

ÉTUDE DES PLANÈTES PAR LA POLARISATION DE LEUR LUMIÈRE

SOMMAIRE. — Les instruments réalisés permettent de mesurer la proportion de lumière polarisée et la direction de la vibration avantagée sur des régions petites de la surface des disques des planètes, et dans des domaines spectraux limités. Les mesures réalisées de 1948 à 1954 sur Mercure, Vénus, Mars, Jupiter et la lumière cendrée de la Lune ont été comparées aux déterminations relevées sur des échantillons terrestres. Les natures de leurs sols, de leurs nuages, et les densités de leurs atmosphères ont pu être précisées de la sorte.

INTRODUCTION

La lumière solaire naturelle éclaire les planètes ; une partie de cette lumière est renvoyée dans l'espace ; elle a acquise des propriétés de polarisation ; celles-ci dépendent d'une part des directions d'éclairement et d'observation, d'autre part des propriétés optiques de la surface et de l'atmosphère planétaire.

L'examen des astres sous les angles de phase successifs, et en différents points de la surface du disque, détermine les propriétés polarisantes des couches renvoyant la lumière. La comparaison avec des échantillons mesurés sur terre établit sur ces corps célestes des connaissances nouvelles.

Après les recherches de Arago et de Lyot, je me suis proposé d'étendre les mesures de polarisation aux détails exigus des surfaces planétaires, ainsi qu'aux domaines étroits du spectre.

Une instrumentation particulière était nécessaire ; elle n'existait pas dans toutes ses parties et il fallut l'étudier. Les appareils furent réalisés à l'Observatoire de Meudon. Les observations des planètes ont été recueillies pour la plus grande partie avec l'installation astronomique de montagne du Pic du Midi.

DÉFINITIONS

La **lumière naturelle** est physiquement décomposable en deux flux de même intensité, constitués par des vibrations rectilignes indépendantes, orientées selon un couple quelconque de directions orthogonales. Leurs intensités seront désignées par I_1 et I_2 .

La **lumière partiellement polarisée rectiligne** résulte de l'affaiblissement inégal de ces deux flux.

La **direction de la polarisation** est l'azimuth du flux 'avantage' ; elle est repérée par rapport au **plan de vision** contenant la direction d'incidence et d'émergence (le Soleil, la planète et la Terre). Certains traités définissent le **plan de polarisation**, perpendiculaire à la direction précédente. La **proportion de lumière polarisée** est le rapport

$$P = \frac{I_2 - I_1}{I_2 + I_1}$$

La lumière partiellement polarisée peut encore être considérée comme constituée par le mélange de deux flux, l'un de lumière complètement polarisée rectiligne ($I_2 - I_1$), l'autre de lumière naturelle ($2I_1$).

La **quantité de lumière polarisée** est l'intensité ($I_2 - I_1$) du flux complètement polarisé.

Un mélange d'un flux naturel et d'un flux polarisé elliptique réalise la **lumière partiellement polarisée elliptique**.

L'addition de flux rectilignes, elliptiques et naturels, dans diverses directions, produit des lumières polarisées complexes.

Projection et signe de la lumière partiellement polarisée :

Un polarimètre orienté pour mesurer la proportion polarisée P_0 , puis tourné d'un angle α indique la proportion plus faible projetée sur cette nouvelle direction, selon l'expression $P(\alpha) = P_0 \cdot \cos 2\alpha$. A 45° la polarisation mesurée est nulle et à 90° elle est de nouveau P_0 , mais affectée du signe négatif. Deux lumières polarisées dans des directions perpendiculaires seront notées de signe contraire.

La lumière polarisée dans la direction normale au plan de vision sera associée au signe $+$; elle aura le signe $-$ dans la direction du plan de vision.

La proportion de lumière polarisée affectée de son signe suffit le plus généralement à définir les propriétés du flux observé.

Composition des lumières partiellement polarisées :

On rencontre des lumières constituées par le mélange de plusieurs faisceaux partiellement polarisés rectilignes dans des directions parallèles ; soit $B_1, B_2 \dots B_n$ leurs brillances et $P_1, P_2 \dots P_n$ leurs proportions polarisées.

La proportion polarisée résultante est :

$$P = \frac{B_1 \cdot P_1 + B_2 \cdot P_2 + \dots + B_n \cdot P_n}{B_1 + B_2 + \dots + B_n}$$

Les flux polarisés dans les directions orthogonales se retranchent comme le feraient des polarisations affectées de signes négatifs.

Polarisation de la lumière des planètes :

Le flux global reçu de l'ensemble d'un astre éclairé par le Soleil traduit la polarisation engendrée dans les couches visibles ; la vibration est presque toujours dirigée soit perpendiculairement, soit parallèlement au plan de vision contenant le Soleil, la planète et la Terre ; la proportion polarisée varie en même temps que l'**angle de vision** désigné par V , de la lumière solaire incidente et de la direction d'observation ; c'est aussi l'angle de phase, donné dans les annuaires sous la notation i .

Portant en abscisse l'angle de vision V et en ordonnée la proportion de lumière polarisée P déterminée sous différentes phases pour le flux de l'ensemble de l'astre, affectée de son signe, on obtient la **courbe de polarisation** de la planète ; elle caractérise les propriétés polarisantes de l'ensemble du globe éclairé.

L'examen de la lumière en différents points du disque permet de détailler la provenance de cette polarisation globale, selon la nature de la région, l'inclinaison de la surface, l'épaisseur de l'atmosphère, les nuages, les circonstances climatiques, météorologiques ou locales.

INSTRUMENTS ET CONDITIONS D'OBSERVATION

APPAREILS POUR LA MESURE DE LA PROPORTION DE LUMIÈRE POLARISÉE

Polarimètres utilisés

Les appareils destinés à déterminer la direction et la proportion de la lumière partiellement polarisée utilisent les récepteurs visuels, photographiques ou photoélectriques. Les trois types d'appareils peuvent convenir à l'étude des planètes avec une sensibilité suffisante, plus particulièrement pour mesurer des petites taches localisées à la surface.

J'ai utilisé surtout le polarimètre visuel de Lyot, qu'il fallut adapter et dans certains cas perfectionner. J'ai dû réaliser aussi des polarimètres photographiques nouveaux.

Description du polarimètre visuel de B. Lyot :

Un polariscope de Savart à franges serrées constitué par deux rhomboédres de spath de 1,4 mm d'épaisseur, dont les axes sont croisés, est suivi en guise d'analyseur d'un prisme biréfringent d'angle faible donnant deux systèmes de franges superposées avec coïncidence de leurs maxima et de leurs minima de lumière. Ce polariscope de Lyot est deux fois plus lumineux que le polariscope classique de Savart.

Le polariscope interposé entre l'œil et l'oculaire d'une lunette astronomique pointée sur la planète montre la surface de l'astre parcourue par des franges dans les régions qui envoient une lumière polarisée. L'écart des franges vaut 10' environ, ce qui permet de les observer sur de petites portions de la surface planétaire de quelques secondes d'arc seulement si on utilise un oculaire grossissant plusieurs centaines de fois.

Pour mesurer la proportion de lumière polarisée, l'opérateur compense cette polarisation sur la région du disque observée, en réalisant la disparition des franges grâce à une lame transparente de celluloïd mince que l'on peut incliner dans le faisceau.

Celle-ci produit une polarisation partielle réglable et calculable à l'aide des formules de Fresnel (cf. barème p. 15).

