

LES ANTENNES DU BOUT DU MONDE, DEEP SPACE NETWORK

Floriane Michel

Pour s'affranchir de l'obstacle que constitue l'atmosphère au passage de certains rayonnements, les scientifiques envoient dans l'espace de nombreuses sondes afin d'ausculter l'Univers. Ces sondes recueillent des informations qu'il faut ensuite transmettre sur Terre. Pour cela une série d'antennes de grands diamètres sont réparties de manière adéquate afin de couvrir l'ensemble du ciel en permanence. C'est également à partir de ces antennes que s'effectue le pilotage des sondes.

Canberra est la capitale méconnue de l'Australie, coincée entre Sydney et le mont Kosciuszko (le plus haut d'Australie, 2 228 m...), la ville où il y a plus de kangourous que d'habitants. Pourtant, c'est là que se trouve le Canberra Deep Space Communication Complex, une des trois stations de communication du Deep Space Network de la NASA, les deux autres se trouvant à Madrid en Espagne et à Goldstone aux États-Unis.

Ce réseau d'antennes radio permet à la NASA de rester en contact avec les sondes qui sillonnent le Système solaire, voire plus loin et ce, quel que soit le continent « en face » de la sonde. Les stations sont espacées d'environ 120° ce qui permet de

couvrir l'ensemble du ciel et de faire le relais entre les antennes ; lorsqu'une sonde va passer sous l'horizon de l'une d'entre elle et donc perdre la communication, une autre prend le relais assurant ainsi une continuité dans l'échange des signaux.

Ce réseau d'antennes permet de recevoir, décoder et distribuer les données prises par les sondes, d'envoyer des commandes mais également de mesurer leur position et leur vitesse dans l'espace. Ces signaux peuvent également être utilisés dans certains cas pour étudier la structure intérieure d'une planète ou d'un satellite en étudiant les modifications du signal entre son émission par la sonde et sa réception

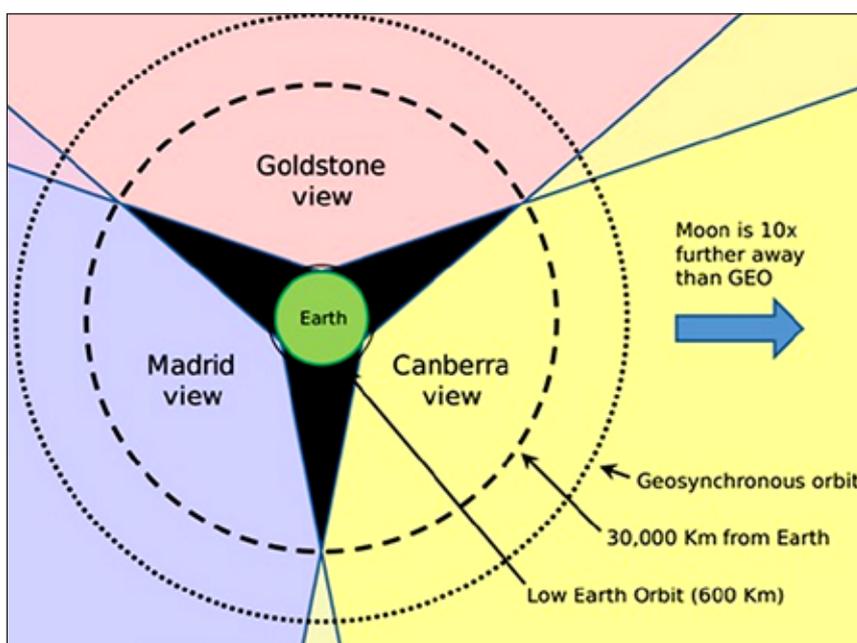
par la station. Les signaux reçus étant très faibles, toutes les stations sont construites dans des vallées afin de limiter les interférences extérieures.

