

H

LA DETERMINATION DES PARAMETRES PHYSIQUES DES PLANETES

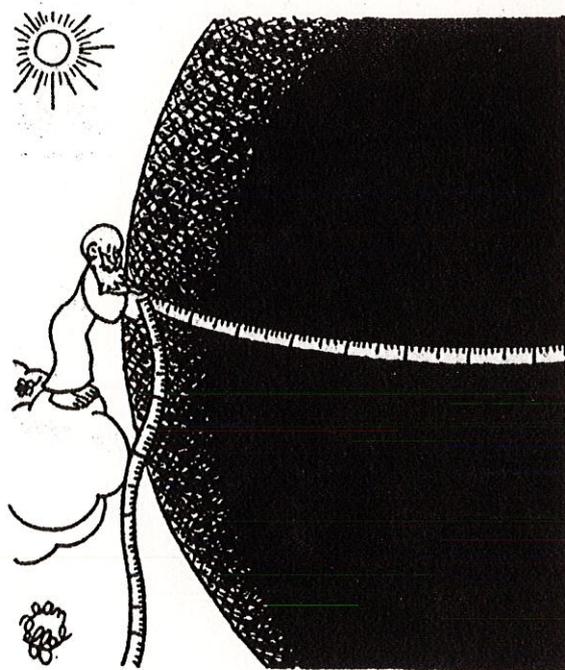
TELLURIQUES

METHODES OPTIQUES

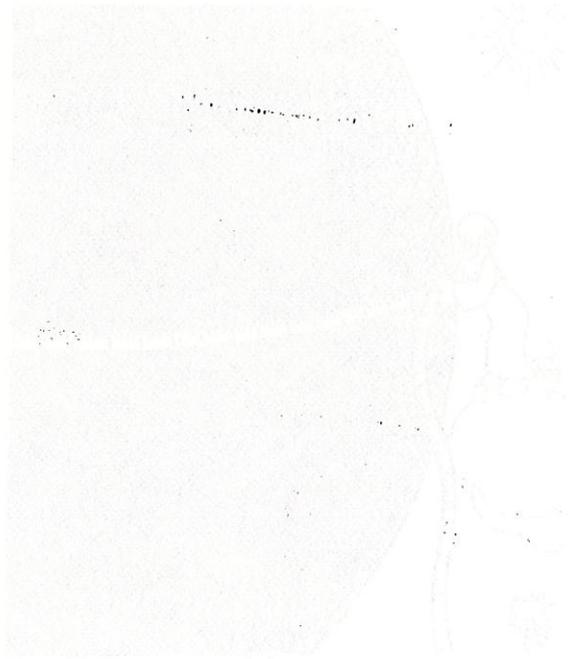
METHODES PAR ECHO-RADAR

METHODES INFRA-ROUGE ET RADIO

EXPLORATION SPATIALE



— ... et svelte ! En centaines de myriamètres,
elle fait tout juste un petit 40...



OBSERVATIONS OPTIQUES DES PLANETES DEPUIS LA SURFACE DE LA TERRE

Les techniques traditionnelles (domaine spectral du visible ; observatoire à la surface de la Terre) ont fourni relativement peu d'informations concrètes et non-ambigües sur la nature physique des planètes telluriques.

Comme nous l'avons vu (pp. 85 etc.), les températures prévues pour les planètes sont telles que leur rayonnement propre se trouve dans le domaine spectral au-delà d'une dizaine de microns ; les dimensions angulaires des planètes sont si faibles que la mauvaise résolution (dûe à la turbulence de notre atmosphère) empêche l'étude de la topographie. De plus, Vénus est couverte de nuages.

Mercuré.

Planète très difficile à étudier à cause de sa proximité du Soleil : la distance angulaire du Soleil ne dépasse jamais 28° . Son albedo est d'environ 0,06 - valeur encore plus faible que celle de la Lune. La période de révolution autour du Soleil est de 87,7 jours.

Quand les conditions d'observation sont particulièrement bonnes, on distingue (avec grande difficulté) de vagues formations superficielles. Ces formations sont permanentes, mais la résolution optique est trop faible pour identifier leur nature ; il a fallu envoyer une sonde pour mettre en évidence une surface couverte de cratères.

Jusqu'à 1965, on croyait que sa période de rotation était égale à sa période de révolution autour du Soleil, soit 88 jours. Les mesures effectuées par technique radar (voir plus loin) ont montré l'erreur de ces idées ; la période de rotation est d'environ 58,6 jours dans le même sens que le mouvement autour du Soleil. On a compris par la suite que la valeur précédente était dûe à une mauvaise interprétation de données essentiellement ambigües.

On remarque que le rapport de la période de rotation à la période de révolution sidérale est approximativement de 3:2 ; ce phénomène n'est pas encore entièrement expliqué.

Question H : On observe Mercuré à différentes phases. Par quel type de mesure optique peut-on comparer la nature de la surface de Mercuré avec celle de la Lune ?

Vénus.

Planète relativement facile à observer - mais on ne voit pas grand-chose à sa surface !

Les observations télescopiques faites quand Vénus est en croissant ont mis en évidence la présence d'une atmosphère (comment, à votre avis ?). Dans le domaine du visible, on n'observe qu'une couche nuageuse de cette atmosphère.

L'albédo de cette couche est d'environ 0,76. Avec grande difficulté et sous des conditions exceptionnelles, on remarque des inhomogénéités d'éclairage ; ces taches sombres se manifestent plus nettement dans l'ultra-violet. On y distingue des formations permanentes qui se déplacent à travers le disque de Vénus - on trouve ainsi que les couches supérieures de l'atmosphère ont une période de rotation autour de la planète d'environ 4 jours.

Vénus a été la première planète à être étudiée par la technique des échos radar ; elle a été aussi la cible de plusieurs sondes (soviétiques en particulier, cf. plus loin).

La période de révolution de Vénus autour du Soleil est de 224,7 jours, tandis que sa période de rotation (mesurée par technique radar, cf. plus loin) est de 243 jours dans le sens opposé au mouvement autour du Soleil ("rotation rétrograde"). Remarquons que le rapport des périodes est tel qu'au moment de la conjonction inférieure, Vénus présente à la Terre toujours la même face ; la raison de cette "synchronisation" n'est pas connue.

La lumière réfléchiée par la couche nuageuse de Vénus devrait comporter les raies d'absorption des atomes et des molécules qui se trouvent au-dessus des nuages. En pratique, la seule molécule qu'on ait pu ainsi identifier avec certitude est celle du CO_2 ; l'analyse spectrale avait aussi soulevé la possibilité de la présence en traces de Ar, H_2O , O_2 , HF et HCl.

Jusqu'à présent, les propriétés de la lumière réfléchiée par les nuages n'ont pas été expliquées de façon satisfaisante. Des mesures récentes, prises en considération avec des expériences de laboratoire, suggèrent que les nuages pourraient être composés de petites gouttelettes d'acide sulfurique en suspension.

Mars.

Cette planète n'est pas facile à observer à cause de sa petite taille et de sa grande distance. Sa couleur dominante est rouge et son albédo est d'environ 0,16 ; puisque la densité de son atmosphère est faible, on peut observer la surface.

Les détails observés au télescope sur le disque de Mars étaient souvent classés de la façon suivante :

- 1) calottes polaires : taches blanches qui se forment autour des pôles en automne (martien) pour disparaître partiellement en été.
- 2) régions brillantes, qui couvrent environ 2/3 du disque ; ces "champs" sont homogènes, de couleur orange-rouge.
- 3) régions sombres, présentant l'aspect de taches ayant des formes et des dimensions diverses.

Les régions sombres, de même que les calottes polaires, interviennent dans le cycle des changements saisonniers. En "hiver", le contraste des régions sombres est faible. A partir du "printemps", le contraste des régions sombres s'étend progressivement du bord des calottes jusqu'à l'équateur. Dans certaines régions, les changements sont réguliers et reviennent d'année en année ; dans d'autres, ils sont différents chaque printemps.

Les observations faites à partir de la surface de la Terre sont extrêmement difficiles à interpréter : une idée courante jusqu'à il y a une quinzaine d'années était la présence sur Mars d'une végétation quelconque (simple ou complexe) qui "meurt" en hiver et qui "pousse" au printemps.

En effet, il fallut attendre l'avènement des sondes (cf. plus loin) pour connaître la surface de Mars : la planète a un relief très complexe, car elle est à la fois couverte de montagnes, de cratères et surtout d'une grande quantité de poussière. Les phénomènes saisonniers semblent associés avec de grandes "tempêtes de sable" qui se répètent de façon régulière et qui transportent de la matière poussiéreuse d'un endroit de la planète à un autre. L'albédo de certaines régions privilégiées change ainsi de façon périodique. Quelquefois, les "tempêtes" atteignent une intensité telle que toute la surface reste couverte de poussière pendant des périodes prolongées. Ce phénomène a été observé de près à partir des sondes (Mariner IX est arrivé dans le voisinage de Mars au moment d'une telle tempête !) ; il a été déjà observé et interprété correctement à partir des observations faites en infra-rouge proche.

Question H2: Pendant une très grande "tempête", certaines formations normalement visibles depuis la surface de la Terre sont très affaiblies ; pourtant, on peut les observer en infra-rouge proche. Expliquer pourquoi on est ainsi amené à conclure que la "tempête" a emporté dans l'atmosphère de Mars des quantités de matière poussiéreuse.

