

Routage dans les constellations de satellites LEO

Directeur de thèse : Jérôme Lacan (HDR, ISAE-SUPAERO)

Co-directeur de thèse : Emmanuel Lochin (HDR, ENAC)

Co-encadrante : Oana Hotescu (PhD, ISAE-SUPAERO)

Contacts : jérôme.lacan@isae-supaeo.fr, emmanuel.lochin@enac.fr, oana.hotescu@isae-supaeo.fr

Durée : 36 mois

Début de la thèse : septembre/octobre 2023

Etablissement d'accueil : ISAE-SUPAERO/ENAC Toulouse

Salaire brut : 1975 euro/mois

Contexte et problématique :

Les constellations de satellites LEO ont une latence théorique d'environ 1 à 4 millisecondes au contraire des satellites géostationnaires (GEO) qui dépassent la centaine de millisecondes. Cette très faible latence permet d'envisager une infrastructure LEO comme NGI-compatible (Next Generation Internet). Bien qu'il y ait certaines contraintes de déploiement et maintenance, les constellations LEO offrent donc une latence tout à fait acceptable au regard des besoins des applications actuelles.

Les constellations à large bande LEO, comme SpaceX, Starlink, OneWeb et Telesat Lightspeed, cherchent à la fois à combler la fracture numérique, mais aussi à changer la donne pour le service de connectivité en vol (IFC) des compagnies aériennes. En effet, OneWeb et Telesat présentent leurs constellations comme un complément parfait au service IFC en raison de la quantité de capacité que les systèmes mettront à disposition, de la faible latence et de la couverture mondiale, y compris dans les régions polaires.

Les systèmes GEO actuels n'offrent pas de couverture sur les pôles, et ils sont limités dans la quantité de capacité qu'ils peuvent offrir. Dans un article d'Aviation Today de juillet 2021, il est reporté un constat de Brad Grady, analyste principal pour la société de recherche sur l'industrie des satellites NSR, qui déclare « qu'il y aura un certain nombre de préoccupations pour les compagnies aériennes, qu'elles choisissent ou non un service LEO, telles que la zone de couverture et le matériel nécessaire. Mais la plus grande différence du point de vue de l'utilisateur avec le service IFC de LEO par rapport à GEO restera la latence ».

L'ensemble des acteurs du marché des LEO cherchent donc à minimiser cette métrique au maximum afin d'offrir la meilleure qualité de service aux utilisateurs finaux. Or, comme pour tous réseaux, une des briques essentielles de la bonne performance des constellations LEO ayant un impact direct sur la latence des communications est la performance du routage.

La conception d'un algorithme de routage efficace est toutefois un problème critique et complexe. En effet, une constellation LEO se caractérise généralement par un certain nombre de contraintes, telles que des ressources limitées et une capacité énergétique qui est particulièrement différente des infrastructures de communication sur le terrain.

Il existe ainsi de nombreux problèmes à résoudre si l'on veut concevoir un algorithme de routage efficace permettant la minimisation de la longueur du chemin, la réduction du nombre de handovers et l'équilibrage de charge en vue d'optimiser l'utilisation des ressources et de minimiser la congestion au sein de la constellation.

Les trois quarts de la surface de la terre étant océaniques et la répartition de la population terrestre n'étant pas uniforme, il semble évident que des communications via une constellation de satellites

peuvent être, de facto, sources de congestion. En effet, alors que certains satellites peuvent se retrouver sous-utilisés, d'autres peuvent être des contributeurs importants au niveau de la latence car trop surchargés. Il y a quelques années, L. Franck et G. Maral ont proposé un algorithme de contrôle de congestion où tous les satellites conservaient la connaissance du graphe de la constellation entière.

Aujourd'hui, l'un des objectifs premiers des nouvelles propositions de routage est de simplifier au maximum les plans de contrôle/données ou les informations de routage contenues dans le plan de données. L'idée étant de réaliser le moins de calcul possible au sein des routeurs.

Cet objectif est donc complètement aligné avec les caractéristiques d'une constellation LEO telle que précédemment présentée. Cette tendance est liée au succès des architectures Software-Defined Networking qui gagnent en popularité et commencent à susciter l'intérêt dans le monde satellitaire.

Une des méthodes de routage particulièrement adaptées à ce type d'architectures est basée sur le routage à la source (source routing). Le routage à la source est en fait une technique plutôt ancienne permettant, comme le routage standard, d'acheminer un paquet de données d'une source à une destination.