Pour assurer avec plus de précision cette compensation, Lyot s'aidait d'une polarisation auxiliaire, qu'il introduisait à l'aide d'une seconde lame inclinée d'un angle suffisant pour faire apparaître de faibles franges dans tout le champ ; son axe de rotation peut être orienté alternativement selon deux directions orthogonales, parallèle ou normale à la direction de l'axe de la première lame ; les franges produites ont même contraste et sont complémentaires ; si la première lame ne compense pas exactement la polarisation planétaire, les franges résiduelles s'ajoutent à celles de la polarisation auxiliaire

lorsque la seconde lame occupe l'une de ses deux positions, elles s'imbriquent entre les franges pour l'autre position ; l'égalité du contraste des franges est détruite. La mesure consiste à rétablir l'égalité en retouchant l'inclinaison de la première lame.

Cet artifice permet de déceler et de mesurer une proportion de lumière polarisée de un millième sur une plage lumineuse de brillance comparable à celle d'une planète observée dans le champ d'une lunette munie d'un grossissement élevé.

Emploi du polarimètre de Lyot :

Ce polarimètre visuel de Lyot, sous la forme initiale, se prêtait aux mesures de façon très satisfaisante avec la lunette de 60 cm du Pic du Midi lorsqu'elle était munie d'un grossissement de 900 et d'un filtre coloré orangé. Il fonctionnait encore avec un filtre vert, mais il fallait diminuer le grossissement sur Mars et Jupiter pour conserver une luminosité suffisante.

A travers un filtre bleu, la distance angulaire des franges s'abaissait à 6'5 et la faible brillance rendait l'appareil impropre aux mesures. Il fallait substituer au polariscope original un autre polariscope montrant des franges plus larges, réalisé avec des rhomboèdres de 0.75 mm et muni d'un analyseur dédoublant d'un demi-intervalle de franges avec la lumière bleue. Le tableau suivant donne l'écart des franges pour les deux polariscopes :

Longueur d'onde :	0,4 μ	0,5 μ	0,6 μ	0,7 μ
Polariscope A :		8'0	10'0	11'5
Polariscope B :	13'5	16'5		

Avec la lumière bleue, l'œil devient presbyte ; la fatigue entraîne une asthénopie accommodative qui empêche de bien voir les franges à l'infini ; il fallait s'aider d'une lentille supplémentaire interposée entre l'œil et le polariscope.

Pour pouvoir observer sur les surfaces très peu lumineuses, j'ai dû substituer au polarimètre de Lyot, un appareil conçu spécialement à cet effet et plus sensible dans ce domaine. Ce nouveau polarimètre convient particulièrement bien aux mesures à travers des filtres très sélectifs.

L'étude des surfaces planétaires en lumière filtrée nécessitait un monochromateur très lumineux adaptable au polarimètre de Lyot ainsi qu'au nouveau polarimètre ; je l'ai réalisé selon le principe des filtres polarisants.

Certaines observations devant être effectuées en plein jour, il fallait utiliser un compensateur de polarisation atmosphérique, construit dans ce but selon un principe nouveau.

Les mesures polarimétriques effectuées au laboratoire conduisirent à imaginer un compensateur de forte polarisation à grand champ et un polariscope dont l'écart des franges peut être réglé mécaniquement.

Les observations en plein air nécessitaient encore un petit polarimètre portatif, qu'un système optique particulier permettait d'orienter.

Voici la description de ces différents appareils nouveaux.

POLARIMÈTRE VISUEL ADAPTÉ AUX BRILLANCES FAIBLES

Principe :

Les franges du polariscope de Savart se prêtent mal à l'observation lorsque la brillance est faible ; le flux polarisé incident est modulé dans le champ selon un profil photométrique sinusoïdal qui utilise incomplètement cette quantité de lumière. Une modulation qui transmettrait et absorberait alternativement toute la lumière modulée conduirait à un contraste plus élevé.

Les bandes, équidistantes, seraient à bords nets, le développement en série de Fourier de la répartition de la lumière est dans ce cas :

$$B(x) = \frac{4}{\pi} \left[\sin x + \frac{\sin 3x}{3} + \dots + \frac{\sin (2n-1)x}{2n-1} + \dots \right]$$

Lorsque les franges ont une largeur angulaire comparable au pouvoir séparateur de l'œil, l'observateur ne distingue que la modulation produite par le premier terme ; les franges, d'apparence sinusoïdale, ont un contraste $4/\pi = 1,3$ fois celui des franges de Savart et la sensibilité est augmentée dans ce rapport.

Lorsque les franges sont larges, elles apparaissent rectangulaires et modulent deux fois plus de lumière que les franges sinusoïdales. La sensibilité s'étend aux lumières plus faibles.

Cet avantage théorique m'avait été signalé par B. LYOT qui me conseilla de chercher à l'exploiter par l'emploi de lames demi-ondes.

Polariscope à grille demi-onde :

La disposition suivante s'est révélée la meilleure. Une lame de cellophane demi-onde pour la lumière de composition spectrale utilisée est découpée en grille, les intervalles ayant la même largeur que les barreaux ; l'axe optique de la lame est à 45° de la direction des barreaux ; cette grille est orientée parallèlement à la direction polarisée de la lumière incidente. Suivie d'un analyseur transmettant la vibration polarisée incidente, la grille laisse passer la lumière dans les intervalles entre les barreaux : elle arrête la partie polarisée de la lumière à travers les bandes de cellophane demi-onde, la direction des vibrations ayant tournée de 90° ; la grille montre des barreaux sombres et des intervalles clairs ; le contraire a lieu lorsque l'analyseur est tourné de 90° . Pour ne perdre aucune lumière, l'analyseur est remplacé par un rhomboèdre de spath d'Islande dont l'épaisseur est choisie afin de dédoubler l'image, par double réfraction, de la largeur d'un barreau (ce dédoublement est, pour l'épaisseur e : $\delta = 0,109 \times e$ en lumière jaune) ;

la grande diagonale du rhomboèdre est perpendiculaire à la direction des barreaux ; les deux images sont exactement imbriquées, mais l'une d'elle se comporte comme avec un analyseur parallèle et montre les barreaux sombres ; l'autre, avec analyseur croisé, montre les intervalles sombres ; les deux images superposent donc leurs aspects et le contraste primitif est restitué avec deux fois plus de lumières.

Construction de la grille :

Un disque est découpé dans un morceau de carton bristol, puis replacé dans son logement. La feuille de cellophane, sélectionnée par la longueur d'onde et l'homogénéité de l'extinction qu'elle donne entre polarisateurs parallèles, est collée sur le bristol, aux pourtours du disque qu'elle recouvre. L'ensemble est fixé sur une planche à dessin ; l'un des côtés d'une équerre appliquée sur la cellophane à 45° de l'axe optique sert de guide à l'incision d'une lame de rasoir. Le côté orthogonal de l'équerre, de longueur l , prend appui contre la glissière d'un pied à coulisse ouvert de $l + \varepsilon$, ε étant la largeur des barreaux ; une progression alternative du pied à coulisse et de l'équerre présente à la coupe les traits successifs.

Bristol séparé de la planche, disque enlevé, la lame reste tendue dans l'ouverture qui sert de cadre ; les intervalles entre les barreaux sont coupés aux ciseaux ; la grille est appliquée entre deux disques de verre après interposition de baume du Canada dilué ; après séchage complet à la chaleur douce, la cellophane peut être découpée au ras du verre et séparée du bristol. Il reste à coller le rhomboèdre analyseur sur l'un des disques.

J'ai réalisé de grandes grilles de 4 cm de côté dont la largeur des barreaux était de 0,3 mm seulement.

Détermination du pas optimum et de la sensibilité :

Il convient de déterminer pour diverses valeurs de la brillance la largeur angulaire des barreaux qui fournit la sensibilité maximum, ainsi que la précision obtenue.

D'après la figure 1, sur les sources de brillances $B = 10^{-5}$ stilb, le pas optimum des barreaux est $30'$; vers 10^{-6} stilb il devient $60'$.

