

## ÉTUDE DES PLANÈTES A L'AIDE DU RADAR

*Professeur V. Kotelnikov, V. Doubrovine, B. Kouznetsov, G. Petrov, O. Rjiga,  
A. Chakhovski*

L'onde électrique

Comme chaque année, la Société Scientifique et Technique POPOV a tenu à Moscou son Congrès national de la Journée de la Radio, du 7 au 11 mai 1964.

Dans ses précédents numéros, l'Onde Électrique a donné les titres des nombreuses communications présentées, dont tous les résumés (en russe) ont été envoyés par la Société POPOV à la S.F.E.R.

A ce Congrès, deux Présidents de notre Société ont assisté, invités par le Président de la Société POPOV: Messieurs Pierre Grivet, Président de la S.F.E.R. en 1965, et Gérard Lehmann, Président en 1963.

L'ouverture du Congrès fut marquée par un exposé magistral du Professeur Kotelnikov, sur «l'Étude des planètes à l'aide du Radar», exposant la situation de cette question fondamentale pour l'astronomie, à la suite des travaux exécutés par les laboratoires du monde entier, qui ont permis d'améliorer de deux ordres de grandeur la précision de nos connaissances sur les dimensions géométriques du système solaire. Le Professeur Kotelnikov, membre de l'Académie des Sciences de l'U.R.S.S., a bien voulu accepter, sur notre demande, de remettre à la S.F.E.R. le texte intégral de sa conférence, que l'Onde Électrique est heureuse de publier. Qu'il reçoive ici, ainsi que ses collaborateurs, nos très vifs remerciements.

A cette occasion, nous sommes heureux de transmettre notre meilleur souvenir à Monsieur le Professeur Siforov, Président de la Société Scientifique POPOV, et à son secrétaire général technique, Monsieur Soudakov, qui ont établi la tradition suivant laquelle, chaque année, plusieurs électroniciens français sont invités à assister au Congrès Scientifique annuel de la Journée de la Radio, à Moscou.

Pierre Grivet, Gérard Lehmann

В настоящую статью включены материалы следующих работ:

1) *Котельников В.А., Дубровин В.М., Кузнецов Б.И., Петров Г.М., Ржига О.Н., Шаховской А.М.* Успехи планетной радиолокации. Природа. Ежемесячный популярный естественно-научный журнал Академии наук СССР. 1964, стр. 2-13.

2) *Котельников В.А., Дубровин В.М., Дубинский Б.А., Кислик М.Д., Кузнецов Б.И., Петров Г.М., Работягов А.П., Ржига О.Н., Шаховской А.М.* Радиолокация планеты Марс в Советском Союзе. Доклады Академии наук СССР. 1963. Том 151, №4, стр. 811-814

## 1. Introduction

La localisation des planètes au moyen de la radio est basée sur le principe de l'exploration par radar. Autrement dit, il s'agit d'envoyer vers la planète des trains d'ondes radioélectriques à l'aide d'un émetteur puissant et d'un aérien très directif. Ces ondes nous reviennent après réflexion et, à l'aide d'un récepteur très sensible, nous pouvons recueillir des renseignements sur le mouvement de la planète et la structure de sa surface.

Le premier corps extra terrestre dont on a pu recevoir un écho radio fut la lune distante, en moyenne, de 384 000 km. Déjà dans la troisième décennie du siècle, lors des premiers essais de sondage de l'ionosphère à l'aide d'impulsions, on se demande s'il serait possible de déceler des signaux radio réfléchis par la lune. Cependant, deux décennies s'écoulèrent encore avant que les progrès de la technique permettent la réalisation de l'expérience. Les premiers signaux radio réfléchis sur la lune ont été enregistrés en 1946 par de Witt, Stodola et autres [1] aux Etats-Unis et, presque simultanément, par Z. Bay [2] en Hongrie à l'aide de stations radar militaires transformées. Ces expériences ont été le début d'une nouvelle méthode active d'exploration des corps célestes.

Grâce aux perfectionnements apportés aux systèmes radar, les années suivantes ont vu des études détaillées sur les propriétés réfléchissantes de la surface lunaire. De nombreuses mesures effectuées dans une gamme d'ondes allant de 8 mm à 8 m [3] ont montré que la surface lunaire était plus unie qu'on ne le supposait autrefois. La réflexion de base des ondes radio s'effectue à partir d'une calotte sphérique profonde de quelques kilomètres située sur la partie de la surface lunaire la plus proche de la terre. Cela a permis de mesurer la distance de la terre à la lune avec une erreur plus faible que 1 km [4], ce qui dépasse d'un ordre de grandeur la précision moyenne des observations astronomiques.

Il s'est avéré que la surface lunaire réfléchissait vers l'émetteur quelque 7% de l'énergie qui serait renvoyée par une sphère unie de conductance parfaite. Ces derniers temps aux U.S.A. ont eu lieu des expériences, à la suite desquelles ont été dressées les premières cartes de réflexions des ondes radio par diverses parties de la surface lunaire [5].

L'expérience acquise en étudiant la lune fût mise à profit pour l'étude de Vénus par radar. Quoique Vénus se rapproche plus de la terre que les autres planètes, nous la connaissons très peu. Un voile compact de nuages recouvrant la planète ne permet pas de voir sa surface, mais la couche de nuages ne présente pas d'obstacle infranchissable pour les ondes radio. Aussi est-il possible d'obtenir des réflexions sur la surface même de la planète (à condition d'utiliser des ondes suffisamment courtes pour franchir librement l'ionosphère).

La radiolocalisation de Vénus présentait un problème incomparablement plus difficile du fait de l'énorme distance. Ainsi, en conservant le

même récepteur et la même antenne, il serait nécessaire de multiplier par quelque cinq millions la puissance de l'émetteur. En effet, dans le cas du radar, la puissance des signaux reçus décroît en proportion de la quatrième puissance de la distance, contrairement à ce qui se passe en communication radio où la puissance des signaux décroît proportionnellement au carré de la distance.

Les premières expériences de localisation radio de Vénus (qui, à l'époque, avaient été supposées concluantes) furent exécutées en 1958 aux U.S.A. [6]. Elles furent répertées en Angleterre [7] en 1959. Mais, comme on le sait maintenant, les résultats de ces expériences étaient erronnés. En effet, il fut prouvé que ce qui fut pris pour le signal réfléchi n'étaient en réalité que des tops fortuits du bruit à la réception. Une localisation par radar de Vénus, couronnée de succès, a été réalisée pour la première fois en 1961 lors de la conjonction inférieure (distance minimum terre-Vénus, environ 40 millions de kilomètres) à l'aide d'appareillages plus puissants et plus perfectionnés créés à cette époque. Elle a été faite aux U.S.A. (Institut Technologique de Massachusset [8], Institut Technologique de Californie [9], Radio Corporation of America [10]), en Angleterre (radio-observatoire de Jodrell Bank [11]) et en Union Soviétique (Institut de Radiotechnique et d'Electronique de l'Académie des Sciences, en collaboration avec d'autres institutions [12]). Dans tous ces pays de nouvelles observations de Vénus au radar furent faites pendant la conjonction inférieure de 1962 [13], [14], [15], [16] et [17].