Les antennes

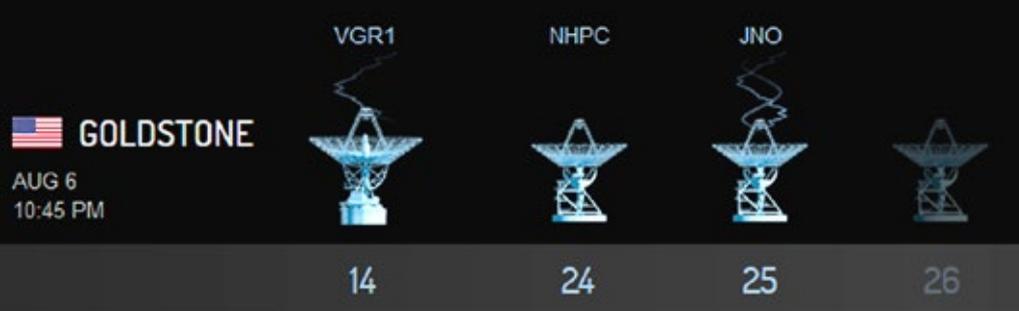
Chaque site peut contenir quatre types d'antennes : 70 et 26 mètres de diamètre ainsi que deux types d'antennes de 34 m (High Efficiency et Beam waveguide). Elles sont nommées DSS (DSS pour Deep Space Station), suivi d'un numéro variant en fonction du site (entre 30 et 49 pour Canberra par exemple).

Plus le diamètre est grand, plus l'antenne est capable de recevoir des signaux de faible puissance. À titre d'exemple, les antennes de 70 m de diamètre ont été construites dans le but de communiquer avec Voyager 1 et 2 qui sont à présent à plusieurs milliards de kilomètres de la Terre.

Les antennes de 26 m ont quant à elles été construites pour communiquer lors des missions Apollo qui nécessitaient une précision moindre, la Lune étant beaucoup plus proche. Elles servent à présent pour échanger des informations avec des satellites en orbite autour de la Terre. Les antennes de 34 m servent à communiquer avec toute une gamme de sondes explorant le Système solaire, des rovers sur Mars jusqu'à Juno autour de Jupiter.



La répartition des 3 antennes (source : NASA).



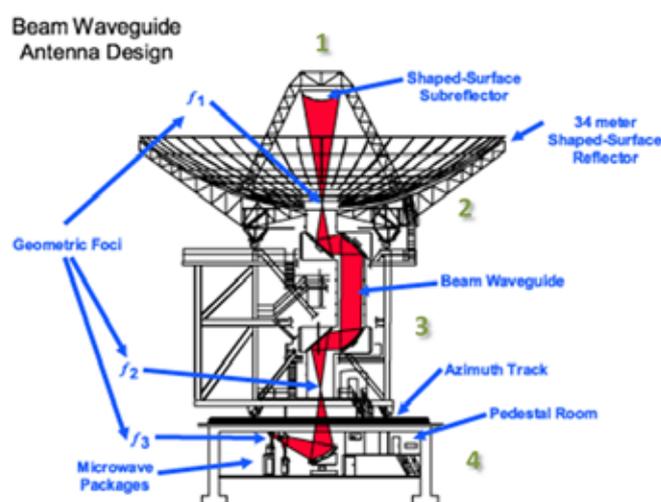
Le 5 août, à Goldstone, l'antenne de 70 m DSS14 communique avec Voyager 1, l'antenne de 34 m DSS24 avec la mission New Horizons vers Pluton et DSS25 avec la sonde Juno.

Les antennes de 70 m de diamètre sont les plus coûteuses en pièces détachées et en maintenance. Pour les remplacer, des essais ont déjà été réalisés en utilisant plusieurs antennes de 34 m en réseau.

Lorsqu'une sonde envoie un signal, celui-ci est déjà faible au départ en raison du peu d'énergie disponible (20 W soit l'équivalent d'une ampoule de réfrigérateur). Ce signal est envoyé en direction de la Terre

les antennes Beam waveguide (guidage d'onde).

Contrairement aux antennes « High Efficiency », les émetteurs et récepteurs des antennes à guidage d'onde (et toute l'électronique qui va avec) sont à l'abri du vent, de la pluie mais surtout des changements de température que les composants électroniques n'aiment pas, dans un hangar à la base de l'antenne.