La précision croît comme la racine carrée de la brillance, propriété analogue à celle des récepteurs photographiques et photoélectriques (figure 2) ; elle croît dans un large domaine comme la racine carrée du nombre de mesures distinctes, mais les lectures cessent d'être complètement indépendantes après une vingtaine de déterminations, en raison de la fatigue et de l'éducation inconsciente de la mémoire.

Les observations deviennent pénibles pour les brillances inférieures à 10^{-6} stilb malgré une indispensable et très longue adaptation à l'obscurité.

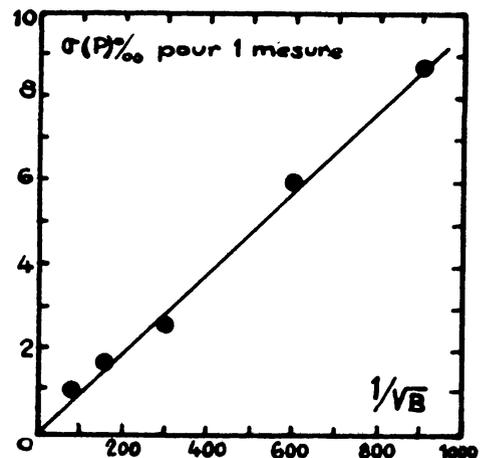
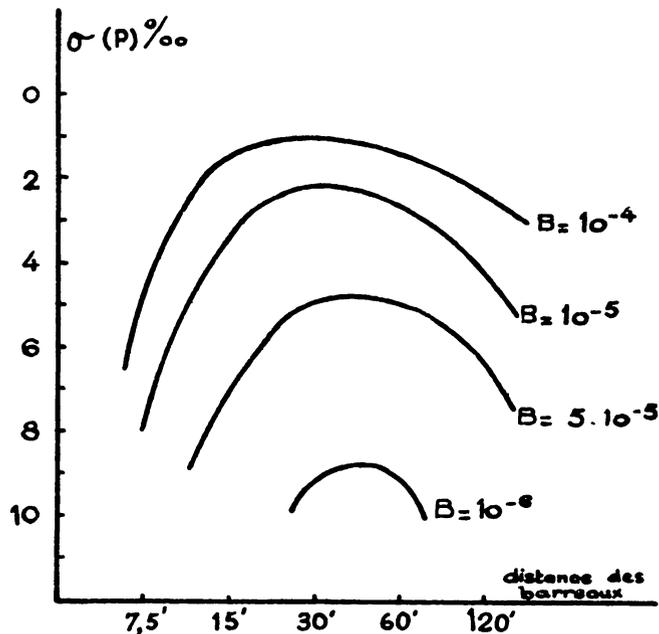


FIG. 1. — Sensibilité du polarimètre à grille demi-onde en fonction de la largeur angulaire des barreaux.

FIG. 2. — Sensibilité du polarimètre à grille demi-onde en fonction de la brillance.

Du côté des fortes brillances, supérieures à quelques dix millièmes de stilb (Saturne observé avec 3 fois le grossissement résolvant), les mesures commencent à être gênées par des liserés qui deviennent perceptibles à la limite de la séparation des barreaux (1). Leur importance s'accroît avec la brillance, le grossissement total et la petitesse du pas angulaire de la grille.

Le polariscope à grille demi-onde convient donc pour les faibles brillances seulement et il s'y montre plus sensible que les polariscopes de Savart et de Lyot. Associé aux lames de compensation et de polarisation auxiliaire du polarimètre de Lyot, il permet encore des mesures sur des plages d'étendue suffisante ayant pour brillance un millionième de stilb et une seule détermination permet d'y déceler une proportion polarisée de un pour cent. La précision devient un pour mille pour la brillance un dix millième de stilb, et son emploi cesse d'être avantageux sur les sources plus intenses.

Polariscope à grille achromatique :

La cellophane possède la propriété demi-onde pour une seule longueur d'onde λ_0 ; l'extinction cesse d'être complète pour les radiations différentes, la lumière résiduelle étant :

$$i = 1 - \sin^2 \frac{\pi}{2} \frac{\lambda_0}{\lambda}$$

(1) J'ai essayé de réduire leur importance en remplaçant le baume du Canada par des huiles d'indice plus voisin des deux indices de la cellophane ; mais ces stries semblent résulter plutôt de la discontinuité de biréfringence produite lors de l'incision des traits, par le relâchement des tensions de la cellophane ; les contours des barreaux diffractent en dehors de la plage pupillaire une lumière non recueillie par l'œil et elles apparaissent sombres.

Pour l'ensemble du spectre visible et la sensibilité spectrale de l'œil moyen, une lame demi-onde pour $0 \mu 55$ donne en lumière incidente totalement polarisée une extinction à teinte sensible laissant 2 pour cent de lumière, dans le violet et le rouge, et n'altère pas sensiblement les mesures.

Mais lorsqu'on observe avec un filtre transmettant une partie du spectre seulement, cette lame donne le contraste entre barreaux indiqué dans la colonne II du tableau suivant :

I	II	III	IV
λ	lame simple	lame double à 45°	lame double à 40°
0 μ 4	0,72	0,94	0,96
0 μ 5	0,99	0,99	0,99
0 μ 6	1,00	1,00	1,00
0 μ 7	0,89	0,99	1,00
0 μ 8	0,75	0,92	0,94
0 μ 9	0,65	0,88	0,90
1 μ 0	0,57	0,81	0,84

La sensibilité dans le bleu et le rouge est abaissée.

J'ai fabriqué des grilles réalisant l'extinction presque parfaite dans un intervalle de longueurs d'onde beaucoup plus grand. Elles sont constituées par deux cellophanes superposées (voir C. Gaudfroy, 1943) ; leurs axes optiques sont à 45° ; la direction des barreaux fait $22^\circ 5'$ avec l'axe de la première lame. La lumière incidente est tournée de 45° par la première lame ; elle pivote encore de 45° à travers la seconde lame ; la lumière résiduelle est entre polarisateurs croisés :

$$i = 1 - \sin^2 \frac{\pi}{2} \frac{\lambda}{\lambda} - \frac{1}{4} \sin^2 \pi \frac{\lambda}{\lambda}$$

Le contraste des barreaux se lit dans la colonne III du tableau.

Une combinaison encore meilleure s'obtient en réduisant légèrement l'angle des axes des deux lames, qui devient $45^\circ - \Delta$, avec approximativement pour Δ petit :

$$i = 1 - \sin^2 \frac{\pi}{2} \frac{\lambda}{\lambda} - \left(\frac{1}{4} + \frac{\pi}{180} \frac{\Delta}{2} \right) \sin^2 \pi \frac{\lambda}{\lambda}$$

Avec $\Delta = 5^\circ$ le contraste est celui de la colonne IV.

On fabrique de telles lames en découpant le bord d'une cellophane parallèlement à l'axe et en pliant la feuille afin que le bord fasse un angle de 40° .

Les polariscopos à grilles doubles permettent de réaliser des mesures sans perte de sensibilité dans des domaines spectraux très différents.

Montage optique :

Un polariscope à grille, placé dans le plan de l'image préalablement agrandie, est recouvert d'une lentille de champ qui projette l'image de l'objectif sur l'œil de l'observateur ; une loupe ou une petite lunette positive ou négative permet d'examiner la grille avec le grandissement convenable.

Lorsque l'observateur désire conserver un grand champ et mesurer seulement au centre de celui-ci, il peut strier seulement le milieu de la feuille de cellophane ; le rhomboèdre de spath est remplacé par un prisme biréfringent placé sur la pupille, avec dédoublement angulaire égal à celui de la largeur des barreaux, l'axe cristallographique étant parallèle à l'arête.

