaheim, California, États-Unis: IEEE Xplore, 2012, to appear. [Online]. Available: <http://hal.inria.fr/hal-00745161>
- [61] R. Diana, E. Lochin, L. Franck, C. Baudoin, E. Dubois, and P. Gelard, “A dtn routing scheme for quasi-deterministic networks with application to leo satellites topology,” in *IEEE Vehicular Technology Conference (VTC Fall)*, 2012, pp. 1–5.
- [62] S. Nelson, M. Bakht, and R. Kravets, “Encounter-based routing in dtns,” in *Proceedings IEEE INFOCOM*, 2009, pp. 846–854.
- [63] A. Vahdat and D. Becker, “Epidemic routing for partially connected ad hoc networks,” 2000.
- [64] J. Burgess, B. Gallagher, D. Jensen, and B. N. Levine, “Maxprop: Routing for vehicle-based disruption-tolerant networks,” in *Proceedings IEEE INFOCOM*, 2006.

BIBLIOGRAPHIE

- [65] A. Balasubramanian, B. Levine, and A. Venkataramani, "Replication routing in dtns: A resource allocation approach," *IEEE/ACM Transactions on Networking*, vol. 18, no. 2, pp. 596–609, 2010.
- [66] A. Lindgren, A. Doria, E. Davies, and S. Grasic, "Probabilistic Routing Protocol for Intermittently Connected Networks," RFC 6693 (Experimental), Internet Engineering Task Force, 2012. [Online]. Available: <http://www.ietf.org/rfc/rfc6693.txt>
- [67] L. Costa, F. Rodrigues, G. Travieso, and P. Boas, "Characterization of complex networks: A survey of measurements," *Advances in Physics*, vol. 56, no. 1, pp. 167–242, 2007.
- [68] R. Cabaniss, S. Vulli, and S. Madria, "Social group detection based routing in delay tolerant networks," *Wireless Networks*, vol. 19, no. 8, pp. 1979–1993, 2013. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1007/s11276-013-0580-2>
- [69] Y. Li, Y. Cao, S. Li, D. Jin, and L. Zeng, "Integrating forwarding and replication in dtn routing: A social network perspective," in *IEEE 73rd Vehicular Technology Conference (VTC Spring), 2011*, 2011, pp. 1–5.
- [70] T. Spyropoulos, K. Psounis, and C. S. Raghavendra, "Spray and wait: An efficient routing scheme for intermittently connected mobile networks," in *Proceedings of the ACM SIGCOMM Workshop on Delay-tolerant Networking*, ser. WDTN. New York, NY, USA: ACM, 2005, pp. 252–259. [Online]. Available: <http://doi.acm.org/10.1145/1080139.1080143>
- [71] G. Sandulescu and S. Nadjm-Tehrani, "Opportunistic dtn routing with window-aware adaptive replication," in *Proceedings of the 4th Asian Conference on Internet Engineering*, ser. AINTEC '08. New York, NY, USA: ACM, 2008, pp. 103–112. [Online]. Available: <http://doi.acm.org/10.1145/1503370.1503397>
- [72] R. Diana and E. Lochin, "Modelling the delay distribution of binary spray and wait routing protocol," *CoRR*, vol. abs/1111.6860, 2011.
- [73] A. Lindgren and K. Phanse, "Evaluation of queueing policies and forwarding strategies for routing in intermittently connected networks," in *First International Conference on Communication System Software and Middleware (Comsware)*, 2006, pp. 1–10.
- [74] A. Krifa, C. Barakat, and T. Spyropoulos, "Optimal buffer management policies for delay tolerant networks," in *IEEE Communications Society Conference on Sensor, Mesh and Ad Hoc Communications and Networks (SECON)*, 2008, pp. 260–268.
- [75] T. Karagiannis, J.-Y. Le Boudec, and M. Vojnović, "Power law and exponential decay of intercontact times between mobile devices," *IEEE Transactions on Mobile Computing*, vol. 9, no. 10, pp. 1377–1390, Octobre 2010.