La spectroscopie dans le domaine du visible a mis en évidence dans l'atmosphère martienne la présence de CO_2 , qui semble être la molécule dominante. La spectroscopie infra-rouge (cf. plus loin) a également mis en évidence une petite quantité de vapeur d'eau. La composition des calottes polaires n'est pas connue directement; des mesures en infra rouge effectuées au dessus de la calotte polaire boréale par des sondes ont montré que cette calotte, en été, est composée de la glace d'eau. En hiver, les calottes sont probablement couvertes du CO_2 solide.

A partir du mouvement de formations permanentes sur le disque, il est facile de trouver la période de rotation de Mars et l'inclinaison de l'axe de rotation sur le plan orbital : on trouve ainsi respectivement 1,03 jours et $25,2^\circ$.

ETUDES DES PLANETES PAR ECHO RADAR

Vénus fut la première planète à être étudiée par écho radar. Les premiers échos ont été obtenus à la fin des années cinquante ; le but de ces expériences était une mesure directe de la distance Terre-Vénus afin de déterminer avec une bonne précision la valeur de l'unité astronomique (cf. pp. 27,28)

Comme dans le cas de la Lune, l'exploration d'une planète par le radar nous permet de déterminer sa vitesse de rotation, sa dimension exacte (quand celle-ci est inconnue à cause des nuages) et nous fournit quelques renseignements (quoique douteux) sur l'état de la surface.

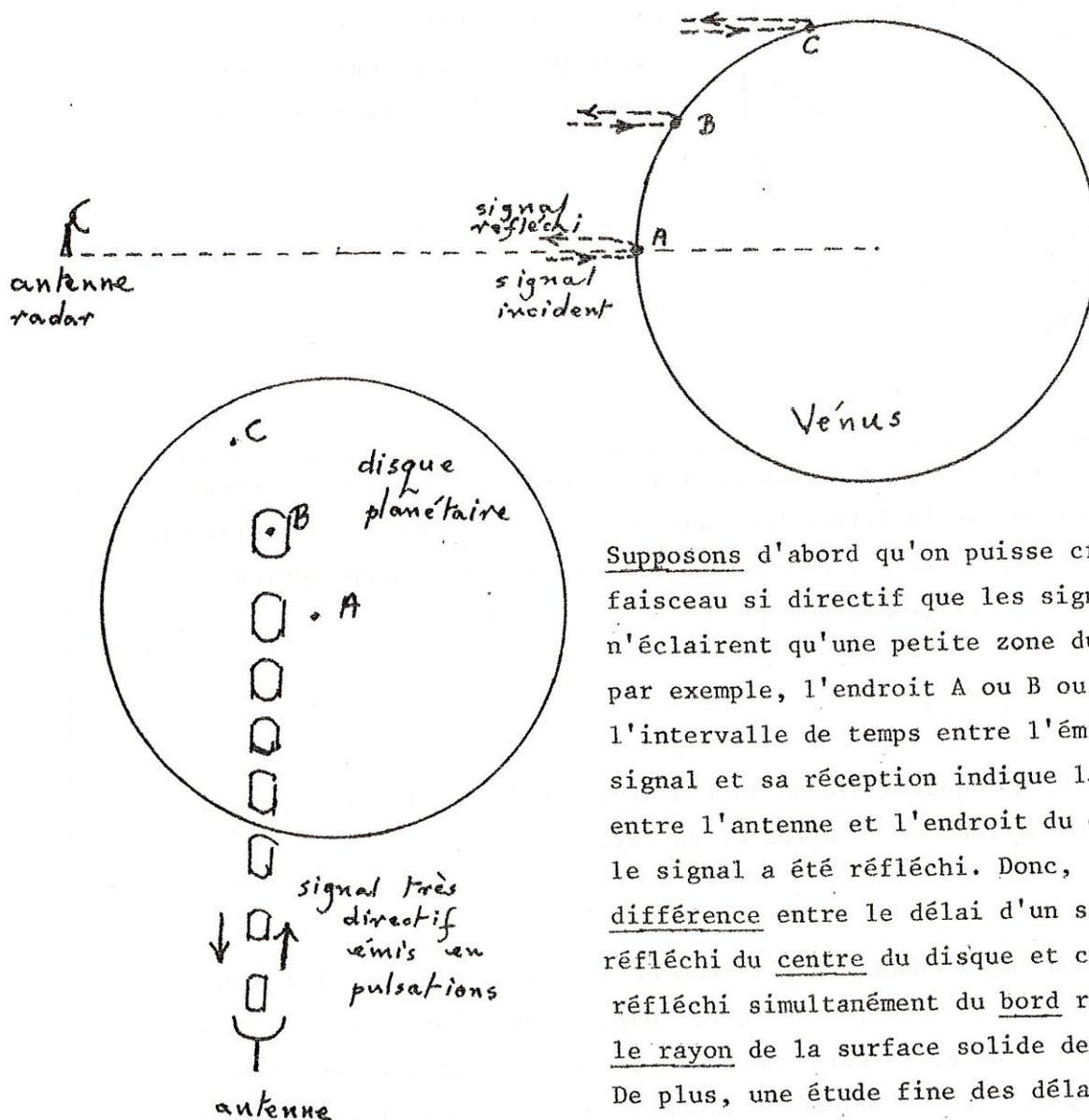
Jusqu'à présent, on a obtenu des échos de Mercure, de Vénus, de Mars et des anneaux de Saturne.

Les résultats les plus intéressants ont été trouvés pour Mercure et pour Vénus.

Etude de Vénus par écho radar.

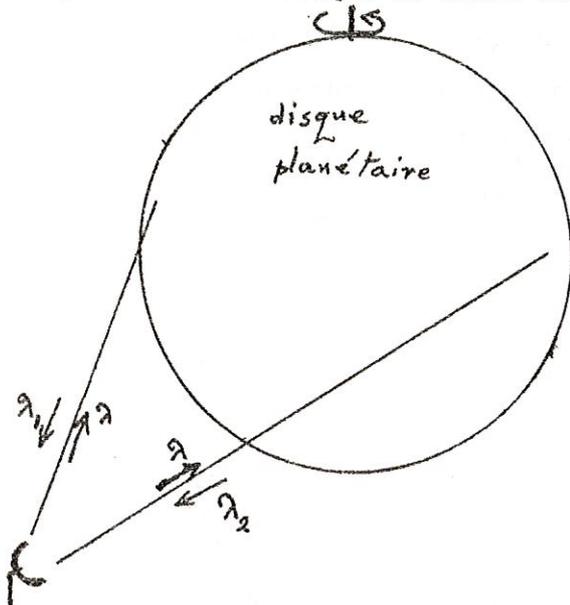
Le principe de la méthode est très simple.

Considérons un signal radio-électrique de très courte durée envoyé du sol terrestre et réfléchi vers l'antenne par Vénus. On suppose que la réflexion est faite à la surface solide de la planète.



Supposons d'abord qu'on puisse créer un faisceau si directif que les signaux n'éclairent qu'une petite zone du disque, par exemple, l'endroit A ou B ou C. Or, l'intervalle de temps entre l'émission du signal et sa réception indique la distance entre l'antenne et l'endroit du disque où le signal a été réfléchi. Donc, la différence entre le délai d'un signal réfléchi du centre du disque et celui réfléchi simultanément du bord représente le rayon de la surface solide de la planète. De plus, une étude fine des délais des signaux reçus des différents endroits du disque nous permet de trouver le relief.

Considérons maintenant un signal monochromatique (Peut-on créer un signal monochromatique de durée très limitée ?)



Par suite de l'effet Doppler-Fizeau (cf. p. 48), la fréquence de l'onde est modifiée si l'endroit où la réflexion a eu lieu possède une composante de mouvement sur la ligne de visée.

Question H3 : Considérons une planète dont l'axe de rotation est perpendiculaire à sa direction vue de la Terre. Une onde de longueur d'onde λ est réfléchie des deux bords équatoriaux ; on observe que la longueur d'onde devient respectivement λ_1 et λ_2 . Montrer que :

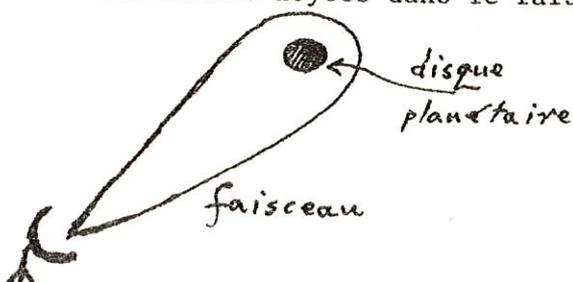
$$\lambda_1 - \lambda_2 = 2 \lambda \frac{v}{c}$$

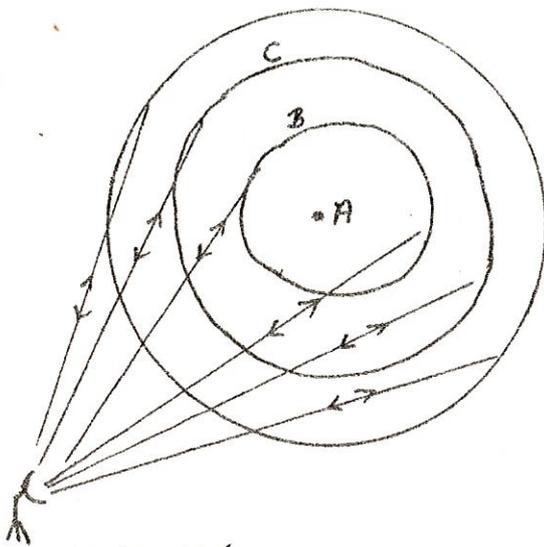
v étant la vitesse équatoriale de la planète. Exprimer cette relation en fonction de la période de rotation et du rayon.