Une antenne Beam Waveguide (source : NASA).

mais perd en directivité lors du voyage. Il n'arrive que 10^{-19} W sur Terre dans le cas de Voyager 2. Le signal étant disponible sur une large surface, il est donc possible d'utiliser plusieurs antennes réparties à différents endroits pour reconstituer le signal. Un essai a été fait avec jusqu'à 5 antennes de 34 m pour la mission Galileo : cela a permis d'améliorer la précision du signal d'un facteur trois par rapport à une antenne de 70 m.

Ces dernières sont donc amenées à disparaître au profit d'antennes plus petites et plus performantes comme

Bien que le système de guidage soit complexe en raison du fait qu'il doit traverser la montage de l'antenne sans pour autant empêcher sa rotation, ces antennes permettent d'obtenir des mesures plus fiables et facilite la maintenance.

Canberra Deep Space Communication Center

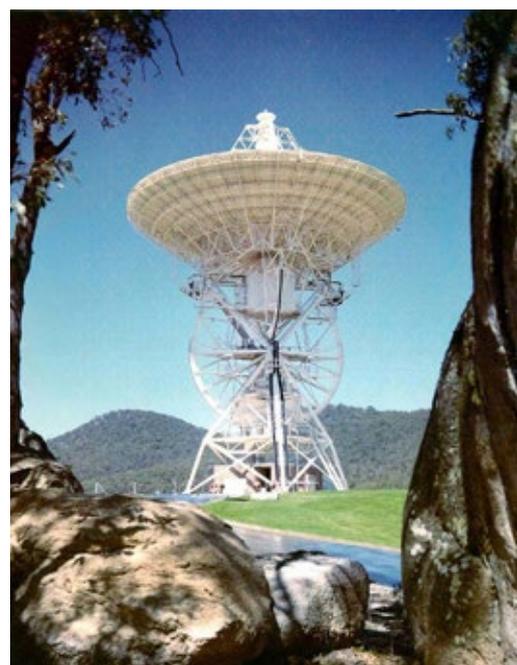
Construite proche de la capitale pour contribuer à son développement qui se faisait attendre, la station a commencé à émettre en décembre 1964.

Quatre antennes sont actuellement

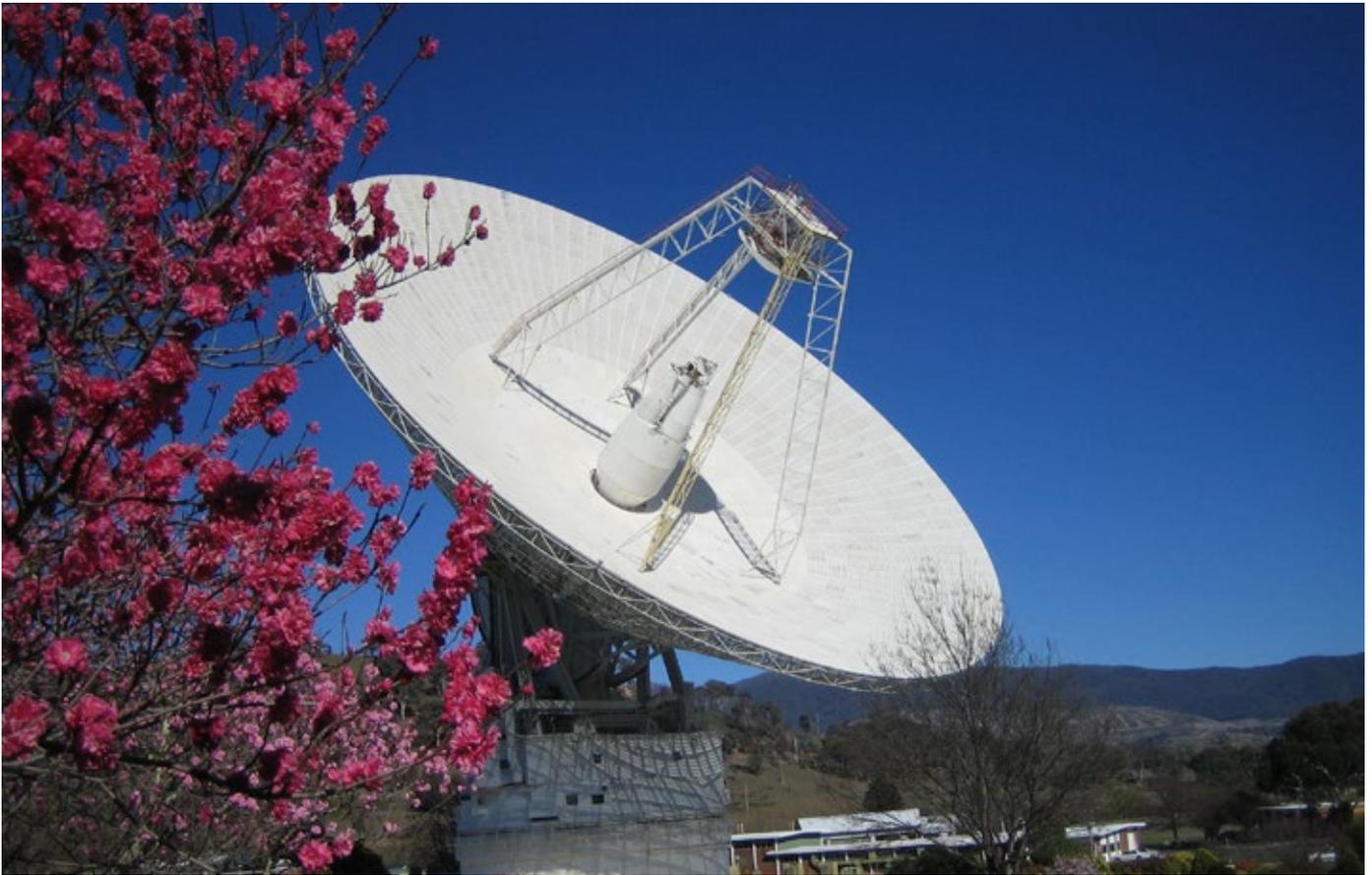
en activité : une antenne de 70 m et trois de 34 m de type « beam waveguided ».