- [76] M. Seligman, K. Fall, and P. Mundur, "Alternative custodians for congestion control in delay tolerant networks," in *Proceedings of the SIGCOMM Workshop on Challenged Networks*, ser. CHANTS. New York, NY, USA: ACM, 2006, pp. 229–236. [Online]. Available: <http://doi.acm.org/10.1145/1162654.1162660>
- [77] M. Keane, E. Kranakis, D. Krizanc, and L. Narayanan, "Routing on delay tolerant sensor networks," in *Algorithmic Aspects of Wireless Sensor Networks*, ser. Lecture Notes in Computer Science, S. Dolev, Ed. Springer Berlin Heidelberg, 2009, vol. 5804, pp. 155–166. [Online]. Available: http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-05434-1_17
- [78] Y. Wang, H. Dang, and H. Wu, "A survey on analytic studies of delay-tolerant mobile sensor networks," *Wireless Communications and Mobile Computing*, vol. 7, no. 10, pp. 1197–1208, 2007. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1002/wcm.519>
- [79] Y. L. and Z. L., "Data gathering in opportunistic wireless sensor networks." *IJDSN*, vol. 2012, 2012. [Online]. Available: <http://dblp.uni-trier.de/db/journals/ijdsn/ijdsn2012.html#LaiL12>
- [80] A. Nayebi, H. Sarbazi-Azad, and G. Karlsson, "Performance analysis of opportunistic broadcast for delay-tolerant wireless sensor networks." *Journal of Systems and Software*, vol. 83, no. 8, pp. 1310–1317, 2010. [Online]. Available: <http://dblp.uni-trier.de/db/journals/jss/jss83.html#NayebiSK10>
- [81] "Filière spot," Janvier 2014, http://www2.astrium-geo.com/files/pmedia/public/r437_9_formatcap_en.pdf.
- [82] "Pleiades," Janvier 2014, http://smc.cnes.fr/PLEIADES/Fr/GP_mission.htm.
- [83] "Vegetation," Janvier 2014, http://smc.cnes.fr/VEGETATION/Fr/GP_mission.htm.
- [84] S. Cakaj and K. Malarić, "Rigorous analysis on performance of leo satellite ground station in urban environment," *International Journal of Satellite Communications and Networking*, vol. 25, no. 6, pp. 619–643, 2007. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1002/sat.895>
- [85] "La filière proteus," Mars 2014. [Online]. Available: <http://smc.cnes.fr/PROTEUS/Fr/>
- [86] M. Younus, A. Minhas, M. Javed, and A. Naseer, "Ear: Efficient energy aware routing in wireless sensor networks," in *7th International Conference on ICT and Knowledge Engineering*, 2009, pp. 57–62.
- [87] R. Haider, M. Javed, and N. Khattak, "Eagr: Energy aware greedy routing in sensor networks," in *Future Generation Communication and Networking (FGCN)*, vol. 2, 2007, pp. 344 349–344 349.

