

La saga des sondes

« Voyager »



Présenté le JJ = 2460280...

Patrice / Gérard

Au sommaire ce soir

1. Introduction, contexte de la mission.
2. Petit manuel de voyage spatial.
3. Structure *physique* des sondes.
4. Allo la Terre...
5. Une moisson scientifique exceptionnelle
6. En conclusion

Introduction

Lancées en 1977, les deux sondes Mariner Jupiter/Saturn A et B rebaptisées Voyager ont survolé les grosses planètes du système solaire et sont maintenant éloigné de 20 milliards de km, donc 4 fois plus éloignées de nous que Neptune ou Pluton.

Prévues initialement, pour une mission de 5 ans, ces sondes fonctionnent toujours après 46 ans de service et une récente reprogrammation des (vieux) ordinateurs devrait permettre encore 5 années de service.

Pour réaliser cet exploit avec les technologies des années 70, il a fallu que l'opération soit très bien préparée... (Et peut-être que les dieux de l'astronautique soient sympas avec la NASA !)

On raconte dans cette présentation comment ces sondes ont réussi à accomplir un tel voyage et quels résultats elles nous ont apportées sur le système solaire et le milieu intersidéral.

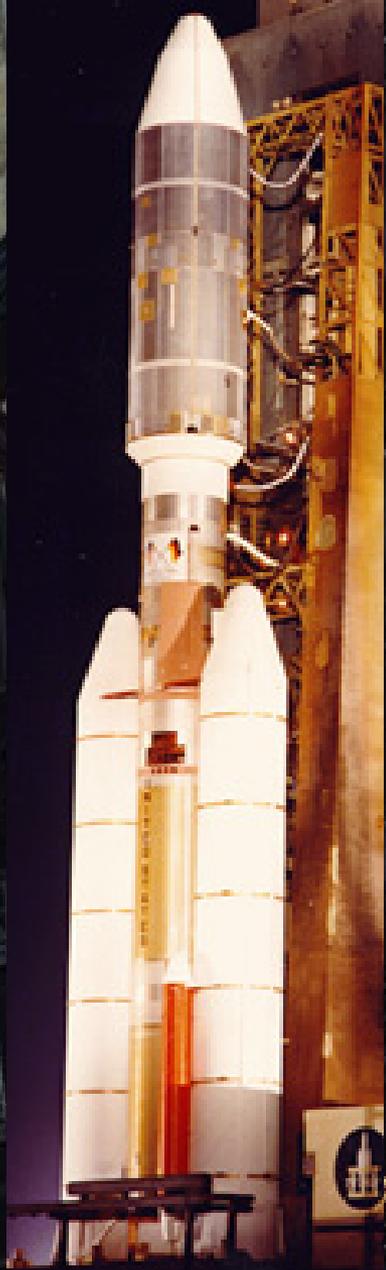
Contexte de la mission

Quatre faits sont à l'origine de cette mission

- (1) Un alignement remarquable des grosses planètes détecté par le JPL et la NASA au milieu des années 60,
- (2) Le projet d'un « Grand tour » dans le système solaire (avec des Saturn V)
- (3) Une forte réduction budgétaire pour la NASA en 1970.
- (4) Un redéploiement de la mission sans l'abandonner (mais avec un budget divisé par 3)

Le contexte politique a aussi changé. Le succès des missions Apollo de 69 à 72 ont écrasé les Russes et le grand public américain n'en demande pas plus.

Par ailleurs, Nixon préfère mettre ses dollars dans la « Navette spatiale »



Titan III Centaur Voyager 2 dans sa capsule

Petit manuel de voyage spatial

Comment organiser une grande promenade spatiale

La mission décidée, les « Saturn V » restant au garage, il fallait réaliser cette mission avec une sonde de moins d'une tonne, carburant compris (=> Fusée Titan III Centaur).

Comment faire ? Pour déplacer une sonde dans l'espace, on dispose de 3 « moteurs »

1. L'impulsion initiale (8 à 11 km/s) plus la vitesse de la Terre, de 29.8 km/s
2. L'effet de fronde des planètes en passant à la bonne distance.
3. Un peu de carburant pour modifier « à la marge » la *vitesse* de la sonde

L'orbite d'une sonde est majoritairement une succession de *portion d'orbites elliptiques autour du Soleil* entrecoupé de (petites) *portions d'orbites hyperboliques* lorsque la sonde rentre dans la zone d'influence d'une planète.

Une courte poussée des moteurs permet de bien faire la transition entre l'orbite principale elliptique et la portion d'orbite hyperbolique.

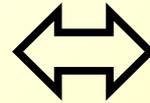
Petit manuel de voyage spatial

Quelques outils bien utiles

Une orbite elliptique ou hyperbolique se caractérise par 2 ensembles de 6 nombres parfaitement équivalents

Les 6 constantes, de l'orbite

$$a, e, i, L_m, \varpi, \Omega$$



$$+\mu_s = G.M_s$$

Le vecteur d'état

$\{ \mathbf{r}, \mathbf{v} \}$ position et vitesse

L'interaction gravitationnelle avec une planète est souvent brève et on peut considérer que le vecteur d'état en entrée est $\{ \mathbf{r}, \mathbf{v} \}$ et en sortie, $\{ \mathbf{r}, \mathbf{v}' \}$. Le vecteur d'état $\{ \mathbf{r}, \mathbf{v}' \}$ permet de définir une nouvelle ellipse ($a', e', i', L_m', \varpi', \Omega'$) dont le foyer reste le Soleil.

Les vecteurs \mathbf{v} et \mathbf{v}' ne diffèrent parfois que par leur direction.

On va y revenir ...

Petit manuel de voyage spatial

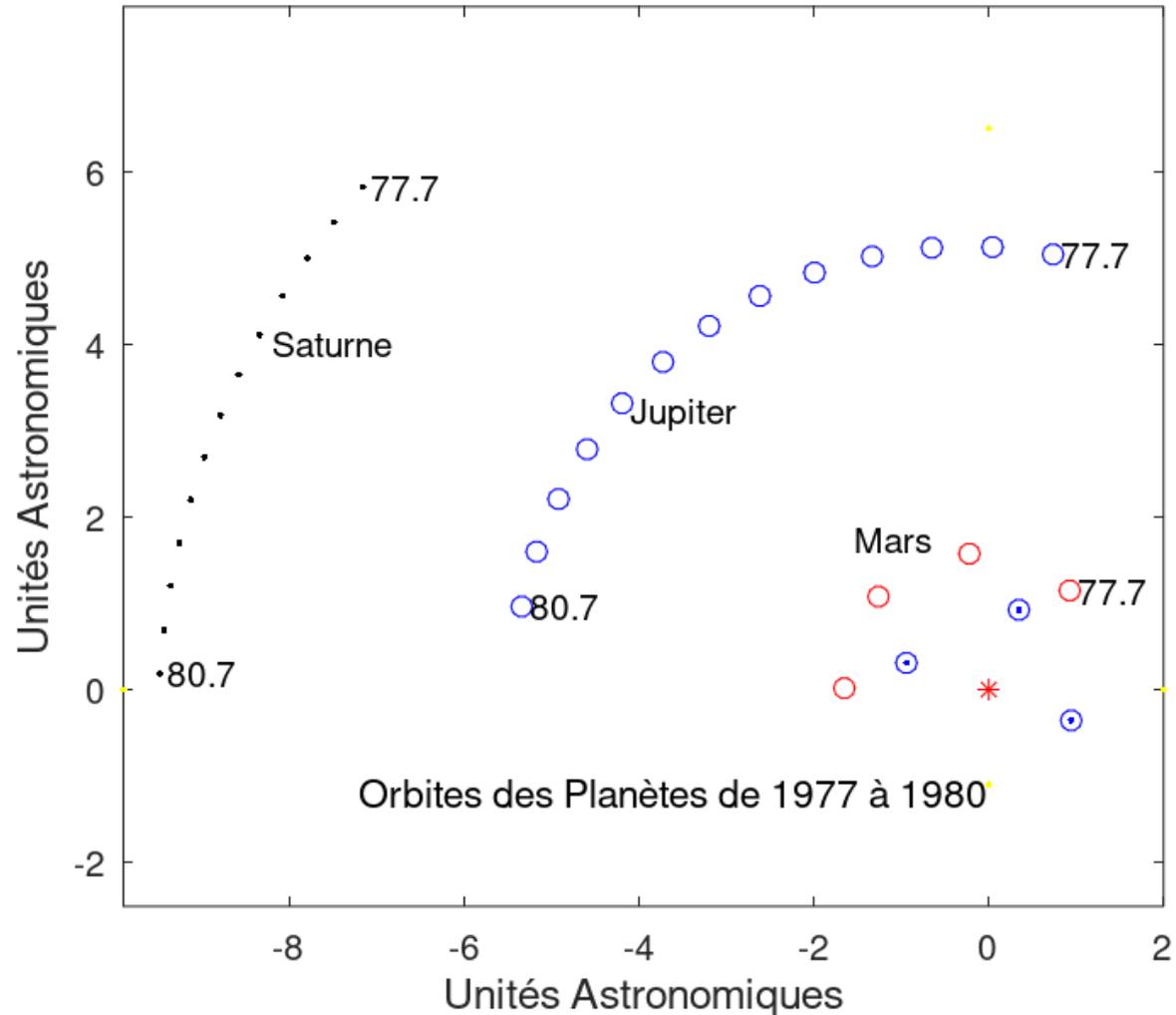
Le terrain de jeu de la mission

A l'origine, les sondes Voyager devaient visiter Jupiter et Saturne ainsi que leurs satellites et anneaux

On distingue sur cette carte les positions de la Terre, Mars, Jupiter et Saturne, de 1977.7 à 1982.1, l'espacement entre les positions étant d'un trimestre de 91 jours.

Devant les bons résultats, il fut décidé de poursuivre la route vers Uranus et Neptune.

Terrain de jeu des Sondes Voyager 1 & 2

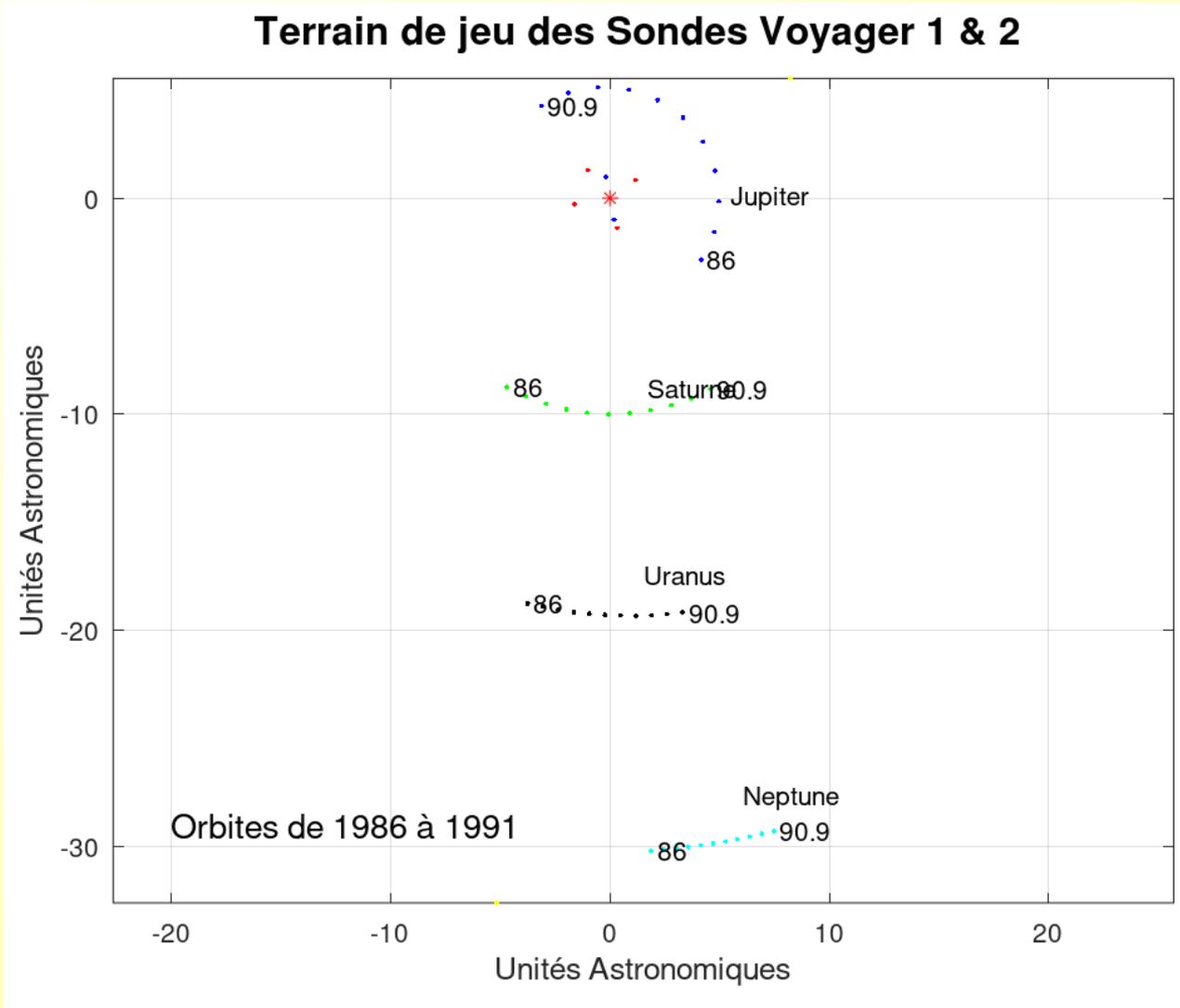


Petit manuel de voyage spatial

Le terrain de jeu de la mission (un peu agrandi)

Le temps du voyage s'est écoulé...

On distingue en plus sur cette carte les positions de Saturne, Uranus et Neptune de 1986 à 1990.9. l'espacement entre les positions est de 6 mois.

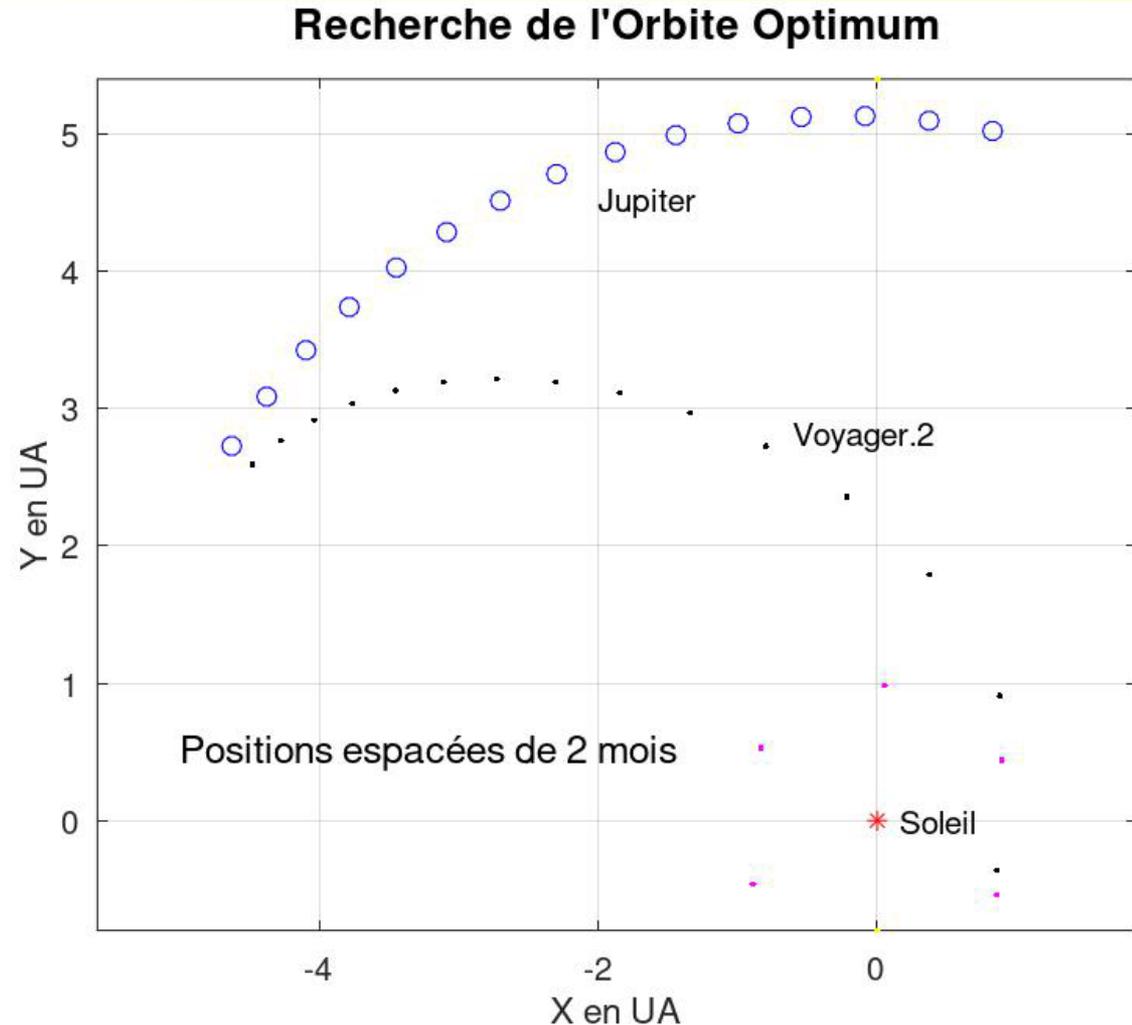


Petit manuel de voyage spatial

Recherche de l'orbite optimale

Il s'agit de trouver une orbite elliptique, proche de la Terre au départ et proche de Jupiter environ deux ans plus tard.