L'ensemble est précédé par les lames de compensation et de polarisation auxiliaire d'un polarimètre de Lyot, dont il remplace le polariscope.

J'ai réalisé sur ce principe plusieurs appareils (cf. page 62). La figure 3 décrit l'ins-

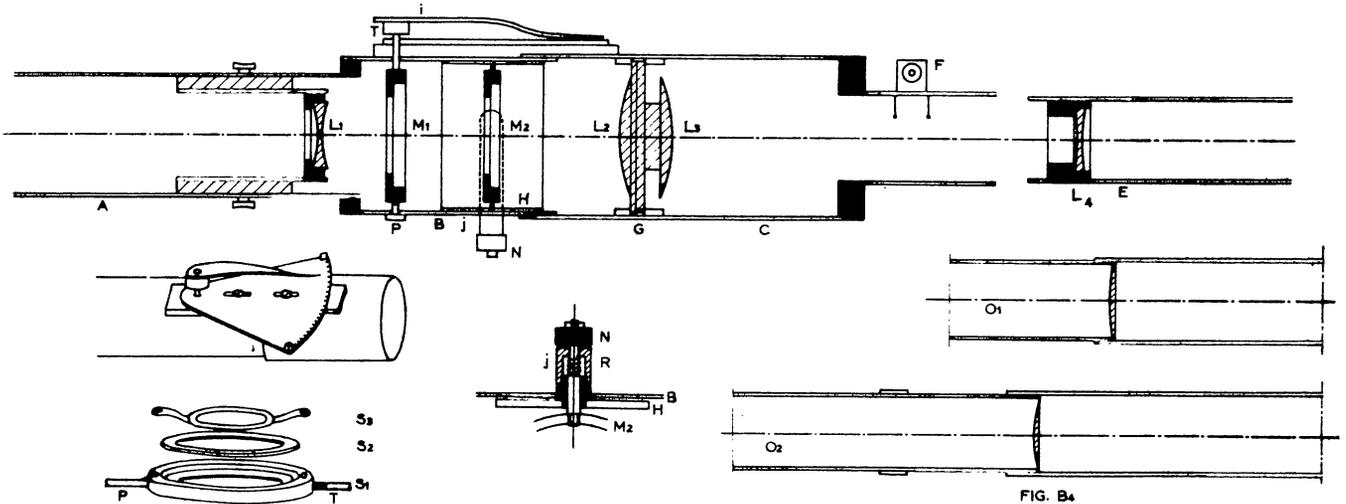


FIG. 3. — Polarimètre à grille demi-onde.

Grille G en cellophane demi-onde striée sur un carré de 20 mm de côté par 25 barreaux de 0,4 mm de large, recouverte par un rhomboèdre de spath de 4 mm d'épaisseur.

Lentilles de champ L_2 et L_3 plan convexe, collées de chaque côté de la grille G, avec foyer résultant 7 cm.

Lentille divergente L_1 , dont le foyer dépend de la lunette employée, portée par une bonnette coulissant dans le tube de laiton A. Elle projette l'image de la planète sur la grille G, avec un grandissement réglable par déplacement de la lentille à l'aide de deux ergots sortant du tube A par deux fentes.

Lentille divergente L_4 de -12 cm de foyer, portée par le tube E coulissant dans D, et par la vis F.

Deux oculaires O_1 et O_2 de 10 et 20 cm de foyer constituant avec L_4 une lunette de Galilée inversée montrant une petite image à l'infini de la grille, la distance angulaire des barreaux étant au choix $14'$ ou $25'$.

Lame compensatrice M_1 actionnée par l'aiguille I se déplaçant sur le cadran fixé au patin porté par le tube B, par l'intermédiaire de vis dans les trous allongés, ménageant une translation pour régler la perpendicularité de la lame et de l'axe optique, par pivotage autour de l'axe pointeau P.

Lame de polarisation auxiliaire M_2 solidaire du manchon H, inclinable grâce à la molette N freinée par la pression du ressort R, orientable dans deux positions rectangulaires par rotation du manchon H à l'aide de l'ergot J sortant du tube B par une ouverture allongée (en pointillé).

Membranes de celluloid des lames M_1 et M_2 fixées sur des anneaux S_2 introduits dans les boîtiers S_1 et maintenues planes et tendues par la compression de rondelles toriques S_3 fixées sur S_1 par deux vis et deux pattes élastiques.

trument utilisé pour l'étude de la polarisation de la lumière sur les différentes régions de la surface des disques planétaires à travers des filtres très sélectifs.

Le pas angulaire apparent des barreaux est réglable par le choix de l'oculaire ; le grandissement de l'image sur la grille est ajustable par translation de la première lentille.

La mise au point de la pupille sur l'ocillon de l'oculaire est assurée par le coulissement du tube E dans D.

Cet instrument convient particulièrement bien aux observations avec le filtre polarisant décrit page 16.

Mesure aux très faibles brillances :

Pour réussir les mesures sur les images de brillance inférieure à 10^{-5} stilb, il convient d'introduire une polarisation auxiliaire forte. On peut incliner beaucoup la lame M_2 , mais cette opération limite le champ de polarisation uniforme, et peut produire une erreur systématique. En effet, le lieu des points du champ pour lesquels la polarisation est identique pour les deux positions de la lame est une droite passant par le centre du champ, parallèle à la diagonale de ces deux directions dans le quadrant balayé par l'axe. L'erreur systématique commise est d'autant plus forte que la région mesurée sur l'astre est plus éloignée de cette diagonale, et que la lame de polarisation auxiliaire est plus inclinée (cf. p. 23). Pour éviter cet inconvénient, la polarisation auxiliaire peut être réalisée, comme dans le montage décrit p. 24, avec deux lames inclinées symétriquement d'un angle égal.

Dans le polarimètre à grille le manchon H portant la lame M_2 doit être remplacé par un autre tube H' décrit figure 4.

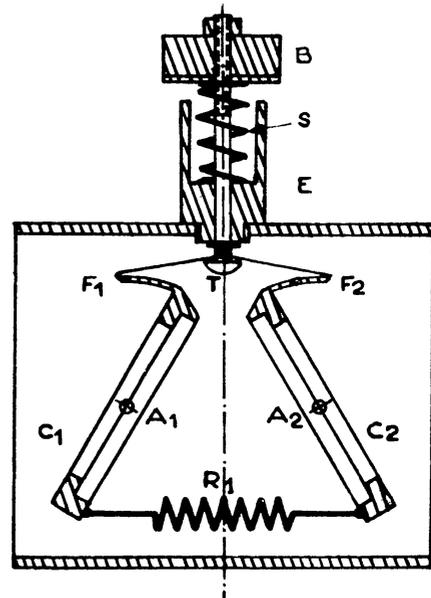


FIG. 4. — Lames pour forte polarisation auxiliaire.

Deux porte-lames C_1 et C_2 pivotent autour des axes parallèles A_1 et A_2 . Le bouton B actionne la tige T traversant l'ergot E, et bobine deux fils dont les extrémités sont fixées en F_1 et F_2 en bout des deux secteurs soudés aux boîtiers C_1 et C_2 . Un ressort R tend ces fils, un autre ressort S freine la tige T.

Mesure dans des portions étroites du spectre :

Lorsque les mesures sont effectuées dans des domaines spectraux très étroits, les lames de compensation et de polarisation auxiliaires doivent être l'objet de précautions particulières :

1°) Observées en lumière monochromatique, les membranes de celluloid montrent des courbes sombres de formes complexes, qui sont les lignes d'égale épaisseur produites par les interférences des lumières réfléchies par les deux faces. Le long de ces lignes le

pouvoir réflecteur est modifié, ainsi que la polarisation produite par l'inclinaison de la lame. Pour éviter cet inconvénient, on peut réaliser des membranes plus épaisses, en étendant sur une plaque de verre horizontale une solution visqueuse de celluloïd dans l'acétone ; j'ai également utilisé des lames couvre-objet pour préparations microscopiques ;

2°) L'indice de réfraction des lames varie avec la longueur d'onde, ainsi que la polarisation créée. Il faut donc effectuer l'étalonnage pour les différentes couleurs.

