Rapport de stage de DEA Réseaux et Systèmes distribués
(ESSI Sophia-Antipolis)

Routage dans les constellations de satellites

Jean-Noël Petit

Responsable de stage
Afonso Ferreira & Jérôme Galtier

Juin 1998

Projet SLOOP (CNRS/INRIA/UNSA)
INRIA Sophia-Antipolis

Je remercie mes responsables de stage Afonso FERREIRA et Jérôme GALTIER pour leurs conseils et la confiance qu'ils m'ont accordée. Je remercie également l'équipe du projet SLOOP pour l'accueil et la bonne ambiance qui régnait. Enfin, pour l'implémentation du simulateur de constellations je remercie Laurent VILLEFRANCHE et Hervé RIVANO pour leur participation.

Table des matières

Table des figures

Résumé

Les constellations de satellites sont dans l'air du temps. Plusieurs sont déjà en cours de réalisation et d'autres sont déjà au stade du projet. Ces nouveaux réseaux de communications vont proposer tous les services actuels et bien d'autres encore. Après avoir détaillé les différents types de constellation de satellites nous nous intéressons à une certaine catégorie d'entre elles dont les satellites forment un réseau maillé dans l'espace. Nous étudions alors les solutions proposées de reroutage de communications dans ce type de réseau dont les noeuds sont mobiles. Enfin, nous envisagerons deux algorithmes que nous évaluerons selon différents critères de qualité ; on finira par l'implémentation d'un simulateur de constellation afin de valider les résultats obtenus sur ces deux algorithmes.

Introduction

La constellation de satellites Iridium, qui doit offrir des services de téléphonie personelle entre en service dès le mois de septembre 1998. Ce n'est qu'un début, d'autres constellations devraient suivre dans les années qui viennent. Les constellation de satellites sont des systèmes de communications qui comprennent plusieurs dizaines de satellites ; les projets en cours utilisent de 48 (Globalstar)[SS97] à 288 satellites (Teledesic) [Mon97] réparties sur plusieurs orbites. La présence d'un nombre aussi important de satellites au sein d'un même système pose forcement un certains nombres de question. Par exemple, suite à l'utilisation de telles constellations pour offrir des services semblables à ceux des réseaux cellulaires (téléphonies, télécopie, etc...) on est amené à se demander comment s'effectue le routage des communications à travers les satellites ? Comme aucune information n'a été divulguée sur ces mécanismes dans Iridium, nous allons, en se basant sur les recherches déjà entreprises, étudier différentes réponses.

Chapitre 1

Pourquoi des constellations ?

Comme l'orbite géostationnaire est bien encombrée, surtout au dessus des zones économiquement fortes, on fait appel aux constellations sur des orbites plus basses (LEO, MEO [1]) [Mon97] pour proposer de nouveaux services. Ainsi on peut tirer partie des délais de transmission Terre-Satellite relativements faible des constellations en basse orbite (LEO) de l'ordre de 10-15ms (les délais de transmission vers un satellite géostationnaire sont de l'ordre de 120 ms)[Mon97] pour améliorer la téléphonie par satellite ou proposer des services temps réels ou intéractifs (vidéo, internet, etc...)[McC97] [HS97] [Sfo97].

De plus, contrairement aux satellites géostationnaires qui ne peuvent couvrir parfaitement les zones de la Terre dont la latitude est supérieure à 70° (New York, Paris, Londres et Berlin entre autres sont dans cette zone), les constellations peuvent aller jusqu'à couvrir la Terre entière.

1.1 Définitions

On peut différencier les constellations selon plusieurs caractéristiques : La première est le type d'orbite sur laquelle sont placées ses satellites et plus particulièrement l'inclinaison de ces orbites par rapport à l'équateur. En effet, les satellites géostationnaires utilisent une orbite équatoriale donc pas inclinée du tout alors que la constellation Iridium par exemple (figure 1.1), utilise des orbites qui passent au dessus des pôles (polaires) et qui forment donc un angle

1. LEO: Low Earth Orbit, c'est à dire qu'ils utilisent une altitude comprise entre 400 et 1500km. MEO: Medium Earth Orbit, altitude comprise entre 5000 et 13000km.

de 90° environ avec le plan de l'équateur. Il existe aussi des constellations dont l'inclinaison des orbites est comprise entre 0 et 90°, comme par exemple les orbites de Walker [KM97] [WDB97] de la constellation M-Star.

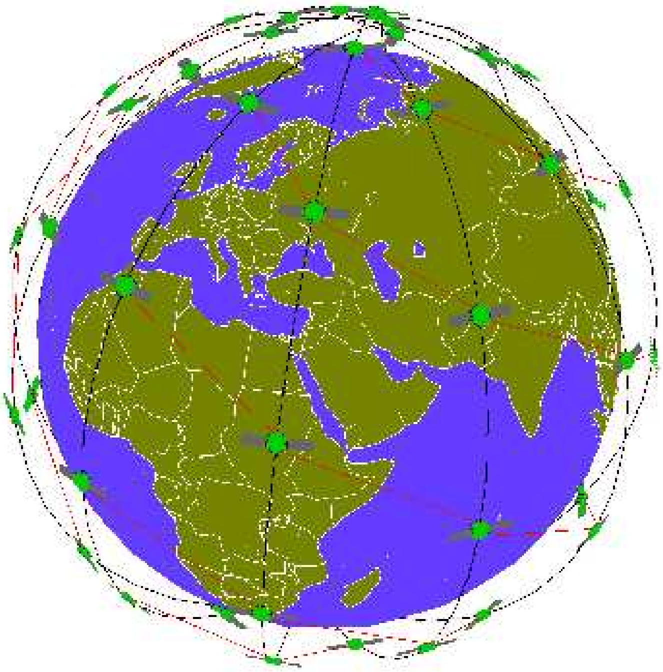


FIG. 1.1 - *Constellation Iridium*

Les constellations de satellites se différencient également par la topologie du réseau que forme leurs satellites. Certaines comme Iridium et Teledesic utilisent des liens de communication entre satellites afin de former un réseau maillé dans l'espace : on nomme ces liens des ISLs [2].

Enfin, les constellations à orbites polaires possèdent deux particularités, la première est d'offrir une couverture globale de la Terre (figure 1.2) et la deuxième est de créer dans le réseau de satellites une zone où les orbites tournent à contre-sens : la couture.

