

À LA RECHERCHE DE LA PARALLAXE SOLAIRE (10/11)

## Écho radar sur Vénus

Vers la fin des années cinquante, avec l'apparition de l'astronomie radar non passive<sup>1</sup> liée aux exigences de précision astrométrique de la conquête spatiale, une nouvelle méthode va s'ouvrir pour déterminer l'unité astronomique – ou, ce qui revient au même, la parallaxe solaire - avec une précision inégalée. La cible : Vénus à sa conjonction inférieure. Commencées au MIT, la technologie et la méthode vont atteindre leur forme la plus aboutie avec le JPL et les grandes antennes de Goldstone.

La méthode des échos radars sur Vénus permet de mesurer la distance de la Terre à Vénus par mesure du temps d'aller-retour d'une onde radio envoyée sur Vénus. La connaissance de la vitesse de la lumière et de la distance Terre-Vénus exprimée en unités astronomiques permet la détermination de celle-ci en kilomètres. Les ondes radio peuvent pénétrer l'atmosphère terrestre à partir de longueurs d'onde ayant quelques millimètres à près de 100 mètres. Elles induisent alors un léger courant électrique dans un conducteur tel qu'une antenne. Comme les miroirs paraboliques, les antennes paraboliques collectent et rassemblent les ondes radio en leur foyer où un petit courant est créé et amplifié. L'intensité des ondes radio est très faible comparée aux ondes visibles, par conséquent il est nécessaire de disposer de grandes antennes.

La Lune est le premier corps à avoir été utilisé comme cible dès 1946. La relation entre la puissance émise  $P$  et la puissance reçue  $p$  est donnée par l'équation du radar :

$$\frac{p}{P} = \frac{A^2 \sigma}{4\pi \lambda^2 d^4}$$

Où  $A$  est la surface de l'antenne,  $\sigma$  la section équivalente au corps observé,  $d$  sa distance à la Terre. La distance de la Lune a pu être mesurée avec une précision d'un kilomètre. Pour mesurer la distance de Vénus, la sensibilité du radar devait être accrue au moins de 200 000 fois si l'on ne considère que les rapports de distance au moment de la conjonction inférieure.

Les premiers tirs radars vont être faits sur la grande antenne parabolique de 26 m du laboratoire Lincoln de Millstone Hill du MIT en 1958 (Fig. 1). Le maser (Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation) de Kingston allait être utilisé pour la première fois pour l'amplification du signal de retour. Le radar est pointé les 10 et 12 février 1958 vers Vénus qui se trouve alors à quelque 45 millions de kilomètres de la Terre (soit  $\sim 0,3$  ua). Le signal radar demandait environ 5 min pour faire le voyage aller-retour vers Vénus. Après étude des enregistrements sur bande, un signal de retour fut détecté. Treize mois après, le résultat était publié dans la revue *Science* du 20 mars 1959. Cette première estimation radar de l'unité astronomique était de 149 467 000 km ou 8,8021" pour la parallaxe solaire. Cependant, en 1959

<sup>1</sup> L'astronomie radar « passive » se rapporte à la détection de signaux d'origine non humaine venus de l'espace.

une nouvelle tentative fut menée avec l'espoir d'une détection en temps réel. C'est l'échec: "None of the individual runs show strong evidence of Venus echoes" déclarent les responsables.