Supposons maintenant que l'albédo de la surface (envers les ondes radio-électriques) ne soit pas uniforme. Dans ce cas, les intensités des signaux réfléchis de différents endroits sont différentes, ce qui nous permet de comparer les propriétés réfléchissantes de la surface planétaire avec celles de la Lune.

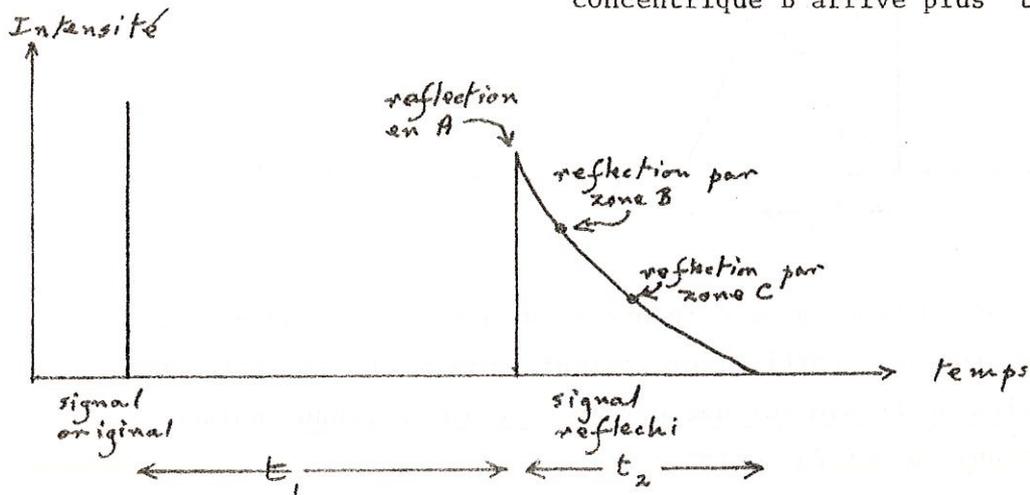
En pratique, la méthode est difficile à utiliser, parce que la résolution angulaire d'une antenne est très faible ; en effet, les planètes sont entièrement noyées dans le faisceau. Par conséquent, on ne peut pas

"diriger" le signal là où on le voudrait -- on reçoit un reflet de toute la surface.





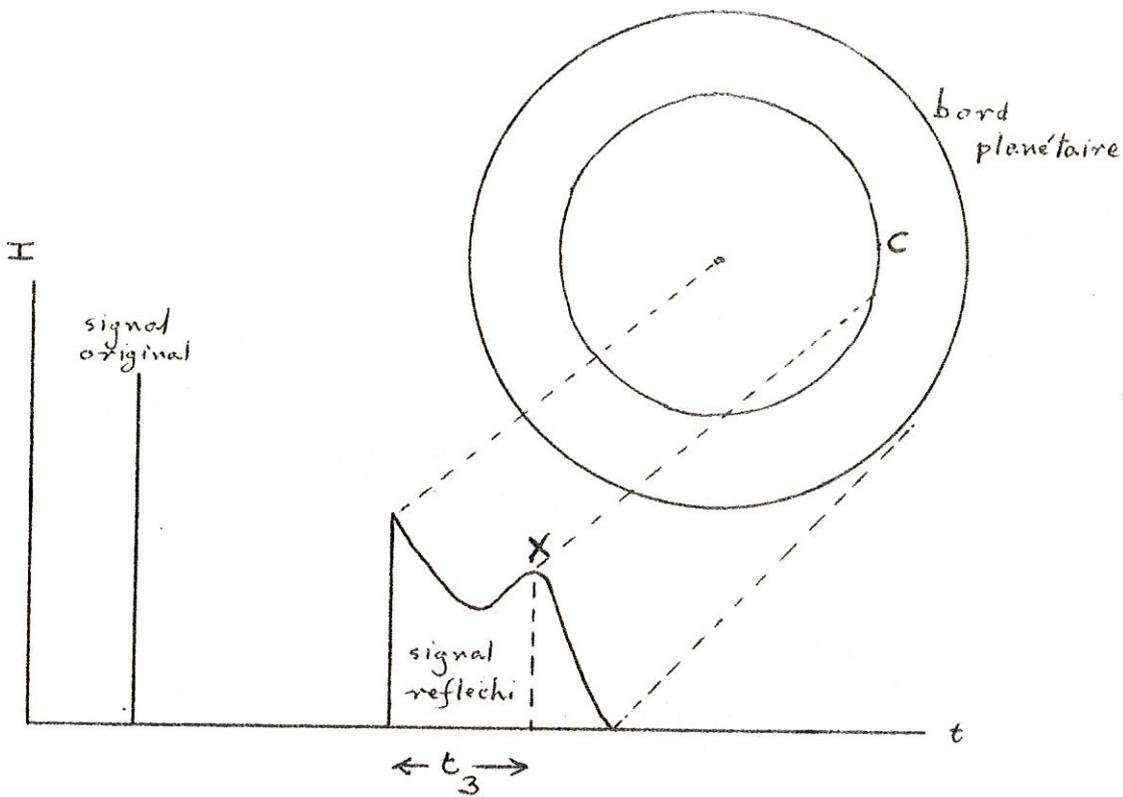
Par conséquent, le reflet d'un signal de courte durée est étalé dans le temps : la partie réfléchi au centre A arrive le plus rapidement, la partie réfléchi par la zone circulaire concentrique B arrive plus tard, etc...



Le délai t_1 donne la distance entre l'antenne et la planète, tandis que la largeur du signal (initialement très petite) donne son rayon.

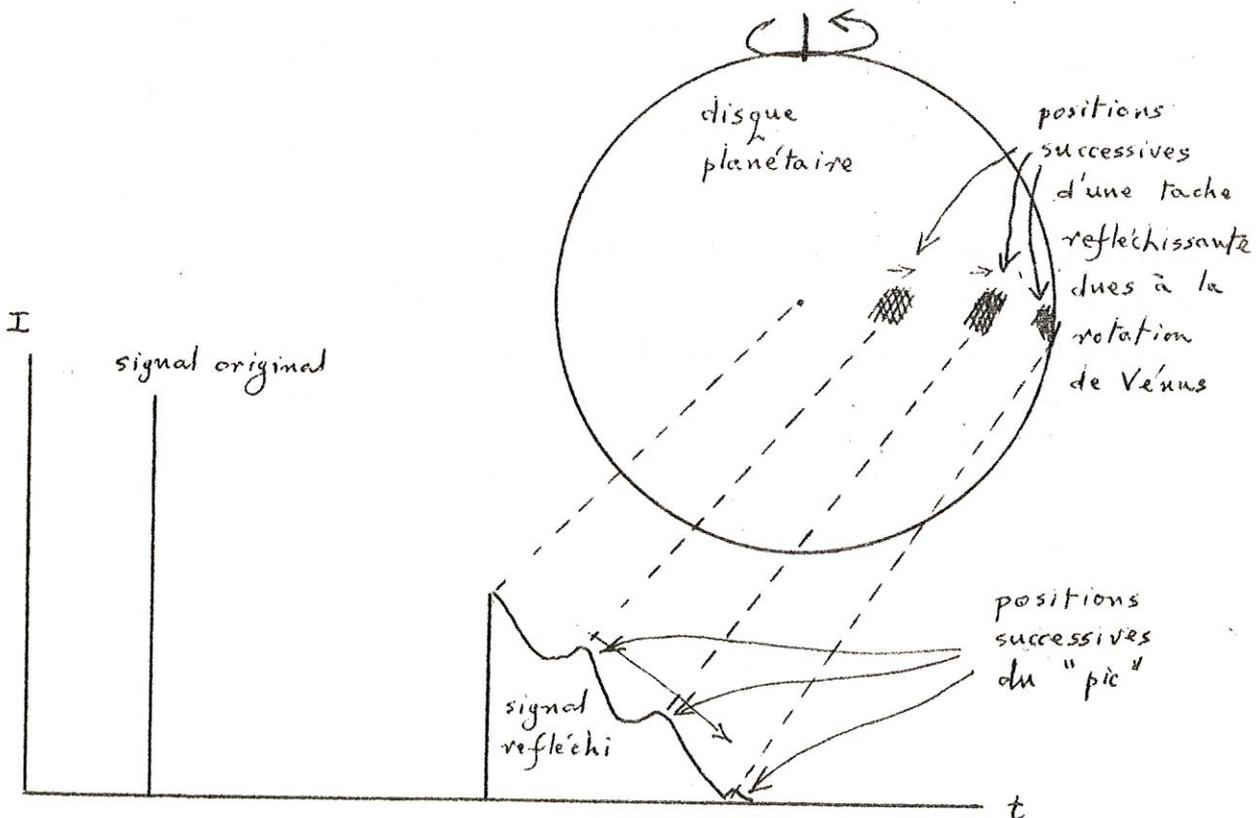
Question H4 : On remarque que l'intensité du signal réfléchi décroît vers le bord du disque. Pourquoi ?

Supposons maintenant que la surface de la planète n'est pas uniforme ; par conséquent, l'intensité du signal réfléchi décroît en fonction du temps de façon irrégulière. Considérons, par exemple, un "pic" X dans le signal réfléchi : ce pic représente une région où l'albédo radar est relativement grand.