On appele zone de couverture d'un satellite la partie de la surface de la Terre à partir de laquelle un utilisateur est capable de communiquer avec le satellite. Alors que pour un satellite géostationnaire cette zone est fixe, dans le cas des constellations qui utilisent d'autres types orbites, cette zone se

2. ISL: Inter Satellite Link.

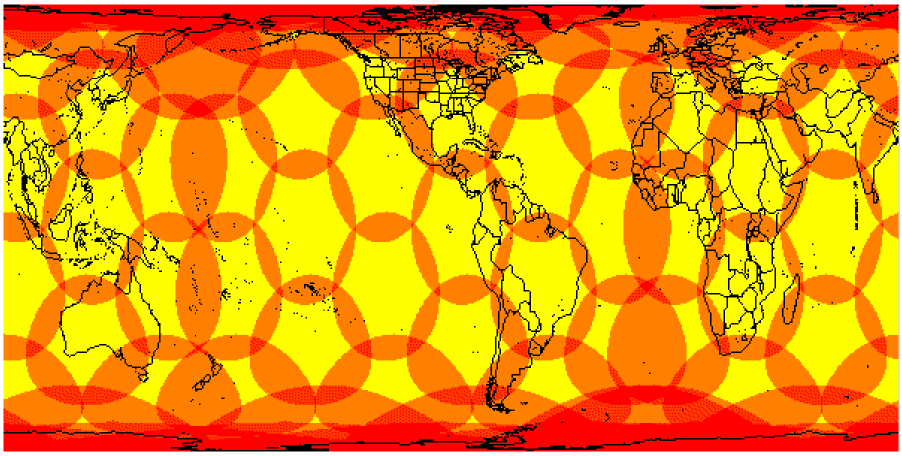


FIG. 1.2 - *Couverture des satellites de la constellation Iridium*

déplace avec le satellite. De même on définit le temps de couverture comme la durée pendant laquelle un satellite peut conserver une communication avec un point sur la Terre. Par soucis de réutilisation des fréquences employées pour la communication avec la Terre, la couverture d'un satellite est divisée en cellules [RM97].

Lorsqu'un utilisateur change de zone de couverture on dit qu'il subit un handover. On utilise ce même terme pour désigner le passage à l'intérieur même de la couverture d'une cellule à une autre. Le handover est causé la plupart du temps par le déplacement des satellites (le mouvement d'un utilisateur terrestre est négligeable par rapport à celui des satellites).

1.2 Architectures

Un système de communications par constellation de satellites ne comporte pas seulement des satellites et des terminaux. En effet, si on veut proposer une connexion avec d'autres systèmes comme le téléphone par voie terrestre, il faut établir un ou plusieurs ponts (gateways) vers ces systèmes (figure 1.3). Dans le cas d'Iridium, ce ne sont pas moins de 16 gateways qui sont répartis sur la planète (figure 1.4). Ainsi, les satellites utilisent la constellation même pour router une communication vers une destination extérieure. On peut imaginer qu'une telle constellation puisse fonctionner avec un seul gateway au départ et être enrichie par la suite. On remarque également que cela procure

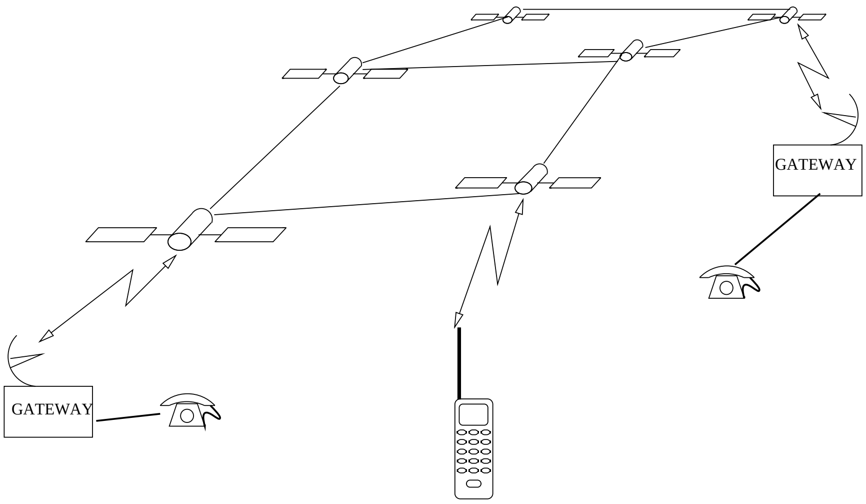


FIG. 1.3 - *Architecture du système de communication*

une robustesse de la globalité de la couverture face aux pannes éventuelles d'un ou plusieurs gateways [Mon97]; il suffit qu'il en reste au moins un ! Dans une constellation comme Globalstar (sans ISL) chaque satellite pour être utilisable doit posséder à tout moment un gateway dans sa zone de couverture. Pour palier à une éventuelle panne d'un gateway, il est nécéssaire que chaque satellite ait en permanence deux gateways dans sa zone de couverture.

1.3 Utilisations

Les domaines d'utilisation sont extrèmements variés. On peut considérer déjà l'ensemble du système de positionnement par satellites GPS (Global Positioning System) comme une constellation. Mais les possibilités de constellations de satellites sont supérieures. Les projets actuels (Iridium, Globalstar) concernent la téléphonie mobile personelle, la télécopie et l'envoi de messages courts. A première vue, rien de plus que ce que permettent les téléphones cellulaires actuels. La nouveauté vient de la couverture et du mode de fonctionnement de ces systèmes ; en effet, non seulement un utilisateur est couvert sur la totalité du globe (dans le cas des constellations à orbites polaires car les autres couvrent plus ou moins les pôles) mais en plus il utilise le même appareil partout ! La cible privilégiée est bien sur le grand voyageur qui n'a plus dès lors besoin de se demander si il pourra être joint là où il va. Mais toutes

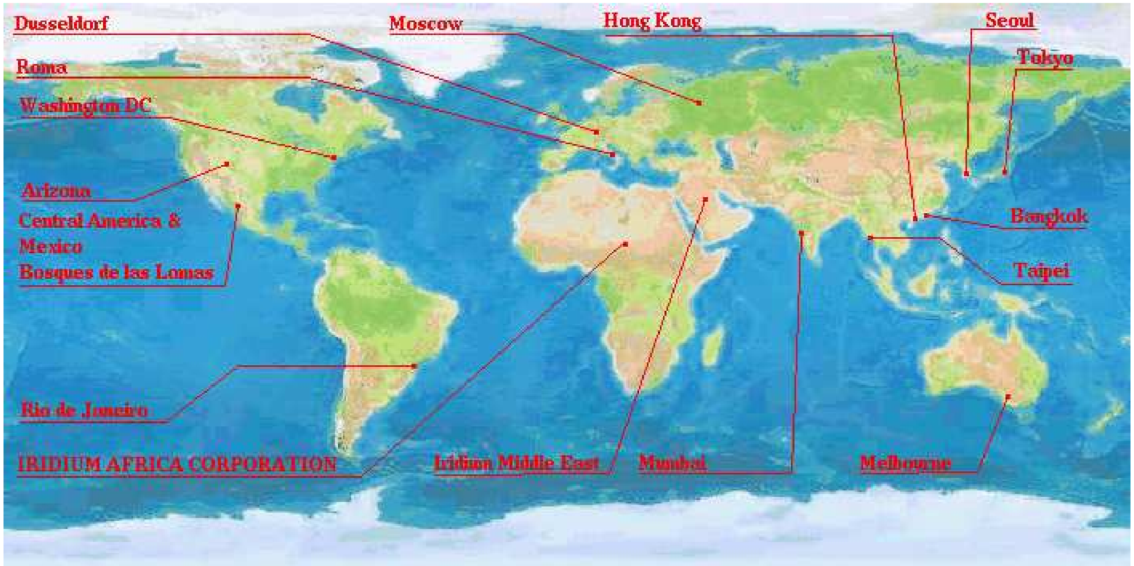


FIG. 1.4 - *Répartition des Gateways de la constellation Iridium*

sortes d'utilisations sont envisageables, sur terre, mer, et même dans les airs. Les couteux systèmes de communication par satellite géostationnaires utilisés dans la marine marchande peuvent être avantageusement remplacés par ces nouveaux téléphones portables, de même que la plupart des équipements de radio utilisés dans la naviguation de plaisance ou sur terre. L'utilisation en avion risque néanmoins d'être restreinte à cause d'éventuelles interférences avec les équipements de vol. Le consortium Iridium prévoit même l'installation dans des pays étendus et où les infrastructures terrestres sont inexistantes des cabines téléphoniques utilisant leur constellation et alimentées à l'énergie solaire.