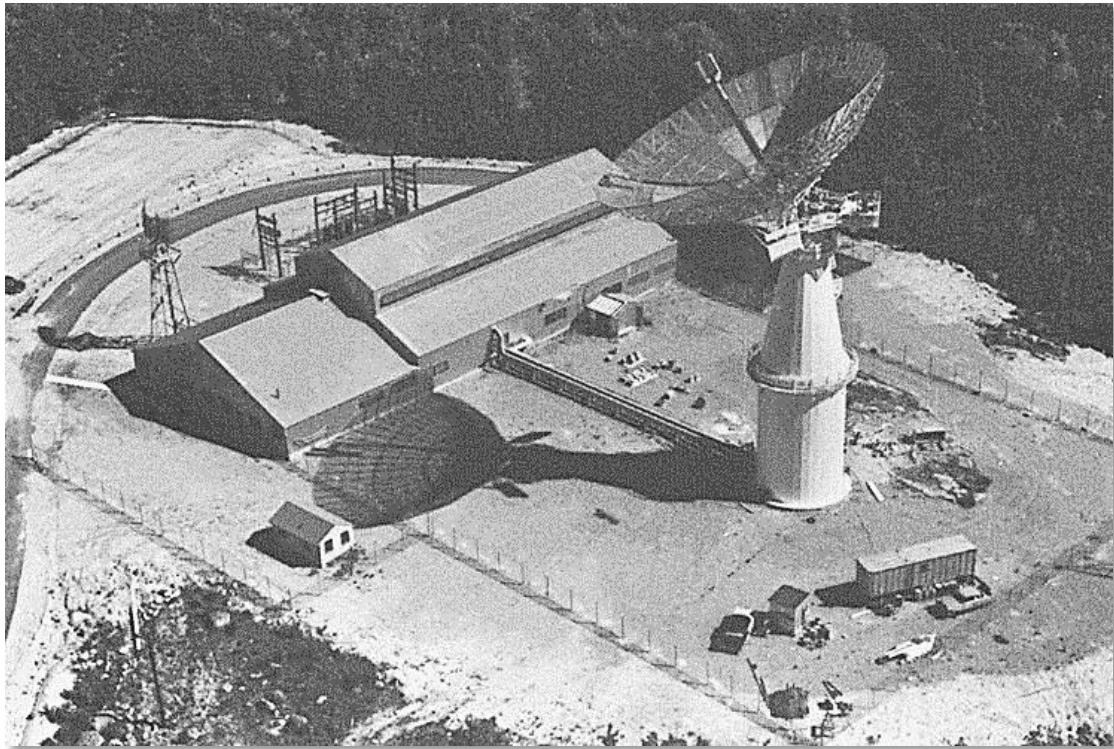


Fig. 1 : L'antenne radar de 26 mètres de diamètre de Millstone Hill du laboratoire Lincoln en 1958.

Quand vint la station du JPL (Jet Propulsion Laboratory à Pasadena fondé par le physicien Von Karman avant la Seconde guerre mondiale), la méthode était différente de celle du MIT ou de Jodrell Bank en Angleterre. La station est située à Goldstone, dans le désert de Mojave, à 300 km à l'est de Pasadena (Fig. 2) ; elle est pourvue de deux antennes de 26 m de diamètre, l'une pour l'émission à la fréquence de 2388 MHz (ou onde de 12,6 cm de longueur) et l'autre pour la réception, de masers comme détecteurs et d'horloges atomiques. Au lieu d'envoyer dans l'espace un train d'impulsions discrètes, c'est une onde continue à une fréquence beaucoup plus élevée qui est envoyée. Deux jeunes étudiants faisaient de la réussite des tirs sur Vénus le succès de leur thèse, Duane Muhleman et Richard Goldstein. La pression était forte, surtout après les échecs récents du laboratoire Lincoln. Leur directeur de thèse leur résuma ainsi l'enjeu : « No Echo, No Thesis ». Ils construisirent chacun un système de traitement du signal et se partagèrent le temps d'antenne. Mulheman en particulier construisit un instrument capable de mesurer le décalage Doppler-Fizeau. En effet, l'onde radar qui est envoyée voit sa longueur d'onde modifiée lors de sa réception au retour du fait du déplacement dans l'espace de la Terre et de Vénus. Cet effet Doppler-Fizeau est fonction des positions et vitesses de la Terre et de Vénus sur leur orbite respective, par conséquent sa mesure constitue un autre moyen d'accéder à la valeur de la parallaxe solaire. Après un an de travail, l'antenne fut tournée vers Vénus pour la première fois le 10 mars 1961. Le signal aller-retour mettait environ 6,5 min pour parcourir les 113 millions de kilomètres de distance. Deux cent trente-huit heures de données radars sont enregistrées jusqu'au 10 mai 1961. Dès le premier essai, Goldstein vit bouger l'aiguille de l'ampèremètre qui mesurait le signal du récepteur. Il observait pour la première fois en temps réel l'écho d'une planète qui lui répondait ! Le signal était très faible, sa puissance ne dépassait pas les cinquante milliwatts, petits résidus du long voyage de l'onde de treize kilowatts de puissance qui

était partie de l'antenne de Goldstone. L'affaiblissement du signal était de 260 000 fois. Muhleman publia en 1962 dans *The Astronomical Journal* une valeur de l'unité astronomique de  $149\,598\,500 \pm 250$  km, soit une parallaxe solaire de  $8,794185 \pm 0,000015''$ .



**Fig.2** : L'antenne AZ-EL de 26 mètres de diamètre de la station de Goldstone du Jet Propulsion Laboratory qui était utilisée en couplage avec l'autre antenne HA-DEC pour détecter l'écho radar de Vénus en 1961.