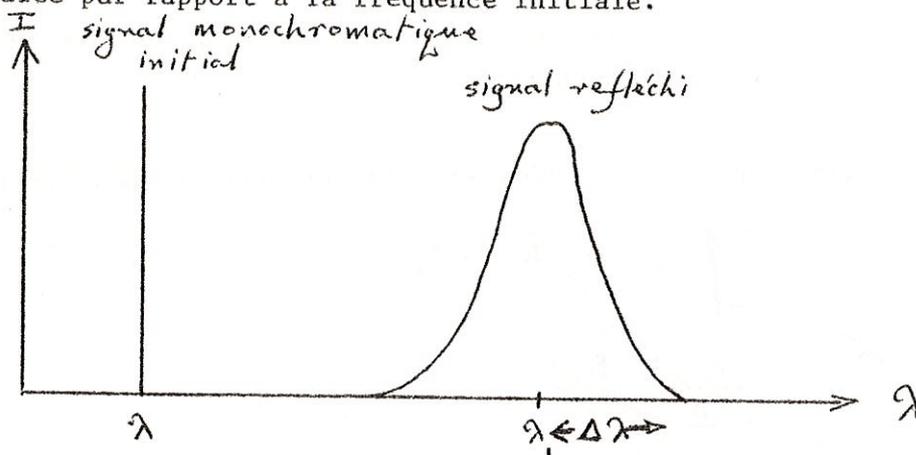
A partir de cette information, nous ne pouvons pas préciser l'endroit du disque ayant cette propriété particulière ; tout de même, on constate que l'endroit en question se trouve sur une cercle C de rayon connu (puisque le délai t_3 est connu) autour du centre.

Vénus tourne sur son axe : donc, la région réfléchissante traverse le disque et, par exemple, s'approche du bord. Ce mouvement se manifeste dans le signal réfléchi par un mouvement régulier du "pic" X, de gauche à droite par exemple. Il est bien évident que le "pic" disparaît quand la région réfléchissante passe de l'autre côté de la planète.



Donc, à condition de pouvoir identifier et suivre dans les signaux réfléchis les "pics" d'albédo, nous pouvons estimer la période de rotation de Vénus.

Considérons maintenant une onde monochromatique. On observe que le signal réfléchi est étalé en fréquence et que sa fréquence centrale est décalée par rapport à la fréquence initiale.



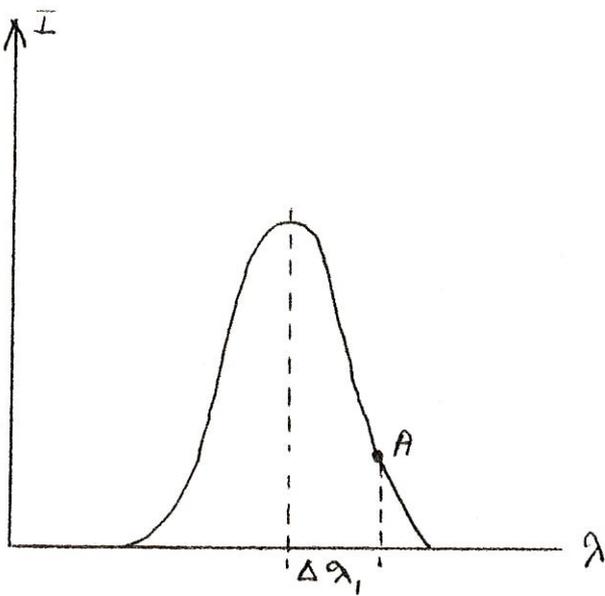
Les deux phénomènes sont dûs à l'effet Doppler-Fizeau. Le décalage de la fréquence centrale est dû au mouvement de Vénus par rapport à la Terre. L'étalement du signal en fréquence est dû à la rotation de Vénus. On reçoit simultanément (pour un signal monochromatique, il n'y a aucune résolution temporelle) des reflets de chaque endroit de la surface planétaire ; comme la planète tourne, différents endroits provoquent différents décalages Doppler et l'ensemble des ondes ainsi décalées produit un signal étalé en fréquence.

Question H.5 : Montrer que :

$$\Delta \lambda = \lambda \frac{v}{c} \sin \theta$$

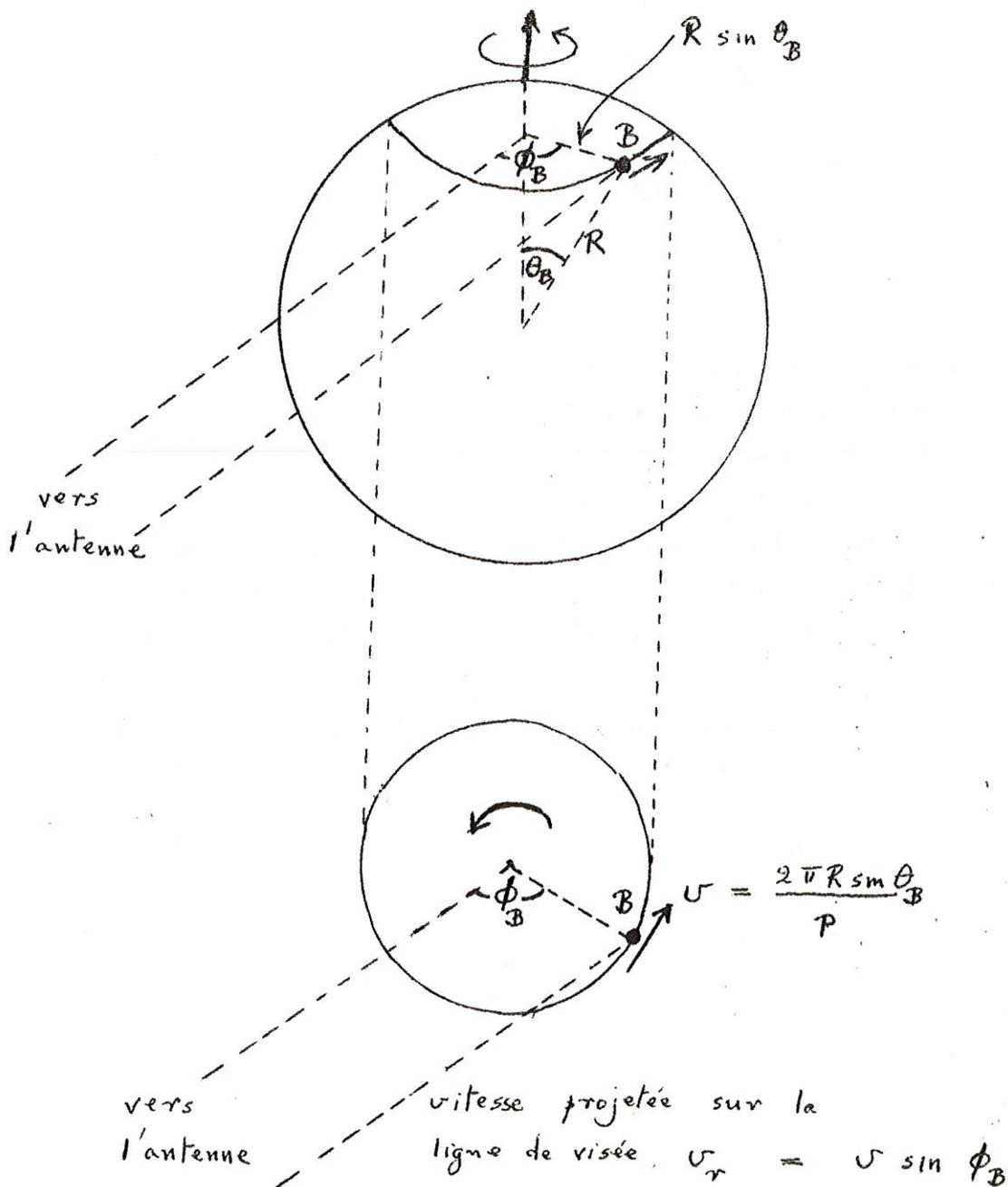
où : v = vitesse équatoriale de Vénus

θ = angle entre l'axe de rotation et la ligne de visée.



Un point particulier sur la courbe $I - \lambda$ d'un signal monochromatique réfléchi par une sphère en rotation représente une vitesse radiale particulière par rapport à la Terre. Cette vitesse radiale est-elle associée avec un endroit unique sur la surface ?

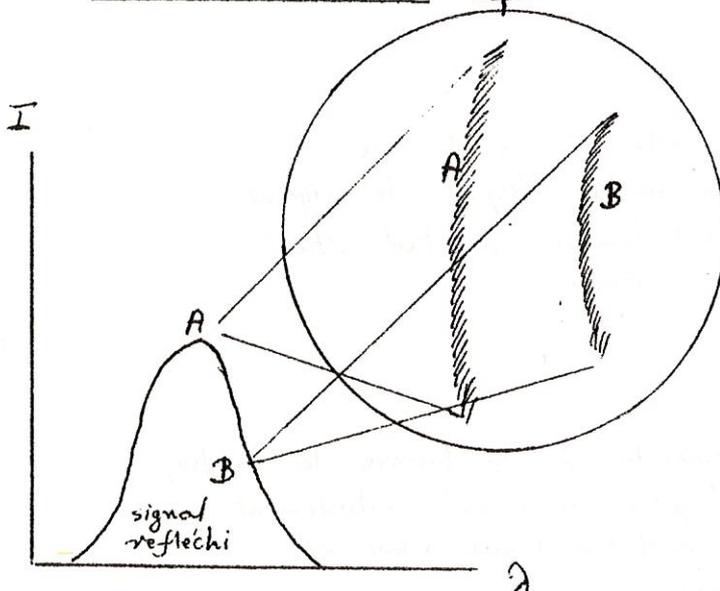
Considérons l'endroit B sur une sphère en rotation avec une période p .