Initialement décrite et présentée dans la RFC791, elle regagne aujourd'hui en intérêt en partie grâce au déploiement et à l'adoption de nouveaux protocoles tels que le Segment Routing.

Au travers du Segment Routing, le source routing est actuellement activement développé et discuté à l'IETF au sein du groupe de travail Source Packet Routing in Networking (SPRING).

De façon très grossière et par rapport au routage conventionnel qui transmet les paquets suivant les deux adresses IP source et destination puis par une recherche dans la table de transfert du routeur, le routage à la source permet à l'expéditeur d'indiquer partiellement ou complètement la liste des noeuds qu'un paquet doit traverser (l'en-tête de chaque paquet contenant une liste ordonnée des différents labels/identifiants).

Le routage à la source présente plusieurs avantages : tout d'abord le plan de données devient plus simple car les éléments de base effectuent alors des opérations simples.

De plus, l'ingénierie de trafic devient plus flexible (au sens MPLS-TE, gestion de trafic, etc.). Cette technique de routage à la source a notamment gagné en popularité suite à l'adoption d'architectures SDN dans les datacenters considérées comme des architectures flexibles et évolutives.

Il a été démontré que le routage à la source basé sur un plan de contrôle suivant une architecture SDN réduit considérablement la signalisation entre routeurs puisque la majorité des informations de contrôle sont maintenant contenues dans les en-têtes des paquets. L'encodage du chemin complet à l'intérieur d'un paquet supprime les latences imputables aux procédures de recherche dans les tables de forwarding/routage des commutateurs de paquets principaux (par exemple, couche de liaison commutateur ou routeur) car chaque commutateur est capable d'identifier rapidement le saut suivant (next hop) du chemin stocké dans le paquet.

Fort de ce constat, l'ISAE-SUPAERO et l'ENAC ont développé un algorithme innovant baptisé XSR, qui simplifie encore ces procédures. Contrairement à d'autres techniques de routage à la source utilisant la théorie des modulus, XSR utilise des opérations binaires extrêmement simples basées sur des XOR (ou exclusif) ; ne nécessite pas le recalcul d'un chemin de retour (l'identifiant calculé permet à la fois le trajet aller et retour) et autorise la diffusion multicast. De ce fait, cette technique de routage rapide pourrait être un atout essentiel pour la performance d'une constellation LEO et justifie notre motivation pour l'évaluation de ses performances et de ses possibilités de déploiement.

D'autres travaux en cours par les mêmes auteurs avec leurs étudiants ont permis de prendre en main un simulateur réseau Hypatia qui permet de générer facilement des constellations de satellites, d'étudier des algorithmes de calcul des routes optimales puis de les connecter au simulateur réseau NS-3, qui fait partie des références en la matière. Notons en passant que ce simulateur permet une visualisation 3D des résultats (routes congestionnées ou autres).

Objectifs :

L'objectif de cette thèse est d'investiguer des techniques de calcul de routes optimales, d'en quantifier la pertinence et le gain lorsqu'elles sont combinées à l'algorithme XSR.

La première étape de cette thèse consistera en la réalisation d'un état de l'art des techniques d'optimisation de calcul des routes ainsi que des algorithmes de routage classiques afin d'extraire un ensemble pertinent pouvant être combiné à XSR.

Dans un second temps, l'étudiant pourra prendre en main les outils développés à l'ENAC et à l'ISAE, puis il pourra réaliser une évaluation de performance des algorithmes pré-sélectionnés pour en évaluer les contraintes de déploiement et la performance de diffusion de routes.

Il pourra ensuite évaluer l'intérêt d'utiliser le routage source dans un tel système et suite à cette expertise, proposer un algorithme ou une variante intégrant la technique de calcul proposée par XSR. Une adaptation de XSR à ce système particulier sera d'ailleurs peut-être nécessaire.

Enfin, une étude de la performance globale sur une topologie LEO simulée sera effectuée afin d'en tirer des probabilités de garantie de latence et de résilience de la topologie à l'erreur.

Profile de candidat recherché :

- Diplôme de master, ingénieur ou équivalent en informatique / réseaux et télécommunications
- Prérequis : connaissances de réseaux de communication, notions de modélisation mathématique, optimisation et théorie des graphes
- Compétences en langages de programmation : C / C ++, Java, Python
- Bon niveau d'anglais parlé et écrit