



HAL
open science

Store and Forward routing in satellite constellations de satellites

Hugo Cruz Sanchez

► **To cite this version:**

Hugo Cruz Sanchez. Store and Forward routing in satellite constellations de satellites. domain_other. Télécom ParisTech, 2008. English. NNT: . pastel-00004301

HAL Id: pastel-00004301

<https://pastel.hal.science/pastel-00004301>

Submitted on 7 Jul 2010

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



École Doctorale
d'Informatique,
Électronique et
Télécommunications
de Paris

Thèse

Présentée pour obtenir le grade de docteur
de TELECOM ParisTech
Spécialité : **Électronique et Communications**

Hugo CRUZ SANCHEZ

**Routage Store and Forward dans
les constellations de satellites**

soutenue publiquement le 22 septembre 2008 devant le jury composé de :

Maurice GAGNAIRE	Professeur à TELECOM ParisTech	<i>Président</i>
Xavier LAGRANGE	Professeur à TELECOM Bretagne	<i>Rapporteur</i>
Tijani CHAHED	Professeur à TELECOM & Management SudParis	<i>Rapporteur</i>
Michel BOUSQUET	Professeur à l'ISAE campus SUPAERO	<i>Examineur</i>
Laurent BESOMBES	NOVACOM Services	<i>Invité</i>
André-Luc BEYLOT	Professeur des Universités à l'ENSEEIH Bretagne	<i>Directeur</i>
Laurent FRANCK	Maitre de Conférences à TELECOM Bretagne	<i>Encadrant</i>

Remerciements.

Je voudrais tout d'abord remercier Messieurs André-Luc BEYLOT et Laurent FRANCK qui ont suivi de façon différente mais complémentaire mes travaux durant ces années : Laurent, par son excellent encadrement et sa bonne humeur quotidienne et André Luc par son efficacité, ses corrections et suggestions précises et pointues.

Je remercie vivement le jury qui a participé à la soutenance de cette thèse et sans lequel elle n'aurait pu être publiée. Par ailleurs grâce aux corrections apportées, ce travail a pu être enrichi et peaufiné.

Je veux remercier ensuite le Mexique qui à travers la bourse CONACyT m'a donné l'opportunité de venir en France et de mener à bien ces travaux. J'espère pouvoir, dans les années à venir, rendre au moins un peu de ce que j'ai reçu.

Je tiens à remercier tous ceux qui m'ont soutenu à leur façon tout au long de ces années, les collègues et amis qui m'ont permis de découvrir la France et Toulouse et de rendre cette expérience exceptionnelle : les amis de l'N7, les amis du MOSE et du CIMI, la communauté mexicaine aussi festive en France qu'au Mexique, les amis du collectif Chiapas et MutVitz et le collectif mexicain en résistance.

Je remercie Martine Biscos et M. Gérard Maral, les collègues de l'ENST Paris site Toulouse.

Enfin je voudrais remercier ma famille, qui m'a soutenu et encouragé depuis le Mexique, mes parents, mes frères, mes sœurs et Daniel. Merci Benoît, Dimitri, Gelad, Yao, Tere, Alejandro, Paola, Jean Pierre, Laura, Hilario, Eduardo, Gibran, Carlos...

Merci Emilie pour tout ce bonheur. Merci Armelle pour la précieuse touche finale.

Table des matières

1	Introduction	13
2	Les communications <i>Store and Forward</i> (S&F)	19
2.1	Introduction	19
2.2	Mode de communication S&F	22
2.2.1	<i>Delay Tolerant Networks</i> DTN	25
2.3	Communications S&F dans les satellites	28
2.3.1	Généralités	28
2.3.2	Systèmes de communication S&F par satellite	29
2.3.3	Services offerts	31
2.3.4	Avantages et contraintes des communications S&F par satellite en utilisant les ‘micro sats’	33
2.4	Résumé	33
3	Étude d’un système S&F par satellite	35
3.1	Introduction	35
3.2	Un S&F par satellite et un scénario d’étude	38
3.2.1	Description du système	38
3.2.2	Avantages du système proposé	42
3.3	Évaluation et justification du système proposé	42
3.3.1	Description du scénario	42
3.3.2	Justification des paramètres établis	46
3.3.3	Analyse du système	49
3.4	Les sujets d’étude	51
3.5	Résumé	51

4	Routage adaptatif pré-calculé	53
4.1	Introduction.	53
4.2	Stratégies pour le processus de routage	55
4.2.1	Collecte des informations sur l'état du réseau. Routage statique et dynamique	55
4.2.2	Calcul et sélection de routes optimales	56
4.2.3	Acheminement des messages des usagers au travers des routes sélectionnées	58
4.3	Réseaux dynamiques	58
4.3.1	Routage dans les réseaux dynamiques.	60
4.3.2	Le système proposé, un réseau dynamique	63
4.4	Solutions de routage	65
4.4.1	Les solutions possibles	67
4.4.2	Une solution pour les réseaux Store & Forward (S&F) : Les réseaux spatio-temporels	69
4.5	Routage adaptatif pré-calculé	75
4.5.1	Paramètres d'optimisation et restrictions	76
4.5.2	Description de scénarios	77
4.5.3	Analyse générale des résultats.	87
4.6	Résumé	88
5	Métriques pour le routage dans les réseaux S&F	89
5.1	Introduction.	89
5.2	Métriques de routage dans les réseaux S&F	92
5.2.1	Métriques	92
5.2.2	Métriques pour les réseaux S&F	95
5.2.3	Relations entre le Synchronisme, la Discontinuité et la Simultanéité	111
5.3	Non dépendance des métriques	112
5.4	Conclusion	118
6	Utilisation des métriques S&F sur une constellation de satellites	119

6.1	Introduction	119
6.2	Utilité des métriques pour le routage S&F	121
6.2.1	Avantages	122
6.2.2	Qualité de service, classe de service	122
6.3	Manière d'utiliser les métriques	123
6.3.1	Les services	124
6.4	Application des métriques	125
6.4.1	Présentation du problème	126
6.4.2	Solution proposée	127
6.5	Résultats	131
6.6	Conclusions	132
7	Conclusions	137

Liste des tableaux

2.1	Fonctionnalités S&F	24
3.1	Paramètres des constellations	41
4.1	Table avec les différents types de fonctions de poids	63
5.1	Relations entre synchronisme, discontinuité et simultanété . .	112

Table des figures

2.1	Architecture d'un réseau tolérant aux délais (DTN)	26
2.2	Satellite avec communication <i>Store and Forward</i>	29
3.1	Angle d'inclinaison (i)	40
3.2	Angle d'élévation (E)	40
3.3	Distribution géographique des GWs.	41
3.4	Distribution de la population	44
3.5	Distribution d'accès Internet	44
3.6	Distribution d'accès GSM	45
3.7	Disponibilité des infrastructures de communication	45
3.8	Durée moyenne des contacts pour l'ensemble de GWs.	48
3.9	Nombre de contacts pour l'ensemble des GWs	49
3.10	Temps total de communication pour l'ensemble des GWs	50
4.1	Les trois composantes du routage.	54
4.2	Evolution de la topologie du réseau	56
4.3	Coût total d'une route	61
4.4	Evolution du réseau entre 0 et 100 minutes	71
4.5	Réseau spatio-temporel de la Figure 4.4	73
4.6	Distribution géographique des GWs et les trois types de routes considérées dans le problème.	78
4.7	Résultats de simulation en Scénario 2.	84
4.8	Seuils de temps utilisés par la fonction $F(H)$	85
4.9	Résultats de simulation en Scénario 3	87

5.1	Demandes de qualité de service multimedia	93
5.2	Un exemple de diagramme saut-temps.	95
5.3	Causalité d'une route.	97
5.4	Variation du délai de bout en bout selon l'instant de génération à la source	100
5.5	Capacité d'une route.	103
5.6	Synchronisme d'une route.	104
5.7	Simultanéité d'ordre 2 d'une route.	106
5.8	Simultanéité d'ordre k d'une route.	107
5.9	Sauts entièrement et partiellement disjoints.	109
5.10	Routes selon le degré de connectivité	113
5.11	Matrices de corrélation pour les métriques S&F	116
6.1	Critères d'optimisation pour des services S&F	125
6.2	Performance des trois politiques de routage S&F	135

Abbreviations et acronymes

ADSL Asymmetric Digital Subscriber Line

AMSAT Radio Amateur Satellite Corporation

CPU Central Processing Unit

DARPA Defense Advanced Research Projects Agency

DiffServ Differentiated Service

DTN Delay/Disruption Tolerant Network

DTNRG Delay/Disruption Tolerant Network Research Group

FIFO First In, First Out

GSM Global System for Mobile

GW GateWay

ICT4B ICT for Billions

IETF Internet Engineering Task Force

IntServ Integrated Service

IPN Interplanetary Internet

IRTF Internet Research Task Force

ISL Inter Satellite Link

ITU International Telecommunication Union

LEO Low Earth Orbit

LTP-T Licklider Transmission Protocol Transport

MEO Middle Earth Orbit

OSCAR Orbiting Satellites Carrying Amateur Radio

OSI Open Systems Interconnection, OSI Model

OSPF Open Shortest Path First

PRoPHET Probabilistic Routing Protocol for Intermittently Connected Networks

QoS Quality of Service

RIP Routing Information Protocol

SCORE Signal Communicating by Orbiting Relay Experiment

SMS Short Message Service

SNC The Sámi Network Connectivity Project

SSETI Express Student Space Exploration and Technology Initiative

SSTL Surrey Satellite Technology LTD

TIER Technology and Infrastructure for Emerging Regions

UMTS Universal Mobile Telecommunications System

VITA Volunteers in Technical Assistance

Chapitre 1

Introduction

*The most exciting phrase to hear in science,
the one that heralds new discoveries,
is not “Eureka” (I found it!) but “That’s funny ...”*

Isaac Asimov (1920 – 1992)

On a pu constater, ces vingt dernières années, une croissance significative dans la demande de services de communication à fort débit et à grande mobilité. Des applications comme l’imagerie à haute résolution et la vidéo demandent une énorme quantité de ressources technologiques et physiques (par exemple en termes d’énergie et de bande passante).

En revanche, l’accès à ces ressources n’est pas toujours possible, notamment dans des circonstances de manque ou d’insuffisance d’infrastructures (pour des raisons économiques ou techniques) et/ou de ressources (limitation en bande passante). Dans ces cas, l’accès aux services de communication de base (à bande étroite, asynchrones) n’est pas négligeable. L’utilisation des systèmes de communication demandant peu de ressources et garantissant la mobilité et l’ubiquité représentent une solution pour la réduction de la fracture numérique. Ces systèmes rendent possible l’accès, au plus grand nombre de personnes, aux services de communication essentiels telle que la messagerie électronique. Nous proposons dans cette thèse un système qui permet de répondre à cette problématique : une constellation de satellites en orbite basse

fournissant un service de transfert de messages en mode *Store and Forward* (S&F).

Les mécanismes S&F rendent possible la communication malgré un manque de connectivité instantanée entre les équipements d'un même réseau. Grâce à eux, si la connexion est interrompue, l'information peut être stockée dans des nœuds intermédiaires et envoyée seulement lorsqu'elle sera rétablie. Cela permet donc de surmonter avec succès l'interruption de communication quelle qu'en soit l'origine.

C'est le cas des réseaux présentant des conditions variables le long de tous ses segments : longs délais de propagation, liens partagés ou congestionnés, liens avec des interruptions intermittentes, intempestives ou planifiées, hautes variations dans les taux d'erreurs ... Ces conditions peuvent trouver leur origine dans l'hétérogénéité des équipements ou dans l'environnement qui entoure ces réseaux.

Une grande variété d'applications et de scénarios de communication S&F a été étudiée ces dernières années. La plupart de ces travaux a été menée au sein du groupe de recherche DTNRG (*Delay/Disruption Tolerant Network Research Group*). Parmi les travaux de ce collectif de recherche on peut distinguer la publication d'une architecture de réseau tolérant aux délais ou *Disruption/Delay Tolerant Network* (DTN) [21], du protocole *Bundle* [19] et des études expérimentales [47] et fondées sur des simulations, comme celles relatives au routage ([63], [59]).

Les services offerts par ces réseaux sont limités par les caractéristiques mêmes des réseaux S&F : l'impossibilité d'offrir de services en temps réel à cause des intermittences des liens ou du faible débit engendré par les conditions difficiles générées par l'environnement (bande étroite, taux d'erreurs variables).

Les communications S&F s'appliquent aussi dans les réseaux traditionnels quand l'usage des mécanismes S&F se révèle pertinent. On peut citer comme exemples les réseaux de prévention des risques [66], les réseaux de communication pour la télé médecine (messagerie asynchrone), les services de messagerie électronique utilisant des mules de données [92], [93].

Même si l'application des mécanismes S&F au niveau des satellites est une question peu étudiée, l'intention de les utiliser existe depuis leur création. Aujourd'hui, leur utilisation offre de nombreuses possibilités grâce à l'existence de composants de petite taille et facilement manipulables. Comme exemple, nous pouvons citer ORBCOMM, qui fournit des services de messagerie à l'intérieur des Etats-Unis et dont le potentiel de commercialisation ne cesse d'augmenter.

Les nombreuses applications des satellites font de ce moyen de communication un élément incontournable dans le monde des télécommunications. Parmi ces applications se trouvent : la diffusion, le positionnement, les réseaux de capteurs, les communications personnelles, l'observation, etc.

Si les constellations de satellites connurent un grand intérêt dans le fin des années 90, elles ont été dépassées par des systèmes à haut-débit (ADSL, fibre optique, GSM, UMTS, etc.). Les coûts élevés liés à leur installation et leur entretien les rendent peu attractives en comparaison de solutions plus économiques, pour lesquelles il n'est pas fondamental d'avoir une couverture de l'ensemble de la surface terrestre.

Cependant l'usage de ces constellations ne se limite pas aux communications personnelles. L'emploi de pico et de nano satellites offre un champ d'applications pour les satellites à orbite basse (*Low Earth Orbit* - LEO). Différentes institutions de recherche ont commencé à explorer l'utilisation de cette technologie lors d'applications expérimentales : observation de la terre et météorologie. Tout cela est possible grâce à des mises en orbite plus accessibles et aux composants de petite taille qui font partie de la charge utile.

Les avantages des communications par satellites n'ont pas évolué depuis les premières mises en orbite : couverture de l'ensemble de la surface terrestre de façon quasi continue, facilité d'installation de terminaux plus rapide que pour d'autres systèmes.

C'est dans ce contexte que nous proposons l'application d'un système de communication par satellite utilisant une technologie simple dans le but d'offrir des services bon marché dans des zones où les communications font

défaut. Dans ce système, les communications S&F complètent les réseaux traditionnels.

Dans tous les systèmes de communication, l'optimisation des ressources disponibles reste la priorité. Notamment en ce qui concerne les satellites, cette optimisation est essentielle à cause des coûts élevés liés à cette technologie. On peut, en particulier, optimiser le système à travers le routage. Dans les systèmes S&F, le routage comme moyen d'optimisation a été largement étudié mais aucune règle générale n'a pu être établie.

A notre connaissance, des méthodes d'évaluation propres aux systèmes S&F n'ont toujours pas été étudiées. En effet jusqu'à présent seuls des critères appartenant aux réseaux traditionnels étaient retenus (temps, longueur de la route). Or le fait que les réseaux S&F soient tolérants au retard minimise l'importance de ces critères. De ce fait, pour ces systèmes, il est nécessaire d'utiliser des mécanismes et des critères plus adaptés à leurs caractéristiques. Par exemple, on pourra donner plus d'importance aux ressources de stockage utilisées qu'au délai associé à une route.

Cette étude a pour but de montrer que le routage dans les systèmes S&F peut être abordé à partir de perspectives nouvelles, qui sont plus adaptées aux systèmes tolérants au délai. Pour ce faire, nous allons utiliser une politique de routage précalculé depuis la source.

Dans le deuxième chapitre, nous présenterons un état de l'art sur les systèmes S&F. Nous décrirons, alors, les mécanismes intervenant dans leur fonctionnement et les scénarios d'application.

Dans le troisième chapitre, nous analyserons les systèmes par satellites utilisant les techniques S&F. Nous étudierons le processus de conception d'un de ces systèmes, dont le but est d'offrir des services de messagerie dans des zones où les infrastructures de communication font défaut. Ce système servira de cadre à l'ensemble de ce travail.

Dans le quatrième chapitre, nous décrirons l'outil de calcul de routes établi pour le scénario décrit dans le chapitre précédent. Cet instrument est conçu à partir des techniques utilisées dans les systèmes de transport, en raison des ressemblances existantes entre les deux systèmes, notamment celles afférentes aux propriétés dynamiques. Ce travail a donné lieu à un

article dans le *Vehicular Technology Conference* (VTC-2007 Fall) intitulé *Precomputed Routing in a Store and Forward Satellite Constellation* où des outils de transport sont utilisés pour le calcul de routes optimales [28].

Dans le cinquième chapitre, nous procéderons à une analyse des routes existantes, ce qui permettra la mise en place d'instruments de mesure de leurs propriétés. Le résultat obtenu prendra la forme de nouvelles métriques qui serviront, non seulement à caractériser d'une meilleure façon les routes des réseaux satellitaires, mais qui pourront être généralisées à l'ensemble des systèmes S&F. Grâce à ces nouvelles métriques, la caractérisation des systèmes S&F est possible à partir de leur nature propre, sans utiliser des méthodes d'évaluation issues de systèmes présentant un autre type de fonctionnement. Cette contribution a été formalisée par la publication d'un rapport technique à l'Institut de Recherche en Informatique de Toulouse (IRIT) intitulé *Routing Metrics in Delay Tolerant Networks* [29] et par l'article *Routing Metrics for Store and Forward Networks* qui, au moment de l'écriture de ce mémoire de thèse, avait été soumis au *Computer Networks Journal* pour sa publication [31]. Dans cet article, les métriques sont utilisées pour le calcul des routes optimales dans un réseau de capteurs. L'utilisation des métriques contribue à la définition de politiques de routage mieux adaptées aux conditions de fonctionnement du système.

Dans le sixième chapitre, les métriques établies précédemment seront utilisées pour étudier les caractéristiques des services offerts par le système afin de définir une politique de routage appropriée à chacun d'eux. Comme les résultats le montrent, l'usage de métriques pour adapter les politiques de routage aux caractéristiques propres à chaque service permet une meilleure gestion des ressources disponibles. Les résultats ont été publiés dans l'article *Use of Store and Forward metrics for service-oriented routing in Satellite Constellations* dans l'IEEE International Workshop on Satellite and Space Communications (IWSSC'08) [30].

Enfin, dans la conclusion, après en avoir établi le bilan, nous présenterons les développements possibles de ces travaux.

Chapitre 2

Les communications *Store and Forward* (S&F) dans le domaine de communications par satellite

Contents

2.1	Introduction	19
2.2	Mode de communication S&F	22
2.3	Communications S&F dans les satellites	28
2.4	Résumé	33

2.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous présentons la notion de communication de type *Store and Forward* (S&F). Le point fondamental de ce type de communication est la notion de stockage longue durée. Elle permet d'établir une communication entre terminaux sans avoir de connexion de bout en bout.

Un réseau est composé fondamentalement de 3 éléments :

- **Des nœuds.** Ces sont les équipements intermédiaires qui prennent en charge le routage des messages, qui circulent dans le réseau.
- **Des équipements terminaux.** Ce sont les équipements des utilisateurs qui sont l'origine et la destination des messages qui circulent dans le réseau.
- **Des liens.** Ce sont les canaux de communication à travers lesquels les terminaux et les nœuds communiquent.

Dans un réseau sans fil, les nœuds et terminaux peuvent être mobiles. Cela implique une évolution constante dans sa configuration. Les travaux de recherche sur ce sujet sont très nombreux. Mais la plupart d'entre eux se restreignent à des scénarios dans lesquels la connectivité entre des terminaux est continue, c'est-à-dire qu'il s'agit d'une connectivité de bout en bout.

Si, dans un réseau on n'a pas une connectivité de bout en bout entre terminaux à cause de la mobilité des nœuds et/ou des terminaux ou bien à cause de la variabilité des conditions du support (variation des caractéristiques des liens) il est nécessaire d'aborder le problème de communication d'un autre point de vue. Cela consiste à utiliser des communications de type S&F.

Le mode de communication S&F permet de surmonter la rupture des communications : le message est stocké dans un nœud intermédiaire quand il n'existe pas de possibilité de le faire passer au nœud suivant ; le message est renvoyé ultérieurement une fois que la communication entre les nœuds est rétablie.

Parmi les scénarios où les communications S&F peuvent être une solution idéale se trouvent ceux avec des environnements pour lesquels :

- les conditions du milieu sont extrêmement variables et provoquent fréquemment la perte ou l'interruption de liens ;
- la mobilité des nœuds et des terminaux est telle qu'elle peut provoquer la perte ou la création de liens, ayant comme conséquence des changements dans la configuration du réseau et des interruptions fréquentes ;
- les mécanismes pour économiser l'énergie des composants du réseau peuvent provoquer la perte de liens. L'état des composants peut varier (disponible/non disponible) du point de vue des autres composants du réseau [44],

- la présence des nœuds ne peut être garantie, on pense par exemple à un scénario de guerre ou à un scénario où les équipements changent d'état on/off en fonction de critères pré-établis, par exemple dans les réseaux de capteurs où l'économie d'énergie est essentielle ;
- les délais de communications sont variables et/ou très importants. Par exemple, dans les communications interplanétaires ;
- les communications entre équipements sont faites de façon *opportuniste* comme dans quelques systèmes de communication par satellite.

Ce mode de communication est à l'origine d'un nouveau type de réseaux, les réseaux tolérants aux délais, connus dans la littérature comme *Delay/Disruption Tolerant Networks* (DTN). Comme leur nom l'indique, ces réseaux incluent des mécanismes qui permettent l'établissement des communications même en présence de délais importants et non uniformes et d'interruption de liens dans le réseau empêchant l'établissement d'une connectivité de bout en bout entre les terminaux.

D'après la définition d'architecture DTN [21] proposée par le *Delay Tolerant Networking Research Group* (DTNRG) ([41], [55]), un DTN est un inter-réseau composé des réseaux liés par des nœuds DTN, lesquels incluent des fonctionnalités S&F ([43], [97]). L'architecture DTN permet d'établir des communications entre réseaux hétérogènes tolérant la gestion de délais longs et variables, la traduction des messages entre les réseaux ainsi que les interruptions de connectivité entre les composants du réseau.

Le DTNRG a travaillé depuis quelques années dans des activités liées à la standardisation et à l'implantation de projets :

Standardisation :

- Formation du IETF/IRTF DTNRG à la fin de 2002 ;
- Spécification de l'architecture DTN [21] ;
- Spécification du protocole *Bundle* [19] ;
- Spécification du *Licklider Transmission Protocol Transport* (LTP-T) ([45], [90]) ;
- Définition de l'architecture de *Interplanetary Internet* (IPN) ([22], [18], [56]) ;

- Spécification du *Probabilistic Routing Protocol for Intermittently Connected Networks* (PRoPHET) [63].

Implantations et autres projets :

- Le *DTN Agent Source code release version 2.1.99* sortie en décembre 2005 [41];
- Zebranet [96], un projet qui utilise les notions des DTN pour l'étude de la vie sauvage des zèbres,
- Les bases du nouveau programme *Disruption Tolerant Networks* (DTN) de la *Defense Advanced Research Projects Agency* (DARPA) [1].

Ci-après, on trouvera d'autres projets liés aux DTNs et qui n'ont pas été développés par le DTNRG :

- *ICT for Billions* (ICT4B) [48];
- *Technology and Infrastructure for Emerging Regions* (TIER) [12];
- *Remote sensing for Habitat monitoring* [68];
- *The Sámi Network Connectivity Project* (SNC) [79];
- Seaweb [91];
- DakNet [47].

2.2 Mode de communication S&F

En général, au niveau du routage, il y a deux modes de communication : le mode de communication S&F et le mode *relayé*. Le mode *relayé* est utilisé dans la plupart des réseaux existants dont les réseaux IP. Ce mode de communication fait passer les messages qui circulent dans le réseau le plus rapidement possible. Pour accomplir cet objectif, plusieurs techniques peuvent être mises en œuvre : découpage des messages, utilisation de plusieurs routes, etc. Ce mode de communication est utilisé dans une logique de communication de bout en bout, l'existence d'au moins une route entre l'origine et la destination est nécessaire pour pouvoir transporter les messages : s'il n'y a pas de route complète disponible, la communication de type *relayé* est impossible à réaliser. Avec le mode S&F, il n'est pas nécessaire d'avoir une route directe. Quand les routes sont interrompues en raison de la perte de liens, les nœuds intermédiaires sont capables de garder l'information jusqu'à disposer

d'une route. Nous nous sommes intéressés aux systèmes de communication où le recours au mode de communication S&F est obligatoire.

Les caractéristiques principales du mode de communication S&F sont décrites ci-dessous :

– **Notion de stockage longue durée.**

Les nœuds qui composent les réseaux S&F ont suffisamment de mémoire pour pouvoir stocker les messages lorsqu'il n'y a pas de possibilité de les faire passer par un autre nœud après la rupture des communications. La période de stockage dans le nœud est déterminée par la taille de la mémoire ou par la priorité du message s'il y a des critères de qualité de service, etc. Cette notion de stockage est complètement différente de celle qui est liée aux communications du type *relayé* où le stockage est très court ; le stockage dans ces réseaux est vu comme un effet indésirable car il provoque l'utilisation excessive des ressources dans les nœuds et la perte d'informations quand la limite de ces ressources est dépassée (*overload*).

– **Stockage des messages complets et vérification de l'intégrité.**

Le stockage des messages dans les réseaux S&F est effectué sur la base de messages entiers. Après avoir vérifié l'intégrité du message, celui-ci est stocké pour être transmis immédiatement si possible, ou bien, pour attendre d'être transmis ultérieurement. La différence avec le mode *relayé* est que les messages qui circulent dans le réseau ne constituent pas des unités d'information complètes, ce sont des morceaux d'information qui ne sont pas vérifiés par les nœuds intermédiaires mais par le(s) nœud(s) de destination. Les tâches assignées aux nœuds intermédiaires sont essentiellement limitées à la lecture de l'adresse destination et au routage immédiat.

– **Notion d'envoi complet des messages.**

Dans les communications S&F, les messages qui circulent constituent eux-mêmes des unités complètes d'information. Les messages passent d'un nœud à l'autre et sont vérifiés après chaque saut par le nœud d'origine et par le nœud destination. C'est ainsi qu'une fois le message transmis et arrivé à destination, aucune communication supplémentaire

n'est nécessaire. Cela constitue un des avantages des communications S&F par rapport aux communications *relayées* dans les environnements présentant des conditions extrêmes et où l'interruption des communications et l'occurrence d'erreurs peuvent être fréquents.

Dans la table 2.1, nous présentons les ressources nécessaires pour remplir les fonctionnalités S&F. Les caractéristiques de communication, qui sont aussi des conséquences des fonctionnalités S&F, sont également transcrites.

Toutes les propriétés du mode de communication S&F lui permettent d'être un mode de communication idéal pour faire face aux conditions où les communications du type *relayés* ne sont pas du tout performantes : délais longs et variables, intermittence des communications et fortes variations des taux d'erreurs. En revanche, en raison de ces mêmes propriétés, les applications des communications de type S&F sont limitées aux applications pour lesquelles le temps réel n'est pas requis.

TAB. 2.1 – Fonctionnalités S&F, ressources nécessaires pour les mettre en place et les caractéristiques sur la communication.

Fonctionnalités des réseaux S&F	Ressources nécessaires	Caractéristiques de communication
Stockage longue durée	La mémoire persistante dans chaque nœud ne doit pas être affectée si le système est redémarré.	Longs délais associés aux longs temps de stockage
Stockage de messages complets et vérification de leur intégrité	Suffisamment de mémoire dans chaque nœud, plus de ressources du <i>Central Processing Unit</i> (CPU) et plus d'énergie disponible par nœud.	Il y a un délai associé au temps de vérification et de stockage dans chaque nœud.
Envoi des messages complets	Mécanismes pour vérifier l'envoi complet de messages dans chaque nœud.	Il n'y a pas de pertes ou d'erreurs dans les messages reçus par le nœud de destination. L'envoi est garanti dans chaque saut.

2.2.1 *Delay Tolerant Networks* DTN

Un DTN est composé de plusieurs réseaux sujets à des connexions intermittentes. Ces réseaux ne sont pas nécessairement homogènes ni en termes de technologies ni par rapport aux protocoles utilisés. Les DTN sont composés de nœuds appelés “*nœuds DTN*”; ces sont tous les nœuds qui implantent la couche *bundle*.

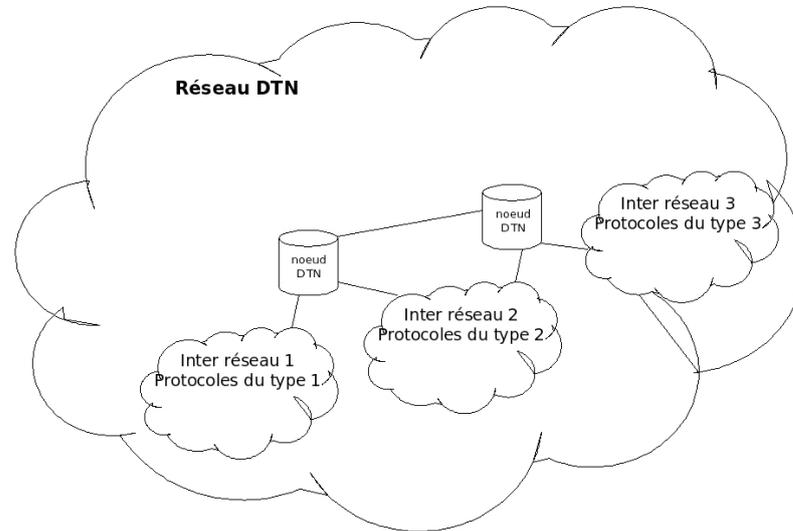
La couche *bundle* se trouve au-dessus des couches transport ou d’autres couches inférieures. La couche *bundle* fait l’intégration des réseaux dans une approche S&F. Pour chaque transmission entre les nœuds, il y a une procédure de stockage, de vérification du contenu et d’envoi complet du message.

Dans la Figure 2.1(a), nous montrons un exemple d’architecture DTN composée de trois réseaux avec deux nœuds DTN. Les nœuds DTN servent à interconnecter les réseaux qui, en principe, peuvent avoir différentes piles de protocoles. Ils servent également à surmonter les interruptions de communication entre les réseaux. Les fonctionnalités S&F ne sont utilisées que pour passer des messages d’un réseau vers un autre, les communications entre les composants qui appartiennent à un même réseau utilisent leur propre pile de protocoles.

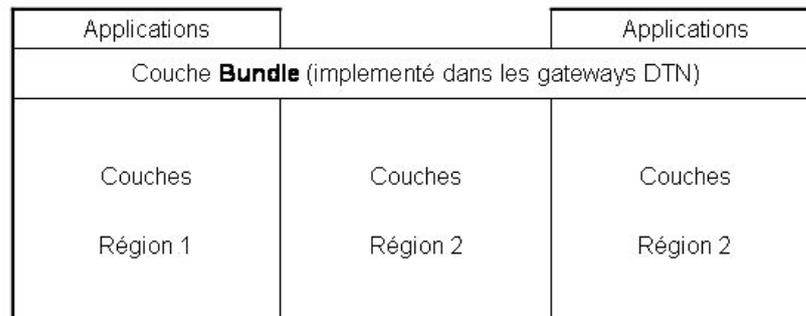
Les fonctionnalités S&F des DTNs reposent dans la couche *bundle*, Figure 2.1(b). La couche *bundle* est décrite en détail dans la spécification du *Bundle Protocol* [19]. Les propriétés principales du *Bundle Protocol* sont :

- *Custody-based retransmission* ou retransmission avec “garde”;
- mécanismes pour fonctionner avec une connectivité intermittente ;
- mécanismes pour profiter de la connectivité opportuniste, prévisible ou planifiée (*scheduled*) en plus de la connectivité continue ;
- utilisation d’une résolution tardive d’adresse.

La fiabilité des DTNs repose sur la notion de garde. Celle-ci peut être vue comme la responsabilité du nœud DTN qui doit retransmettre de façon intègre le message *bundle* à qui on confie la garde. La garde est passée du nœud DTN au nœud DTN en même temps que le *bundle*. Un nœud qui a passé un *bundle* vers un autre nœud attend une notification d’acceptation de la garde pour se libérer de cette garde. Lors de la réception d’un *bundle*,



(a) Nœuds DTN



(b) Couche bundle dans un nœud DTN

FIG. 2.1 – Architecture d'un réseau tolérant aux délais (DTN)

après la vérification de son intégrité, le nœud récepteur envoie vers le nœud d'origine une notification d'acceptation de la garde. Une fois que le nœud d'origine reçoit l'acceptation de la garde il efface toute copie du bundle, sinon, il enverra de nouveau le *bundle* dès la première opportunité. La garde permet d'avoir une garantie de délivrance de nœud DTN en nœud DTN, c'est-à-dire, une fiabilité par saut.

Comme exemple d'utilisation de l'architecture DTN on peut décrire brièvement le projet *Interplanetary Internet* (IPN). Ce projet est l'origine des DTN.

L'objectif de l'IPN est de construire un réseau homogène d'inter-réseaux à une échelle interplanétaire. Pour atteindre cet objectif, l'IPN doit être capable de remplir les tâches suivantes :

- déployer des inter-réseaux standards ayant des positions éloignées (dans des planètes ou des faisceaux) ;
- connecter les inter-réseaux à travers une ligne troncale interplanétaire qui puisse gérer les longs délais associés ;
- créer des passerelles et des relais qui puissent fonctionner comme interfaces entre les réseaux à long délai et ceux à court délai.

Les communications interplanétaires sont caractérisées par des délais de propagation longs et variables, par d'énormes atténuations et des interruptions régulières ou irrégulières des communications. Au contraire des communications terrestres, dans les communications spatiales, on observe que :

- la capacité de communication est chère, les ressources pour la communication restent limitées en raison des très fortes atténuations et des pertes importantes ainsi que d'énormes contraintes d'énergie ;
- les temps d'aller/retour sont de l'ordre des minutes, l'utilisation de protocoles interactifs et tous les mécanismes de contrôle qui reposent sur des interactions de bout en bout sont complètement inefficaces ;
- une communication fiable est nécessaire en raison des contraintes de l'environnement et des interruptions fréquentes.

Les communications dans l'environnement spatial présentent des caractéristiques qui sont difficiles à gérer avec le mode relayé. L'utilisation des communications S&F est donc fondamentale. Avec une approche S&F, ces contraintes sont surmontées et, parfois, elles deviennent avantageuses. La solution proposée par le DTNRG pour le IPN repose sur l'utilisation de *bundles*.

