



ESPACE

& Vous

ASSISTANCE GRAVITATIONNELLE ET LA SONDÉ PIONEER 10

EMMANUEL BEECKMANS

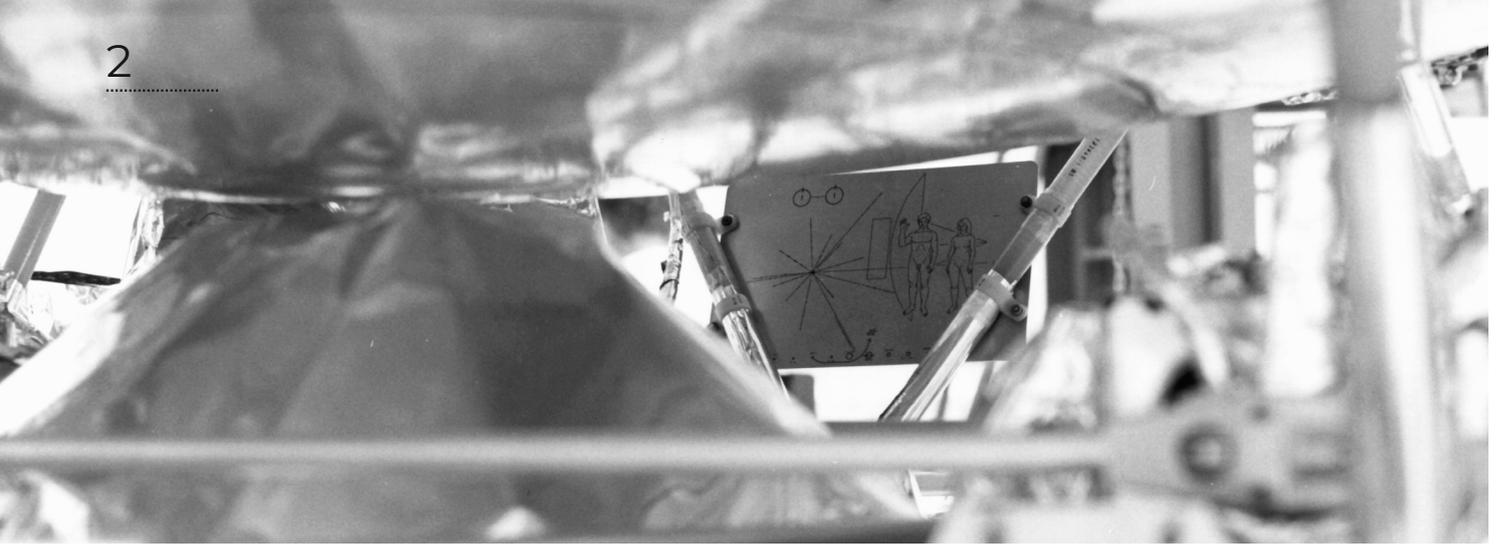
Credit images : NASA, PxHere, Wikimedia
Ed. Resp. : M. Swaelens - ULB CP238 - 1050 Bruxelles