Le perfectionnement de l'appareillage permit la réception de réflexions radio sur Mercure et Mars après celles sur Vénus. Mercure est la plus petite parmi les neuf grandes planètes du système solaire; son diamètre est 2,5 fois plus faible que celui de Vénus. Sa distance à la terre n'est jamais inférieure à 80 millions de kilomètres. Mercure circule à proximité immédiate du Soleil ce qui rend son observation visuelle très difficile. Ainsi, comme pour Vénus, connaissons-nous peu de chose sur lui. La localisation radio de Mercure a été faite pour la première fois en U.R.S.S. en juin 1962 [18]. Presque une année plus tard elle fut répétée aux U.S.A. [19]. Au début de 1963 en Union Soviétique et aux U.S.A., lors de l'opposition de Mars, on a reçu des réflexions radio en provenance de cette planète qui se trouvait à ce moment à une distance de 100 millions de kilomètres de la terre [20], [21].

En septembre-octobre de la même année, grâce à une nouvelle amélioration de la sensibilité de l'appareillage, on réussit en Union Soviétique à obtenir des réflexions sur Jupiter, la plus grande des planètes du système solaire [22]. Pendant cette expérience les ondes radio avaient à franchir 1 milliard 200 millions de kilomètres. Le signal en retour était extrêmement affaibli et, pour le déceler, il a fallu intégrer l'énergie reçue pendant plus de vingt heures. Aux U.S.A. le contact radio sur Jupiter a été fait en octobre-novembre 1963 [23].

Dans le tableau I sont données les distances des planètes au moment de la localisation radio, le temps mis par les ondes pour parcourir l'aller

et retour, ainsi que la puissance du signal reçu sur la planète entière (observations faites en U.R.S.S.).

Tableau I

Planète	Epoque des opérations	Puissance en watts du signal reçu par la planète	Distance en millions de km	Temps de propagation du signal en minutes
Vénus	avril 1961	15	43-48	5
	octobre-décembre 1962	23-9	40-65	4,5-7
Mercure	juin 1962	1	83-88	9-10
Mars	février 1963	1,2	100-101	11
Jupiter	septembre-octobre 1963	13	592-600	66-67

## 2. Mesure des distances de la terre aux planètes

Nous savons que les ondes radio se propagent de la terre vers les planètes suivant le chemin le plus court, avec une vitesse égale à celle de la lumière. En mesurant le temps de parcours des ondes, il est possible de déterminer la distance jusqu'à la planète et à divers points sur sa surface. On peut obtenir une très grande précision de mesure dans cette opération, vu qu'actuellement la vitesse de la lumière est connue avec une exactitude de un millionième et la mesure du temps peut être exécutée avec une précision meilleure que le cent millionième de la durée de l'intervalle à mesurer.

Il existe diverses méthodes pour mesurer les distances à l'aide d'ondes radio. Nous ne parlerons que d'une seule, celle de la modulation linéaire en fréquence, utilisée par nous en 1962 pour la localisation de Vénus au radar. Dans ce procédé la fréquence des ondes rayonnées par l'émetteur variait périodiquement suivant une loi en dents de scie. La variation des signaux réfléchis à l'entrée du récepteur (fig. 1) suivait la même loi, mais avec un retard égal au temps de propagation du signal jusqu'à la planète et retour.

La fréquence des oscillations à la sortie du récepteur était égale à la différence des fréquences du signal réfléchi et de l'hétérodyne locale. Pendant la réception, la fréquence de l'hétérodyne variait suivant la même loi en dents de scie que la fréquence de l'émission (fig. 1), mais avec le retard de la propagation aller-retour à la planète. Dans ce but la modulation en fréquence de l'hétérodyne débutait au moment  $t_1$ , donné par le calcul et correspondant au retour du signal.

La différence des fréquences du signal et de l'hétérodyne dépendait de la distance mesurée. Ainsi, dans le cas où la valeur calculée était égale à

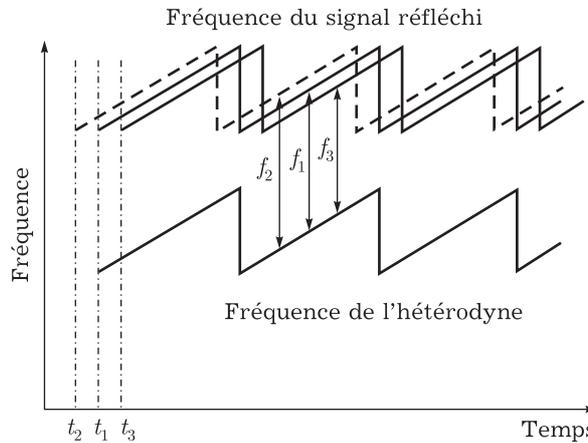


Рис. 1. Variation de la fréquence à la sortie du récepteur en fonction du moment du retour du signal réfléchi, la distance étant mesurée par la méthode de la modulation de fréquence

la distance réelle, le début de la modulation de l'hétérodyne à la réception correspondait d'une manière précise au moment  $t_1$  de l'arrivée du signal réfléchi (ligne grasse sur la fig. 1), la fréquence  $f_1$  étant celle calculée. Si le signal réfléchi arrivait plus tôt, au moment  $t_2$  (ligne en pointillé), la fréquence à la sortie du récepteur devenait plus élevée que la valeur nominale, sa valeur passant à  $f_2$ . Dans le cas d'une distance plus élevée que celle supposée par le calcul, le signal réfléchi arrivait plus tard, au moment  $t_3$  (ligne fine continue) et la fréquence à la sortie du récepteur  $f_3$  se trouvait inférieure à la fréquence nominale. La correction de la valeur de la distance calculée était déterminée d'après la différence de la fréquence à la sortie du récepteur par rapport à la valeur nominale. La mesure des distances jusqu'aux planètes par radar donne un procédé sûr pour la détermination de l'unité fondamentale de longueur dans le système solaire, l'unité astronomique.

### 3. Détermination de l'unité astronomique

En partant de la valeur moyenne de la distance entre la terre et le soleil les méthodes de la mécanique céleste permettent le calcul très précis de toutes les distances dans le système planétaire. Cette valeur porte la désignation d'unité astronomique. En calculant la distance jusqu'à une planète en unités astronomiques et en la mesurant ensuite à l'aide du radar en unités de longueur terrestres (kilomètres), on peut déterminer la valeur de l'unité astronomique.