Par rapport à la direction Terre-planète, la position de B sur la surface est déterminée par les deux angles θ_B et ϕ_B . Or, la vitesse de B autour de l'axe de rotation est $v = \frac{2\pi R \sin\theta_B}{p}$; par conséquent, la vitesse radiale v_r est :

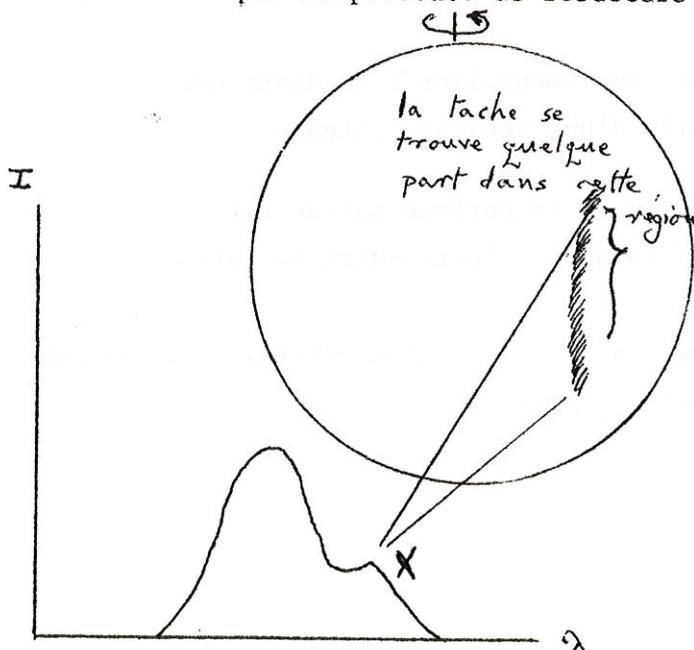
$$v_r = \frac{2\pi R}{p} \sin\theta_B \sin\phi_B$$

Supposons que le produit $\sin\theta_B \sin\phi_B = \alpha < 1$. Il est bien évident que la vitesse radiale de tout endroit i tel que $\sin\theta_i \sin\phi_i = \alpha$, sera égale à celle de l'endroit B : c'est-à-dire que, par rapport à la Terre, les signaux réfléchis de tous les endroits qui vérifient cette relation ont le même décalage Doppler.



On remarque que la relation représente des courbes orientées dans un sens parallèle à l'axe de rotation. Donc, par exemple, les ondes réfléchies de la courbe B telle que $\sin\theta_B \sin\phi_B = \alpha_B$ sont toutes superposées sur le même point B du signal entier réfléchi de la planète.

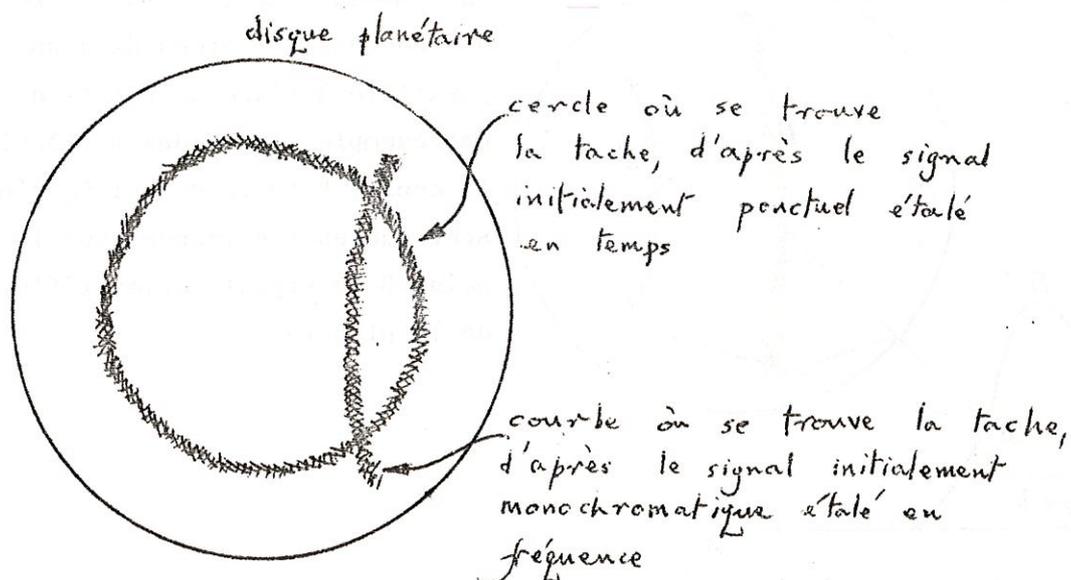
Comme précédemment, les inhomogénéités d'albédo superficiel se traduisent par la présence de structure fine dans le signal étalé en fréquence.



Considérons un pic X dans le signal. La planète tourne : par conséquent, la tache, quelle que soit sa position sur la surface, se déplace aussi et sa vitesse radiale change. Il s'ensuit que la position du pic X dans le signal réfléchi de la planète change aussi - dans le cas illustré, vers les grandes longueurs d'onde.

Supposons maintenant que nous étudions Vénus simultanément avec un radar "ponctuel" et avec un radar ^(monochromatique); on suppose que dans les signaux réfléchis (d'une part un signal étalé en temps, d'autre part, un signal étalé en fréquence), on peut identifier la même anomalie de réflexion (chose qui n'est pas facile s'il y en a beaucoup).

Comme nous l'avons expliqué, les propriétés du signal étalé en temps nous permettent de préciser que l'anomalie se trouve sur un cercle de rayon connu autour du centre du disque planétaire. Les propriétés du signal élargi par l'effet Doppler nous fournissent une autre courbe sur laquelle l'anomalie doit se trouver. L'intersection de ces deux courbes limite à deux endroits seulement la position de la tache.



Donc, les deux informations sont complémentaires ; le doute qui subsiste ne peut être levé qu'avec l'aide d'une deuxième antenne.

Résultats : On a trouvé ainsi que le rayon de la surface solide est de 6056 ± 1 km ; remarquons que le rayon "visible" (c'est-à-dire la couche nuageuse) est de 6150 ± 25 km.

L'axe de Vénus est incliné d'environ 3° sur le plan orbital ; la période de rotation est de 243 jours dans un sens rétrograde.

La "cartographie" par radar faite par les méthodes que nous venons d'exposer est difficile à interpréter. La surface montre des variations importantes d'albédo radar sur une échelle de quelques centaines de kilomètres ; le relief semble être non négligeable. Finalement, on est tenté d'interpréter certaines taches par la présence de cratères, de bassins, etc...

Mercuré.

L'exploration par échos radar nous a permis de déterminer la période de rotation de Mercure ainsi que sa direction (résultats confirmés après par une ré-interprétation des observations optiques !). On a trouvé ainsi que la direction de rotation est directe, de période 58,6 jours.

Il est facile de comprendre a posteriori pourquoi l'interprétation des observations optiques était erronée. En effet, la répétition des détails sur les dessins et les clichés (faits au sol) de la planète peuvent s'expliquer par les périodes de rotation t suivantes :

$$t = T, \quad t = \frac{4}{5} T, \quad t = \frac{2}{3} T, \quad t = \frac{4}{7} T,$$

T étant la période de révolution autour du Soleil. En effet, on prit la première de ces valeurs en rejetant les autres comme peu probables ; néanmoins, c'est la troisième valeur qui coïncide avec la période obtenue par la méthode radar.

Moralité?

Le rayon de Mercure est de 2440 km.

Mars

Déjà avant l'époque d'exploration spatiale, le radar nous avait fourni des informations sur la topographie de Mars. On a déduit ainsi que la surface martienne est loin d'être régulière : la différence d'altitude entre les endroits les plus élevés et les endroits les plus bas est typiquement de 5 à 10 kilomètres. Il ne s'agit pas ici nécessairement de "montagnes" isolées, mais de régions étendues à l'échelle de "continents" ou "bassins".

OBSERVATIONS INFRA-ROUGE ET RADIO DES PLANETES

Nous avons déjà vu l'importance des observations infra-rouge et radio pour l'étude de la structure superficielle de la Lune.

En effet, un corps noir en équilibre thermodynamique avec le rayonnement solaire est chauffé à une température de l'ordre de quelques centaines de degrés Kelvin ; la courbe de Planck correspondante trouve son maximum dans les longueurs d'onde de l'ordre de dix microns, c'est-à-dire dans le domaine de l'infra-rouge.

Or, à l'exception de quelques petites "fenêtres", l'atmosphère terrestre est opaque au rayonnement infra-rouge : par conséquent, on ne peut pas tracer la courbe de Planck d'une planète pour trouver sa température de couleur.

On est alors amené à supposer comme hypothèse de travail que le rayonnement vérifie la courbe de Planck : en ce moment, une mesure de l'intensité du rayonnement à une longueur d'onde qui nous est accessible est suffisante pour calculer la température de brillance. On suppose par la suite que cette quantité est la "température" de la région émettrice.

Les longueurs d'onde utilisées couramment se trouvent dans le voisinage de 1μ , de 10μ , dans le domaine millimétrique et aux longueurs d'onde supérieures à 1 cm (domaine radio).

Remarquons que les raies d'absorption de plusieurs molécules apparaissent dans l'infra-rouge ; donc, en principe, la spectroscopie dans ce domaine peut nous informer sur la composition chimique des atmosphères de Vénus et de Mars. En pratique, la molécule d'eau est particulièrement difficile à identifier dans les atmosphères planétaires parce que l'atmosphère terrestre en contient relativement beaucoup et les raies "telluriques" se confondent avec les raies d'eau éventuellement planétaires. La recherche d'eau sur les planètes se fait principalement à l'aide de spectroscopes infra-rouge montés en avion ou ballon stratosphérique, ou à l'aide de sondes spatiales.