Le site de Canberra possédait une antenne de 26 m, la DSS-46 jusqu'en 2009. Cette antenne est connue pour avoir reçu les images du premier pas sur la Lune de Neil Armstrong en 1969 lorsqu'elle était sur le site de Honey Suckle Creek, démantelé en 1984. Cette antenne a été déclarée « Historical Aerospace Site » et est donc restée sur le site proche de Canberra où l'on peut facilement la voir.

L'antenne la plus impressionnante du site de Canberra est la DSS-43 de 70 m de diamètre construite en 1973. Elle mesurait 64 m puis a été élargie en 1987 afin d'assurer les communications avec Voyager 2 lors de son approche de Neptune en 1989. Elle pèse plus de 3 000 tonnes, mesure 73 m de haut et est très impressionnante vue de près car sa surface est environ celle d'un terrain de football. Elle peut tourner à une vitesse de $0,25^\circ$ par seconde et a une précision de pointage de $0,005^\circ$.



L'antenne Honeysuckle. La salle d'émission est la structure carrée située directement sous l'antenne. Photos par Hamish Lindsay, scan par John Saxon.



DSS43, l'antenne de 70 m de diamètre.

Les types de données collectées par le DSN

Il existe 7 types de données qui transitent par les antennes.

- **Frequency and Timing** : données essentielles au bon fonctionnement du DSN, ses données constituent l'horloge interne du réseau. Les différents sites restent synchronisés en comparant leurs données aux données des satellites, notamment GPS.
- **Tracking** : données permettant de déterminer la distance (à 1 m près), la vitesse (au mm/s près). Elles sont obtenues en faisant des calculs de temps de parcours de signaux et par effet Doppler.
- **Telemetry** : données provenant de mesures prises par la sonde (température, pression, images...). Lors de l'envoi des données, la sonde code un symbole correspondant au type de mesure avant l'envoi des valeurs. Ce symbole permet alors d'encoder les mesures qui sont ensuite transmises à l'équipe du projet.
- **Command** : données transmises par l'équipe sur Terre à la sonde. Ce sont des commandes que la sonde exécute après les avoir chargées dans l'ordinateur de bord.
- **Monitor** : données sur les opérations et les performances

du DSN lui-même. Elles permettent d'informer/gérer des projets et coordonner les sites entre eux. Les équipes des projets fournissent en général un set de données moniteur avec celles de tracking pour informer sur la force du signal par exemple.