Antérieurement l'unité astronomique a fait l'objet de multiples déterminations à l'aide de diverses méthodes. Les résultats des méthodes

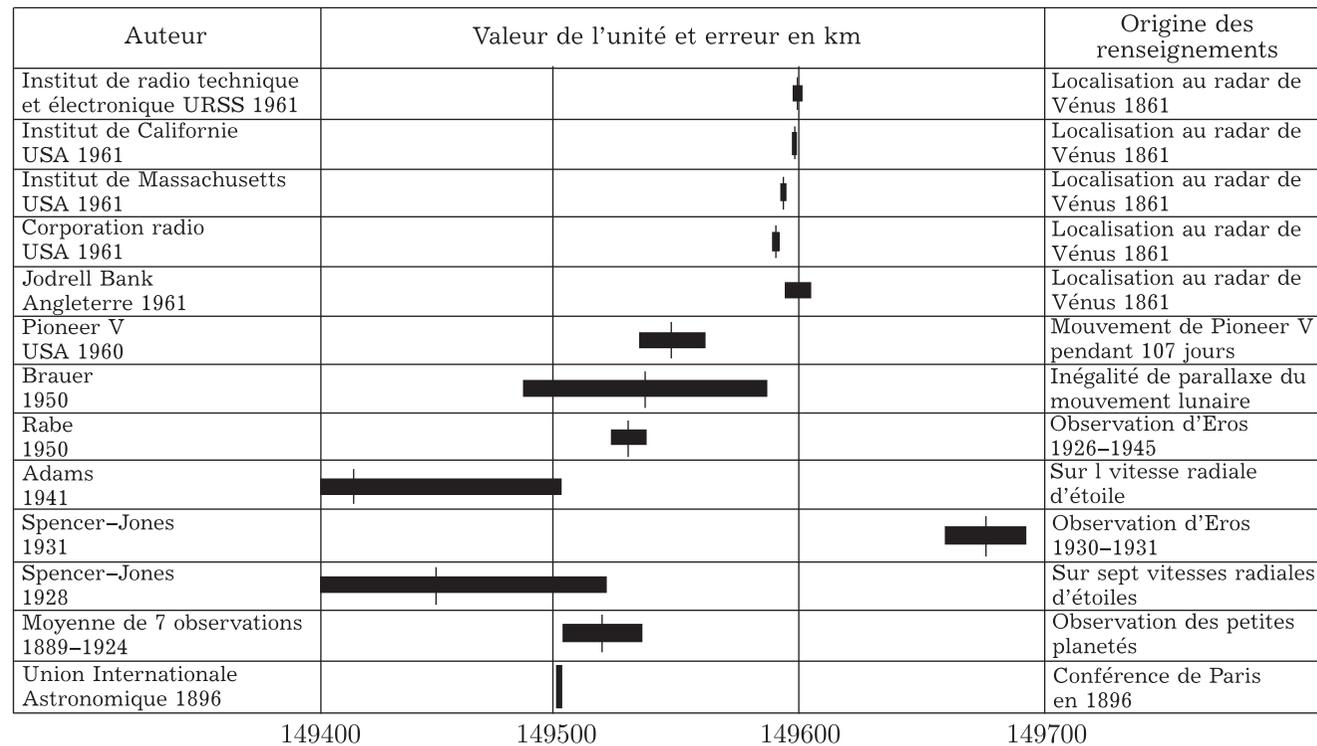


Рис. 2. Résultats de la détermination de l'unité astronomique par procédés radio et par méthodes astronomiques

de mesures astronomiques fondamentales de cette unité, et ceux des mêmes mesures effectuées par radar en 1961 sont représentés sur la figure 2. Les rectangles ombrés représentent les évaluations des erreurs de mesures, données par leurs auteurs-mêmes. Les diverses déterminations astronomiques donnent des valeurs pour l'unité astronomique se situant entre 149.4 et 149.7 millions de kilomètres.

Les mesures par radar de 1961 ont donné, comme on le constate sur le dessin, des résultats concordants et de beaucoup plus précis que tout ce qu'on avait eu auparavant. La sûreté de ces résultats ne fait aucun doute, les mesures ont été exécutées indépendamment dans trois pays sur des longueurs d'ondes différentes et les divergences sont dans les limites de l'erreur admise. Les mesures ont été répétées de nombreuses fois, la sensibilité de l'appareillage était suffisante pour enregistrer avec certitude le signal réfléchi sur Vénus.

Les résultats de la mesure de l'unité astronomique d'après les observations de Vénus au radar en 1961 et 1962 sont représentés séparément sur la figure 3 à échelle agrandie. D'après ces mesures, la valeur de l'unité astronomique est située entre 149 596 000 et 149 600 000 kilomètres.

Sur le même dessin sont indiquées les fréquences des émetteurs radar. Leurs valeurs limites (50–2 388 MHz) sont presque dans le rapport 50. Dans le cas où la présence de particules chargées dans l'espace interplanétaire aurait une influence essentielle sur la propagation des ondes de cette bande, la distance mesurée serait plus faible pour les ondes plus courtes, moins sujettes aux influences d'un milieu ionisé que les ondes plus longues. L'absence de toute liaison visible entre les valeurs obtenues pour l'unité astronomique et la fréquence utilisée pour les mesures montre que l'influence du milieu interplanétaire s'englobe dans les limites des erreurs de mesure.

Les données de la figure 3 ont été obtenues d'après les observations du mouvement d'une seule planète. La localisation de Mercure et de Mars au radar en 1962–1963 a donné la possibilité d'exécuter des mesures indépendantes de l'unité astronomique, en se servant encore de deux autres planètes. Ces mesures ont donné des résultats similaires à ceux obtenus avec Vénus.

Avant les mesures au radar, on était d'accord pour estimer comme valeur la plus certaine de l'unité astronomique le chiffre de  $149\,532\,000 \pm 7\,000$  km obtenu par Rabe: [26] à l'aide d'observations sur la petite planète Eros en 1926–1945 (fig. 2). L'erreur de détermination de Rabe, comme les mesures au radar l'ont prouvé, représentait 64 à 68 000 km, c'est-à-dire qu'elle était une centaine de fois plus importante qu'à présent. Cette précision était tout-à-fait insuffisante pour le guidage des mobiles interplanétaires. Une plus grande précision de la valeur de l'unité astronomique est limitée non pas par les possibilités de l'appareillage radar, mais par nos connaissances insuffisantes des paramètres de l'orbite de Vénus, de son rayon et de la valeur de la vitesse de la lumière.