2.3 Communications S&F dans les satellites

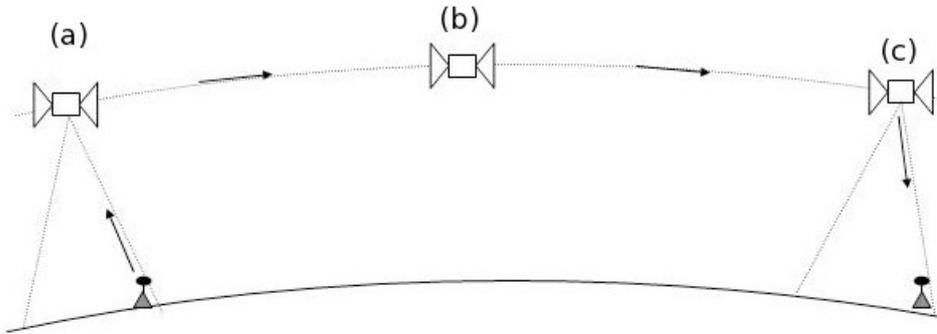
2.3.1 Généralités

Les communications de type S&F peuvent être utilisées avantageusement dans les systèmes de communication par satellite. Les satellites qui ne se trouvent pas dans une orbite géostationnaire ne sont pas capables d'avoir une communication continue avec une position géographique fixe. Les satellites qui se trouvent dans une orbite MEO (*Middle Earth Orbit*) ou LEO (*Low Earth Orbit*) ont de brèves périodes de communication avec des positions fixes sur Terre. La durée de communication entre le satellite et une station dépend de l'orbite du satellite (inclinaison, altitude) et de la position géographique de la station. Les satellites en orbite basse (800 km à 1500 km) ont des périodes de visibilité d'environ une dizaine de minutes depuis une position géographique fixe. La communication entre une position sur la Terre et un satellite s'établit à chaque passage du satellite, les périodes entre deux passages oscillent entre 90 et 120 minutes. Pour avoir une communication sans utiliser des constellations de satellites ou des liens inter satellites (ISL), le mode de communication S&F peut être utilisé.

Les communications S&F dans les satellites tirent parti du mouvement du satellite pour faire passer l'information d'une position géographique à une autre. Pour que le satellite soit capable d'exécuter les fonctions S&F il doit remplir certaines conditions : une capacité de stockage de longue durée et un protocole de communication qui puisse gérer les politiques de transmission des messages en considérant les conditions décrites précédemment.

La notion de communications S&F par satellite n'est pas récente. Elle remonte aux années où cette industrie a débuté. Un système de communication S&F par satellite fonctionne de la manière suivante (Figure 2.2) :

Une station terrestre émet un message vers le satellite une fois que le satellite passe au dessus d'elle (a). Le message est stocké dans la mémoire du satellite et transporté physiquement avec lui en suivant la trajectoire définie par son orbite (b). Enfin, quand le satellite passe au dessus de la destination, le message est transmis et il arrive à sa destination (c).

FIG. 2.2 – Satellite avec communication *Store and Forward*

2.3.2 Systèmes de communication S&F par satellite

L'idée de mettre en place des mécanismes S&F satellite avec l'utilisation des technologies numériques a été proposé d'abord par Brandon W. en 1973 [15]. Il a proposé un système où les données étaient transportées d'une part par les liens radioélectriques et d'une autre part par le transport orbital (le mouvement physique du satellite). Dans le système proposé, appelé *Data Courier Satellite*, le message reçu par le satellite était d'abord démodulé et enregistré dans la mémoire du satellite. Ce message voyageait à l'intérieur du satellite et lors de l'arrivée du satellite à la position géographique où se trouvait la destination, il était finalement retransmis. Brandon proposait l'utilisation de petites unités de mémoires numériques ainsi que des satellites de petite taille pour réduire le coût de mise en orbite. En revanche, en 1973 la technologie était limitée et l'implantation du système n'était pas encore possible.

Avant la proposition de Brandon, d'autres systèmes analogiques de communication de type S&F par satellite avaient déjà été implantés. En 1958, l'armée des Etats Unis, dans un projet classifié, a mis en œuvre le satellite *Signal Communicating by Orbiting Relay Experiment* (SCORE). Ce satellite avait été conçu pour relayer des communications décalées dans le temps.

Les messages reçus par le satellite étaient stockés dans une mémoire magnétique (analogique) et ultérieurement émis vers la Terre. La taille maximale du message était de 4 minutes. Ce satellite a été utilisé pour émettre le message de Noël du président américain Eisenhower. Le premier satellite S&F non-militaire, l'US COURIER, a été mis en orbite en 1959 avec une bande magnétique à bord.

Les transpondeurs numériques ont été utilisés pour la première fois dans le satellite UoSAT-2 (AMSAT-OSCAR-11) qui a été mis en orbite en mars 1984, dix ans après la proposition de Brandon.

Le satellite UoSAT-2, construit par *Surrey Satellite Technology LTD* (SSTL), contenait dans sa charge utile une partie conçue pour mettre en œuvre des communications numériques de type S&F. Cette charge utile a été utilisée pour le transfert de courrier électronique. C'est ainsi que l'utilisation des communications numériques S&F par satellite a commencé [37]. Après cette expérience, la SSTL a mis en œuvre d'autres projets similaires avec des satellites dont le coût de construction n'est pas très élevé (autour des trois Millions de \$). Parmi ces projets on trouve le HealthSat-1 (UoSAT-3) et le HealthSat-2. Ce dernier a été mis en orbite en 1992 comme le deuxième satellite du système de communication *HealthNet* de SatelLife. HealthNet est utilisé par VITA (Volunteers in Technical Assistance) pour établir des communications à faible coût (autour de \$3,400 pour l'équipement et moins de \$500 par an) entre des institutions médicales et des programmes de santé dans les pays en voie de développement.

La charge utile S&F de l'UoSAT-2 a été aussi utilisée par la communauté des radioamateurs. Ce satellite est également connu comme *Orbiting Satellites Carrying Amateur Radio* (OSCAR 11). La série de satellites OSCAR est gérée par la *Radio Amateur Satellite Corporation* (AMSAT) qui est une association à but non lucratif [13]. C'est le premier satellite de type S&F utilisé pour les services radioamateurs. Les satellites radioamateurs sont des satellites construits par des communautés académiques, scientifiques, gouvernementales et par des associations de radioamateurs. Le point commun des satellites OSCAR est leur faible coût de construction et de mise en orbite (autour de 4 millions de \$).

Ces dernières années, les satellites de radioamateurs sont devenus plus complexes, ils ont offert des services de communication dans des situations de détresse, ils ont servi comme plates-formes d'expérimentation et pour transmettre des images de la Terre.

Actuellement, le système de satellites S&F qui est exploité commercialement est ORBCOMM [80], un système de 36 satellites de type *Low Earth Orbit Satellite* (LEOS) : 24 satellites distribués dans 3 plans de 40° d'inclinaison, 4 satellites dans 2 plans polaires et 8 satellites dans un plan équatorial. Les satellites fonctionnent dans le mode S&F lorsqu'ils n'ont pas la possibilité de retransmettre immédiatement les messages reçus. Le premier satellite a été mis en orbite en 1993 et l'exploitation commerciale du système a commencé en 1996. Les services offerts sont le tracking, la télé-surveillance et la messagerie.

2.3.3 Services offerts

Les services offerts par les systèmes actuels de communication S&F par satellite sont des services de transmission de données en bande étroite. Les trois services de base sont :

- La **messagerie**. Transmission et réception de messages alphanumériques introduits par des utilisateurs entre terminaux mobiles.
- Le **tracking**. Suivi et localisation de mobiles actifs au travers de l'envoi périodique de messages contenant la position géographique. Les messages sont transmis depuis des terminaux mobiles équipés des mécanismes nécessaires pour accomplir cette tâche.
- La **télé-surveillance**. Surveillance et contrôle de dispositifs au travers de l'envoi périodique ou/et la demande de données concernant les changements d'états pendant leur fonctionnement.

Ces services peuvent avoir des applications multiples s'ils sont utilisés de façon indépendante ou combinée. Les possibilités sont multiples et elles dépendent des besoins des utilisateurs.

Parmi les services commerciaux possibles, on a d'abord, ceux de communication personnelle via messagerie. Ce sont tous les services qui sont pris en

charge par la transmission de *Short Message Service* (SMS), qui peuvent être liés à des services informatifs (news, météo, services d'information financière, etc.) ou à des services de communication personnelle (texto alphanumérique).

On a ensuite, les services de *tracking*, comme le suivi et la localisation de marchandises transportées par mer ou par terre, de flottes ou de véhicules.

Enfin, les services de télé-surveillance comme la surveillance de compteurs, de valves, de pompes à injection pétrolières ou à eau, la lecture de réseaux de capteurs, la surveillance de lieux à accès limité, les services d'urgence et la prévention dans des situations de détresse.

Tous ces services peuvent être combinés pour en composer d'autres plus performants. On peut prendre l'exemple d'un service de télé-surveillance d'une flotte de véhicules de transport qui transmet l'état de l'intérieur du conteneur (température, humidité, etc.) et la position géographique du véhicule en permettant d'avoir une communication avec l'opérateur via SMS. D'autres services de communication peuvent être similaires à ceux fournis par *Volunteers in Technical Assistance* (VITA) dont le but est d'améliorer l'accès aux communications à la population des pays en voie de développement. VITA utilise des satellites S&F pour établir des communications entre professionnels de médecine au travers d'un service de messagerie. L'utilisation des messages sert à offrir des services comme le courrier électronique et la transmission de pages web avec des informations de santé, l'aide et la prévention de catastrophes naturelles, l'éducation, la gestion de l'énergie et l'environnement, la gestion gouvernementale, l'agriculture et la commercialisation des produits agricoles.

Il faut dire que les services S&F par satellite conservent, sauf en ce qui concerne le temps réel, les principaux avantages des systèmes par satellite dont l'ubiquité. Son utilisation est avantageuse si on considère que les communications offertes par ce genre de satellites ont des prix bas par rapport à d'autres systèmes LEO (le prix du service ORBCOMM est d'environ \$ 0.01 par caractère). De plus, un autre avantage est la facilité d'utilisation des équipements et leur simplicité de leur installation.

2.3.4 Avantages et contraintes des communications S&F par satellite en utilisant les ‘micro sats’

L’utilisation des microsatellites de type S&F est une bonne solution pour avoir des communications à faible coût. La construction des microsatellites (moins de 50 kg.) et leur lancement dans l’espace ne sont pas coûteux. Cela a permis à des universités et des centres de recherche d’avoir un moyen facile pour accéder à l’espace. Un exemple de leur viabilité est le projet *Student Space Exploration and Technology Initiative* SSETI Express [2] qui est composé des satellites construits par des institutions d’éducation et de recherche. Construit en 18 mois, le SSETI Express a été mis en orbite le 27 octobre 2005. La conception du satellite a été faite par des étudiants et des radioamateurs. Le centre de contrôle est situé à l’Université de Aalborg en Danemark. Le SSETI Express, en orbite basse, a pour mission de fournir des services d’imagerie terrestre et de communications aux radioamateurs dans la bande S. Le système inclut aussi trois autres ‘pico satellites’ (en général de moins de 2 kg. avec une taille autour de 10 cm.) :

- XIV de l’Université de Tokio, Japon ;
- UWE-1 de l’Université de Würzburg, Allemagne ;
- Ncube-2 de Norvège.

Les coûts de la mise en orbite ne sont pas très élevés car ces satellites voyagent comme charge secondaire. Pour les lancer il suffit de payer qu’une partie du coût total du lancement. Le coût total estimé pour le SSETI express est de € 100 000 ce qui fait l’utilisation de ce genre de satellites une option abordable.

2.4 Résumé

Dans ce chapitre nous avons établi la notion de communications S&F. Au travers d’une comparaison avec les communications du type *relayé* nous avons abordé les réseaux tolérants aux délais ainsi que les travaux menés autour de ce genre de réseaux. Les réseaux tolérants aux délais sont une solution pour surmonter les difficultés rencontrées avec les réseaux du type *relayé* dans

des environnements difficiles. Enfin nous avons montré ce que représentent actuellement les communications S&F dans le domaine des satellites. Nous nous sommes intéressés à l'utilisation de satellites S&F pour fournir des services de communication à faible coût. La possibilité d'utiliser des micro ou des pico satellites reste très intéressante en raison de leurs faibles coûts de fabrication et de mise en orbite. Dans le chapitre suivant nous proposerons un scénario où ce genre de satellites sera utilisé pour l'établissement d'un système de communication S&F à faible coût.

Chapitre 3

Étude d'un système de communication Store and Forward par satellite

Contents

3.1	Introduction	35
3.2	Un S&F par satellite et un scénario d'étude . .	38
3.3	Évaluation et justification du système proposé .	42
3.4	Les sujets d'étude	51
3.5	Résumé	51

3.1 Introduction

Les communications par satellite jouent un rôle fondamental dans l'industrie spatiale où elles représentent la composante économique la plus importante. Les satellites ont aussi une énorme importance stratégique et l'industrie militaire est la principale consommatrice des services offerts. Dans les secteurs politique et culturel, les satellites sont devenus essentiels pour la diffusion de l'information sans limites géographiques.

A cause des disparités économiques et culturelles, il y a des différences très marquées entre les régions de la planète par rapport à l'accès aux informations et aux technologies de communication. Dans ces conditions et dans la mesure où les satellites peuvent atteindre n'importe quelle région géographique, ces différences peuvent être réduites en utilisant des systèmes de communication par satellite.

La communication instantanée, les équipements peu chers et la facilité d'installation et de configuration font des technologies satellitaires la seule option pour les zones où aucune infrastructure n'est disponible (en raison de la géographie ou des limitations économiques), a été détruite (scénarios de catastrophes naturelles, d'urgence, de guerre) ou bien, reste inadéquate par rapport aux besoins et aux conditions locales.

De par les spécificités des communications par satellite certains services ne peuvent être fournis que par cette voie : radiolocalisation, télé-contrôle, télé-surveillance, réseaux de capteurs, etc. En revanche, aujourd'hui, les communications satellitaires constituent plus un complément aux communications terrestres qu'un concurrent.

Le coût des communications par satellite dépend de plusieurs critères. Les plus importants et significatifs sont ceux liés à la construction, la mise en orbite, les assurances et les travaux de maintenance pendant la durée de vie du satellite. Le coût lié à la construction du satellite est lié à la complexité et à la charge utile. Le coût lié au lancement est plutôt lié au poids et le coût de maintenance aux tâches de contrôle, facteur très important par exemple dans les systèmes de satellites en orbites géostationnaires.

Parmi tous les types de satellites existants, les satellites du type 'micro' et 'pico' sont les satellites les moins coûteux en raison de la simplicité de construction, de lancement et de maintenance. La communauté de radioamateurs est particulièrement intéressée par ce type de satellites. Regroupés dans la *Radio Amateur Satellite Corporation* (AMSAT) [27], les radioamateurs ont prouvé pendant plus de 40 ans la viabilité des projets satellites fondés sur des travaux volontaires et collectifs. Les coûts associés au lancement sont réduits grâce à la taille des satellites. Le lancement de ces satellites peut être fait

en utilisant les espaces qui restent dans les compartiments où voyagent des satellites de plus grande taille.

Les communications S&F ont été implantées plusieurs fois depuis l'origine des communications par satellite. L'utilisation de satellites S&F contenant des dispositifs numériques est courante depuis le lancement d'OSCAR-11 (UoSat-2) en 1984 [4].

L'utilisation des systèmes par satellite pour diminuer la fracture numérique est une activité constante. Des projets de ce genre incluent le projet TWISTER [11] pour offrir l'accès internet à des communautés isolées comme dans le petit village de 56 habitants de Camps-sur-l'Agly (Aude). D'autres exemples d'une ampleur supérieure peuvent être pris tels les projets de l'Union Internationale des Télécommunications (UIT). Il s'agit de Télécentres Communautaires Polyvalents (TCP) qui ont pour objectif d'offrir aux villages isolés partout dans le monde des services de téléphonie, de télécopie, d'Internet, de courrier électronique et, dans certains cas, d'enseignement à distance et de télé-médecine avec la collaboration d'autres organismes tels que VITA ([33], [49]).

Dans la communauté scientifique, des efforts sont faits pour rendre les technologies de communication accessibles aux différentes régions de la planète [16]. Une option viable pour réduire la fracture numérique est l'utilisation des satellites S&F.

Dans ce chapitre nous proposons un système de communication par satellite qui utilise le mode de communication S&F. Ce système a pour objectif d'offrir un service de messagerie qui peut être utilisé pour composer des services plus complexes comme ceux offerts par quelques systèmes commerciaux [80]. Ce système est concentré sur les zones les plus défavorisées vis-à-vis de l'accès aux moyens de communication et de la disponibilité de l'information. Les zones ciblées sont celles qui ont une haute densité de population et qui ne comptent pas suffisamment d'infrastructures de télécommunications. Ci-dessous nous décrivons les critères pris en compte pour faire la sélection de ces zones, le système de communication par satellite et les sujets de recherche considérés. Le but final de cette proposition est d'établir un scénario qui nous permettra d'étudier les problèmes de routage dans un réseau tolérant aux dé-

lais. Dans ce cas particulier, il s'agit d'un système de communications par satellite de type S&F.

3.2 Proposition d'un système de communications S&F par satellite et d'un scénario d'étude

Cette section contient la description d'un système de communication par satellite qui utilise le mode de communication S&F. Ce système offrira un service de messagerie par satellite à bas prix. Le service de messagerie par satellite est actuellement exploité commercialement par des sociétés comme ORBCOMM [80], qui offre des services fondés sur la messagerie. Nous proposons un système de communication par satellite qui pourra offrir ces services aux régions dont l'infrastructure de communication terrestre reste insuffisante pour satisfaire les besoins de la population locale. La description technique et les détails de conception sont présentés dans les sections suivantes.

3.2.1 Description du système

Le système considéré offre des services à travers l'envoi de messages dans un contexte de tolérance aux délais. Les services sont similaires à ceux qui ont été décrits dans le chapitre précédent. Ce sont essentiellement des services de messagerie personnelle et des services de transmission de données.

Pour remplir les caractéristiques dont le système a besoin, on considère l'existence de deux types de messages qui diffèrent par leur taille :

- 2048 octets pour les services de communication personnelle via e-mail et pour la transmission d'informations fondée sur la messagerie (consultation de sites web, télé-éducation, e-librairies, etc.)
- 256 octets pour les services de télésurveillance, réseaux de capteurs et télécontrôle

Le mode de fonctionnement est celui décrit dans le Chapitre 2. Les messages sont générés dans les gateways (GW) et ils sont transmis vers un sa-

tellite. Le message est stocké dans la mémoire du satellite qui contient des fonctionnalités S&F et qui l'amène avec lui en suivant sa trajectoire. Ensuite, le message peut être transmis vers une GW intermédiaire contenant elle aussi des fonctionnalités S&F où il sera stocké jusqu'au passage d'un autre satellite. Les sauts GW-Satellite-GW peuvent être enchaînés afin d'arriver à la destination. Les politiques de transmission des messages vers les satellites/GWs et depuis les satellites/GWs sont décidées selon les règles du protocole de routage qui sera ultérieurement décrit dans ce travail.

Le segment spatial

Le système est composé de deux constellations de satellites de type LEO (*Low Orbit Satellite*).

La première constellation dessert les régions qui sont près de l'Equateur où l'on a besoin d'autres moyens de communication que les systèmes existants (GSM, accès Internet) qui sont, le plus souvent, limités aux grands centres urbains. Cette région, que nous appelons Région A, est localisée entre -30° et $+30^\circ$ de latitude (le signe négatif représente une latitude sud, le signe positif représente une latitude nord). Cette composante du système couvre, comme il sera décrit dans les sections suivantes, les zones géographiques où se trouvent la plupart des utilisateurs potentiels des services offerts. C'est pourquoi, elle contient la plupart des ressources disponibles en termes de satellites et de bande passante.

La deuxième constellation offrira un service d'interconnexion entre la Région A et la zone géographique qui se trouve entre $+30^\circ$ et $+70^\circ$ et entre -30° et -70° . Nous appelons cette région, Région B. Cette constellation a la capacité de connecter d'autres zones où les tâches de contrôle et maintenance du système peuvent être faites plus facilement grâce aux ressources disponibles dans ces latitudes. Potentiellement, les services qui seront les plus utilisés dans cette région seront ceux liés au contrôle, aux réseaux de capteurs et à la télé-surveillance. Les paramètres du segment spatial sont montrés sur la Table 3.1. Les notions d'altitude (h), d'angle d'inclinaison (i) et d'angle d'élévation (E) sont rappelées sur les Figures 3.1 et 3.2.

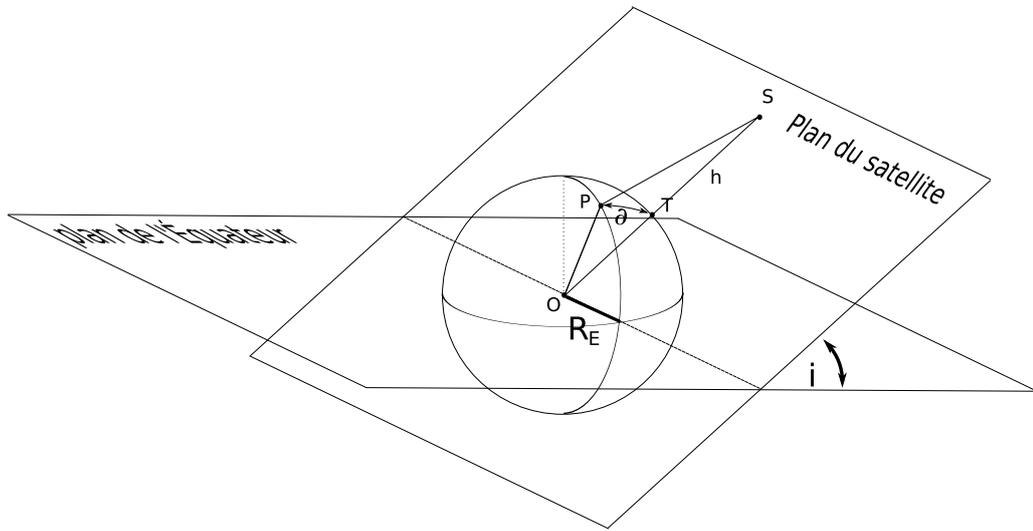


FIG. 3.1 – Angle d'inclinaison (i). C'est l'angle formé entre le plan de l'orbite du satellite et le plan de l'Equateur. O , le centre de la Terre; P , un point sur la surface de la Terre; S , le satellite; T , le point d'intersection de la ligne $O-S$ et la surface de la Terre. R_E est le rayon de la Terre (6378km.) et h est l'altitude du satellite (distance entre T et S).

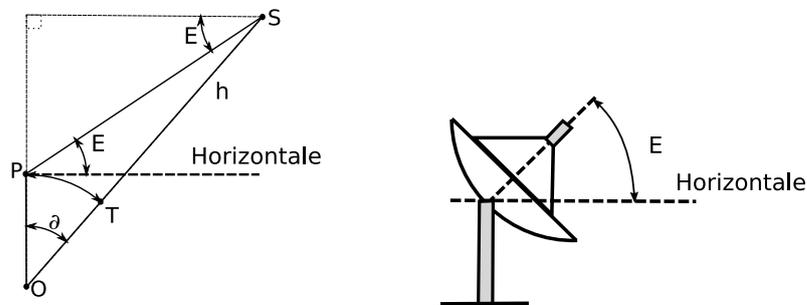


FIG. 3.2 – Angle d'élévation (E). C'est l'angle entre la ligne horizontale du point considéré sur la surface de la Terre (P) et le satellite (S). Mesuré sur le plan qui contient le point considéré (P), le satellite (S) et le centre de la Terre O . h est l'altitude du satellite (Voir figure 3.1).

Le segment terrestre

On considère que des GWs rassemblant un certain nombre de terminaux des utilisateurs sont uniformément distribuées dans les régions A et B (Voir

TAB. 3.1 – Paramètres du segment spatial pour les deux constellations composant le système.

Paramètre	Constellation 1	Constellation 2
N = Nombre de satellites	12	9
P = Nombre de plans	3	3
S = Nombre de satellites par plan	4	3
i = Angle d'inclinaison	10°	45°
h = altitude	1000 km.	1350 km.
Emin = Angle d'élévation minimal	10°	10°

Figure 3.3) et qu'elles possèdent des mécanismes qui leur permettent d'avoir une autonomie en énergie (batteries de longue durée, cellules solaires et batteries rechargeables, mécanismes pour économiser l'énergie) en gardant une simplicité de fonctionnement. L'autonomie énergétique est considérée comme un pré-requis pour avoir un système sans aucune dépendance par rapport à des infrastructures complexes et coûteuses qui pourraient limiter leur utilité dans des zones où les infrastructures de base sont difficiles à mettre en œuvre.

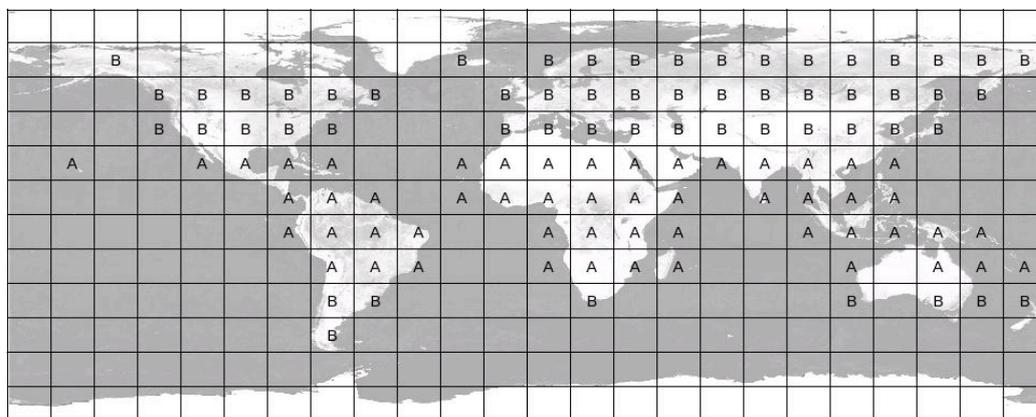


FIG. 3.3 – Distribution géographique des GWs.

3.2.2 Avantages du système proposé

Nous supposons que les satellites qui constitueront le système sont des satellites du type CubeSats [32] avec une charge utile de communication qui permet d'offrir les services S&F évoqués précédemment. Le coût de construction de ce genre de satellites est entre 25.000 \$ et 40.000 \$. Le coût de lancement est dans l'ordre de 40.000 \$. L'initiative CubeSat est un travail international coopératif entre des universités et des entreprises intéressées par développement des technologies réduites pour des satellites.

La construction des CubeSats reste une tâche accessible aux communautés académiques et de recherche [57]. Ce sont des satellites dont la taille est de 10 cm de côté, qui ne pèsent pas plus d'un kilogramme et qui ont une capacité de stockage variable pouvant aller jusqu'à 2Go [78]. Avec le standard CubeSat [77], créé par la *California Polytechnic State University* et la *Stanford University* l'accès à l'espace est possible.

3.3 Évaluation et justification du système proposé

3.3.1 Description du scénario

Le système de communication par satellite présenté a été conçu pour offrir une couverture optimisée pour l'application de communications par messagerie dans des zones où les infrastructures sont insuffisantes par rapport à la densité de population.

Même si le marché pour un système de messagerie par satellite peut être très grand, le but de notre système est de servir là où l'on a le plus besoin d'un système de communication simple à bas prix. Le principal service est celui de communication interpersonnelle et c'est pourquoi les analyses de la distribution de la population et de la disponibilité des technologies orientées aux communications interpersonnelles sont les facteurs les plus importants. Les services de communication de machine à personne et de machine à ma-

chine sont considérés comme des services qui peuvent être offerts de façon supplémentaire dans les zones de couverture.

Historiquement, les services de communication ont été conçus pour desservir les principaux centres urbains en premier lieu, puis les centres urbains où le profit commercial n'est pas négligeable. Notre système suit aussi des critères de population mais, en regardant les propriétés de couverture globale des systèmes de communication par satellite, la zone de service et de couverture comprend toute une région géographique qui est limitée uniquement par la latitude.

Pour l'optimisation de notre système nous avons fait une analyse de population. Une analyse des infrastructures servant à offrir un système de communication interpersonnel a été également menée. Pour cette analyse nous nous sommes concentrés sur les technologies GSM et la disponibilité des infrastructures internet. Les résultats nous ont conduit à une relation entre la quantité de population (la demande) et la disponibilité des infrastructures (l'offre) pour des services de communication interpersonnelle.

Pour cette analyse, on a divisé la surface terrestre en carrés de 15° . Les données prises en compte pour l'analyse de la population [76] représentent la distribution de population en 1994. On a attribué empiriquement un facteur qui indique la densité (nombre d'habitants par km^2) de 0 à 4 (0 pour l'absence de population et 4 pour la densité relative la plus grande). Ce travail est retracé sur la Figure 3.4.

On a procédé de la même manière pour les cartes d'infrastructures (accès Internet et accès GSM par km^2) [10]. On a établi la valeur de 1 pour les zones sans infrastructures et 5 pour les zones avec ressources suffisantes. Les Figures 3.5 et 3.6 montrent les infrastructures GSM et les Routeurs (Internet) [39].

Pour faire l'analyse des résultats, on a défini des indicateurs de densité d'infrastructures par rapport à la densité de la population. Pour obtenir la densité d'infrastructures GSM par rapport à la population on a utilisé la relation suivante par zone carrée de 15° (Accès GSM par habitant).

$$FGSM_i = GSM_i / Pop_i$$

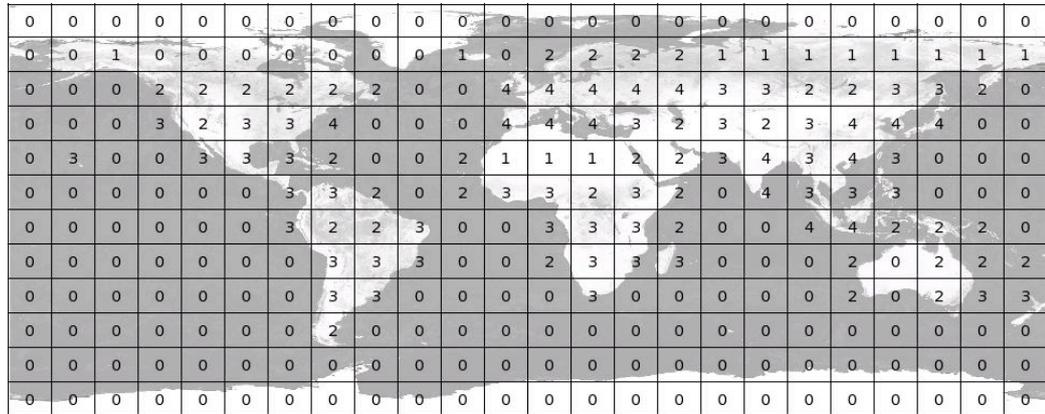


FIG. 3.4 – Distribution de la population

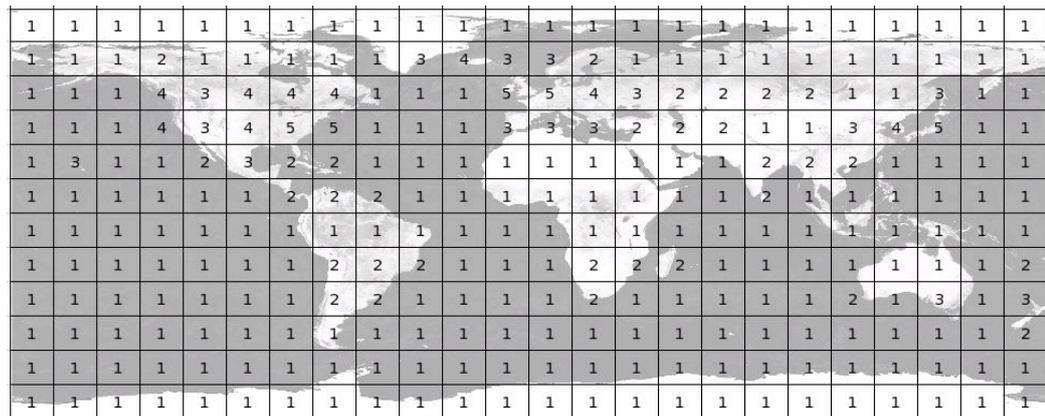


FIG. 3.5 – Distribution d'accès Internet

On a fait l'analyse de la même manière pour les infrastructures Internet (Accès Internet par habitant).

$$FInternet_i = Internet_i / Pop_i$$

Enfin, on a utilisé la relation suivante pour obtenir la disponibilité de ces deux infrastructures par rapport à la population (Accès communication interpersonnelles par habitant).

$$F_{total} = FGSM_i + FInternet_i$$

3.3.2 Justification des paramètres établis

Le système proposé a été optimisé pour desservir les zones identifiées dans la section précédente (zones dont l'indice est inférieur ou égal à 1). Les critères et les paramètres suivis pour augmenter l'efficacité du système obéissent aux besoins imposés par le genre de services offerts.

Tout d'abord, ce sont les services de communication personnelle qui imposent certaines caractéristiques de base. La taille du message, le temps pour les transmettre et la quantité de messages qui peuvent être transmis pendant la durée d'une connexion sont les paramètres les plus importants. Pour avoir une quantité maximale de messages transmis quelle que soit la taille de ces messages, le système doit avoir une durée de connexion entre les satellites et les GWs suffisamment grande. Plus la durée de la connexion sera longue plus on aura la possibilité de transmettre une grande quantité de messages. Si on analyse ce critère de durée de connexion, on peut remarquer un autre avantage : si la connexion dure longtemps, la quantité de messages incomplets en raison de l'interruption de la connexion pendant la transmission est réduite car le nombre de messages interrompus diminue.

Un autre critère d'analyse du système est constitué par le nombre de contacts entre les satellites et les GWs dans la zone de couverture. Il est aussi lié à la durée de connexion. Si les contacts sont nombreux et la durée maximale, le temps global de communication est maximisé. En revanche, si les contacts ne sont pas longs et même si les contacts sont nombreux, la performance du système peut être diminuée. Si nous restons dans l'hypothèse d'une durée de contacts maximisée et d'un nombre de contacts lui-aussi maximisé, cela se traduit par une amélioration de la performance globale du système.

Avec l'augmentation du nombre de contacts on suppose une augmentation de la charge de trafic attribuée à l'établissement de la connexion. Comme l'établissement de connexion se répète plusieurs fois pendant que le satellite reste en communication avec les GWs, une augmentation du nombre de contacts entre le satellite et une GW n'a pas un impact très significatif.

Pour faire l'analyse des variables décrites précédemment nous avons retenu un algorithme de calcul des temps de visibilité d'un satellite LEO depuis une GW sur la surface de la Terre [3]. Parmi les algorithmes de calcul de la visibilité entre un satellite et une position géographique ([89], [84]), l'algorithme d'Irfan Ali [3] constitue une méthode simple et rapide. Cet algorithme repose sur une approximation géométrique entre la trajectoire qui suit le satellite et la Terre. A la différence d'autres algorithmes, la méthode proposée ne repose pas sur des approximations interactives en temps discret.

Nous avons implanté cet algorithme dans un logiciel. Cet algorithme ainsi que le logiciel développé ont été validés avec le Orbit Analysis Software (SatOrb), un logiciel conçu et développé par le CAS (Centre Aéronautique et Spatiale) de l'ENSAE. SatOrb permet de faire l'analyse des orbites et des liens satellite. Grâce à l'implantation de [3] nous avons trouvé les paramètres les plus pertinents pour les zones identifiées et montrées dans la Figure 3.3. Pour l'analyse, chaque zone est représentée par une GW qui concentre le trafic de tous les GWs qui s'y trouvent. Il faut dire que notre analyse est concentrée sur les zones entre -30° et 30° . C'est la région pour laquelle nous voulons offrir les services proposés.

Tout d'abord nous avons analysé la durée des contacts visuels entre l'ensemble des GWs et un satellite avec une altitude de 1000 km. Nous avons supposé un angle d'élévation minimal entre l'antenne de la GW et le satellite de 10° . A partir de ces conditions nous avons fait varier l'angle d'inclinaison pour trouver la valeur pour laquelle nous aurons une durée de communication maximale. La Figure 3.8 montre le graphique obtenu pour une variation de l'angle d'inclinaison de 0° à 70° . La durée moyenne des contacts, après que le satellite a accompli 10000 révolutions, est située toujours au-dessus de 10 minutes, avec des valeurs maximales entre 11 et 13 minutes.