1.4 Problèmes posés

Enfin, les projets futurs (Teledesic, Skybridge, Celestri) utilisent des constellations pour transmettre des flux multimédias hauts débits directement vers l'utilisateur ou la réalisation de backbone [3] entre deux sites.

Dans cette étude, nous nous intéressont aux problèmes de routage et de

3. Liens haut débit permanents

reroutage de communications dans une constellation qui utilisent des liens intersatellites. En effet, dans les constellations qui n'utilisent pas d'ISL les satellites jouent le rôle de relais entre deux stations au sol : les problèmes de routage posés sont différents et ne sont pas abordés ici.

Dans une première approche, une constellation comprenant des liens intersatellites peut être vue comme un graphe et donc les problèmes de routage peuvent être résolus à l'établissement des communications. C'est ce qui se passe dans les réseaux mobiles terrestres, où le coeur du réseau constitué de l'ensemble des émetteurs est fixe et ce sont les terminaux qui sont mobiles. Dans les constellations, non seulement les terminaux peuvent être mobiles mais aussi les noeuds du réseau (satellites) se déplacent provoquant des handover [Hub97]. Mais là où dans les réseaux mobiles le déplacement des terminaux est quasi imprévisible, la dynamicité de la topologie des constellations est déterministe car régie par les lois de la gravitation. De plus dans les constellations dont les satellites utilisent des orbites polaires, comme Iridium (figure 1.1), il est techniquement compliqué de maintenir des ISL à travers les coutures et donc ils n'existent pas. A cause de la rotation de la Terre, les coutures se déplacent par rapport a la surface de la Terre et elles occasionnent donc des difficultés dans le reroutage des communications.

Chapitre 2

Etat de la recherche

Les problèmes posés par les constellations de satellites qui utilisent des ISL sont étudiés depuis quelques années et des solutions ont été proposées concernant les algorithmes de reroutage après un handover dans l'optique principalement de communication en mode connecté comme ATM [WDV+97] [WDB97].

2.1 Première approche

En considérant l'évolution du temps comme une suite d'instants discrets, on peut considérer que la dynamicité de la topologie du réseau est une succession de topologies statiques. Comme les changements de la topologie du réseau sont prévisibles et calculables à l'avance, il suffit [WDV+97] [WDB97] de calculer l'ensemble des routes successives utilisées par les communications et de les stocker dans les satellites. Ensuite, à chaque instant, il suffit de mettre à jour les tables de routage des satellites. En fait, pour chaque route et chaque instant, plusieurs chemins sont calculés : le meilleur et k alternatives, avec k inférieur ou égal au nombre de liens ISL que comportent chacun des satellites de la constellation. Ces opérations sont effectuées avant l'établissement de la communication et par les gateways qui possèdent des capacités de calcul supérieures à celles embarquées dans les satellites.

Remarquons que cet algorithme considère que les durées de communications soient connues à l'avance, ce qui n'est pas le cas des communications téléphoniques. De plus, en reportant dans les gateways les calculs préliminaires, il crée un surplus de messages de signalisation dans le réseau.

2.2 Deuxième approche

On peut définir pour chaque communication sa route dans la constellation par la succession des satellites empruntés : $S_1 \rightarrow S_2 \rightarrow ... \rightarrow S_k$ où S_1 et S_k sont respectivement les satellites source et destination et peuvent être notés S_S et S_d. Cette route initiale est calculée comme optimum par un algorithme de routage quelconque. On considère une topologie où il n'y a pas de coutures et où les liens intersatellites sont permanents. Ainsi, on est sur que dans un délai maximum égal au temps de couverture d'un satellite la route initiale devient : $S'_1 \rightarrow S'_2 \rightarrow ... \rightarrow S'_k$ où les S'_i sont les successeurs (satellite suivant sur la même orbite) ou les voisins successeurs (satellite voisin sur l'orbite adjacente) des S_i. L'algorithme FHRP (Footprint Handover Rerouting Protocol) [UYA97] repose sur cette propriété. Il se décompose en deux temps, la période d'augmentation et le Footprint Rerouting. L'augmentation consiste lors du premier handover de la source, par exemple (satellite S_S vers le satellite S'_S), à raccorder le nouveau satellite S'_S à l'ancienne route pour former la route $S'_S \rightarrow S_S \rightarrow S_2 \rightarrow ... \rightarrow S_d$. Evidemment, si S'_S fait partie de l'ancienne route $S_S \rightarrow S'_S \rightarrow S_2 \rightarrow ... \rightarrow S_d$, celle-ci est raccourcie, et de même si il existe un lien direct entre S'_S et un des satellites de l'ancienne route, cette dernière est alors amputée. Ce mécanisme fonctionne de manière identique si c'est S_d qui subit le premier handover.

Quand les satellites source et destination sont remplacés par leurs successeurs ou voisins successeurs, le Footprint Re-routing consiste à remplacer la route actuelle par celle formée par tous les successeurs des satellites qui formaient la route initiale. Ainsi, la nouvelle route est :$S'_S \rightarrow S'_2 \rightarrow ... \rightarrow S'_d$ Si à un moment ou à un autre il est impossible d'utiliser les nouveaux liens, on fait appel à l'algorithme de calcul de route initial pour en établir une nouvelle. Il y a ainsi un risque de coupure de la communication suite à un handover.

Remarquons que les performances de cet algorithme sont bonnes en termes de blocage des nouveaux appels ou de coupures des communications existantes, mais la durée moyenne d'une communication à été fixée à 3 min [WM97] [UYA97] [Wer97], avec un temps de couverture des satellites de 10 minutes. (Ainsi la plupart des communications ne subissent en fait pas de handover).

Chapitre 3

Deux stratégies de routage/reroutage

On va s'attacher à proposer des algorithmes de routage/reroutage distribués et qui tirent partie de la propriété détérministe de la constellation.