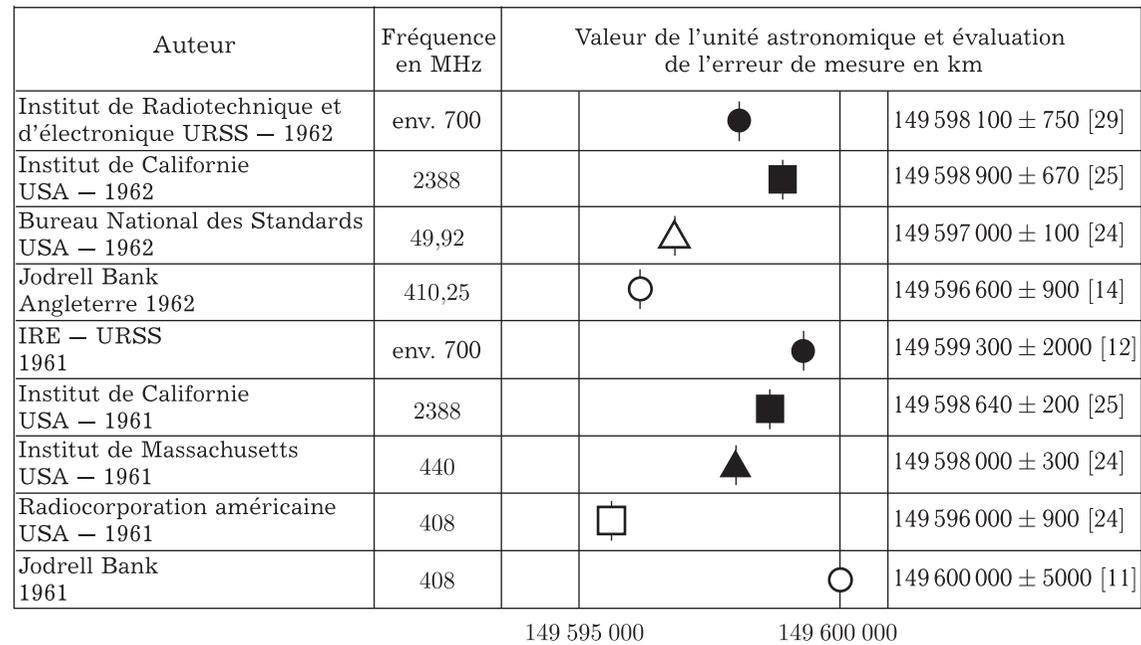


Рис. 3. Résultats de la détermination de l'unité astronomique d'après les observations de Vénus au radar en 1961 et 1962. La vitesse de la lumière a été supposée égale à 299 792,5 km s; le rayon de Vénus à 6100 km. Pour les mesures faites en U.R.S.S. il a été donné la valeur maximale de l'erreur, tenant compte de l'erreur de l'équipement, de l'approximation de la connaissance de la vitesse de propagation des ondes radio, du rayon de Vénus et de l'erreur des éphémérides. Pour les autres mesures ces erreurs n'ont pas été entièrement escomptées

#### 4. Précision accrue sur les paramètres de l'orbite et le rayon de Vénus

Les mesures précises de la distance de la planète poursuivies pendant une durée de temps suffisant permettent, en plus de l'unité astronomique, la détermination, avec grande exactitude, de divers paramètres de l'orbite (excentricité, localisation sur le trajet, etc.) ainsi que du rayon de Vénus. Ainsi, par exemple, si les dimensions de l'orbite sont bien connues, mais si la planète se trouve sur son orbite en avant de l'endroit calculé, cela indique, avant la conjonction (quand la planète se rapproche) que la distance mesurée est plus faible que la distance calculée; plus grande, au contraire après la conjonction (quand la planète s'éloigne).

Cette possibilité d'amélioration de la précision peut être observée sur les résultats de nos mesures de la distance de la terre à Vénus en octobre-décembre 1962 [13] sur la figure 4. Nous y avons indiqué par des cercles les variations, en fonction de la date des observations, de la valeur  $\Delta\tau$  représentant la différence entre la distance mesurée et la valeur calculée en se basant sur nos connaissances antérieures de l'orbite de Vénus. Près des cercles sur le dessin sont indiquées les erreurs totales journalières de mesure pour la date donnée, ce qui représentait 7 à 15 km.

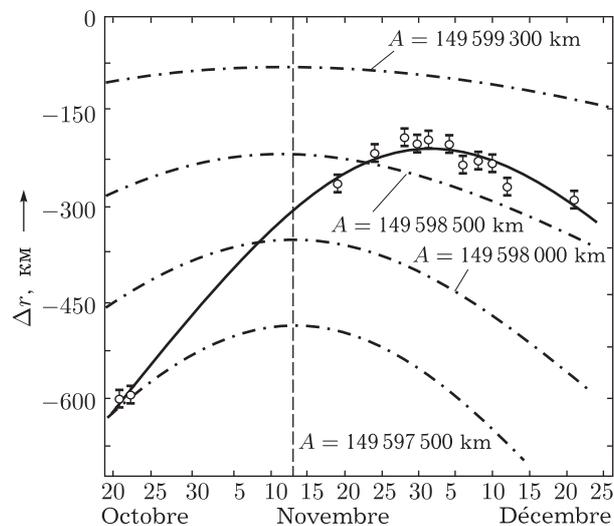


Рис. 4. Variation dans le temps de la différence entre la distance émetteur-Vénus calculée et la distance mesurée

En trait mixte, on a marqué sur la figure comment aurait dû varier cette valeur pour diverses grandeurs de l'unité astronomique. En particulier, si cette dernière avait été égale à  $A = 149\,599\,300$  km, ce que nous avons trouvé aux mesures de 1961 et utilisé pour nos calculs, les points

expérimentaux, en absence d'autre erreur, se seraient alignés le long de l'axe horizontal.

La non-coïncidence des points expérimentaux avec les courbes est un témoignage de la nécessité de rechercher une précision meilleure, non seulement pour la valeur de l'unité astronomique mais aussi pour les paramètres de l'orbite et le rayon utilisés pour calculer les distances de Vénus à la terre. En particulier, en adoptant la valeur de 149 579 000 km pour l'unité astronomique et 6 020 km pour le rayon de Vénus et en admettant que la position réelle de son centre de gravité sur l'orbite soit décalée de 270 km dans le sens du mouvement par rapport à la position calculée, la valeur  $\Delta\tau$  varie comme l'indique le trait continu de la figure 4. On voit qu'elle suit assez bien les points expérimentaux. La valeur de ce décalage ne représente que 2% du diamètre de Vénus, le déceler optiquement est très difficile.

Les observations optiques, contrairement à celles par radar, nous donnent le rayon de la limite extérieure de la couche de nuages. D. Martynov, en observant l'occultation de l'étoile Regulus par Vénus, a déterminé la valeur de ce rayon à  $6\,100 \pm 34$  km [27]. En prenant la différence des rayons mesurés optiquement et par radar, on peut déterminer la hauteur de la couche nuageuse sur Vénus. Cependant, la précision des mesures dont on dispose pour le moment est insuffisante.

## 5. Étude de la surface des planètes

Un cosmonaute, s'apprêtant à partir pour Vénus, cherchera d'abord à savoir ce qu'il trouvera sur sa surface: est-ce un océan aqueux continu, ou une plaine inondée de pétrole [28]? Le radar, appliqué à l'étude des planètes a déjà partiellement répondu à ces questions.

L'intensité de la réflexion des ondes radio en direction de l'émetteur dépend, en plus des dimensions géométriques de la planète, de sa structure et du coefficient de réflexion de sa surface. On peut avoir une idée de sa structure en comparant les valeurs de l'énergie des signaux réfléchis par les divers éléments de sa surface.

Le front des ondes rayonnées par l'émetteur en arrivant sur la planète commence par toucher le point le plus rapproché de la terre (le point *A* au centre du disque de la planète sur la figure 5), puis des zones plus éloignées dessinant dans le plan des cercles concentriques. Etant donné que la réflexion sur les zones plus éloignées revient vers la terre avec un certain retard, il est possible de distinguer les réflexions des zones consécutives annulaires et de les séparer.

Sur la figure 6 nous indiquons, conformément à nos expériences, comment varie, en valeur relative, l'énergie *P* des signaux réfléchis sur Vénus en fonction de la distance  $\Delta R$  du point de réflexion. La position du point *A* de la figure 5 a été affectée de la valeur 0. Ainsi, la plus grande colonne correspond à l'énergie des signaux réfléchis par la zone du segment sphérique la plus rapprochée de la terre. Les dix premières colonnes

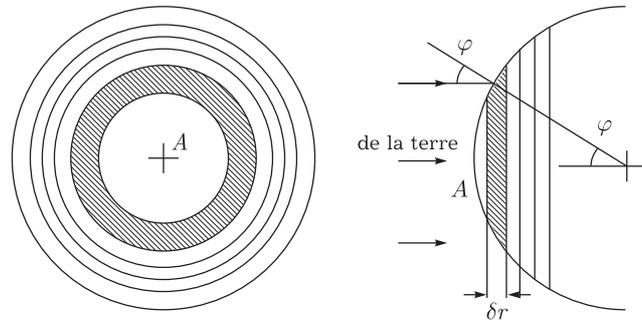


Рис. 5. Zones annulaires de réflexion sur la surface d'une planète irradiée par une onde plane

représentent l'énergie réfléchié par des zones annulaires d'épaisseur égale  $\delta t = 38$  km. Les autres zones sont quatre fois plus épaisses. La profondeur de ces zones se détermine par le pouvoir séparateur de l'appareillage. L'énergie correspondant aux valeurs négatives de  $\Delta R$  est le résultat de la limitation en durée de la période de la modulation en dents de scie du signal, que nous avons utilisé pendant toutes ces expériences.