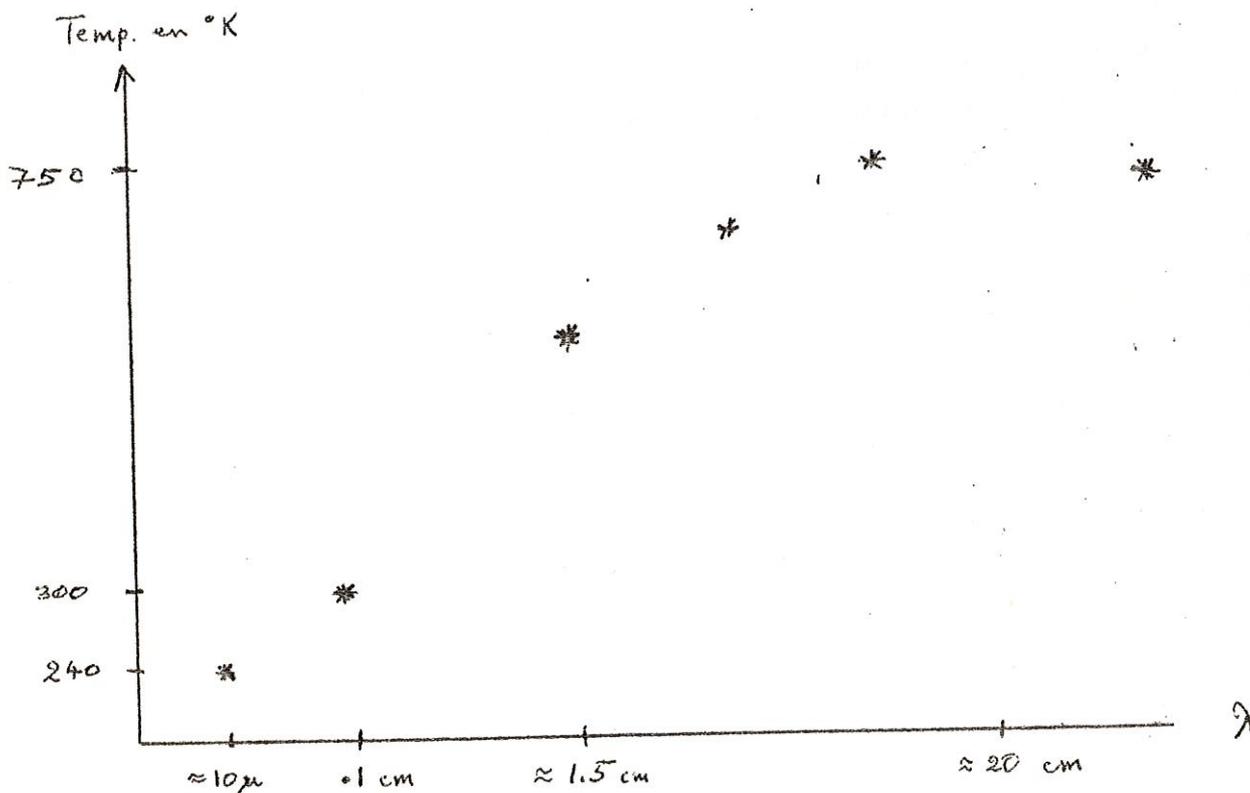
Mercury.

La température superficielle a été mesurée à l'aide d'un thermo-couple ; la valeur moyenne de la face éclairée par le Soleil est d'environ 600°K , mais varie d'environ 10 % selon la position de la planète sur son orbite (pourquoi ?). La température de la surface sombre est d'environ 110°K .

Par contre, les observations radio-astronomiques montrent que la température de brillance de Mercure pour des ondes autour de 7 cm ne varie pratiquement pas avec la phase, étant (dans les limites non négligeables de l'expérience) d'environ 350°K. Nous avons déjà rencontré un phénomène analogue dans le cas de la Lune ; on l'avait interprété en supposant que le rayonnement centimétrique était émis, non seulement par la surface (comme le rayonnement infra-rouge), mais par une couche superficielle ayant une épaisseur de l'ordre de quelques dizaines de centimètres. La faible valeur de la température à cette profondeur ainsi que sa constance s'expliquent si la matière superficielle est un bon isolant thermique - si, par exemple, la surface est fragmentée en petits granules.

Vénus.

La température de brillance de Vénus a été déterminée à plusieurs longueurs d'onde, depuis 0,8 μ jusqu'à environ 70 cm. On a ainsi mis en évidence un phénomène remarquable : la température de brillance croît en fonction de la longueur d'onde utilisée pour l'estimation.



Dans le domaine de micro-ondes, la température est d'environ 240°K ; jusqu'à un centimètre, elle est dans le domaine 300°K - 400°K ; au-delà d'un centimètre, elle croît rapidement pour atteindre un plateau d'environ 750°K à la longueur d'onde ≈ 20 cm.

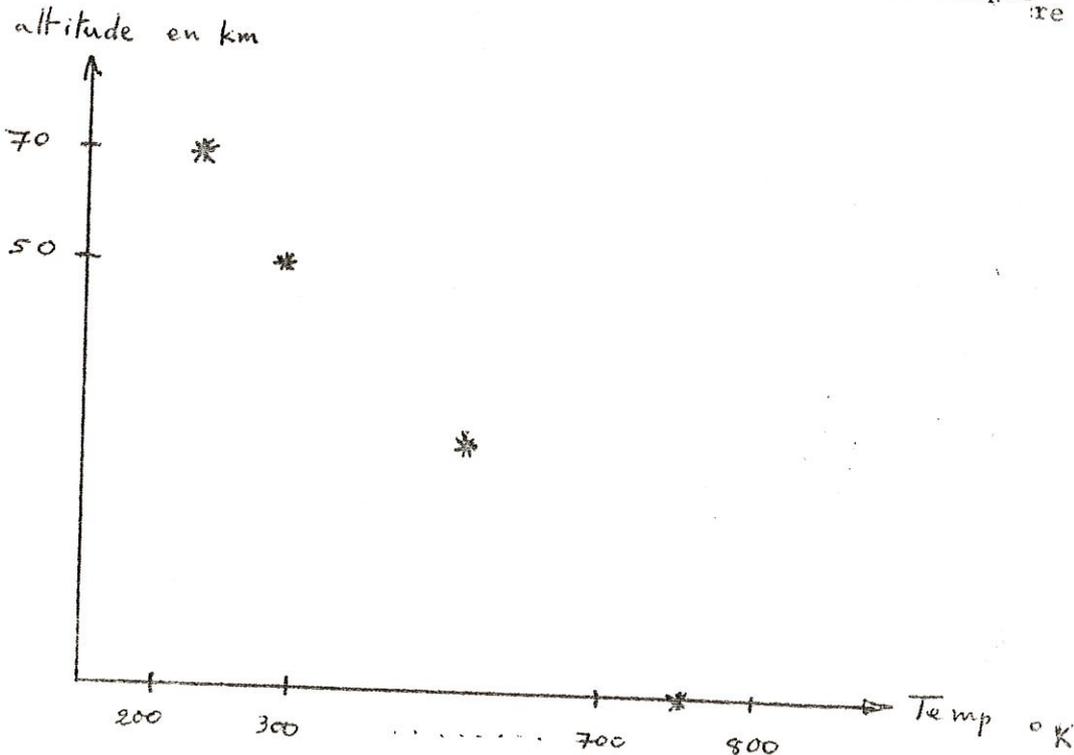
Nous avons déjà vu que Vénus est enveloppée d'une épaisse couche atmosphérique. On peut donc supposer que les petites ondes pénètrent dans cette atmosphère beaucoup moins facilement que les grandes ondes ; les mesures de la température s'interprètent alors de la façon suivante :

a) micro-ondes : les très courtes longueurs d'onde étant absorbées très facilement, la source de ce rayonnement doit être une couche relativement mince à l'extérieur de l'atmosphère (cf. la discussion sur l'opacité de la photosphère solaire). Par conséquent, l'intensité de ce rayonnement nous informe sur la température de la haute atmosphère (toujours en supposant que la loi de Planck s'applique !).

b) ondes millimétriques : meilleure pénétration ; donc les conditions thermiques témoignées par l'intensité de ce rayonnement sont celles d'une couche intermédiaire de l'atmosphère.

c) ondes centimétriques : pénètrent l'atmosphère essentiellement sans atténuation ; donc, le rayonnement de la surface solide se manifeste en ondes centimétriques.

Donc, même avant l'exploration spatiale, on a pu se rendre compte de la manière dont la température varie à l'intérieur de l'atmosphère de Vénus :



Cette distribution se trouve parfaitement vérifiée par les mesures des sondes soviétiques "VENERA".

On a pu aussi estimer la variation de température de l'équateur aux pôles ; on trouve qu'elle est faible, de l'ordre de 2 % de la valeur moyenne, aussi bien en infra-rouge (donc au "sommet" de l'atmosphère) qu'en radio (donc à la surface).

De plus, la température "nocturne" n'est pas sensiblement différente de la température "diurne".

En principe, la molécule d'eau se manifeste par des raies d'absorption dans l'infra-rouge. Dans le cas de Vénus, on n'a jamais pu obtenir de résultats précis ; si la haute atmosphère contient de la vapeur d'eau, la spectroscopie suggère que sa teneur est très faible ($\ll \approx 0,1 \%$).

Mars.

Comme l'atmosphère de Mars est très tenue, les mesures en infra-rouge nous renseignent essentiellement sur la surface solide. Quand Mars est en position favorable par rapport à la Terre, on peut alors estimer la température à différents endroits du disque - en particulier aux pôles et à l'équateur.