SPECTACLE DIDACTIQUE DE PHYSIQUE ET DE CHIMIE

3^e > 6^e SECONDAIRE & GRAND PUBLIC

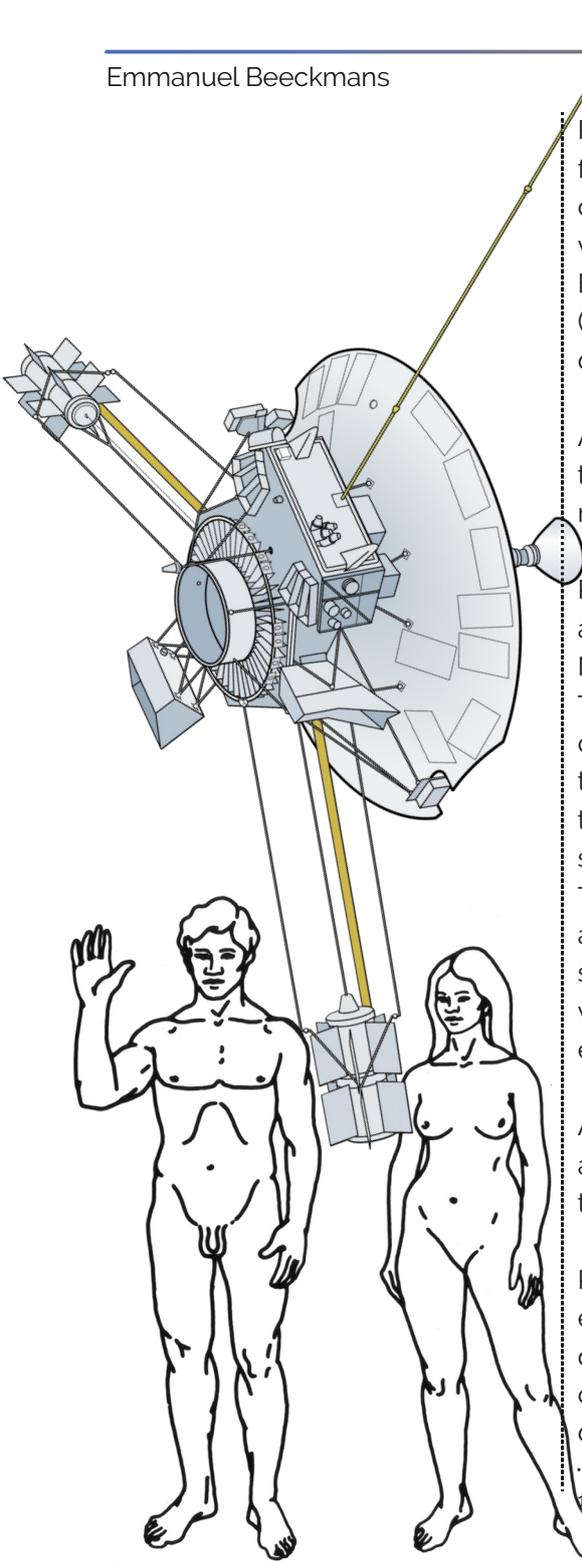
ULB CAMPUS DU SOLBOSCH

INFOS : SCIENCES.BRUSSELS/SPECTACLE



ASSISTANCE GRAVITATIONNELLE ET LA SONDE PIONEER 10

Emmanuel Beeckmans



Pour échapper définitivement à la force gravitationnelle d'un astre, un objet doit atteindre une certaine vitesse appelée vitesse de libération. Elle dépend évidemment de l'astre (masse et distance à l'objet), mais pas de la masse de l'objet !

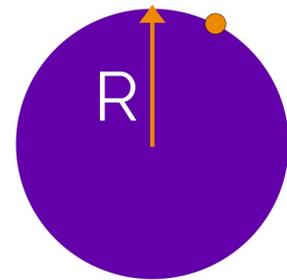
À titre d'exemple, la vitesse de libération pour échapper à l'attraction terrestre¹ est de 11 km/s.

Pour sortir du système solaire, il faut atteindre une vitesse de 42.1 km/s. Notez qu'un objet lancé à partir de la Terre bénéficie de la rotation de celle-ci : 500 m/s à l'Équateur pour la rotation diurne et 29,7 km/s pour la rotation autour du Soleil. Pour sortir du système solaire, un objet (partant de la Terre) doit être propulsé dans l'espace avec une vitesse de 16.6 km/s. Même si nous pouvons profiter de notre vitesse autour du Soleil, cela reste énorme !

Avec la puissance des lanceurs actuels, nous ne pouvons atteindre de telles vitesses.

Par ailleurs, même si l'objet que nous envoyons dans l'espace ne « sort » pas du système solaire, vu la taille de celui-ci, il est intéressant de pouvoir obtenir des vitesses élevées.