3.1 Modèle choisi

Notre modèle est basé sur la constellation Iridium ; en effet il utilise des orbites polaires et des liens intersatellites intra [1] et inter [2] orbite (figure 3.1). La constellation Iridium propose des services de téléphonie personelle et de transmission de courts messages en utilisant 66 satellites à 780km d'altitude (LEO) répartis en 6 orbites quasi-polaires. Ainsi, chaque satellite accomplit une révolution en 100 minutes et son temps de couverture est de 10 minutes. De plus à cause de la rotation propre de la Terre, que l'on prend égale à 24 heures, un handover vers l'Est a lieu toute les deux heures. Les zones de couverture des satellites sont de forme rectangulaire et, sur deux satellites successifs d'une même orbite se recouvrent sur $\frac{1}{10}$ de leur longueur. De même, les zones de couvertures de deux satellites d'orbites adjacentes se recouvrent également sur $\frac{1}{10}$ de leur largeur. Nous ne prenons pas en compte les handover entre cellules d'un satellite qui ne font pas intervenir le reste de la constellation, pour nous concentrer sur les handover entre satellites. On choisit de repérer les objets de la constellation (satellites, objets terrestres) par leurs

1. entre satellites d'une même orbite.
2. entre satellites d'orbites adjacentes.

coordonnées géographiques (longitude, latitude, altitude) ce qui semble naturel et permet de simplifier le routage(les tables de routage se ramènent à savoir router vers les 4 points cardinaux).
Enfin, on choisit d'effectuer le maximum de la route entre la source et la destination sur la constellation ; ainsi une communication type depuis un portable vers un poste extérieur à la constellation (un abonné filaire par exemple) va utiliser au maximum la constellation jusqu'au gateway le plus proche de la destination. Inversement, si la source est extérieure à la constellation, on demande aux réseau auquel elle appartient de router l'appel vers le gateway de la constellation le plus proche.

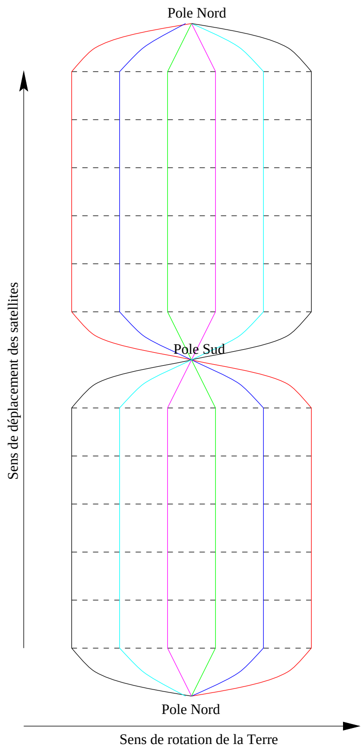


FIG. 3.1 - *Modèle de la constellation*

3.1.1 Définitions

On différencie deux types de handover : le handover vers le Sud, d'un satellite vers son successeur sur la même orbite, et le handover vers l'Est d'un satellite vers son voisin située sur l'orbite suivante vers l'est.

Sur notre modèle, une route en x consiste à passer vers un satellite d'une orbite adjacente et une route en y consiste à passer vers un satellite de la même orbite.

3.2 Hypothèses de base

Les algorithmes suivants sont basés sur des mécanismes de reroutage adaptatifs, qui se prêtent mieux à un environnement réparti, que ceux basés par exemple sur le précalcul des routes successives avant l'établissement de la communication.

Dans la constellation Iridium, les liens intersatellites entre satellites d'orbites adjacentes ne sont pas permanents ; en effet, lorsque deux satellites d'orbites adjacentes reliés par un ISL passent le pôle, ils se croisent et le lien ne peut pas techniquement être maintenu. Il est interrompu quelques instants, le temps du croisement. Si une route utilise un lien intersatellite qui est momentanément coupé au passage du pôle, elle a besoin d'être reroutée même si aucune de ses extrémités ne subit un handover. Pour nous concentrer sur les reroutages dûs au handover, nous considérons que tous les liens sont permanents. Enfin, la vitesse des satellites étant de l'ordre de 27000 km/h [RM97] il est raisonnable de considérer les stations terrestres (terminaux ou gateways) comme fixes.

Grâce à la zone de recouvrement entre les zones de couverture de deux satellites d'orbites adjacentes, on peut retarder un handover vers l'Est d'un terminal jusqu'a son prochain handover vers le Sud. On nomme cette situation un handover vers le SudEst

3.3 Premier algorithme

Dans cet algorithme on utilise la différence de latitude entre la source et la destination en réalisant un routage $y/x/y$. Le principe de l'algorithme ensuite est de conserver le plus longtemps possible la partie de la route en x.

3.3.1 Etablissement de la communication

On différencie deux cas :

- Les satellites source et destination d'une communication sont sur la même face de la Terre, c.-à-d. que la route la plus courte qui joint les deux ne passe pas par un pôle. On appelle face montante celle sur laquelle les satellites se déplacent du Sud vers le Nord et face descendante celle où les satellites se déplacent du Nord vers le Sud. Sur la face montante, on établit la route depuis l'extrémité la plus au Sud vers la plus au nord avec un routage x/y (figure 3.2).
  Sur la face descendante, on établit la route depuis l'extrémité la plus au Nord vers la plus au Sud avec un routage x/y.

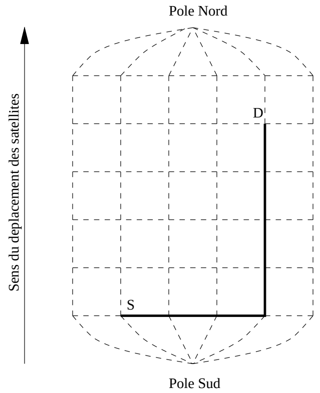


FIG. 3.2 - *Route initiale optimale*

- Si les deux extrémités ne sont pas sur la même face, il faut tout d'abord déterminer par quelle pôle on va passer. Pour ce faire on va chercher a minimiser la distance en y entre les deux extémités en utilisant un routage x/y (figure 3.3). Dans ces conditions, la route entre deux satellites est unique et est optimale en nombre de liens empruntés. Si au moins une des ressources (lien ou satellite) qui compose cette route est indisponible, l'établissement de la communication est un échec.

3.3.2 Réaction au handover

On a vu que le handover vers l'est est retardé jusqu'au handover suivant vers le sud. Donc il reste deux situations à gérer, le handover vers le Sud et

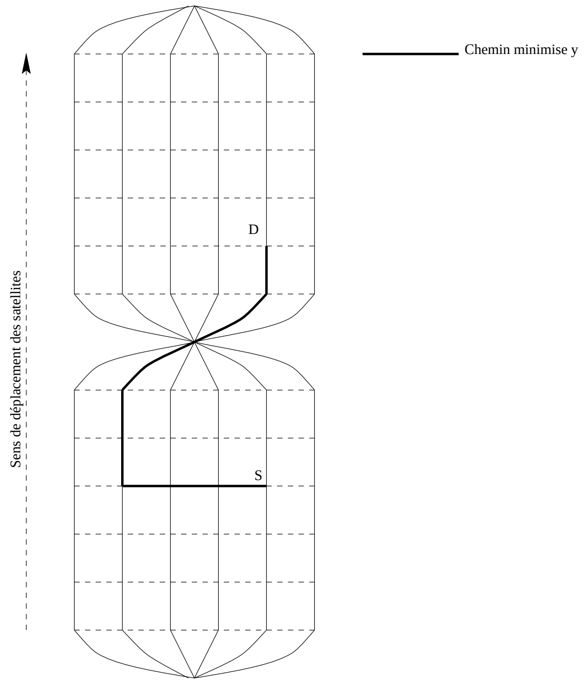


FIG. 3.3 - *Choix de la route par les pôles*

le handover vers le SudEst.