La méthode radar exige de disposer d'une éphéméride ou de tables du mouvement de Vénus et de la Terre (ou du Soleil, ce qui revient au même). Celles de Newcomb furent utilisées dans un premier temps et ensuite légèrement corrigées par Duncombe pour les besoins du tir radar. Tant le décalage Doppler que le temps de propagation pouvaient être calculés au préalable à l'aide des éphémérides. La comparaison des observations aux mesures permettait de déterminer l'unité astronomique par ajustement progressif de celle-ci à l'aide de la méthode des moindres carrés. Les résidus pour les observations de vitesse (vitesse du centre de masse de Vénus au moment où l'onde radar vient frapper la surface de la planète par rapport à la position et la vitesse de la station émettrice ; vitesse et position de la station réceptrice par rapport à la vitesse du centre de masse de Vénus au moment de la réflexion sur Vénus) sont de  $\pm 0,1$  m/s et ceux pour l'estimation de la distance parcourue aller-retour de  $\pm 200$  km. La mesure Doppler se montrait très sensible à l'éphéméride utilisée, ce qui n'était pas le cas de la mesure du temps de parcours. En conséquence, les mesures de décalage Doppler fournissaient une excellente évaluation des qualités propres des éphémérides utilisées et des corrections à y apporter. Ainsi, les corrections de Duncombe aboutissaient en définitive à avancer Vénus sur son arc d'orbite respectivement à la Terre de  $0,54''$ . La comparaison des observations avec l'éphéméride de Newcomb montrait que celle-ci était en erreur de près d'une seconde d'arc. Par conséquent, la nouvelle éphéméride de Duncombe permettait à elle seule d'absorber la moitié de cette erreur.

Lors du symposium de l'UAI (Union Astronomique Internationale) de 1963 à Paris consacré aux constantes fondamentales de l'astronomie, pour la première fois, aux côtés des grands gourous des bureaux d'éphémérides nationaux, tels que Dirk Brouwer et Gerard Clemence du Naval Observatory et Jean Kovalevsky du Bureau des longitudes, on trouvait des spécialistes de l'astronomie radar tels que Duane Mulheman. Il donna lieu à un « grand débat » entre Eugène Rabe, le dynamiqueur spécialiste d'Éros (voir LI#105), et Mulheman à propos de la valeur de la parallaxe solaire. La valeur de la parallaxe issue des observations d'Éros ne corroborait absolument pas celle obtenue par les tirs radars sur Vénus. L'affrontement fut vif. Brian Marsden de l'observatoire de l'Université de Yale tenta de concilier les points de vue mais conclut en faveur des mesures radars.

Le groupe de travail mis en place par l'UAI adopta finalement la valeur radar obtenue par le JPL en 1964 lors de son congrès de 1964 à Hambourg. Il y a donc exactement 50 ans que l'unité astronomique fut fixée pour la première fois par la méthode des échos radars sur Vénus. Les méthodes astronomiques cédaient le pas comme elles l'avaient déjà fait pour la mesure de la vitesse de la lumière et comme elles le feront dans les années qui suivirent pour la détermination du mètre ou la définition de la seconde. Après un très sévère arrondi sur la valeur, l'unité astronomique fut posée égale à la valeur de 149 600 000 km (parallaxe solaire de 8,80"). L'une des nouveautés de cette résolution fut de reconnaître l'unité astronomique comme une unité primaire. Le système de l'UAI 1968 signifiait que les éphémérides nationales devaient utiliser le système des constantes adopté lors de l'AG de l'UAI de 1964. En adoptant une telle valeur, la parallaxe solaire se ramenait à 8,80" exactement, de sorte que l'inconsistance existant entre la valeur provenant de la mesure de l'aberration (en effet, il n'y avait pas qu'avec Éros que les valeurs ne s'accordaient pas, voir LI#104) et celle provenant de la mesure radar était aplanie (en adoptant d'aplanir celle avec les mesures d'Éros !). Entre-temps, de nouvelles observations radar poursuivies jusqu'en 1967 aboutissaient à une valeur incroyablement précise de  $149\,597\,892,9 \pm 5,0$  km (parallaxe de 8,7941493") pour un temps mis par la lumière pour parcourir 1 ua de  $499,004788 \pm 0,000017$  s. Par ailleurs, en 1967 également, Schubart et Zech réanalysèrent les observations utilisées par Rabe et lui trouvèrent une erreur lors du calcul des dérivées partielles ! Finalement, en 1968 le désaccord qui existait entre les deux méthodes avait complètement disparu.

Éros s'était réconcilié enfin avec Vénus ...