J'ai utilisé pour cela le montage classique suivant : une lampe électrique à globe opale constitue une source lumineuse brillante, uniforme, étendue ; un nicol polarise la lumière de cette source. Une lame de quartz, plan parallèle, épaisse d'au moins 8 mm est interposée à la suite du polarisateur. Son axe cristallographique parallèle, aux faces fait avec la direction de la polarisation un angle α . A la sortie de la lame, la lumière se comporte comme partiellement polarisée, avec vibration normale ou parallèle à la direction de l'axe de la lame ; pour la lumière de l'ensemble d'un intervalle spectral étendu sur plusieurs bandes du spectre cannelé que donnerait la lame de quartz entre polariseurs, toutes les différences de phase sont également représentées et la proportion de lumière polarisée observée, est $P = \cos 2\alpha$; elle reste indépendante de l'intervalle spectral choisi.

La mesure de cette polarisation à travers différents filtres détermine le coefficient par lequel il faut multiplier les valeurs du barème d'étalonnage en lumière jaune de la lame :

ÉTALONNAGE SPECTRAL POUR LES LAMES CELLULOÏD ET DE VERRE

longueur d'onde	coefficient
4000 Å	1,09
4500	1,07
5000	1,03
5500	1,00
6000	0,98
6500	0,95
7000	0,92

Pour les lames de celluloïd, la proportion de lumière polarisée est donnée à la page suivante en lumière jaune, en fonction de l'inclinaison, d'après les mesures de Lyot et conformément à de nouvelles déterminations.

LAME DE CELLULOÏD MINCE D'INDICE 1,511

I	$P_0/100$	I	$P_0/100$	I	$P_0/100$	I	$P_0/100$
0°	0,00	18°	11,6	36°	52,0	54°	139,9
1°	0,04	19°	13,0	37°	54,4	55°	146,7
2°	0,13	20°	14,4	38°	58,9	56°	153,7
3°	0,31	21°	16,0	39°	61,6	57°	161,0
4°	0,55	22°	17,7	40°	66,5	58°	168,5
5°	0,87	23°	19,4	41°	70,5	59°	176,2
6°	1,24	24°	21,3	42°	74,7	60°	183,1
7°	1,68	25°	23,2	43°	79,0	61°	192,3
8°	2,21	26°	25,2	44°	83,5	62°	200,7
9°	2,78	27°	27,4	45°	88,3	63°	209,2
10°	3,41	28°	29,6	46°	93,2	64°	218,0
11°	4,17	29°	32,0	47°	98,3	65°	226,9
12°	4,93	30°	34,5	48°	103,6	66°	236,1
13°	5,92	31°	37,1	49°	109,1	67°	245,3
14°	6,92	32°	39,8	50°	114,8	68°	254,6
15°	7,97	33°	42,6	51°	120,7	69°	264,0
16°	9,12	34°	45,6	52°	126,8	70°	273,6
17°	10,32	35°	48,7	53°	133,2	71°	283,1
18°	11,63	36°	52,0	54°	139,9	72°	292,4

FILTRE POLARISANT ISOLANT LA LUMIÈRE D'UNE PARTIE DU SPECTRE

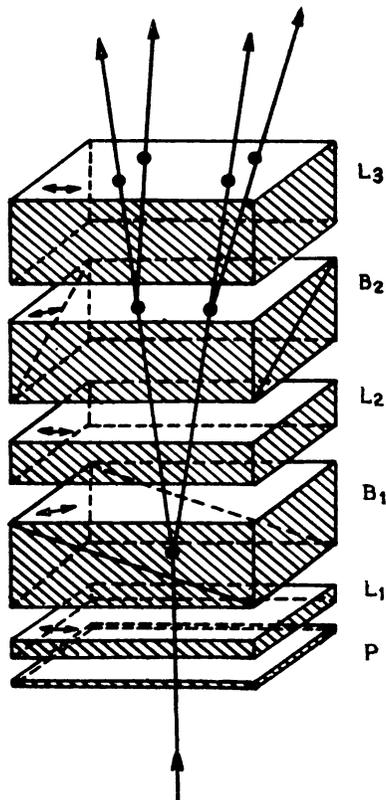
Pour mesurer la polarisation sur les détails planétaires avec la lumière d'une partie seulement du spectre, il faut isoler cette lumière avec un filtre sélectif.

Lorsque la largeur de la bande spectrale à transmettre dépassait 400 \AA , j'ai employé des filtres colorés convenablement associés.

Pour des intervalles spectraux plus étroits, il faut renoncer aux substances colorées. Comme les filtres interférentiels et spectroscopiques sont peu lumineux, j'ai étudié un filtre polarisant.

Filtre polarisant pour l'étude des planètes :

Ce filtre est réalisé avec trois lames carrées de quartz de 12 mm de côté ; l'axe optique est parallèle à l'un des côtés. La première lame L_1 (fig. 5) 0,380 mm d'épaisseur ; la seconde L_2 , 0,760 mm et la troisième L_3 , 1,520 mm. Elles sont superposées, leurs axes



optiques étant parallèles. Une feuille de polaroïd P est collée avec du baume de Canada en avant de la première lame, entre celle-ci et une lame de verre destinée à la protéger ; elle transmet la vibration à 45° des lames. Un prisme de Wollaston B_1 est interposé entre la première et la deuxième lame, l'arête parallèle aux axes optiques des lames ; il est constitué par deux prismes de spath d'environ 12° d'angle dont les axes, parallèles aux faces d'entrée et à 45° des arêtes, sont croisés.

Ce prisme donne deux faisceaux déviés symétriquement de 2° chacun ; l'un isole les radiations du spectre cannelé de la lame mince entre polariseurs parallèles ; l'autre, avec polariseurs croisés, contient les radiations complémentaires.

Entre la deuxième et la troisième lame de quartz, un autre Wollaston B_2 est interposé, semblable au premier, mais tourné de 90° afin que son arête soit perpendiculaire à l'axe des quartz : il produit un dédoublement orthogonal à celui du premier prisme, et la lumière émerge en quatre faisceaux distincts.

FIG. 5. — Schéma du filtre polarisant.

Le bloc des pièces assemblé avec du baume de Canada a la forme d'un cube de 12 mm de côté ; il est placé entre l'oculaire polariscopique et l'œil de l'observateur. Celui-ci voit quatre images de la planète ; elles occupent les sommets d'un carré de 4° de côté ; elles sont donc séparées sans empiéter les uns sur les autres avec le grossissement 600 lorsque le diamètre de la planète est inférieur à $27''$.

Pour deux de ces images, diamétralement opposées, la deuxième lame se trouve entre polariseurs parallèles ; l'une de ces images est constituée par les trois bandes spectrales visibles suivantes, transmises par le filtre ayant les deux premières lames entre polariseurs parallèles :

$$\begin{array}{r} \lambda = 5770 \text{ \AA} \quad \text{demi-largeur} = 225 \text{ \AA} \\ 4940 \qquad \qquad \qquad 175 \\ 4320 \qquad \qquad \qquad 125 \end{array}$$

L'autre est composée par trois bandes visibles intercalées entre les précédentes, la première lame du filtre étant entre polariseurs croisés :

$$\begin{array}{r} \lambda = 6290 \text{ \AA} \quad \text{demi-largeur} = 270 \text{ \AA} \\ 5320 \qquad \qquad \qquad 190 \\ 4610 \qquad \qquad \qquad 145 \end{array}$$

Les faisceaux de l'autre diagonale traversent le filtre avec des polariseurs en discordance ; leurs compositions spectrales sont complexes, ils ne sont pas utilisés.

