

La normalisation de la réseautique atteint l'espace

Par Marc BLANCHET

Président de Viagénie

Et Vinton G. CERF

Vice-président et évangéliste en chef de l'Internet chez Google

Jusqu'à maintenant, les communications sont directes entre les infrastructures terrestres et les dispositifs dans l'espace. En parallèle à la conquête de l'espace, l'Internet a conquis la Terre et les réseaux mobiles se sont déployés. Chacun de ces domaines possède un organisme de normalisation. Avec les avancements technologiques et la baisse significative des coûts, la conquête de l'espace amène des nouveaux acteurs offrant différents services dans l'espace, dont le premier jalon est la Lune. Ainsi, un réseau est planifié par les agences spatiales pour assurer une utilisation optimale des communications. La normalisation de ces technologies réseaux est la clé de voûte pour assurer une interopérabilité entre tous les services offerts. Cet article traite des normes et fait un survol des technologies de réseau prévues autant pour les communications vers et autour de la Lune mais aussi pour Mars et plus loin.

Jusqu'à récemment, l'espace était uniquement conquis par des agences gouvernementales telles que le Cnes ou la Nasa, notamment à cause des coûts très importants des missions spatiales. Les communications sont directes entre les infrastructures terrestres et les dispositifs dans l'espace. Dans le jargon de la réseautique, ce sont des communications point à point. La seule exception est l'utilisation de relais souvent en orbite autour d'une planète comme Mars permettant de transmettre les communications à des dispositifs moins puissants sur la surface de la planète, tels que les robots d'exploration sur Mars. Ces relais sont relativement sans intelligence dans le sens qu'ils ne créent pas de véritable réseau, parce que, par exemple, il n'y a pas de considération de chemins alternatifs et aucune décision de routage n'est prise en compte.

Les acteurs étant limités en nombre, ils se sont coordonnés techniquement sur des normes de communications *via* un organisme appelé Consultative Committee for Space Data Systems [CCSDS] dont les membres principaux sont la plupart des agences spatiales.

En parallèle à la conquête de l'espace, l'Internet a conquis la Terre. Internet a initialement été financé par les gouvernements et a ensuite été commercialisé. Dès ses débuts, la coordination technique sur des normes était un élément clé de son futur succès et fut rapidement chapeauté par l'Internet Engineering Task Force [IETF] où il n'y a pas de *membership* formel et où chacun peut contribuer. Plus tard, le World Wide Web Consortium [W3C] a aussi pris en charge la normalisation des protocoles du Web.

La venue des réseaux mobiles a commencé avec plusieurs organismes de normalisation pour finalement converger vers une seule suite de normes, gérées par le Third Generation Partnership Project [3GPP] dont les principaux membres sont des organisations régionales.

Chaque organisme de normalisation a son propre champ de compétence : CCSDS, pour l'espace, 3GPP, pour le mobile et l'IETF, pour la réseautique (filaire et sans fil). La convergence des technologies sans fil sur la Terre a amené une dépendance et une coordination entre le 3GPP et l'IETF pour assurer la normalisation de la réseautique mobile. Plus récemment, le 3GPP a augmenté son champ en développant des normes pour l'utilisation de satellites sur orbite basse (Low Earth Orbit, LEO) pour les communications mobiles, souvent appelées Non-Terrestrial Networks (NTN) [3GPPNTN].

La normalisation est la clé pour assurer l'interopérabilité et ainsi permettre aux usagers et clients de pouvoir utiliser n'importe quel fournisseur de service sans changer les logiciels et les matériels. En assurant un marché homogène des technologies, la normalisation crée un marché innovant et compétitif, assurant aux usagers et clients le coût le plus bas et une efficacité globale du marché.