L'intensité de l'énergie réfléchié diminue avec l'augmentation de la distance  $\Delta R$ , à peu près suivant l'hyperbole:  $p = \frac{24}{\Delta R + 24}$  figurée en trait mixte sur la figure 6.

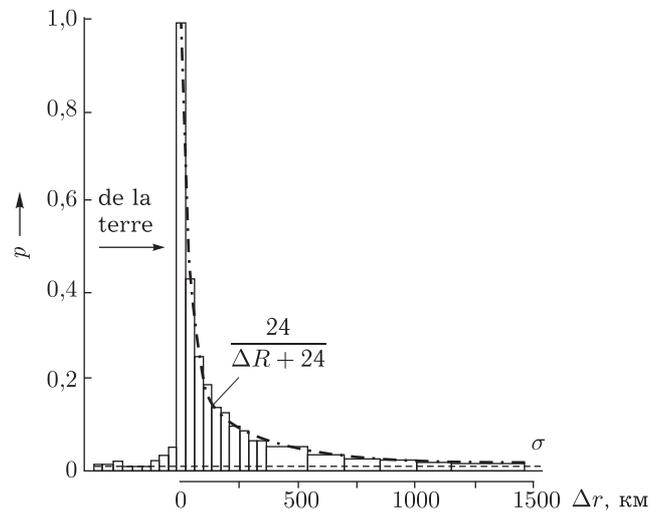


Рис. 6. Répartition de l'énergie des signaux réfléchiés suivant la distance jusqu'au point de la surface de Vénus le plus proche de la Terre. En pointillé: valeur de l'erreur  $\sigma$  provoquée par le bruit dans l'équipement

Comme on peut le constater, il fut possible d'enregistrer l'énergie réfléchiée par des zones situées 1 500 km plus loin de la terre que le point le plus rapproché de la planète. En se basant sur ces données, on a pu déterminer l'énergie des ondes réfléchies en fonction de l'angle d'incidence  $\varphi$  (fig. 5). Cette loi est représentée sur la figure 7 par une ligne continue (l'énergie est donnée en unités relatives, à l'échelle logarithmique). A titre de comparaison, sur le même dessin sont données, en pointillé, des courbes analogues obtenues à l'exploration par radar de la lune sur des longueurs d'ondes de 68 et de 3,6 cm [3].

La confrontation des données de la figure 7 permet d'établir le fait important que, pour les ondes de 40 cm, les surfaces de Vénus et de la lune présentent à peu près la même structure au point de vue de l'hétérogénéité. Les ondes lumineuses sont réfléchies par la lune comme par une sphère rugueuse à peu près conformément à la loi Lommel-Zéligier (ligne mixte de la fig. 7). La réflexion par Vénus et la lune des ondes radio se rapproche du mode de réflexion par une sphère lisse. La majeure partie de l'énergie des signaux réfléchis vers l'émetteur provient d'une petite tache au centre du disque visible de la planète. On peut admettre, que dans les limites de cette tache, l'orientation de l'onde incidente est normale à la surface de la planète.

On peut déterminer le coefficient de réflexion de la surface de la planète d'après l'intensité des signaux réfléchis et rechercher des matériaux correspondants parmi ceux que nous trouvons sur terre. Le coefficient de réflexion pour incidence normale de quelques matériaux est donné dans le tableau II. Pour les diélectriques, sa valeur ( $\rho$ ) dépend de la constante diélectrique du matériau  $|\varepsilon|$ :

$$\rho = \left( \frac{\sqrt{\varepsilon} - 1}{\sqrt{\varepsilon} + 1} \right)^2.$$

Le coefficient de réflexion de la surface de Vénus, d'après les mesures faites en U.R.S.S. sur ondes de 40 cm et aux U.S.A. sur ondes de 68 et de 12,5 cm, se chiffre par 10 à 15 % (c'est-à-dire qu'il est de 1,5 à 2 fois plus élevé que pour la lune). Il faut noter que sa valeur ne variait que peu d'un jour à l'autre, ce qui indiquerait que la surface de Vénus (au moins la partie qui a fourni les réflexions) est d'une structure plus ou moins uniforme, contrairement à la surface terrestre. Un coefficient de réflexion similaire pour les ondes radio est accusé par certaines roches terrestres (tableau II). La valeur du coefficient de réflexion est trop élevée pour admettre que la surface de Vénus soit totalement recouverte par du sable ou par du pétrole. Elle est, par contre, trop faible pour appuyer l'hypothèse d'une surface totalement recouverte par l'océan.

La localisation de Mars par radar, effectuée en 1963 en U.R.S.S. sur onde de 40 cm et aux U.S.A. sur ondes de 12,5 cm, a fourni des données sur le coefficient de réflexion de la surface de cette planète. Sur la figure 8

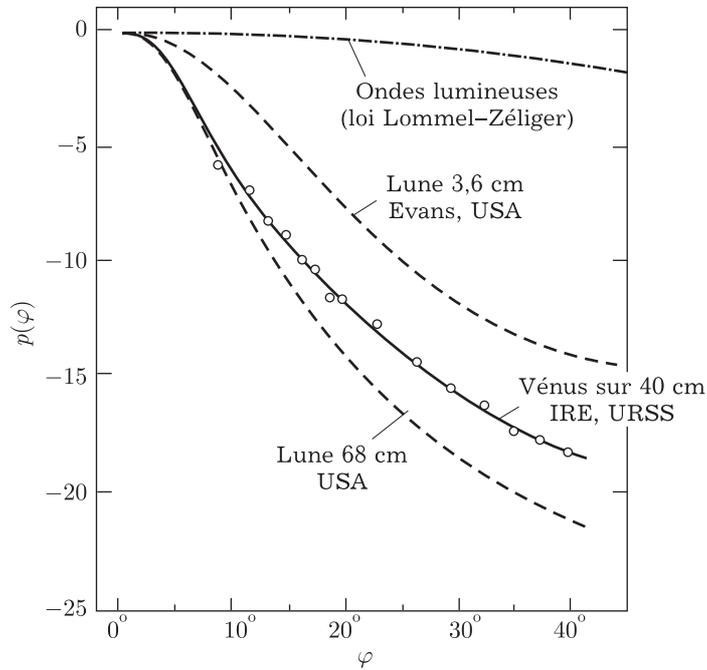


Рис. 7. Energie réfléchié en fonction de l'angle d'incidence de l'onde pour Vénus et la lune

Tableau II

Matériau de la surface réfléchissante	Constante diélectrique	Coefficient de réflexion %
Quartz cristallin	4,5	13
Quartz fondu	3,5-4,1	9-11,5
Sable de quartz	3,0	7
Marbre	8,3	23
Pétrole	2,1	3,5
Eau douce	80	64
Eau de mer	conducteur	env. 100

est représentée une carte de Mars, sur laquelle un trait horizontal indique la région dont nous avons obtenu des signaux réfléchis.