On observe que la température moyenne dépend de la position de Mars sur son orbite (expliquer ce phénomène), et qu'elle varie de façon importante au cours du jour martien.

position de la planète	variation de la température à l'équateur, pendant une journée	température au pôle austral
périhélie	220 - 300	220
aphélie	190 - 270	200

Ces mesures ont été considérablement raffinées par les sondes interplanétaires.

Question H6 : Les mesures de la température martienne faites avec des instruments terrestres sont relatives au jour martien. Pourquoi n'arrive-t-on pas ainsi à estimer la température pendant une nuit martienne (comme on le fait dans le cas de Mercure et de Vénus) ? Expliquer l'intérêt d'une telle mesure.

EXPLORATION SPATIALE

Mercure : sonde Mariner X.

Les résultats les plus remarquables concernent l'aspect visuel de la planète.

Du premier coup d'oeil (ou, plutôt, de la caméra télévision !), Mercure ressemble à la Lune. En général, la dimension des cratères est inférieure à 200 km ; la résolution optique nous a permis d'observer des cratères jusqu'à environ 200 mètres de diamètre. Globalement, le nombre de cratères par unité de surface est comparable à celui estimé pour la Lune ; de plus, les cratères sont superposés les uns sur les autres comme dans le cas de la Lune. On observe aussi des "sillons" (parfois tout seuls, parfois centrés sur des cratères) qui semblent traverser des régions étendues comme dans le cas des "raies" brillantes lunaires. Enfin, on a noté aussi la présence de "bassins" dont les dimensions sont comprises entre 200 et 400 km. L'un de ces "bassins" a 440 km de diamètre ; il est entouré d'un "mur" circulaire de 1300 km de diamètre. Le fond des "bassins" et de plusieurs grands cratères est relativement dégagé de cratères : ce phénomène nous rappelle les "mers" lunaires.

Pourtant, quelques différences importantes par rapport à la Lune se présentent :

1) dans le cas de la Lune, la matière qui couvre le fond des "mers" est très sombre (au moins pour la face dirigée vers la Terre) ; par contre, l'albédo du fond des bassins mercuriens n'est pas très différent de l'albédo moyen.

2) on n'a observé aucune formation témoignant d'une activité volcanique - en particulier, les cratères semblent tous être d'origine météorique.

3) La surface lunaire semble "saturée" de cratères de 20 à 50 km de diamètre ; ce n'est pas le cas pour Mercure.

Remarquons que le mouvement de la sonde était tel que toutes les photos prises concernent la même face. Or, on sait que la Lune et Mars présentent des asymétries importantes ; on ne sait pas si des phénomènes analogues se reproduisent dans le cas de Mercure.

Le mouvement de Mariner X dans le voisinage de Mercure nous a permis d'obtenir une valeur précise de sa masse et donc de sa densité :

$$\bar{\rho} = 5,44 \text{ g cm}^{-3}.$$

La sonde était équipée de magnétomètres, qui ont décelé un champ magnétique dont la valeur est de l'ordre de 1 % de celle du champ terrestre. Son origine est inconnue, vue, en particulier, la faible rotation de la planète.

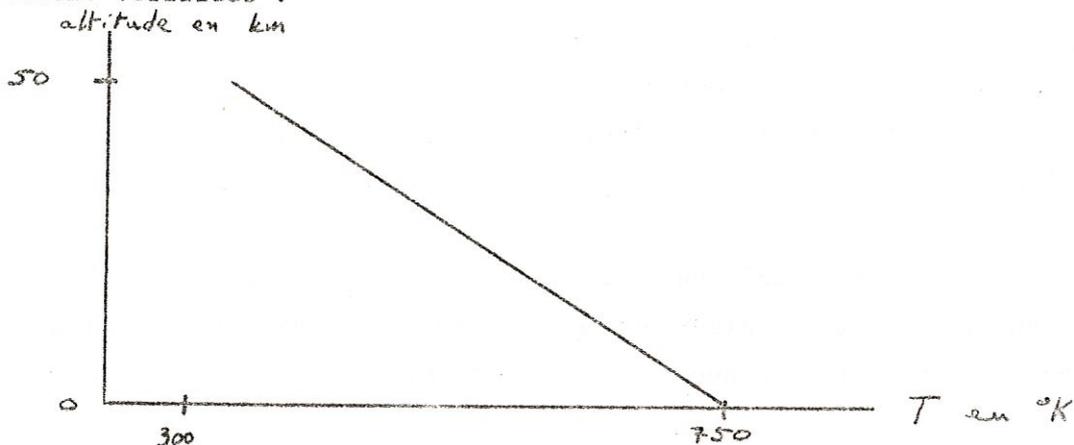
Des mesures en infra-rouge faites par la sonde ont mis en évidence de grandes variations de température : à l'équateur, celle-ci varie de 700°K à "midi" jusqu'à environ 90°K juste avant "l'aube". Cette variation de température est la plus grande connue dans le système solaire ; comme nous l'avons déjà remarqué, elle peut être interprétée en termes d'une surface granuleuse, thermiquement isolante.

Des spectromètres ultra-violet à bord de la sonde ont décelé une atmosphère très tenue - sa pression est de l'ordre de 10^{-12} fois la pression à la surface de la Terre. Les composantes principales sont He, Ar, Ne. Bien que négligeable du point de vue des phénomènes éoliens, sa présence est tout de même surprenante : la faible attraction gravitationnelle et la température superficielle élevée favorisant une évaporation rapide de He et de Ar. On a proposé que ces gaz sont fournis par le vent solaire (voir p. 81), ou bien qu'ils sont le produit de la désintégration d'une composante radioactive du sol. Si la deuxième possibilité est confirmée, un troisième corps du système solaire s'avèrera avoir une concentration de matière radio-active dans son écorce, ce qui est une information importante en ce qui concerne les spéculations sur l'origine du système solaire.

Vénus : sondes soviétiques de la série "Venera", sondes Mariner II, V, X.

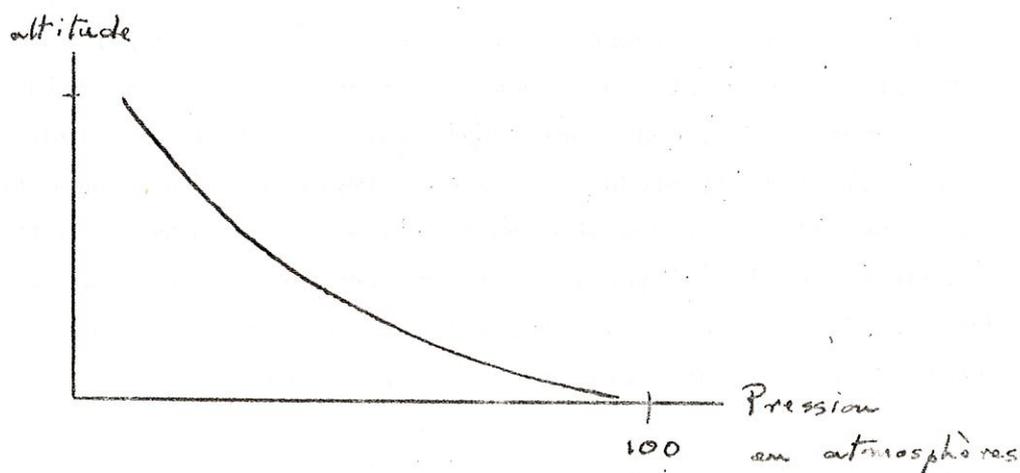
Les résultats les plus importants concernent les propriétés de l'atmosphère de Vénus ; les sondes Venera y sont entrées (quelques unes jusqu'à la surface), ce qui leur a permis de "renifler" l'atmosphère "in situ".

La variation de température déjà déduite à partir des mesures radio se trouvent vérifiées :



De plus, on remarque que la décroissance est linéaire. Puisque les sondes sont descendues au-dessus de l'hémisphère "nocturne" et de l'hémisphère "diurne", on a pu également mesurer cette variation de température : on a trouvé des valeurs très semblables, ce qui témoigne de la présence d'importants courants atmosphériques.

Les sondes nous ont permis de connaître la variation de pression avec l'altitude : on trouve que la pression superficielle vaut environ 90 fois la pression terrestre.



De plus, pendant leur descente, les sondes ont mesuré la vitesse du vent : à une altitude de 45 km, elle est d'environ 50 m s^{-1} , une valeur qui tombe à moins de 2 m s^{-1} près de la surface (n'oublions pas, pourtant, qu'un "faible" vent à la surface de Vénus représente une grande quantité de mouvement - l'atmosphère est très dense !). Remarquons que les sondes Mariner ont photographié des mouvements équatoriaux très rapides au sommet ($\approx 60 \text{ km}$ d'altitude) de l'atmosphère : ces vitesses sont de l'ordre de 100 m s^{-1} , et correspondent bien à la période de rotation de 4 jours déjà observée depuis la surface de la Terre. Le mécanisme qui "accélère" l'atmosphère de bas en haut n'est pas encore connu : on rappelle que la vitesse de rotation de la planète elle-même est très faible.

D'après les sondes, la composante majeure de l'atmosphère est le CO_2 : sa teneur relative est d'environ 97 %. La teneur en azote est inférieure à 2 %, celle en O_2 inférieure à 0,1 %. La teneur en H_2O mesurée par les sondes est en désaccord avec les mesures spectroscopiques : les sondes indiquent une teneur de l'ordre de 1 %. On n'en comprend pas la raison ; il se peut que les instruments d'analyse aient été "perturbée" par une composante atmosphérique imprévue. Remarquons pourtant que les mesures par sonde sont relatives aux régions situées en-dessous des nuages, tandis que la spectroscopie dont nous avons parlé nous informe sur la composition chimique au-dessus des nuages. On a spéculé que les nuages de Vénus contiennent des gouttelettes de H_2SO_4 : ceci expliquerait l'absence d'eau au-dessus des nuages, car l'acide sulfurique est très hygroscopique.