Comme nous l'avons précédemment décrit, cette valeur représente seulement une partie de l'analyse. Pour pouvoir juger de l'efficacité du système nous devons considérer un autre facteur : la quantité de contacts visuels entre le satellite et l'ensemble de GWs.

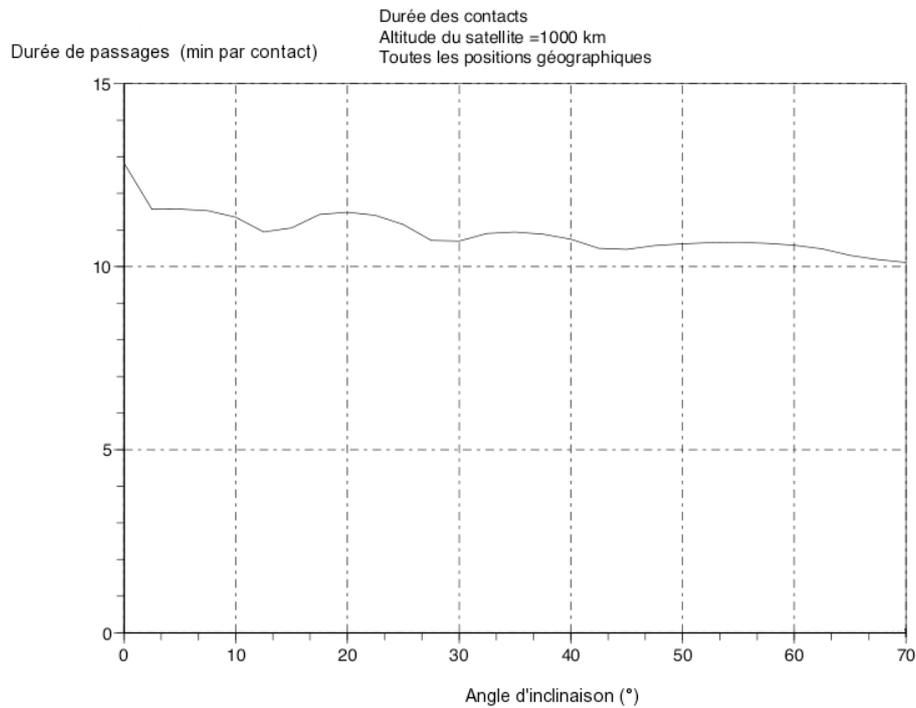


FIG. 3.8 – Durée moyenne des contacts pour l'ensemble de GWs.

Pour ce faire nous avons obtenu la quantité de contacts visuels au cours de la même simulation. La Figure 3.9 montre la fréquence avec laquelle le satellite réussit à avoir contact visuel avec l'ensemble des GWs.

A partir des facteurs montrés dans les Figures 3.8 et 3.9 nous pouvons déduire le temps moyen total de communication pour la période simulée. Ce temps nous permet de faire une évaluation plus précise de ce que notre système peut offrir. Evidemment, plus le temps total de communication est grand, plus notre système est efficace. Nous observons dans la Figure 3.10 qu'il y a certaines valeurs de l'angle d'inclinaison qui permettent d'avoir un temps plus long de communication entre le satellite et l'ensemble des GWs. Cette valeur se situe entre 3° et 13° .

Notre système ayant 10° d'inclinaison, il permet de couvrir des latitudes plus au nord que s'il était établi avec un angle d'inclinaison plus faible. Cela nous permettra d'avoir plus d'opportunités pour offrir une interconnexion

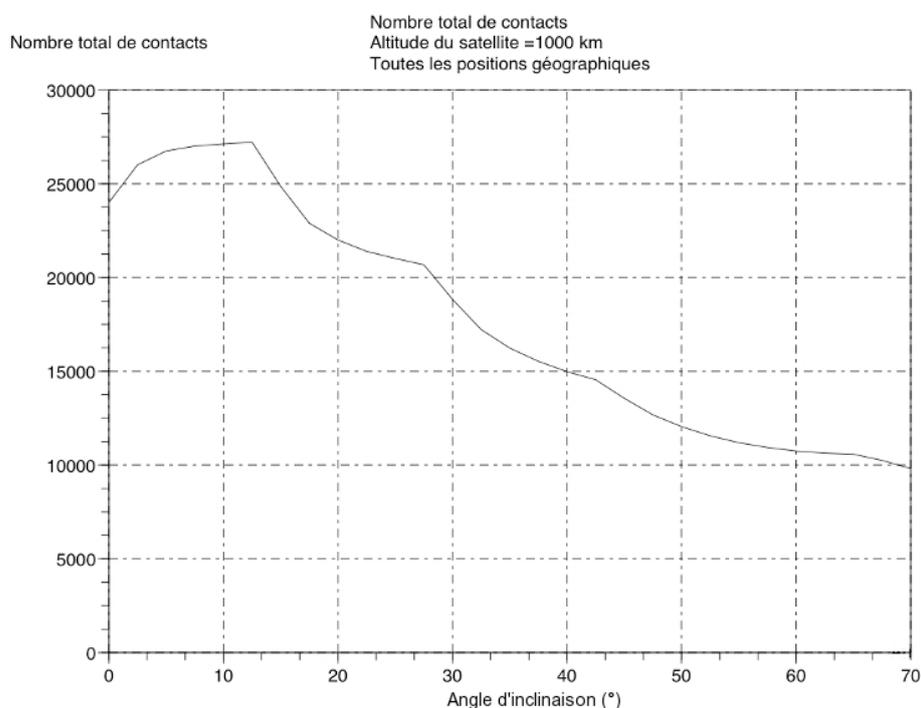


FIG. 3.9 – Nombre de contacts pour l'ensemble des GWs

avec la constellation 2 dont le rôle principal est d'offrir une connectivité vers les latitudes au-delà de $\pm 30^\circ$.

3.3.3 Analyse du système

On suppose que les services qui seront offerts par le système proposé sont des services accessibles à la plupart de la population dans les zones géographiques ciblées. Pour atteindre cet objectif nous devons garder la configuration la plus simple pour conserver une accessibilité au sens économique. Du point de vue spatial, l'utilisation d'un système composé des satellites à bas prix nous permet de remplir quelques conditions de base. En revanche, ces systèmes doivent permettre l'utilisation d'équipements terrestres capables de communiquer avec les satellites en gardant une configuration et une complexité qui leur permettent d'être indépendants d'installations lourdes ou bien de beaucoup de ressources qui ne peuvent pas être disponibles partout (par

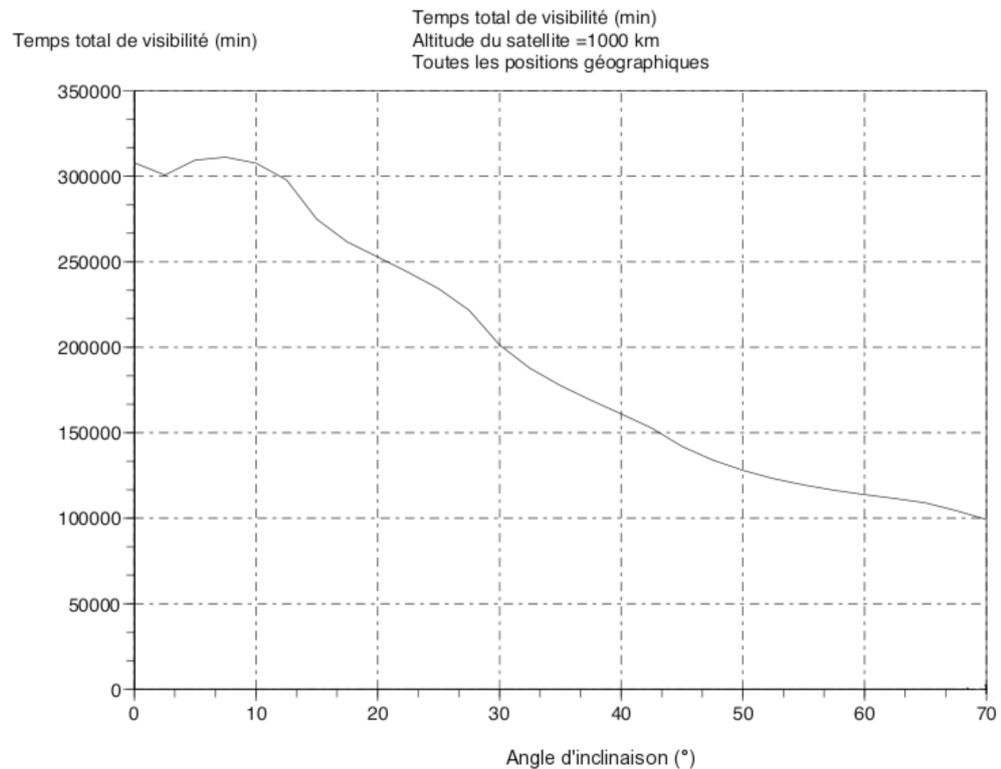


FIG. 3.10 – Temps total de communication pour l'ensemble des GWs

exemple l'énergie). Pour relever ce défi, le système de satellites doit mettre en œuvre tout ce qui est nécessaire pour faciliter cette tâche. Pour rester accessible économiquement, les satellites qui composent le système doivent être peu nombreux. La réduction du nombre de satellites demande une augmentation de la complexité des charges utiles, particulièrement dans le système de communication. On obtient alors une constellation de satellites sans couverture globale instantanée ni avec possibilité d'offrir des services en temps réel. Pour améliorer la performance globale du système on doit optimiser l'utilisation des fonctionnalités S&F sur les satellites et les GWs avec le routage. Cela permet d'éviter l'utilisation de liens inter-satellites (ISL), une technologie très complexe et chère.

3.4 Identification de sujets d'étude dans le système proposé

La thématique de recherche dans le scénario proposé a une grande ampleur. Nous nous sommes intéressés aux problèmes liés au routage. C'est pourquoi nous allons mettre de côté toutes les thématiques induites par le même scénario (techniques d'accès, codage, gestion de l'énergie, aspect radioélectrique, etc.)

L'étude de routage que nous prétendons réaliser comprend plusieurs parties : protocoles, sécurité, gestion des files, etc. Nous nous limiterons à un seul sujet, celui du protocole et des règles de routage pour trouver la solution la plus efficace pour notre système. Nous analyserons des solutions existantes dans des systèmes partageant des caractéristiques avec le scénario proposé.

On pense plus particulièrement aux :

- réseaux ad-hoc ou *Mobile Ad Hoc Networks* (MANETs) ;
- réseaux de capteurs ;
- autres réseaux satellitaires ;
- réseaux tolérants aux délais (architecture DTN) ;
- autres réseaux mobiles.

Bien que ces scénarios aient des solutions spécifiques de routage et que ces solutions aient été adaptées à des cas particuliers (type de réseau, degré de mobilité, ressources disponibles, environnement, etc.), l'analyse que nous prétendons faire peut nous conduire à identifier des caractéristiques communes. C'est ainsi que nous pourrions identifier des solutions pour notre sujet. D'un autre côté, notre système comprend des conditions spécifiques, qui devront être considérées également et utilisées pour proposer une solution complètement adaptée.

3.5 Résumé

Dans ce chapitre nous avons introduit les systèmes de satellites qui fonctionnent en mode S&F. Cette technique de communication a été présentée

tout au long de l'histoire des communications par satellite. Ces dernières années, il y a eu plusieurs initiatives qui ont montré la faisabilité et même la rentabilité de tels systèmes. Les exemples sont ceux qui sont exploités commercialement et ceux qui ont été mis en œuvre par d'autres communautés (radioamateurs, universités).

Avec les possibilités ouvertes grâce à l'évolution technologique (composants de taille réduite, processeurs plus puissants, existence de technologies plus efficaces dans l'utilisation d'énergie, matériaux plus légers, etc.), il est plus facile d'accéder aux systèmes spatiaux dont les satellites constituent la partie la plus importante.

Nous avons proposé un système de communication par satellite qui utilise le mode de communication S&F et qui représente une solution complémentaire de communication pour les zones où les ressources restent limitées ou inexistantes. Ce système est aussi une option économiquement viable si on le compare avec d'autres qui sont plus performantes, mais qui restent inaccessibles en raison des coûts des équipements et des services offerts.

Le scénario proposé représente aussi le point de départ de l'étude des techniques de routage dans un système de type S&F. Ce scénario représente aussi un cas tout à fait possible dans le domaine des communications par satellite. En regardant l'ensemble des systèmes possibles dans le domaine des réseaux tolérants aux délais ou DTNs *Delay Tolerant Networks*, même si le scénario reste un cas particulier, l'étude proposée permettra d'établir des bases solides pour d'autres systèmes qui peuvent avoir des caractéristiques communes.

Dans la suite, nous présenterons l'étude des systèmes qui peuvent partager des caractéristiques avec le nôtre. Nous étudierons les solutions existantes dans le domaine du routage dont notre système peut bénéficier. Une étude plus approfondie de ces techniques nous permettra de trouver une solution particulière et efficace pour le système proposé.

Chapitre 4

Routage adaptatif pré-calculé

Contents

4.1	Introduction.	53
4.2	Stratégies pour le processus de routage	55
4.3	Réseaux dynamiques	58
4.4	Solutions de routage	65
4.5	Routage adaptatif pré-calculé	75
4.6	Résumé	88

4.1 Introduction.

En général, tout processus de routage peut être décomposé en trois parties fondamentales (voir Figure 4.1) [95] :

1. La procédure de collecte des informations sur l'état du réseau : connectivité entre nœuds et conditions de trafic ;
2. La procédure de calcul et de sélection de routes optimales à partir des informations collectées ;
3. La procédure d'acheminement des messages des usagers à travers les routes sélectionnées.

Ces trois processus fonctionnent de manière indépendante les uns des autres mais ils sont profondément liés entre eux. La façon dont ils sont mis

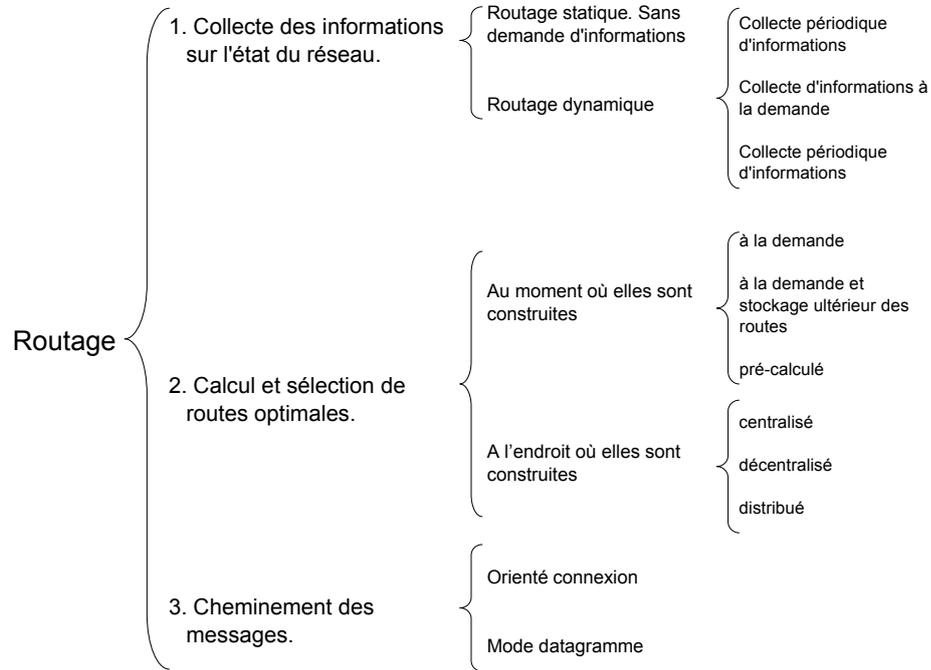


FIG. 4.1 – Les trois composantes du routage.

en œuvre dépend d'un nombre important de variables et de la façon dont elles évoluent. La politique de routage choisie pour être appliquée dans un système doit être adaptée à les conditions physiques et au comportement demandé en fonction des services offerts aux utilisateurs.

Dans ce chapitre nous abordons le problème du routage dans le réseau formé par le système de communication par satellite dont la topologie est dynamique. Nous décrivons d'abord le processus général de routage dans un réseau de communication. Puis nous décrivons les différentes politiques de routage qui peuvent être mises en place dans le réseau formé dans le cadre du système décrit dans les chapitres précédents. Nous décrivons une politique de routage adaptatif pré-calculée, conditions de trafic mises à part, avec l'objectif d'analyser l'influence de la mobilité dans le réseau. Enfin, nous décrivons le processus d'implantation de cette politique et les résultats obtenus.

4.2 Stratégies pour le processus de routage

Dans la suite, nous aborderons les différentes parties qui composent le processus de routage et en même temps que nous analyserons le système proposé.

4.2.1 Collecte des informations sur l'état du réseau. Routage statique et dynamique

La collecte d'informations est le premier processus qui compose le routage. Selon ce processus il y a deux types de routage :

1. Le **routage statique**, pour lequel la collecte d'informations n'est pas nécessaire. Les systèmes à routage statique ne nécessitent pas d'informations sur l'état du réseau car les routes ne sont pas recalculées ni changées une fois le système est mis en marche. Quand il y a un changement dans l'état du réseau (agrandissement du réseau, ajout d'équipements, modification du trafic), le système de routage peut être modifié. Ces changements sont faits, normalement, par intervention directe de l'opérateur dans les équipements. Ce type de routage est normalement conçu lors de l'étape de dimensionnement des réseaux. Des exemples concrets de routage statique peuvent être trouvés dans des cœurs de réseaux optiques.
2. Le **routage dynamique**, pour lequel l'algorithme de routage répond à l'évolution du réseau. Les systèmes à routage dynamique utilisent des mécanismes permettant de faire connaître l'état du réseau aux entités chargées de mettre en place le routage. L'évolution dans la topologie est une conséquence de la variation du nombre d'équipements connectés au réseau ou de leur mobilité. (Voir Figure 4.2).

Dans le cas de notre système, toutes les informations liées à l'établissement de routes et à leur évolution peuvent être connues à l'avance. Les éphémérides des satellites peuvent être pré-calculés et par conséquent les connexions potentielles entre eux et les GWs.

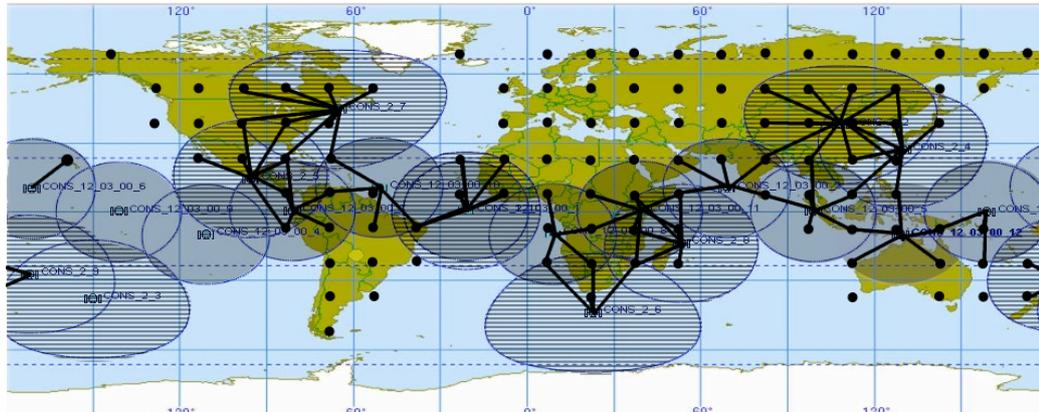
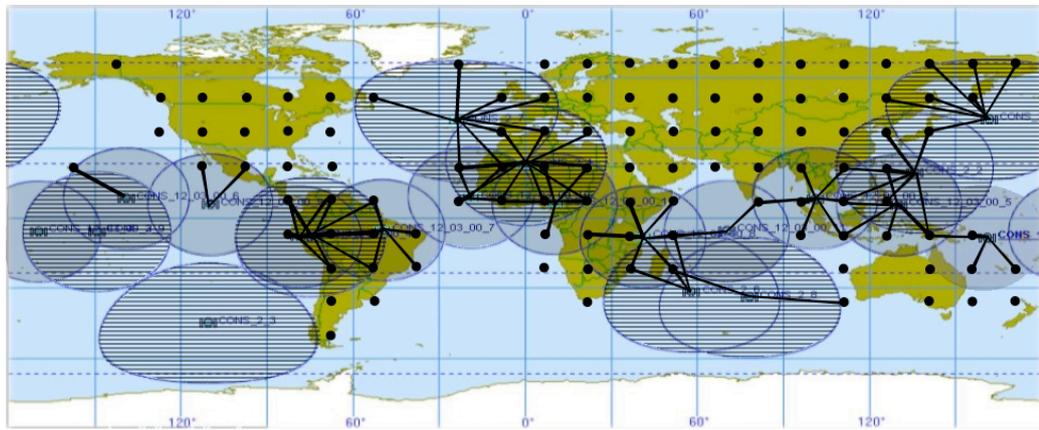
(a) $t = t_0$ (b) $t = t_0 + 10 \text{ min.}$

FIG. 4.2 – Evolution de la topologie du réseau dans la période de 10 minutes.

4.2.2 Calcul et sélection de routes optimales

Le calcul de routes se fait en fonction des caractéristiques requises par le service offert aux usagers (fiabilité, coût, rapidité, etc.). La procédure utilisée pour le calcul de routes est définie par l'opérateur en fonction des ressources disponibles.

Les méthodes pour la recherche et la construction des routes peuvent être classifiées par le moment ou le lieu où elles sont construites ou bien, par les besoins exprimés dans la construction de routes :

Par le moment où elles sont construites

- A la demande, au moment où le message est introduit dans le réseau. Pour le calcul d'une route à un instant donné, il est nécessaire de connaître l'état du réseau de façon instantanée. En raison de la fréquente segmentation de notre système, il n'est pas possible de connaître la topologie du réseau instantanément.
- A la demande, avec réutilisation ultérieure des routes une fois qu'elles sont stockées dans les équipements pendant une durée de validité.
- Pré-calculé : le processus de calcul de routes est fait à l'avance et les routes calculées sont stockées dans les tables de routage des nœuds afin d'être disponibles à l'instant de leur utilisation. Cette technique est employée dans des systèmes dont la topologie réseau est connue à l'avance. La topologie peut être fixe (statique) ou bien évolutive (dynamique déterministe).

Dans notre système le pré-calcul de routes peut être davantage utilisé car il s'agit d'un réseau déterministe.

Par le lieu où elles sont construites

- Centralisé. Le calcul est effectué en un seul endroit du réseau, puis les routes sélectionnées sont distribuées vers les nœuds concernés.
- Décentralisé. Les tâches associées au routage sont réalisées par plusieurs centres de calcul. La décentralisation des tâches de calcul apporte plusieurs avantages par rapport à l'approche centralisée car les ressources utilisées pour le calcul de routes sont prises en charge par plusieurs centres de calcul.
- Distribué. Le calcul et la sélection de routes sont faits dans plusieurs centres de calcul, voire dans chaque nœud. Ainsi, les tâches pour le calcul de routes sont partagées par tous les composants du réseau.

Dans notre système, l'approche distribuée pour le calcul de routes convient mieux au regard des ressources très limitées (bande passante, mémoire et puissance de calcul).

Par les besoins exprimés dans la construction des routes

. Dans tout processus de calcul de routes il y a des objectifs à remplir. En faisant référence au modèle OSI (*Open System Interconnexion Reference Model*), le service offert par la couche réseau doit correspondre à certains critères pré-établis en fonction des demandes de la couche transport et des conditions offertes par la couche liaison de données. Une autre classification de routage peut être faite en fonction de ces critères.

Face à la limitation des ressources, une politique de routage dépendant des besoins spécifiques des services offerts par le système peut être envisagée.

4.2.3 Acheminement des messages des usagers au travers des routes sélectionnées

Il y a deux stratégies pour faire circuler les paquets à travers une route : le mode circuit virtuel où le routage est effectué à la demande de connexion et le mode datagramme dans lequel il n'y a pas de connexion.

Le service orienté connexion permet d'établir une route avant de faire passer les paquets. Les paquets qui traverseront ces routes seront traités dans les nœuds avec l'information relative à la route dans laquelle ils se trouvent.

Le mode datagramme inclut, dans chaque paquet, les informations relatives à l'origine et la destination. Ainsi, chaque paquet est traité dans les nœuds de façon indépendante des autres paquets sans dépendre d'aucune directive pré établie dans les nœuds qu'il traverse. La plupart de réseaux actuels fonctionnent en mode datagramme. Nous considérons que les messages qui circuleront dans le système proposé seront traités sous le mode datagramme sans segmentation.

4.3 Réseaux dynamiques

La dynamique d'un réseau est déterminée par l'évolution de sa topologie. D'une part, les changements de connectivité entre les équipements en raison de leur mobilité ou de la variation de leur état de fonctionnement (veille,

allumé, éteint) provoquent des variations topologiques. D'autre part, les variations fortes de trafic provoquent aussi une évolution dans la configuration du réseau. Par exemple, quand la quantité de trafic qui circule dépasse la capacité des liens (congestion), les routes associées deviennent inutilisables pouvant provoquer un changement dans la topologie du réseau considéré pour le calcul de routes.

Un mécanisme de routage dynamique inclut des mécanismes pour affronter les changements de topologie. Le processus de calcul de routes est exécuté fréquemment en fonction de ces changements.

Dans le cadre du système de communication par satellite la mobilité provoque l'établissement et l'interruption des connexions entre les équipements au cours du temps. L'évolution de la topologie et le haut degré de fragmentation entraînent une absence de connectivité entre tous les équipements (Voir Figure 4.2).

Le mouvement des satellites est le facteur le plus important dans le dynamisme du réseau. Il y a d'autres facteurs comme le changement d'état des composants du segment terrestre ou bien des événements qui pourraient intervenir dans la communication entre les composants terrestres et les satellites (blocages, interférences, erreurs dans les systèmes de communication ou d'énergie, pannes, etc.). L'étude présentée dans ce chapitre se concentre sur les changements de topologie dont l'origine est la dynamique physique du réseau.

Dans cette logique, et en faisant référence aux trois parties qui composent le processus de routage on peut établir les conditions dans lesquelles nous devons établir la politique de routage.

Tout d'abord, dans le processus de collecte d'informations notre système peut bénéficier des caractéristiques déterministes du mouvement de satellites. Les informations liées à l'établissement de connexions entre les équipements terrestres et le segment spatial peuvent être connues à l'avance. Pour le processus de calcul de route, il peut être fait à l'avance en utilisant des informations liées à l'état topologique du réseau.

La procédure pour le calcul de routes comporte deux parties : la découverte et la maintenance des routes. Dans notre système les conditions et

les paramètres considérés pour le calcul de routes changent constamment. Les caractéristiques générales pour établir l'optimalité des routes à calculer sont fréquemment liées aux fonctions de coût. Dans cette étude, ce coût est d'abord limité aux paramètres de base comme le temps (rapidité) ou la distance (longueur de routes). Le coût des routes est dû aux coûts individuels des liens qui les composent. Pour ces paramètres de base (temps et longueur de routes), la durée d'une route est déterminée par les différentes périodes de temps associées aux différents segments de la route. La longueur est liée à la quantité de sauts. Les composantes du délai seront détaillées ultérieurement avec la description des paramètres d'efficacité.

Dans la littérature nous trouvons différentes approches pour analyser le délai d'une route comme critère d'optimisation. Nous présenterons dans la suite ces approches et une classification en fonction des propriétés dynamiques des réseaux. En fonction de cette classification nous aborderons alors notre système et nous décrirons la procédure suivie pour son étude.

4.3.1 Routage dans les réseaux dynamiques.

Les études sur le calcul et la sélection de routes dans des réseaux dynamiques dépendent de leur domaine d'application. La procédure de recherche et de sélection des routes optimales repose sur l'étude de la fonction de coût de la route et/ou des fonctions de coût des segments qui la composent. Dans la Figure 4.3, nous montrons ces composants.

L'expression mathématique du coût total pour la route indiquée dans la Figure 4.3 vaut :

$$C = f(\Theta_1, \Theta_2, \Theta_3, \dots, \Theta_n) \quad (4.1)$$

où $\Theta_1, \Theta_2, \Theta_3, \dots, \Theta_{n-1}, \Theta_n$, représentent les fonctions de coût des segments composant la route. Dans un réseau statique, ces composants ont des valeurs constantes tout au long de la vie d'une route. La fonction de coût total de la route a aussi une valeur constante déterminée par les segments. En revanche, dans un réseau dynamique, les poids des liens varient dans le temps. Ainsi,

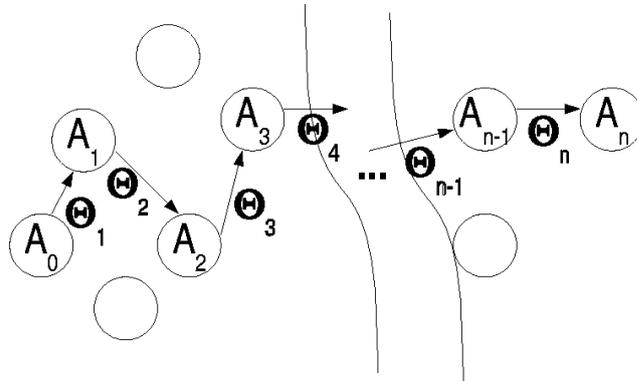


FIG. 4.3 – Un réseau contenant une route entre A_0 et A_n avec les différents coûts des liens : $\Theta_1, \Theta_2, \Theta_3, \dots, \Theta_{n-1}, \Theta_n$. Le coût total de la route entre A_0 et A_n est en fonction de ces poids.

le coût total varie en fonction de toutes les variations incluses dans tous les segments.

Dans un réseau dynamique, une fonction de coût associée à un segment (lien) peut avoir plusieurs variables internes. Ces variables peuvent comprendre le délai (temps), la longueur du lien, les ressources (physiques, économiques, etc.) utilisées dans les liens et les nœuds, etc. Les paramètres utilisés par la fonction de coût de la route proviennent des fonctions associées aux segments qui la composent. Les paramètres de la fonction de coût total peuvent être liés par plusieurs règles mathématiques définies à l'intérieur de la même fonction.

Dans la littérature, il y a plusieurs études visant le problème de calcul et de sélection de routes pour les réseaux dynamiques. Chacune prend en compte des particularités associées aux réseaux étudiés et sont abordées depuis différents points de vue, les problèmes causés par la variation du temps de traversée des liens. Ces études peuvent être classifiées en fonction de la variation des temps de traversée de liens.

Tout d'abord, les études visant les réseaux avec des liens statiques et déterministes ont été faites par Bellman (1958) [14], Dijkstra (1959) [38] et Dreyfus (1969) [40]. Ils ont proposé des techniques pour trouver les routes optimales entre une source et une destination (les routes les plus rapides). En

général, les routes sont calculées en utilisant un algorithme du type Dijkstra [38] en supposant constants les temps de traversée des liens qui la composent.

Par la suite, les études proposées par Dreyfus [40], Ziliaskopoulos (1993) [100] et Cooke (1996) [26] entre autres, ont visé des réseaux pour lesquels les temps de traversée varient en fonction du temps sans aucune composante stochastique. Ces solutions comprennent des modifications des algorithmes de Dijkstra [38] et Bellman [14] pour une utilisation avec des liens qui dépendent du temps. Plus récemment, en 1990, Orda [81] a étudié la prise en compte de périodes d'attente limitées ou illimitées dans la source puis l'utilisation d'algorithmes traditionnels pour le calcul de routes. Les fonctions de coût (délai) considérées sont réelles. Postérieurement, en 1998, Chabini [23] propose quant à lui une solution qui considère une fonction discrète pour le temps de traversée.

Les études de réseaux dynamiques pour lesquelles les poids de liens sont aléatoires mais sans aucune dépendance au temps ont été abordés par Frank en 1969 [50]. Des valeurs typiques de délai des liens et l'utilisation des algorithmes classiques pour les routes les plus courtes (Dijkstra [38], Bellman [14]) sont retenues. Loui, en 1983, [65] et Eiger, en 1985, [42] proposent dans le même contexte des fonctions d'utilité associées au poids des liens et quelques méthodes pour leur optimisation. Des études ultérieures menées par Mirchandini (1985) [71] et par Murthy ((1996) [73], (1997) [74], (1998) [75]) incluent des heuristiques pour simplifier les fonctions aléatoires associées aux liens.

Enfin, certaines solutions considèrent des poids de liens aléatoires et variables dans le temps. En 1986, Hall [53] a démontré que les solutions classiques pour trouver les meilleures routes (Dijkstra et Bellman) ne fonctionnaient plus dans ce contexte et que pour trouver les meilleures routes les choix devaient se faire de manière adaptative car les poids des liens étaient dynamiques. Des méthodes adaptatives pour le choix de routes avec un temps d'arrivée au plus tôt ont été proposées. Wellman, en 1990, [99] a proposé la notion de *cohérence stochastique* et, en 1995, un algorithme [98] pour trouver les routes optimales (avec un temps d'arrivée au plus tôt) dans les réseaux qui remplissent ce principe et dont les poids des liens dépendent du temps et sont incertains. La notion de *cohérence stochastique* établit simplement

que la probabilité d'arriver à une destination en un certain temps ne peut pas être augmentée en partant plus tard de l'origine. En 1994, Miller [69] a proposé une solution pour trouver les routes les plus courtes en termes de délai, c'est-à-dire, les routes ayant le temps de traversée le plus court qui constituent un type de routes qui n'avait pas été pris en compte dans les autres études.

TAB. 4.1 – Les différents types de fonctions pour représenter les poids des liens

Dépendances de la fonction de coût des liens	Références
Statique et déterministe	Bellman, 1958[14] ; Dijkstra, 1959[38] ; Dreyfus, 1969[40] ;
Dépendant du temps sans dépendance aléatoire	Dreyfus, 1969[40] ; Orda, 1990[81] ; Ziliaskopoulos, 1993[100] ; Cooke, 1996[26] ; Chabini, 1998[23] ;
Non dépendant du temps avec dépendance aléatoire	Frank, 1969[50] ; Loui, 1983[65] ; Mirchandini, 1985[71] ; Eiger, 1985[42] ; Murthy, 1996[73], 1997[74], 1998[75] ;
Dépendant du temps et avec de processus aléatoires associés aux liens	Hall, 1986[53] ; Miller, 1994[69] ; Wellman, 1990[99], 1995[98] ;

4.3.2 Le système proposé, un réseau dynamique

Le réseau formé par le système de communications par satellite que nous proposons constitue un réseau dynamique. Les liens entre les nœuds apparaissent et disparaissent selon la trajectoire des satellites (Figure 4.2). De plus, ces liens ont des conditions qui varient pendant leur durée de vie (angle d'élévation, interférences, rapport signal à bruit). D'autres événements externes peuvent aussi changer l'état des liens (disponible / non disponible)

comme, par exemple, des coupures d'énergie dans les équipements dues parfois à des politiques d'économie d'énergie.

Dans notre système, une connectivité permanente entre tous les nœuds (satellites et GWs) n'est pas garantie en raison des fréquents changements dans la topologie. En revanche, lorsque le système permet le stockage des paquets dans les nœuds nous pouvons atteindre n'importe quel autre nœud en attendant l'établissement du lien ou des liens qui permettent de compléter la route souhaitée.