L'essentiel du voyage a lieu en mode balistique. A proximité de Jupiter (dans sa zone d'influence de 43 millions de km de Rayon), son attraction redeviendra prépondérante.



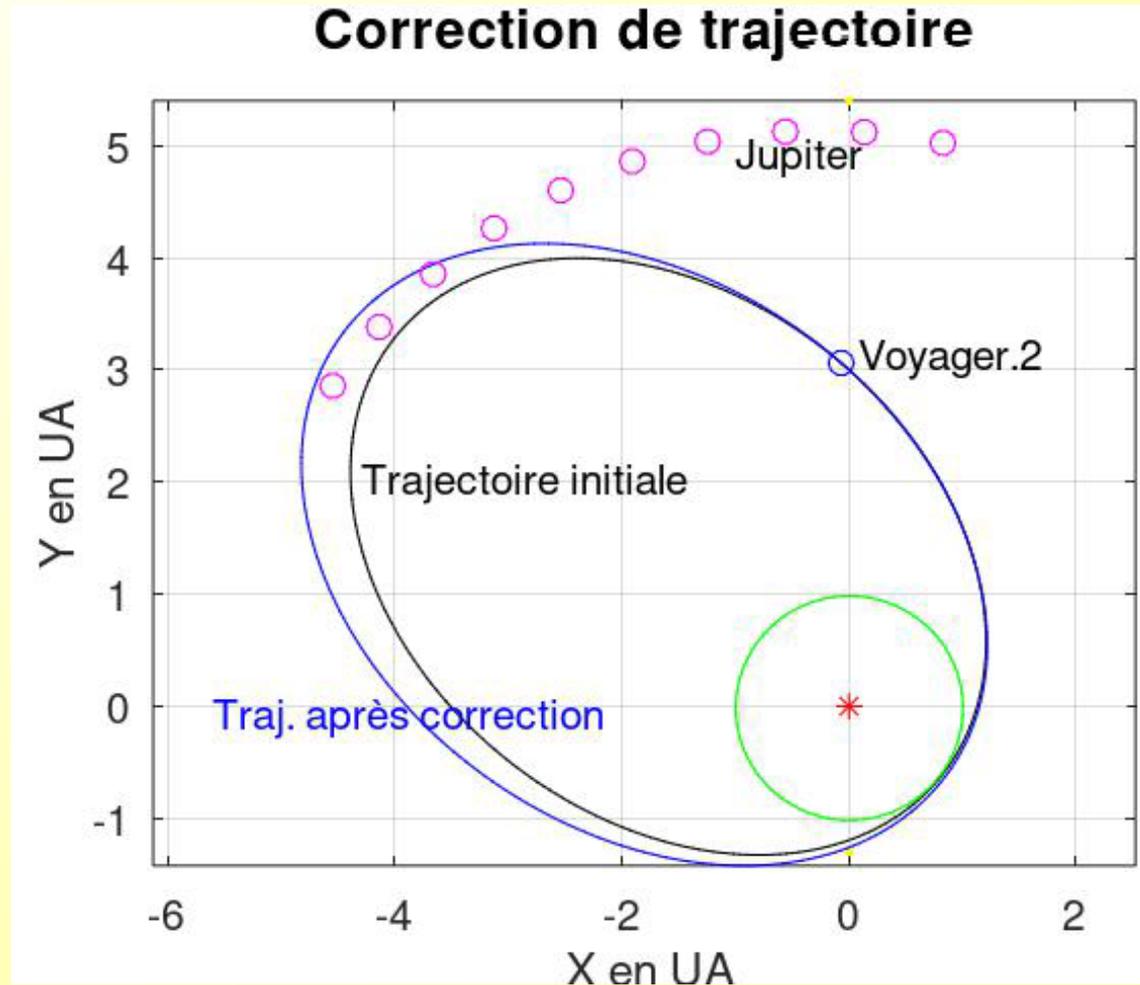
Petit manuel de voyage spatial

Effet d'une impulsion

La figure montre l'orbite de la Terre, (en vert), la position de Jupiter tous les trimestres et en noir l'orbite initiale (elliptique) de la sonde.

Lorsque la sonde est en $x,y=(1.7, 2.6)$ ua, on allume les moteurs pour donner une brève impulsion qui fait varier la vitesse de 0.56 km/s. Il en résulte une nouvelle orbite tracée en bleu.

En pratique, la trajectoire elliptique au voisinage de Jupiter ne sera pas respectée à cause de l'attraction de cette planète. L'impulsion est donc destinée à favoriser l'effet de fronde..



Petit manuel de voyage spatial

L'effet de Fronde

Pour comprendre l'effet de fronde, commençons par s'en passer et allons visiter les grosses planètes via une demi orbite de Hohmann. (Pb à 2 corps, Soleil & sonde)

Après une mise en orbite basse, on met les gaz (au bon moment !) et la sonde atteint sur une position proche de la Terre, une vitesse combinée de 29.8 km/s plus un v_o de l'ordre de 8 à 11 km/s.

Supposons la sonde à 1 ua du Soleil mais à plus de 700 000 km (diam. Zone d'influence terrestre), de la Terre. La sonde occupe alors le périastre d'une orbite elliptique avec $q=1$ ua, $Q=a_{\text{planète}}$, et $v_+ = 29.8+v_o$. Il reste donner à v_o la bonne valeur pour atteindre la planète, sachant que le grand axe a_{sonde} de cette orbite vaut $(a_{\text{planète}}+1)/2$.

Le temps de voyage T est de l'ordre de la demi période P de l'orbite de Hohmann, soit $T= a^{3/2}/2$ en années. Ceci donnerait les temps suivants.

Jupiter	Saturne	Uranus	Neptune
2.7 ans	6 ans	16 ans	30.6 ans

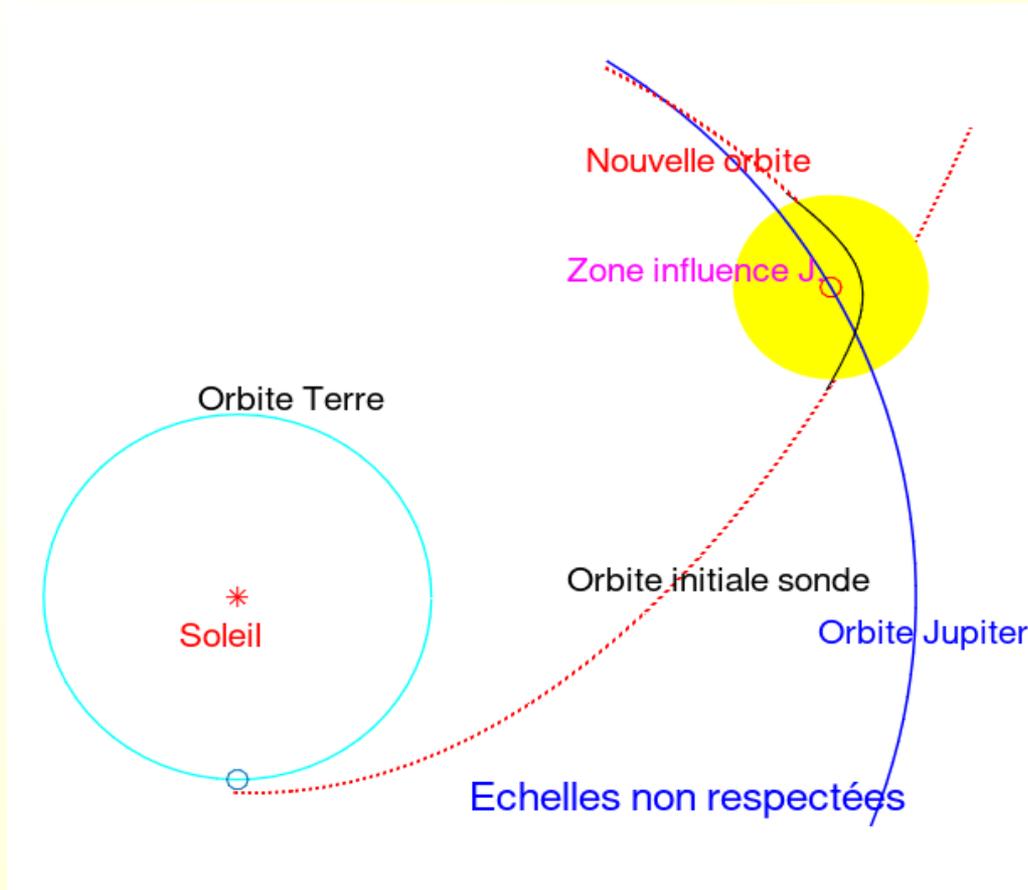
Les temps de vol pour Voyager 2 furent bien plus courts :

1.87 ans, 4.01 ans, 8.43 ans, 12.01 ans (avec effet de fronde)

Pour Jupiter, pas d'effet de fronde, mais un v_o plus important qui permet aussi de croiser Jupiter sans être satellisée autour.

Petit manuel de voyage spatial

Explication de l'effet de Fronde



On a partout,

$$\mathbf{S}_s = \mathbf{S}_J + \mathbf{J}_s \text{ (au temps } t)$$

$$\text{(ou } \mathbf{R}_s = \mathbf{R}_J + \mathbf{r}_s \text{)}$$

Soit en dérivant par rapport au temps t ,

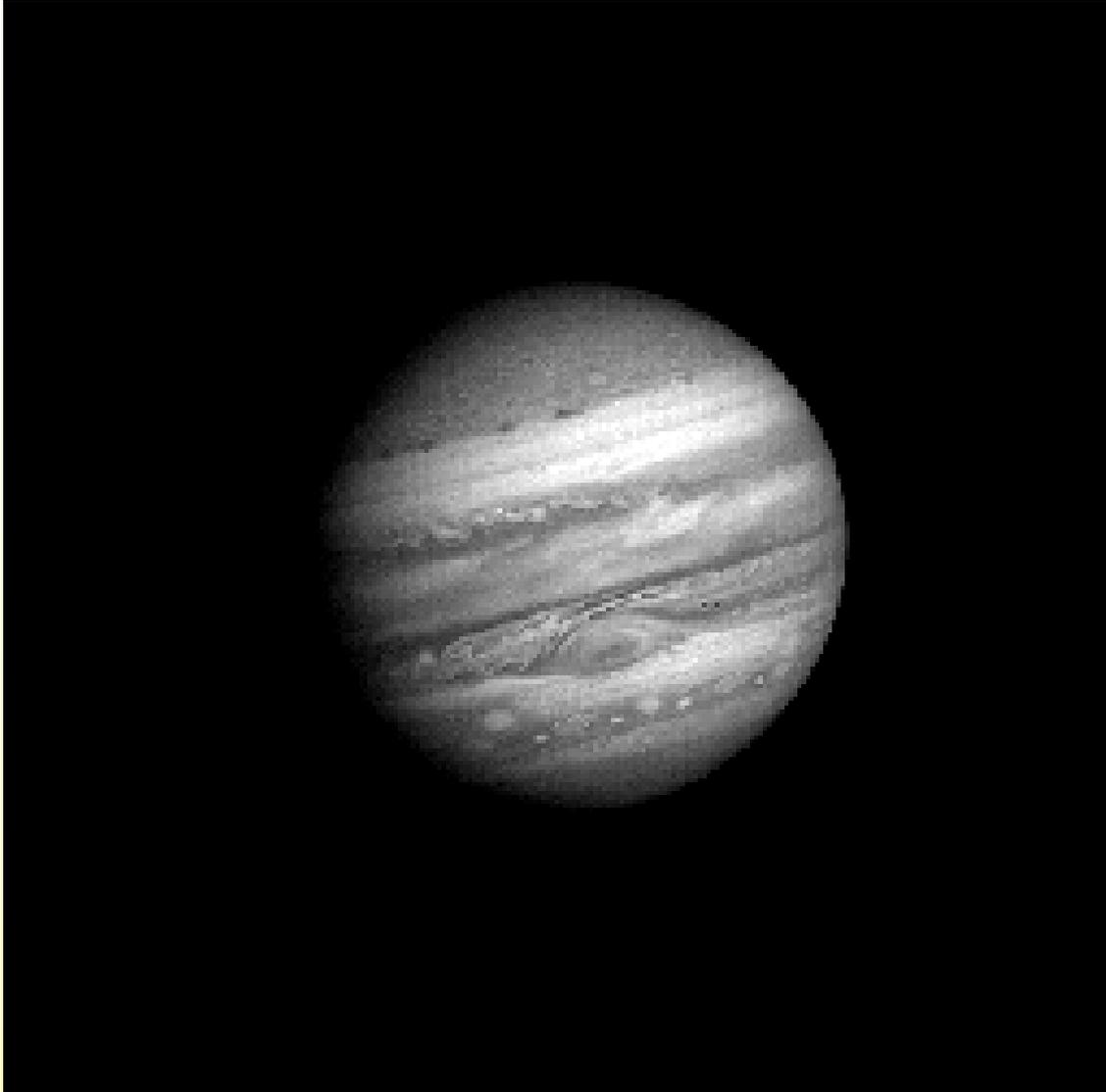
$$\mathbf{V}_s = \mathbf{V}_J + \mathbf{v}_s \text{ (au temps } t)$$

\mathbf{V}_s et \mathbf{V}_J sont absolues

\mathbf{v}_s est relatif à Jupiter

Les *vitesses* relatives de la sonde en entrée ($\mathbf{v}_s(t_e)$ et sortie $\mathbf{v}_s(t_s)$) de la partie hyperbolique sont égales en module mais pas en direction. (C'est le *secret* de la méthode)
La sphère d'influence de Jupiter à un rayon de 43 millions de km.

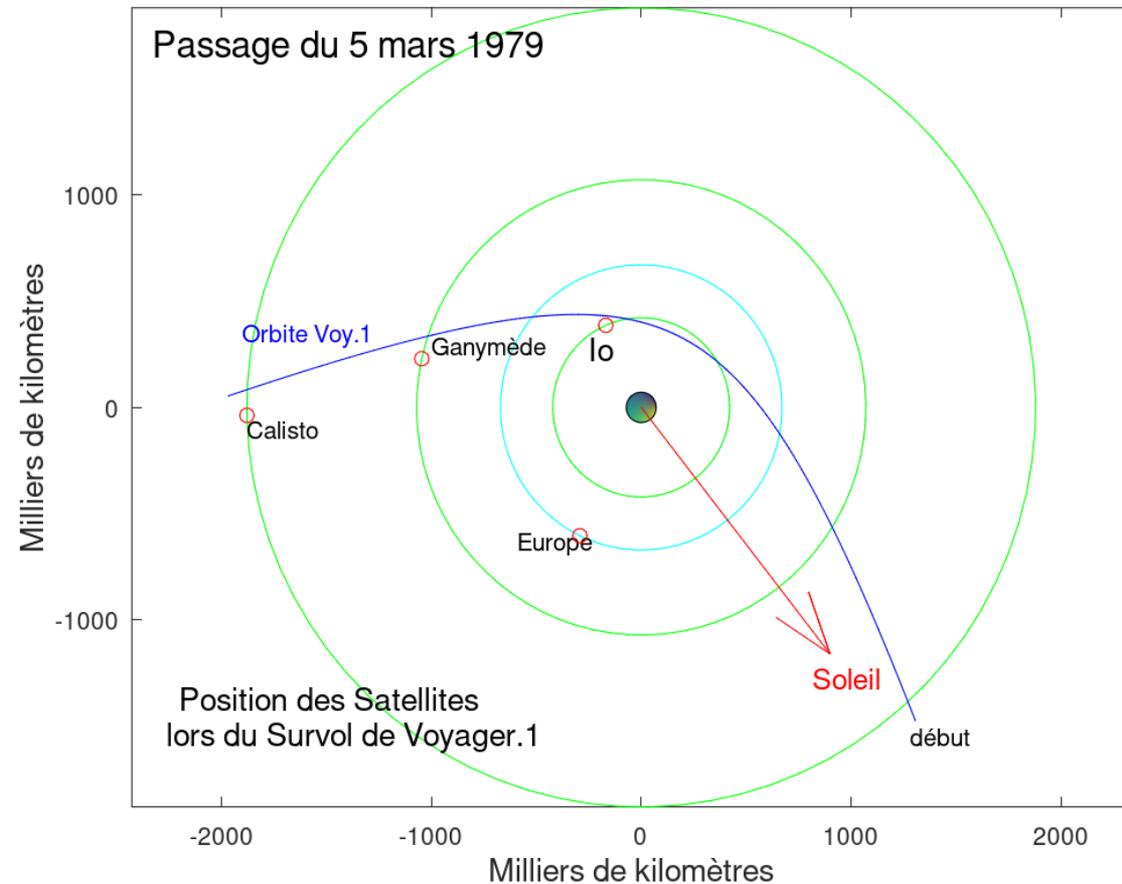
Approche de Voyager 1 vers Jupiter pendant une période de plus de 60 jours.