Les 6 bandes spectrales précédentes peuvent être isolées séparément à l'aide d'un jeu de filtres colorés. Pour certains travaux la largeur spectrale des bandes transmises peut être réduite de moitié en ajoutant après la dernière lame de quartz de 1,520 mm un analyseur transmettant l'une ou l'autre des vibrations à 45° de l'axe des lames, selon l'image observée, afin de placer cette lame entre polariseurs parallèles.

Ainsi je peux examiner les planètes avec 6 radiations distinctes de leur spectre visible et deux valeurs de l'intervalle spectral isolé.

Filtre polarisant avec polarisateur total :

La transmission des polaroïds les plus transparents est au maximum 0,76 lorsque la lumière incidente est polarisée totalement. Un filtre réalisé avec 4 polaroïds aurait pour transmission $(0,76)^4 = 0,33$ seulement ; la polarisation de la lumière à l'entrée du filtre réduit encore le flux de moitié et il resterait finalement 16 % de la lumière pour les radiations permises.

Le filtre construit avec les deux prismes biréfringents transmet 35 % environ. Même avec cette combinaison les planètes paraissent souvent très sombres à travers les étroites bandes spectrales choisies ; c'est pourquoi j'ai complété le filtre afin de lui laisser 80 % de la lumière des radiations permises.

Il suffit pour cela d'utiliser les deux composantes polarisées à l'entrée du filtre.

Le premier polaroïd est remplacé par un rhomboèdre de spath d'environ 15 mm d'épaisseur. La pupille de la lunette se forme dans le plan de la face de sortie de ce rhomboèdre. Le rhomboèdre dédouble les images ; on observe deux pupilles côte à côte, formées de deux faisceaux lumineux parallèles et totalement polarisés à angle droit ; la distance de leur centre est environ 1,5 mm ; avec les grossissements usuels elles sont séparées. Contre la face de sortie du rhomboèdre, deux lames demi-ondes sont collées juxtaposées ; elles recouvrent chacune l'une des pupilles ; la première a son axe à 22°5 de la direction de la vibration lumineuse qui la traverse. La seconde a son axe à 22°5 de la vibration correspondante, dans le même quadrant.

Ces lames font tourner les vibrations lumineuses de 45° , chacune dans un sens, et elles sortent polarisées totalement et parallèlement. Le filtre est traversé par les deux faisceaux à la fois ; l'œil recueille toute la lumière.

Cet ensemble, très lumineux, peut être placé derrière les polariscope de Lyot ou à grilles demi-onde ; il suffit de l'orienter de façon que les directions de vibration correspondant à chaque pupille soient à 45° des directions des vibrations sortant des analyseurs des polariscope. S'il n'en était pas ainsi, chaque pupille formerait l'image d'un seul des deux systèmes de franges imbriquées complémentaires ; les deux faisceaux, pénétrant dans l'œil à travers deux régions différentes du cristallin, seraient inégalement déplacés par les changements d'accommodation de l'œil et la visibilité des franges dépendrait de cette accommodation.

La figure 6 décrit le montage du filtre sur le polarimètre de Lyot ; l'adaptation au polarimètre à grille est semblable.

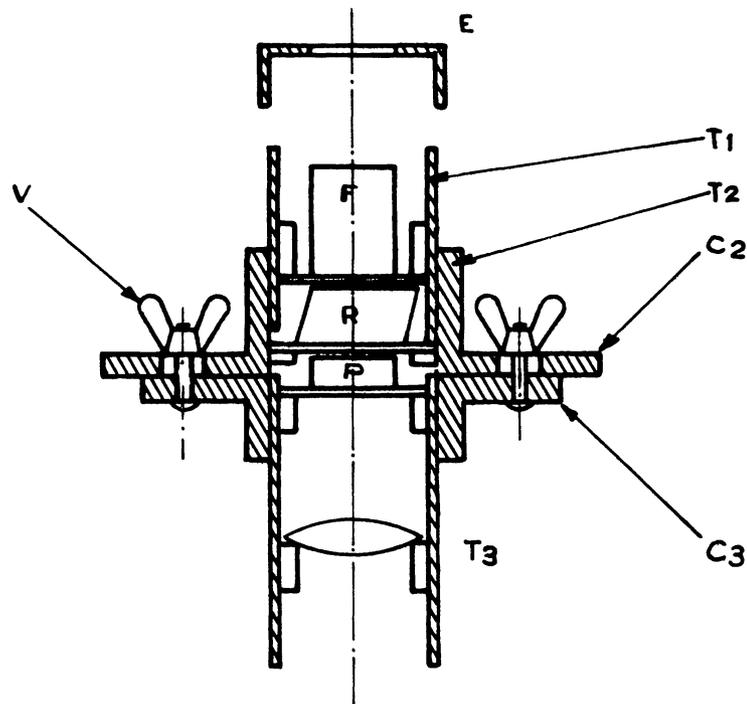


FIG. 6. — Montage du filtre à polariseur total sur le polarimètre de Lyot.

Le filtre F est collé au baume sur une rondelle de verre fixée par une bague dans un tube de laiton T_1 .

Le polariseur total R est fixé de même au tube T_1 , emboîté autour de T_2 , l'orientation étant repérée par un ergot. La jonction optique des deux pièces est assurée par une goutte d'huile interposée.

Le tube T_2 porte une collerette C_2 percée de deux fentes opposées, parallèles au sens de dédoublement du polariseur, permettant la fixation par les vis V à l'extrémité du polarimètre avec translation pour le centrage des deux images de la pupille sur les deux demi-ondes.

Le polariscope de Lyot P fixé au tube T_3 est optiquement lié à R par une goutte d'huile.

La lentille de l'oculaire projette l'image de la pupille dans le plan des demi-ondes du polariseur.

Le boîtier E porte les filtres colorés et l'analyseur supplémentaire.

Polarisateur total pour les faibles grossissements :

Le filtre à polariseur total qui vient d'être décrit fonctionne bien lorsque la pupille de la lunette est voisine de 1 mm, c'est-à-dire avec les grossissements usuels pour l'étude des planètes. Lorsqu'on doit utiliser des grossissements faibles, plusieurs inconvénients apparaissent :

— Les deux images de la pupille empiètent l'une sur l'autre, et il faut utiliser un rhomboèdre de spath plus épais pour les séparer ;

— Ce rhomboèdre introduit de l'astigmatisme sur l'image déviée et il forme les deux images dans des plans différents ;

— Les deux faisceaux ne peuvent plus pénétrer dans l'œil simultanément, tandis que des écarts d'accommodation débouleraient l'image de la planète dans le champ.

Pour s'affranchir simultanément de ces inconvénients, j'ai étudié au laboratoire la modification suivante :

Le rhomboèdre unique est remplacé par deux rhomboèdres un peu plus épais (18 mm), croisés, entre lesquels se trouve une lame demi-onde dont l'axe est bissecteur des plans contenant les axes optiques des deux spaths. La combinaison dédouble plus et donne deux images stigmatiques ; le rayon ordinaire dans le premier spath est en effet tourné de 90° par la lame demi-onde, il reste ordinaire dans le second spath et demeure stigmatique ; l'autre rayon, extraordinaire dans les deux blocs, subit deux astigmatismes de distance $0,063 \times e$, égaux et opposés qui se détruisent.

A la sortie du filtre une seconde pièce, analogue, est disposée symétriquement ; elle regroupe les deux faisceaux en un seul, qui pénètre ensuite dans l'œil comme à l'ordinaire. Cette pièce est orientée de façon que le faisceau ordinaire du premier polariseur total soit extraordinaire dans le second ; les trajets optiques des deux faisceaux ont alors même longueur et les deux pupilles se forment dans le même plan.