La façon dont le réseau évolue détermine la stratégie de routage. Tout d'abord, les nœuds mobiles (satellites) fonctionnent comme transporteurs d'informations grâce aux propriétés *Store and Forward* (S&F). Ce transport d'information (paquets) se fait grâce au mouvement physique des satellites avec un délai associé à leur périodes orbitales. Ce délai est de l'ordre de 2 heures pour des satellites à 1000 km d'altitude. Ensuite, les GWs ne sont pas considérés comme mobiles. Ces équipements ont aussi des propriétés S&F qui leur permettent de stocker les paquets pendant des périodes variables de temps pour les délivrer en temps utile aux satellites. Enfin, les liens établis entre une gateway (GW) et un satellite (les liens inter-satellites sont exclus), ne sont pas permanents et le délai de traversée est de l'ordre des $3.33ms$ pour un satellite à $1000km$ d'altitude. Ce délai, comparé aux délais associés aux périodes orbitales est négligeable.

Jusqu'à présent, les approches utilisées dans les réseaux de communication par satellite sont semblables à celles utilisées dans les réseaux mobiles terrestres. Les stratégies pour l'établissement de routes reposent sur le calcul de routes obéissant à des conditions similaires et par conséquent à des critères d'efficacité similaires aux réseaux terrestres. Les algorithmes de routage visent normalement à minimiser, dans les routes calculées, les délais de bout en bout, la longueur ou bien la congestion en prenant de mesures préventives ou correctives pendant leur fonctionnement. La façon avec laquelle l'intermittence de connectivité dans les systèmes de communication par satellite est abordée est similaire à celle des réseaux terrestres de communication. Dans les systèmes à faible ou haute intermittence (faible connectivité) comme les réseaux ad hoc, le problème de calcul et de sélection des routes nécessite

une route instantanée entre l'origine et la destination (connexion de bout en bout).

La possibilité de stockage de longue durée dans les nœuds qui constituent les routes nous permet, d'une part, de pouvoir surmonter les limitations des systèmes à faible connectivité et/ou haute intermittence si on applique les politiques de routage traditionnelles et, d'autre part, d'ouvrir un nouveau champ de recherche dans le domaine des réseaux de communication qui a été peu étudié jusqu'à présent. Les mécanismes S&F permettent l'utilisation d'une route constituée par des liens qui n'existent pas forcément de façon instantanée.

4.4 Solutions de routage pour notre système

Pour aborder le problème de routage nous devons limiter d'abord le nombre de solutions en regardant de plus près leurs propriétés. Pour cela, nous nous limiterons à l'analyse des propriétés dynamiques de la topologie en laissant de côté le dynamisme lié aux variations de trafic. Cela nous permet aussi d'isoler et d'identifier les phénomènes liés exclusivement au dynamisme physique.

Une solution de routage est constituée de trois parties fondamentales :

- La collecte d'informations sur l'état du réseau et du trafic. Notre système ne présente pas un état de connectivité simultanée entre tous les nœuds. La connectivité est partielle en constituant une sorte de réseaux régionaux. De plus, le mouvement continu des satellites provoque un changement fréquent et rapide de la topologie (voir Figure 4.2). Pour connaître l'état du réseau à tout instant nous devrions avoir un mécanisme en exécution permanente qui puisse avoir la possibilité d'interroger tous les équipements en continu. Cela n'est pas possible sans faire appel à d'autres équipements (par exemple une passerelle avec des fonctionnalités de NCC - *Network Control Center*) que ceux qui constituent notre système : nous avons proposé depuis le début un système entièrement autonome. De plus, la charge de trafic due à ces opérations peut pénaliser la performance globale du système. Il faut

remarquer qu'une solution fondée sur la demande périodique de l'état du réseau représente les mêmes inconvénients. En revanche, le système proposé est un système déterministe. En utilisant les éphémérides des satellites, nous pouvons connaître les propriétés dynamiques du système à l'avance et donc, leurs périodes de connectivité avec les GWs.

- Le calcul et la sélection de routes. A l'exception des conditions de trafic, l'état du réseau est connu à l'avance. Le calcul de routes peut donc être fait à l'avance. Ce calcul peut être fait par tous les sources (GWs). Il faut préciser que ces GWs auront aussi les fonctionnalités de nœuds intermédiaires. Les satellites ne sont pas considérés comme l'origine ou la destination de messages de données. Les solutions pré-calculées doivent considérer l'évolution du système pour pouvoir s'adapter aux conditions au moment de l'utilisation d'une route. Cette étude prétend développer une stratégie pour le calcul et la sélection de routes qui puisse nous montrer la relation entre la dynamique du réseau et les paramètres qui reflètent l'efficacité des routes (délai, longueur, etc.).
- L'acheminement des messages des usagers à travers les routes sélectionnées. Face à l'interruption fréquente de liens et à l'impossibilité de connaître les changements imprévus dans l'état des liens (pannes, blocages, ...), nous supposons que les messages ont toujours la possibilité de prendre n'importe quel lien valide à n'importe quel moment.

Le système étant un système S&F, il permet le stockage des paquets de façon permanente dans les nœuds. Quand un nœud n'est pas capable d'envoyer immédiatement un message, il le stocke jusqu'à trouver le moyen de l'envoyer vers un autre nœud ou vers la destination. Nous considérons que le temps de stockage dans les nœuds est illimité, et donc, que la capacité de stockage des paquets dans les nœuds est aussi illimitée. Nous considérons enfin que les messages portent leur propres informations de routage ajoutées par la source et qui ne sont plus modifiées par les nœuds intermédiaires. La politique d'acheminement des messages repose sur le mode datagramme. Les tâches des nœuds intermédiaires sont réduites à l'interprétation des directives contenues

dans les messages. Aucune directive d'acheminement n'est définie par les nœuds intermédiaires.

4.4.1 Les solutions possibles

4.4.1.1 Approche des réseaux ad-hoc

Notre système a des propriétés similaires à celles des réseaux ad-hoc : forte mobilité et intermittence des liens. En revanche, les réseaux ad-hoc ne sont pas des réseaux déterministes et par conséquent la collecte des informations sur l'état des liens est faite en temps réel ou bien, à la demande. Une autre différence est que notre système possède des fonctionnalités S&F, ce qui le rend tolérant aux déconnexions. Dans les réseaux ad hoc, ces événements provoquent la perte de paquets qui empruntent ces routes.

Dans le domaine des réseaux ad hoc, les études de routage sont pléthoriques (Voir [60], [86]). En revanche, toutes ces solutions, dont le principal objectif est la tolérance à la perte de routes, semblent perdre leur efficacité quand elles sont appliquées à des scénarios où le degré d'intermittence est très grand et donc, les routes entre les sources et les destinations rarement établies ou d'une durée de vie très courte. Toutes ces propositions appliquent des solutions qui nécessitent une ou plusieurs routes disponibles entre la source la destination pour pouvoir faire parvenir les informations. Si un paquet est perdu, la fiabilité de l'information ou bien, l'ensemble des informations risque de se perdre. De nombreuses études visent une amélioration de l'efficacité des protocoles connus ou d'autres approches pour surmonter les difficultés rencontrées dans leur mise en œuvre. Dans ce contexte, en 2003 et 2004, Ferreira [46] et Bui-Xuan [17] ont proposé un modèle pour traiter les facteurs dynamiques des réseaux ad hoc au travers de graphes évolutifs (*evolving graphs*).

4.4.1.2 Approche des réseaux de transport

En analysant les propriétés qui caractérisent notre système on peut remarquer plusieurs similarités générales avec un système de transport. En faisant

une simple comparaison, les satellites peuvent être considérés comme les véhicules de transport (train, métro) pour les paquets (passagers) et les GWs jouent le rôle de sources, destinations ou étapes intermédiaires (GWs d'origine, de destination ou de changement de train). Le délai associé à la montée ou à la descente des paquets ($3ms$) est faible et sa contribution au délai total (comme dans les systèmes de transport en commun), reste négligeable.

Il faut remarquer que les liens associés aux systèmes de transport correspondent aux véhicules de transport et ne sont pas liés aux temps de montée ou de descente. Dans notre cas, les véhicules de transport sont les satellites, ils possèdent des propriétés similaires : horaires de passage, trajectoire, capacité de transport, temps de parcours, etc.

L'évolution des conditions des réseaux de transport pose un problème pour le calcul de routes. La représentation de cette évolution (en fonction du temps ou d'autres variables typiquement aléatoires) dans les algorithmes de recherche et de sélection de routes est un problème largement étudié au cours de ces dernières années. Dans ce domaine, les algorithmes classiques (Bellman [14] (1958) et Dijkstra [38] (1959)) ont été adaptés aux conditions évolutives des réseaux de transport et utilisés pour le calcul de routes. Les algorithmes offrent des solutions théoriquement efficaces mais difficiles à mettre en place dans la pratique pour plusieurs raisons : le temps de calcul excessif, utilisation excessive de mémoire, etc. Dans un travail de 1979 [51], Garey et Johnson donnent des exemples où la complexité de calcul grandit de façon exponentielle avec la taille du problème (nombre de nœuds). Dans le contexte des réseaux de transport, le calcul et le choix de routes obéissent à plusieurs critères en plus de la distance (la route la plus courte), tels que le temps (temps d'arrivée, temps de départ, temps de traversée) et le coût (coût différencié entre liens, entre nœuds, entre horaires, etc.). Par exemple, en 1990, Orda et Rom [81] ont analysé les coûts minimaux dans un réseau avec des caractéristiques variables dans le temps (délais de traversée des liens, poids des liens et coût de stationnement dans les nœuds).

Le problème des routes les plus courtes avec des restrictions dans le temps a été étudié en 1983 par Desrosiers [36], en 1998 par Desrochers [35] et en 2000 par Desaulniers [34]. Dans la contribution de ce dernier, l'utilisation de

fenêtres temporelles restreint énormément le problème du calcul des routes. Dans sa contribution de 1998, Chabini [23] propose un algorithme pour le calcul des routes les plus rapides et des routes les moins coûteuses (valeurs discrètes) entre plusieurs origines et une seule destination et plusieurs intervalles de temps de départ.

D'autres études incluant une évolution aléatoire du système ont été publiées par : Frank (1969) [50], Eiger (1985) [42], Hall (1986) [53], Wellman (1990 et 1995) [99] [98] et Miller (1994) [69]. Dans ces études, plusieurs types des variations stochastiques des poids des liens ont été analysés. Les conclusions conservent leur intérêt pour l'étude des réseaux dynamiques. Par exemple, la notion de cohérence stochastique proposée en 1995 par Wellman [98] qui est une extension de la condition FIFO *First In - First Out* établie postérieurement par Miller [70] en 1997.

La cohérence stochastique s'explique de la manière suivante :

Soit $c_{ij}(t_0)$ le temps de traversée d'un origine i vers une destination j à un temps de départ t_0 . Le réseau a une cohérence stochastique si pour tous les sommets du graphe associé i, j et les temps $s \leq t$ et z :

$$Pr(s + c_{ij}(s) \leq z) \geq Pr(t + c_{ij}(t) \leq z) \quad (4.2)$$

Autrement dit, la probabilité d'arriver plus tôt (Pr) ne peut pas être augmentée en partant plus tard.

Dans ce domaine de recherche, le travail le plus intéressant pour nous c'est celui de Pallotino et Scutellà [83] qui sera détaillé par la suite.

4.4.2 Une solution pour les réseaux Store & Forward (S&F) : Les réseaux spatio-temporels

Le système de communication proposé présente des caractéristiques qui n'ont pas été considérées précédemment dans le domaine des réseaux de communication. En revanche, ces conditions le rendent similaire aux réseaux de transport. C'est pourquoi il est possible d'utiliser des notions et des solutions provenant de ce domaine pour aborder l'analyse du système.

Si l'on considère les satellites comme des véhicules de transport, le comportement général du système et notamment, son comportement dynamique ressemble à celui d'un système de transport. La variation dans la dynamique d'un système de transport comporte en revanche des composantes aléatoires comme la variation de la vitesse des véhicules, dans un milieu urbain par exemple, ou les délais imprévus dans des systèmes de transport ferroviaire (train, métro) ou aérien. Dans notre système, cette composante aléatoire n'existe pas puisque les satellites présentent un mouvement sans variations significatives une fois qu'ils sont placés en orbite. Dans ces conditions, la dynamique de la topologie du réseau est réduite au mouvement des satellites qui peut être représenté par une fonction qui dépend uniquement du temps.

Parmi les études précédentes dans le domaine des transports, celles réalisées en 1997 par Pallottino et Scutella [83] apportent les notions les plus importantes pour notre étude. Ils utilisent la notion de réseau spatio-temporel et proposent le paradigme algorithmique du *Chrono-STP* (Chronological Shortest Path Tree). Ils ont envisagé son application au problème d'un réseau évolutif avec des restrictions dans le domaine du temps (fenêtres de temps) décrit par Desrosiers en 1983 [36]. Un algorithme pour trouver le chemin le plus court dans ce contexte a été proposé en 1998 par Desrosiers et Soumis dans [35]. Un autre algorithme pour résoudre le problème du plus court chemin avec de fenêtres de temps (*SPPTW -Shortest Path Problem with Time Windows*) a été proposé par Chen et Powell en 1998 dans [88]. Une solution pour le problème de routage dans un réseau ferroviaire a été abordé en 1995 par Goczyła et Cielatkowski dans [52].

Parmi les outils possibles pour l'analyse du réseau formé par notre système se trouvent :

1. le Chrono STP proposé par Pallottino en 1997 [83] et son adaptation aux fenêtres de temps ;
2. les graphes évolutifs proposés par Ferreira et Bui-Xuan en 2004 ([46], [17]).

La différence entre ces deux solutions provient notamment de leur domaine d'application. La première étude formalise un réseau spatio-temporel

avec des restrictions horaires pour un réseau de transport, des conditions d'attente, ainsi que des délais associés à la traversée. Les travaux issus de cette solution sont nombreux et variés. La deuxième propose une analyse de graphes évolutifs dans le contexte des réseaux ad-hoc ainsi que des paramètres pour mesurer la performance des routes. Cette dernière solution représente aussi une solution au problème décrit par Desrosiers en 1983 [36].

4.4.2.1 Les réseaux spatio temporels dans notre système

Un segment réseau entre deux satellites (S_0 et S_{19}) et deux GWs (T_0 et T_{49}) est montré sur la Figure 4.4.

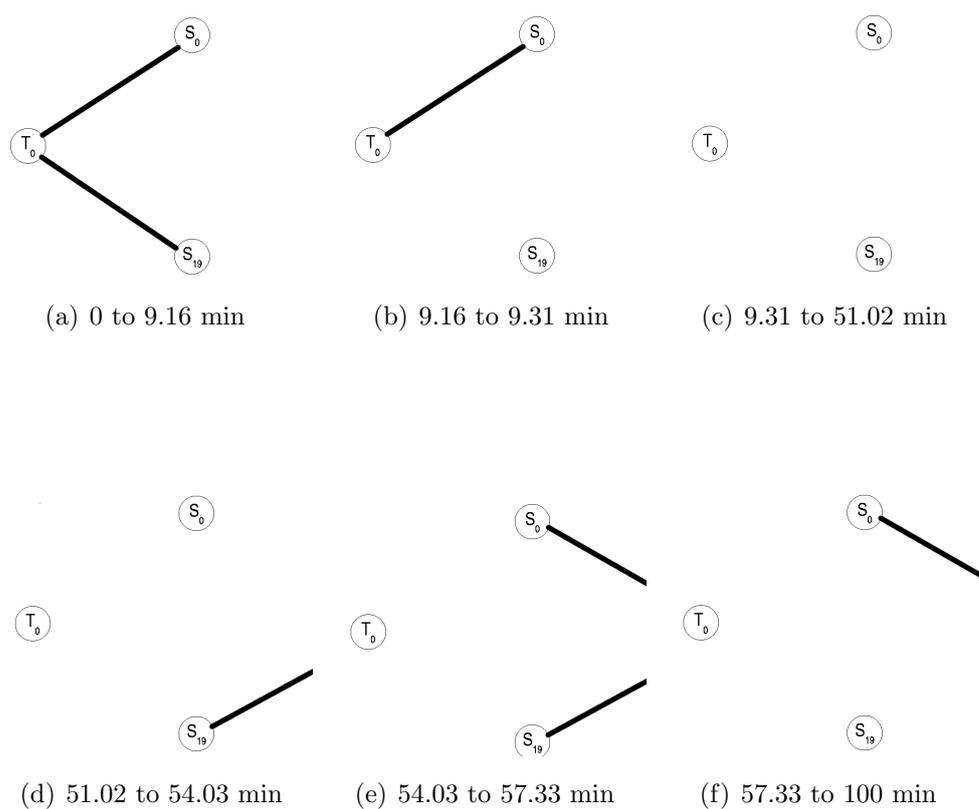


FIG. 4.4 – Evolution du réseau entre 0 et 100 minutes

Pour analyser le réseau formé par le système on peut utiliser le Chrono-STP proposé par Pallottino [83]. Il est possible de représenter le système par un réseau spatio-temporel à fenêtres de temps associées aux nœuds et/ou aux liens. Un réseau spatio-temporel, $R = (V, E)$, est défini par l'ensemble des nœuds V et des liens E tels que :

V est l'ensemble des nœuds i avec des fenêtres de temps $[a_i, b_i]$ associées :

$$V = \{i_h : i \in N, a_i \leq h \leq b_i\} \quad (4.3)$$

où

- a_i et b_i sont des instants limitant la période dans laquelle le nœud i est disponible tel que $a_i \leq b_i$ (fenêtre de temps). Cette disponibilité peut être déterminée par l'état des terminaux (allumé, éteint, en veille, en panne ...) ou par la portée en fonction d'un autre nœud de référence.
- h est un instant compris dans la fenêtre de temps associée au nœud, c'est un instant où le nœud est disponible.

E est l'ensemble des liens :

$$E = \{(i_h, j_k) : (i_h, j_k) \in V, a_i \leq k = \max\{h + d_{ij}, a_j\} \leq b_j\} \quad (4.4)$$

où

- i est un nœud existant au temps h ;
- j est un nœud existant au temps k ;
- k est un instant compris dans la période définie par la valeur inférieure de fenêtre de temps associée au nœud i (a_i) et la valeur supérieure de la fenêtre de temps associée au nœud j (b_j) ;
- la valeur de k est la valeur maximale entre l'instant $h + d_{ij}$ et la valeur inférieure de la fenêtre de temps associée au nœud j (a_j) ;
- d_{ij} est le délai associé à la traversée du lien.

Par simplicité, et étant donné que dans le système de satellites le temps de traversée des liens reste négligeable par rapport aux périodes de non connectivité entre les équipements, il n'est pas pris en compte pour le calcul de routes. On suppose d_{ij} égal à zéro.

Avec cette hypothèse, l'existence des liens est seulement possible dans l'existence simultanée des nœuds, c'est-à-dire dans la période de temps définie par la limite inférieure de la fenêtre associée au nœud j et la limite supérieure de la fenêtre associée au nœud i . Cette période de temps est appelée fenêtre de lien $[a_j, b_i]$. L'équation 4.4 devient alors :

$$E = \{(i_h, j_k) : (i_h, j_k) \in V, a_j \leq h \leq b_i, h = k\} \quad (4.5)$$

La Figure 4.5 représente le segment réseau de la Figure 4.4 avec les périodes de temps associées à chaque lien.

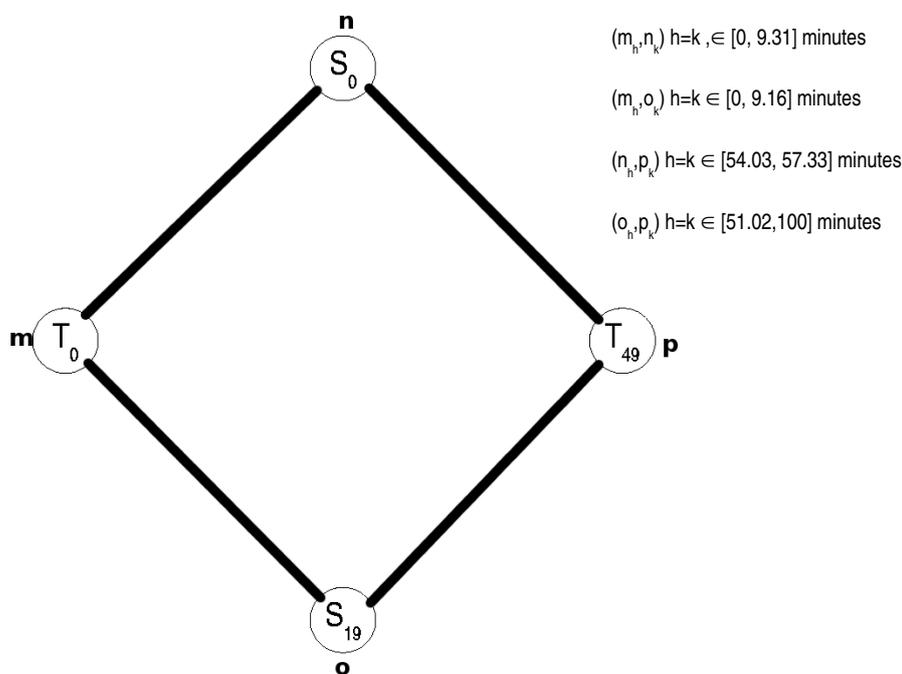


FIG. 4.5 – Réseau spatio-temporel de la Figure 4.4. On affiche les périodes associées aux liens. On considère le délai associé à la traversée du lien égal à 0, donc $h = k$.

Cette représentation du système est similaire aux graphes évolutifs (*evolving graphs*) utilisés par Ferreira et et Bui-Xuan dans [17], une représentation conjointe de succession de graphes dans le temps.

4.4.2.2 Propriétés dynamiques du système dans les graphes évolutifs.

Le problème du chemin le plus court avec une dépendance au temps est fréquemment traité dans le domaine du transport. Cela nous permet d'analyser le comportement du système ainsi que sa performance. L'analyse et la solution de ces problèmes sont souvent simplifiées en fonction des propriétés particulières des éléments qui l'intègrent :

- Délai associé aux arcs à temps discret ou à temps continu.
- Possibilité d'attente dans les nœuds : attente dans les nœuds d'origine, dans tous les nœuds ou bien encore, attente interdite ;
- Restrictions sur l'instant de départ à l'origine.

Pour l'analyse du système on considère une modélisation en temps discret, ce qui n'est pas une perte importante de généralité. Cela permet de restreindre un peu l'étude à ce cas et de se concentrer également sur les nombreux travaux réalisés dans le domaine de transport qui font cette hypothèse :

- $T = \{t_0, t_1, t_2, t_3, \dots, t_q\}$ et $t < t_q$;
- t est une variable temporelle telle que $t + d(t) \in T$;
- $d(t)$ est une fonction de délai dépendante de temps.
- La durée des arcs est toujours considérée plus grande que le temps d'émission d'un paquet (p) :
 $(t_{i+1} - t_i) > p$; $i = 0, 1, \dots, q - 1$.

La possibilité d'attente dans les nœuds est permise puisque tous les éléments du réseau incluent des mécanismes S&F. En revanche, cette considération implique la prise en compte d'un coût d'attente dans l'analyse.

Il n'y a aucune restriction sur l'instant de départ à l'origine.

A partir des particularités du système, nous pouvons procéder à une analyse plus complète. Les propriétés décrites dans [83] sont :

- *FIFO*. Le réseau regardé dans son ensemble n'est pas un réseau FIFO, c'est-à-dire qu'il se peut qu'en partant plus tard de l'origine un message arrive plus tôt à la destination. Soient d_1 et d_2 deux temps de départ avec $d_1 \leq d_2$, $c_{ij}(t_0)$ le temps de traversée d'un nœud i vers un nœud j

à l'instant t_0 . La condition : $d_1 + c_{ij}(d_1) \leq d_2 + c_{ij}(d_2)$ n'est pas toujours vérifiée.

- *Cohérence du coût.* Cette propriété est directement déduite de la notion de coût associé à l'attente dans les nœuds. Dans un graphe, si une attente plus grande dans les nœuds (à l'origine par exemple) implique un coût moindre à celui que l'on a lorsqu'il n'y a pas d'attente, cela veut dire qu'il n'y a pas de cohérence de coût.
- D'après les propriétés S&F du réseau, l'attente dans tous les nœuds est permise. Les coûts associés sont restreints aux coûts associés au temps d'utilisation des ressources de stockage (temps de stockage).

D'autres considérations durant le calcul de route :

- Les délais associés à la montée ou à la descente des paquets ne sont pas pris en compte car ils restent négligeables par rapport aux délais de bout en bout. Ces délais sont considérés comme nuls.
- Les variations dans les délais des satellites n'ont pas un caractère aléatoire car les passages sont invariables et liés à la mécanique orbitale qui ne subit aucune variation.
- Aucune condition de trafic n'est prise en compte en raison de la forte fragmentation du réseau. C'est pourquoi, l'analyse du système prend exclusivement en compte le comportement et la performance du système déduits des conditions dynamiques (mécanique orbitale).

Comme les horaires de passage des satellites sont connus à l'avance, les intervalles de temps des liens établis entre les passerelles et les satellites peuvent être calculés. Avec ces données, le graphe spatio-temporel associé au système peut être déduit.

4.5 Calcul de routes pour le système selon une politique de routage adaptatif pré-calculé

Avec le pré-calcul des temps de passage des satellites, les problèmes de calcul et de sélection de route est simplifié. Les changements dans la topologie

du réseau ainsi que l'établissement de liens et leur durée de vie peuvent être calculés à l'avance par plusieurs méthodes. L'une d'entre elles est l'algorithme proposé par Ali et al. [3], utilisé dans la conception même du système. Une fois les trajectoires des satellites calculées ainsi que leur temps de passage sur des positions fixes sur terre, nous pouvons construire les graphes évolutifs associés pour calculer les routes et sélectionner celles qui induisent une meilleure performance du système.

Les routes marquent le chemin que le paquet doit suivre depuis son origine jusqu'à sa destination. Ce chemin est caractérisé par une séquence de couples de données qui indiquent le nœud auquel le paquet doit être envoyé et l'instant prévu pour le faire. Les routes associées à un paquet sont représentées par :

$$P_{i_0, i_n} = (i_0, t_0), (i_1, t_1), (i_2, t_2) \dots (i_n, t_n) \quad (4.6)$$

Ainsi, une route entre deux nœuds i_0, i_n , peut être caractérisée par l'instant de départ t_0 , l'instant d'arrivée t_n et sa longueur n .

Dans l'exemple de la Figure 4.5 :

$$P'_{T_0, T_{49}} = (0, T_0), (0, S_0), (54.30, T_{49})$$

$$P''_{T_0, T_{49}} = (0, T_0), (0, S_{19}), (51.02, T_{49})$$

La performance des routes est mesurée au travers de paramètres de base (distance, temps) qui nous permettent d'identifier les relations existantes entre les routes et la dynamique du système.

4.5.1 Paramètres d'optimisation et restrictions

Les paramètres à optimiser dans les conditions mentionnées précédemment sont la longueur des routes et leur délai.

Avec ces critères d'optimisation, les routes qui peuvent être calculées sont :

- Les routes les plus rapides. Ce sont les routes qui présentent le plus court délai entre l'instant de départ et d'arrivée (Δt).

- Les routes les plus courtes (nombre de sauts). Ce sont les routes qui permettent d'envoyer le paquet vers la destination avec une utilisation minimale des nœuds.
- Les routes avec un temps de départ au plus tôt. Ces routes permettent de libérer rapidement les ressources de la GW d'origine. Dans le cas d'un réseau FIFO ce genre de routes permet d'avoir un temps d'arrivée au plus tôt. Le système présenté, étant non FIFO, ne bénéficie pas de ce genre de routes.
- Les routes les moins coûteuses. Le coût d'une route est associé au temps d'utilisation de la capacité de stockage. On fait l'hypothèse que le temps de stockage est directement lié au délai de bout en bout. Ainsi, les routes les moins coûteuses sont les plus rapides.

4.5.2 Description de scénarios

4.5.2.1 Le problème

Le problème qui se présente est de trouver les routes optimales pour aller d'une GW d'origine vers toutes les destinations en respectant les contraintes d'horaire imposées par l'intermittence de connectivité entre les nœuds. Pour cela nous considérons trois types de routes possibles dans le système de satellites décrit dans le chapitre 3, Section 3.2.1, à savoir :

- Routes Type I, celles qui vont d'une GW dans la région A à une autre dans la même région ;
- Routes Type II, celles qui vont d'une GW dans la région A à une autre dans la région B ;
- Routes Type III, celles qui vont d'une GW dans la région B à une autre dans la région A.

Ces routes sont représentées dans la Figure 4.6.

L'ensemble de sommets V (Equation 4.3) sera constitué par toutes les combinaisons des GWs i avec toutes les valeurs de temps h comprises dans leurs fenêtres de temps $[a_i, b_i]$. Ces fenêtres de temps sont établies en fonction des périodes de connectivité entre les satellites et les GWs, elles sont calculées à l'avance.

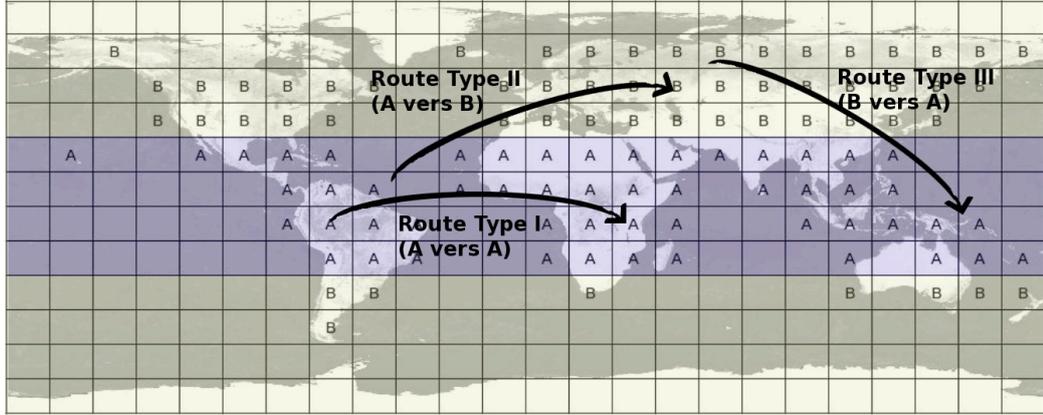


FIG. 4.6 – Distribution géographique des GWs et les trois types de routes considérées dans le problème.

L'existence des liens entre les nœuds du réseau est déterminée par l'Equation 4.4. Comme nous avons considéré que le délai associé à la traversée de liens était négligeable, les liens formés dans le réseau seront :

$$E = \{(i_h, j_k) : (i, j) \in A, a_i < k = \max \{h, a_j\} \leq b_i\} \quad (4.7)$$

Pour la construction du réseau nous avons calculé ces fenêtres de temps pour une période de 33.8 heures, c'est le temps qu'il faut à un satellite à 1350 km d'altitude pour accomplir 18 périodes orbitales. Les fenêtres de temps ont été calculées avec l'algorithme d'Irfan Ali [3].

La procédure envisagée pour le calcul des routes les plus courtes et les plus rapides repose sur la construction d'un arbre de recouvrement ayant comme racine la GW d'origine (source).

4.5.2.2 La procédure

La construction de l'arbre a pour but l'identification des routes optimales (les plus rapides et les plus courtes) depuis un nœud source (racine) vers toutes les destinations possibles. Les routes considérées sont toutes les routes existantes durant la période de simulation.

Les paramètres dont on a besoin pour la construction de l'arbre sont l'ensemble des nœuds et les fenêtres de temps associées (Equation 4.3). Ces deux éléments nous permettent de construire l'ensemble de liens (Equation 4.7) qui constituent le réseau spatio-temporel.

L'algorithme

L'objectif de l'algorithme est d'identifier les solutions optimales pour les routes les plus courtes et les plus rapides. Cela est fait en parcourant l'ensemble des solutions possibles. L'algorithme fait le calcul des routes d'une GW (nœud origine) vers toutes les autres.

L'algorithme consiste à la construction d'un arbre $T(r)$ de routes ayant pour racine la GW d'origine (r). Les feuilles sont ajoutées en forme de sauts (origine, destination, instant, niveau dans l'arbre).

La procédure pour la construction de l'arbre et le calcul des routes optimales est la suivante :

Soit $H \in E = (H(i, j), t_H, level_H)$ un saut quelconque, il est composé de :

- le couple $H(i, j)$ correspondant aux nœuds d'origine i et de destination j ;
- t_H est l'instant où ce lien devient valide ;
- $level_H$ est un entier associé au saut ajouté et qui indique le niveau attribué dans la structure de l'arbre.

L'initialisation des variables est la suivante :

L'arbre, $T = \emptyset$

La queue des sauts dont la destination va être prise comme nœud d'origine est initialisée avec un saut racine, $Q_{pending} = \{(R(x, r), 0, 0)\}$

Le vecteur $fastest(r) = (r, 0, 0)$ et $fastest(i) = (\emptyset, \infty, \infty) \forall i \neq r$

Le vecteur $shortest(r) = (r, 0, 0)$ et $shortest(i) = (\emptyset, \infty, \infty) \forall i \neq r$

x étant un nœud d'origine fictif utilisé pour composer le saut de démarrage vers le nœud r (racine).

Les vecteurs $fastest(k)$ et $shortest(k)$ contiennent les derniers sauts associés aux routes les plus courtes et les plus rapides vers la destination k (GW quelconque).

Le processus suivant se réitère jusqu'à ce que la queue $Q_{pending}$ soit vide :

- Le saut suivant dans $Q_{pending}$ est pris (et effacé) et le nœud destination est pris comme nœud d'origine.
- Depuis cette origine on calcule tous les sauts possibles (P) vers toutes les destinations.
- Ces sauts possibles sont évalués un par un par une fonction de sélection $F(P)$.
- Ceux qui sont valables sont ajoutés comme feuilles dans l'arbre et dans la queue $Q_{pending}$ pour leur traitement postérieur (les nœuds destination deviennent nœuds origine).
- Parmi les sauts ajoutés à l'arbre on sélectionne ceux qui affichent les meilleures performances en termes de longueur et de délai.
- Ces sauts sont stockés dans deux vecteurs ($fastest(k)$ et $shortest(k)$).

A la fin de la procédure les vecteurs $fastest(k)$ et $shortest(k)$ contiennent seulement les derniers sauts des meilleures routes vers la destination k , où k est n'importe quel nœud (GW).

1. Initialisation des variables : $T = \emptyset$

$$Q_{pending} = \{(R(x, r), 0, 0)\}$$

$$fastest(r) = (r, 0, 0) \text{ et } fastest(i) = (\emptyset, \infty, \infty) \forall i \neq r$$

$$shortest(r) = (r, 0, 0) \text{ et } shortest(i) = (\emptyset, \infty, \infty) \forall i \neq r$$

2. Tant que $Q_{pending} \neq \emptyset$ faire :

(a) Prendre le lien suivant $(U(i, j), t_U, level_U)$ de la liste $Q_{pending}$ et faire $U \rightarrow T$.

(b) Si $fastest(j) < t_U$ alors $fastest(j) = t_U$

(c) Si $shortest(j) < level_U$ alors $shortest(j) = level_U$

(d) Pour tous les sauts possibles ayant pour origine la composante j de $U(i, j) : (P(j, n), t_P)$ avec $t_P \geq t_U$ (causalité) faire.

i. Si $F(P) = 1$ (valable), alors $((P(j, n), t_P, level_U + 1)) \rightarrow Q_{pending}$ comme fils de U , autrement effacer P .

L'algorithme se termine quand tous les sauts possibles sont passés par $F(P)$ et que la liste $Q_{pending}$ est vide. Les routes les plus rapides et les plus

courtes peuvent être retrouvées en remontant depuis les sauts de l'arbre sauvegardés dans les vecteurs $fastest(k)$ et $shortest(k)$. Avec ces vecteurs on peut connaître immédiatement la longueur de la route et l'instant d'arrivée.