Vitesse de libération à la surface $\sqrt{\frac{2GM}{R}}$



C'est typiquement le cas des nombreuses sondes spatiales que nous avons envoyées dans l'espace pour mieux comprendre le système solaire et au-delà.

Une fois sorti de l'atmosphère terrestre un engin spatial compte sur la matière éjectée pour s'appuyer dessus et accélérer (cf. « S'arracher d'ici ? »).

Cependant, il existe une autre manière d'accélérer « gratuitement » sans carburant : l'assistance gravitationnelle.

ASSISTANCE GRAVITATIONNELLE : QUÉSACO ?

Lorsque nous envoyons une sonde dans l'espace pour observer un astre, nous ne le faisons pas en ligne

¹ Il s'agit ici de la vitesse nécessaire pour être « libérée » de la terre mais pas du soleil !

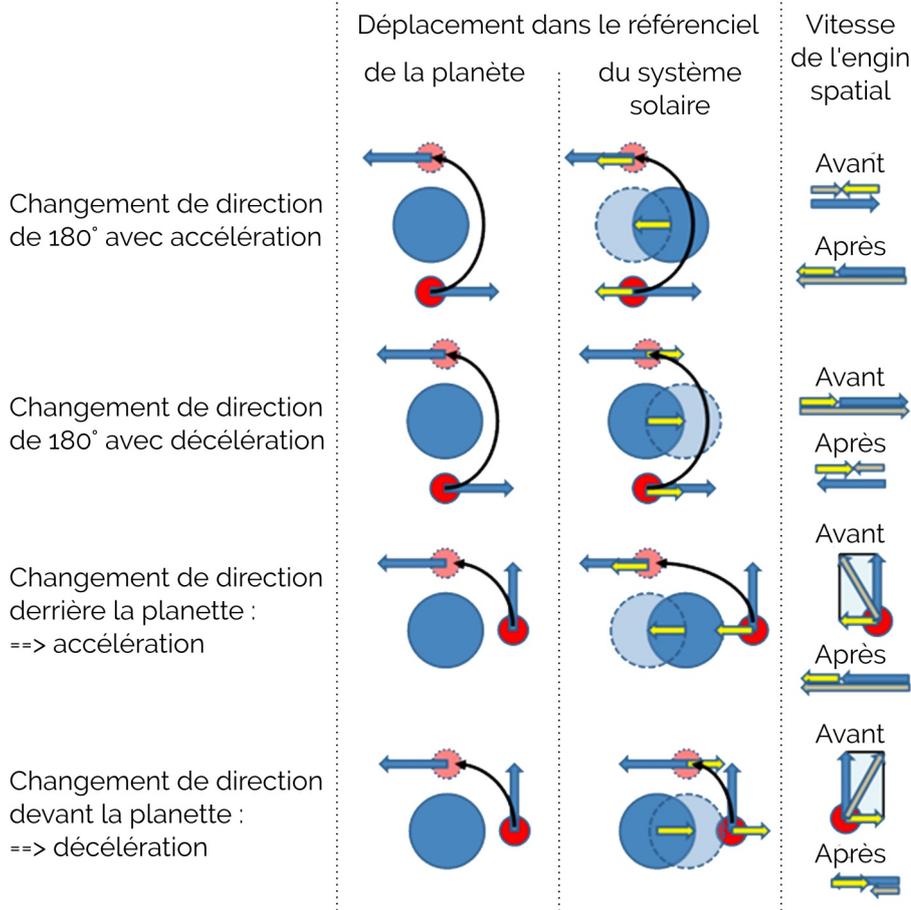


fig. 1 Les différents cas d'assistance.