Handover vers le Sud

Commençons par regarder d'abord le cas ou le handover vers le Sud n'est pas précédé par un handover vers l'Est.
On considère par exemple la face montante, les satellites se déplacent du Sud vers le Nord (l'algorithme est symétrique pour l'autre face ou le déplacement s'effectue du Nord vers le Sud) ; en appliquant l'algorithme d'établissement de la route on constate que depuis l'extrémité la plus Sud la route emprunte des liens x jusqu'à atteindre l'orbite de l'extrémité Nord et se poursuit ensuite sur des liens y.

A chaque handover, la route est alternativement augmentée en y depuis l'extrémité Sud et diminuée en y vers l'extrémité Nord. Cet enchainement à lieu tant qu'il n'y a pas de handover vers l'Est et que la route en y vers l'extrémité Nord est non nulle (figure 3.4). De plus, dans cet algorithme le

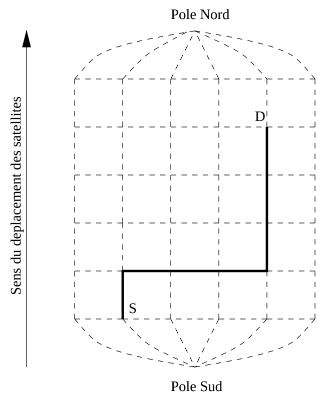


FIG. 3.4 - *Route après un handover*

nombre de liens qu'emprunte la route reste constant après les handovers de chacune des extrémitées. Néanmoins à chaque allongement de la route en y il y a un risque qu'elle soit coupée car les ressources nécéssaires ne sont pas présentes. Voyons ce qui se passe quand la route depuis le Sud vers le Nord devient seulement y/x (figure 3.5). La solution qui consiste à allonger dès lors la route en y des deux côtés présente deux inconvénients : Le premier c'est que le nombre de liens va augmenter à chaque handover et le second c'est que le risque de ne pas trouver les ressources nécéssaires double. C'est pourquoi il est préférable dans cette situation de redéfinir une nouvelle route, semblable à celle utilisée à l'établissement de la communication. Malgré un fort risque d'échec dans cette manoeuvre on retrouve ensuite la situation favorable où à chaque handover les risques sont minimums et la route est de nouveau optimale en nombre de liens empruntés.

Handover vers le SudEst

Dans le cas ou le handover vers le Sud a lieu alors qu'un handover vers l'Est à été enregistré, on décide de redéfinir une route optimale en x/y. On obtient une nouvelle route optimale avec les risques d'échec que cela comporte pour son établissement.

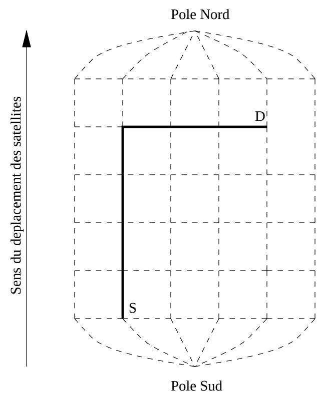


FIG. 3.5 - *Route limite*

3.3.3 Situation critique

Dans le cas où la source et la destination sont à des latitudes proches, c'est à dire couvertes par des satellites se situant sur la même ligne, on se retrouve dans la situation où la route de l'extémité sud vers l'extrémité nord est en y/x avec y nul. On a donc besoin de redéfinir une nouvelle route à chaque handover, avec les risques déjà cités. Dans cette situation, l'idée est d'établir la communication initiale en y/x/y, en utilisant une route en x plus au sud que la position géographique (figure 3.6). Bien qu'utilisant plus de liens, la route est garantie le temps qu'elle devienne égale à la route optimale ; en effet, tant qu'elle n'est pas égale à la route optimale, la route est raccourcie alternativement à chacune de ses extrémités.

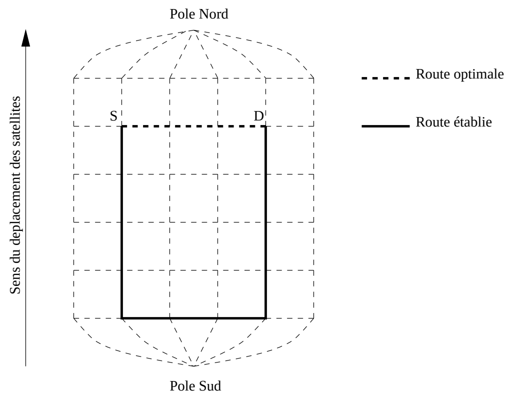


FIG. 3.6 - *Choix de la route en situation critique*

Le choix de la longueur de l'allongement de la route par le Sud est fonction d'un compromis entre la garantie que l'on veut offrir et le délai que cet allongement induit. Néanmoins, c'est un cas de figure qui va être très courant dans les constellations de satellites ISL où la plus grande partie des communications ont lieu dans l'hémisphère nord, aux alentours du 45ème paralèlle.

3.3.4 Synthèse

Cet algorithme est simple dans son implémentation. Il n'offre aucune garantie de durée sur la continuité de la communication suite à un handover, mais limite les risques en minimisant le nombres de liens nouveaux qui sont sources d'echec du reroutage. Soit une route optimale de départ qui comporte n liens. Un algorithme simple qui recalcule une route optimale après chaque handover à besoin d'au plus $n-1$, ou $n+1$ liens nouveaux pour la nouvelle route alors qu'en dehors des situations critiques et des handover vers l'Est celui ci n'en nécéssite au plus qu'un (pour rejoindre l'ancienne route).

Néanmoins, dans la situation d'un handover vers l'Est, il est nécéssaire de recalculer une route complète et alors cet algorithme n'apporte rien de plus.

3.4 Deuxième algorithme

La durée d'une communication n'est pas à priori connue à l'avance et en particulier au moment de son initialisation. Cet algorithme vise à garantir à l'utilisateur que sa communication ne sera pas coupée tant que ni la source ni la destination de cette communication ne subit un handover vers l'Est.

3.4.1 Principes

Soit T le temps de couverture d'un satellite. Par définition du temps de couverture, T minutes au plus après son établissement chacune des communications aura subi un handover de chacune de ses extrémités. L'idée est de réserver les ressources nécéssaires (liens ou satellites) à la communication pour la route qui sera utilisée T minutes après sa création, et ensuite de propager ces réservations au fur et à mesure des handover.

3.4.2 Remarques

Dans un premier temps il semblait que cet algorithme permettait de garantir l'existence d'une communication sur une durée indéterminée. Mais il est apparu que les réservations destinées à rétablir une route après un handover vers l'Est empiètent sur celles d'autres communications. Donc les réservations de ressources destinées à répondre à un handover vers l'Est sont effectuées avec une priorité inférieure à celle initiées par un handover vers le Sud si elles sont concurrentes. Dès lors, les communications qui subissent un handover vers le Sud ne sont pas gênées par celles qui subissent un handover vers l'Est car ces dernières ne sont pas prioritaires. Ainsi, si une communication qui va subir un handover vers l'Est n'a plus de ressources réservées, elle doit recommencer. Si aucune nouvelle réservation n'est possible, la communication sera coupée lors de son handover vers l'Est.