Les conditions

Chaque lien possible a un ensemble de fenêtres de temps associées $[a_p, b_p]$ (voir Figures 4.2 et 4.5) qui sont les périodes où ils peuvent être utilisés. Ces fenêtres se trouvent rassemblées dans un vecteur de l couples contenues dans l'intervalle de temps à étudier.

Nous supposons que les paquets doivent partir de la source le plus tôt possible. Pour construire tous les $(P(j, n), t_P)$ nous considérons la première fenêtre de temps qui soit ultérieure à t_U . De cette façon nous restreignons le temps d'attente dans les nœuds au minimum. Une autre avantage de cette condition est de limiter la construction de l'arbre en largeur, car pour chaque nœud possible, nous ne prenons en compte qu'une fenêtre.

Les vecteurs $fastest$ et $shortest$ contiennent seulement de données liées aux GWs étant donné que les satellites ne jouent pas le rôle de source/destination.

Scénario 1. Construction de l'arbre par GW

1. Conditions. La fonction d'évaluation $F(P)$ considère :
 - L'évitement de boucles. Pour la construction de routes, elle élimine les sauts possibles $(P(j, n), t_P)$ dont l'élément n a déjà été visité.
2. Difficultés rencontrées. Limitation à cause de la mémoire du PC. La structure Hop a une taille de 256 Octets. La mémoire disponible (RAM + SWAP) du serveur de calcul utilisé est limité a 3Go. La capacité réelle de stockage est limitée a 2.8 Go, c'est-à-dire 10138953 Hop. Le calcul des routes est fait pour chaque GW vers toutes les destinations possibles (1 vers n). Toutes les périodes de temps (fenêtre de temps) ont été prises en compte pour l'exécution des simulations. En revanche, une fois qu'une fenêtre représentait une solution, les fenêtres provenant d'une solution plus tardive sont écartées pour la recherche des routes les plus rapides.

La taille de l'arbre avec les conditions décrites est une fonction combinatoire du nombre de satellites et de GWs. La taille de l'arbre est :

$$A = S!(T - 1)! \quad (4.8)$$

Où A est le nombre maximal de nœuds qui composent l'arbre, S le nombre de satellites et T le nombre de GWs. La taille de l'arbre qui représente toutes les routes possibles est de $21! \times 108!$. Pour réussir le calcul des routes, il est nécessaire de limiter la taille de l'arbre aux conditions imposées par la capacité de calcul dont on dispose.

3. Analyse des résultats. On n'a pas réussi à obtenir de résultats en raison de la limitation de mémoire.

Scénario 2. Construction de l'arbre en le limitant en profondeur

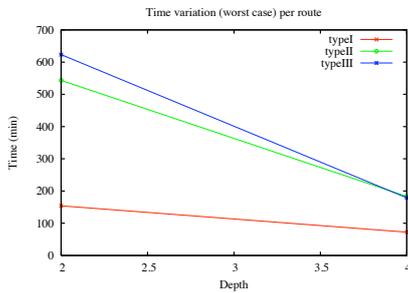
1. Conditions. La fonction d'évaluation $F(P)$ inclut :
 - L'évitement de boucles.
 - La limitation de l'arbre en profondeur. La fonction permet d'éliminer les sauts possibles $(P(j, n), t_P)$ fils d'un élément père $(U(i, j), t_U, level_U)$ dont $level_U \geq Longueur_{limite}$. Le paramètre $Longueur_{limite}$ ne peut prendre que des valeurs paires car les satellites (niveaux impairs) ne sont pas de destinations.
2. Difficultés rencontrées. Le temps d'exécution pour un arbre de profondeur 4 est d'environ 30 secondes. La durée pour faire le calcul des 108 GWs est de 50 minutes.

La taille de l'arbre est une fonction de la profondeur, elle vaut :

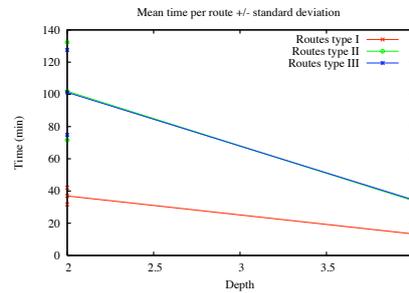
$$A = \frac{S!(T - 1)!}{(S - \frac{d}{2})!((T - 1) - \frac{d}{2})!} \quad (4.9)$$

Où A est le nombre maximal de nœuds qui composent l'arbre, S le nombre de satellites, T le nombre de GWs et d la profondeur paire permise dans la fonction $F(P)$ avec la condition $d \leq Longueur_{limite}$. Avec les équipements utilisés la profondeur maximale de l'arbre est de 4.

3. Analyse des résultats. Avec ces premiers résultats (voir Figure 4.7) nous pouvons observer une réduction du délai de bout en bout à mesure que la profondeur maximale permise dans la construction de l'arbre augmente. En passant d'une profondeur 2 à une profondeur 4, le délai de bout en bout maximal est réduit de 50% pour les routes de Type I et de 65% pour les routes de Type II et III. Le délai de bout en bout pour



(a) Délais de bout en bout, pire cas



(b) Délai de bout en bout moyen

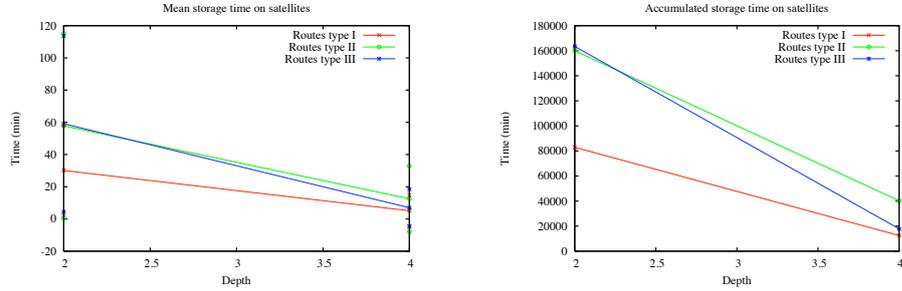
les routes Type II et III est plus long que pour les routes de Type I, lorsque le nombre de satellites pour la construction des routes est réduit (seule la constellation 2 est utilisée - Voir Table 3.1 -). Cependant les réductions de délai apparaissant lorsque on augmente la longueur des routes sont plus conséquentes dans le cas des routes Type II et III. Ce comportement est le même pour le délai de bout en bout moyen (Voir Figures 4.7(a) et 4.7(b)).

En revanche, l'utilisation de la mémoire dans les satellites est réduite de 75% dans les trois types de routes (Voir Figures 4.7(c) et 4.7(d)).

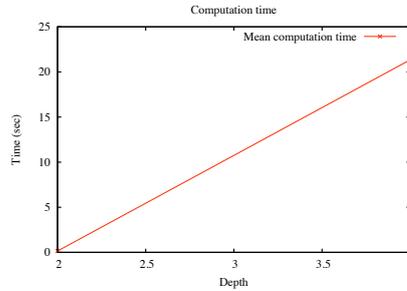
Le temps de calcul moyen de routes par GW passe de 0.15s à 21s (Voir 4.7(e)).

Scénario 3. Limitation en largeur et profondeur

Pour réussir à faire le calcul de routes avec une profondeur au-delà de 4, nous avons eu besoin de limiter la taille de l'arbre en largeur. Dans la fonction d'évaluation nous avons inclus un autre critère pour sélectionner



(c) Temps de stockage moyen dans les satellites. (d) Temps de stockage cumulé dans les satellites.

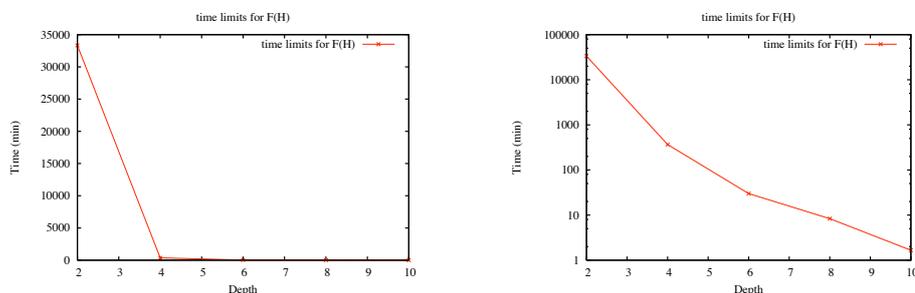


(e) Temps de calcul moyen par GW

FIG. 4.7 – Résultats de simulation en Scénario 2.

les sauts qui se trouvent au dessous d'une valeur de temps. Cette valeur a été d'abord sélectionnée en fonction du pire cas dans le cas $d - 2$. Pour une profondeur 2, on n'a pas considéré de limites. Pour une profondeur 4 on a considéré le temps maximal à une profondeur 2 et ainsi de suite pour les profondeurs 6, 8 et 10 (voir Figure 4.8) . Pour rendre l'outil plus performant, nous avons aussi modifié la politique de files, pour ce scénario nous avons utilisé une liste ordonnée séquentiellement des sauts possibles $(P(j, n), t_P)$.

1. Conditions. La fonction d'évaluation $F(P)$ inclut :
 - L'évitement de boucles.
 - La limitation de l'arbre en profondeur. La fonction permet d'éliminer les sauts possibles $(P(j, n), t_P)$ fils d'un élément père $(U(i, j), t_U, level_U)$



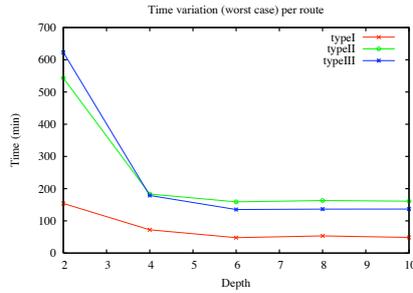
(a) Seuils de temps en fonction de la profondeur maximale de l'arbre. Lineaire.

(b) Seuils de temps en fonction de la profondeur maximale de l'arbre. Semilog.

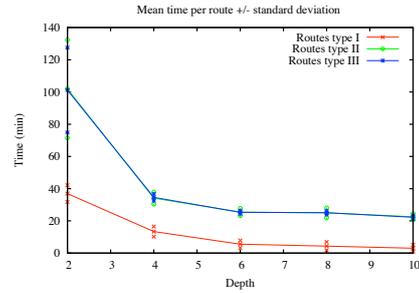
FIG. 4.8 – Seuils de temps utilisés par la fonction $F(H)$ pour limiter la construction de l'arbre en largeur. Les valeurs montrées à une profondeur n sont utilisées pour le calcul de routes à longueur $n + 2$.

- qui a $level_U = Longueur_{limite}$. Le paramètre $Longueur_{limite}$ ne peut prendre que de valeurs paires car les satellites, qui se trouvent au niveau impair ne peuvent pas jouer le rôle de destination.
- Une fonction de sélection qui prend en compte les délais de bout en bout maximaux possibles et qui permet d'écarter des solutions non efficaces. Voir Figure (4.8).
2. Difficultés surmontées. Le principal problème s'est présenté au moment d'établir des seuils pour $F(H)$. Choisir les seuils en fonction des temps maximaux de $d - 2$ ne garantissait pas l'obtention du meilleur arbre à d . C'est pour cela que ces seuils ont été établis en fonction de la quantité de mémoire utilisée. Les valeurs obtenues garantissent une utilisation maximale de la mémoire disponible, c'est-à-dire, les meilleures conditions permises par le hardware.
 3. Analyse des résultats. La Figure 4.9 montre les résultats obtenus avec les conditions décrites. Comme dans le scénario 2, nous observons une décroissance du délai de bout en bout quand on augmente la longueur de la route de 2 à 4 (Figure 4.9(a) et 4.9(b)). La réduction du délai de bout en bout pour une profondeur au-delà de 4 est moins importante

que celle obtenue précédemment. Cette diminution dans le délai de bout en bout est due au nombre important de satellites qui offrent un choix plus grand de routes.



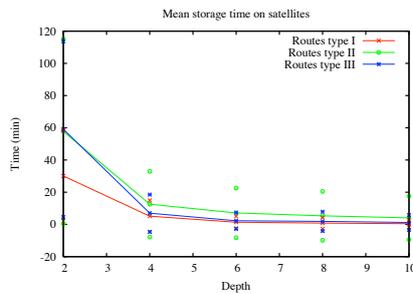
(a) Délais de bout en bout, pire cas.



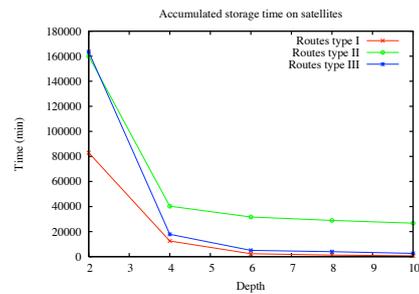
(b) Délai de bout en bout moyen.

En revanche, la relation entre la longueur de route et le temps de calcul est exponentielle (Figures 4.9(e) et 4.9(f)) et le calcul pour une longueur plus grande n'est pas réalisable.

Nous observons aussi la corrélation entre les délais de bout en bout et le temps de stockage dans les satellites (Figure 4.9(c) et 4.9(d)).

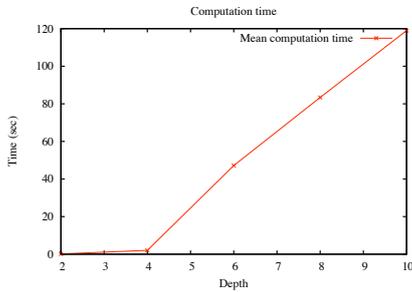


(c) Temps de stockage moyen dans les satellites.

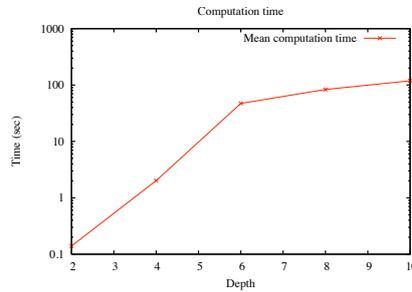


(d) Temps de stockage accumulé dans les satellites.

Avec l'utilisation des limites de temps (seuils Figure 4.8) le temps de calcul n'accroît pas exponentiellement, son comportement est plutôt linéaire (Figures et 4.9(e)). Cela permet d'avoir des temps de calcul raisonnables pour le calcul de routes longues.



(e) Temps de calcul.



(f) Temps de calcul. Semilog

FIG. 4.9 – Résultats de simulation en Scénario 3. La longueur de route (profondeur d’arbre) est de 2, 4, ... et 10 sauts.

4.5.3 Analyse générale des résultats.

La relation observée entre la longueur des routes et le délai de bout en bout est important pour faire l’évaluation des routes considérées optimales : les routes les plus courtes et les routes les plus rapides. Nous observons que, même s’il y a une réduction du délai de bout en bout avec l’augmentation de la longueur des routes (profondeur de l’arbre), cette réduction n’est plus intéressante dans la mesure où l’on consomme beaucoup de ressources (mémoire et temps de calcul) pour la construction de l’arbre. Cette relation exponentielle entre la taille de l’arbre et la longueur de route nous montre un compromis entre les ressources destinées au calcul de routes et les améliorations en termes de délai de bout en bout : la quantité de ressources destinée au calcul ne correspond pas forcément à une réduction du délai de bout en bout du même ordre de grandeur. De plus, la réduction du délai de bout en bout n’est pas considérée comme essentielle dans les services S&F où les périodes d’attente dues au stockage peuvent être d’une grandeur incomparable avec les améliorations obtenues en termes de délai de bout en bout. Cette relation, en revanche, peut nous permettre d’établir des limites pour les ressources destinées à la construction de routes ou bien, dans un contexte de services différenciés cette relation pourrait nous permettre d’établir des compromis entre les prix et les garanties minimales de service.

4.6 Résumé

Dans ce chapitre nous avons présenté les bases pour l'implantation d'une politique de routage adaptatif pré-calculé. La constellation étudiée, à la différence d'autres systèmes existants, ne considère pas l'utilisation de liens inter-satellites.

Nous avons proposé une solution pour le routage dans ce système qui est fondée sur des techniques provenant du domaine du transport. Dans le domaine des télécommunications nous n'avons pas trouvé une technique qui puisse résoudre le problème de routage dans les conditions engendrées par la dynamique du système (haute intermittence et segmentation fréquente du réseau). Nous avons développé un outil pour le calcul des routes qui permet de faire le pré-calcul de routes en considérant le problème comme celui du plus court chemin avec des fenêtres de temps (SPPTW).

L'adaptation graduelle de l'outil aux critères de performance demandés a abouti à l'application d'heuristiques qui permettent d'obtenir des solutions optimales tout en identifiant un compromis entre la qualité de ces solutions et la quantité de ressources destinées à leur calcul.

Les perspectives de cette première implantation générale sont nombreuses. La génération de routes pré-calculées ne pose pas de limites et on peut parfaitement envisager son application avec d'autres conditions d'optimisation ou avec des fonctions de coût plus complexes. Le coût de liens ou d'attente dans les nœuds peuvent être associés par exemple à une valeur monétaire.

Une autre extension du travail se trouve dans les critères d'optimisation. Tandis que dans la plupart des travaux liés au routage on trouve comme critère principal d'optimisation le délai de bout en bout, le délai devient dans un contexte S&F un critère secondaire vis-à-vis des longues périodes d'attente qui sont possibles dans de tels systèmes. Ces autres critères d'application ouvrent non seulement la possibilité d'établir d'autres métriques pour le routage mais aussi la possibilité d'appliquer d'autres stratégies de routage, comme celles du domaine de transport aux systèmes de communication S&F.

Chapitre 5

Métriques pour le routage dans les réseaux Store and Forward

Contents

5.1	Introduction.	89
5.2	Métriques de routage dans les réseaux S&F	92
5.3	Non dépendance des métriques	112
5.4	Conclusion	118

5.1 Introduction.

Les métriques sont des valeurs associées à une propriété particulière d'une route et elles sont utilisées par les processus qui composent une politique de routage. Les métriques servent de référence pour répondre aux critères d'efficacité utilisés dans le processus de routage.

À notre connaissance, il n'existe pas un cadre de métriques spécifiques pour l'évaluation des réseaux *Store and Forward* (S&F). Dans la littérature des réseaux tolérants aux délais (DTN), les métriques employées utilisent un référentiel de temps (par exemple le délai). Elles gardent donc une relation directe avec celles des réseaux traditionnels. Dans [62], les métriques utilisées sont **le délai** moyen de transmission d'un *bundle* et **la longueur** moyenne de

route. Dans [61], le **délai de bout en bout** est optimisé dans l'hypothèse d'une relation directe avec le taux de réception des messages. Cette hypothèse n'est pas toujours vraie dans les réseaux S&F. Il est possible d'avoir des routes avec un très court délai de bout en bout mais avec une grande instabilité dans les liens (taux de pertes significatif) et des routes avec un grand délai de bout en bout mais avec des liens plus stables (faible taux de pertes). La contribution de Jain et al. [59] utilise la probabilité d'envoi des messages (similaire au taux de réception des messages) et le délai, composé des délais d'attente, de mise en file, de transmission et de latence. L'utilisation de ces métriques, qui sont normalement applicables sous l'hypothèse d'une connectivité permanente des extrémités, semblerait difficile à justifier dans un contexte S&F car cette hypothèse est rarement réalisable.

Dans les réseaux traditionnels, l'existence d'une connexion entre la source et la destination d'une route permet d'obtenir facilement les valeurs des métriques qui lui sont associées. C'est le cas des métriques **analytiques** concaves ou additives (délai de propagation d'un lien, nombre de sauts d'une route, bande passante d'un lien en fonction de la taille des paquets, etc) et des métriques empiriques qui sont définies sous des conditions particulières de fonctionnement (RFC 2330 dans [85]). Les métriques utilisées dans l'Internet se fondent aussi sur ce principe : connectivité (RFC2678 dans [67]), délai dans un sens (RFC 2679 dans [5]), perte de paquets dans un seul sens (RFC2680 dans [6]), délai aller/retour (RFC 2681 dans [7]),... Dans les réseaux S&F, les conditions permettant le dialogue entre les entités d'extrémité ne sont pas garanties car les liens qui composent les routes ne coïncident pas toujours dans le temps. De ce fait, on ne peut plus appliquer les mécanismes et les métriques conçus pour les réseaux traditionnels.

Dans le domaine des transports, les métriques utilisées pour augmenter la capacité des systèmes sont liées à la globalité du système : coût par message transporté, temps de transit moyen, pourcentage d'utilisation de la capacité totale, taux d'utilisation des routes qu'elles soient optimales ou non. En revanche, les critères de différenciation entre des routes individuelles ne sont pas établis.

Dans ces conditions et étant donné le poids que prennent les processus de routage dans les réseaux S&F, il est nécessaire de compter sur un schéma de métriques permettant d'une part d'avoir une image précise des propriétés des routes et, d'autre part, de définir et de faire l'évaluation des politiques de routage à appliquer. C'est la principale raison qui nous amène à proposer les métriques pour les réseaux S&F.

L'analyse de routes calculées dans le système S&F de communications par satellite nous a permis d'identifier leurs principales caractéristiques. Les métriques utilisées, provenant des réseaux traditionnels, ont été suffisantes pour démontrer l'utilité des techniques de routage issues du domaine des transports. Elles ont rendu possible la création d'un algorithme facilitant la mise en place d'une politique de sélection de routes en fonction d'une métrique déterminée. En revanche ces critères (longueur de route, temps d'arrivée) ne sont pas suffisants pour l'optimisation des routes dans le contexte S&F. Ces routes montrent un plus grand nombre de caractéristiques qui n'a pas été pris en compte lors de notre première contribution [28].

L'identification, après analyse, des caractéristiques des routes calculées nous a permis de proposer un schéma de métriques rendant plus précise leur différenciation. Ces métriques ne sont pas diamétralement opposées à celles existant dans les réseaux traditionnels.

Dans ce chapitre nous allons décrire les métriques des réseaux traditionnels et voir en quoi elles ne sont pas toujours valides dans un contexte S&F. Ensuite, nous allons exposer les métriques que nous proposons dans le cadre de routage dans les réseaux S&F. Nous décrirons dans un premier temps les métriques une par une, puis nous étudierons leurs relations. Cela est nécessaire pour comprendre l'influence qu'elles exerceront lors d'une politique de routage quelles que soient leurs combinaisons, combinaisons qui dépendent des caractéristiques des services offerts.

Ensuite, nous présenterons une étude sur la non dépendance linéaire des métriques proposées, ce qui garantit la non-redondance dans l'évaluation des routes. Chacune reflétera une seule propriété de routes.

En dernier lieu, nous exposerons les domaines d'application possibles dont celui des communications par satellites.

5.2 Métriques de routage dans les réseaux Store and Forward

5.2.1 Métriques

Dans le routage, les métriques sont des valeurs numériques qui représentent une propriété associée à une route. Elles sont utilisées pour définir les stratégies de routage à suivre.

Dans les réseaux traditionnels, les protocoles de routage utilisent une ou plusieurs métriques combinées en fonction des objectifs poursuivis par les fonctions de coût.

Par exemple, OSPF *Open Shortest Path First* [72] permet le calcul des routes en fonction de quatre métriques : distance, coût, délai et fiabilité. Normalement dans les fonctions de coût, une seule de ces quatre métriques est utilisée. L'EIGRP *Enhanced Interior Gateway Routing Protocol* [24] utilise : le délai, la bande passante, la fiabilité et la charge. RIP *Routing Information Protocol* [54] utilise le nombre de sauts (longueur de route).

La fonctionnalité des protocoles de routage repose sur le choix de routes à partir d'une comparaison entre les valeurs des métriques associées à chacune. Parmi toutes les métriques existantes, les plus importantes sont :

- **Nombre de sauts, longueur de route.** Le nombre de sauts est le nombre de liens composant la route. La quantité de sauts, dans les réseaux traditionnels, est directement liée au délai associé à la route. Le minimum absolu de ces délais est le temps qu'une onde met pour parcourir cette longueur. Les coûts associés aux routes sont déterminés par la quantité de ressources utilisées (nombre de routeurs, nombre de liens) par les messages qui l'empruntent. Les routes courtes réduisent l'utilisation des ressources du réseau.

Dans les réseaux S&F, en raison de la discontinuité des liens, il n'y a pas de correspondance entre la longueur de la route et les délais/coûts associés. Il est possible d'avoir des routes plus longues en termes de sauts tout en réduisant le délai total et l'usage des ressources.

- **Délai de bout en bout.** Il s’agit du temps écoulé entre l’envoi d’un paquet par un émetteur et sa réception par le destinataire. Ce délai a trois composantes : délai de propagation, délai d’émission et délai de files d’attente dans les nœuds, produits lors du passage de l’information dans chacun des composants de la route. Dans les réseaux traditionnels, la demande d’une certaine qualité de service détermine les valeurs maximales du délai total (voir Figure 5.1).

Qualité de service (QoS) multimedia				
Type de trafic	Perte maximale de paquets	Latence maximale (un seul sens)	Gigue maximal	Bande passante garantie par session
Voix sur IP	0,01	200ms	30ms	12 à 106 kbps
Vidéo conférence	0,01	200ms	30ms	Taille de session plus 20%
Vidéo <i>steraming</i>	0,02	5s	Ne s’applique pas	Dépendant du format d’encodage et vitesse de transmission de vidéo
Transfer de données	Variable	Variable	Variable	Variable

FIG. 5.1 – Demandes de qualité de service multimedia

Dans le réseaux S&F, outre les composantes du délai présentes dans les réseaux traditionnels, il est nécessaire d’en ajouter une qui se produit lors d’un stockage de longue durée d’un message à l’intérieur d’un nœud intermédiaire. Ce stockage se produit lorsqu’il n’est pas possible d’envoyer le message sur un lien de sortie. En général, le délai de stockage varie et il peut même représenter, dans des certains systèmes, la majorité du délai de bout en bout.

- **Fiabilité.** La probabilité de perte des paquets sur une route est prise en compte par certains protocoles de routage (OSPF, EIGRP). C’est une métrique permettant d’associer un paramètre de pertes aux routes afin d’assurer un niveau acceptable de performance. Un paramètre de fiabilité pour des routes dans un réseaux S&F peut difficilement être établi de façon identique à cause des conditions de fonctionnement de ces systèmes.
- **Bande passante.** La bande passante maximale disponible. C’est une métrique concave dépendant de la valeur minimale des débits des liens

qui forment une route. Dans les réseaux S&F, cette notion se révèle peu efficace face à la non simultanée des liens. La bande passante d'une route n'est pas quantifiable dans des conditions de non simultanée des sauts.

Même si certains protocoles de routage peuvent utiliser plusieurs métriques dans le processus de calcul de routes ([24], [72]), la plupart d'entre eux sont fondés sur l'utilisation d'une seule (longueur de route) en utilisant un algorithme de calcul des chemins les plus courts.

Les méthodes employées pour le calcul de ces métriques dans les réseaux traditionnels sont fondées, la plupart du temps, sur des mécanismes d'échanges d'informations entre les composants du réseau. Ainsi, les métriques sont calculées quand ces messages arrivent à destination et leurs valeurs numériques sont renvoyées immédiatement à la source, en suivant parfois le même chemin de retour. D'une certaine manière, la communication simultanée entre ces éléments du réseau (origine, destination) dans les deux sens doit être garantie pour pouvoir prendre en compte les métriques utilisées, même si les routes qui les communiquent sont différentes les unes des autres.

La connectivité entre la source et la destination est toujours nécessaire dans tous les réseaux qui utilisent les mécanismes liés aux métriques des réseaux traditionnels (par exemple les *Mobile Ad-hoc Network* ou MANET). Dans le cas des communications S&F, cette connectivité est difficilement disponible et par conséquent les mécanismes qui demandent cette bidirectionnalité ne fonctionnent pas.

Utilité des métriques S&F

Étant données les particularités des réseaux S&F et leurs incompatibilités avec les mécanismes des réseaux traditionnels, il est nécessaire d'avoir un cadre de métriques permettant une caractérisation des routes S&F.

Dans cette perspective, nous avons pris comme base d'analyse le scénario décrit dans les chapitres précédents. Grâce à la connaissance de l'évolution de la topologie du réseaux, nous avons eu la possibilité de repérer les change-

ments des routes et de proposer des métriques nous permettant de mesurer l'amplitude de ces changements.

Tout comme dans les réseaux traditionnels, l'objectif des métriques S&F est de donner une référence au processus de routage pour arriver à une utilisation optimale des ressources.

5.2.2 Métriques pour les réseaux S&F

5.2.2.1 Définitions nécessaires pour expliquer les métriques

La définition des métriques S&F n'est possible qu'une fois les notions de base établies. Pour faire figurer une route nous employons une représentation graphique en temps et en espace (Figure 5.2).

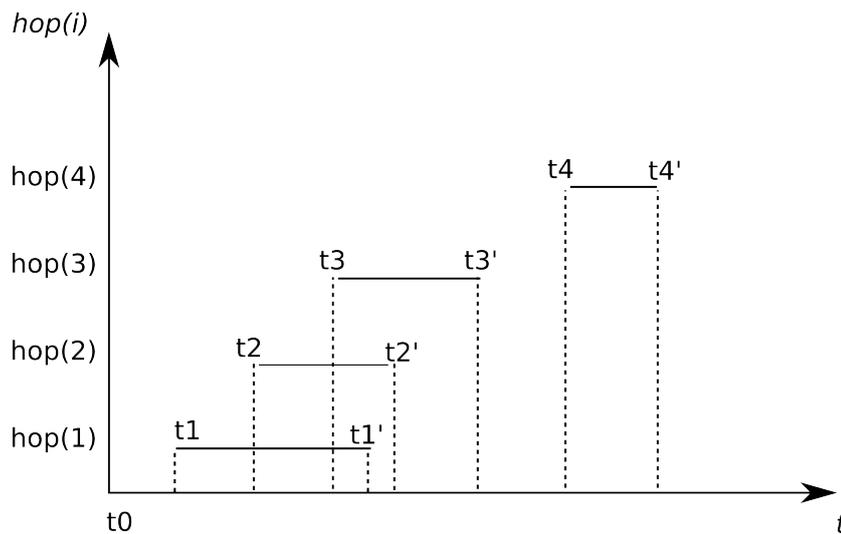


FIG. 5.2 – Un exemple de diagramme saut-temps.

Une **route** $R(0, n)$ entre une source (0) et une destination (n) est composée d'une séquence de **sauts** $h(i)$, $i : 1, \dots, n$.

Un **saut** $h(i)$ est le transfert d'un message depuis le nœud ($i - 1$) vers le nœud (i). L'existence d'un saut est définie par une fenêtre de temps associée (appelée fenêtre de saut) définie comme la période de temps $[t_i, t'_i]$. Nous supposons qu'il est possible d'effectuer la réception intégrale d'un message durant l'existence d'un saut $h(i)$.

Dans la Figure 5.2 nous montrons une route composée de quatre sauts sur un diagramme saut-temps. Les sauts $h(i)$ sont représentés sur l'axe vertical, le temps t sur l'axe horizontal. Le temps t_0 est un point de référence qui indiquerait l'instant à partir duquel la route calculée est disponible. t_1 est le temps à partir duquel la route peut être utilisée, donc $t_0 \leq t_1$. Cela se traduit par un temps de stockage à la source égal à $t_1 - t_0$. Dans la présentation du cadre de métriques, nous supposons que $t_1 - t_0 = 0$ et de ce fait nous n'incluons pas le facteur aléatoire ajouté par le comportement des usagers.

Dans la Figure 5.3 nous montrons deux routes incluant les délais de propagation associés au sauts. $h(i)$ est le saut pour aller au noeud i , p_i est le délai de propagation associé à ce saut. Dans le cas de la présence d'un délai de propagation p_i associé au saut $h(i)$, la fenêtre de temps de départ depuis le noeud $(i - 1)$ est $[t_i, t'_i]$, l'instant d'arrivée est donc compris dans la période $[t_i + p_i, t'_i + p_i]$. C'est-à-dire que la fenêtre de temps associée au saut reste intacte mais la présence d'un délai de propagation restreint les temps d'utilisation du lien. Sur la Figure 5.3(a) nous observons que $t'_2 < t'_1 + p_1$ et que $t_3 < t_2 + p_2$. Sur $h(1)$ et $h(3)$ les segments de temps entre t'_2 et $t'_1 + p_1$ et entre t_3 et $t_2 + p_2$ n'ont pas d'utilité dans la route puisque les sauts n'ont pas de causalité.

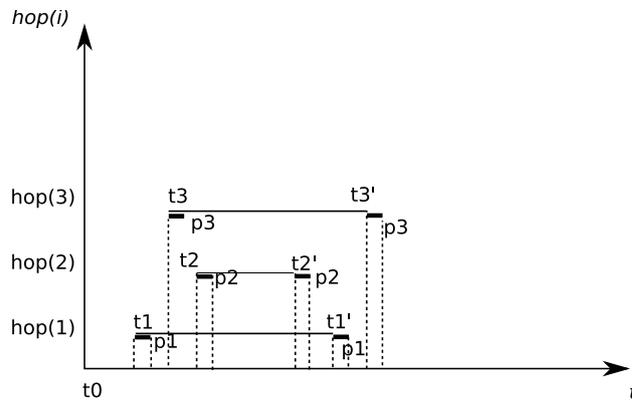
Pour la conservation de leur **causalité**, les $h(i) : i = 1, 2, \dots, n - 1$ appartenant à une route $R(0, n)$ doivent satisfaire les conditions suivantes :

1. $t'_i + p_i \leq t'_{i+1}$.
2. $t_i + p_i \leq t_{i+1}$.

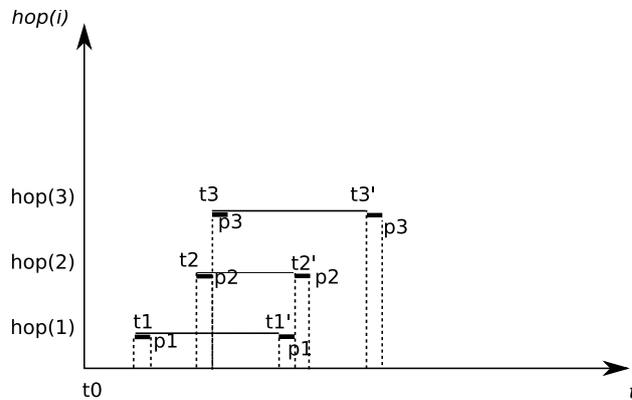
Les sauts de la route montrée sur la Figure 5.3(b) remplissent les conditions de causalité.

5.2.2.2 Métriques proposées

Mise apart la longueur de route (nombre de sauts), nous allons maintenant décrire six métriques applicables au routage dans un contexte S&F. Chacune d'entre elles est conçue pour mesurer une caractéristique particulière des routes S&F. Elles sont expliquées par des diagrammes saut contre temps et



(a) Route sans causalité.



(b) Route satisfaisant le principe de causalité.

FIG. 5.3 – Causalité d'une route. Sur 5.3(a) les conditions $t'_1 + p_1 > t'_2$ et $t_2 + p_2 > t_3$ sont contraires à la causalité. Sur 5.3(b) les fenêtres de sauts $h(1)$ et $h(3)$ sont modifiées pour satisfaire les conditions $t'_i + p_i \leq t'_{i+1}$ et $t_i + p_i \leq t_{i+1}$.

pour chacune d'elles une explication et une formalisation sont données. Les métriques proposées sont :

- Durée de vie.
- Délai de bout en bout.
- Capacité.
- Synchronisme.
- Simultanéité d'ordre k .
- Discontinuité.

Les métriques équivalentes aux trois premières dans un contexte de réseaux traditionnels ne sont pas directement applicables dans un contexte S&F et elles doivent être redéfinies pour que l'on puisse les utiliser. Les trois dernières découlent entièrement des caractéristiques des routes S&F.