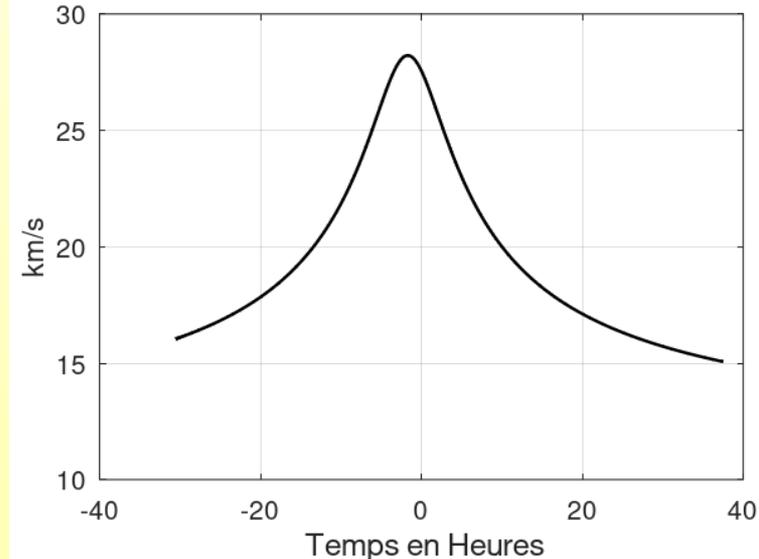
Visite de Jupiter

Orbite de Voyager 1 au passage de Jupiter

Voyager.1 visitant les satellites Galiléens



Vitesse Voyager.1 devant Jupiter



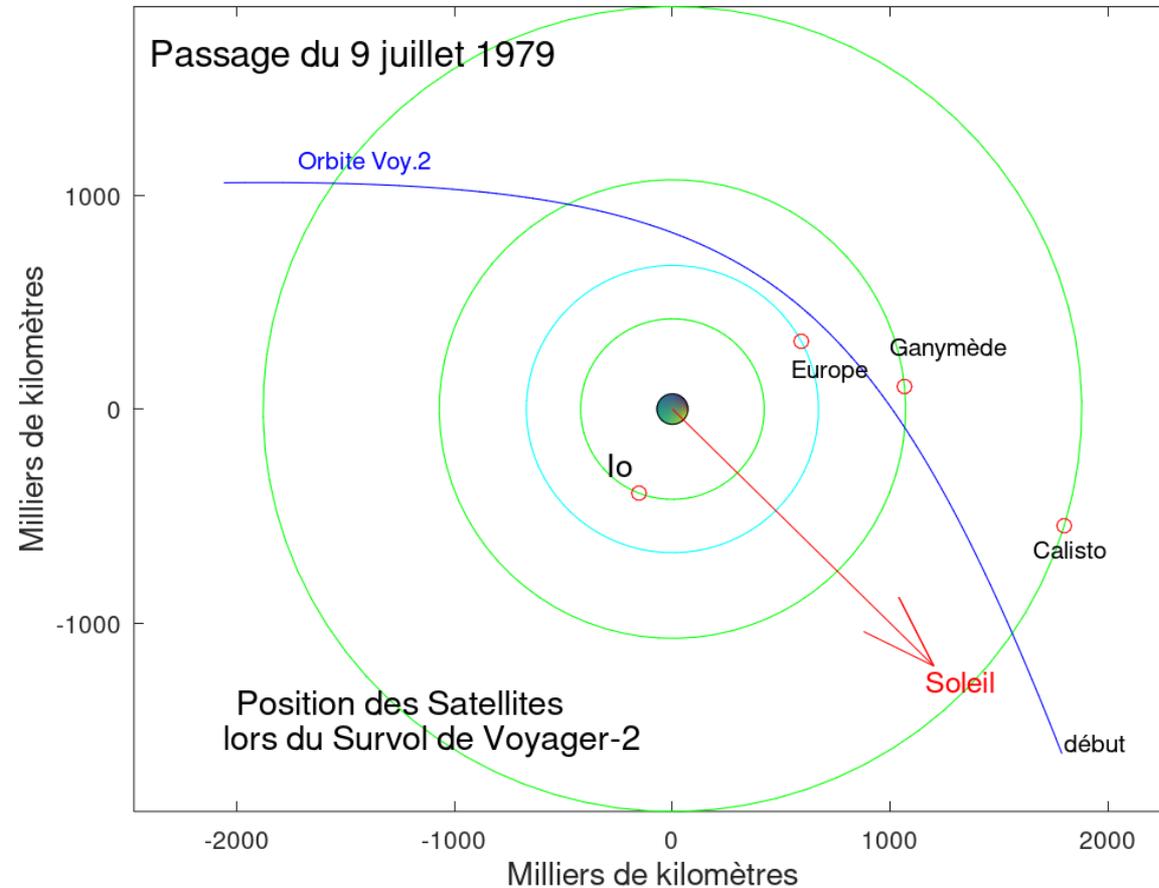
Il reste à combiner cette orbite avec celle de Jupiter en \mathbf{r} , \mathbf{v}



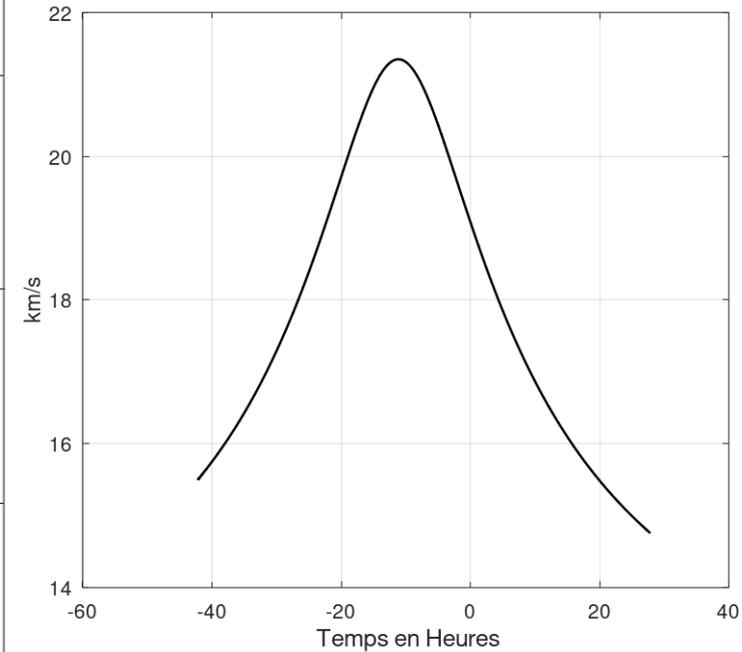
Visite de Jupiter

Orbite de Voyager 2 au passage de Jupiter

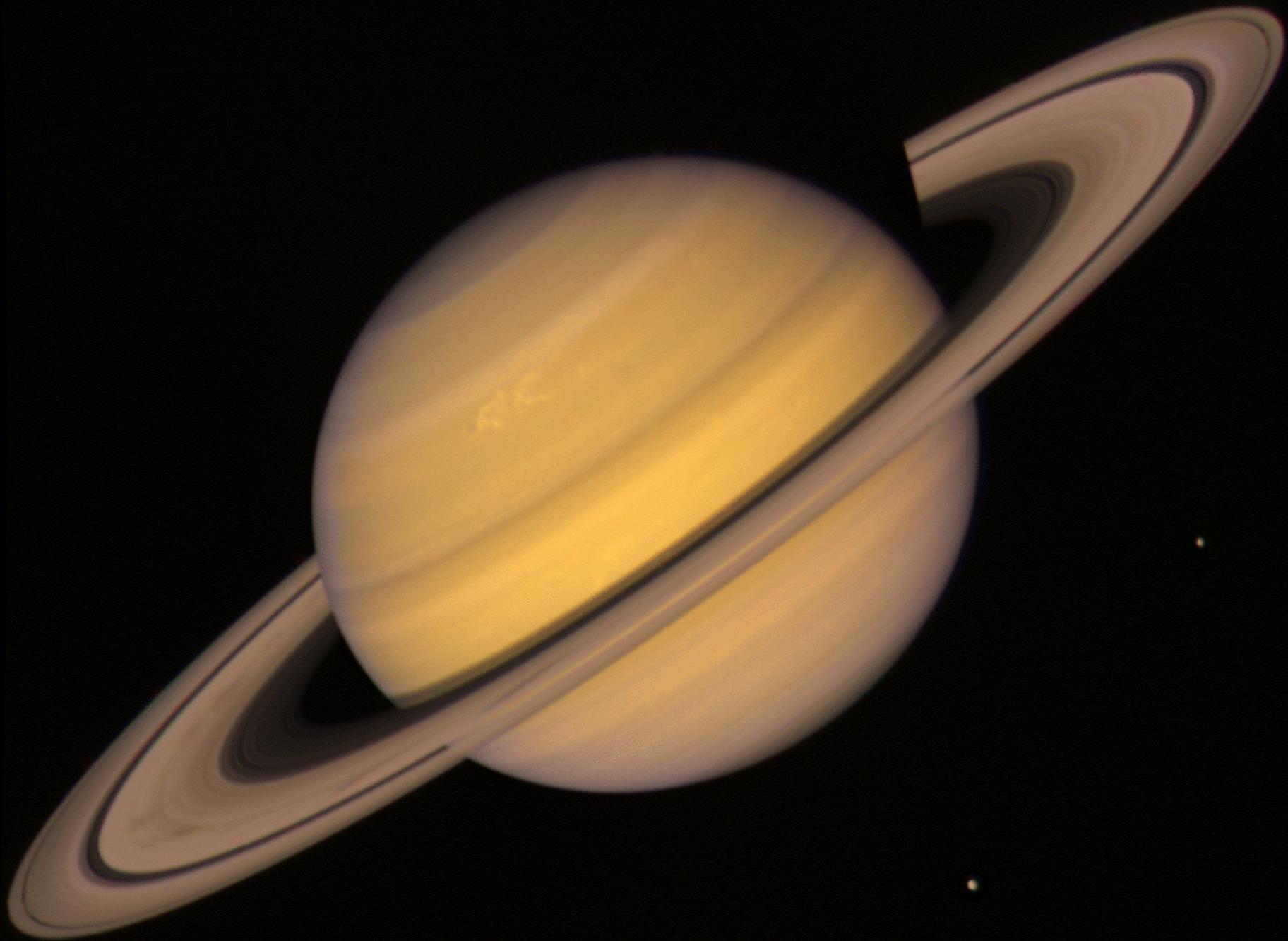
Voyager.2 visitant les satellites Galiléens



Vitesse Voyager.2 devant Jupiter



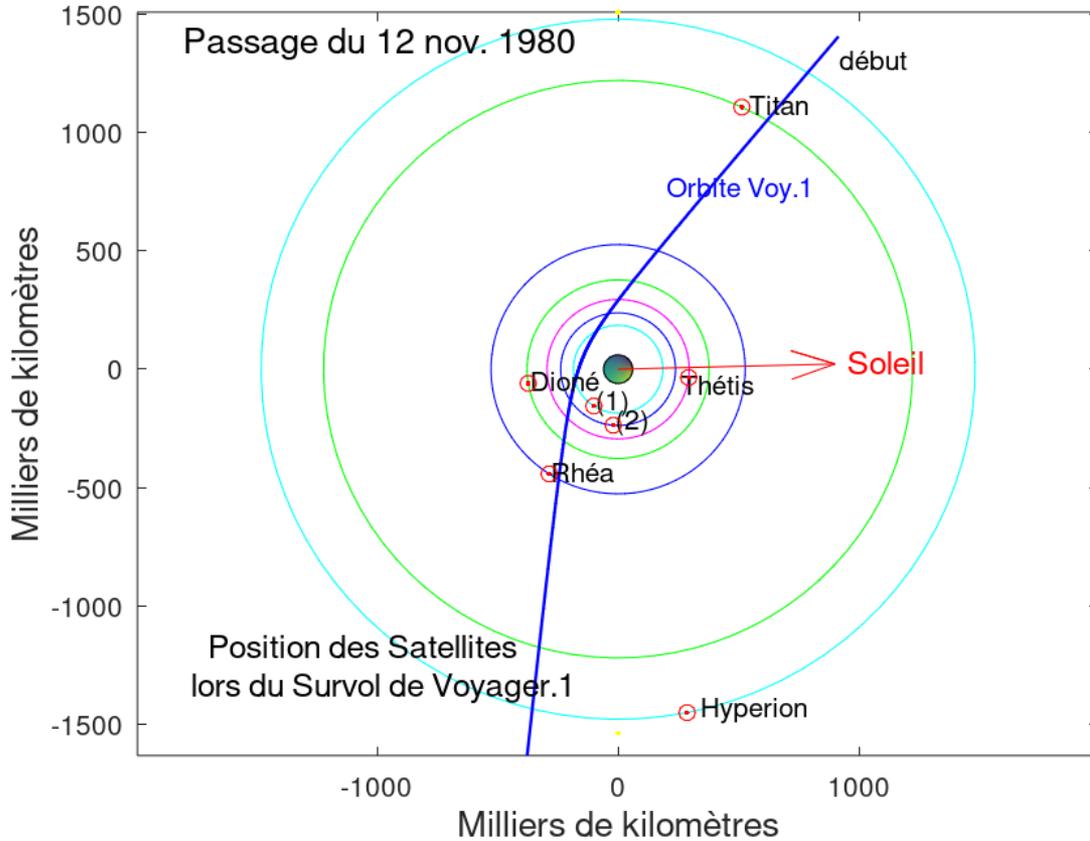
Il reste à combiner cette orbite avec celle de Jupiter en \mathbf{r} , \mathbf{v}



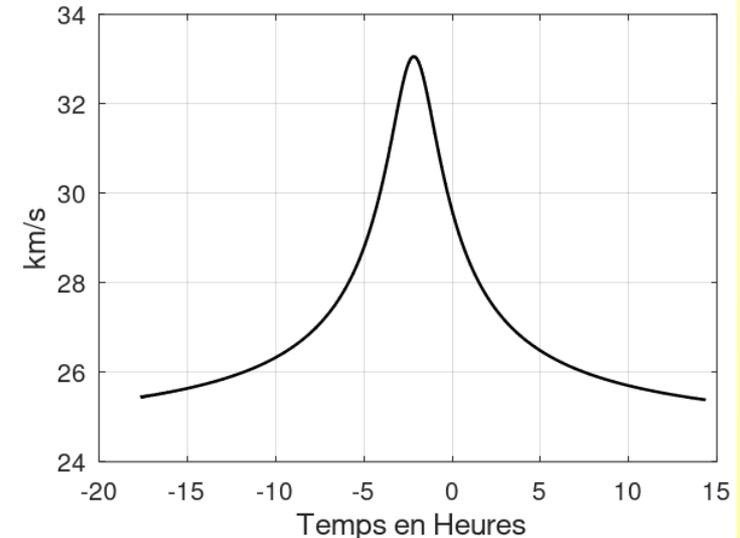
Visite de Saturne

Orbite de Voyager 1 au passage de Saturne

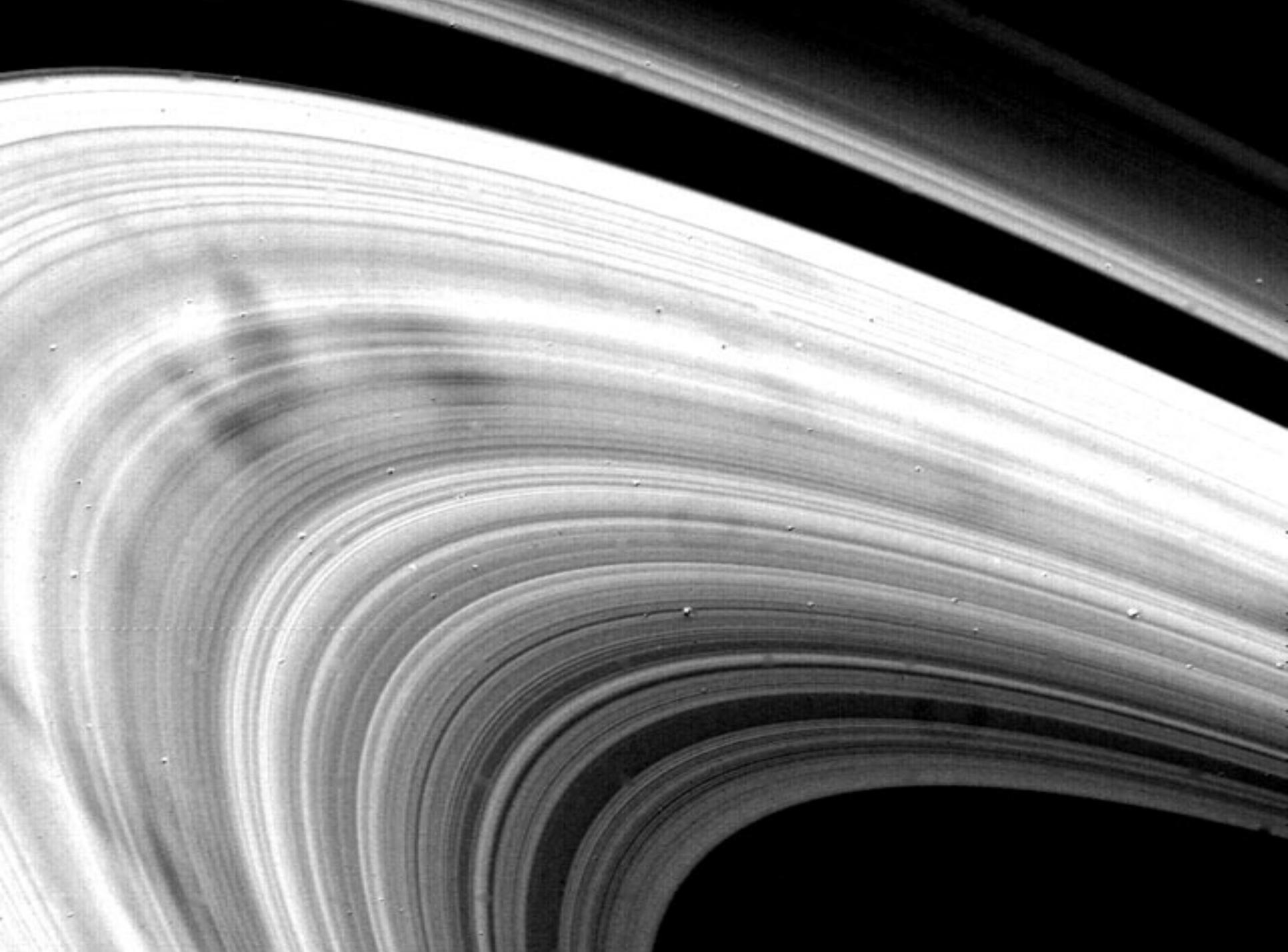
Voyager.1 visitant les satellites de Saturne