3.4.3 Etablissement de la communication

La première partie de l'algorithme consiste à établir la route initiale de la communication au temps $t = t_0$. C'est le premier élément de la constellation concerné qui s'en occupe. Par exemple dans le cas ou l'appel provient de l'extérieur de la constellation c'est le rôle d'un gateway. Ce mécanisme est indépendant de l'algorithme de routage utilisé, mais en choisissant un routage particulier, on facilite comme on le verra plus loin le calcul de la route future d'une communication. On choisi un routage en x/y en choisissant une route optimale, c'est à dire la plus courte en terme de nombre de liens empruntés. On note $S_s \rightarrow S_1 \rightarrow ... \rightarrow S_d$ la route ainsi obtenue avec S_s et S_d les deux satellites extrémitées.

En même temps on réserve les liens et ressources nécessaires à partir du satellite qui couvrira la source à $t = t_0 + T$ vers le satellite qui couvrira la destination à ce même instant (figure 3.7). Ces réservations sont la route $S'_s \rightarrow S'_1 \rightarrow ... \rightarrow S'_d$ ainsi que que le lien qui joint S'_s à S_s si S_s est l'extrémité qui subit un handover. En fait il n'est pas besoin que ces ressources soient disponibles a $t = t_0$ mais elles doivent l'être quand on en aura besoin, c'est à dire lors du handover de la source ou de la destination. Ainsi on optimise l'utilisation des ressources en permettant à d'autres communications de les utiliser, sous réserve qu'elles les libèrent à temps.

On remarque que la route $S'_s \rightarrow S'_1 \rightarrow ... \rightarrow S'_d$ se déduit facilement de la route initiale car chaque S'_i est le suivant dans la même orbite de S_i.

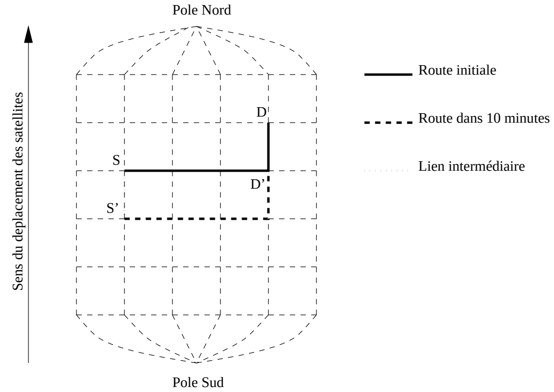
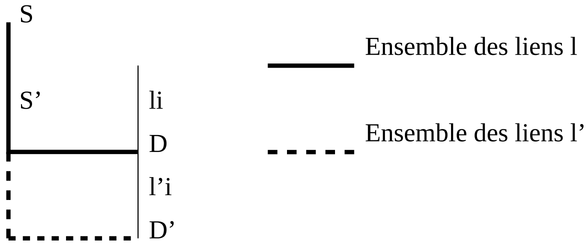


FIG. 3.7 - *Réservations initiales*

Théorème 1 *Si la réservation d'un ensemble de liens l a réussie, alors on peut toujours faire la réservation de l', ensemble des liens utilisés après le handover vers le Sud de chacune des deux extrémités.*



Démonstration:

On note S et D respectivement la source et la destination de la communication et l la route entre les deux et l' la route suivante. On considère que D subit un handover en premier et on note l'_i le lien qui relie D à D'.

t_l instant de réservation de l
$t_{l'}$ instant de réservation de l', $t_{l'} = t_l + T$
t_{li} instant de réservation de l_i
$t_{l'i}$ instant de réservation de l'_i, $t_{l'i} = t_{li} + T$

On va montrer que si la réservation de $l' + l'_i$ échoue, c'est que la réservation de $l + l_i$ n'avait pas pu réussir.

Si la réservation de $l' + l'_i$ échoue c'est que soit un lien de l' soit l'_i est déjà réservé.

Soit au temps $t_{l'i}$ la communication utilise l_i donc on doit réserver l'_i.
Si il a déjà été réservé par une autre communication c'est à un temps t, $t < t_{l'i}$.
Or si ce lien à été réservé à l'instant t, c'est que la communication qui l'emprunte utilisait alors le lien l_i lui même réservé à $t - T$.Comme $t < t_{l'i}$ alors $t - T < t_{li}$ donc la réservation de l_i n'a pas pu avoir lieu.

De même on montre que si un lien de l' ne peut pas être réservé au temps $t_{l'}$ cela implique que l'ensemble l n'a pas pu être réservé non plus.

3.4.4 Réaction au handover vers le Sud

Le handover intra satellite est géré par le mobile, il dialogue avec le satellite afin de changer de cellule et demande la réservation dans la cellule suivante. Même si à l'instant de la réservation la ressource est indisponible, elle le deviendra au moment ou il y en aura besoin. En effet, la communication qui utilise la cellule va forcement subir un handover avant celle qui vient d'en subir un.

Le handover inter satellite est plus difficile à gérer : en effet, aussi bien la source que la destination vont subir un handover dans un temps inférieur ou égal à T (durée de couverture d'un satellite) à partir de n'importe quel instant. Bien sur la plupart du temps chacune subira le handover à un moment différent. Dans la suite on ne parlera que du handover inter satellite.

De même que dans l'algorithme précédent, un handover vers l'Est est toujours retardé jusqu'au prochain handover vers le Sud (grâce à la zone de recouvrement entre satellites d'orbites adjacentes). Lors du handover vers le Sud, on rallonge simplement la route vers le satellite suivant en utilisant le lien réservé précédemment(figure 3.8). Comme dans T minutes cette extrémité subira de nouveau un handover, il faut dès maintenant effectuer la réservation du lien vers le satellite suivant. Bien sur, si sur notre exemple c'était l'extrémité notée D qui subissait le handover en premier, on se bornerait à raccourcir la route sans avoir besoin d'effectuer de réservation de lien de transition entre les deux handover. Lorsque la deuxième extrémité subit le handover, il suffit d'utiliser la route qui avait été réservée et de recommencer.

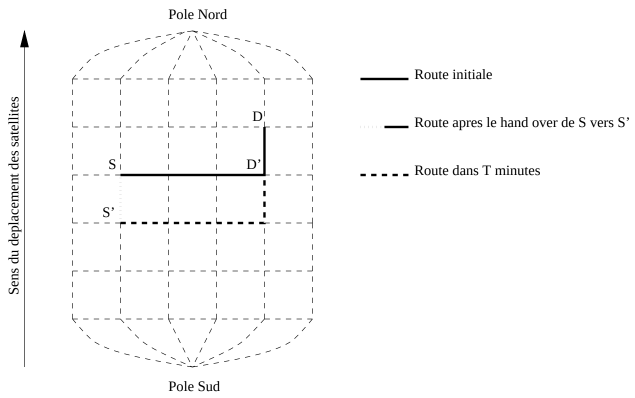


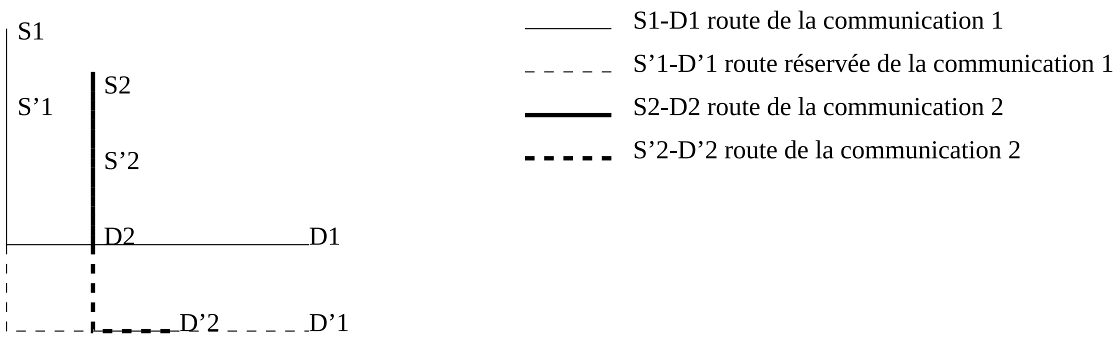
FIG. 3.8 - *handover sud*

3.4.5 Handover vers l'Est

Malheureusement, un handover vers l'Est généralement perturbe ce bel enchainement. En effet, en réservant les ressources nécéssaires, à cause du décalage vers l'Est, on empiète alors sur des réservations effectuées par d'autres communications qui jusqu'à cet instant ne gênaient pas.