La longueur de route (nombre de sauts, n) dans les réseaux S&F ne garde pas la même relation avec le délai de bout en bout que dans les réseaux traditionnels. Un incrément/décroissement du nombre de sauts composants une route ne signifie pas un incrément/décroissement du délai associé à une route. En revanche, la longueur de route ou le nombre de sauts est utilisé pour définir des autres métriques et pour les normaliser.

Durée de vie

La durée de vie d'une route est le laps de temps durant lequel une route entre deux nœuds peut être utilisée. Dans les réseaux traditionnels, les routes restent valables tant qu'elles ne sont pas interrompues.

Grâce aux mécanismes de stockage, dans les réseaux S&F l'interruption des liens ne signifie pas une perte de route. Un mécanisme de communication bidirectionnel et instantané entre la source et la destination n'est pas nécessaire pour qu'une route soit valable. Dans ces conditions, la durée de vie d'une route doit prendre en compte la possibilité de perte des liens sans la perte de route et rester compatible avec les conditions rencontrées dans les réseaux traditionnels.

Pour définir la durée de vie d'une route avec des caractéristiques S&F, il est nécessaire d'utiliser une référence en espace (i) et en temps (t). Le temps est la seule référence dans les réseaux traditionnels. Nous supposons une modélisation en temps discret et nous considérons une valeur constante pour le délai de propagation durant la durée de vie des routes.

Dans ces conditions, la durée de vie d'une route $RLF_i^t(R)$ est alors définie comme :

$$RLF_i^t(R) = t'_{i+1} - t \quad (5.1)$$

avec

$$t_i + p_i \leq t \leq t_{i+1}; i : 1 \dots n - 1$$

Dans la pratique la durée de vie d'une route est le laps de temps au cours duquel elle est utilisable. Pour cela il est nécessaire de spécifier la référence spatiale (le nœud). Dans la Figure 5.2, pour $i = 2$ et $t_2 < t_0 < t'_2$ la durée de vie est $RLF_2^{t_0}(R) = t'_3 - t_0$. La durée de vie d'une route, lorsque la route est dynamique, change en fonction des références spatio-temporelles utilisées. Elle ne peut pas être utilisée pour la caractérisation d'une route à moins qu'elle ne la comprenne complètement. De ce fait, pour décrire cette caractéristique, la durée de vie totale ou bien le temps de vie de bout en bout, doit être défini comme :

$$RLF_{DBB}(R) = t'_n - t_1 \quad (5.2)$$

La durée de vie de bout en bout est le laps de temps complet durant lequel la route est fonctionnelle. Dans la partie qui suit, nous nous référerons sauf indication contraire exclusivement à cette métrique ($RLF_{DBB}(R)$). Cette métrique présente une propriété particulière des routes S&F mais elle est utilisée principalement pour la normalisation des autres métriques.

Délai de bout en bout

Le délai de bout en bout (DBB) est le temps parcouru entre le départ depuis la source d'un message jusqu'à son arrivée à destination. Dans le travail que nous présentons, les points de référence considérés sont ceux des interfaces de la couche réseau et la couche supérieure, c'est-à-dire, que l'on a pris comme point de départ, le moment où le message est injecté dans la couche réseau pour son traitement.

Dans les réseaux S&F, le délai de bout en bout en plus des délais des réseaux classiques inclut le délai produit par le stockage longue durée. Ces événements ont lieu dans chaque nœud où il n'y a pas de continuité entre les liens d'entrée et de sortie. La durée de stockage résulte des conditions

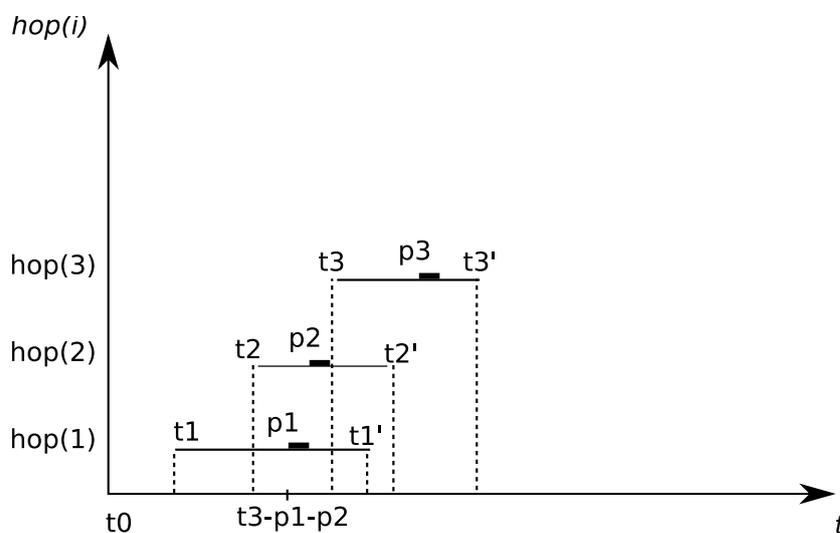


FIG. 5.4 – Une route où l’instant de génération à la source a un effet sur le délai de bout en bout. p_1 , p_2 et p_3 sont représentés par des segments de temps tels que $p_i \ll [t_i, t'_i]$.

du réseau au moment de l’émission du message. De ce fait le délai de bout en bout, qui dépend de la durée de stockage, va aussi dépendre du temps d’émission.

Dans la Figure 5.4 il est montré que le délai de bout en bout évolue en fonction de l’instant où un message est introduit dans la couche réseau pour son traitement. Nous considérons les délais de propagation $p_i \ll [t_i, t'_i]$. En considérant le temps de génération du message t compris entre $[t_1, t'_1]$ le délai de bout en bout est :

1. $t \in [t_1, t_3 - p_1 - p_2], t_1 < t_3 - p_1 - p_2$:
 - le délai de bout en bout **minimum** est $t_3 - t + p_3$ avec une période de stockage **minimum** totale de $t_3 - t - p_1 - p_2$;
 - le délai de bout en bout **maximum** est $t'_3 - t + p_3$ avec une période de stockage **maximum** totale de $t'_3 - t - p_1 - p_2$;
2. $t \in [t_3 - p_1 - p_2, t'_1], t'_1 > t_3 - p_1 - p_2$:
 - le délai de bout en bout **minimum** est $p_3 + (p_1 + p_2)$ sans aucune période de stockage ;

- le délai de bout en bout **maximum** est $t'_3 - t + p_3$ avec une durée de stockage **maximum** total de $t'_3 - t - p_1 - p_2$.

Le stockage longue durée utilisé pour surmonter le manque de connectivité entre les éléments du réseau est ce qui fait la différence des valeurs du délai de bout en bout entre un réseau traditionnel et un réseau S&F. En revanche, cette variation peut être déterminée en fonction des caractéristiques du réseau et elle peut être délimitée avec un intervalle de valeurs.

Le délai de bout en bout est défini comme :

$$DBB(R) \in [DBB^m(R), DBB^M(R)] \quad (5.3)$$

où :

$$DBB^m(R) = \begin{cases} p_1 + \dots + p_n & \text{si } t'_1 \geq t_n - (p_1 + \dots + p_{n-1}) \\ p_n + (t_n - t'_1) & \text{sinon} \end{cases}$$

$$DBB^M(R) = p_n + (t'_n - t_1)$$

L'intervalle de temps $[DBB^m(R), DBB^M(R)]$ est invariable et délimite les valeurs du délai de bout en bout associées à une route déterminée. Les variations dans l'intervalle dépendent fortement des variations des composantes du délai (transmission, propagation, stockage longue durée). En revanche, la totalité de l'intervalle dépend exclusivement des opportunités de contact (durée des sauts), notamment du dernier.

Capacité de routes

La capacité d'une route indique la quantité maximale d'informations qu'elle peut transporter pendant sa durée de vie. Cette métrique est une métrique concave, c'est-à-dire qu'elle est définie par la plus petite des valeurs de capacité de l'ensemble des liens.

Le produit du débit et du temps d'usage d'une route est l'équivalent de cette métrique dans les réseaux traditionnels. Grâce à l'existence simultanée des liens dans ces systèmes la capacité a une correspondance directe avec le

débit. C'est cette dernière métrique que nous utilisons le plus pour caractériser les routes.

Etant donnée l'absence de continuité et de simultanéité des liens qui composent une route S&F, il n'est pas possible d'utiliser le débit pour mesurer la capacité de transport. Un équivalent par extension (produit du débit et du temps d'usage) serait le produit des débits disponibles et du temps de vie d'une route mais ce temps de vie comprendrait aussi des temps de stockage.

Pour connaître la capacité de transport d'une route, il est nécessaire de considérer les capacités individuelles des liens qui la composent. La capacité d'un saut $h(i)$ qui fait partie d'une route R , $CAP_i(R)$, représente la quantité d'informations qui peut être transportée depuis un nœud $(i - 1)$ vers un nœud (i) pendant la période d'existence du saut $[t_i, t'_i]$. Cela correspond à la multiplication du débit par la durée d'utilisation du lien. Dans le cas d'un débit du saut variable et dépendant du temps $d_i(t)$, la capacité du lien devient alors $CAP_i(R) = \int_{t_i}^{t'_i} d_i(t) dt$.

La capacité de la route est alors définie comme la valeur minimale de la capacité des liens :

$$CAP(R) = \min(CAP_i(R)) ; i : 1 \dots n \quad (5.4)$$

A la différence du "contact volume" défini dans [59], cette métrique fait référence à une seule route et non à l'ensemble des routes appartenant à un système.

La capacité d'une route S&F détermine la quantité maximale d'informations qu'une route peut transporter (Voir la Figure 5.5). Elle est un indicateur de la mémoire que les nœuds intermédiaires nécessitent pour stocker les informations.

Synchronisme

Le synchronisme est une propriété associée à l'existence simultanée des sauts qui composent une route S&F. C'est une métrique qui permet de mesurer combien de temps une route S&F peut prendre en charge une transmission d'informations depuis la source jusqu'à la destination sans qu'il n'y ait besoin

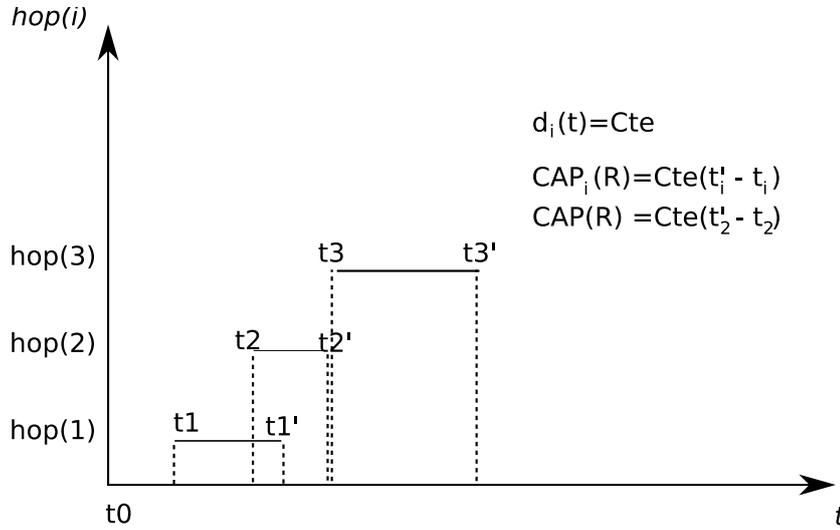


FIG. 5.5 – Capacité d'une route $CAP(R) = \min(CAP_i(R))$; $i : 1 \dots n$. En considérant un débit constant et égal pour tous les sauts $d_i(t)$, dans l'exemple, $CAP(R)$ est déterminée par $CAP_2(R)$.

de stocker longtemps les messages dans les nœuds intermédiaires. La présence du synchronisme signifie qu'une route S&F a les mêmes caractéristiques que la route d'un réseau traditionnel.

Les avantages de cet état sont :

- Les routes sont utilisables dans les deux sens. De ce fait si les délais de propagation et de transmission le permettent, des mécanismes de type conversationnel peuvent être mis en œuvre. Le nombre de transmissions bidirectionnelles possibles (r) dans une période $[t_n, t'_1]$ est :

$$r = \frac{(t'_1 - t_n)}{(2 * \sum_{i=1}^n p_i)}$$

- Les routes n'ont pas besoin de stockage pour surmonter le manque de connectivité entre la source et la destination.

Le synchronisme est défini comme :

$$SYN(R) = \frac{GTWO(R)}{RLF_{DBB}(R)} \quad (5.5)$$

avec $SYN(R) \in [0, 1]$.

$GTWO(R)$ est le laps de temps durant lequel les sauts sont simultanés pour tout saut $h(i)$, pour $i = 1, 2, \dots, n$

$$GTWO(R) = \begin{cases} t'_1 - (t_n - \sum_{j=1}^{n-1} p_j) & , \text{ si } t_n - \sum_{j=1}^{n-1} p_j < t'_1 \\ 0 & , \text{ autrement} \end{cases}$$

Dans la Figure 5.6, si on considère le délai de propagation p_i négligeable par rapport aux durées des sauts $[t_i, t'_i]$, le synchronisme est alors donné par :

$$SYN(R) = \frac{t'_1 - (t_3 - p_1 - p_2)}{t'_3 - t_1}$$

Si les délais de propagation existait pas (transfert instantané), le synchronisme est alors donné par :

$$SYN(R) = \frac{t'_1 - t_3}{t'_3 - t_1}$$

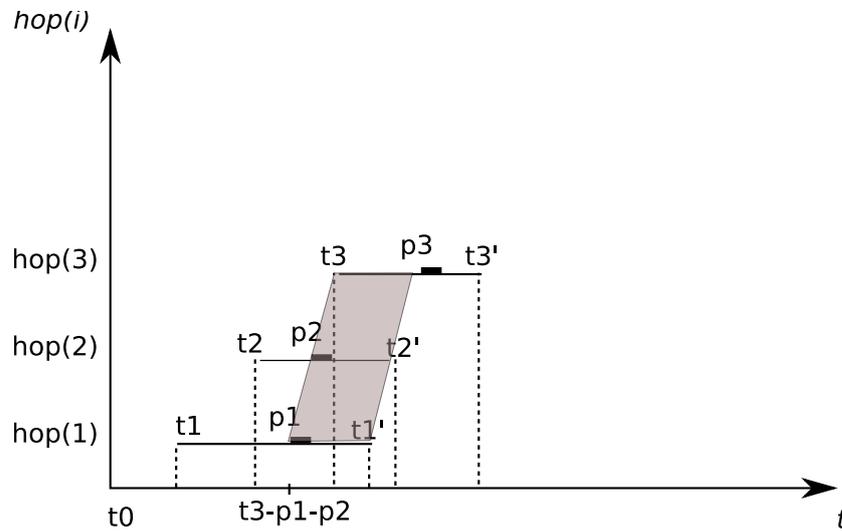


FIG. 5.6 – Synchronisme d'une route. Les sauts sont simultanément utilisables.

Les réseaux traditionnels ont un synchronisme égal à 1. Quand le synchronisme est différent de 1, la route n'est pas permanente.

Simultanéité

A la différence du synchronisme, la simultanéité est une métrique qui indique le pourcentage de temps durant lequel des sauts $h(i)$ successifs coïncident. Il est possible d'avoir plusieurs ordres de simultanéité en fonction du nombre de sauts qui coïncident. Pour une route quelconque la simultanéité d'ordre 2 ($SIM^2(R)$) est définie comme :

$$SIM^2(R) = \frac{\sum_{i=1}^{n-1} SIM_i^2(R)}{(n-1)RLF_{DBB}(R)} \quad (5.6)$$

avec $SIM^2(R) \in [0, 1]$.

$SIM_i^2(R)$ est la durée de chevauchement du saut $h(i)$ et le suivant consécutif.

$$SIM_i^2(R) = \begin{cases} t'_i - (t_{i+1} - p_i) & \text{si } t'_i > t_{i+1} - p_i \\ 0 & \text{autrement} \end{cases}$$

Dans les réseaux traditionnels la simultanéité d'une route est $SIM^2(R) = 1$ durant toute sa durée de vie.

La simultanéité d'ordre 2 permet de faire le transfert fiable deux sauts par deux sauts, ce qui est utile pour élargir l'application des fonctionnalités prévues dans le *Bundle Protocol* [19].

Dans l'exemple de la Figure 5.7 :

$$SIM_i^2(R) = t'_1 - t_2 + p_1 + t'_2 - t_3 + p_2$$

et

$$SIM^2(R) = \frac{t'_1 - t_2 + p_1 + t'_2 - t_3 + p_2}{(2)(t'_3 - t_1)}$$

Et dans le cas d'absence de délais de propagation :

$$SIM^2(R) = \frac{t'_1 - t_2 + t'_2 - t_3}{(2)(t'_3 - t_1)}$$

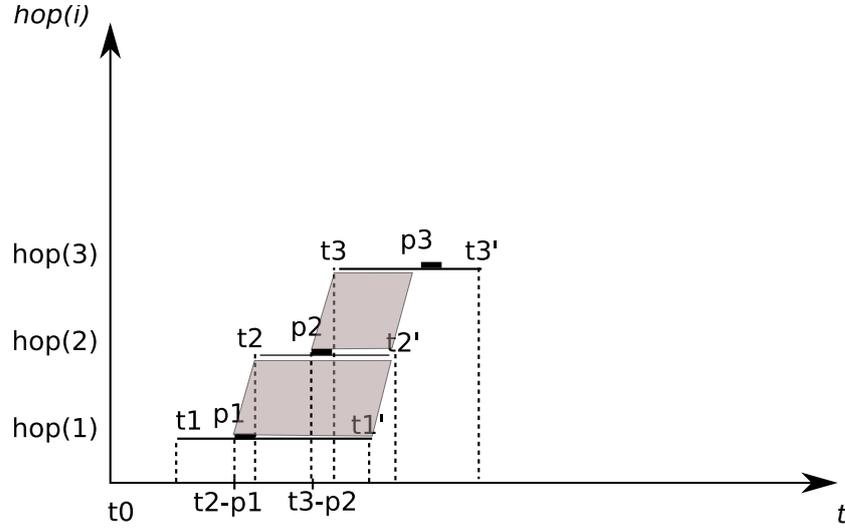


FIG. 5.7 – Simultanéité d'ordre 2 d'une route. Les sauts consécutifs sont simultanément utilisables.

La simultanéité d'un ordre arbitraire $k \in [3, n]$ suit le même principe. Elle indique la capacité d'une route à favoriser l'utilisation des k sauts en même temps sans stocker les informations dans les nœuds intermédiaires. La simultanéité d'ordre k , $SIM^k(R)$ est définie comme :

$$SIM^k(R) = \frac{\sum_{i=1}^{n-(k-1)} SIM_i^k(R)}{(n - (k - 1))RLF_{DBB}(R)} \quad (5.7)$$

avec $2 \leq k \leq n$ et $SIM^k(R) \in [0, 1]$.

$SIM_i^k(R)$ est la durée de chevauchement pour les k sauts à partir du saut i .

$$SIM_i^k(R) = \begin{cases} t'_i - (t_{i+(k-1)} - \sum_{j=0}^{k-2} p_{i+j}) & \text{si } t'_i > t_{i+(k-1)} - \\ & \sum_{j=0}^{k-2} p_{i+j} \\ 0 & \text{autrement} \end{cases}$$

Dans l'exemple de la Figure 5.8, avec $k = 3$ (ordre de simultanéité) :

$$SIM_1^3(R) = t'_1 - t_3 + p_1 + p_2 + t'_2 - t_4 + p_2 + p_3$$

et donc la valeur de la simultanété d'ordre 3 est :

$$SIM^2(R) = \frac{t'_1 - t_3 + p_1 + p_2 + t'_2 - t_4 + p_2 + p_3}{(2)(t'_4 - t_1)}$$

Et dans le cas d'absence de délais de propagation :

$$SIM^2(R) = \frac{t'_1 - t_3 + t'_2 - t_4}{(2)(t'_4 - t_1)}$$

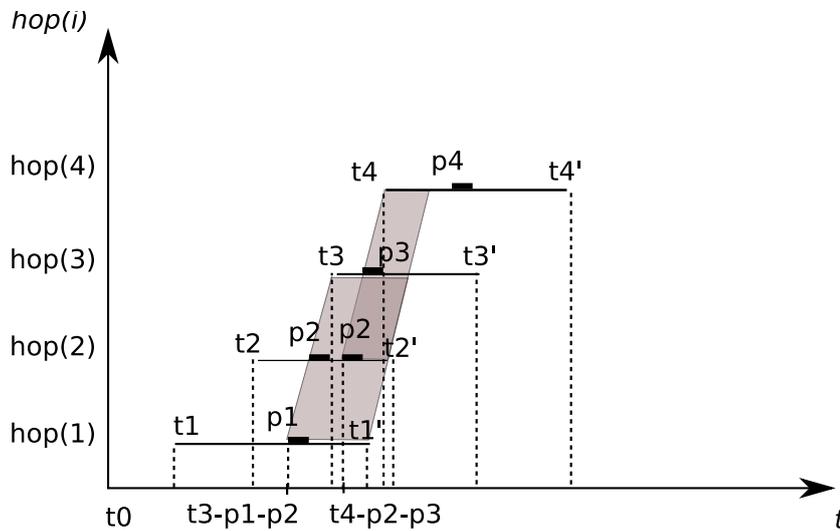


FIG. 5.8 – Simultanété d'ordre k d'une route. Les k sauts consécutifs sont simultanément utilisables. La simultanété d'ordre 3 est montrée dans l'exemple.

Le transfert fiable de messages avec accusé réception (acquiescement) bénéficie directement du degré de simultanété. Lorsqu'il existe une séquence de sauts permettant l'utilisation d'acquiescements, le transfert fiable de messages peut être mis en place.

Lors de chaque séquence de sauts simultanés, il y a un processus de transmission/réception de message accompagné de l'envoi d'un acquiescement et d'une période de stockage dans le dernier nœud. Ce processus n'est fait qu'une seule fois pour tous les sauts simultanés.

En revanche, l'existence d'un haut degré de simultanéité rend plus probable la perte de connexion puisque les probabilités de perte individuelles sont additionnées.

Discontinuité

La discontinuité mesure le laps de temps durant lequel il n'y a pas de sauts utilisables dans une route.

Cette métrique indique le temps minimum de stockage longue durée. Le temps maximum de stockage longue durée est déterminé par les variations des caractéristiques de la route pendant toute sa durée de vie (variation de trafic, congestion de routes, files d'attente, etc.). De la même façon que les autres métriques, la simultanéité est normalisée avec la durée de vie de la route.

La Figure 5.9 montre les conditions dans lesquelles un stockage longue durée est réalisé en fonction de la discontinuité (le délai de propagation étant pris comme valeur constante) : saut entièrement disjoint et saut partiellement disjoint.

Soit t_d l'instant où un message demande l'utilisation de la route sur le saut i ($t_d < t'_i + p_i$).

Dans le cas de la Figure 5.9(a) le temps de stockage est :

$$(t_{i+1} - t'_i + p_i) + (t'_i - t_d)$$

le premier membre de l'addition est le stockage longue durée obligatoire est lié directement à la discontinuité.

Dans le cas de la Figure 5.9(b) le temps de stockage est :

$$(t_{i+1} + p_i - t_d) \text{ si } t_d < t_{i+1} - p_i$$

ou

$$p_i \text{ si } t_d \geq t_{i+1} - p_i$$

sans aucune contribution du stockage d   à la discontinuité.

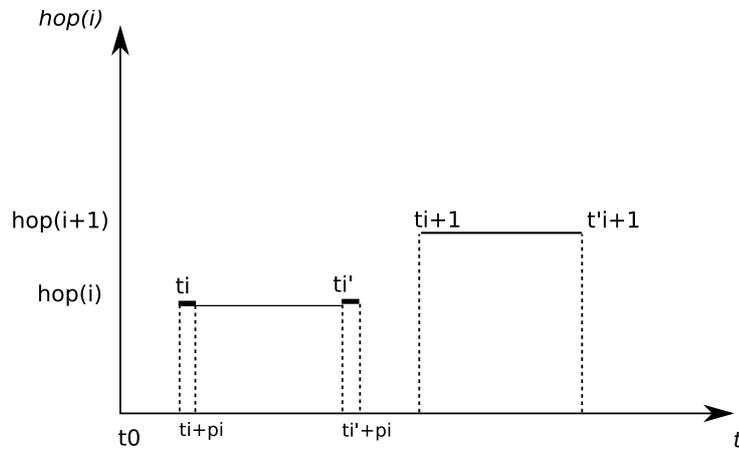
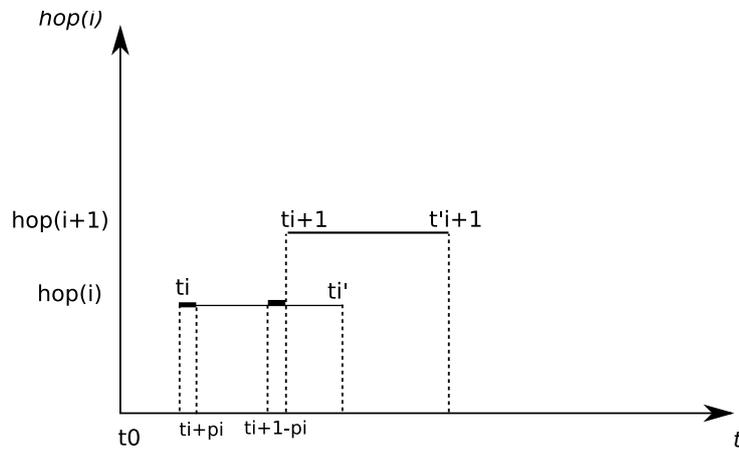
(a) Saut entièrement disjoint : $t_i + p_i < t_{i+1}$ et $t'_i + p_i < t_{i+1}$ (b) Saut partiellement disjoint : $t_i + p_i < t_{i+1}$

FIG. 5.9 – Sauts entièrement et partiellement disjoints.

De la même façon que dans le délai de bout en bout, le délai attribué au stockage longue durée dépend du temps.

Dans les exemples de la Figure 5.9 il est supposé que le comportement du réseau ne génère pas d'autres durées de stockage (causées par la variation du trafic et/ou des files d'attente par exemple).

Les discontinuités minimale et maximale sont définies de la façon suivante :

$$DSC^m(R) = \frac{\sum_{i=1}^{n-1} MSTO_i^m(R)}{RLF_{DBB}(R)} \quad (5.8)$$

où $MSTO_i^m(R)$ représente la période de temps minimale avant de prendre le saut $h(i+1)$. Cela représente au même temps la période de temps associé au stockage minimale forcé avant de prendre le saut $h(i+1)$ (absence de $h(i+1)$) :

$$MSTO_i^m(R) = \begin{cases} t_{i+1} - (t'_i + p_i) & \text{si } t'_i + p_i < t_{i+1} \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$$

$$DSC^M(R) = \frac{\sum_{i=1}^{n-1} MSTO_i^M(R)}{RLF_{DBB}(R)} \quad (5.9)$$

où $MSTO_i^M(R)$ représente la période maximale de temps avant de prendre le saut $h(i+1)$. Cela inclut le temps d'attente possible sur le noeud i .

Dans l'exemple de la Figure 5.9(a) :

$$MSTO_i^m(R) = t_{i+1} - (t'_i + p_i)$$

et

$$MSTO_i^M(R) = t_{i+1} - (t_i + p_i)$$

La discontinuité est donc

$$DSC^m(R) = \frac{t_{i+1} - (t'_i + p_i)}{t'_{i+1} - t_i} \quad (5.10)$$

et

$$DSC^M(R) = \frac{t_{i+1} - (t_i + p_i)}{t'_{i+1} - t_i}$$

Dans les réseaux traditionnels, grâce à la simultanéité des sauts, toutes les routes ont $DSC_{m,M}(R) = 0$. Dans les réseaux S&F, le temps de stockage (mémoire) peut être optimisé en minimisant la discontinuité de la route $DSC^m(R)$.

5.2.3 Relations entre le Synchronisme, la Discontinuité et la Simultanéité

L'utilisation des métriques proposées dépendra des objectifs à atteindre pendant le processus de routage dans un contexte S&F. Les trois premières métriques (Durée de vie, Délai de bout en bout et Capacité) peuvent être utilisées de façon similaire dans les réseaux traditionnels et dans les réseaux S&F. En revanche, les trois dernières (Synchronisme, la Discontinuité et Simultanéité) n'ont que les réseaux S&F comme domaine d'application.

Etant donné que le routage dans les réseaux S&F n'a pas été étudié en détail, les contributions associées sont seulement fondées sur les principes et les propriétés présentes dans les réseaux classiques. Les métriques S&F ouvrent une nouvelle voie de recherche d'applications et de techniques de routage.

Dans un premier temps, nous présenterons les relations entre ces métriques. Dans un second temps, nous exposerons les services qui s'appuieraient potentiellement sur elles.

Les relations entre les métriques sont décrites dans la Table 5.1.

En fonction du degré de connectivité, les routes peuvent être classées en quatre catégories :

- Entièrement connectées. Les routes ne nécessitent aucun type de stockage longue durée. La réception/transmission est faite le plus rapidement possible (cas des réseaux traditionnels) puisque $SYN(R) = 1$ et les routes peuvent être bidirectionnelles si les contraintes du délai de propagation le permettent (Figure 5.10(a)).
- Partiellement connectées. Les routes emploient le stockage longue durée en fonction du temps de génération du message t_d : $SYN(R) > 0$, $SIM^2(R) > 0$, $DSC^m(R) = 0$ (Figure 5.10(b)).
- Partiellement déconnectées. Les routes ne demandent de stockage que dans certains sauts : $SYN(R) = 0$, $SIM^2(R) > 0$, $DSC^m(R) > 0$ (Figure 5.10(c)).

TAB. 5.1 – Relations entre synchronisme, discontinuité et simultanété

$SYN(R) = 0$	$\Rightarrow SIM^2(R) \in [0, 1[$ $\Rightarrow DSC^m(R) \in [0, 1[$ $\Rightarrow DSC^M(R) \in]0, 1[$
$SYN(R) = 1$	$\Rightarrow SIM^2(R) = 1$ $\Rightarrow DSC_{m,M}(R) = 0$
$SIM^2(R) = 0$	$\Rightarrow DSC^m(R) \in]0, 1[$ $\Rightarrow DSC^M(R) \in]0, 1[$ $\Rightarrow SYN(R) = 0$
$SIM^2(R) = 1$	$\Rightarrow DSC_{m,M}(R) = 0$ $\Rightarrow SYN(R) = 1$
$DSC^m(R) = 0$	$\Rightarrow SYN(R) \in [0, 1]$ $\Rightarrow DSC^M(R) \in [0, 1[$ $\Rightarrow SIM^2(R) \in]0, 1]$
$DSC^M(R) = 0$	$\Rightarrow SYN(R) = 1$ $\Rightarrow DSC^m(R) = 0$ $\Rightarrow SIM^2(R) = 1$
$DSC^m(R) \rightarrow 1$	$\Rightarrow SYN(R) = 0$ $\Rightarrow DSC^M(R) \rightarrow 1$ $\Rightarrow SIM^2(R) \rightarrow 0$
$DSC^M(R) \rightarrow 1$	$\Rightarrow SYN(R) = 0$ $\Rightarrow DSC^m(R) \in]0, 1[$ $\Rightarrow SIM^2(R) \rightarrow 0$

- Entièrement déconnectées. Les routes emploient le stockage longue durée dans chacun des sauts : $SYN(R) = 0$, $SIM^2(R) = 0$ (Figure 5.10(d)).

5.3 Non dépendance des métriques

Les métriques proposées sont d'une grande utilité dans la mesure où chacune peut représenter une propriété particulière associée aux routes. Ainsi lors de la définition d'une politique de routage, chaque métrique a une contribution précise dans les fonctions qui la gèrent. De ce fait il est avantageux d'utiliser des métriques qui ne soient pas dépendantes les unes des autres.

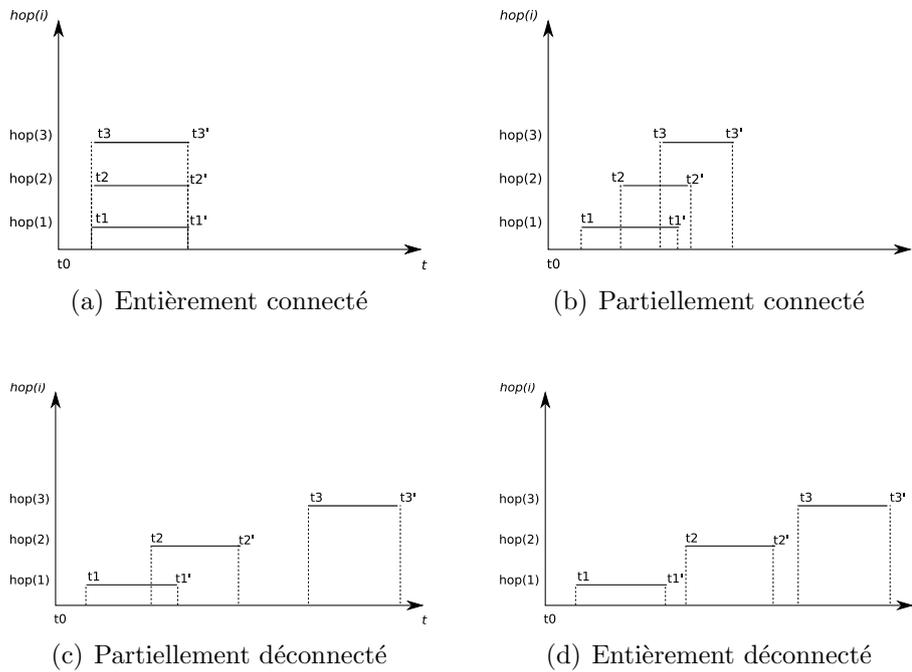


FIG. 5.10 – Routes selon le degré de connectivité : entièrement connectée, partiellement connectée, partiellement déconnectée, entièrement déconnectée. Le délai de propagation est considéré négligeable p_i par rapport à $[t_i, t'_i]$.

Ainsi ce sont les caractéristiques particulières à chaque métrique qui contrôleront les critères de cheminement.

Afin de prouver la non corrélation entre les métriques proposées nous avons réalisé une étude sur la constellation des satellites S&F. Nous nous sommes servis de l'outil de calcul des routes en ajoutant des modifications afin d'observer le comportement du système en fonction des métriques particulières. Ainsi la politique de calcul et de sélection des routes a été faite en fonction de chacune des métriques. L'analyse de corrélation a été faite à partir du calcul du coefficient de corrélation linéaire.

$$\rho = \frac{\sigma_{XY}}{\sigma_X \sigma_Y}$$

où $\sigma_{XY} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})$ est la covariance des deux variables et σ_X, σ_Y sont les écarts type.

Nous allons donc tour à tour prendre chacune des métriques et faire l'optimisation des routes sur cette métrique. Pour chacune de routes ainsi calculées, nous regarderons les valeurs des autres métriques. Cela permettra de déduire la corrélation linéaire entre les différentes métriques. Les corrélations sont faites, chaque fois, entre les métriques d'un ensemble de routes. L'ensemble de routes est choisi en fonction d'un critère (une métrique) : les routes depuis n GW (sources) vers n GW (destinations) affichant le minimum DBD_m , le Synchronisme le plus grand, etc.

Les liens entre les métriques peuvent être représentés par une matrice de corrélation C dont les éléments $c_{i,j}$ ($\rho_{i,j}$) sont les coefficients de corrélation entre les métriques i et j . C est une matrice symétrique telle que :

- $c_{i,j} = c_{j,i} \in [-1, 1]$ pour tout $i \neq j$, et
- $c_{i,i} = 1$ pour tout i

La dépendance linéaire des métriques les unes par rapport aux autres se mesure par la valeur des termes $c_{i,j}$. Une valeur de 0 indique la non corrélation linéaire tandis que les valeurs de -1 ou 1 indiquent la dépendance complète. Le signe indique une corrélation positive ou négative entre les deux métriques (i et j). Cette matrice permet de mesurer la corrélation entre les variables.