Vitesse Voyager 1 devant Saturne



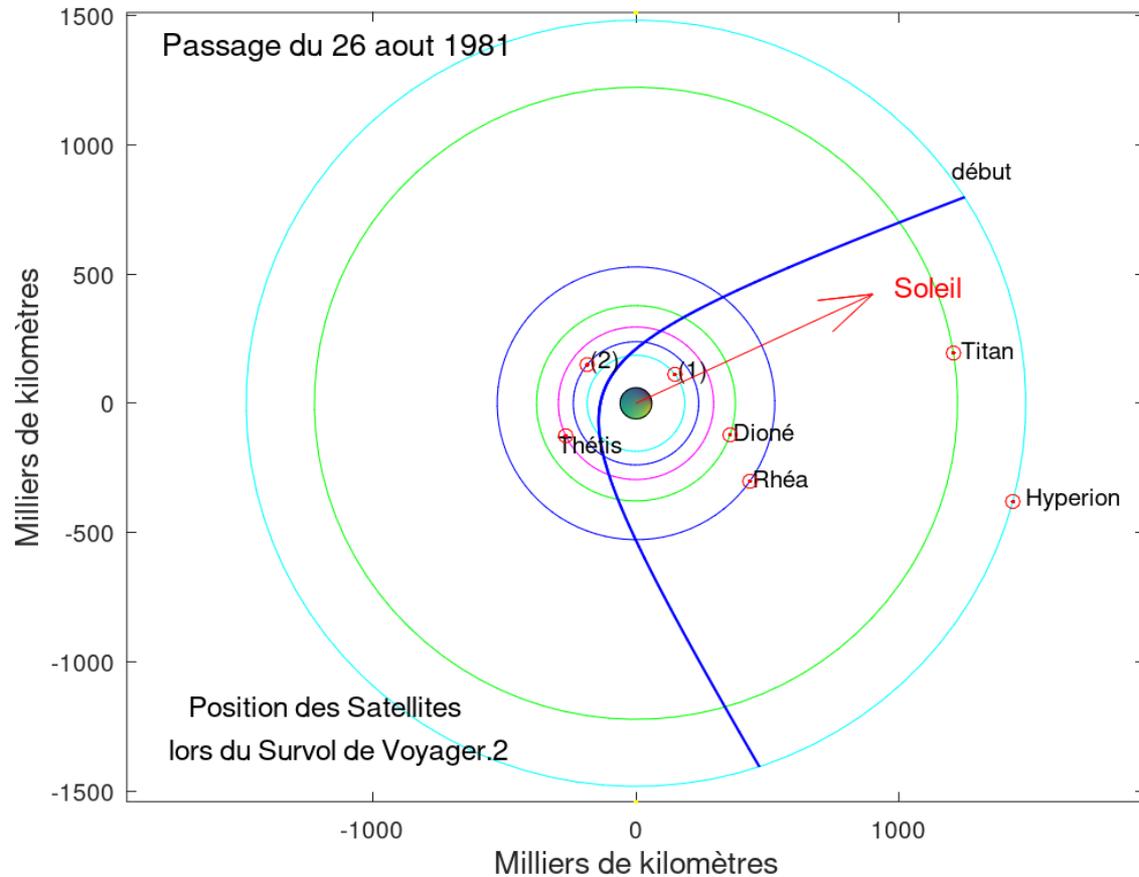
Il reste à combiner cette orbite avec celle de Saturne en r, v



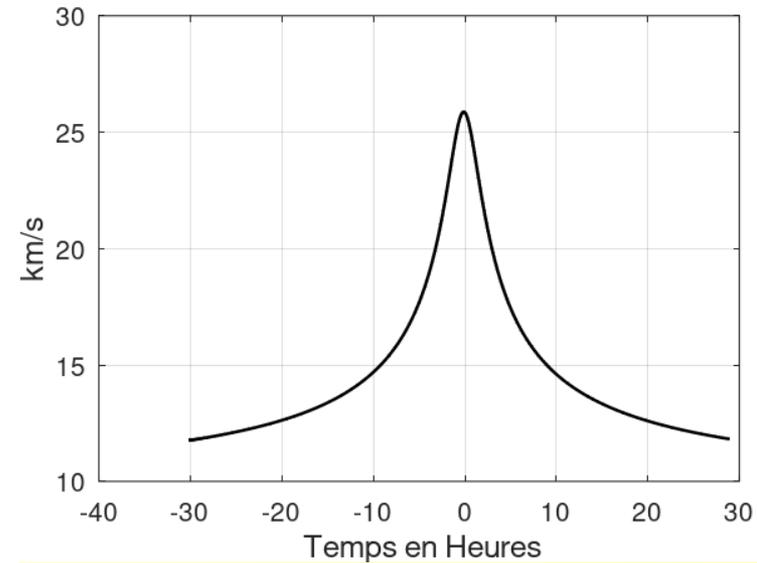
Visite de Saturne

Orbite de Voyager 2 au passage de Saturne

Voyager.2 visitant les satellites de Saturne



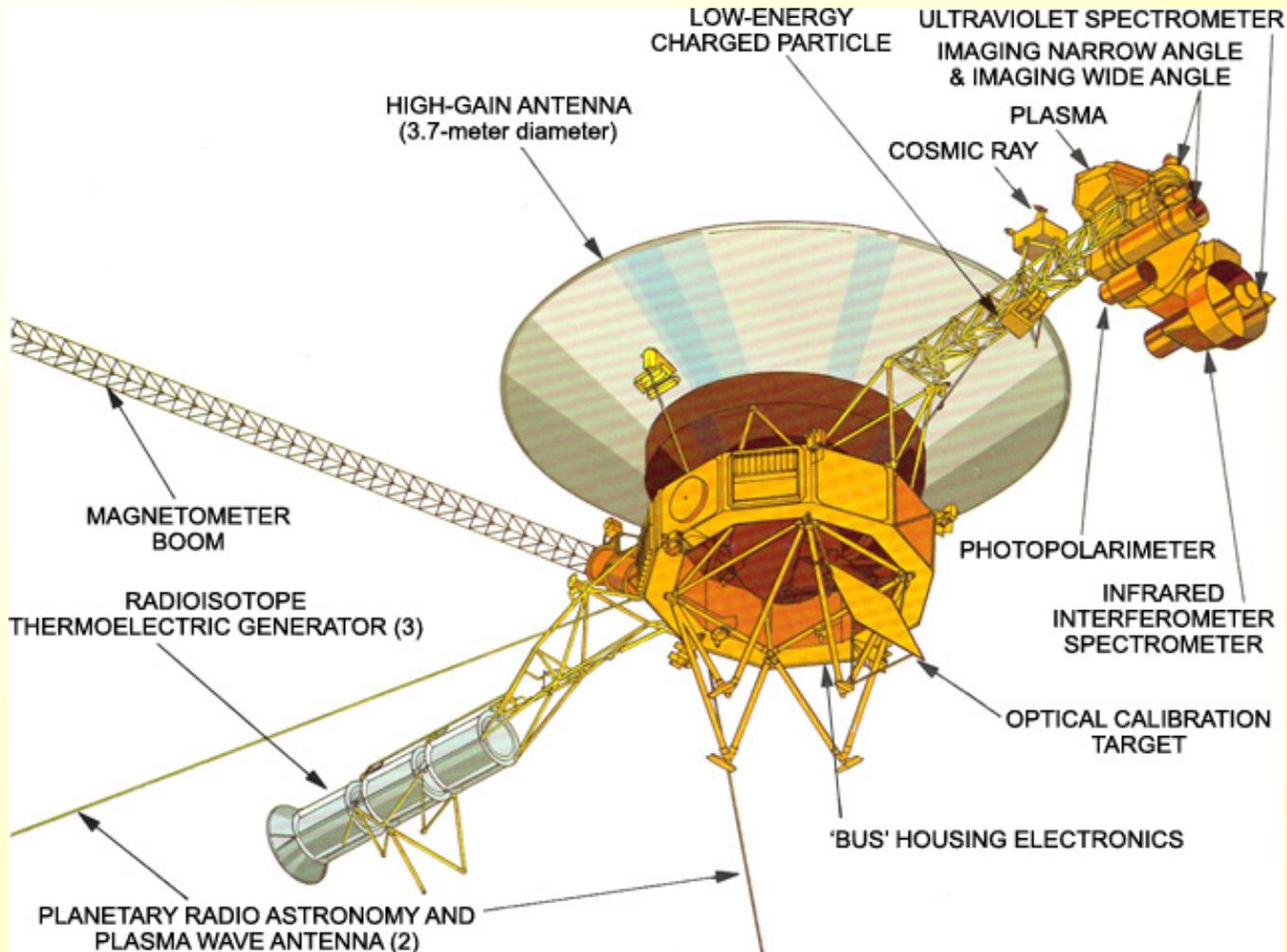
Vitesse Voyager 2 devant Saturne



Il reste à combiner cette orbite avec celle de Saturne en r, v

Structure physique des sondes.

- Les sondes sont stabilisées en rotation sur trois axes pour permettre de longs temps d'intégration.
- Cette stabilisation assure un alignement précis avec la Terre pour maintenir une liaison radio correcte en profitant du gain maximum des antennes.

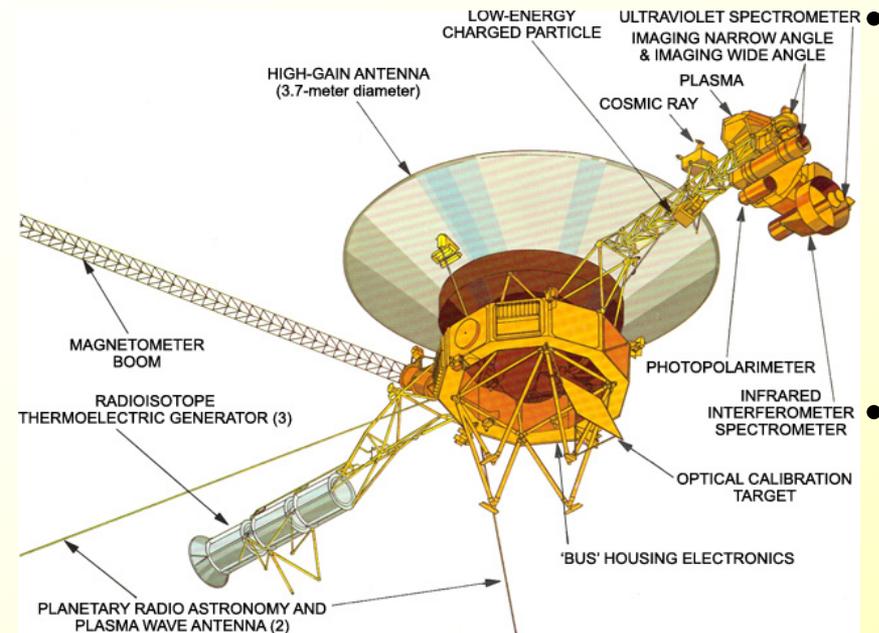


Structure des sondes.

- Chaque Voyager est constitué d'un bus en décagonal, mesurant 47 cm de hauteur et 1,78 m de diamètre d'une niche à l'autre.

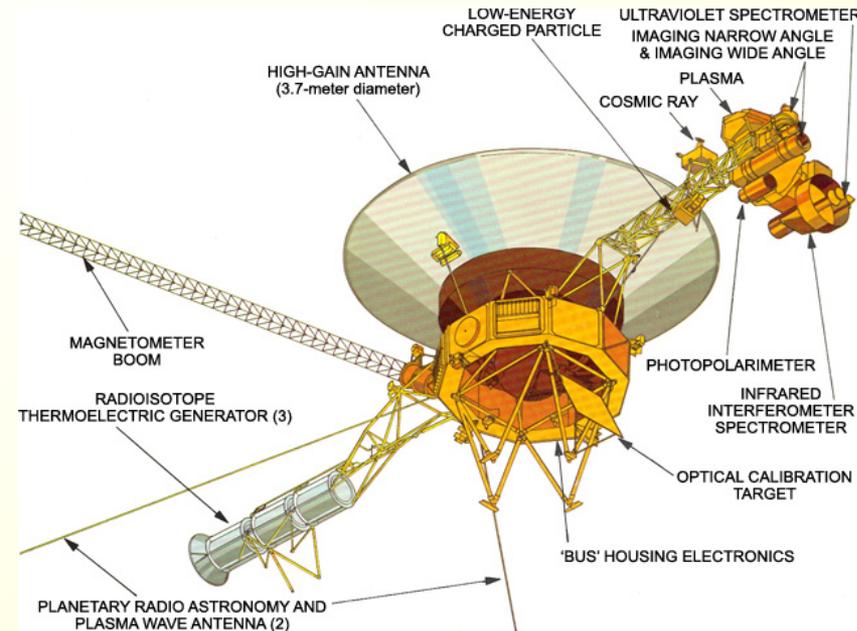
Une antenne parabolique à gain élevé de 3,66 m de diamètre a été montée au sommet du bus. La majeure partie des instruments scientifiques est montée sur une flèche s'étendant à environ 2,5 m du vaisseau spatial.

- À la fin du boom scientifique, il y a une plate-forme de balayage orientable sur laquelle sont montés les instruments d'imagerie et de télédétection spectroscopique. Les détecteurs de plasma et de particules chargées sont également montés à différentes distances le long du boom scientifique.

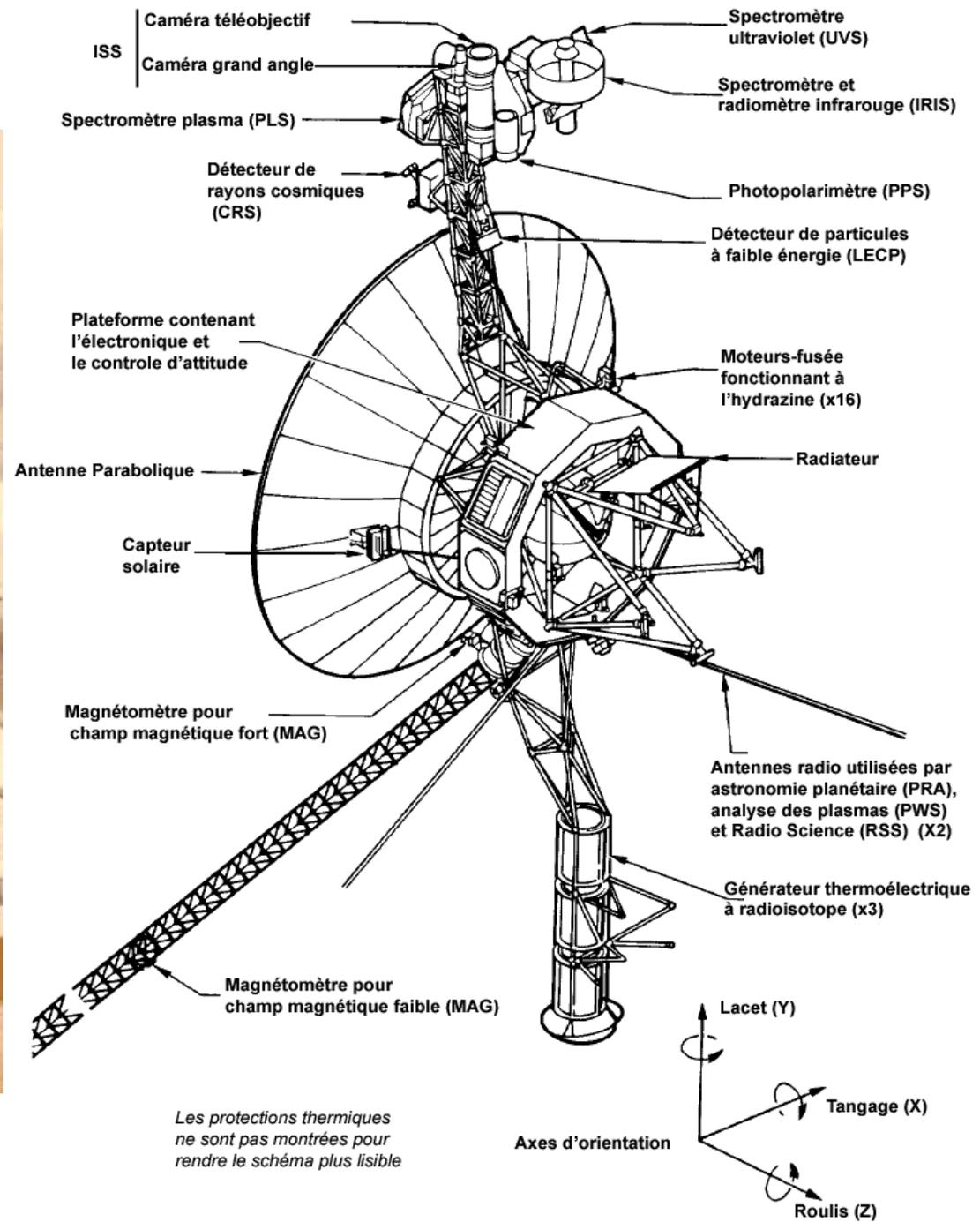


Structure des sondes.