Remarque : Ce gain de vitesse (et donc d'énergie cinétique) ne contredit en rien la conservation de l'énergie. En effet la sonde spatiale gagne de la vitesse, la planète en perd. En quelque sorte la sonde « vole » de la vitesse à la planète, cependant le changement de vitesse de la planète est imperceptible, car il dépend du rapport des masses de la sonde et de la planète¹.

droite vers celui-ci. En effet, vu la durée du trajet, l'astre ne sera plus au même endroit qu'au moment du décollage : il faut tenir compte des vitesses relatives de chacun et bien viser. De plus, si nous voulons l'observer pendant un certain temps (voire se poser dessus, ce qui est encore plus compliqué), il est indispensable que l'astre et la sonde aient des vitesses (au sens vectoriel !) les plus proches possibles au moment de la rencontre. Pour accélérer, une solution consiste à utiliser l'attraction d'autres astres sur le trajet et permettre lors du passage à proximité d'une planète de s'éloigner beaucoup plus vite que durant la phase d'approche.

Il est logique que, lorsque la sonde approche de la planète, elle accélère par la force de gravitation (laquelle sera d'autant plus importante que la masse de la planète est élevée). En revanche dès qu'elle s'éloigne, la force de gravitation est opposée au mouvement et donc elle décélère, et donc celle-ci devrait repartir aussi vite qu'elle est arrivée.

Nous pouvons faire une comparaison avec une balle que nous lançons contre un mur : au mieux, dans le cas d'un choc élastique², la vitesse de la balle avant et après le rebond sont identiques.

Comment est-ce possible avec une sonde spatiale et une planète ?

Nous avons oublié de préciser que la planète n'est pas au repos (dans un repère héliocentrique) : lorsque la sonde arrive dans la zone d'influence de gravitation de la planète³, elle sera « hissée » par le mouvement de la planète grâce à la force gravitationnelle. Dans notre comparaison avec une balle, c'est comme si celle-ci ne rebondissait pas sur un mur mais sur le pare-brise d'un camion lancé à grande vitesse vers nous : on imagine aisément que la balle sera propulsée après le rebond avec une vitesse bien supérieure.

Cet exemple simple à une dimension illustre ce qu'il se passe à trois dimensions dans le cas d'une sonde assistée par la gravitation d'une planète, la fig. 1 représente les différents cas d'assistance.

Pour déterminer les vitesses, il faut appliquer la conservation de l'énergie (ici uniquement cinétique) et la conservation de l'impulsion⁴. Considérant le fait que la masse de la sonde est négligeable par rapport à celle de la planète, nous pouvons écrire :

$$v_{fs} \approx v_{is} + 2 \cdot v_{ip}$$

$$v_{fp} \approx v_{ip}$$

Les indices « p » et « s » font référence à la planète et la sonde respectivement « i » et « f » à initial et final respectivement.

Remarquons que ces équations correspondent au cas simplifié à une dimension où les vitesses sont (anti)parallèles, ce qui correspond aux premières lignes de la fig. 1. Les vitesses sont à prendre ici comme des valeurs algébriques (le signe

1. À titre d'exemple, pour la sonde Pioneer 10 et Jupiter ce rapport est de l'ordre de 10^{-25}

2. C'est à dire sans perte d'énergie cinétique sous forme d'énergie de déformation, vibration, chaleur...

3. Cette zone est appelée sphère de Hill ou de Roche.

4. L'impulsion ou quantité de mouvement est le produit : $m \cdot \vec{v}$

dépend du sens). La deuxième équation traduit le fait que la planète ne subit aucune perte de vitesse (ce qui est le cas en très bonne approximation, comme décrit plus haut).

De nombreuses sondes ont utilisé l'assistance gravitationnelle pour explorer les différents astres (planète, satellite, astéroïde, comètes) de notre système solaire.

Nous n'allons pas toutes les citer mais mentionnons-en quelques-unes particulièrement.

Cassini Huygens (1997-2007) : sonde explorant Saturne et ses satellites, en particulier Titan, qui pourrait ressembler à une Terre primitive au congélateur. Elle utilisa l'assistance gravitationnelle de la Terre, de Vénus (2 fois) et de Jupiter.