BIBLIOGRAPHIE

- [88] R. Kacimi, R. Dhaou, and A.-L. Beylot, "Load balancing techniques for lifetime maximizing in wireless sensor networks," *Ad Hoc Networks*, vol. 11, no. 8, pp. 2172 – 2186, 2013. [Online]. Available: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1570870513000930>
- [89] O. Incel, A. Ghosh, B. Krishnamachari, and K. Chintalapudi, "Fast data collection in tree-based wireless sensor networks," *IEEE Transactions on Mobile Computing*, vol. 11, no. 1, pp. 86–99, 2012.
- [90] D. P. Dallas and L. W. Hanlen, "Optimal transmission range and node degree for multi-hop routing in wireless sensor networks," in *Proceedings of the 4th ACM Workshop on Performance Monitoring and Measurement of Heterogeneous Wireless and Wired Networks*, ser. PM2HW2N '09. New York, NY, USA: ACM, 2009, pp. 167–174. [Online]. Available: <http://doi.acm.org/10.1145/1641913.1641937>
- [91] B. Elbhiri, S. Fkihi, R. Saadane, N. Lasaad, A. Jorio, and D. Aboutajdine, "A new spectral classification for robust clustering in wireless sensor networks," in *6th Joint IFIP Wireless and Mobile Networking Conference (WMNC)*, 2013, pp. 1–10.
- [92] Y. Li, Z. Wang, and Y. Song, "Wireless sensor network design for wildfire monitoring," in *The Sixth World Congress on Intelligent Control and Automation (WCICA)*, vol. 1, 2006, pp. 109–113.
- [93] "Micaz datasheet," Avril 2014, http://www.openautomation.net/uploads/productos/micaz_datasheet.pdf.
- [94] "Spot," Mars 2014. [Online]. Available: <http://smc.cnes.fr/SPOT/Fr/>
- [95] "Earth-observing 1," Mars 2014. [Online]. Available: <http://eo1.gsfc.nasa.gov/new/extended/index.html>
- [96] "La filière myriade, composante sol," Février 2014. [Online]. Available: http://smc.cnes.fr/MYRIADE/Fr/GP_segment_sol.htm
- [97] S. Burleigh, in *4th IEEE, Consumer Communications and Networking Conference, 2007. CCNC 2007*.
- [98] "Dtn2," Avril 2014. [Online]. Available: <http://www.dtnrg.org/wiki/Dtn2Documentation>
- [99] S. Schildt, J. Morgenroth, W.-B. Pöttner, and L. Wolf, "Ibr-dtn: A lightweight, modular and highly portable bundle protocol implementation," *Electronic Communications of the EASST*, vol. 37, pp. 1–11, Janvier 2011. [Online]. Available: <http://journal.ub.tu-berlin.de/eceasst/article/view/512>
- [100] W.-B. Pöttner, J. Morgenroth, S. Schildt, and L. C. Wolf, "An empirical performance comparison of DTN bundle protocol implementations," in *ACM MobiCom Workshop on*

-
- Challenged Networks (CHANTS)*, Las Vegas, Nevada, USA, 2011. [Online]. Available: <http://www.ibr.cs.tu-bs.de/bib/acmdl/?http://dl.acm.org/authorize?6580950>
- [101] R. Patra and S. Nedeveschi, “Dtnlite: A reliable data transfer architecture for sensor networks,” in *8 th International Conference on Intelligent Engineering Systems*, 2004.
- [102] M. Loubser, “Delay tolerant networking for sensor networks,” Master’s thesis, Swedish Institute of Computer Science, Janvier 2006.
- [103] “Contiki,” Janvier 2014. [Online]. Available: <http://www.contiki-os.org/index.html>
- [104] K. Sithampanathan and M. Marchese, *International Conference on Personal Satellite Services (PSATS)*, ser. Lecture notes of the Institute for Computer Sciences, Social Informatics, and Telecommunications Engineering. Springer Berlin Heidelberg, 2009. [Online]. Available: <http://books.google.fr/books?id=HosqsgNYdLUC>
- [105] G. Hebuterne, “A gate with periodic openings and bulk service,” 1988.
- [106] K. Sikdar and U. C. Gupta, “Analytic and numerical aspects of batch service queues with single vacation,” *Comput. Oper. Res.*, vol. 32, no. 4, pp. 943–966, 2005.
- [107] G. V. K. Reddy and R. Anitha, “Non-markovian bulk service queue with different vacation policies,” *Information and Management Sciences*, vol. 10, no. 4, pp. 1–17, 1999.
- [108] A. Krishnamoorthy and P. V. Ushakumari, “A queueing system with single arrival bulk service and single departure,” *Math. Comput. Model.*, vol. 31, no. 2-3, pp. 99–108, 2000.
- [109] A. Movaghar, “On queueing with customer impatience until the beginning of service,” *Queueing Systems*, vol. 29, pp. 337–350, 1998.
- [110] —, “On queueing with customer impatience until the end of service,” in *Proceedings of IEEE International Computer Performance and Dependability Symposium (IPDS)*, 2000, pp. 167–174.
- [111] A. Keränen, J. Ott, and T. Kärkkäinen, “The ONE Simulator for DTN Protocol Evaluation,” in *Proceedings of the 2nd International Conference on Simulation Tools and Techniques (SIMUTools)*. New York, NY, USA: ICST, 2009.
- [112] R. Jain, D. Chiu, and W. Hawe, *A quantitative measure of fairness and discrimination for resource allocation in shared computer system*. cse.wustl.edu, 1984.
- [113] I. Rhee, M. Shin, S. Hong, K. Lee, S. J. Kim, and S. Chong, “On the levy-walk nature of human mobility,” *IEEE/ACM Transactions on Networking*, vol. 19, no. 3, pp. 630–643, Juin 2011.