Comme on ne veut pas interférer avec les communications qui subissent des handover vers le Sud et que le handover vers l'Est ne se produit pas souvent, on préfère établir une réservation non prioritaire, c'est à dire qu'elle peut être annulée par celle d'une autre communication. Bien sur, suite à cette annulation, on ne peut plus garantir au delà de 10 minutes, délai durant lequel on peut retarder le handover vers l'Est.

Comment le handover vers l'Est interfère-t-il avec les réservations ?



Soient deux communications dont les routes sont distinctes, c.-à-d. qui n'ont aucun lien commun comme sur le schéma ci-contre. On voit que suite à un handover vers l'Est la réservation de la communication 1 va par exemple écraser celle de la communication 2, qui a été effectuée précédemment.

Chapitre 4

Comparaison des algorithmes

Tant que les communications ne subissent pas de handover vers l'Est, les deux algorithmes sont sensiblement différents. Le premier est simple mais comporte des risques de coupure alors que le second est plus lourd en terme de signalisations (réservations vers les satellites voisins) mais garantie la continuité de la communication.

4.1 Résultats formels

On peut comparer ces deux algorithmes suivant les points suivants :

Le nombre de liens empruntés par une communication après son établissement

Dans chacun des algorithmes on choisit par défaut pour établir une communication une route qui minimise justement le nombre de liens empruntés. Ils sont donc équivalents sur ce point. Néanmoins, on a vu que dans le cas où la source et la destination sont couvertes par des satellites de même latitude, il est intéressant, pour retarder l'instant ou la route doit être entièrement recalculée, d'établir une route non optimale. Sur ce point, l'algorithme de réservation ne permet pas cette modification et calculera dans tous les cas la route optimale.

La longueur physique d'une route entre les satellites source et destination

C'est la valeur en kilomètres par exemple de la somme des longueurs des liens intersatellites empruntés par une route et elle est directement liée au délai de transmission sur celle-ci. On s'aperçoit en effet qu'une route qui utilise des liens intersatellites au dessus de l'équateur pour relier deux orbites est plus longue qu'une autre qui, pour relier les mêmes orbites, utilise des liens plus près d'un pôle. Prenons un exemple sur notre modèle. Soit une route entre les orbites les plus éloignées, c'est à dire espacées de $5 * 30°$ soit 150°. La longueur d'un lien entre deux satellites d'orbites adjacentes est égale à la longueur de la corde qui les relie ; cette longueur est donnée par la formule $l = 2Rsin(\frac{\theta}{2})$ avec R la distance à l'axe de rotation de la Terre des deux extrémités de la corde et θ l'écart entre deux orbites. Avec un rayon de la Terre égal à 6500 kilomètres et une altidude des satellites de 800 kilomètres la somme des longueurs des liens utilisés au niveau de l'équateur est égale à: $5 * 2 * (6500 + 800) * sin(\frac{30}{2})$ soit 19000 kilomètres environ. Maintenant une route rejoignant les mêmes orbites à 70° de latitude a une longueur de 6500 kilomètres environ. Le délai de transmission sur la route à l'équateur est de 64 ms contre 21 ms sur celle à 70° de latitude.
Il reste à ajouter le délai du déplacement éventuel, sur une même orbite, pour rejoindre le satellite qui couvre l'autre extrémité qui emprunte au maximum 6 liens soit un délai de 72ms.Pour des applications téléphoniques, le délai n'est pas perceptible à l'utilisateur tant qu'il reste inférieur à 150 ms. Les deux algorithmes ne cherchent pas à optimiser ce délai car il reste même dans le cas le pire en dessous de la valeur limite de 150ms.

La variation du nombre de liens empruntés après chaque handover

Dans le premier algorithme on a vu qu'alternativement un handover rallonge la route puis la raccourci. La variation du nombre de liens est donc de plus ou moins un. Sauf dans le cas du handover vers l'Est ou il est alors possible que l'extrémité qui subit le handover traverse la couture. La route est alors complètement recalculée et la variation du nombre de liens empruntés peut être importante. En fait l'algorithme avec réservation se comporte de la même manière. En effet, dans le cas des handover vers le Sud, comme la route réservée est la suivante de la route initiale, le nombre de liens est identique.

Et pour un handover vers l'Est il recalcule aussi une nouvelle route.

La qualité de service

C'est sur ce point que les deux algorithmes se différencient vraiment. La qualité de service, c'est l'aptitude de l'algorithme à garantir la continuation d'une communication après un handover. En effet, alors que le premier peut voir la route utilisée par la communication coupée dès le premier handover vers le Sud, le mécanisme de réservation du second permet de la garantir tant qu'une de ses extrémités ne subit pas un handover vers l'Est.

4.2 Utilisation de la simulation

Nous implémentons un simulateur de constellations de satellites afin de comparer les algorithmes de routage/reroutage présentés selon les critères précédents et les suivants en fonction des paramètres de la constellation comme la capacité des ISL ou le nombre de communication que peut héberger un satellite à un instant donné :

- Pourcentage de réussite d'établissement de la communication
- Pourcentage de communications interrompues
- Impact de la modification des capacités des ISL ou du nombre de gateways sur les deux points précédents

4.3 Modèle de simulation

Le modèle utilisé dans la simulation est semblable à celui décrit précédemment, à savoir une constellation de 66 satellites répartis sur 6 orbites polaires. Le simulateur utilise le moteur de simulation Prosit qui s'adapte parfaitement. Les satellites sont représentés par des objets actifs, et par soucis de simplification leur mouvement est décrit par une orbite exactement polaire (angle de 90°) et parfaitement circulaire. On néglige de même la dérive des orbites car elle affecte toute la constellation. Le système de coordonnées utilisé aussi bien par les satellites que les terminaux (mobiles ou gateways) est un système de coordonnées sphériques, avec un repère centré sur le centre de la Terre et correspondant aux coordonnées géographiques(figure 4.1). Par contre la longitude et la latitude sont comprises entre 0° et 360° au lieu de respectivement 180° Ouest et 180° Est, et 90° Nord et 90° Sud. Le mouvement de la Terre est pris en compte comme une dérive de la constellation dans le sens inverse. Le handover intra satellite (entre cellules) n'est pas simulé car il ne fait pas intervenir d'autres éléments du réseau que le satellite lui même. Dans un premier temps, nous avons voulu implémenter les algorithmes de manière distribuée, comme ils le seraient dans la réalité. Mais pour des raisons de performances liées au moteur de simulation qui ne fonctionne pas de manière répartie, nous avons préféré une gestion centralisée. Nous avons choisi une simulation à temps discret avec un intervalle de discrétisation de 1 minute, qui nous est apparu suffisament fin compte tenu des autres temps des algorithmes, comme la durée de couverture égale à 10 minutes. De plus, on considère que le temps de recouvrement entre deux satellites successifs (d'une même orbite) est lui aussi égal à 1 minute.