La sonde Rosetta (2004-2016) : sonde de l'ESA qui se met en orbite autour de la comète 67P/Tchourioumov-Guérassimenko et pose son module Philae sur la comète, première historique et prouesse spatiale. Elle utilisa l'assistance gravitationnelle de la Terre à trois reprises et une fois celle de Mars.

La sonde Bepicolombo (2018-...) : sonde qui sera en orbite autour de Mercure en 2025. En plus de ses moteurs à propulsions ioniques, elle utilise l'assistance gravitationnelle de la Terre (une fois), de Vénus (2 fois) et de Mercure (6 fois), non pour accélérer, mais pour freiner.

LA SONDE PIONEER 10

En mars 1972 la sonde spatiale Pioneer 10 est envoyée au-delà de la ceinture d'astéroïde pour étudier, entre autres, la planète Jupiter. Le risque de destruction par un morceau d'astéroïde était évalué à 10%. C'est ce qui justifia l'envoi de sa sœur jumelle Pioneer 11, à peine un an plus tard.

Par chance, elle traverse sans encombre la ceinture d'astéroïde, après quoi la sonde spatiale doit étudier le milieu interplanétaire, dont les caractéristiques n'ont jamais été mesurées au-delà de l'orbite de Mars.

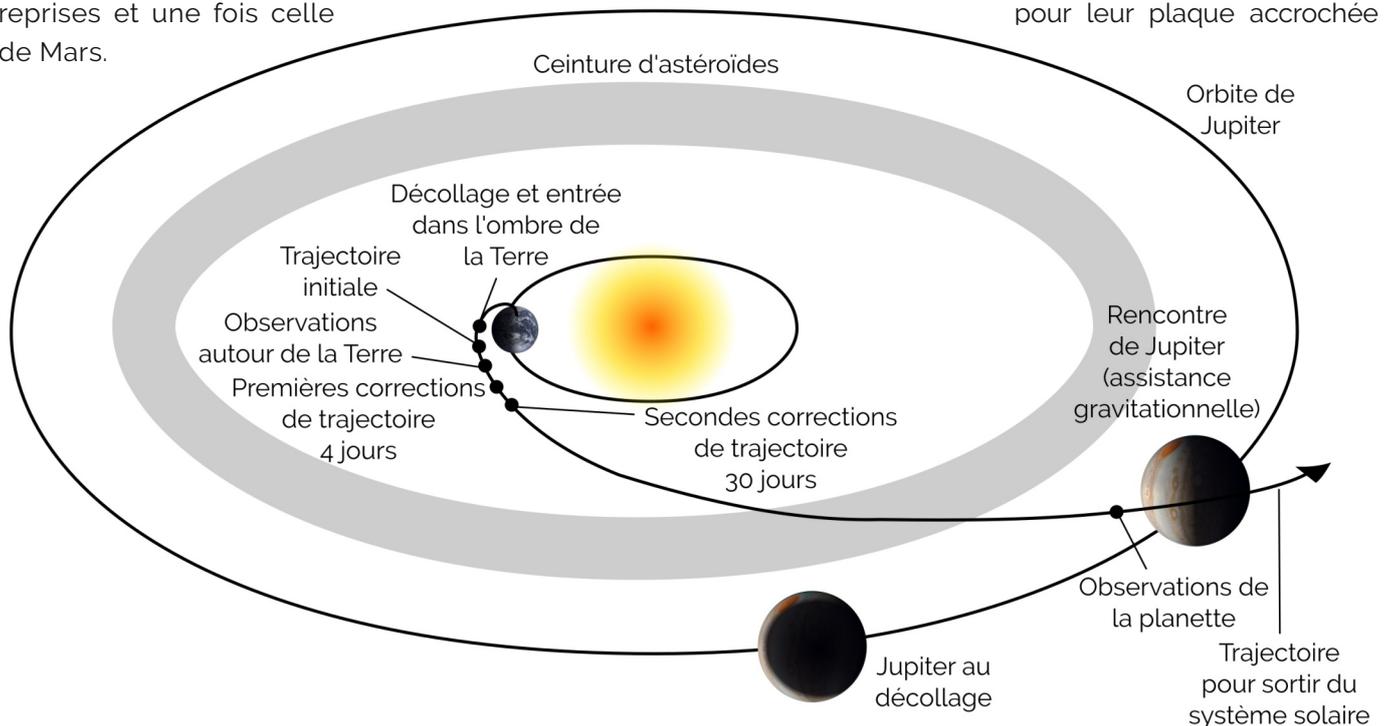
Pioneer 10 en passant à proximité de la géante gazeuse prit des photos de celle-ci ainsi que