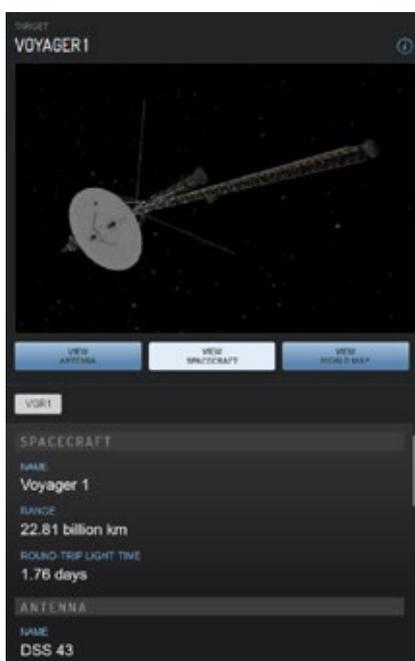
- **Radio Science** : données relatives aux expériences faites en utilisant le système sonde-antenne comme un instrument de mesure. Ses données permettent par exemple de déterminer l'atténuation, la réflexion, la variation de fréquence du signal émis par la sonde lors de sa réception par le DSN et d'obtenir ainsi des informations sur l'atmosphère d'un astre, des anneaux ou autre champ gravitationnel.

- **Very Long Baseline Interferometry** : données obtenues lorsque deux ou plusieurs antennes reçoivent des signaux de la même sonde ou du même quasar. Elles permettent de trouver la position précise des antennes par exemple ou d'obtenir des images d'objets astronomiques. Toutes ces données permettent de mieux comprendre le rôle et les missions du DSN.

Position et vitesse des sondes spatiales

Pour mesurer la position des sondes, les antennes au sol envoient un signal (uplink) sur une des fréquences ci-dessous.

Pour les enseignants, sur le site DSN Now, on peut voir en temps réel les communications entre les antennes et les sondes avec plein de données pour faire des exercices avec les élèves : la distance entre la sonde et l'antenne, le temps de trajet des signaux, leur fréquence, le débit, la puissance reçue par l'antenne entre autres.



SOURCE	VOYAGER 1
TYPE	DATA
DATA RATE	159.00 b/sec
FREQUENCY	8.42 GHz
POWER RECEIVED	-156.03 dBm (2.50×10^{-22} kW)

Page du site du Deep Stage Network indiquant l'état des différentes antennes des 3 sites (<https://eyes.nasa.gov/dsn/dsn.html>).

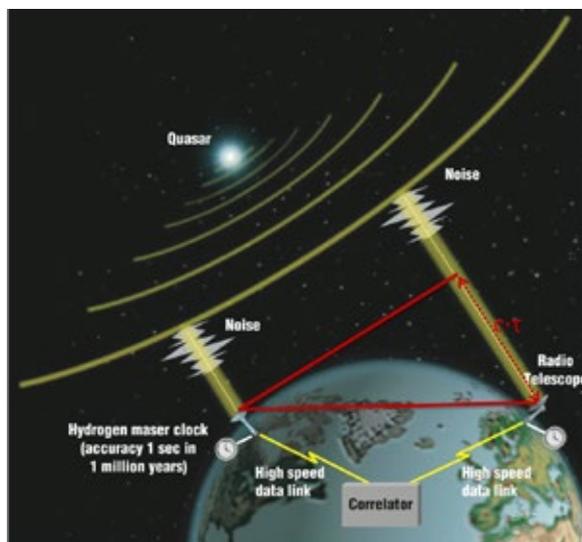
Band	Uplink Frequency (MHz)	Downlink Frequency (MHz)
S	2110 - 2120	2290 - 2300
X	7145 - 7190	8400 - 8450
Ka	34200 - 34700	31800 - 32300