Récemment, la conquête de l'espace a subi des transformations importantes. En effet, l'industrialisation permet maintenant de diminuer les coûts de construction des dispositifs spatiaux. Un bel exemple est le Cubesat [Cubesat] qui consiste en un format simple et relativement petit de satellites permettant aux acteurs et projets moins fortunés de pouvoir envoyer des dispositifs dans l'espace à moindre coût. De plus, l'industrie spatiale utilise maintenant des composantes électroniques de niveau moins exigeant [COTSESA] [COTSNASA] permettant des baisses de coûts significatives mais demandant plus de tests de vérification, dont ceux de radiation. Enfin, l'innovation des lanceurs menée par SpaceX a permis une diminution importante des coûts de lancement. Ces changements combinés créent une nouvelle ère où beaucoup de petites et grandes entreprises et organisations, deviennent des acteurs dans cette conquête de l'espace. Les agences spatiales qui avaient l'habitude de définir elles-mêmes et souvent faire exécuter par des sous-contractants, sont maintenant dans un mode d'appel d'offres de services commerciaux qu'elles pourront louer selon leurs besoins.

Pour les usagers et clients, incluant les agences spatiales, la normalisation devient donc une clé de voûte pour assurer l'interopérabilité entre tous les services de ces acteurs de l'espace, présentement et dans le futur.

Le déploiement de satellites de communications sur l'orbite basse a pris une ampleur significative dans les dernières années avec le lancement de plusieurs milliers de satellites par SpaceX Starlink. Des projets similaires tels que OneWeb et Kuiper sont aussi en cours de déploiement. Cependant, malgré l'utilisation de la couche Internet Protocol (IP) telle qu'utilisée sur Internet par les utilisateurs, chaque réseau de fournisseur utilise une technologie propriétaire ne permettant pas pour le moment de pouvoir utiliser des terminaux normalisés ou des portions de réseaux de satellites de plusieurs fournisseurs. Des discussions ont lieu sur ce sujet mais aucune norme ne semble émerger pour être utilisée par les fournisseurs de services.

La destination actuellement convoitée dans l'espace lointain est la Lune. La normalisation est critique considérant les multiples acteurs qui vont se partager les services. Elle inclut entre autres les services de position, de temps, de navigation, de communication et de réseautique. La Nasa et l'Agence spatiale européenne (ESA) ont conjointement proposé une normalisation des communications appelée LunaNet Interoperability Specification (LNIS), présentement à la version 5 [LNISv5]. Cette spécification est basée sur un modèle de fournisseur de services, appelé LunaNet Service Provide (LNSP). Détaillée sur le plan des communications, elle demeure incomplète sur le sujet de la réseautique, en mentionnant de façon haut niveau l'utilisation du protocole Internet (IP) et le protocole Bundle (Bundle Protocol, BP) [RFC9171].

Le Bundle Protocol (BP) est une norme plus récente d'un protocole qui permet de créer un réseau similaire mais différent du protocole Internet (IP). BP a été fondé sur la conclusion que la suite du protocole IP ne peut être utilisée [RFC4838] dans l'espace lointain, consi-

dérant les caractéristiques propres de l'espace lointain, telles que les délais très grands et variables et les longues interruptions de communications. Par exemple, le délai pour une transmission aller-retour de la Terre vers Mars peut se situer entre quelques minutes jusqu'à 40 minutes, à cause des délais de propagation des ondes radios dans l'espace et de la position des planètes l'une par rapport à l'autre. Les longues interruptions peuvent être de quelques secondes à plusieurs jours ou semaines. Par exemple, la planète Mars peut être de l'autre côté du Soleil par rapport à la Terre, créant une période où les communications directes ne sont pas possibles, une situation qui arrive tous les 2 ans. La dernière conjonction solaire de Mars a eu lieu en novembre 2023 où pendant deux semaines, aucune communication directe n'était possible entre les deux planètes. Un protocole qui gère les longs délais et longues interruptions est appelé Delay and Disruption Tolerant Networking (DTN).