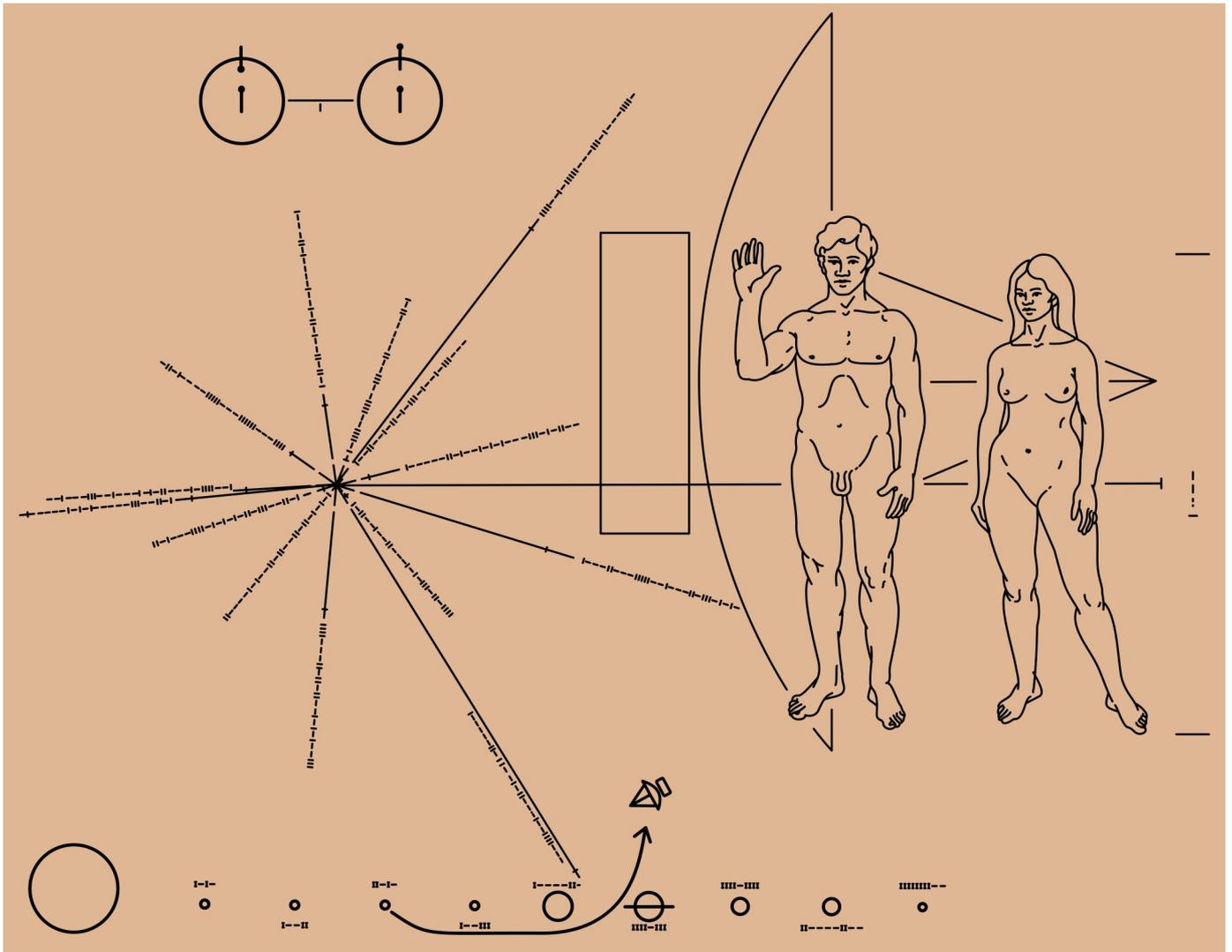
de ses satellites. Elle transmet aussi des informations sur les radiations émises par Jupiter, sur son atmosphère et sa constitution. Ces données furent d'un intérêt capital pour la conception des missions Voyager et Galileo qui suivirent dans les années 1990.