Ce signal porteur est modulé en phase par un signal de « traçage ». À sa réception par la sonde, le signal est démodulé, filtré puis monté sur le signal porteur (d'une autre fréquence que le signal uplink) en modulation de phase et envoyé en direction de la Terre. Le temps de trajet entre l'antenne et la sonde est alors estimé en comparant les signaux de traçage envoyé et reçu. À ce temps, sont soustraites différentes contributions indépendantes du temps de trajet dont le temps de traitement par la sonde déterminé par des tests effectués avant le lancement (environ 420 ± 9 ns pour Cassini), les temps de trajet du signal entre l'émetteur et l'antenne dans les cas des antennes beam waveguide (quelques microsecondes, calibration faite avant chaque utilisation), les effets de l'atmosphère entre autres. Lorsque l'on a identifié le temps de parcours réel, connaissant la vitesse de la lumière, il en découle alors la distance entre la sonde et la station.

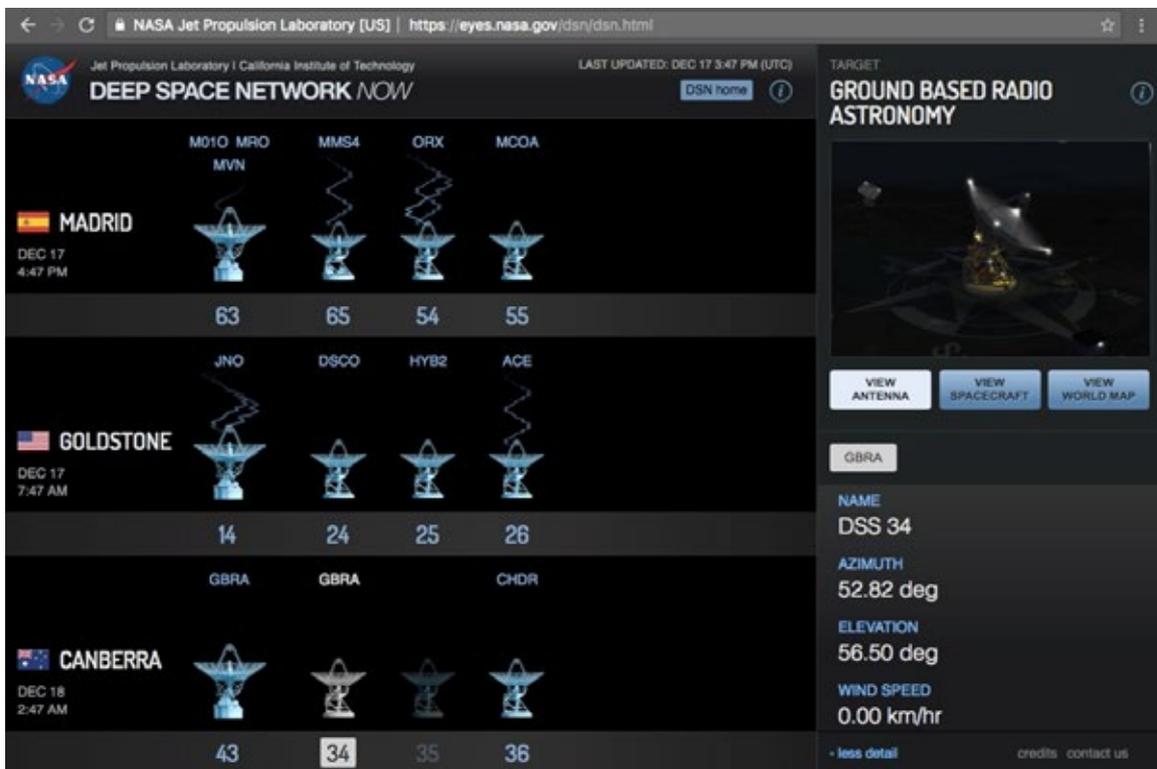
Cette distance ne permet cependant pas de connaître la position exacte de la sonde car elle ne donne pas d'information sur les composantes latérales de la vitesse ou de la position. Des techniques complémentaires sont alors utilisées telles que l'analyse de photos envoyées par les sondes qui montre les étoiles et permettent ainsi de préciser sa position. De plus, les équations de trajectoires sont très bien connues et il n'y a pas un grand panel de trajectoires possibles qui peuvent correspondre à un échantillon de mesures.