- Les magnétomètres sont situés le long d'une flèche séparée s'étendant sur 13 m du côté opposé à la flèche scientifique. Une troisième flèche, s'étendant vers le bas et s'éloignant des instruments scientifiques, contient les générateurs thermoélectriques à radio-isotopes (RTG) du vaisseau spatial.
- Deux antennes fouet de 10 m (utilisées pour les études sur les ondes de plasma et la radioastronomie planétaire) s'étendaient également du vaisseau spatial, chacune perpendiculaire à l'autre.



Instruments



Energie électrique.

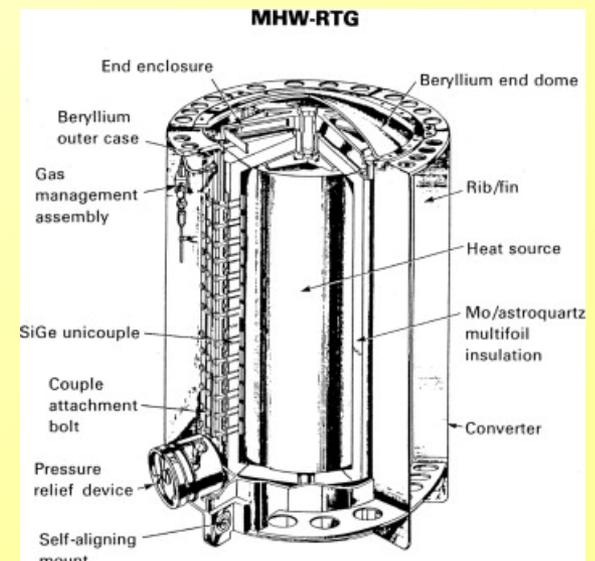
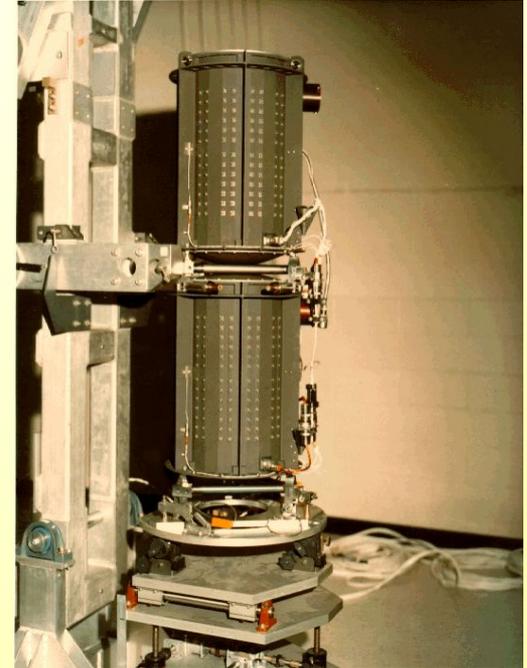
- L'alimentation électrique des systèmes et instruments des sondes est assurée par l'utilisation de trois *générateurs thermoélectriques à radio-isotopes* (RTG).
- Les RTG sont assemblés en tandem.
- Chaque unité RTG, contenue dans un boîtier extérieur en béryllium, mesure 40,6 cm de diamètre, 50,8 cm de longueur et pèse 39 kg.
- Les RTG utilisent une source radioactive (du plutonium 238 sous forme d'oxyde de plutonium) qui, en se désintégrant, dégage de la chaleur.
- Un dispositif thermoélectrique a été utilisé pour convertir la chaleur en énergie électrique. La production d'énergie diminue lentement avec le temps, à mesure que la matière radioactive est dépensée.
- Par conséquent, même si la puissance initiale des RTG au lancement du Voyager était d'environ 7 200 watts de chaleur pour 470 W de puissance électrique produite, elle était tombée à environ 335 W au début de 1997 (environ 19,5 ans après le lancement).
- À mesure que la puissance diminue, les charges de puissance sur le vaisseau spatial doivent également diminuer. Selon les prévisions faites en 1998, les mesures instrumentales de plus en plus limitées devaient être réalisées au moins jusqu'en 2020 !

Etat actuel des instruments

Instrument	Voyager 1	Voyager 2
Cosmic Ray Subsystem (CRS)	ON	ON
Low-Energy Charged Particles (LECP)	ON	ON
Magnetometer (MAG)	ON	ON
Plasma Wave Subsystem (PWS)	ON	ON
Plasma Science (PLS)	OFF	ON
Imaging Science Subsystem (ISS)	OFF	OFF
Infrared Interferometer Spectrometer and Radiometer (IRIS)	OFF	OFF
Photopolarimeter Subsystem (PPS)	OFF	OFF
Planetary Radio Astronomy (PRA)	OFF	OFF
Ultraviolet Spectrometer (UVS)	OFF	OFF

Générateur thermoélectrique à radioisotopes : RTG

- Ce système utilise un élément radioactif : le plutonium 238 qui développe 567 W/kg. Il existe bien un radionucléide plus efficace comme l'oxyde de curium (Cm_2O_3) qui développe 2.27 kW/kg, mais il émet des neutrons indésirables qui exigent un blindage dix fois plus lourd qu'un RTG à base de plutonium.
- Selon la NASA, le plutonium 238 reste l'isotope le plus efficace et le plus simple à contrôler bien que cette solution ne soit jamais sans risque.
- Cet isotope est impropre à la fabrication d'armes nucléaires.
- La sonde a besoin d'autant d'énergie uniquement pour ses systèmes internes, notamment pour le chauffage. Le réservoir de carburant doit être chauffé, sinon l'hydrazine se transformerait en glace. L'hydrazine fut utilisée comme carburant pour fusées à la fin de la Seconde Guerre mondiale pour les avions Messerschmitt Me 163.



Communications et orientation

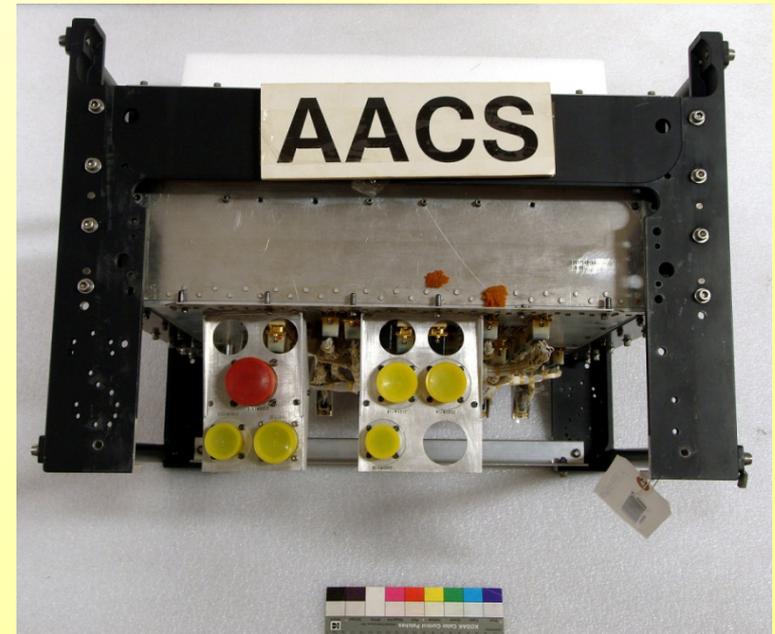
- Les communications sont assurées via l'antenne à gain élevé avec une autre à faible gain pour la sauvegarde.
- L'antenne à gain élevé prend en charge la télémétrie descendante en bande X et en bande S. Voyager a été le premier vaisseau spatial à utiliser la bande X comme fréquence principale de liaison de télémétrie. Les données pourraient être stockées pour une transmission ultérieure sur Terre grâce à l'utilisation d'un magnétophone numérique embarqué. La bande magnétique avait une capacité de 536 Mbits, ce qui correspondait à un maximum de 100 images. Le magnétophone a également été utilisé plus tard comme tampon, de sorte qu'une fois par semaine, 48 secondes de données de 115,2 Kbits provenant de l'instrument PWS (capteur de particules du plasma interstellaire) sont stockées, qui sont récupérées de la Terre tous les 6 mois.
- La **bande X** est une plage de fréquences d'onde radio dite 'SHF' (Supra-haute fréquence), elle s'étend de 8 à 12 GHz, utilisée pour les radars, les télécommunications et la radio. Elle est également utilisée dans le domaine spatial, où sa très longue portée dans l'espace est notamment exploitée pour la communication avec les sondes.
- La **bande S** de portée plus limitée est une bande de fréquences (2 à 4 GHz) notamment utilisée dans les radars météorologiques et certains radars militaires de surveillance aérienne, des satellites de télécommunications, la communication de la NASA avec ISS, les réseaux sans fil Wi-Fi (2400 à 2485 MHz), les réseaux mobiles LTE (2500 à 2690 MHz) et 5G (3400 à 3800 MHz)

Communications et orientation

- Voyager, en raison de sa distance par rapport à la Terre et du décalage temporel qui en résulte pour le commandement, a été conçu pour fonctionner de manière hautement autonome. Pour ce faire et exécuter les séquences complexes de mouvements du vaisseau spatial et d'opérations d'instruments, trois ordinateurs de bord interconnectés ont été utilisés. Le sous-système de commande informatique (CCS) est chargé de stocker les commandes des deux autres ordinateurs et d'émettre les commandes à des heures définies. Le sous-système de contrôle d'attitude et d'articulation (AACCS) est lui chargé de contrôler l'attitude du vaisseau spatial et les mouvements de la plate-forme de numérisation.
- *C'est ce dernier qui a été mis à jour en 2023 pour économiser du carburant.*

AACS

Attitude and Articulation Control Subsystem



Panne du FDS le 13-12-2023 !

- Le sous-système de données de vol (FDS) contrôle les instruments, y compris les changements de configuration (état) ou les taux de télémétrie. Les trois ordinateurs disposent de composants redondants pour assurer la continuité des opérations.
- Le 13 décembre 2023 le système de données de vol qui compile des informations techniques et des données scientifiques à bord de la sonde Voyager 1 a rencontré un dysfonctionnement. Celui-ci a entravé la transmission des données vers la Terre.
- Plus précisément, le système ne communique plus correctement avec l'unité de télécommunications (TMU) de la sonde. Le paquet de données transmis présente actuellement un modèle répétitif de uns et de zéros, bloquant ainsi la transmission des informations.
- Les ingénieurs ont identifié le problème, il va falloir reprogrammer cet ordinateur de bord pour qu'il fonctionne à nouveau correctement.
- Les tentatives simples, comme le redémarrage du système, se sont révélées infructueuses.
- ***Le 2 Janvier 2024, la NASA*** estimait que ça pourrait prendre plusieurs semaines. Et pour cause, en raison de son éloignement, chaque transmission prend près d'un jour et une réponse nécessite un jour supplémentaire.
- La complexité de la situation vient aussi de l'âge et du matériel de la sonde. Les ingénieurs doivent travailler avec les technologies disponibles à cette époque, ce qui nécessite des solutions logicielles créatives.

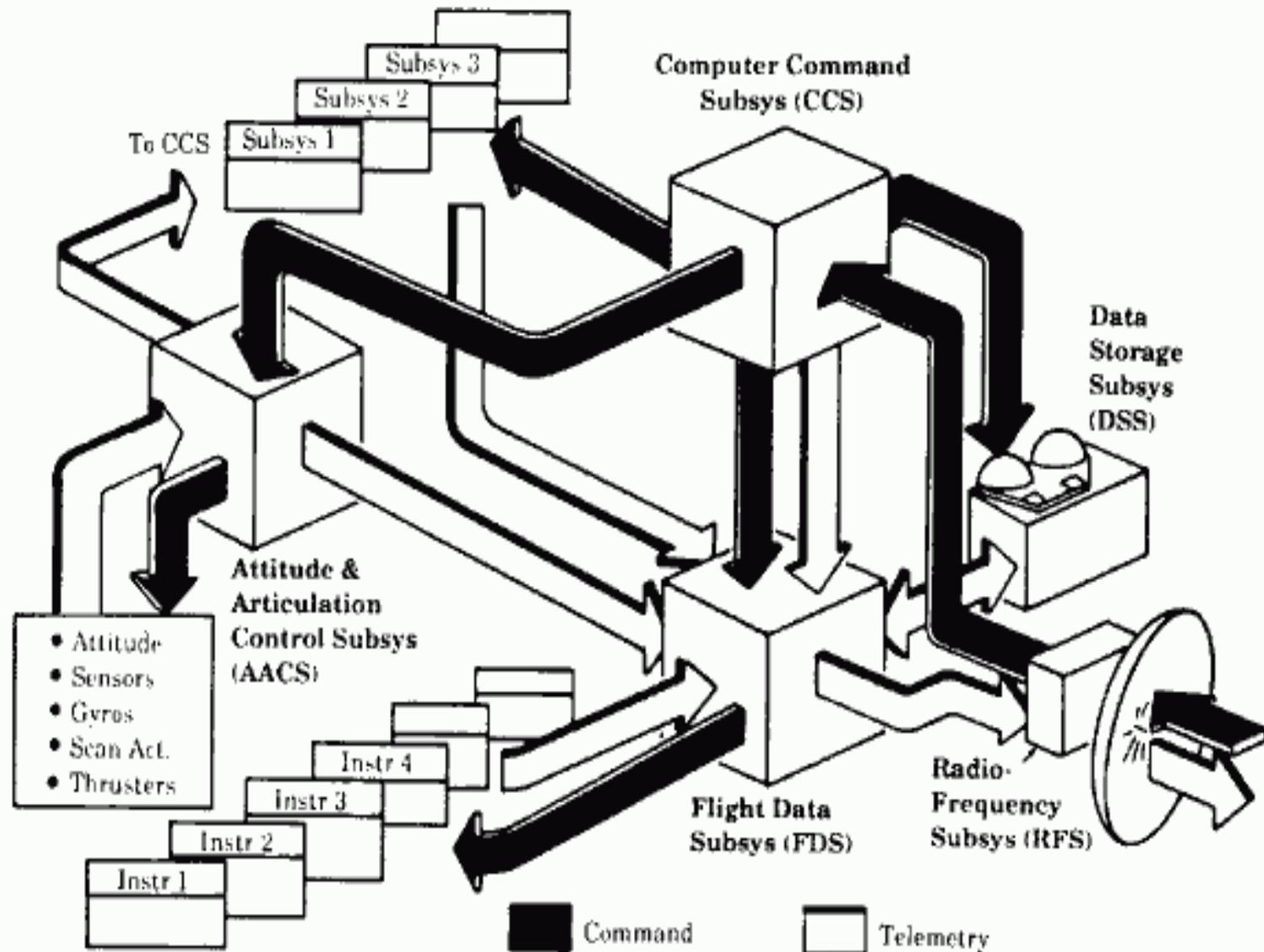
Ordinateurs de bord

- Le microprocesseur et l'électronique de tous les ordinateurs ont été sélectionnés de manière à pouvoir résister à la ceinture de rayonnement de Jupiter, dont la dose de rayonnement peut tuer un humain en quelques minutes.
- Pioneer 10, par exemple, a été touché par une dose de rayonnement 500 fois supérieure à celle qui tuerait un humain lors de son survol. La conception en double s'est avérée efficace lorsque l'un des ordinateurs de Voyager 1 est tombé en panne en 1992.
- Depuis, la sonde spatiale travaille avec le système de sauvegarde. Le système a fait ses preuves et Galileo , Magellan et Cassini disposent chacun d'un CCS et d'un AACS.
- L'AACS est le système d'articulation et de contrôle d'attitude de la sonde Voyager, qui maintient ainsi son antenne dirigée vers la Terre.
- Son rôle est de contrôler l'orientation spatiale de la sonde par l'allumage des moteurs à combustible solide (Hydrazine) . C'est le premier système actif.
- Le FDS ne se retrouve plus aujourd'hui sur les instruments, car chaque expérience possède sa propre électronique, parfois encore plus puissante que l'ordinateur de bord.
- En 2005, les ordinateurs de bord Voyager comptaient chacun plus de 100 000 heures de fonctionnement à leur actif. Sur les 12 ordinateurs, 11 sont toujours actifs.
- *Appliqué à la Terre, ce serait comme si vous aviez allumé un total de 12 ordinateurs Apple II en août 1977 et que 11 d'entre eux fonctionnaient encore en 2005 !*

AACS (Attitude Articulation and Control System)

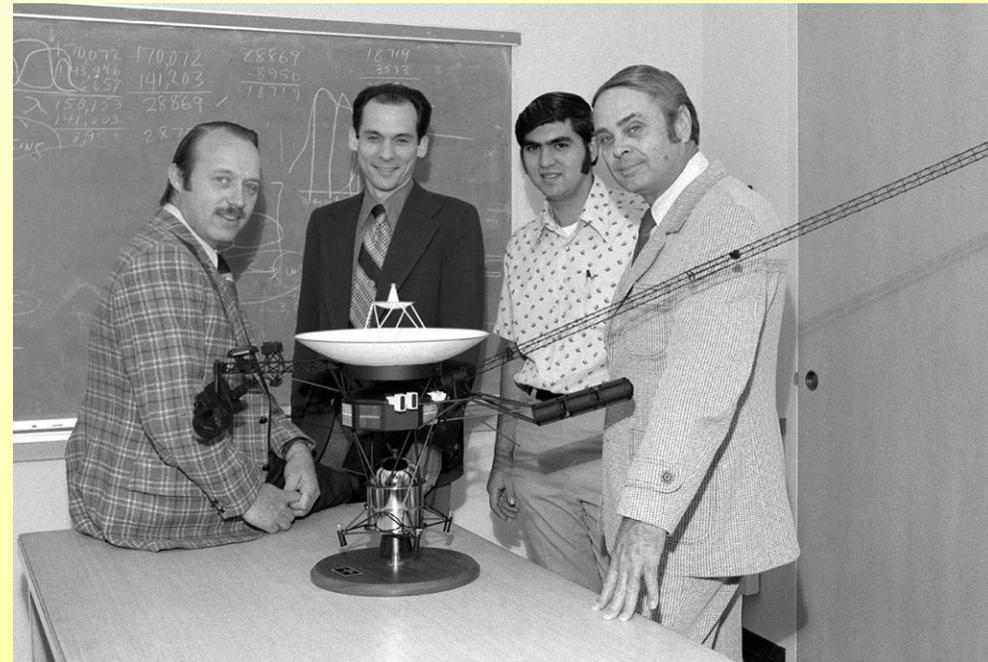
- En plus d'un ordinateur, l'AACS comprend d'autres parties : l'ensemble du contrôle d'attitude, les capteurs, les gyroscopes, etc. L'ordinateur à lui seul portait le nom HPACE (Hybrid programmable attitude control electronics).
- L'AACS a deux modes, le mode Gyro et le mode Étoile.
- En mode gyroscope, qui durait de quelques heures à quelques jours maximum alors que la sonde était la plus proche de la planète et que la plate-forme d'instruments devait être alignée très précisément, des gyroscopes à rotation rapide fournissaient un signal de référence. Si la sonde spatiale changeait d'orientation dans l'espace, cela induisait un signal aux gyroscopes, qui déclenchaient alors sa réorientation. Sans calibrage, il y avait un décalage lié au système de 0,5 degré par heure ; avec calibrage, il pouvait être réduit à une valeur de 0,05 degré par heure.
- La sonde a utilisé le mode étoile le reste du temps. À cette fin, un capteur solaire a été utilisé à l'extrémité de l'antenne parabolique et un capteur stellaire latéral visant l'étoile Canopus. Dès que le soleil ou l'étoile se trouvait en dehors d'une certaine zone, l'AACS générerait une correction de trajectoire et les ramenait au centre du capteur. Le capteur solaire était un potentiomètre optique doté d'un détecteur de sulfure de cadmium. Il y avait une erreur d'alignement de 0,01 degrés et une correction était initiée si l'écart était de 0,05 degrés. Le capteur d'étoiles Kanopus était un tube photomultiplicateur avec un détecteur de césium avec le même champ d'erreur de mesure et de correction.