Grâce à l'assistance gravitationnelle de Jupiter, elle atteignit une vitesse suffisante pour pouvoir sortir du système solaire, elle continua à effectuer des mesures sur le rayonnement cosmique et le vent solaire. La mission de la sonde est arrivée officiellement à son terme le 31 mars 1997. Cependant on réceptionna encore des télémessures le 27 avril 2002, le dernier contact (très faible) fut en janvier 2003. En décembre 2005 la sonde est alors à 89,7 UA du soleil.

En 2006, une dernière tentative de contact sans résultat, la sonde continue sa route vers l'étoile Aldébran qu'elle devrait atteindre dans... 2 millions d'années.

Outre leurs missions scientifiques, les sondes Pioneer sont connues pour leur plaque accrochée





au vaisseau représentant un message à une éventuelle intelligence, un peu comme une bouteille jetée à la mer interstellaire.

Carl Sagan et Frank Drake, tous deux astronomes sont à l'origine du message sur la plaque. Les figures humaines sont dessinées par la femme de Carl Sagan, Linda Salman Sagan.

Le message sur la plaque est destiné à nous localiser dans l'espace et dans le temps.

Quel message faire passer à une hypothétique intelligence extraterrestre et comment ?

Sagan émit l'hypothèse que les principes de la physique sont uni-

versels, de sorte que la plupart des civilisations intelligentes auront une compréhension similaire de ces principes. Dès lors le message doit être écrit dans un seul langage : celui de la science.

Il suppose également que des voyageurs interstellaires capables de construire un vaisseau spatial auraient des outils logiques et arithmétiques et une intelligence qui leur permettrait de décoder ce message.

Après avoir eu les accords des autorités de la NASA, C. Sagan et F. Drake eurent à peine trois semaines pour réaliser complètement la plaque !

Regardons ce message d'un peu plus près :

1. Les figures humaines

C'est certainement elles qui ont fait couler le plus d'encre et constitué de nombreuses polémiques. L'origine de ces polémiques provient sans doute du fait que nous ne pouvons résumer ce qu'est l'humanité dans un dessin lequel ne reflètera jamais exactement la réalité et surtout que l'image que nous voulons en donner est loin d'être universelle.

Si cette représentation était dessinée aujourd'hui, il y a fort à parier qu'elle serait très différente. Bien que beaucoup de ces polémiques étaient justifiées et intéressantes, nous ne discuterons pas de ces aspects ici.

2. Atomes d'hydrogène et transition hyperfine

Afin de définir une échelle de distance et de temps, ils choisissent de prendre la transition hyperfine de l'hydrogène. Chaque cercle représente un atome d'hydrogène avec le proton au centre et l'électron autour, avec leur spin. Le passage de l'état où les spins de l'électron et du proton sont parallèles à l'état où ils sont antiparallèles, s'accompagne de l'émission d'un photon (correspondant à la différence d'énergie entre les deux états). La longueur d'onde d'un tel photon est de 21 cm, ce qui n'est pas dans le spectre visible (onde radio) et la fréquence associée est de 1420,4 MHz. L'atome d'hydrogène est le plus abondant dans l'univers, et en particulier dans le milieu interstellaire de sorte que cette transition est souvent observée et que la raie a une forte intensité (correspondant à la somme de toutes les transitions dans un laps de temps donné), là où l'hydrogène atomique est présent. Entre les deux atomes sous la barre horizontale il y a une barre qui représente le chiffre 1 en binaire.