Les sondes n'ont pas détecté de champ magnétique appréciable.

En 1975, deux sondes soviétiques ont renvoyé deux photographies panoramiques prises du sol de la planète. Le terrain paraît fragmenté en gros cailloux ; la portée des caméras était trop faible pour que l'on puisse observer autre chose. Les photos étaient apparemment prises sans lumière artificielle : on en conclut que les nuages ne sont pas entièrement opaques à la lumière du Soleil.

Mars : Mars 2, 3, 4, 5, 7 ; Mariner IV, VI, VII, IX, Viking I et II

Comme dans le cas de Mercure, les résultats les plus frappants concernent l'aspect visuel de la planète.

On remarque tout d'abord la présence d'un grand nombre de cratères. Pourtant, le relief est très réduit par rapport à la Lune, témoignant d'un processus d'érosion.

Par opposition à la Lune, ou à Mercure, on observe sur Mars un nombre important de cratères d'origine volcanique. Ces cratères sont souvent très grands : le plus grand a environ 700 km de diamètre à la base et 1 km de hauteur ; un autre a environ 600 km de diamètre et 26 km de hauteur.

La distribution des cratères sur Mars n'est pas uniforme : l'hémisphère sud est relativement riche en cratères et ressemble aux régions lunaires "continentales", tandis que l'hémisphère nord en possède relativement peu. Il est remarquable que la plupart des cratères volcaniques les plus frappants (les moins "érodés" - les plus "jeunes" ?) se trouvent dans l'hémisphère nord. On ne comprend pas cette asymétrie.

La présence de cratères volcaniques suggère que la planète Mars est (ou a été dans un passé récent) géologiquement active.

Outre les cratères volcaniques, les sondes ont mis en évidence un autre type de formation insoupçonné : des "canyons". Ce sont des fractures, souvent très longues et larges ; parfois, on peut expliquer leur aspect visuel par l'effondrement d'un tunnel sous-terrain, mais parfois leur aspect rappelle le lit d'une rivière asséchée. A l'heure actuelle, il n'y a pas d'eau liquide à la surface de Mars (voir plus loin) : on ne comprend pas la formation de ces "canaux" dans l'absence d'un écoulement quelconque.

Les sondes ont aussi confirmé l'importance des phénomènes éoliens : on a observé une tempête qui a complètement couvert la planète pendant quelques mois et il existe des formations superficielles qui ressemblent fortement aux dunes de sable.

Viking I et Viking II, qui se sont posés sur le sol martien, confirment l'aspect "désertique" de la surface - on distingue du sable et des cailloux.

sur les sondes en orbite

Les radiomètres nous ont permis de déterminer de façon plus exacte la distribution de température en surface. On trouve ainsi (ces mesures sont relatives à l' "été" martien) :

	température moyenne	220 ± 20°K
Equateur	température maximale à 1h de l'après-midi	305
	température minimale (juste avant l'aube)	174
latitude 45°	température maximale	280
	température minimale	160

La pression superficielle vaut environ 9×10^{-3} fois celle à la surface de la Terre. La composante majoritaire est le CO_2 (environ 95 %) ; on trouve aussi du N_2 (< 2.5%), de l' H_2O (< 1 %, variable selon l'endroit et le temps) et quelques autres molécules à l'état de traces (O_2 , HCl , CO).

On a constaté aussi que la pression atmosphérique quotidienne moyenne a constamment décliné au cours de la période d'observation, d'environ 7.7 millibars jusqu'à 7.45 millibars. Cette décroissance pourrait être le résultat d'une condensation de CO_2 sur la calotte polaire d'hiver.

Il est très significatif que la température dans le voisinage de la calotte polaire d'été est dans les environs de 205 - 210 K. Comme la température de fusion de CO_2 est de l'ordre de 140 K, et comme on y observe de grandes quantités d'une matière blanche, on pense qu'il doit y avoir des

quantités importantes d'eau glacée. Cette supposition est renforcée par l'observation (faite aussi par les instruments à bord les "orbiters") que la teneur atmosphérique en vapeur d'eau augmente d'un ordre de grandeur en passant de l'équateur à 75° N. De plus, les analyses chimiques effectuées au sol ont mis en évidence des minéraux fortement hydratés facilement décomposables.

Les stations au sol ont mis en évidence que les composantes majeures sont Si, Fe, Mg, Ca, Al et S (Si:Fe:Mg:Ca+Al+S = 20:14:6:3). Une fraction de la matière superficielle est composée d'un minéral fortement magnétique.

Les sondes ont effectuées des expériences biologiques:

- 1) la recherche des composées organiques s'est soldée par un échec ($< 10^{-8}$)
- 2) des échantillons du sol ont été "incubés" dans la présence de composées organiques (apportées par les sondes) et de l'atmosphère martienne. Des quantités d'oxygène ont été dégagées - un phénomène indicatif d'une activité biologique. Pourtant, l'oxygène a été le seul gaz à être libéré (ce qui n'est pas le cas si on fait l'expérience avec des organismes terrestres); de plus, le gaz a été libéré très vite, la quantité libérée arrivant ainsi à un plafond (ce qui n'est pas très "biologique" non plus).
- 3) Des échantillons du sol ont été mis en contact avec une "bonne soupe", dont les molécules contiennent l'isotope radioactif C^{14} . On a observé une croissance du taux de la radioactivité dans l'atmosphère environnante - ce qui aurait normalement suggéré que quelque chose avait "mangé la soupe". Pourtant, comme dans le cas de (2), le taux de la radioactivité est arrivé rapidement à un plafond.
- 4) Des échantillons du sol ont été incubés dans la présence d'une atmosphère martienne enrichie de CO_2 dont les atomes de carbone sont l'isotope C^{14} . L'échantillon était éclairé avec une lampe ultra-violet. Ensuite, l'échantillon était chauffé à 700 K: s'il y avait eu de l'activité de photosynthèse, les composées

organiques ainsi formées auraient été décomposées et transformées en CO_2 radioactif. La radioactivité aurait été le témoin d'une activité biologique. Les résultats de cette expérience sont contradictoires, différents échantillons réagissant différemment.

Les sondes Mariner IX et les Vikings ont aussi photographié les satellites de Mars; de plus, le mouvement des sondes a été perturbé par les satellites, ce qui a permis une estimation de leur masse. On a trouvé ainsi que ces corps sont très peu massifs ($\approx 2 \cdot 10^{19}$ g; $\approx 3 \cdot 10^{18}$ g), très difformes et couverts de cratères; en particulier, le nombre de cratères correspond bien à une formation de ces corps contemporaine à la formation de la planète Mars elle-même. On remarque ^{que} la surface de Phobos est couverte d'un système de "rainures" parallèles; on ignore totalement son origine.

Résumé des conditions physiques des planètes telluriques.

	Mercure	Vénus	Terre	Mars
Masse en g	$.34 \times 10^{27}$	$4,87 \times 10^{27}$	$5,98 \times 10^{27}$	$.64 \times 10^{27}$
Rayon moyen en km	2434	6050	6378	3394
aplatissement polaire	0	0 ?	.0034	.0052
$\bar{\rho}$ g cm ⁻³	5,42	5,24	5,52	3,94
g cm s ⁻²	376	888	981	373
distance moyenne du Soleil en km	$57,92 \times 10^6$	$108,2 \times 10^6$	$149,6 \times 10^6$	$227,9 \times 10^6$
excentricité de l'orbite	.206	.007	.017	.093
période sidérale en jours	87,97	224,7	365,26	686,97
période de rotation	58,67 jours	- 243,08 jours	23,94 heures	24,62 heures
inclinaison de l'équateur sur le plan orbital	< 7°	177 °	23,45 °	24,5°
albedo	.06	0,76	0,39	0,15

Composition atmosphérique

Mercure	He, Ar, Ne
Vénus	CO ₂ (97 %) ; N ₂ (< 3 %) ; O ₂ (< 4 x 10 ⁻³ %) ; H ₂ O (.01 - 1 % ?) ; HCl, HF, CO, H ₂ SO ₄
Terre	CO ₂ (.03 %) ; N ₂ (78 %) ; O ₂ (21 %) ; H ₂ O (< 1 %)
Mars	CO ₂ (97 %) ; N ₂ ; O ₂ (.1 %) ; H ₂ O (< 1 %, variable) ; CO (.1 %)

	Mercure	Vénus	Terre	Mars
Température à la surface solide	Varie de 700°K à 90°K à l'équateur ; < 270°K aux pôles	Peu de variation autour de 750°K	Valeur moyenne 298°K	A l'équateur, ne dépasse pas 305°K ; aux pôles 205-140°K Valeur moyenne \approx 220°K
Topographie superficielle	"Lunaire" ; beaucoup de cratères météoriques de toutes dimensions, peu de "mers" lunaires	Grands cratères ? Grand bassins ? Terrain fragmenté ?	Croûte mobile ; continents, mers, volcans. Grande activité géologique	Cratères météoriques et volcaniques ; grandes différences de niveaux ; quantités de poussière
Pression atmosphérique à la surface, en atmosphères	10^{-12}	92	1	8×10^{-3}
Mouvements atmosphériques		Très faibles à la surface ($\approx 2 \text{ m s}^{-1}$) ; très importants à grande altitude ($\approx 100 \text{ m s}^{-1}$)	Très turbulents et compliqués à toute altitude : vents, mouvements convectifs	Variables en fonction de la saison ; importants phénomènes éoliens