L'analyseur total est porté par un tube muni d'une collerette à glissière, à la sortie du filtre, à la place de la bonnette E ; il donne au filtre la sélectivité de la lame L_3 , placée entre polariseurs parallèles pour l'une des images utilisées ; l'observation avec l'autre image oblige à tourner de 90° la direction de polarisation à la sortie du filtre par interposition d'une lame demi-onde ayant son axe à 45° de cette direction.

La pupille de l'instrument doit être projetée au milieu du filtre.

Les lames demi-ondes qui détruisent l'astigmatisme ont cette propriété dans un intervalle spectral peu étendu. Pour les longueurs d'ondes très différentes la lumière sort légèrement elliptique et des images parasites colorées faibles subsistent ; dans le filtre, elles altèrent un peu la qualité de l'extinction de la lumière en dehors des bandes transmises. Il y a donc intérêt à remplacer chaque lame demi-onde par deux demi-ondes superposées dont les axes sont à 40° l'une de l'autre et à 20° de part et d'autre de la direction de l'axe primitif ; la combinaison se comporte comme une lame unique demi-onde exacte pour un grand intervalle spectral (p. 11).

NOUVEAU COMPENSATEUR DE POLARISATION ATMOSPHERIQUE

Les mesures de polarisation astronomiques effectuées dans les lueurs du crépuscule ou pendant la journée montrent les astres à travers le fond lumineux du ciel, souvent très polarisé, qui perturbe la polarisation à mesurer.

Anciens compensateurs de la polarisation du ciel :

Pour corriger cette polarisation B. Lyot disposait sur la partie centrale de l'objectif une pile de glaces inclinées, légèrement prismatiques. Celle-ci polarisait la lumière et la déviait, formant de la planète une image hors du champ de l'oculaire. La lumière du fond du ciel recouvrait l'image ordinaire de la planète formée par le reste de l'objectif. En réglant la quantité de lumière qui traverse les lames inclinées à l'aide d'un diaphragme, où bien la direction de la polarisation en tournant ces glaces, Lyot parvenait à égaliser la polarisation de la lumière résultante du fond et celle de la planète dont la proportion de lumière polarisée n'était plus alors perturbée. Il fallait effectuer cette compensation pour chaque détermination.

Grâce à de nombreuses autres précautions, B. Lyot exécuta ainsi les mesures de jour sur Mercure et Vénus,

Lyot imagina ensuite une combinaison biréfringente interposée avant le polariscope, qui compensait d'elle-même la polarisation du fond lumineux sur l'étendue limitée de la surface planétaire. Cependant, cet ingénieux dispositif est difficile à régler. Lyot ne l'avait pas effectivement utilisé pour l'étude des planètes.

J'ai réalisé mes mesures en dédoublant l'image de la planète à la suite du polariscope à l'aide du nouveau dispositif suivant :

Dispositif pour compenser la polarisation du ciel :

Derrière le polariscope, entre celui-ci et l'œil de l'observateur, un prisme biréfringent est interposé ; il est constitué par un prisme de spath suivi d'un prisme de verre opposé de même angle ; l'axe optique du spath parallèle à la face d'entrée du prisme fait un angle de 45° avec l'arête du prisme. L'angle de 17° dans l'appareil réalisé produisait un dédoublement de 3° .

Le prisme est orienté pour dédoubler parallèlement aux franges du polariscope. Les deux images du fond lumineux du ciel se superposent, leurs systèmes de franges complémentaires s'imbriquent exactement, se compensent et disparaissent ; on observe deux images distinctes de la planète, parcourues par des franges qui proviennent de la polarisation de la lumière de la planète seulement ; le fond lumineux diminue le contraste des franges et la précision, mais il n'introduit plus d'erreur systématique.

Pour réussir les observations, il faut encore que les deux pupilles correspondant aux deux images soient confondues ; dans le cas contraire, la brillance et le dédoublement de chacune des deux images dépendraient du centrage de l'œil ainsi que de l'accommodation, et les franges du fonds lumineux pourraient réapparaître. On réalise cette condition en plaçant le prisme dans le plan de la pupille.

Association du compensateur de polarisation avec un polariscope à franges rectilignes :

Le dispositif précédent fonctionne convenablement derrière un polariscope à grille demi-onde ; les bandes, rectilignes et équidistantes, s'imbriquent alors parfaitement.

Il n'en est plus ainsi avec le polariscope de Savart qui montre au contraire des franges hyperboliques ; le prisme du compensateur donne deux images déplacées qui ne peuvent s'imbriquer exactement en tout point ; le champ compensé est d'autant plus étroit que le dédoublement du prisme est plus grand.

Pour remédier à cet inconvénient, j'ai imaginé une nouvelle combinaison de polariscope dont les franges sont rectilignes :

Les deux rhomboèdres de spath d'un polariscope de Savart sont disposés à la suite non plus avec les axes optiques dans les plans à 90° , mais avec des plans à 180° ; entre les deux blocs j'interpose une lame demi-onde dont l'axe est à 45° du plan contenant l'axe optique du premier spath ; entre deux polariseurs transmettant la direction de vibration à 45° du plan de l'un des axes, le polariscope montre des franges parallèles, rectilignes et équidistantes, dans la direction perpendiculaire au plan des axes des deux spaths ; leur écartement est $1/\sqrt{2}$ fois celui que montre un polariscope de Savart de même épaisseur. L'analyseur est constitué par le prisme biréfringent compensateur lui-même, dont l'angle peut être choisi beaucoup plus grand.

Ce polariscope détruit la polarisation du ciel sur un champ étendu.

APPAREILS POUR LES MESURES DE POLARISATION AU LABORATOIRE

Pour mieux comprendre les phénomènes de polarisation dont la lumière renvoyée par les corps peut être l'objet, j'ai effectué au laboratoire des mesures sur des substances diverses.

J'ai employé pour les mesurer sur les corps solides le goniomètre et le montage optique utilisé par B. Lyot. L'écart optimum qui convient aux franges du polariscope dépend de la brillance et de la couleur ; il parut quelquefois souhaitable de pouvoir adapter leur largeur angulaire. J'ai réalisé dans ce but un polariscope possédant cette propriété.

Les planètes du système solaire montrent rarement des proportions de lumière polarisée supérieures à 150 millièmes, qu'une lame de celluloïd dont la normale est inclinée de 55° sur l'axe du faisceau peut encore compenser ; mais certaines substances terrestres et les phénomènes lumineux de la nature manifestent quelquefois des polarisations beaucoup plus fortes ; une seule lame inclinée ne suffit plus à les mesurer, il faut ajouter alors au polarimètre un compensateur supplémentaire nouveau.

Voici la description de ces deux instruments :

Polariscope à franges d'écartement réglable :

Le perfectionnement est une modification du polariscope de Savart :

a) La première lame rhomboèdre d'un polariscope de Savart ordinaire est suivie d'une lame quart d'onde dont l'axe est à 45° du plan de section principale ; cette lame est collée contre la face du rhomboèdre avec du baume de Canada, elle est suivie d'une lame de verre collée destinée à la protéger.

b) La seconde lame du polariscope est précédée de même par une lame quart d'onde ; elle est suivie d'un analyseur polaroïd transmettant la vibration à 45° du plan de section principale ;

c) Les deux blocs sont en contact, séparés par une pellicule d'huile de cèdre ; ils peuvent tourner l'un par rapport à l'autre ; la disposition mécanique est celle de la figure 7.