Le coefficient de réflexion de la surface variait dans de larges limites au fur et à mesure que Mars présentait divers côtés vers la terre. Dans le bas de la figure, en dessous de la carte de Mars, nous avons indiqué

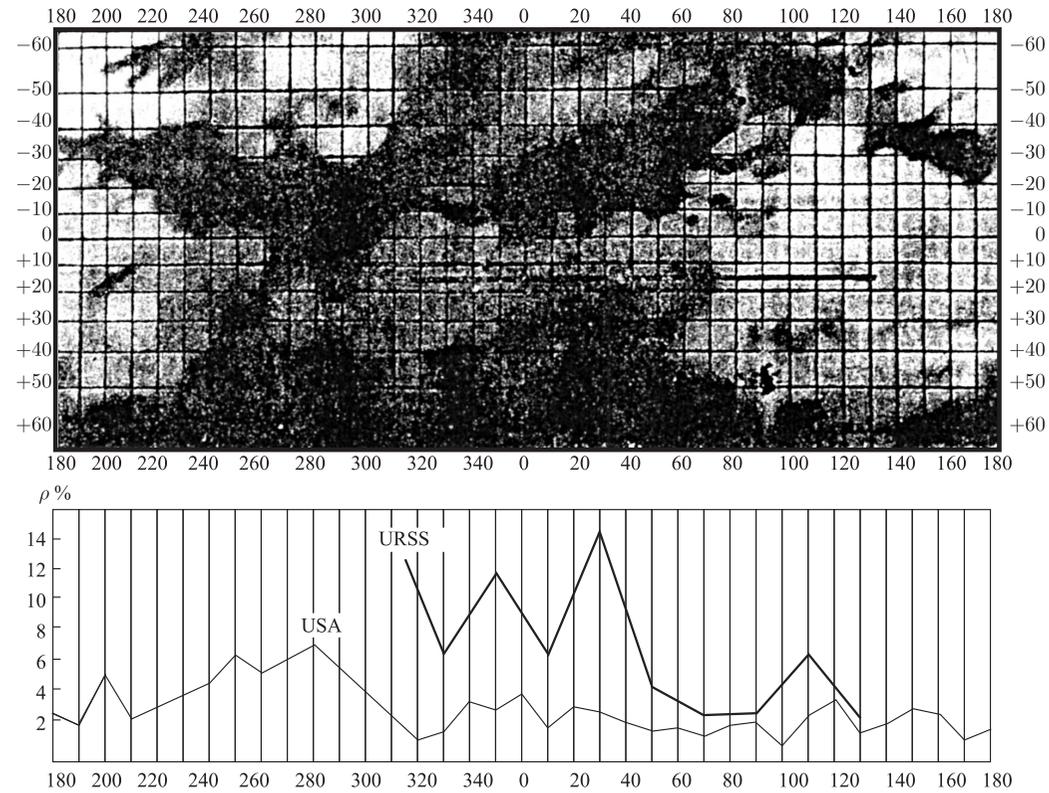


Рис. 8. Carte astronomique de Mars et variations du coefficient de réflexion de sa surface, d'après les observations faites en U.R.S.S. et aux U.S.A.

les variations du coefficient de réflexion en fonction de la longitude du lieu réfléchissant, conformément aux observations faites en U.R.S.S. [20] et aux U.S.A. [21]. Les deux courbes accusent une certaine corrélation mutuelle. D'après ces renseignements, il semblerait que les parties sombres, qu'on qualifie de mers, réfléchissent mieux que les régions claires, qualifiées de continents. Le coefficient de réflexion moyen de la surface de Mars, d'après nos observations s'est avéré comme égal à 7% (comme pour la lune). Aux U.S.A., il a été trouvé deux fois plus faible. Il est possible que cela s'explique par une variation de la réflexion en fonction du raccourcissement de la longueur d'onde.

Pendant nos observations, il y avait des jours où il était impossible d'enregistrer des réflexions, peut-être à cause des variations des propriétés réfléchissantes de Mars. Des observations ultérieures avec un équipement plus sensible doivent fournir des données plus précises concernant la surface de Mars.

Conformément à nos observations sur ondes d'environ 40 cm, le coefficient de réflexion de Mercure est d'environ 6%. Celui de Jupiter dépasse 10%.

## 6. La période de rotation de Vénus

Jusqu'à la mise en œuvre des observations par radar, la période de rotation de Vénus ainsi que l'inclinaison de son axe restaient indéterminées. Le temps de rotation était évalué entre 15 heures et 225 jours [28]. En étudiant Vénus au radar en 1962, tant en U.R.S.S. qu'aux U.S.A., on a pu déterminer sa période de rotation d'après l'élargissement des spectres de signaux à leur réflexion sur la planète.

Du fait de la rotation, les divers éléments de la surface planétaire ont des vitesses différentes par rapport à l'émetteur. Par suite de l'effet Doppler la fréquence des signaux réfléchis se décale en fonction de la vitesse des éléments réfléchissants. Ainsi, par exemple, le point *a* de la figure 9, qui se rapproche de nous, donnera une réflexion de fréquence plus élevée que le point *b* qui s'éloigne de nous. Les réflexions sur le point *C* seront à fréquence encore plus élevée étant donné la plus grande vitesse de ce point.

La figure 10 représente le spectre moyen pour deux mois d'observations de signaux réfléchis obtenus lors d'irradiations monochromatiques de Vénus avec une onde d'environ 40 cm. La stabilité de la fréquence de l'émetteur était suffisante pour utiliser à l'analyse des filtres avec bande passante de largeur 1 Hz. Un dispositif spécial compensait pendant la mesure le décalage moyen de la fréquence du signal provoqué par le mouvement relatif de l'émetteur et du centre de Vénus. Ce dispositif n'introduisait aucune erreur appréciable. Chaque colonne sur la figure 10 représente l'énergie des signaux réfléchis par des éléments de la surface, qui se projettent sur le disque visible de la planète sous l'aspect de bandes parallèles à l'axe de rotation comme indiqué en figure 9.