La vitesse de la sonde est quant à elle calculée grâce à l'effet Doppler. La fréquence émise par la sonde est comparée à la fréquence reçue sur Terre. Cela permet d'en déduire la vitesse relative entre la sonde et l'antenne. Ces mesures sont ensuite soustraites aux valeurs théoriques calculées à partir des modèles de la trajectoire de la sonde ; ce résultat s'appelle « the residual » ou le résidu et permet de mesurer à quel point la sonde a dérivé par rapport à son orbite de référence.

En fonction des résultats, il peut alors être décidé d'opérer des corrections de trajectoires (Trajectory Correction Maneuver ou TCM si la correction est de l'ordre de la dizaine de m/s mais il existe d'autres types d'ajustements



Principe de la VLBI (source NASA).



pouvant aller jusqu'au mm/s). Une série de commandes est alors programmée et transmise à la sonde par l'intermédiaire du DSN.

Une fois les corrections effectuées, des mesures de distance et de vitesse sont à nouveau prises et comparées à l'orbite théorique, etc.

Cassini par exemple a exécuté 17 TCM durant les 7 ans qu'ont duré son voyage jusqu'à Saturne et plusieurs autres ajustements par la suite afin de pouvoir observer Titan et d'autres satellites.

Utilisation du réseau pour la recherche

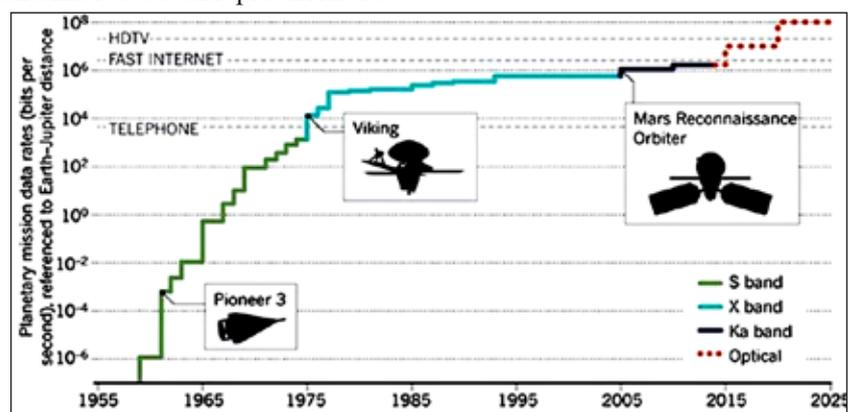
En plus de communiquer avec les sondes, le Deep Space Network consacre également environ 3 % de son temps à soutenir les recherches basées sur des observations faites depuis le sol. En effet, les antennes peuvent servir de radiotélescope. Elles sont très sensibles, déjà organisées en réseau et leur position très éloignées les unes des autres permet d'avoir la meilleure précision de calcul possible pour des appareils sur Terre. Elles viennent donc en soutien à un réseau de télescopes qui utilise, entre autres, une technique

appelée VLBI (very long baseline interferometry). Cette technique mise au point dans les années 60, consiste à mesurer la différence entre les horaires d'arrivée sur Terre d'ondes radio émises par un quasar (tellement éloigné que les ondes émises sont considérées comme planes). En raison de la petite taille de la Terre, la précision de mesure du temps est cruciale (quelques picosecondes) et les horloges atomiques des antennes sont un outil indispensable au bon fonctionnement de cette technique. Cela permet dans un premier temps de mesurer la position des quasars. Ceux-ci étant très éloignés de la Terre, leur position peut être considérée comme fixe, et on peut donc à l'inverse mesurer la position des antennes avec une précision de

quelques millimètres !

Il est alors possible d'étudier le mouvement des plaques tectoniques ou des déformations géologiques. C'est également cette technique qui a permis de faire la fameuse image d'un trou noir publiée en 2019.

Utilisé depuis les années 1960, le réseau d'antennes de la NASA évolue pour s'adapter aux nouvelles technologies, aux débits nécessaires toujours plus élevés (passage aux transmissions optique) et être de plus en plus précis. Il a de beaux jours devant lui et peut servir de support pour une panoplie d'exercices à faire avec les élèves !



Évolution des débits de communications entre 1955 et 2025.