Les conditions pour cette étude sont :

- **Le scénario** est composé d'une constellation S&F de satellites. 36 passerelles (GW) sont réparties sur l'ensemble de la zone de service, elles sont identifiées par leurs coordonnées géographiques. Les satellites interconnectent les GW en relayant leurs messages. On utilise une politique de routage pré-calculée par la source. Pour les objectifs de cette étude (la non dépendance des métriques), nous avons limité la taille de l'arbre en fonction de la longueur de route (longueur maximale = 4).
- **L'algorithme** construit un arbre avec des sauts (arbre de routes). Chaque segment représente un saut possible vers un nœud et donc une route possible. L'algorithme n'utilise aucune heuristique pour simplifier les calculs de routes ou la taille de l'arbre. A la différence de l'algorithme montré dans le chapitre précédent nous utilisons d'une structure de pile pour additionner des branches (construction en profondeur). Cela permet de définir entièrement les routes déjà construites avant de passer à

la construction des nouvelles. Dans ces conditions, les routes qui ne sont plus nécessaires sont effacées de l'arbre en ne stockant que les branches utiles. De ce fait, la mémoire n'est pas encombrée par de routes inutiles. Cependant, l'exploration de toutes les possibilités augmente de façon significative le temps de calcul (même si les routes sont courtes).

- Toutes **les simulations** sont faites dans les mêmes conditions. Le critère d'optimisation utilisé pour le calcul des routes est la seule différence entre elles. Dans chaque cas, les routes sont calculées en fonction d'un paramètre d'optimisation parmi toutes les métriques considérées : délai de bout en bout, durée de vie, capacité, synchronisme, discontinuité et simultanéité.

Lors de chaque simulation, le calcul des routes optimales (depuis une source vers toutes les destinations) est réalisé par chacune des GW. Les liens entre les métriques sont montrés par les matrices de corrélation suivantes. Chacune d'elles représente les relations entre les métriques par critère d'optimisation. Les degrés de corrélation montrent la dépendance ou non dépendance linéaire des métriques.

Une description individuelle des matrices de corrélation est effectuée dans la suite par critère d'optimisation. L'absence de l'indice 1 indique la non corrélation entre les variables considérées. Les liens qui existent entre les variables (indice $\neq 0$) sont expliqués par les conditions particulières générées par les critères d'optimisation. La non répétition de ces liens sur toutes les matrices de corrélation montre que l'origine de ces liens est autre que la corrélation des variables.

1. Délai de bout en bout inférieur ($DBB^m(R)$). L'optimisation sur le délai de bout en bout inférieur (minimisation) ne montre aucune métrique corrélée.
2. Durée de vie. La durée de vie est équivalente au délai de bout en bout supérieur ($DBB^M(R)$). L'optimisation sur le délai de bout en bout supérieur (minimisation) montre un lien apparent entre la capacité et le synchronisme des routes. Quand les routes affichent une durée de vie très courte elles ont une tendance à être synchrones. L'augmentation ou variation du synchronisme correspond aussi à une variation similaire

	L	D_min	D_Max	Cap	Sync	Dis	Sim
L	1,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
D_min	0,000	1,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,012
D_Max	0,000	0,000	1,000	0,000	0,000	0,000	0,021
Cap	0,000	0,000	0,000	1,000	0,039	0,000	0,000
Sync	0,000	0,000	0,000	0,039	1,000	0,000	0,000
Dis	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	1,000	0,003
Sim	0,000	0,012	0,021	0,000	0,000	0,003	1,000

(a) Routes optimisées sur la minimisation du délai de bout en bout inférieur (d, d')

	L	D_min	D_Max	Cap	Sync	Dis	Sim
L	1,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
D_min	0,000	1,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
D_Max	0,000	0,000	1,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Cap	0,000	0,000	0,000	1,000	0,579	0,000	0,000
Sync	0,000	0,000	0,000	0,579	1,000	0,000	0,000
Dis	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	1,000	0,000
Sim	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	1,000

(b) Routes optimisées sur la minimisation du délai de bout en bout supérieur (d, d')

	L	D_min	D_Max	Cap	Sync	Dis	Sim
L	1,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
D_min	0,000	1,000	0,000	0,188	0,000	0,000	0,000
D_Max	0,000	0,000	1,000	0,154	0,000	0,000	0,001
Cap	0,000	0,188	0,154	1,000	0,000	0,696	0,003
Sync	0,000	0,000	0,000	0,000	1,000	0,000	0,000
Dis	0,000	0,000	0,000	0,696	0,000	1,000	0,004
Sim	0,000	0,000	0,001	0,003	0,000	0,004	1,000

(c) Routes optimisées sur la maximisation de la capacité

	L	D_min	D_Max	Cap	Sync	Dis	Sim
L	1,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
D_min	0,000	1,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
D_Max	0,000	0,000	1,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Cap	0,000	0,000	0,000	1,000	0,000	0,000	0,000
Sync	0,000	0,000	0,000	0,000	1,000	0,000	0,000
Dis	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	1,000	0,000
Sim	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	1,000

(d) Routes optimisées sur la maximisation du synchronisme

	L	D_min	D_Max	Cap	Sync	Dis	Sim
L	1,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
D_min	0,000	1,000	0,000	0,000	0,492	0,000	0,000
D_Max	0,000	0,000	1,000	0,000	0,429	0,000	0,000
Cap	0,000	0,000	0,000	1,000	0,002	0,000	0,007
Sync	0,000	0,492	0,429	0,002	1,000	0,000	0,000
Dis	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	1,000	0,000
Sim	0,000	0,000	0,000	0,007	0,000	0,000	1,000

(e) Routes optimisées sur la minimisation de la discontinuité

	L	D_min	D_Max	Cap	Sync	Dis	Sim
L	1,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
D_min	0,000	1,000	0,000	0,000	0,492	0,000	0,223
D_Max	0,000	0,000	1,000	0,000	0,000	0,000	0,169
Cap	0,000	0,000	0,000	1,000	0,085	0,000	0,000
Sync	0,000	0,492	0,000	0,085	1,000	0,000	0,000
Dis	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	1,000	0,000
Sim	0,000	0,223	0,169	0,000	0,000	0,000	1,000

(f) Routes optimisées sur la maximisation de la simultanéité

FIG. 5.11 – Matrices de corrélation pour les métriques de routage S&F : longueur de route (L), délai de bout en bout minimum (D_min), délai de bout en bout maximum (D_Max), capacité (Cap), synchronisme (Sync), discontinuité (D)

de la capacité. C'est la raison pour laquelle la dépendance linéaire des métriques (capacité et synchronisme) est écartée.

3. Capacité. Les routes optimisées sur la capacité montrent un lien entre la capacité et la discontinuité. Cela s'explique en raison des types des sauts qui composeront ce type de routes : les sauts avec la période de contact la plus longue. Pour trouver les meilleures routes il est nécessaire d'attendre les sauts avec la plus grande capacité. Cela entraîne l'apparition de périodes de stockage sur les nœuds. Ces périodes de stockage surviennent pendant des périodes de temps où il n'y a pas de sauts disponibles et donc où la discontinuité est présente. C'est ainsi que les routes avec la plus grande capacité affichent des valeurs de discontinuité importantes mais qui ne sont pas liées directement avec la capacité.
4. Synchronisme. Aucun indice n'est différent de zéro et donc aucune lien entre les métriques est présent.
5. Discontinuité. Pour minimiser la discontinuité les routes ont besoin de sauts séquentiels avec le minimum de temps d'attente entre eux. La non interruption de la transmission entre les sauts implique une diminution du temps de stockage forcé (causé par l'inexistence de sauts). Le délai de bout en bout sera influencé par la suppression de ces périodes de temps.
6. Simultanéité. Les liens qui apparemment existent entre le synchronisme et le délai de bout en bout minimum quand la simultanéité est prise comme critère d'optimisation sont une conséquence de la longueur de la route considérée. Pour obtenir une haute simultanéité les sauts séquentiels doivent avoir une longue période de coïncidence temporelle. Les routes sont construites avec des sauts qui sont plus immédiats dans le temps. Comme conséquence le dernier saut des routes sera proche du temps de début de la route. Il y aura des routes qui afficheront un haut niveau de synchronisme à cause de la longueur de route utilisée. En effet, parmi les routes avec une longueur maximale de 4 et optimisées sur la simultanéité de degré 2, certaines auront un grand synchronisme.

5.4 Conclusion

Les politiques de routage utilisées dans les réseaux traditionnels sont fondées sur des métriques tels que le délai, le nombre de sauts, la gigue ... Ces métriques sont, parfois, obtenues par des mécanismes interactifs fonctionnant entre les nœuds d'une route. De plus, ces métriques dépendent des contraintes des milieux dans lesquels elles évoluent. Il s'agit le plus souvent des réseaux à délai court et à pertes faibles.

Dans les réseaux S&F, ces métriques ne peuvent pas être appliquées dans les mêmes conditions, en particulier celles qui sont fondées sur des mécanismes conversationnels entre les nœuds. En effet à cause des pertes fréquentes de communication entre les nœuds qui forment les routes, l'existence d'une route avec des sauts simultanés est rare. De ce fait les métriques traditionnelles ne peuvent s'utiliser dans des réseaux S&F. Les résultats obtenus par leur utilisation sur ces systèmes ne sont pas adaptés à ces réseaux. C'est pour cela que nous proposons d'autres métriques qui sont plus adaptées pour le routage dans les systèmes S&F.

Les métriques présentées dans ce chapitre prennent en compte des caractéristiques des réseaux S&F : manque de communication permanente entre les liens, discontinuité de sauts, synchronisme des sauts, temps de stockage et temps de latence qui sont traduits en délais de bout en bout. Elles sont orientées vers l'optimisation des ressources et l'amélioration de la performance du système vis à vis des besoins des services prévus. Chaque métrique a la faculté de mesurer une caractéristique particulière des routes. Cette capacité est essentielle dans la mesure où les métriques peuvent être utilisées séparément pour la définition des politiques de routage.

Chapitre 6

Utilisation des métriques pour le routage Store and Forward sur une constellation de satellites.

6.1 Introduction

Contents

6.1	Introduction	119
6.2	Utilité des métriques pour le routage S&F	121
6.3	Manière d'utiliser les métriques	123
6.4	Application des métriques	125
6.5	Résultats	131
6.6	Conclusions	132

Les services qui peuvent potentiellement être fournis par les systèmes *Store and Forward* (S&F) sont limités par les conditions propres à l'environnement du système et aux équipements. Par exemple, dans les réseaux mobiles, ces limites peuvent être, outre les interruptions de lien de communication, la capacité de stockage et l'autonomie énergétique des équipements.

La politique de routage dans les réseaux S&F doit prendre en compte le plus grand nombre de paramètres possible pour pouvoir s'adapter au mieux au système dans lequel elle s'applique. Ainsi la politique de routage devra répondre aux caractéristiques des services pour les besoins auxquels elle est destinée. Les systèmes S&F, en général, sont des systèmes dans lesquels les ressources (matérielles et logicielles) sont précieuses dans la mesure où elles sont peu nombreuses. Cette gestion des ressources est encore plus importante lorsqu'il s'agit, comme c'est le cas ici, des systèmes de communications par satellite. Après leur installation (longue et complexe), la quantité de ressources disponibles est fixe. Dans ces conditions, il est important de maintenir une efficacité maximale dans l'utilisation des ressources.

Dans le réseau Internet peu de protocoles de routage prennent en compte les aspects de qualité de service ou QoS. Dans le réseau S&F généré par le système de satellites les paramètres de performance doivent de préférence être pris en compte dès la conception des politiques de routage.

Pour déterminer les demandes particulières, en terme de routage, d'un service il faut prendre en compte principalement deux facteurs :

1. Les conditions qui entoureront le système une fois qu'il est mis en fonctionnement. Ces conditions déterminent la façon dont la topologie évolue.
2. Les besoins précis des services fournis par le système. Ils sont définis d'une part par les demandes des utilisateurs et, d'autre part, par les limitations imposées par la nature S&F du système.

Le lien entre les deux se fait par l'intermédiaire des métriques proposées. En effet, elles peuvent d'un côté représenter les caractéristiques et les besoins des services et de l'autre elles permettent de mesurer les routes.

La variété des métriques conçues pour le routage S&F permet la caractérisation des services associés à ces systèmes en fonction de leurs besoins. Leurs combinaisons sont faites en fonction des intérêts des utilisateurs (besoins) et de l'opérateur (quantité de ressources utilisées pour satisfaire les besoins).

Les métriques S&F permettent aussi la mise en place de mécanismes améliorant l'efficacité des processus de calcul. Cela entraîne la mise en place

d'heuristiques pour simplifier le calcul de routes. Elles utilisent les métriques (de façon individuelle ou combinée) pour simplifier et optimiser le processus de calcul de route.

Dans ce chapitre nous exposerons les avantages apportés par l'application des métriques S&F en fonction des services offerts dans le cadre d'un système de communication par satellites. L'approche multi-métrique pour le calcul des routes dans le contexte S&F sera analysé de même que les critères utilisés pour l'application des métriques. Nous montrerons l'intérêt d'utiliser des métriques adaptées aux systèmes S&F pour dimensionner la performance des processus de calcul de route et en même temps pour mesurer la bonne gestion des ressources disponibles. L'objectif de l'application des métriques est l'adaptation maximale des politiques de routage aux conditions propres au système.

6.2 Utilité des métriques pour le routage S&F

Dans un contexte de routage traditionnel ce qui est pris en compte c'est l'évolution temporelle des métriques telles que le *nombre de sauts*, le *délai*, la *variation du délai*, le *débit*, le *taux de perte*. Dans la théorie, les fonctions qui sélectionnent les routes peuvent combiner plusieurs métriques [25]. Dans la pratique, il est plus simple d'implanter des fonctions avec un seul critère face à la complexité qu'un calcul multi-métrique peut représenter pour les nœuds (*routeurs*) durant le routage.

Pour remplir les critères de qualité de service dans les réseaux traditionnels on utilise des mécanismes sur plusieurs couches : liaison données [94], réseau [87], [9] ou transport [8]. Les méthodes pour mesurer les caractéristiques de performance des réseaux traditionnels ne peuvent pas être appliquées dans un contexte S&F. Les mécanismes utilisés dans les réseaux traditionnels doivent prendre en compte la simultanéité permanente des liens composant les routes. De ce fait il faut concevoir des paramètres qui répondent aux conditions des systèmes S&F : manque de connectivité et grand délai dû au stockage. Les critères utilisés dans les réseaux traditionnels res-

tent valables lorsque les conditions de fonctionnement des systèmes S&F sont les mêmes (durant les périodes de synchronisme de liens par exemple).

6.2.1 Avantages

Nous avons vu dans Chapitre 4 une politique de routage optimisant uniquement le délai de bout en bout (les routes les plus rapides). En revanche, la réduction des délais n'implique pas l'utilisation optimale des ressources de stockage du système. De plus, les réseaux S&F sont des systèmes tolérants aux longs délais de sorte que la réduction de ces délais importe peu pour la plupart de services associés, contrairement aux réseaux traditionnels.

La prise en compte de facteurs autres que le délai (souvent pris comme métrique de base [59], [82], [64]) améliore la performance globale des systèmes S&F. Pour obtenir la meilleure utilisation des ressources du système pour d'autres services pour lesquels le délai n'est pas un facteur déterminant, les critères définissant les politiques de routage doivent reposer sur les critères qui leur sont essentiels (par exemple la fiabilité ou la capacité). En fonction de ces critères, les métriques prennent individuellement une certaine importance et définissent différentes politiques de routage. Ces dernières doivent aussi être adaptées par l'opérateur du réseau en fonction des ressources dont il dispose pour les exécuter.

Les routes obtenues grâce à l'application de ces métriques sont complètement adaptées aux conditions et aux besoins des systèmes S&F.

6.2.2 Qualité de service, classe de service

Dans les réseaux traditionnels, le routage est généralement fait avec une approche *best-effort*. De ce fait la notion de qualité de service (*QoS*) est utilisée lorsqu'il est nécessaire de garantir un certain niveau de performance.

En ce qui concerne le routage, les deux mécanismes les plus connus définis par l'IETF pour inclure la notion de QoS sont le modèle *DiffServ* et le modèle *IntServ*. Avec le premier, le trafic est classifié au travers d'un code inclus dans chaque paquet IP, chaque classe de trafic est traitée différemment.

Avec le deuxième, les ressources des nœuds intermédiaires destinées au routage de chaque flux individuel sont réservées par chaque flux. En général, l'implantation de la QoS dans le routage consiste à contrôler la totalité du trajet emprunté par les données. Ce contrôle est fait avec le traitement des paquets : classification de paquets, prévision de ressources pour les paquets et transmission programmée de paquets.

Des mécanismes établis pour garantir un certain niveau de qualité de service peuvent être adaptés aussi dans d'autres couches. Tel est le cas des mécanismes conçus pour le standard IEEE 802.1Q [94] qui permettent de différencier les files d'attente en fonction des types de trafic.

Dans les réseaux S&F des mécanismes similaires à ceux des réseaux traditionnels pourraient être mis en place, si les différences existant entre les deux réseaux telles que les différentes échelles de temps pouvaient être prises en compte : les mécanismes de contrôle de transmission (ordonnancement, étiquetage) des réseaux traditionnels sont opérationnels dans les échelles de temps de la μs (celles des paquets) tandis que dans les réseaux S&F cette valeur est plus grande (de l'ordre des *ms*, *s*, *heures*, *jours* ...).

La qualité de service dans les réseaux S&F reste encore un domaine à explorer et sa potentielle utilité reste dépendante des conditions de fonctionnement de ces systèmes. En effet, il s'agit de garantir des niveaux de qualité dans des systèmes qui, dans l'optique des réseaux traditionnels, n'ont pas toujours les capacités minimales pour assurer une communication.

Face à ces conditions nous proposons d'inclure des critères de garantie de service dans le processus de calcul de route. Nous avons classifié les services en les rassemblant selon leurs principales caractéristiques. Le calcul de route dépendra de ces caractéristiques et donc, des classes de service définies.

6.3 Manière d'utiliser les métriques

Une politique de routage doit utiliser efficacement les ressources offertes par la couche réseau. Notre démarche porte sur son optimisation en fonction des besoins des services. Cette optimisation se fait à partir de la métrique qui

est directement liée à ces besoins. Nous faisons une classification des services potentiels en fonction d'un paramètre principal d'optimisation.

6.3.1 Les services

Les services de ce système emploient des messages agissant comme des unités autonomes d'information. Ainsi un message circulant à l'intérieur du système n'a pas besoin d'autres messages ou d'autres éléments pour rendre utilisables les informations qu'il porte. La segmentation d'informations donc n'est pas nécessaire sur ce système.

Pour l'étude du routage adapté aux services, nous proposons trois services dotés de trois paramètres différents d'optimisation :

1. *Messagerie Rapide*. Communication à base de messages de petite taille. Optimisé sur le **temps**.
2. *Bulk messaging*. Communication à base de messages de grande taille. Optimisé sur la **quantité** d'information.
3. *Messagerie fiable*. Transmission fiable des messages. Optimisé sur la **fiabilité à faible coût**.

Les caractéristiques des services présentées sur la Figure 6.1 peuvent servir de guide pour la conception des politiques de routage.

Sur la première colonne nous présentons deux critères d'optimisation *utilisateur* associés aux services proposés et trois autres critères ayant de l'importance pour l'*opérateur* (optimisation des ressources).

Pour présenter d'une manière plus simple les liens existants entre les services et les métriques nous faisons référence à des services de base qui reposent sur une seule caractéristique. Cependant il convient de préciser que dans la pratique, les services sont dotés de plusieurs caractéristiques. Sur la Figure 6.1 (colonnes 3 à 8) nous montrons les six métriques S&F associées à un chiffre. Ce chiffre représente la priorité à accorder à la métrique dans le processus de calcul de route en fonction du service fourni. Les combinaisons des métriques sont faites selon leurs degrés d'importance.

A partir de ces considérations nous décrivons la manière dont les métriques peuvent être utilisées pour satisfaire les demandes des services de la

Critères d'optimisation	Principales caractéristiques des services	Métriques associées (leur priorité d'optimisation)					
		durée de vie	délai de bout en bout	capacité	synchronisme	simultanéité	discontinuité
Temps	service indifférent au temps			1		3	2
	service proche du temps réel		1		2	4	3
	service avec contraintes de temps de vie	2	1		3	5	4
	service avec génération régulière	2	1			3	
	service au temps asynchrone		2	1			
	service au temps min	2	1			3	4
Capacité	maximisation de la capacité			1		2	3
	garanties d'une capacité minimale			1		2	3
Facilité d'acquittement	besoin de simultanéité d'ordre n (n>2)	4			3	1	2
Longueur de route	services avec longueur de route minimale	3		1	2		4
Temps de stockage	réduction des discontinuités				3	2	1
	augmentation de simultanéité				2	1	3

FIG. 6.1 – Critères d'optimisation pour des services S&F et leurs liens avec les métriques proposées

Figure 6.1, pour définir les fonctions de calcul et sélection de route et pour simplifier le processus de routage.

6.4 Application des métriques au système des communications S&F par satellite

Afin d'illustrer l'application des métriques S&F dans le système de communication par satellite nous présentons ci-dessous trois exemples de politiques de routage définies en fonction des caractéristiques du service.

6.4.1 Présentation du problème

Le scénario utilise la constellation de satellites S&F présentée dans les chapitres précédents. Il s'agit d'un système dans lequel tous les éléments peuvent exécuter le stockage à long terme qui est une conséquence des consignes de routage reçues ou d'un manque de communication.

Nous considérons trois services offerts par l'opérateur représentant les classes de service présentées :

1. Messagerie rapide.
2. Bulk messaging service.
3. Service de messagerie fiable.

Les conditions du système sont les suivantes :

Les périodes d'établissement des **liens** sont connues à l'avance, l'instant à partir duquel le lien est utilisable et sa durée sont connus. Les passages des satellites au dessus des *gateways* (GW) peuvent être calculés afin de les considérer pour le calcul de routes. Nous estimons qu'il n'y a pas de variations dans ces caractéristiques de communication tout au long de leur disponibilité : le **débit** utilisable est de 19200 bit/s.

Le but principal de cette étude est de montrer l'utilité des métriques lors de leur prise en compte au moment de la conception des règles de routage. C'est pourquoi nous ne prenons pas en considération les causes qui provoqueraient des variations de débit : bruit ou variations du milieu (atténuations dues à la pluie ou aux changements atmosphériques).

Pour calculer et sélectionner une route on utilise une politique de routage pré-calculée depuis la source, politique qui ne tient pas compte des conditions de trafic.

La **taille des messages** dépend du service envisagé. Pour le service de messagerie d'urgence la taille prévue des messages est de 512 octets (la taille d'un message sur Iridium est de 160 octets, sur ORBCOMM est de 250 octets) Pour le service *bulk*, la taille des messages est de 2048 octets. Cette taille des messages intègre les informations liées au routage.

6.4.2 Solution proposée

Pour calculer les routes, nous avons mis en place un algorithme prenant en compte les besoins des services associés aux métriques. L'algorithme construit un arbre des routes qui part d'une source en direction de toutes les destinations possibles. Lors de la sélection des sauts, on ne garde que ceux qui feront probablement partie des solutions optimales. Ces sauts sélectionnés forment la meilleure route possible.

Les critères de sélection des sauts et des routes emploient les métriques les mieux adaptées pour le service considéré.

Cette solution conduit à l'exploration systématique de toutes les routes possibles dans une période de temps déterminée. Les routes sont choisies au fur et à mesure que l'arbre se construit. Pour sa construction nous utilisons un algorithme glouton qui affiche les caractéristiques suivantes :

- **Procédure de construction de l'arbre.** L'arbre se construit à partir des sauts disponibles. Pour qu'ils soient sélectionnés, il faut qu'ils :
 - remplissent la causalité ;
 - ne forment pas des routes plus longues que prévu ;
 - ne forment pas de boucles dans la route ;
 - garantissent la transmission du message, quel que soit le débit. En ce qui concerne notre système, nous considérons que tous les liens ont un débit égal et constant ;
- A ces quatre critères communs aux différents services, s'ajoutent des critères spécifiques associés à des métriques particulières. Ce sont des heuristiques qui excluent de l'arbre les sauts inutiles, simplifiant ainsi le processus de calcul des routes.

Les chemins formés, de bas en haut, lors des séquences de sauts définissent les routes. Le nœud racine est la GW source et les nœuds aux extrémités des branches représentent les sauts ultimes pour arriver aux GW associées. Chaque nœud contient les GWs d'origine et de destination, le moment de disponibilité du lien et sa durée. La construction de l'arbre se fait en profondeur en explorant toutes les possibilités de

sauts dès le premier saut. La taille en profondeur est contrôlée (longueur maximale de routes).

- **Règles de construction des sauts.** Les sauts sont construits à partir des liens disponibles depuis une GW à un moment précis. Les sauts sont choisis en raison des critères définis par le service à offrir.
- **Règles pour la construction et la sélection des routes.** Les routes optimales sont construites par chaque saut dont la destination est une GW. Si une meilleure route est trouvée, elle remplace la précédente. Ces règles prennent en compte les métriques S&F.

Dans la partie qui suit, nous décrivons les fonctions de sélection de nœuds et de calcul de routes en fonction des services choisis.

Les services

Messagerie rapide

Les caractéristiques de ce service sont :

- Arrivée le plus tôt possible à destination. Le délai de bout en bout des routes doit être minimum et donc l'instant d'arrivée du dernier saut doit être le plus court possible.
- Les sauts qui composent la route choisie doivent avoir une capacité minimum pour faire transiter le message.

En plus des critères de sélection des sauts préalablement cités, pour ce service, il faut prendre en compte ces heuristiques :

- la rapidité : le délai de bout en bout affiché pour une longueur n doit être $1/2$ du délai de bout en bout MAX pour une longueur $n - 4$;
- la discontinuité : les sauts séquentiels qui affichent une discontinuité sont écartés, car l'absence de discontinuité permet d'arriver plus rapidement à destination.

Pour choisir la route optimale :

1. Le début du dernier saut (délai de bout en bout minimum) est comparé avec la meilleure route associée à la GW de destination. Celle qui conduit au plus court délai de bout en bout est gardée comme solution.

2. Un critère additionnel d'efficacité (côté opérateur) est aussi pris en compte : on ne garde que les routes qui mènent à un temps de stockage sur les satellites inférieur au seuil prédéterminé par les besoins de l'opérateur.

Messagerie de transfert de données ou *bulk messaging*

Les conditions pour ce service sont :

- Routes à capacité maximale permettant l'envoi d'un nombre maximum de messages.
- Du côté opérateur, l'existence d'une simultanéité peut être importante pour réduire le temps de stockage dans les nœuds, notamment sur les satellites.

Dans les critères de sélection propres au transfert de données, on retrouve comme pour le service d'urgence, celui de la rapidité. la règle est la même mais elle s'applique aux deux composants du délai associé au saut à sélectionner. En plus du critère de rapidité, s'ajoute aussi un critère de discontinuité. A la différence du service d'urgence, les sauts de grande capacité même s'il présentent une discontinuité sont conservés.

La route optimale est sélectionnée avec les critères suivants :

1. Le premier critère de sélection est la capacité, la route sélectionnée est celle qui a la capacité la plus grande sous réserve de remplir les autres critères d'efficacité à savoir :
2. En cas d'équivalence en capacité, la meilleure route est sélectionnée en fonction des capacités des liens qui la composent. C'est celle dont les capacités individuelles diffèrent le moins de la plus petite capacité existante ;
3. Si les deux critères ci-dessus se révèlent identiques un troisième critère est pris en compte. Il s'agit du délai de bout en bout. Ainsi on privilégiera la route qui présente le délai le plus court ;
4. Enfin s'ajoute à tous ces critères, celui du temps de stockage sur les satellites. La route qui représente un temps de stockage minimum sera préférée.

Messagerie SMS fiable

Ce service demande des routes permettant de transporter l'acquittement de messages. L'accusé de réception peut être fait saut à saut, mais sur les routes à forte simultanété, le transfert peut se faire tous les deux sauts voire plus. Cela évite le stockage des messages dans les nœuds intermédiaires.

Les caractéristiques de ce service sont :

- l'absence d'utilisation de la mémoire des satellites lorsque l'accusé réception se fait directement de GW à GW ;
- en cas d'erreur, il faut disposer de la possibilité de retransmettre le message au moins trois fois.

Pour la sélection de sauts, outre les critères généraux déjà cités précédemment, s'ajoutent :

- le critère de discontinuité mais de façon plus restreinte que dans les deux autres cas. En effet pour la messagerie fiable ne sont écartés que les sauts Satellite-GW qui présentent une discontinuité par rapport au saut précédent GW-Satellite ;
- la simultanété : les sauts Satellite-GW qui ont une courte simultanété avec le saut précédent GW-Satellite sont écartés. Le degré de simultanété peut être augmenté, ce qui permet de réduire les lieux de stockage ;
- la rapidité, qui contrairement aux cas précédents est facultative. En effet elle n'entre en compte que lorsque des besoins de durée de vie s'imposent. De plus le critère de rapidité n'est appliqué qu'au dernier composant du délai.

La route optimale est sélectionnée à partir des critères suivants :

1. La route sélectionnée est celle qui affiche le degré de simultanété le plus grand.
2. En cas d'égalité, le choix de la route se fait en fonction :
 - du délai de bout en bout ;
 - de la capacité des sauts.

6.5 Résultats

Les métriques S&F se révèlent fondamentales pour l'optimisation des routes. Tout d'abord elles permettent d'identifier les critères nécessaires au bon fonctionnement de chaque service et de mettre en valeur l'importance de chacun de ces critères.

Ainsi sur le graphique 6.2(a), on constate que le critère de délai de bout en bout, fondamental pour le service de messagerie d'urgence, l'est deux fois moins pour la messagerie fiable et se révèle indifférent pour le service de transfert de données.

En revanche sur le graphique 6.2(e), le critère de capacité met en avant des courbes différentes. En effet le service de transfert de données demande une capacité maximale alors que la messagerie fiable nécessite seulement une capacité moyenne et la messagerie d'urgence une capacité plus faible. Cette différence au niveau du critère de capacité de transfert a comme conséquence une utilisation variable des ressources de stockage (graphique 6.2(f)). Ainsi pour satisfaire ce besoin de capacité, le service de transfert de données utilisera la mémoire de stockage des satellites durant plus de 35% de la durée de vie de la route. Cet utilisation des ressources de stockage limite l'utilisation des satellites. De ce fait pour garantir la fonctionnalité du système, on doit contrôler le nombre de messages associés à ce type de service.

Enfin sur le graphique 6.2(d), on s'aperçoit que le critère de simultanéité est très important pour les services de messagerie fiable et de messagerie d'urgence alors qu'il est moindre pour le transfert de données. Une importante simultanéité entre deux sauts entraîne une plus faible utilisation des capacités de stockage (graphique 6.2(f)). En effet, elle nous permet de choisir les sauts les plus performants ou les plus appropriés, de sorte que l'on évite l'usage des ressources les plus coûteuses.

De plus, pour certains services, comme celui du message d'urgence, on constate un lien étroit entre les critères. Ainsi pour réduire au maximum le délai de bout en bout (graphique 6.2(a)), le synchronisme (graphique 6.2(c)) et la simultanéité (graphique 6.2(d)) doivent être importants pour que le message puisse passer le plus rapidement possible d'un nœud à un autre. La

présence d'une haute simultanéité et d'un important synchronisme entraîne une utilisation moindre des ressources de stockage des satellites (graphique 6.2(f)).

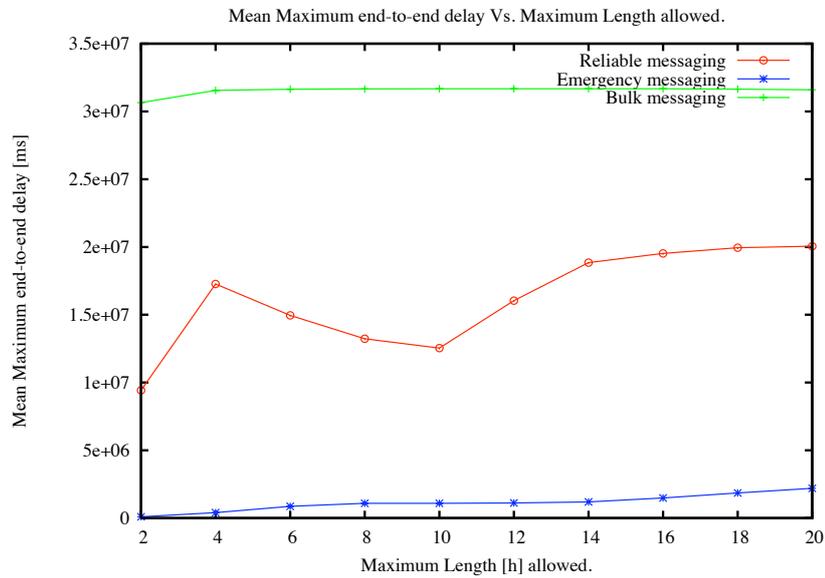
Les métriques S&F permettent de connaître les besoins ponctuels de chaque critère de chacun des services pour ce système. Ainsi sur le graphique 6.2(d), on constate que pour satisfaire les besoins du service de messagerie fiable, la simultanéité est autour de 0,35 au bout de quatre sauts, de 0,5 au bout de dix sauts et de nouveau autour de 0,35 au bout de 14 sauts. Ces besoins pour un même critère varient en fonction de chaque service puisque pour la messagerie d'urgence, la simultanéité est autour de 0,15 au bout de deux sauts, de 0,45 au bout de 10 sauts et de 0,45 au bout de 14 sauts. Les besoins de simultanéité du transfert de données, quant à eux, restent constants.

6.6 Conclusions

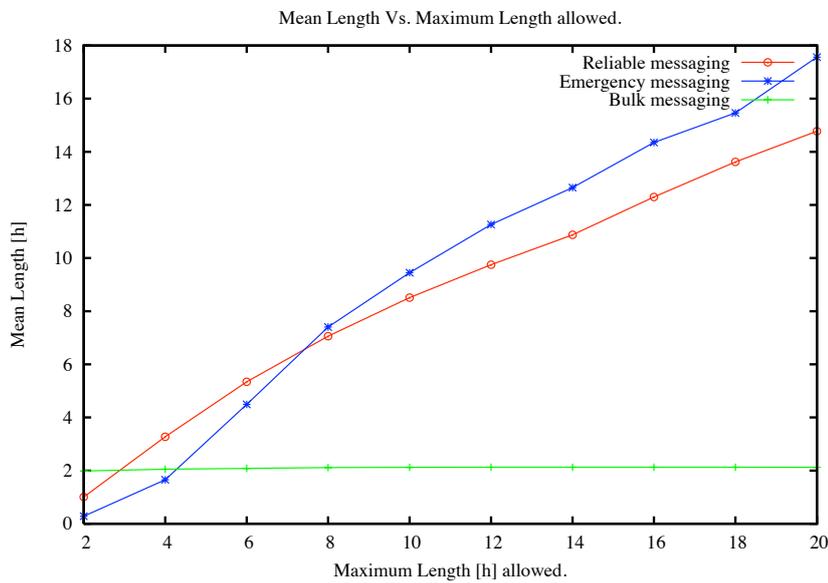
Au cours de cette étude de cas, nous avons pu montrer que les métriques définies dans le chapitre 5 sont précieuses pour spécifier les besoins des services déployés dans une constellation S&F. Elles permettent de capturer et d'introduire les contraintes inhérentes au système lors de la conception des politiques de routage.