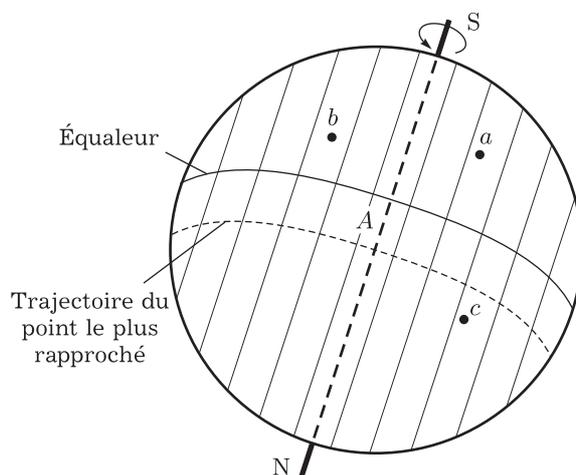


Рис. 9. Schéma explicatif de l'élargissement de la ligne spectrale du signal quand la réflexion a lieu sur une planète en rotation. Les points  $a$  et  $c$  se rapprochent de l'observateur,  $b$  s'en éloigne

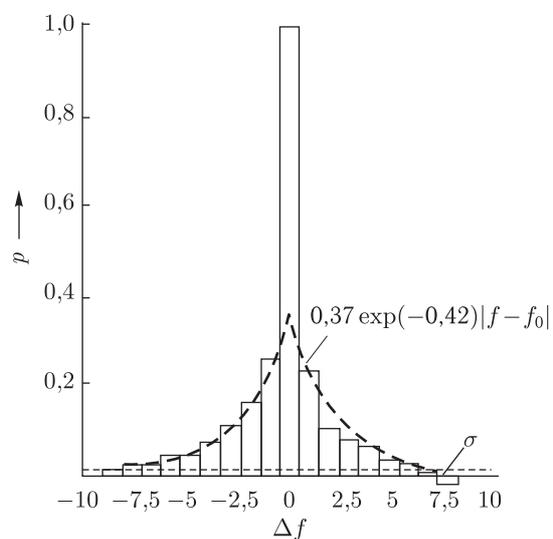


Рис. 10. Spectre moyen des signaux réfléchis sous l'effet d'une irradiation monochromatique de Vénus avec une onde d'environ 40 cm.  $\Delta f$  décalage de la fréquence par rotation de la planète. En pointillé: valeur de l'erreur  $\sigma$  provoquée par le bruit de l'équipement

Le spectre des signaux réfléchis n'était pas de la même largeur tous les jours. C'est la preuve que la rotation de Vénus variait, par rapport à l'émetteur. Cette rotation relative qu'il serait possible de remarquer en observant au télescope le déplacement des détails sur la surface de Vénus si elle n'était pas recouverte par les nuages, est provoquée par deux causes: la rotation propre de Vénus (qui doit précisément être déterminée et dont la valeur est constante) et le déplacement relatif Vénus-terre. L'origine de cette dernière composante peut être expliquée par l'analogie avec une personne qui contourne un globe immobile. Quoique ce dernier ne bouge pas, on a l'impression qu'il tourne dans le sens inverse du mouvement de la personne. Cette composante peut être calculée théoriquement.

La figure 11 représente les variations de la rotation relative de Vénus. Elles ont été calculées pour diverses valeurs de la période  $T$  dans le cas où l'axe de la planète est perpendiculaire au plan de l'orbite.

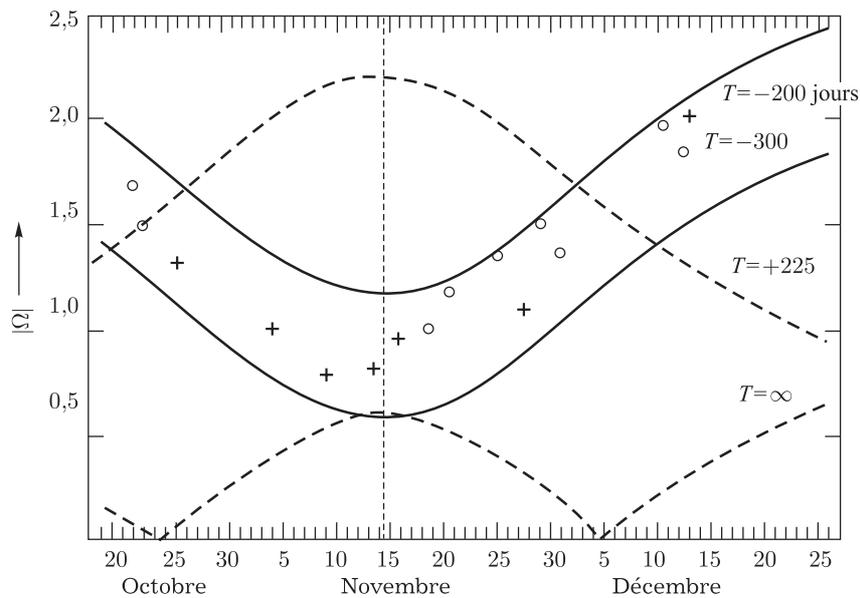


Рис. 11. Détermination de la période de rotation de Vénus d'après les observations faites en U.R.S.S. (cercles) et aux U.S.A. (croix).  $\Omega$  vitesse angulaire en degrés/jour de la rotation de Vénus par rapport à l'émetteur;  $T$  période de rotation propre de Vénus en jours:  $T = \infty$  si la planète ne tourne pas, pour  $T = 225$  jours (durée du tour de Vénus autour du Soleil) elle tournerait toujours la même face vers le soleil (comme la lune par rapport à la terre). Les valeurs négatives de  $T$  indiquent une rotation rétrograde par rapport à sa course autour du soleil

Sur le même dessin ont été portés les points expérimentaux d'après les observations faites en U.R.S.S. [13] et aux U.S.A. [15]. Dans ce but, le spectre obtenu expérimentalement à des jours différents par ob-

servation directe, était comparé à celui calculé pour diverses vitesses de rotation d'après les données sur l'énergie réfléchie en fonction de l'angle d'incidence des ondes (fig. 7). On constate sur la figure que les données expérimentales se rapprochent d'une rotation rétrograde avec une période de 200 à 300 jours terrestres. Jusqu'à présent, une rotation rétrograde n'a été observée que sur la planète Uranus. La bonne coïncidence des données expérimentales obtenues indépendamment sur les ondes de 40 et 12,5 cm est une preuve que la réflexion de ces ondes a lieu directement sur la surface même de Vénus et non sur des couches ionisées éventuelles qui l'entourent.

On suppose que l'existence d'un champ magnétique sur une planète serait un effet de sa rotation. Cette correspondance peut être vérifiée pour les corps célestes pour lesquels on connaît la période de rotation et la valeur du champ magnétique. Ainsi, la terre et Jupiter (l'existence d'un champ magnétique intense sur ce dernier est confirmé par les observations radio-astronomiques) peuvent servir d'exemples de planètes à rotation rapide et a champ magnétique intense. Par contre, pour la lune, qui accomplit un tour en 27 jours, l'absence d'un champ magnétique appréciable a été confirmée par mesure directe à bord des fusées soviétiques en 1959. Aussi, il semblerait que la lente rotation de Vénus serait un témoignage indirect de l'absence de champ magnétique intense sur cette planète. Du reste, quand la fusée cosmique américaine «Mariner 2» est passée au voisinage de Vénus en décembre 1962, on n'a pas observé de champ magnétique sur cette planète.