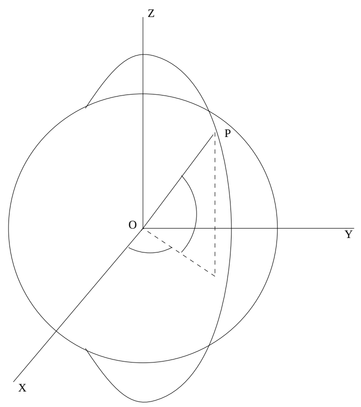


FIG. 4.1 - *Repère utilisé*

4.4 Déroulement d'une simulation

Au démarrage, comme dans la réalité, les satellites sont «lancés». A chaque intervalle de temps, chacun des satellites détecte dans la liste des extrémités de communication qu'il héberge celles qui ont subi un handover ; les communications correspondantes sont alors reroutées suivant l'algorithme choisi. De même, à chaque intervalle, un générateur de traffic simple place des communications sur la constellation. A terme, ce générateur devra tenir compte de l'impact de l'heure et des disparités en terme de besoins et/ou de population en découpant la surface de la Terre en zones distinctes[WM97] [MKM97]. Dans la réalité on ne peut pas savoir combien de temps dure une communication ; nous avons choisi, à sa création de lui fixer une durée paramétrable. En effet, il est interessanr de voir comment se comporte un algorithme avec des durées de 3 minutes (moyenne communément employée et pour laquelle une communication peut ne pas subir de handover [WM97] [UYA97] [Wer97]) ou de 10 minutes et plus pour laquelle il y aura forcement des handover. En fonction de ces durées, le controleur va retirer les communications de la constellation. C'est aussi celui-ci qui répond aux requêtes des satellites pour éxécuter l'algorithme de reroutage.

Conclusion

Bien des domaines et des voies de recherche restent à explorer, en particulier l'utilisation d'un mode non connecté aussi bien pour les transferts de données que pour les communications téléphoniques dans les constellations ISL. En effet, en regardant le fonctionnement du protocole IP (Internet Protocol) on s'aperçoit qu'il est robuste aux pannes donc en particulier aux changement de topologie du réseau qui l'héberge. Le fait que ces changements soient dans les constellations de satellites déterministes doit compenser le fait qu'ils sont plus denses dans le temps. De plus, dans le cadre par exemple de requetes HTTP, le coût en signalisation et en établissement de liens est lourd par rapport à la quantité d'information transportée.

Mais pour rester dans le mode connecté qui semble avoir les faveurs de l'industrie, il est apparu que l'existance du handover vers l'Est (souvent oublié dans la littérature car peu fréquent par rapport au handover vers le Sud) est un problème qui nous a malheureusement empêché de proposer un algorithme qui garantirait à l'infini l'existance d'une communication. Bien que dans le cas de communications téléphoniques dont la durée moyenne est généralement fixée à 3 minutes cette garantie n'aurait pas été d'une grande utilité, elle fait défaut à des constellations multimédias ou backbone qui génèrent des flux continus pendant de longue périodes. On peut également explorer les mécanismes de réservations afin d'améliorer par exemple le reroutage suite a un handover vers l'Est.

On a considéré également que les sources terrestres étaient fixes, mais qu'en est il vraiment ? Et si, profitant de la couverture globale non seulement en surface mais aussi en volume on profitait de ces constellations pour offrir des services nouveaux ? Nous pensons au transport supersonique qui reviendra sans doute à la mode ou alors à des services entres satellites de différents types à différentes orbites : Par exemple un satellite d'observation de la Terre qui plutôt que de stocker les données enregistrées pour les transmettre lorsqu'il passe au dessus de son centre de contrôle utiliserait les services d'une constellation pour les transmettre au fûr et à mesure en quasi temps réel.

Bibliographie

[HS97] Y. F. Hu and R. E. Sheriff. Prediction of the potential demand for mobile broadband satellite services. In *International Mobile Satellite Conference (IMSC'97)*, pages 91–96. JPL Publication, 1997.

[Hub97] Y. C. Hubbel. A comparison of the iridium and amps systems. In *IEEE Network*, pages 52–59. IEEE, March/April 1997.

[KM97] Michael D. Kennedy and Philip L. Malet. Application for authority to construct, lauch and operate the celestri multimedia leo system. pages i–vi 1–79. Federal Communications Commission, Motorola Global Communications, Inc., June 1997.

[McC97] Dawn McCraw. Business model for broadband satellite communication services. In *International Mobile Satellite Conference (IMSC'97)*, pages 115–121. JPL Publication, 1997.

[MKM97] M.Werner, O. Kroner, and G. Maral. Analysis of intersatellite links load in a near polar leo satellite constellation. In *International Mobile Satellite Conference (IMSC'97)*, pages 289–294. JPL Publication, 1997.

[Mon97] J. Montgomery. The orbiting internet fiber in the sky. In *Byte*, pages 58–72, november 1997.

[RM97] J. Restrepo and G. Maral. Guaranted handover (gh) service in a non-geo constellation with "satellite-fixed cell" (sfc) systems. In *International Mobile Satellite Conference (IMSC'97)*, pages 19–24. JPL Publication, 1997.

[Sfo97] M. Sforza. Market perspectives and business potentials for multimedia satellite services in europe. In *International Mobile Satellite Conference (IMSC'97)*, pages 97–102. JPL Publication, 1997.

[SS97] T. Spizzichino and E. Salvatori. Enhancing the coverage of mobile satellite systems: The local signal repeater. In *International Mobile Satellite Conference (IMSC'97)*, pages 565–569. JPL Publication, 1997.

[UYA97] H. Uzunalioglu, W. Yen, and I. F. Akyildiz. A connection handover protocol for LEO satellite ATM networks. In *MOBICOM97*, 1997.

[WDB97] M. Werner, C. Delucchi, and K. Burchard. Atm networking for future isl-based leo satellite constellations. In *International Mobile Satellite Conference (IMSC'97)*, pages 295–300. JPL Publication, 1997.

[WDV+97] M. Werner, C. Delucchi, H.-J. Vogel, G. Maral, and J.-J. De Ridder. Atm-based routing in LEO/MEO satellite networks with intersatellite links. In *IEEE Journal on selected areas in communications*, volume 15, January 1997.

[Wer97] M. Werner. A dynamic routing concept for ATM-based satellite personal communication networks. In *IEEE Journal on selected areas in communications*, volume 15, October 1997.

[WM97] M. Werner and G. Maral. Traffic flows and dynamic routing in leo intersatellite link networks. In *International Mobile Satellite Conference (IMSC'97)*, pages 283–288. JPL Publication, 1997.