L'utilisation numérique des métriques au travers d'algorithmes de routage optimise la performance des services et plus globalement du système en permettant un usage de ressources raisonné. Comme les résultats le montrent, il est possible d'obtenir des politiques de routage correspondant aux besoins de services et aux ressources disponibles.

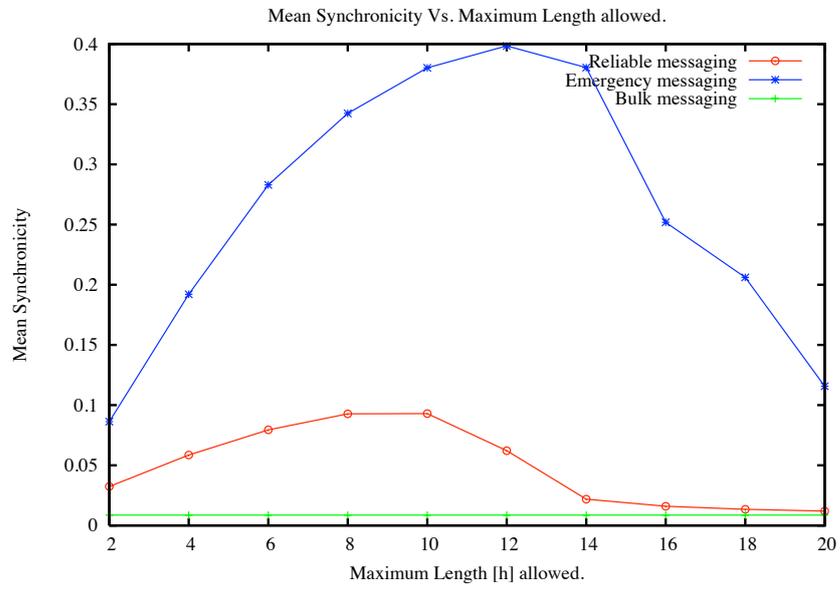
Cette étude reste à généraliser sur d'autres systèmes (réseaux de capteurs, réseaux véhiculaires).



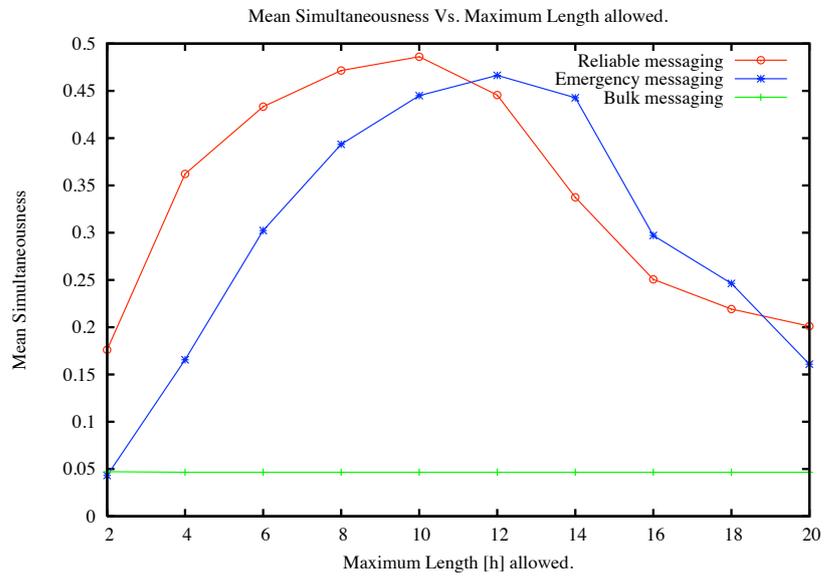
(a) Délai de bout en bout maximum moyen contre longueur maximale permise



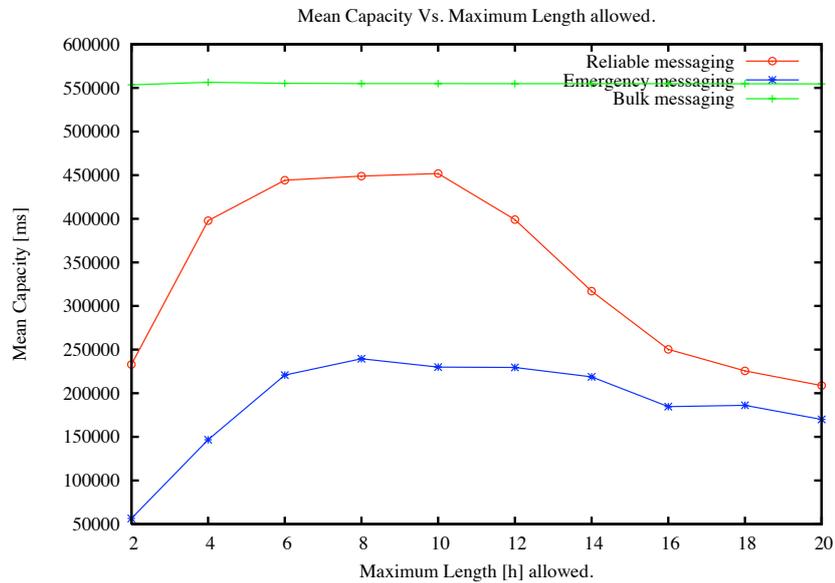
(b) Longueur moyenne contre longueur maximale permise



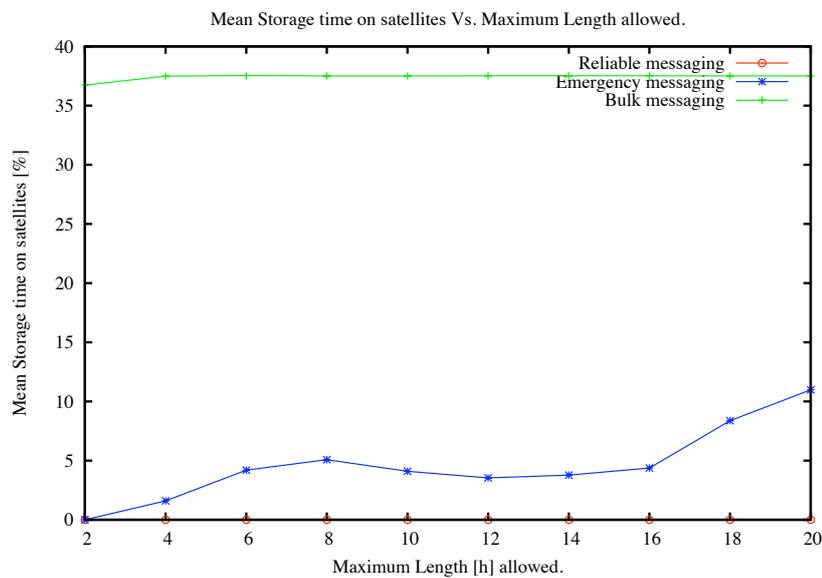
(c) Synchronisme moyen contre longueur maximale permise



(d) Simultanéité moyenne contre longueur maximale permise



(e) Capacité moyenne contre longueur maximale permise



(f) Temps de stockage moyen sur les satellites contre longueur maximale permise

FIG. 6.2 – Performance des trois politiques de routage utilisant les métriques de routage S&F.

Chapitre 7

Conclusions

L'évolution des technologies de communication et l'augmentation de la demande des services garantissant la communication dans n'importe quel lieu et à n'importe quel moment nous amène à explorer sans cesse de nouveaux mécanismes de communication dans de nouvelles conditions. Les mécanismes Store and Forward (S&F) sont un exemple de ces nouveaux mécanismes. Ils assurent des services de communication dans des milieux où les conditions ne permettent pas une connectivité constante entre les nœuds. Les messages qui les traversent sont alors stockés durant l'absence de communication puis retransmis quand les conditions le permettent. L'absence d'une connectivité continue et la fréquente limitation des ressources font du routage dans les réseaux S&F une étape essentielle pour leur optimisation.

L'objectif de notre étude a été de démontrer l'importance des politiques de routage dans les systèmes S&F pour optimiser l'utilisation des ressources disponibles. Elles se révèlent fondamentales dans la mesure où ce sont elles qui permettent de contrôler l'utilisation des ressources au niveau du réseau sans que l'on doive modifier la configuration du système.

Pour pouvoir atteindre cet objectif, nous avons utilisé un système S&F par satellite fournissant des services de communication de base dans des zones où les infrastructures sont insuffisantes ou inaccessibles. En effet les réseaux S&F constituent le meilleur cadre pour mettre en place des communications dans deux cas particuliers : quand on manque d'infrastructures ou

lorsque les systèmes de communication traditionnels se révèlent inopérants. Le manque d'infrastructures peut s'expliquer de différentes façons : l'impossibilité d'installer des équipements, leur longue mise en place ou leur manque de rentabilité dû à leur faible utilisation. Les réseaux S&F sont la meilleure solution pour des environnements contraignants : milieux spatiaux et sous-marins sujets à de très longs délais ou à d'importants taux d'erreurs auxquels s'ajoute, pour les milieux spatiaux, la contrainte de la distance ; milieux où les conditions topologiques du réseau changent de façon imprévisible (désastre ou guerre).

De plus, les réseaux S&F peuvent être appliqués dans des systèmes traditionnels pour des services simples. En effet les réseaux S&F ont la capacité d'utiliser les infrastructures des réseaux traditionnels de façon simple. La gamme des services pouvant être fournis reste limitée à cause des contraintes imposées par le mode de fonctionnement S&F (capacité limitée d'informations et longs délais dus au stockage de longue durée), cependant les solutions S&F sont économiques grâce au peu de ressources utilisées et à la simplicité de leurs mécanismes.

Parmi ces services simples pouvant utiliser des réseaux S&F à partir d'infrastructures traditionnelles, on trouve la messagerie par satellite. Deux avantages essentiels apparaissent alors : nous pouvons éviter l'utilisation de liens inter-satellites (ISL) et nous pouvons avoir une couverture globale de la surface terrestre avec un faible nombre de satellites.

Ces avantages peuvent être complétés par une meilleure gestion des ressources. La reconfiguration d'un système de satellites, une fois mis en place, est impossible. L'amélioration du système peut se faire notamment au niveau du réseau par l'intermédiaire des politiques de routage. Pour y parvenir, nous avons tout d'abord suivi une approche classique, tout en prenant en compte les particularités du système : déterministe avec de hautes intermitteces dans la communication. Cette approche classique consiste à trouver les routes les plus rapides, car cela permet de réduire le délai associé à une route. De plus, dans les réseaux S&F étant donné que le délai est lié au temps de stockage, en diminuant l'un, on diminue l'autre.

Notre première contribution pour calculer les routes les plus rapides a consisté à adapter des outils issus du monde des réseaux de transport, dans la mesure où les deux systèmes ont des propriétés comparables. Cette méthode nous a permis de représenter l'évolution du système pour son analyse. Le recours à des graphes évolutifs a conduit à la mise en place d'une méthode originale pour le calcul des routes [28]. Mais cette méthodologie s'est révélée incomplète dans la mesure où elle ne permettait pas d'explorer l'ensemble des solutions possibles. L'énorme demande de ressources de calcul apparaît comme une limite récurrente dans ce genre de solutions. La raison principale en est la croissance combinatoire des solutions lors de la construction des arbres de routes. Nous avons donc mis en place un système pour contrôler l'utilisation des ressources de calcul disponibles et pour éliminer les solutions non valables. Une fois ces dernières écartées, le système établit une fourchette de solutions qui sert de base pour le calcul des solutions de l'étape suivante, le nombre d'étapes variant en fonction de la longueur de la route. Cette technique d'élagage a permis d'obtenir des résultats très intéressants en peu de temps.

Toutefois, lors d'une étude minutieuse des résultats obtenus après la recherche des routes les plus rapides, on a pu constater l'existence de solutions qui ne répondaient pas au critère d'optimisation de délais de bout en bout mais qui offraient d'autres avantages tels qu'une utilisation moindre des satellites ou bien un temps de parcours plus court même avec un délai de bout en bout plus grand. Cela s'explique par le temps d'attente dans les nœuds d'origine. De par ce constat, nous pouvons conclure que le critère de délai de bout en bout n'offre qu'une catégorie de solutions pour optimiser l'utilisation des ressources du système. D'autres critères d'optimisation peuvent être utilisés pour sélectionner des routes optimales. En effet dans le contexte des réseaux S&F, le délai de bout en bout est long à cause des fréquentes intermittences dans la connectivité entre les nœuds ce qui provoque de longues durées de stockage et donc de longues périodes d'attente dans les nœuds. Dans ces circonstances, la recherche des routes les plus rapides n'apparaît plus comme essentielle. En revanche, d'autres critères d'optimisation comme celui de l'utilisation de la mémoire dans la constellation de satellites de-

viennent plus importants. Ainsi le délai de bout en bout ne doit pas être le seul critère pris en compte.

Suite à l'analyse des caractéristiques des routes obtenues dans notre système, nous avons établi un cadre de métriques permettant leur meilleure classification des routes. Cette contribution devient essentielle dans ce travail de thèse. En effet grâce à ces métriques nous avons pu aboutir à des solutions optimales par rapport à ce système. De plus il s'agit là d'une contribution novatrice dans la mesure où, à notre connaissance, aucun travail à ce jour ne traite des métriques propres aux systèmes S&F.

Six métriques ont été proposées; trois d'entre elles sont issues des systèmes traditionnels et sont adaptées au contexte S&F, alors que les trois autres sont propres aux réseaux S&F. Nous avons choisi des métriques peu dépendantes les unes par rapport aux autres. Pour ce faire une étude de la corrélation linéaire a été effectuée permettant de le vérifier. Avec l'utilisation de ces métriques nous avons pu identifier une grande variété de routes optimales en dehors de celles qui répondaient au critère de rapidité. Ces métriques se révèlent donc d'une importance fondamentale dans la mesure où elles permettent de matérialiser l'ensemble des caractéristiques des systèmes S&F et nous donnent une image précise de leur évolution. Ainsi elles rendent plus facile la différenciation des routes. Il est alors possible de les étudier séparément et de connaître leurs propriétés, ce qui rend plus facile leur adaptation aux besoins des services fournis et donc le système plus performant [29] et [31].

Nous avons réalisé une étude sur les services fournis par le système de communication S&F par satellite. Nous avons constaté qu'il est toujours intéressant d'identifier les critères les plus importants pour chacun et ensuite de construire une politique de routage qui soit en accord. Les métriques peuvent être utilisées pour identifier les besoins des services et en même temps pour calculer les routes en fonction de ces besoins. Le lien que les métriques établissent entre les caractéristiques des services et la caractérisation des routes permet la conception de politiques de routage adaptées aux besoins de ces services. Un routage plus fin est donc possible grâce à l'application des métriques S&F [30]. Nous pensons que cette approche dans le routage est nécessaire

dans les systèmes S&F. La conception des politiques de routage permettant une adaptation complète des routes aux services associés est possible grâce à la prise en compte de critères combinés (métriques) lors du calcul des routes. Cela ouvre la possibilité d'orienter le routage dans les systèmes S&F afin de garantir une performance optimale dans des circonstances où, depuis la perspective des réseaux traditionnels, il est impossible de le faire. L'avantage des métriques S&F se trouve dans leur capacité à concevoir des politiques de routage adaptées à la nature même des systèmes S&F.

Ce travail, et en particulier les métriques S&F, peut s'étendre à d'autres systèmes S&F, comme les réseaux de capteurs fonctionnant dans des environnements contraignants. L'approche entièrement fondée sur les propriétés et les outils S&F permet la conception de solutions portant sur la nature exacte de ces systèmes et incluant les différentes conditions de fonctionnement telles que les propriétés des environnements (spatial, terrestre, sous-marin ...), les différents modèles de mobilité, les interruptions (programmées, intempestives ...), etc. Les solutions proposées jusqu'alors pour le routage S&F peuvent être enrichies avec l'application de ces nouvelles métriques ([19], [20], [59], [64]) de même que les systèmes dont la nature S&F requiert une efficacité maximale ([92], [91], [32], [66], [58]).

Ce travail nous amène à conclure que pour profiter au maximum des systèmes de communication S&F, il est nécessaire d'aborder la problématique de routage depuis une perspective différente de celle des réseaux classiques. Face à la variété de conditions retrouvées dans les systèmes S&F il est difficile d'envisager, comme dans les réseaux classiques, des solutions génériques pour le routage. Dans cette optique, l'identification des métriques permettant l'optimisation des systèmes S&F est la première étape pour établir des solutions de communication entièrement adaptées aux conditions de fonctionnement propres à chaque système. Ces métriques peuvent être étendues ou complétées par d'autres potentiellement existantes dans d'autres systèmes et d'autres conditions de fonctionnement.

L'application de ce raisonnement à d'autres systèmes de communication reste une tâche à accomplir. Des systèmes présentant des conditions de rupture de connectivité comme les réseaux de surveillance, de capteurs et mo-

biles ad-hoc peuvent avoir des propriétés qui ne sont pas toutes repérées avec les techniques utilisées jusqu'à présent. Ces propriétés pourraient être liées aux degrés de mobilité, à la façon dont les interruptions des communications surviennent, etc. et être employées durant l'utilisation des systèmes si elles étaient quantifiables.

Finalement, nous envisageons donc un grand champ d'exploitation sur des systèmes de communication S&F. Leur utilisation sur des infrastructures existantes ouvre nombreuses possibilités pour fournir des services de communication à bande étroite qui compléteraient les systèmes existants. Ces services de communication reposeraient sur la simplicité et la faible utilisation de ressources.

Bibliographie

- [1] Defence Advanced Research Projects Agency. Disruption tolerant networking. <http://www.darpa.mil/sto/solicitations/dtn/index.htm>, Juin 2008.
- [2] European Space Agency. Sseti express project. http://www.esa.int/SPECIALS/sseti_express/index.html.
- [3] I. Ali, N. Al-Dhahir, J. E. Hershey, and A. H. Motorola. Predicting the visibility of LEO satellites. *Aerospace and Electronic Systems, IEEE Transactions on*, 35(4) :1183–1190, 1999.
- [4] M. N. Allery and J. W. Ward. The potential for 'store-and-forward' communications using small satellites in low earth orbits. In *ECSC-3- European Conference on Satellite Communications, 3 rd, Munich, Germany*, pages 230–235, 1993.
- [5] G. Almes, S. Kalidindi, and M. Zekauskas. RFC 2679 - a one-way delay metric for ippm. <http://www.ietf.org/rfc/rfc2679.txt>, 1999.
- [6] G. Almes, S. Kalidindi, and M. Zekauskas. RFC 2680 - a one-way packet loss metric for ippm. <http://www.ietf.org/rfc/rfc2680.txt>, 1999.
- [7] G. Almes, S. Kalidindi, and M. Zekauskas. Rfc 2681 - a round-trip delay metric for ippm. <http://www.ietf.org/rfc/rfc2681.txt>, 1999.
- [8] P. Almquist. Rfc 793 - transmission control protocol. <http://tools.ietf.org/html/rfc793>, 1981.
- [9] P. Almquist. Rfc 1349 - type of service in the internet protocol suite. <http://tools.ietf.org/html/rfc1349>, 1992.
- [10] The GSM Association. Gsm world coverage poster c 2005. <http://www.gsmworld.com/index.shtml>, 2005.

- [11] EADS Astrium. Terrestrial wireless infrastructure integrated with satellite telecommunications for e-rural. <http://www.space.eads.net/families/daily-life-benefits/communications/twister>.
- [12] TIER Research Group at The University of California at Berkeley. Technology and infrastructure for emerging regions. <http://tier.cs.berkeley.edu/wiki/Home>.
- [13] K. Baker and D. Jansson. Space satellites from the world's garage-the story of amsat. In *Proceedings of the IEEE 1994 National Aerospace and Electronics Conference 1994*, pages 1174–1181, 1994.
- [14] B. Bellman. On a routing problem. *Quarterly of Applied Mathematics*, 16(1) :87–90, 1958.
- [15] W. T. Brandon. A data courier satellite system concept. *International Journal of Satellite Communications*, 12(6) :569–578, 1994.
- [16] E. Brewer, M. Demmer, B. Du, M. Ho, M. Kam, S. Nedevschi, J. Pal, R. Patra, S. Surana, and K. Fall. The case for technology in developing regions. *COMPUTER*, pages 25–38, 2005.
- [17] B. Bui-Xuan, A. Ferreira, and A. Jarry. Evolving graphs and least cost journeys in dynamic networks. In *Proceedings of WiOpt'03 – Modeling and Optimization in Mobile, Ad-Hoc and Wireless Networks*, pages 141–150, Sophia Antipolis, March 2003. INRIA Press.
- [18] S. Burleigh, A. Hooke, L. Torgerson, K. Fall, V. Cerf, B. Durst, K. Scott, and H. Weiss. Delay-tolerant networking : an approach to interplanetary internet. *Communications Magazine, IEEE*, 41(6) :128–136, 2003.
- [19] S. Burleigh and K. Scott. Internet draft, bundle protocol specification. <http://www.dtnrg.org/docs/specs/draft-irtf-dtnrg-bundle-spec-04.txt>, 2006.
- [20] B. Burns, O. Brock, and B. N. Levine. Mora routing and capacity building in disruption-tolerant networks. *Ad Hoc Networks*, 6(4) :600–620, 2008.

-
- [21] V. Cerf, S. Burleigh, A. Hooke, L. Torgerson, R. Durst, K. Scott, K. Fall, and H. Weiss. Delay tolerant network architecture, draft-irtf-dtnrg-arch-02. txt. *Internet Research Task Force (IRTF)*, July, 2004.
- [22] V. Cerf, S. Burleigh, A. Hooke, L. Torgerson, R. Durst, K. Scott, E. Travis, and H. Weiss. *Interplanetary Internet (IPN) : Architectural Definition*. Voir <http://www.ipnsig.org/reports/memo-ipnrg-arch-00.pdf>, 2001.
- [23] I. Chabini. Discrete dynamic shortest path problems in transportation applications : Complexity and algorithms with optimal run time. *Transportation Research Record*, 1645(-1) :170–175, 1998.
- [24] CISCO. Document id : 13669. introduction to eigrp. <http://www.cisco.com/warp/public/103/1.pdf>, 2005.
- [25] CISCO. Document id : 16406. enhanced interior gateway routing protocol. <http://www.cisco.com/warp/public/103/eigrp-toc.pdf>, 2005.
- [26] K. L. Cooke and E. Halsey. The shortest route through a network with time-dependent internodal transit times. *Journal of Mathematical Analysis and Applications*, 14 :493–498, 1996.
- [27] The Radio Amateur Satellite Corporation. The radio amateur satellite corporation. <http://www.amsat.org>.
- [28] H. Cruz-Sanchez, L. Franck, and A. L. Beylot. Precomputed routing in a store and forward satellite constellation. *Vehicular Technology Conference, 2007. VTC-2007 Fall. 2007 IEEE 66th*, pages 240–243, 2007.
- [29] H. Cruz-Sanchez, L. Franck, and A. L. Beylot. Routing metrics in delay tolerant networks. Technical Report IRIT/RR–2007-22–FR, IRIT, November 2007.
- [30] H. Cruz-Sanchez, L. Franck, and A. L. Beylot. Use of store and forward metrics for service-oriented routing in satellite constellations. *IEEE International Workshop on Satellite and Space Communications, IWSSC'08*, Octobre 2008, to appear.
- [31] H. Cruz-Sanchez, L. Franck, and A. L. Beylot. Routing metrics for store and forward networks. *Computer Networks (Elsevier)*, submitted.

- [32] CubeSat. Cubesat community website. <http://www.cubesat.org/>.
- [33] Union Internationale des Télécommunications. Telecentres communaitaires polyvalents uit. <http://www.itu.int/itu-news/issue/2002/05/rationale-fr.html>.
- [34] G. Desaulniers and D. Villeneuve. The shortest path problem with time windows ans linear waiting costs. *Transportation Science*, 2000.
- [35] M. Desrochers and F. Soumis. A generalized permanent labelling algorithm for the shortest path problem with time windows. *Canadian Journal of Operational Research and Information Processing*, 1988.
- [36] J. Desrosiers, P. Pelletier, and F. Soumis. Plus court chemin avec contraintes d’horaires. *R.A.I.R.O. Recherche Opérationnelle*, 1983.
- [37] R. J. Diersing and G. Jones. Low-earth-orbit store-and-forward satellites in the amateur radioservice. *Telesystems Conference, 1992. NTC-92., National*, page 8, 1992.
- [38] E. W. Dijkstra. A note on two problems in connection with graphs. *Numerische Mathematik*, 1(269-270) :6, 1959.
- [39] M. Dodge. *An Atlas of Cyberspaces*. <http://personal-pages.manchester.ac.uk/staff/m.dodge/cybergeography/atlas/geographic.html>, 2004.
- [40] S. E. Dreyfus. An appraisal of some shortest-path algorithms. *Operations Research*, 17(3) :395–412, 1969.
- [41] DTNRG. Delay tolerant network research group. <http://www.dtnrg.org>.
- [42] A. Eiger, P. B. Mirchandani, and H. Soroush. Path preferences and optimal paths in probabilistic networks. *Transportation Science*, 19(1) :75–84, 1985.
- [43] K. Fall. A delay-tolerant network architecture for challenged internets. In *SIGCOMM '03 : Proceedings of the 2003 conference on Applications, technologies, architectures, and protocols for computer communications*, pages 27–34, New York, NY, USA, 2003. ACM Press.

-
- [44] K. Fall. Messaging in difficult environments, delay tolerant networking as a generalized messaging service. *Intel Research Berkeley, IRB-TR-04-019*, 27, Dec 2004.
- [45] S. Farrell and V. Cahill. Ltp-t : A generic delay tolerant transport protocol. *TCD Computer Science Technical Report TCD-CS-2005-69*, 7, 2005.
- [46] A. Ferreira. Building a reference combinatorial model for manets. *IEEE Network*, 18(5) :24–29, 2004.
- [47] R. Fletcher and A. Hasson. Daknet : rethinking connectivity in developing nations. *Computer*, 37(1) :78–83, 2004.
- [48] Center for Information Technology Research in the Interest of Society. Ict4b proposal. <http://www.citris-uc.org/>.
- [49] Volunteers for Prosperity. Volunteers in technical assistance. <http://www.volunteersforprosperity.gov/>.
- [50] H. Frank. Shortest paths in probabilistic graphs. *Operations Research*, 17(4) :583–599, 1969.
- [51] M. R. Garey and D. S. Johnson. *Computers and Intractability : A Guide to the Theory of NP-Completeness*. WH Freeman & Co. New York, NY, USA, 1979.
- [52] K. Goczyła and J. Cielatkowski. Optimal routing in a transportation network. *European Journal of Operational Research*, 1995.
- [53] R. W. Hall. The fastest path through a network with random time-dependent travel times. *Transportation Science*, 20(3) :182–188, 1986.
- [54] C. Hedrick. Rfc 1058, routing information protocol (rip). <http://www.ietf.org/rfc/rfc2328.txt>, 1988.
- [55] A. Hooke. The interplanetary internet. *Communications of the ACM*, 44(9) :38–40, 2001.
- [56] A. Hooke. Towards an interplanetary internet : A proposed strategy for standardization. *SpaceOps 2002*, 2002.
- [57] Pumpkin Inc. Cubesat kit home. <http://www.cubesatkit.com/>.

- [58] W. Ivancic, W. M. Eddy, L. Wood, D. Stewart, C. Jackson, J. Northam, and A. Da Silva Curiel. Delay/disruption-tolerant network testing using a leo satellite. In *Eighth Annual NASA Earth Science Technology Conference (ESTC 2008)*, 2008.
- [59] S. Jain, K. Fall, and R. Patra. Routing in a delay tolerant network. In *SIGCOMM '04 : Proceedings of the 2004 conference on Applications, technologies, architectures, and protocols for computer communications*, pages 145–158, New York, NY, USA, 2004. ACM.
- [60] D. Johnson. Routing in ad hoc networks of mobile hosts. In *Workshop on Mobile Computing Systems and Applications*, Santa Cruz, CA, U.S., 1994.
- [61] E. Jones, L. Li, and P. Ward. Practical routing in delay-tolerant networks. In *WDTN '05 : Proceeding of the 2005 ACM SIGCOMM workshop on Delay-tolerant networking*, pages 237–243, New York, NY, USA, 2005. ACM Press.
- [62] J. Leguay, T. Friedman, and V. Conan. Dtn routing in a mobility pattern space. In *WDTN '05 : Proceeding of the 2005 ACM SIGCOMM workshop on Delay-tolerant networking*. ACM, August 2005.
- [63] A. Lindgren and A. Doria. Probabilistic routing protocol for intermittently connected networks. <http://www.dtnrg.org/docs/specs/draft-lindgren-dtnrg-prophet-01.txt>, 2006.
- [64] A. Lindgren, A. Doria, and O. Schelén. Probabilistic routing in intermittently connected networks. *SIGMOBILE Mob. Comput. Commun. Rev.*, 7(3) :19–20, 2003.
- [65] R. P. Loui. Optimal paths in graphs with stochastic or multidimensional weights. *Communications of the ACM*, 26(9) :670–676, 1983.
- [66] M. Lukac, L. Girod, and D. Estrin. Disruption tolerant shell. In *CHANTS '06 : Proceedings of the 2006 SIGCOMM workshop on Challenged networks*, pages 189–196, New York, NY, USA, 2006. ACM.
- [67] J. Mahdavi and V. Paxson. Rfc 2678 - ippm metrics for measuring connectivity. <http://www.ietf.org/rfc/rfc2678.txt>, 1999.

- [68] A. Mainwaring, D. Culler, J. Polastre, R. Szewczyk, and J. Anderson. Wireless sensor networks for habitat monitoring. In *WSNA '02 : Proceedings of the 1st ACM international workshop on Wireless sensor networks and applications*, pages 88–97, New York, NY, USA, 2002. ACM Press.
- [69] E. D. Miller, H. S. Mahmassani, and A. Ziliaskopoulos. Path search techniques for transportation networks with time-dependent, stochastic arc costs. *IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics. Humans, Information and Technology*, 2 :1716–1721, 1986.
- [70] E. D. Miller-Hooks. *Optimal routing in time-varying, stochastic networks : Algorithms and implementations*. PhD thesis, University of Texas, 1997.
- [71] P. B. Mirchandani and H. Soroush. Optimal paths in probabilistic networks : a case with temporary preferences. *Transportation Science*, 12 :365–381, 1985.
- [72] J. Moy. *RFC 2338, Open Shortest Path First (OSPF) Version 2*. Voir [http ://www.ietf.org/rfc/rfc2328.txt](http://www.ietf.org/rfc/rfc2328.txt), 1998.
- [73] I. Murthy and S. Sarkar. A relaxation-based pruning technique for a class of stochastic shortest path problems. *Transportation Science*, 30(3) :220–236, 1996.
- [74] I. Murthy and S. Sarkar. Exact algorithms for the stochastic shortest path problem with a decreasing deadline function. *European Journal of Operational Research*, 103 :209–229, 1997.
- [75] I. Murthy and S. Sarkar. Stochastic shortest path problems with piecewise-linear concave utility functions. *Management Science*, 44(11) :125–136, 1998.
- [76] NASA. Astronomy picture of the day. [http ://ant-wrp.gsfc.nasa.gov/apod/image/0303/peopleearth94](http://ant-wrp.gsfc.nasa.gov/apod/image/0303/peopleearth94).
- [77] I. Nason, J. Puig-Suari, and R. Twiggs. Development of a family of picosatellite deployers based on the cubesat standard. *Aerospace Conference Proceedings, 2002. IEEE*, 1 :457–464, 2002.

- [78] University of Leicester. University of leicester cubesat project. <http://cubesat.wikidot.com>, 2008.
- [79] Lulea University of Technology. The sámí network connectivity project (snc). <http://www.snc.sapmi.net/>.
- [80] ORBCOMM. Orbcomm site. <http://www.orbcomm.com/>.
- [81] A. Orda and R. Rom. Shortest-path and minimum delay algorithms in networks with time-dependent edge-length. *Journal of the ACM*, 37(3) :607–625, 1990.
- [82] A. Orda, R. Rom, and M. Sidi. Minimum delay routing in stochastic networks. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 1(2) :187–198, 1993.
- [83] S. Pallottino and M. G. Scutella. Shortest path algorithms in transportation models : classical and innovative aspects. Technical report, University of Pisa, 1997.
- [84] P. L. Palmer and Y. Mai. A fast prediction algorithm of satellite passes. *12th AIAA/USU Annual Conference on Small Satellites*, 2000.
- [85] V. Paxson, G. Almes, J. Mahdavi, and M. Mathis. Rfc 2330 - framework for ip performance metrics. <http://www.faqs.org/rfcs/rfc2330.html>, 1988.
- [86] C. Perkins and P. Bhagwat. Highly dynamic destination-sequenced distance-vector routing (DSDV) for mobile computers. In *ACM SIGCOMM'94 Conference on Communications Architectures, Protocols and Applications*, pages 234–244, 1994.
- [87] J. Postel. Rfc 760 - internet protocol. <http://www.faqs.org/rfcs/rfc760.html>, 1980.
- [88] W. B. Powell and Z. L. Chen. A generalized threshold algorithm for the shortest path problem with time windows. *Network Design : Connectivity and Facilities Location : DIMACS Workshop, April 28-30, 1997*, 1998.

- [89] J. Radzik and G. Maral. A methodology for rapidly evaluating the performance of some lowearth orbit satellite systems. *Selected Areas in Communications, IEEE Journal on*, 13(2) :301–309, 1995.
- [90] M. Ramadas, S. Burleigh, and S. Farrell. Licklider transmission protocol specification. <http://ietfreport.isoc.org/all-ids/draft-irtf-dtnrg-ltp-03.txt>, 2006.
- [91] J. Rice. Seaweb acoustic communication and navigation networks. In *Proceedings of the International Conference on Underwater Acoustic Measurements : Technologies & Results*, 2005.
- [92] A. Seth, D. Kroeker, M. Zaharia, S. Guo, and S. Keshav. Low-cost communication for rural internet kiosks using mechanical backhaul. In *MobiCom '06 : Proceedings of the 12th annual international conference on Mobile computing and networking*, pages 334–345, New York, NY, USA, 2006. ACM.
- [93] R. C. Shah, S. Roy, S. Jain, W. Brunette, I. Res, and W. A. Seattle. Data mules : modeling a three-tier architecture for sparse sensor networks. *Sensor Network Protocols and Applications, 2003. Proceedings of the First IEEE. 2003 IEEE International Workshop on*, pages 30–41, 2003.
- [94] IEEE Computer Society. *IEEE Standard 802.1Q for Local and metropolitan area networks. Virtual Bridged Local Area Networks*. <http://standards.ieee.org/getieee802/download/802.1Q-2005.pdf>, 2005.
- [95] M. Steenstrup. *Routing in communications networks*. Prentice Hall International (UK) Ltd., Hertfordshire, UK, UK, 1995.
- [96] Princeton University. The princeton zebranet project. <http://www.princeton.edu/mrm/zebranet.html>.
- [97] F. Warthman. *Delay Tolerant Networks (DTNs); A Tutorial. Version 1.1*. Intel Research Berkeley, 2003.
- [98] M. Wellman, M. Ford, and K. Larson. Path planning under time-dependent uncertainty. In *Proceedings of the 11th Annual Conference*

on Uncertainty in Artificial Intelligence (UAI-95), pages 532–53, San Francisco, CA, 1995. Morgan Kaufmann.

- [99] M. P. Wellman. Fundamental concepts of qualitative probabilistic networks. *Artificial Intelligence*, 44(3) :257–303, 1990.
- [100] A. K. Ziliaskopoulos and H. S. Mahmassani. Time-dependent, shortest-path algorithm for real-time intelligent vehicle highway system applications. *Transportation Research Record*, 1408 :94–100, 1993.