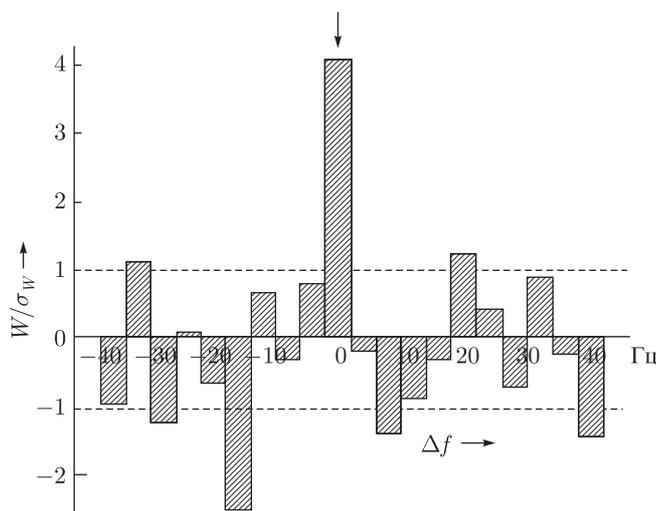


Рис. 12. Spectre des signaux réfléchis sur Mars dans le cas d'une irradiation monochromatique sur onde d'environ 40 cm

Pour Mars, dont la période de rotation, contrairement à celle de Vénus, est connue (24 h 37 mn), on a réussi à obtenir quelques indications sur la structure de la surface d'après les caractéristiques des spectres des signaux réfléchis. Le spectre des signaux que nous avons reçus fut analysé à l'aide de filtres à bandes passantes de 4 Hz. Il est représenté sur la figure 12. Suivant l'axe des abscisses, sont portées la différence entre les fréquences d'accord des filtres et la fréquence centrale ( $\Delta f$ ); en ordonnées, le rapport de l'énergie des signaux reçus dans la bande de chaque filtre  $p$  et de la moyenne quadratique de l'erreur de mesure, provoquée par le bruit de l'équipement  $|\sigma|$ . Le filtre central devait recueillir les signaux réfléchis se rapportant à la bande centrale de la figure 9.

On peut calculer que sur l'onde d'environ 40 cm, la bande totale de la largeur du spectre des signaux réfléchis par Mars dépasse 2000 Hz. Cependant, en pratique, le spectre des signaux reçus fut très étroit (fig. 12). Étant donné la rotation rapide de la planète, l'étroitesse du spectre indiquerait que la surface de Mars comporterait des suites d'espaces horizontaux unis.

## 7. Conclusion

Des études ultérieures au radar pour d'autres positions de Vénus sur son orbite et analysées conjointement avec les renseignements que l'on possède déjà, permettront de préciser, en plus des paramètres de l'orbite et des dimensions de la planète, les paramètres de l'orbite propre de la terre ainsi que la masse de la lune.

Le problème à l'ordre du jour pour les études des planètes au radar est l'exploration de la structure de leur surface. L'antenne d'un émetteur radar ne possède pas le haut pouvoir séparateur angulaire d'un télescope optique. Mais la séparation des signaux dans le temps et d'après la fréquence permet, comme nous l'avons vu ci-dessus, de distinguer des réflexions renvoyées par des éléments différents de la surface de la planète.

Moyennant un équipement suffisamment sensible, ces données permettent de dresser une carte d'après les réflexions radar. L'érection de nouvelles grandes antennes, équipées d'émetteurs puissants rend ce problème parfaitement soluble.

## Bibliographie

1. Witt J.H. de, Stodola E.K. Detection of Radio Signals Reflected from the Moon, Proc. Inst. Rad. Eng., 37, 229, 1949.
2. Bay Z. Reflection of Microwaves from the Moon, Hungarica Acta Physica, 1, 1, 1946.
3. Evans J.V. and Pettengill G.H. The Scattering Behavior of the Moon at Wavelengths of 3.6, 68, and 784 Centimeters, J. Geophys. Res., 68, 423, 1963. Mêmes auteur: The Radar Cross Section of the Moon, J. Geophys. Res., 68, 5098, 1963.

4. Yaplee B. S., Bruton R. H., Graig R. J., Roman N. G. Radar Echoes from the Moon at a Wavelength of 10 cm, Proc. IRE, 46, 293, 1958.
5. Green P. E. and Pettengill G. H. Exploring the Solar System by Radar, Sky and Telescop, 20, Nos 2, 3, 1960.
6. Price R., Green P. E., Gobllick T. J., Kingston R. H., Kraft L. G., Pettengill G. H., Silver R., Smith W. B. Radar Echoes from Venus, Science, 129, 751, 1959.
7. Evans I. V., Taylor G. N. Radio Echo Observations of Venus, Nature, 184, 1358, 1959.
8. Pettengill G. H., Briscoe H. W., Evans J. V., Gehrels E., Hyde G. M., Kraft L. G., Price R. and Smith W. B. A Radar Investigation of Venus, Astron. J., 67, 181, 1962.
9. Victor W. K. and Stevens R. The 1961 JPL Venus Radar Experiment, IRE Trans. PGSET 8, 2, 84, 1962.
10. Maron I., Luchak G. and Blitzstein W. Radar Observation of Venus, Science, 134, 1419, 1961.
11. Thomson J. H., Taylor G. H., Ponsonby J. E., Roger R. S. A New Determination of the Solar Parallax by Means of Radar Echoes from Venus, Nature, 190, 519, 1961.
12. Kotelnikov V. et autres. Résultats obtenus à l'étude de Vénus au radar en 1961. Radiotechnique et Electronique, 7, 1860, 1962.
13. Kotelnikov V. et autres. Les observations au radar de Vénus en U.R.S.S. en 1962. Ctes rendus Ac. Sc. de l'U.R.S.S., 151, 532, 1963.
14. Thomson J. H. Planetary Radar, Quart. J. Roy. Astron. Soc., 4, 347, 1963.
15. Goldstein R. M., Carpenter R. L. Rotation of Venus: Period Estimated from Radar Measurements, Science, 139, 910, 1963.
16. Klemperer W. K., Ochs G. R. and Bowles K. L. Radar Echoes from Venus at 50 Mc/sec, Astron. J., 69, 22, 1964.
17. James J. C. and Ingalls R. P. Radar Observations of Venus at 38 Mc/sec, Astron. J., 69, 19, 1964.
18. Kotelnikov V. et autres. Localisation au radar de la planète Mercure. Ctes Rendus Ac. Sc. de l'U.R.S.S., 147, 1320, 1962.
19. Carpenter R. L., Goldstein R. M. Radar Observation of Mercury, Science, 142, 381, 1963.
20. Kotelnikov et autres. La localisation au radar de la planète Mars en U.R.S.S. Ctes Rendus Ac. Sc. de l'U.R.S.S., 151, 811, 1963.
21. Goldstein R. M., Gillmore W. F. Radar Observations of Mars, Science, 141, 1171, 1963.
22. Kotelnikov et autres. Localisation au radar de la planète Jupiter. Ctes Rendus Ac. Sc. de l'U.R.S.S., 155, 1037, 1964.
23. Goldstein R. M. Radar Observations of Jupiter, Science, 144, 842, 1964.
24. Shapiro I. I. Radar Determination of the Astronomical Unit, Paper presented to IAU Symposium, N° 21, Paris, 1963.

- 
25. Muhleman D.O. Relationship between the System of Astronomical Constants and the Radar Determinations of the Astronomical Unit, Tech. Rept., № 32-477 JPL, 1964.
  26. Rabe E. Derivation of Fundamental Astronomical Constants from the Observations of Eros during 1926–1945, *Astron. J.*, 55, 112, 1950.
  27. Martynov D. Le rayon de Vénus. *Revue Astronomique soviétique*, 37, 848, 1960.
  28. Moore P. *The Planet Venus*, The Macmillan Company, New York, 1959.
  29. Kotelnikov V. et autres. Les progrès de la localisation au radar des planètes. *La Nature (revue soviétique)*, № 9, 1964.