Les sous systèmes



Comment maintient-on en vie les vieilles missions spatiales ?

- Les sondes Voyager sont gérées avec des logiciels du XX^e siècle. Seuls des ingénieurs retraités et passionnés connaissent leur fonctionnement.
- Au sein de certaines agences spatiales, dont la Nasa, il existe des employés dont le métier n'est pas d'inventer de nouveaux systèmes ultramodernes, mais de jongler avec de vieilles technologies.



Comment maintient-on en vie les vieilles missions spatiales ?

- Maintenir en vie des missions spatiales du siècle dernier, parfois à des milliards de kilomètres de la Terre. Pour cela, ils font souvent appel à d'anciens ingénieurs enthousiastes à l'idée de replonger dans les disquettes poussiéreuses.
- Les deux sondes sont toujours contrôlées grâce au même ordinateur, installé sur un bureau beige hors d'âge au Jet Propulsion Laboratory de la Nasa. Un simple écriteau prévient : « *Équipement critique pour la mission Voyager, ne pas toucher.* »
- Ce bureau a vu défiler les images de Jupiter, Saturne, Uranus et Neptune, des données sur des lunes ou des astéroïdes qui ont changé notre vision du système solaire. Et ce n'est pas fini : la Nasa veut les exploiter jusqu'à ce que les piles nucléaires arrivent à bout de souffle.
- Suzanne Dodd, en charge du programme Voyager à la Nasa compte encore aujourd'hui sur l'aide d'Ed Stone, le scientifique – *désormais octogénaire* – qui a dirigé le programme dès 1972 et supervisé le lancement des sondes et les premières décennies de leur périple. L'homme connaît bien les petits et gros caprices de « ses » sondes et donne régulièrement de précieux conseils techniques.

2 ème partie

1. Quelques définitions
2. Allo la Terre...
3. Une moisson scientifique exceptionnelle
4. En conclusion

Le 21 Février 2024 : la panne de Voyager 1 n'est pas résolue !

- Voyager 1 approche de son 47ème anniversaire, malheureusement la NASA ne va probablement pas pouvoir le fêter dignement avec elle.
- Cet âge canonique pour un engin spatial pourrait au contraire marquer son acte de décès. Depuis novembre, Voyager 1 ne communique plus avec la Terre. Depuis, la NASA fait tout pour la ranimer, sans succès. Est-ce la fin pour la sonde légendaire ?
- Même en cas d'échec avec Voyager 1, la NASA continue de communiquer avec Voyager 2, son vaisseau jumeau, qui a également atteint l'espace interstellaire en 2018. De plus, la sonde New Horizons de la NASA est prévue pour quitter le système solaire dans les années 2040, poursuivant l'exploration de l'inconnu.

6 Mars 2024 : inquiétude pour Voyager 1!

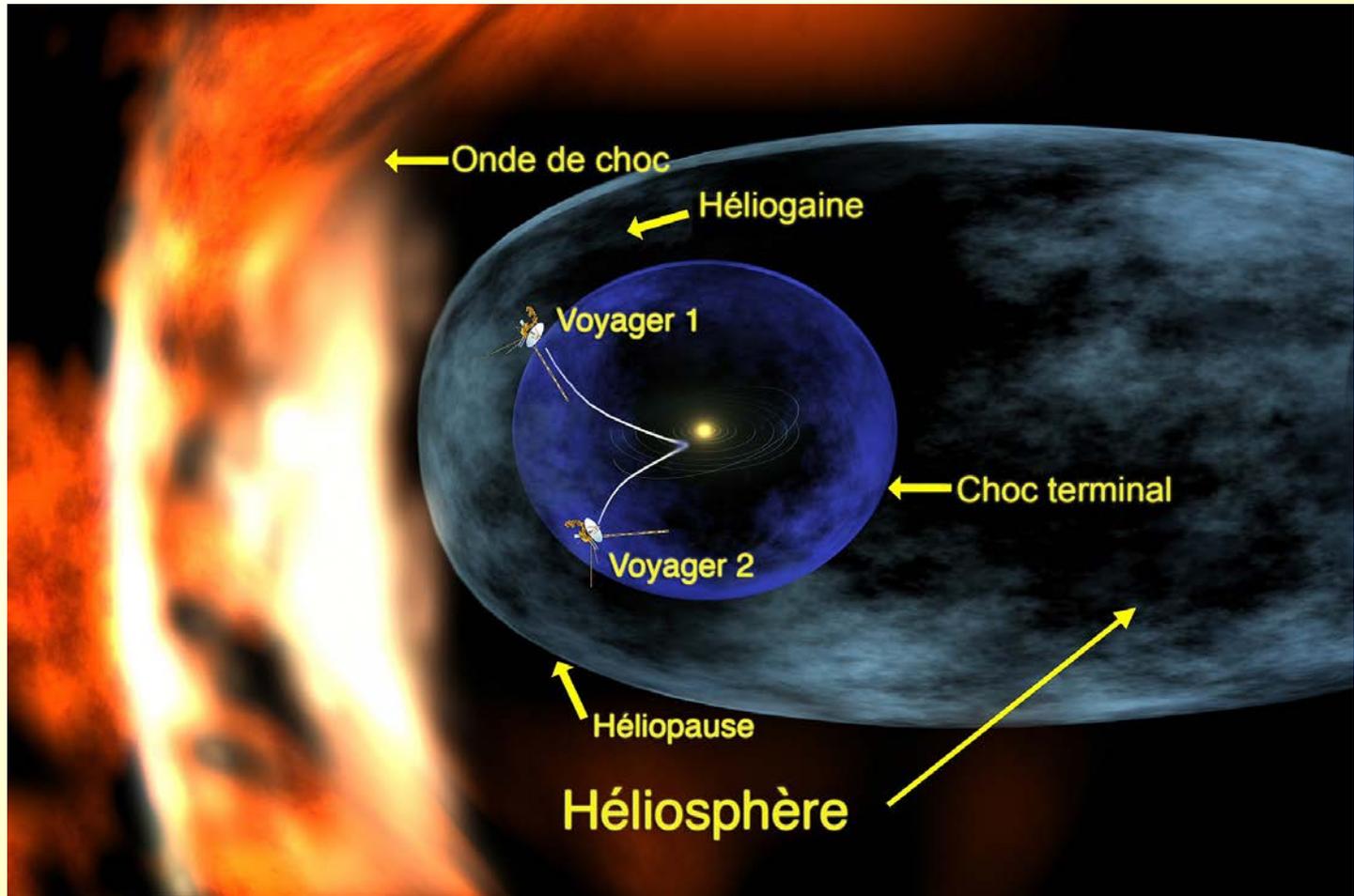
- Les équipes sont actuellement plongées dans la documentation de leurs prédécesseurs, qui avaient conçu les sondes Voyager il y a plusieurs décennies. Une liste de correctifs possibles est à leur disposition.
- Si le problème n'est pas résolu, la Nasa tentera sans doute des commandes de plus en plus risquées. Résoudre le bug de Voyager 1 prendra du temps : la sonde est si loin qu'il faut environ une journée pour lui envoyer une commande puis autant pour recevoir sa réponse. Il faudra certainement encore des semaines, voire des mois, pour sauver Voyager 1.

Définitions

- *L'espace interstellaire qu'est-ce c'est et où commence-t-il ?*
- *« Les scientifiques définissent le début de l'espace interstellaire comme l'endroit où le flux constant de matière et le champ magnétique du Soleil cessent d'influencer son environnement, résume la Nasa sur son site.*
- *Cet endroit s'appelle l'héliopause. Il marque la fin d'une région créée par notre Soleil qui est appelée l'héliosphère. »*
- *L'héliosphère s'étendrait jusqu'à 100 unités astronomiques du Soleil (une unité astronomique équivaut à environ 150 millions de kilomètres). Dans cette région de l'espace, la densité d'énergie du vent solaire est plus importante que celle du milieu interstellaire. Le vent solaire est un plasma constitué d'électrons et de neutrons, éjecté par le Soleil en permanence. Le vent solaire repousse les particules de l'espace interstellaire (qui viennent d'autres étoiles).*
- *La Nasa explique que tout est une question de particules : « Dans l'héliosphère, les particules sont chaudes mais moins concentrées. En dehors de cette bulle, les particules sont bien plus froides mais plus concentrées. »*
- *Donc si l'on pouvait arriver dans l'espace interstellaire, on constaterait qu'il y a une plus grande quantité de particules « froides », ainsi qu'un champ magnétique qui ne viendrait pas du Soleil.*

Schéma simplifié de l'héliosphère, montrant la position approximative des sondes *Voyager 1* et *2* en 2005. (NB : l'hypothèse de l'onde de choc au-delà de l'héliopause est aujourd'hui abandonnée).

- Le choc terminal correspond à l'ensemble des points de l'héliosphère où la vitesse du vent solaire devient subsonique (par rapport à l'étoile et dans le milieu interstellaire) après avoir été ralenti par les interactions avec le milieu interstellaire. Cela entraîne une compression, un réchauffement et un changement dans le champ magnétique.



Allo la Terre...

Antennes et bilan de liaison

Le *bilan de liaison* permet d'établir dans quelles conditions un signal émis par une antenne peut effectivement être reçu par une autre antenne située à la distance d . Il y a plusieurs bilans de liaisons qui sont fonction de la bande utilisée (X, ou S) et du sens de la liaison : (T \rightarrow Voy ou Voy \rightarrow T)

Le bilan est le rapport des puissances émise et reçu, et donné par :

$$P_r/P_e = G_1 \cdot G_2 \times (\lambda/4\pi d)^2$$

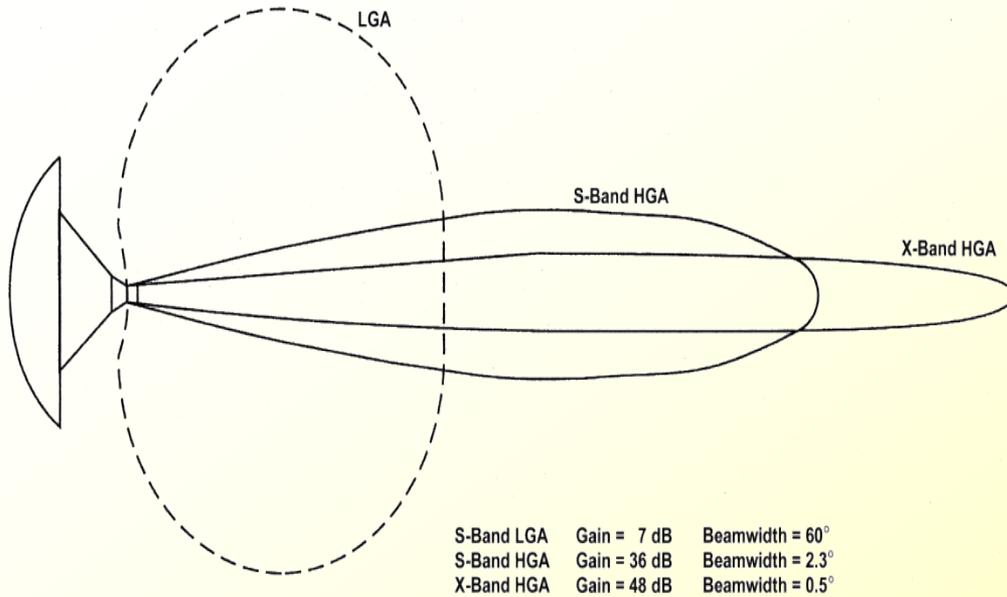
Les 2 gains G_1 , G_2 sont très différents (Taille des antennes!) ainsi que la puissance émise. Attention le *gain* n'est pas dû à une amplification électronique, mais à une concentration du faisceau lié au diamètre des l'antennes.

Les faisceaux (lobes) d'antenne sont très fin (pour avoir du gain !) et les antennes doivent être parfaitement orientées l'une vers l'autre. (Sinon, le produit $G_1 \cdot G_2$ diminue très rapidement).

In fine, la puissance effectivement détectable dépendra du niveau de bruit thermique des récepteurs.

Lobes de l'antenne

Antennes



Antenne terrestre

Allo la Terre...

Communiquer sur des milliards de kilomètres.

Malgré leur grande distance par rapport à la Terre, nous sommes toujours en mesure de communiquer régulièrement avec les sondes Voyager 1 et 2.

Après que le vaisseau spatial Voyager ait quitté la Terre et terminé son grand tour du système solaire, il a commencé son voyage dans les régions de l'espace qui échappent à l'influence de notre soleil, répondant à des questions sur ce qui se cache dans le grand vide cosmique entre les étoiles.

Nous sommes le vendredi 6 Octobre 2023 22h00.

Il y a trente-huit heures, un signal de 20 kW a été transmis depuis la Terre vers la sonde Voyager 1.

Dix-neuf heures plus tard, le signal est reçu par Voyager 1 interprété et renvoyé par un transpondeur de 20 watts.

Une des 3 stations de réception terrestre du Deep Space Network (DSN), reçoit ce signal de retour à un niveau de puissance de 9×10^{-8} pW (-160,48 dBm.) Pour référence, un très bon récepteur radio FM peut capter des signaux à 9×10^{-5} pW, le signal reçu du Voyager est 1000 fois plus faible .

L'alignement des antennes terrestres et de la sonde est donc primordial pour assurer la communication.

Madrid Espagne



Antenne 70m Canberra Australie



Allo la Terre...

Communiquer sur des milliards de kilomètres.

Le Deep Space Network se compose de trois complexes d'antennes stationnés autour du globe à environ 120 degrés de longitude l'un de l'autre. La séparation globale des stations permet à la plupart des engins spatiaux d'avoir une ligne de visée ininterrompue avec au moins une station, quelle que soit l'heure de la journée. Une station d'écoute se lèvera avant que la dernière station visible ne se couche. Voyager 1 est toujours visible depuis les trois stations, *Canberra, Australie Goldstone, Californie, États-Unis ; et Madrid, Espagne* mais Voyager 2 n'est visible que depuis le site de Canberra.

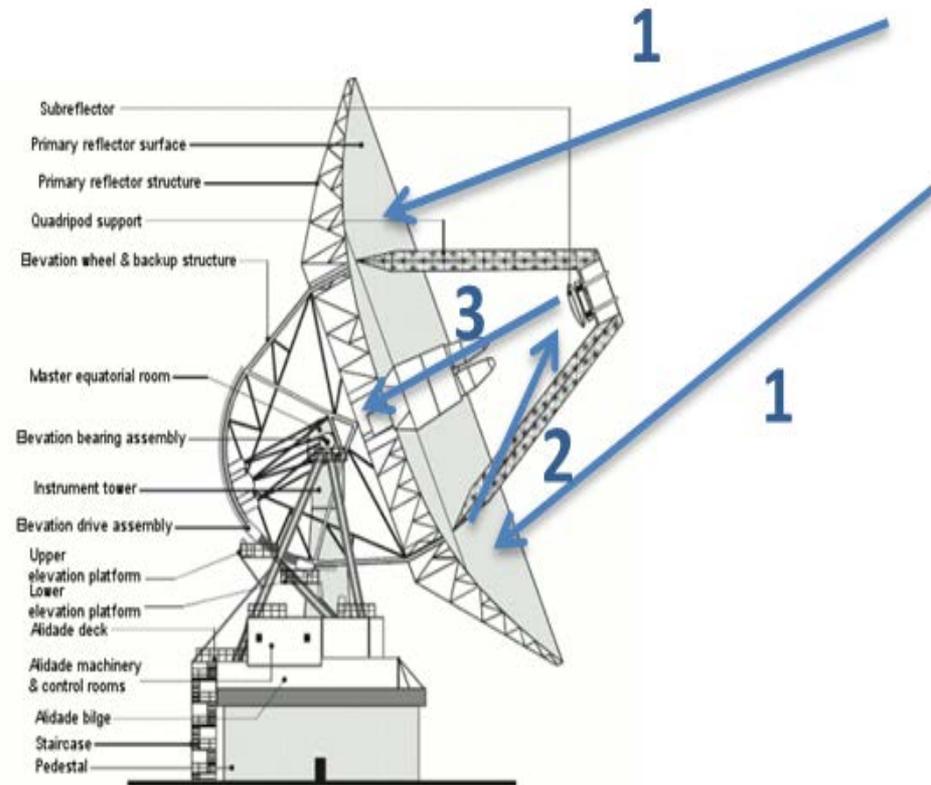
À mesure que le vaisseau spatial s'éloigne de la Terre, la force du signal diminue. En conséquence, le débit des données transmises doit diminuer également pour assurer la cohérence du signal sans perte d'informations. Les améliorations apportées à la sensibilité des récepteurs du Deep Space Network au cours des 40 dernières années ont atténué les réductions du débit de données en améliorant le rapport signal / bruit.