BIBLIOGRAPHIE

- [114] A. Chaintreau, P. Hui, J. Scott, R. Gass, J. Crowcroft, and C. Diot, "Impact of human mobility on opportunistic forwarding algorithms," *IEEE Transactions on Mobile Computing*, vol. 6, no. 6, pp. 606–620, June 2007, (previously published in the Proceedings of IEEE INFOCOM 2006). [Online]. Available: <http://www.thomson.net/~chaintre/pub/chaintreau07impact.pdf>
- [115] M. Piorkowski, N. Sarafijanovic-Djukic, and M. Grossglauser, "A Parsimonious Model of Mobile Partitioned Networks with Clustering," in *The First International Conference on COMmunication Systems and NETworkS (COMSNETS)*, Janvier 2009. [Online]. Available: <http://www.comsnets.org>
- [116] J. D. Noh and H. Rieger, "Random walks on complex networks," *Phys. Rev. Lett.*, vol. 92, p. 118701, 2004. [Online]. Available: <http://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.92.118701>
- [117] B. Hughes, *Random Walks and Random Environments: Random walks*, ser. Oxford science publications. Clarendon Press, 1995, no. vol. 1. [Online]. Available: http://books.google.fr/books?id=QhOen_t0LeQC
- [118] F. Bai and A. Helmy, "Chapter 1 a survey of mobility models in wireless adhoc networks," 2008.
- [119] M. Crosnier, P. Boutry, E. Albery, P. Rodrigues, and A. Oliveira, "Swipe – mission design report," TEKEVER, S.A., ARQUIMEA Ingenieria S.L, ASTRIUM SAS, University of Leicester and Consorzio per la Ricerca nell' Automatica e nelle Telecomunicazioni C.R.A.T., Tech. Rep. D2.1, Septembre 2013.
- [120] P. Rodrigues, A. Oliveira, F. Alvarez, R. Cabàs, M. Crosnier, and P. Boutry, "Swipe – system requirements document," TEKEVER, S.A., ARQUIMEA Ingenieria S.L, ASTRIUM SAS, University of Leicester and Consorzio per la Ricerca nell' Automatica e nelle Telecomunicazioni C.R.A.T., Tech. Rep. D2.2, Décembre 2013.

Résumé

La collecte d'informations et leur transmission au travers d'un réseau de communications peut être effectuée par des réseaux de capteurs ou des satellites d'observation. Leur utilisation conjointe permettrait d'obtenir des données complémentaires afin que l'Humanité pérennise son avenir en comprenant les mécanismes du monde qui l'entoure. Ces dernières années, le secteur spatial a montré une volonté d'unification. Nous étudions les technologies et architectures utilisées dans de tels contextes. Nous proposons alors une architecture réseau répondant aux contraintes des systèmes utilisés dans un tel cadre. Les principales contraintes de ces scénarios sont la forte intermittence des liens. Nous avons diminué l'utilisation des ressources réseau. Après avoir proposé une architecture, nous nous sommes focalisés sur les spécificités des différents segments. Nous sommes parvenus à atteindre des performances supérieures aux solutions existantes à moindre frais.

Mots clés : Satellite; Capteurs; Réseaux

Abstract

Data gathering and transmission through a communicating network can be obtained thanks to wireless sensor networks and observation satellites. Using both these technologies will allow mankind to build a sustainable future by understanding the world around. In recent years, space actors have demonstrated a will to reuse the developed technologies by creating multiple programs platforms and defining context-agnostic protocols. We analyse the existing technologies and architectures in several contexts. Then, we propose a networking architecture handling constraints of most commonly used systems in such a context. The main constraints of observation scenarios are due to the links intermittence. We decreased network resource use. After having proposed a common architecture, we focused on particularities of each network segment. We achieved better performance than existing solutions and at lower cost.

Keywords: Satellite; Sensors; Networks