Le protocole BP est basé sur un modèle de stockage de trames dans les nœuds intermédiaires du réseau pour pallier les longs délais de transmission et les interruptions. Une toute nouvelle suite de protocoles applicatifs et de services réseaux tels que les protocoles de routage, de sécurité, de nommage des nœuds et de transmission du temps doivent être conçus pour être utilisés avec ce nouveau protocole BP. Ces travaux d'ingénierie et de normalisation sont accomplis par l'IETF et le CCSDS et une coordination est en place entre les deux organismes.

Il est aussi prévu qu'on utilise le protocole IP dans l'espace, tel que stipulé dans la norme LNIS autant pour la Lune que pour Mars [IOAGMARS], surtout pour les communications sur la surface et autour du corps céleste. Dans ce contexte, les délais sont courts, les interruptions relativement minimales ou bien planifiées et les technologies sous-jacentes prévues sont les réseaux mobiles 4-5G et le *wifi*, qui utilisent déjà naturellement le protocole IP.

Le protocole BP a été déployé de façon limitée dans l'espace dans des projets de vérification technologique [ESABPISS] *via* l'utilisation de la station spatiale internationale sur l'orbite basse. Jusqu'à maintenant, dans l'espace lointain, par exemple pour Mars, les délais et des interruptions des communications étaient gérés par un logiciel de courtage [MAROS] où les missions tels que le Deep Space Network et les relais autour de Mars offraient les fenêtres de communications aux autres missions telles que celles des robots explorateurs sur la surface de Mars. Tout était spécifié et planifié à l'avance. Si une communication planifiée ne peut être utilisée pour une raison ou une autre, la fenêtre est perdue. L'arrivée de protocoles de réseau permettra l'utilisation optimale de ces fenêtres en proposant des chemins alternatifs et en partageant les fenêtres de communications entre plusieurs missions, projets ou fournisseurs de services. En fait, il n'existe pas de réseau proprement dit dans l'espace actuellement.

Une initiative récente [DEEPSPACEIP] tente de réévaluer si le protocole Internet ne pourrait pas être aussi utilisé dans les communications de l'espace lointain de type DTN, en modifiant les paramètres par défaut des protocoles Internet qui sont typiquement faits pour des délais et des interruptions de l'ordre de millisecondes.

Jusqu'à maintenant, les communications dans l'espace utilisaient les ondes radio, où on assigne une fréquence spécifique pour chaque direction de communication. Ces fréquences spécifiques ainsi que les identifiants des vaisseaux sont consignés dans un registre [SANASCID], assurant aucune collision dans les communications. Récemment, des tests sont en cours [LCRD] [PSYCHE] pour utiliser la lumière avec des lasers permettant non seulement une bande passante beaucoup plus élevée, particulièrement importante pour les quantités importantes de données scientifiques transmises à partir de dispositifs dans l'espace vers la Terre, mais aussi une utilisation beaucoup plus minime d'énergie pour la transmission. Cependant, ces communications exigent une précision dans l'alignement des

dispositifs et aucune obstruction de la lumière dans le chemin. Cette dernière contrainte amène à utiliser des sites sur la Terre où les nuages sont les plus rares possibles.

Le groupe de travail sur la réseautique interplanétaire [IPNSIG], un chapitre de la société Internet (Internet Society) [ISOC], a publié un rapport [IPNSIGSSIARCH] exhaustif sur ces sujets en proposant une gouvernance où les différents acteurs sont invités à contribuer et à développer les normes et la gouvernance de façon consensuelle similaire à celle de l'Internet. Ce rapport est aussi un excellent état des lieux sur l'Internet dans le système solaire (SSI : Solar System Internet).

La normalisation de la réseautique dans l'espace est un travail qui ne fait que commencer. Elle est vitale pour assurer l'interopérabilité et l'utilisation efficace des communications. De plus, la gouvernance des communications et de la réseautique sera aussi critique. La collaboration et la coordination de l'ensemble des organisations et des acteurs est la clé du succès du réseau Internet dans l'espace.