Les antennes terrestres

Chaque station du Deep Space Network dispose de plusieurs antennes de 34 mètres et d'une seule antenne de 70 mètres.

Bien que chacune des antennes soit plus que suffisamment puissante pour transmettre vers le Voyager, une seule antenne de 34 mètres ne collecte pas suffisamment de signal pour détecter la liaison descendante de la sonde.

Les antennes de chaque site peuvent être reliées entre elles pour recevoir simultanément le signal du vaisseau spatial, offrant ainsi un gain accru grâce à l'interférométrie radio .



Combien d'années encore ?

- Le vaisseau spatial Voyager poursuivra son voyage pendant des millénaires inconnus, mais nous ne pourrons communiquer avec eux que pendant encore quelques années (2048 Vgr 2).
- À ce moment-là, les générateurs thermoélectriques seront épuisés au point qu'ils ne pourront plus alimenter ni les instruments scientifiques restants du Voyager ni les émetteurs : le vaisseau spatial deviendra alors silencieux.
- Les scientifiques du Deep Space Network suivront le signal de liaison descendante du vaisseau spatial jusqu'à ce qu'il se transforme en silence et devienne partie intégrante du bruit de fond du système solaire, pour ne plus jamais être entendu par les humains.

Table 1-1. Spacecraft lifetime estimates in calendar years.

	Voyager 1	Voyager 2
Electrical power	2023	2023
Telemetry link capability		
7200 bps, 70-/34-m HEF ^a array	1994	1998
1400 bps, 70-m antenna	2007	2011
600 bps, 70-m antenna	2026	2030
600 bps, 34-m HEF antenna	2003	2007
160 bps, 34-m HEF antenna	2024	2029
40 bps, 34-m HEF antenna	2050	2057
Hydrazine for attitude control	2040	2048

Localiser la sonde

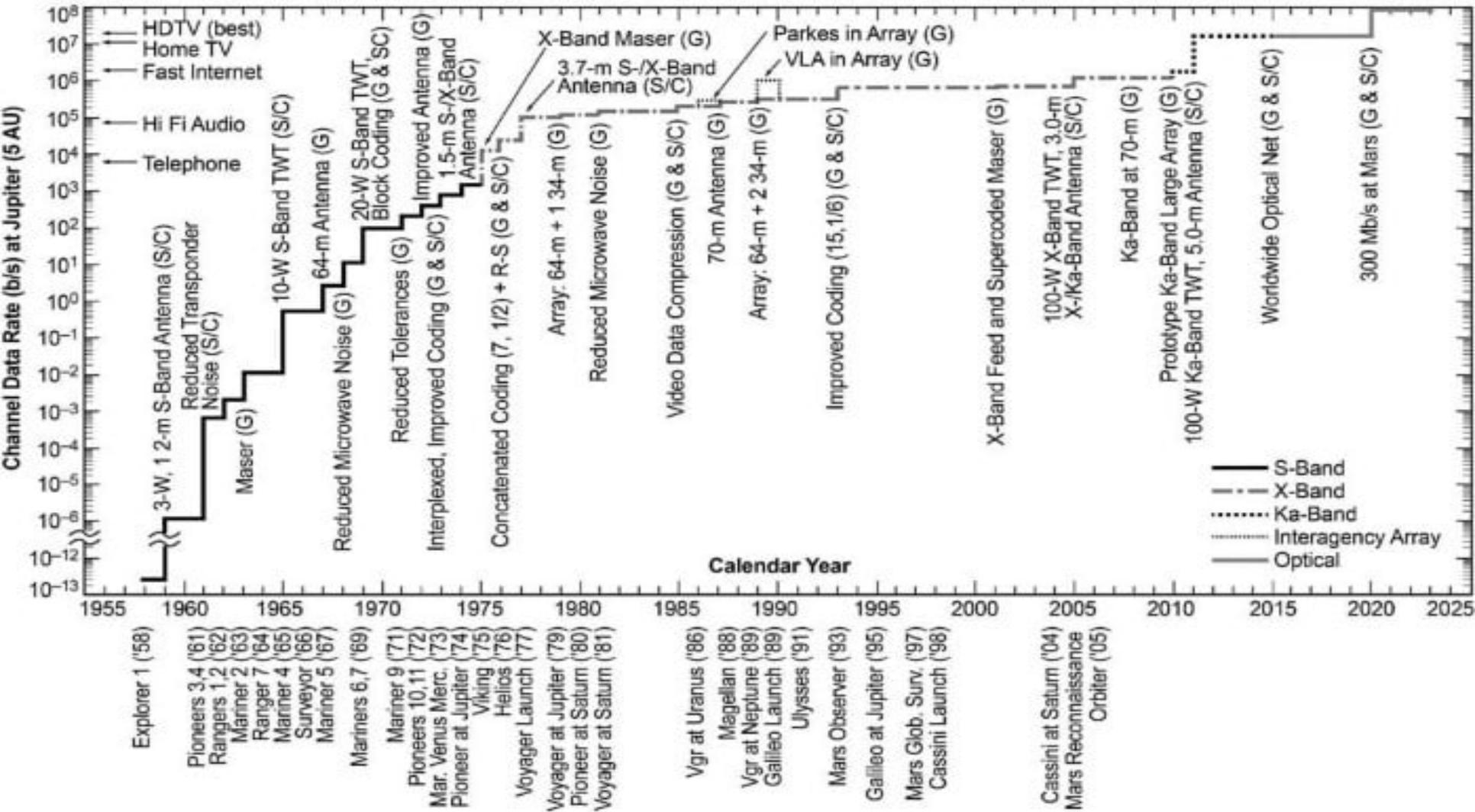
La localisation précise du vaisseau spatial au cours de son voyage a été réalisée grâce à la télémétrie Doppler, puis plus tard grâce à l'interférométrie à très longue base (VLBI) le long de deux lignes de base qui s'étendent de Goldstone, en Californie, à Madrid, en Espagne, et de Goldstone, en Californie, à Canberra, en Australie.

La ligne de base Goldstone-Madrid est utilisée pour déterminer l'ascension droite d'un vaisseau spatial et la ligne de base Goldstone-Canberra fournit un mélange entre l'ascension droite et la déclinaison. Lorsqu'elles sont combinées, les données peuvent localiser le vaisseau spatial avec une extrême précision dans la sphère céleste avec une erreur de mesure angulaire mesurée en nano-radians (un nano-radian d'erreur à 1 million de kilomètres équivaut à 100 cm).

Chaque site du Deep Space Network dispose d'une source de fréquence très précise qui peut être réglée pour compenser le décalage de fréquence Doppler provoqué par le mouvement relatif entre les antennes d'émission et de réception. La compensation prend en compte le mouvement de l'engin spatial, la rotation de la Terre autour du soleil et la révolution de la Terre autour de son axe. Les récepteurs sont capables de détecter des changements de fréquence d'une fraction de hertz.



Vitesse de transmission des données



Au revoir les terriens !

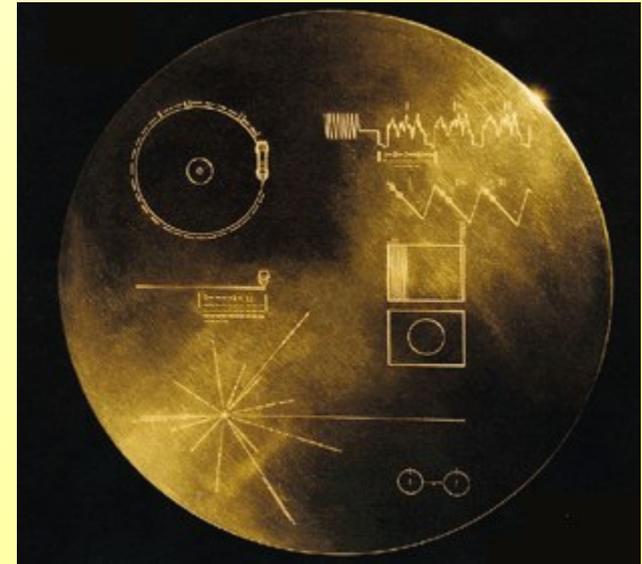
- C'est une des images les plus célèbres de l'exploration spatiale entamée par l'Homme il y a 60 ans : la Terre vue des confins du Système solaire. Pour le 30^e anniversaire de sa captation, à six milliards de kilomètres de notre monde, la Nasa a dévoilé une version revue et améliorée de cette image mythique.
- Un portrait rare et attendrissant de notre Planète bleue, perdue au milieu de l'océan, immense et silencieux, de l'espace. Nous (re)découvrons combien nous vivons sur une île-confetti, isolée. Songez que nous étions déjà quelque 5,2 milliards d'habitants, le 14 février 1990, quand le vaisseau Voyager 1 a pris cette photo historique.

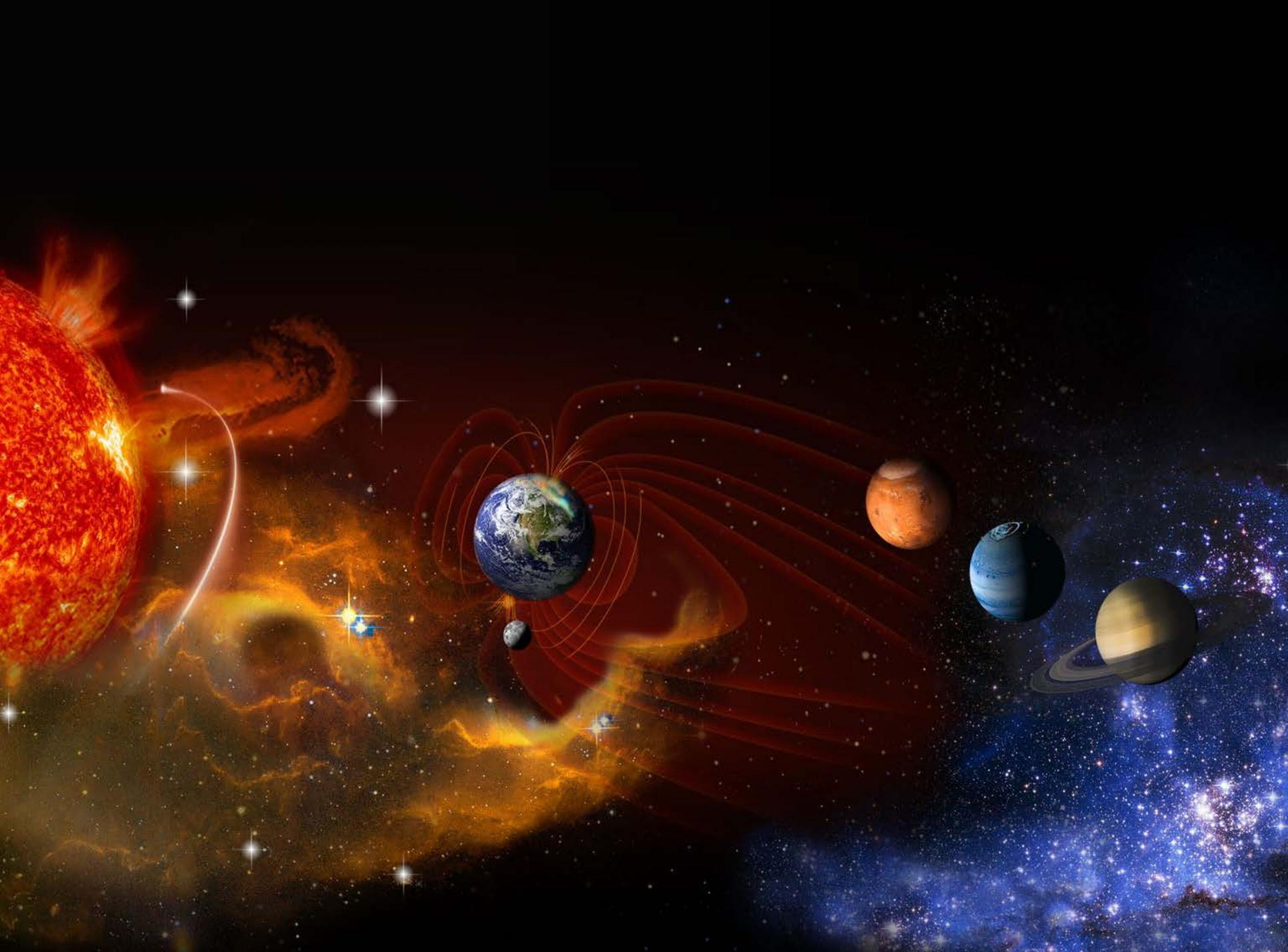


La Terre

Message in bottle

- Un disque en cuivre plaqué or de 12 pouces est fixé sur chaque Voyager sur l'un des côtés du bus. Ce disque contient des sons et des images de la Terre conçus pour décrire la diversité de la vie et de la culture sur la planète. Chaque disque est enveloppé dans une gaine de protection en aluminium. Des instructions expliquant d'où vient le vaisseau spatial et comment lire le disque sont gravées sur la pochette.
 - La galvanoplastie sur une zone de 2 cm du couvercle contient également une source ultra-pure d'uranium 238 (avec une radioactivité d'environ 0,26 nano curies et une demi-vie de 4,51 milliards d'années), permettant de déterminer le temps écoulé depuis le lancement en mesurant la quantité d'éléments filles au U238 restant. Les 115 images du disque ont été codées sous forme analogique.
 - Les sélections sonores (y compris des salutations en 55 langues, 35 sons naturels et artificiels et des portions de 27 morceaux musicaux) sont conçues pour une lecture à 1 000 tr/min.
- * Les sondes Voyagers n'étaient pas le premiers vaisseaux spatiaux conçus avec de tels messages vers le futur.





Une moisson scientifique exceptionnelle

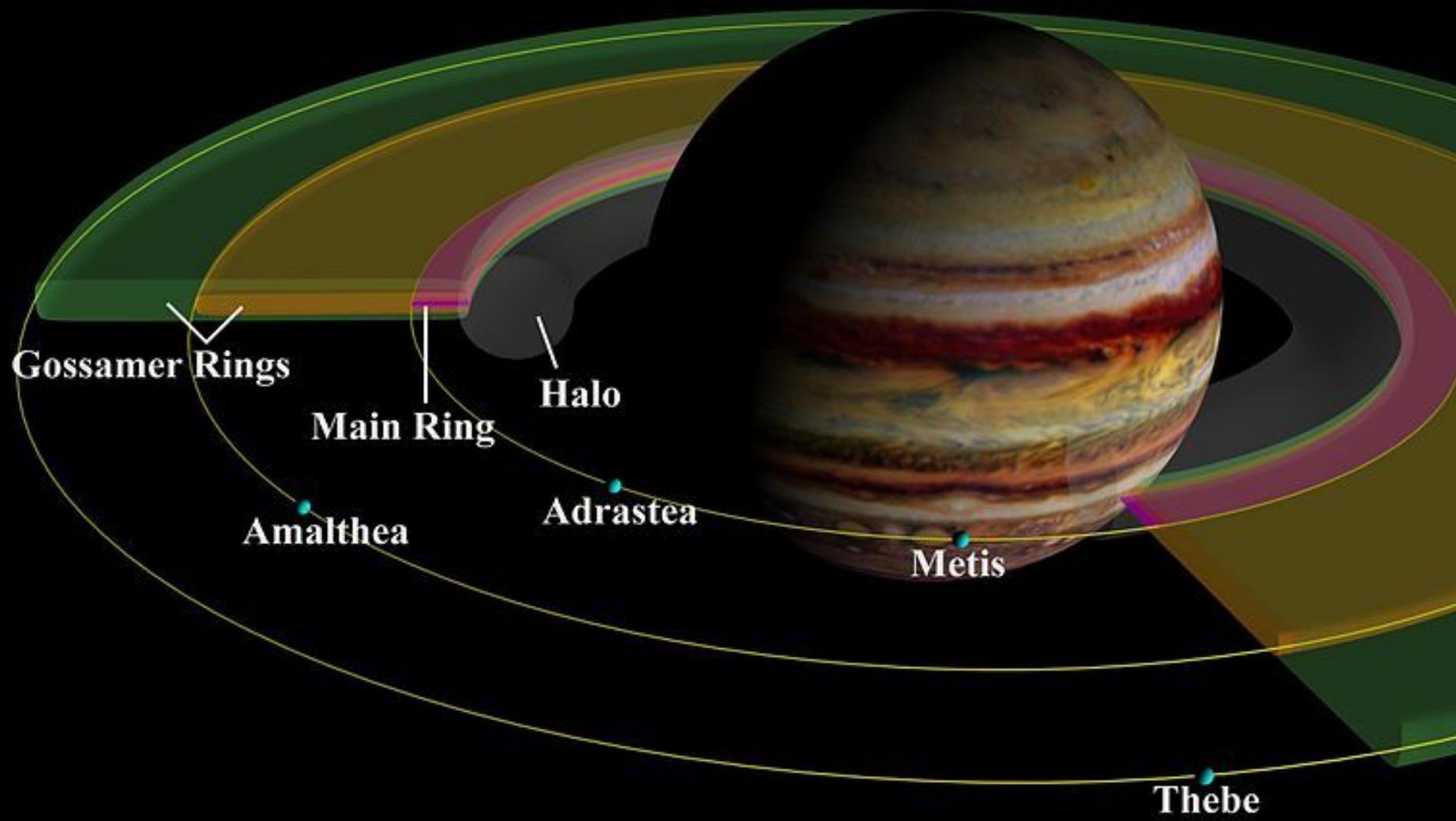
Voyager 1 & 2 sont des sondes lancées pour explorer les planètes du système solaire externe et l'environnement interplanétaire.