Une unité de distance et de temps sont ainsi définies.

Derrière l'homme et la femme, la sonde Pioneer est représentée. Deux traits sont mis à côté de la femme avec le chiffre 8 en binaire (1- - -),¹

Ceci permet deux choses :

- d'indiquer une taille typique pour une femme et un homme (21 cm x 8 = 168 cm).
- de vérifier que le raisonnement est correct : ils peuvent vérifier que la sonde mesure bien 274 cm.

3. Le radian et le système solaire

Sur le côté gauche, le Soleil est représenté par un cercle au centre du radian, chacune des lignes représente une direction et une distance relative par rapport à la ligne horizontale qui passe derrière l'homme et la femme qui sert d'étalon (distance de notre Soleil au centre de la galaxie).

Les chiffres binaires associés à chaque ligne représentent les fréquences des 14 pulsars que nous pouvons observer sur Terre. Un pulsar² est une étoile à neutron, extrêmement dense, qui émet des signaux radio de fréquence de l'ordre du Hertz. Cette fréquence est liée à la rotation rapide du pulsar sur lui-même. Bien que la fréquence soit très régulière, peu à peu les pulsars ralentissent et la fréquence associée au rayonnement diminue également. En effet, par conservation de l'énergie, l'énergie rayonnée se traduit par une perte d'énergie du pulsar, en l'occurrence une diminution de son énergie cinétique de rotation, typiquement la période double en 10^{15} s soit en quelques dizaines de millions d'années.

Ce mandala mathématique révèle les distances pour nous localiser dans l'espace mais aussi dans le temps.

Seule une petite partie de la galaxie peut recevoir les signaux de 14 pulsars disposés de la sorte.

Le bas de la plaque représente notre système solaire avec une flèche indiquant la trajectoire de la sonde ainsi que son point de départ. rrespondent aux distances relatives moyennes au Soleil (1 = 1/10 de la distance de Mercure).

Nous pouvons espérer que dans cette petite partie de la galaxie les candidats similaires à notre système solaire soient très peu nombreux.

Ce message envoyé dans l'espace repose sur des postulats contestables et hasardeux : les éventuels êtres qui verront ces représentations sont doués d'intelligence ou d'une logique proche de la nôtre, ils seront à même de comprendre un message ne connaissant rien de notre monde, de nos codes, uniquement sur base d'un dessin. De nombreux scientifiques n'ont pas réussi à le décoder ici sur Terre, alors qu'en serait-il d'extraterrestres, même intelligents ? Feraient-ils la part de choses entre des chiffres qui représentent tantôt des distances, tantôt des temps ?

Par ailleurs la probabilité d'être découverte dans l'immense espace interstellaire est extrêmement faible et en tous cas pas tout de suite. En effet, les dernières mesures faites par la sonde Gaïa donnent les résultats suivants : la sonde Pioneer 10 s'approchera dans 90 000 ans, à 0,7 année-lumière d'une étoile (plus de 6000 milliards de kilomètres). Et pour qu'une des sondes (Pioneer 10 et 11, Voyager 1 et 2) entre dans la zone d'influence d'une étoile, il faudrait théoriquement attendre 1020 ans.

Au-delà de la signification du message et de sa compréhension éventuelle, on peut s'interroger sur la motivation de cette initiative : prouver notre présence, laisser une trace, une empreinte à un « autre ».

Et si cet autre existe, le fantasme et le désir de pouvoir dire que nous sommes là est pour certains tellement fort, que le jeu en vaut la chandelle.

1. La convention choisie ici est 1 = 1 et - = 0, 1- - - = 1000, ce qui correspond à 8 écrit en binaire.

2. Le premier pulsar fût appelé sous le nom de code semi-humoristique LGM-1 (Little Green Men= petits hommes verts).