BIBLIOGRAPHIE

[3GPP] 3GPP, A Global Initiative, <https://3gpp.org>

[3GPPNTN] Release 17, <https://www.3gpp.org/specifications-technologies/releases/release-1>

[CCSDS] Consultative Committee for Space Data Systems (CCSDS), <https://ccsds.org>

[COTSESA] From custom-made to commercial: how ESA is changing the way that spacecraft are built, https://www.esa.int/Enabling_Support/Preparing_for_the_Future/Discovery_and_Preparation/From_custom-made_to_commercial_how_ESA_is_changing_the_way_that_spacecraft_are_built

[COTSNASA] NASA Efforts In Utilizing Commercial-Off-The-Shelf (COTS), Electronics In Mission Systems, Peter Majewicz, 2022, <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/20220015267/downloads/20220015267-Majewicz-ACCEDE-2022-Presentation-v3.pdf>

[CUBESAT] CubeSat, Origin of the New Space Revolution, <https://www.cubesat.org>

[DEEPSPACEIP] IP Protocol Stack for Deep Space, <https://deepspaceip.github.io/>

[ESAISSBP] Extending the Internet into space, <https://esoc.esa.int/extending-internet-space>

[IETF] Internet Engineering Task Force, <https://ietf.org>

[IOAGMARS] The Future Mars Communications Architecture, Volume 1, Report of the Interagency Operations Advisory Group Mars and Beyond Communications Architecture Working Group, 2022, <https://www.ioag.org/Public%20Documents/MBC%20architecture%20report%20final%20version%20PDF.pdf>

[IPNSIG] Internet Society Interplanetary Chapter, <https://ipnsig.org>

[IPNSIGSSIARCH] Solar System Internet Architecture and Governance - from the Moon to Mars and beyond -, Internet Society Interplanetary Chapter, September, 2023, https://drive.google.com/file/d/1anMcVEqXjNtk5gdo_qce28SowusXKkfi/view

[ISOC] Internet Society, <https://isoc.org>

[LCRD] Laser Communications Relay Demonstration (LCRD) Overview, NASA, <https://www.nasa.gov/directorates/stmd/tech-demo-missions-program/laser-communications-relay-demonstration-lcrd-overview/>

[LNISv5] LunaNet Interoperability Specification, <https://www.nasa.gov/directorates/somd/space-communications-navigation-program/lunanet-interoperability-specification/>

[MAROS] Gladden, Roy E., “Mars Relay Operations Service (MaROS): a present service preparing for the future”, <https://hdl.handle.net/2014/45530>, SpaceOps 2014 13th International Conference on Space Operations, Pasadena, California, May 5-9, 2014.

[MARCONJUNCTION] NASA’s Mars Fleet Will Still Conduct Science While Lying Low, <https://www.jpl.nasa.gov/news/nasas-mars-fleet-will-still-conduct-science-while-lying-low>

[PSYCHE] Deep Space Optical Communications (DSOC), NASA Jet Propulsion Laboratory, <https://www.jpl.nasa.gov/press-kits/psyche/dsoc>

[RFC4838] CERF V., BURLEIGH S., HOOKE A., TORGERSON, L. DURST, R., SCOTT K., FALL K., & WEISS H., “Delay-Tolerant Networking Architecture”, RFC 4838, DOI 10.17487/RFC4838, April 2007, <https://www.rfc-editor.org/info/rfc4838>.

[RFC9171] BURLEIGH S., FALL K., BIRrane E. & III (2022), “Bundle Protocol Version”, RFC 9171, DOI 10.17487/RFC9171, January 2022, <https://www.rfc-editor.org/info/rfc9171>

[SANASCID] Spacecraft Identifier, Space Assigned Numbers Authority (SANA), <https://sanaregistry.org/r/spacecraftid/>

[W3C] World Wide Web Consortium, <https://w3c.org>