Chaque sonde Voyager avait pour objectifs majeurs sur chaque planète :

1. Étudier la circulation, la dynamique, la structure et la composition de l'atmosphère de la planète ;
2. Caractériser la morphologie, la géologie et l'état physique des satellites de la planète ;
3. Fournir des informations détaillées pour la masse, la taille et la forme de la planète, de ses satellites et de ses anneaux ;
4. Déterminer la structure du champ magnétique et caractériser la composition et la distribution des particules énergétiques piégées et du plasma à l'intérieur.

Des éclaireurs !

- L'objectif du programme Voyager est de collecter des données scientifiques sur les planètes externes (Jupiter, Saturne, Uranus et Neptune) qui à l'époque sont pratiquement inexplorées : seules Pioneer 10 et 11, des sondes légères développées pour servir d'éclaireurs aux sondes Voyager mais disposant de peu d'instruments, se sont jusqu'à présent approchées de Jupiter et Saturne.



Une moisson scientifique exceptionnelle

Jupiter et ses satellites

Voyager 1 commence ses observations de Jupiter 80 jours avant le survol le 14 décembre 1978 et les premières photographies sont prises en janvier 1979.

La sonde spatiale commence à bénéficier d'une couverture permanente du réseau d'antennes de télécommunications de la NASA 30 jours avant son survol de Jupiter. Voyager 1 passe au plus près de la planète géante le 5 mars 1979, à une distance de 278 000 km de sa surface. La phase principale des observations scientifiques, qui regroupe l'étude de Jupiter, des lunes galiléennes, des anneaux de Jupiter et de son champ magnétique débute le 4 mars et dure seulement deux jours : le 5 mars Voyager 1 survole à très faible distance (18 460 km) la lune Io puis Ganymède (à 112 030 km) et Europe (à 732 270 km). Le lendemain, la sonde spatiale passe à 123 950 km de Callisto.

La phase d'observation de Jupiter s'achève fin avril. À l'issue de ce survol, la sonde spatiale a pris 19 000 photos de Jupiter et de ses cinq lunes principales, les quatre satellites galiléens et Amalthée. En passant à proximité de Jupiter, la vitesse de la sonde augmente à 16 km/s. Environ cinq kilogrammes d'hydrazine sont utilisés pour effectuer une ultime correction de trajectoire avant que Voyager 1 se dirige vers Saturne.

Une moisson scientifique exceptionnelle

Saturne, ses satellites et plus loin encore

Voyager 1, qui précède sa sonde jumelle, a pour objectif initial d'explorer Jupiter et Saturne. Elle doit achever sa mission d'exploration par le survol à faible distance de Titan, la principale lune de Saturne. Mais elle doit, pour y parvenir, effectuer une manœuvre qui lui fait quitter le plan de l'écliptique, excluant toute possibilité d'explorer une autre planète extérieure.

Le survol et l'étude d'Uranus et Neptune est donc confié à Voyager 2. Pour passer de Jupiter à Saturne, la sonde utilise l'assistance gravitationnelle de la première planète qui lui fournit une accélération importante tout en la plaçant dans la direction de la seconde.

Le recueil des données sur ses deux autres planètes géantes, sur lesquelles très peu d'informations sont acquises du fait de leur éloignement, constitue un objectif majeur dans la mesure où l'étude de Jupiter et Saturne a pu être menée à bien

Une moisson scientifique exceptionnelle

Uranus

Après le survol de Saturne par Voyager 2, il parut probable que cette sonde serait capable de rejoindre Uranus tout en restant opérationnelle. Il fut décidé de procéder au survol de cette planète et même de poursuivre ensuite la mission vers Neptune.

Alors que Saturne fut la dernière planète survolée par Voyager 1, sa sœur jumelle en rencontra donc encore deux autres par la suite.

Le 24 janvier 1986, Voyager 2 passait à 81.500 km du sommet des nuages d'Uranus, devenant la première sonde à survoler cette planète.

Elle en obtint, ainsi que de ses satellites, environ 8000 images.

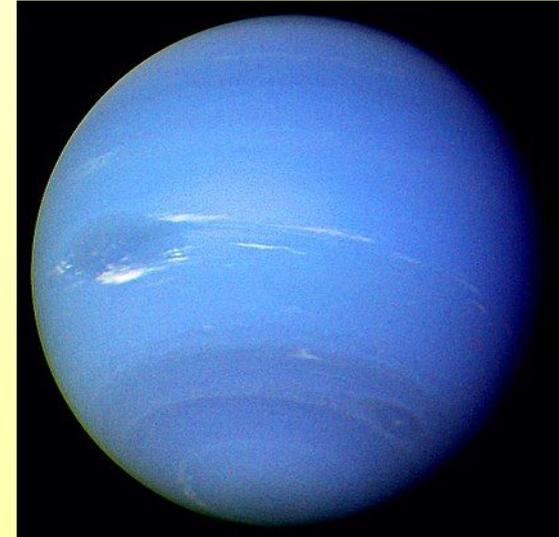
Voyager 2 permit la découverte de plusieurs satellites d'Uranus ainsi que d'un champ magnétique autour de cette planète.



Une moisson scientifique exceptionnelle

Neptune

- Le dernier survol planétaire effectué par une sonde Voyager fut celui de Neptune par Voyager 2, le 25 août 1989 (12 ans après son lancement).
- Grande immensité glacée, Neptune est 17 fois plus massive que la Terre et 19 fois moins massive que Jupiter.
- Tout comme pour Uranus, Voyager 2 reste, à l'heure actuelle, la seule sonde à avoir survolé Neptune.
- D'après certaines sources, cette planète fut même celle dont Voyager 2 s'approcha le plus, la survolant à une distance de 5000 km. La sonde prit environ 10.000 images de la planète et de ses satellites.
- Voyager 2 permit ainsi la découverte de plusieurs satellites de Neptune.
- Elle est allée dans la foulée côtoyer la plus grande lune de Neptune, Triton, le dernier corps solide que le vaisseau spatial a eu l'occasion d'étudier.



Quelques découvertes parmi tant d'autres

- Les sondes Voyager ont découvert 22 nouveaux satellites : 3 à Jupiter, 3 à Saturne, 10 à Uranus et 6 à Neptune.
- Io s'est avéré avoir un volcanisme actif, le seul corps du système solaire autre que la Terre à être ainsi confirmé.
- Triton s'est avéré avoir des structures actives ressemblant à des geysers et une atmosphère.
- Des zones aurorales ont été découvertes sur Jupiter, Saturne et Neptune.
- Jupiter avait des anneaux. Les anneaux de Saturne contenaient des rayons dans l'anneau B et une structure tressée dans l'anneau F. Deux nouveaux anneaux ont été découverts sur Uranus et les anneaux de Neptune, que l'on pensait à l'origine n'être que des arcs d'anneaux, se sont révélés complets, bien que composés de matériaux fins.
- Découverte des magnétosphères uranienne et neptunienne, toutes deux très inclinées et décalées par rapport aux axes de rotation des planètes, suggérant que leurs sources sont très différentes de celles des autres magnétosphères.
- Neptune, initialement considérée comme trop froide pour supporter de telles perturbations atmosphériques, des tempêtes de grande ampleur (notamment la Grande Tache Noire) ont été découvertes.

Une moisson scientifique exceptionnelle

Aux confins du Système solaire

Compte tenu de leur bon état de fonctionnement à l'issue de leur mission primaire en 1989, de nouveaux objectifs ont été fixés aux sondes spatiales après leur survol des planètes externes.

La mission VIM (Voyager Interstellar Mission) a pour objectif l'étude des régions très mal connues situées aux limites de la zone d'influence du Soleil. Sont distingués le choc terminal et l'héliopause avant de déboucher, une fois l'héliogaine traversée, dans le milieu interstellaire dont les caractéristiques ne dépendent plus de notre étoile.

Et l'histoire n'est pas finie...

Aux confins du Système solaire

Après son survol de Neptune, Voyager 2 fut, à son tour, déviée hors du plan de l'écliptique. Les deux sondes quittent à présent progressivement le Système Solaire.

Voyager 1 s'éloigne du Soleil à une vitesse avoisinant les 520 millions de kilomètres par an, au nord du plan de l'écliptique.

Le 14 février 1990, la sonde réalisa la première "photo de famille" du Système Solaire : une mosaïque d'images où l'on peut voir le Soleil et six des planètes (Vénus, la Terre, Jupiter, Saturne, Uranus et Neptune).

Depuis le 17 février 1998, Voyager 1 est l'objet le plus éloigné fait par l'Homme (titre qui revenait précédemment à la sonde Pioneer 10).

En décembre 2004, elle a franchi une limite appelée *termination shock* en anglais. Au-delà de cette limite, le vent solaire ralentit fortement, sous l'effet du gaz interstellaire.

Voyager 2 s'éloigne quant à elle du Soleil à la vitesse d'environ 470 millions de kilomètres par an, au sud du plan de l'écliptique.

Et l'histoire n'est pas finie...

Aux confins du Système solaire

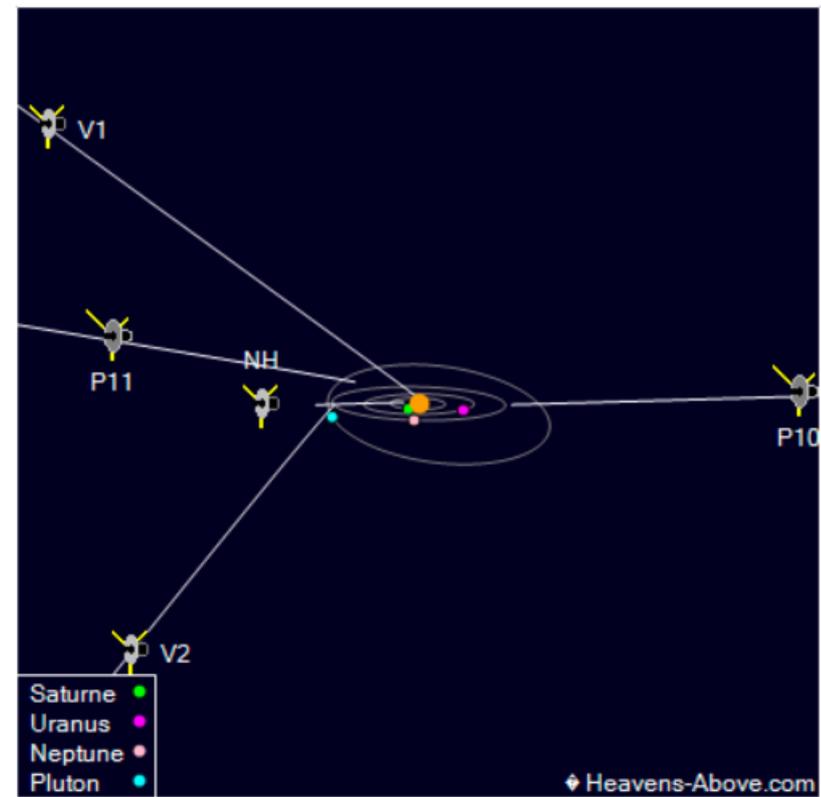
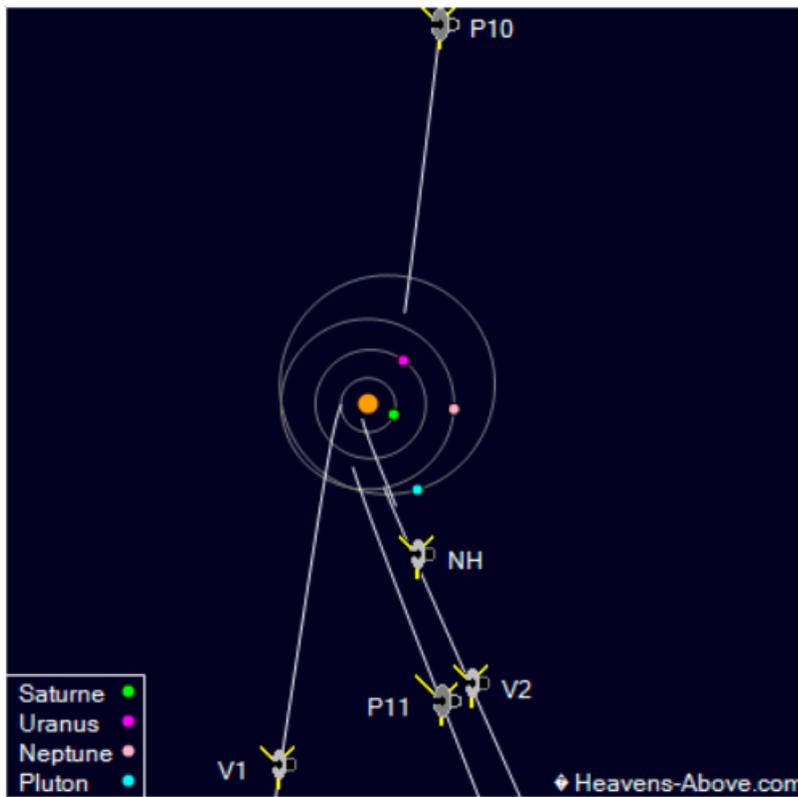
En juillet 2003, Voyager 1 se trouvait à une distance de 13,3 milliards de kilomètres (88 UA) du Soleil - plus de deux fois la distance moyenne entre le Soleil et Pluton - et Voyager 2, à 10,6 milliards de kilomètres (70 UA).

L'une comme l'autre nous envoient encore des informations scientifiques sur l'espace interplanétaire (en étudiant notamment le champ magnétique et le vent solaire) et devraient encore le faire jusqu'en 2020 voire plus. Comme expliqué plus loin, la puissance que peuvent produire les générateurs des deux sondes diminue petit à petit. C'est en principe de cette diminution de puissance que finira par venir la fin de leurs missions, lorsque les Voyager ne seront plus capables de fournir l'énergie nécessaire à leurs opérations scientifiques.

Le 15 Mars 2024

- Un ingénieur du Deep Space Network, qui gère les antennes radio communiquant avec Voyager et d'autres engins spatiaux voyageant vers la Lune et au-delà, a pu décoder le nouveau signal et a découvert qu'il contenait une lecture de l'ensemble de la mémoire du FDS », c'est-il expliqué.
- Prochaine étape : comparer les fameuses données affichées avec celles qui avaient été obtenues avant que le bug de Voyager 1 survienne. La Nasa pourra ainsi rechercher d'éventuelles différences dans le code (les instructions suivies par la sonde) et dans les variables (des valeurs dans ce code qui divergent en fonction des commandes et de l'état de Voyager 1).
- Si le sauvetage de la mission est long et fastidieux, c'est parce que Voyager 1 évolue à plus de 24 milliards de kilomètres de la Terre. Plus de 22 heures sont nécessaires pour qu'un signal radio arrive jusqu'à la mission — et autant pour qu'une réponse de la sonde nous parvienne. Sans parler du temps nécessaire aux scientifiques pour se plonger dans les données et mettre en œuvre des solutions.

Où Êtes vous?



	Pioneer 10	Pioneer 11	Voyager 2	Voyager 1	New Horizons
Distance au Soleil (UA)	135,003	112,865	135,180	162,022	57,691
Vitesse relative au Soleil (km/s)	11,891	11,162	15,283	16,936	13,704
Vitesse relative au Soleil (UA/an)	2,508	2,355	3,224	3,573	2,891
Latitude écliptique	3°	14°	-38°	35°	2°
Déclinaison :	26° 0'	-9° 1'	-59° 0'	12° 2'	-20° 22'
Ascension droite :	5 ^h 12 ^m	18 ^h 53 ^m	20 ^h 4 ^m	17 ^h 15 ^m	19 ^h 14 ^m
Constellation	Taureau	Écu de Sobieski	Paon	Ophiuchus	Sagittaire
Distance à la Terre (UA)	134,022	113,760	135,875	162,823	58,586
Distance-lumière (heures)	18,58	15,77	18,83	22,57	8,12
Luminosité du Soleil depuis la sonde (Magnitude)	-16,0	-16,4	-16,0	-15,7	-17,9
Sonde active ?	non	non	oui	oui	oui
Date de lancement	1972-mars-03	1973-avr.-06	1977-août-20	1977-sept.-05	2006-janv.-19

Sources

- <https://descanso.jpl.nasa.gov/>
- <https://deepspace.jpl.nasa.gov/>
- <https://www.sti.nasa.gov>
- <https://history.nasa.gov/SP-474/sp474.htm>
- <https://www.bernd-leitenberger.de/voyager.shtml>
- https://fr.wikipedia.org/wiki/Programme_Voyager
- https://descanso.jpl.nasa.gov/DPSummary/Descanso4--Voyager_new.pdf
- https://nssdc.gsfc.nasa.gov/imgcat/mission_index.html#Voyager_1 Images prises par les sondes