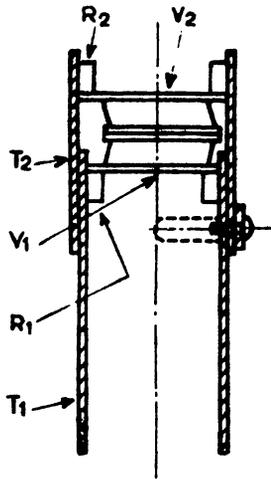


FIG. 7. — Polariscope à franges d'écartement variable.

Le tube T_1 est terminé par une bague R_1 portant une rondelle de verre V_1 collée au premier bloc du polariscope.

Le tube T_2 porte la rondelle V_2 liée au second bloc. T_2 tourne dans T_1 . Une vis servant d'ergot pénètre dans la fente ménagée dans T_1 et limite la rotation à 160°. Une languette de métal non représentée solidaire de T_2 comprime T_1 et sert de frein.

La lumière incidente est dédoublée par le premier rhomboèdre en deux faisceaux totalement polarisés à angle droit ; la première lame quart d'onde transforme ces vibrations rectilignes en deux circulaires droites et gauches. Le quart d'onde du second bloc transforme ces circulaires en deux nouvelles rectilignes orthogonales, orientées de façon à ne subir à travers le deuxième rhomboèdre qu'un nouveau déplacement, sans dédoublement.

La lumière polarisée incidente se trouve donc divisée en deux rayons parallèles dont la différence de marche est sensiblement

$$\Delta = \Delta(90^\circ) \sqrt{2} \cdot i \cdot \sin \frac{\alpha}{2}$$

α étant l'angle réglable des plans contenant la normale et les axes cristallographiques des deux blocs, i l'angle du rayon incident avec le plan bissecteur du dièdre d'angle α . Lorsque la lumière incidente est polarisée à 45° du plan de l'axe du premier rhomboèdre, on observe des franges à l'infini, rectilignes ou légèrement hyperboliques, dirigées selon la bissectrice de l'angle α ; leur écartement au centre du champ est :

$$i = \frac{i(90^\circ)}{\sqrt{2} \sin \alpha/2}$$

Le cas $\alpha = 90^\circ$ correspond au polariscope de Savart, pour lequel $i' = 7 \times e$ en lumière jaune, e étant l'épaisseur des rhomboèdres de spath, en millimètre.

L'écartement des franges varie par rotation du tube T_2 .

J'ai réalisé le polariscope avec des spaths d'épaisseur $e = 1,4$ mm ; il montre des franges d'écart réglables mécaniquement, entre $7'$ et $35'$ en lumière jaune. Ce nouvel appareil permet dans chaque circonstance de choisir le pas des franges qui fournit le maximum de précision, selon la couleur, la brillance et les dimensions de la région à examiner.

Ce polariscope utilise un analyseur, il transmet donc comme le polariscope de Savart, la moitié de la lumière seulement.

Compensateur de polarisation partielle à grand champ :

Le compensateur utilisé par Arago pour annuler la polarisation du flux à mesurer, est constitué par une pile de lames, inclinées, tournant autour de l'axe du faisceau de lumière ; ces lames doivent former un léger dièdre afin de rejeter hors du champ les images parasites qui résultent des réflexions multiples. Cependant la polarisation varie beaucoup d'un point à l'autre du champ : une lame inclinée dont la normale fait un angle α avec l'axe de la lunette donne au centre du champ la polarisation $P(\alpha)$; les faisceaux inclinés dans le plan contenant l'axe de la lunette et la normale à la lame rencontrent la lame sous une incidence $\alpha + h$ et la polarisation produite devient $P = P(\alpha) + h$. $P'(\alpha)$ augmente vite avec α ; dans le plan de l'infini les lignes d'égale polarisation sont sensiblement des droites parallèles à l'axe de rotation, d'autant plus serrées que l'inclinaison de la lame est plus grande. L'association de plusieurs lames réduit encore le champ.

La combinaison suivante peut produire une forte polarisation sur un champ étendu :

Deux lames pivotent autour d'axes parallèles distincts, une liaison mécanique les associe pour les incliner en sens inverse avec le même angle (voir par exemple la figure 4) Elles forment ainsi un dièdre d'angle variable. Le faisceau de lumière qui traverse la première lame ressort partiellement polarisée avec la proportion $P_1 = \frac{I_2 - I_1}{I_2 + I_1}$; le rapport des deux composantes est : $\frac{I_2}{I_1} = \frac{1 + P_1}{1 - P_1}$

La seconde lame augmente encore ce rapport de : $\frac{1 + P_2}{1 - P_2}$ et il devient :

$$\frac{I_2'}{I_1'} = \frac{1 + P_1}{1 - P_1} \cdot \frac{1 + P_2}{1 - P_2}$$

La proportion de lumière polarisée est :

$$P = \frac{I_2' - I_1'}{I_2' + I_1'} = \frac{(1 + P_1)(1 + P_2) - (1 - P_1)(1 - P_2)}{(1 + P_1)(1 + P_2) + (1 - P_1)(1 - P_2)} = \frac{P_1 + P_2}{1 + P_1 P_2}$$

Sur l'axe optique, l'inclinaison des deux lames est la même $P_1 = P_2$ et $P_0 = \frac{2P_1}{1 + P_1^2}$

Hors de l'axe optique, les rayons inclinés dans le plan normal aux pivots de rotation coupent l'une des lames sous un angle plus grand que α et l'autre sous un angle plus petit, les différences de polarisation se compensent en partie.

La première lame produit la proportion :

$$P_1(\alpha+h) = P_1(\alpha) - h \cdot P_1'(\alpha) + h^2/2 \cdot P_1''(\alpha) + \dots$$

et la seconde :

$$P_2(\alpha+h) = P_2(\alpha) + h \cdot P_2'(\alpha) + h^2/2 \cdot P_2''(\alpha) + \dots$$

La polarisation résultante est :

$$P = \frac{P_1+P_2}{1+P_1P_2} = \frac{2P_1}{1+P_1^2} + h^2 \frac{P_1''}{1+P_1^2}$$

h intervient au carré avec un coefficient $\frac{P_1''}{1+P_1^2}$ petit ; la polarisation conserve sensiblement la valeur $\frac{2P_1}{1+P_1^2}$ sur une région étendue du champ.

L'appareil réalisé est un boîtier parallélépipédique contenant les deux lames rectangulaires en verre très mince, dont les axes de rotation sont accouplés par des engrenages ; un ressort rappelle les jeux ; l'instrument étalonné à l'aide du montage décrit p. 14 s'interpose en avant du polarimètre lorsque la polarisation à compenser devient trop forte. On peut incliner les normales aux lames jusqu'à 70° de l'axe et compenser des proportions de lumière polarisées jusqu'à 500 millièmes avec une précision de quelques millièmes. Pour compenser des polarisations encore plus fortes il suffirait d'associer plusieurs lames sur chaque axe.

POLARIMÈTRE POUR LES MESURES EN PLEIN AIR

En observant directement dans la nature les propriétés polarisées de la lumière, j'ai étudié les phénomènes soit dans leur complexité réelle, soit au contraire dans un état de pureté non reproductible au laboratoire. J'ai profité pour cela des prospections, voyages, ascensions en montagne et vols en aérostat. Ces observations exigent un polarimètre capable de mesurer simultanément l'angle de vision, la distance nadirale et la proportion de lumière polarisée ; il devait être robuste et assez petit pour tenir sans gêne dans la poche ordinaire d'un vêtement.

Polarimètre pour mesurer en plein air :

J'ai construit un petit polarimètre de Lyot, adapté de la façon suivante (figure 8) :

L'objectif 0 de 12 mm de diamètre et 120 mm de foyer peut être dévissé lorsqu'on désire observer en lumière diffuse. La lame compensatrice, en verre couvre-objet de microscope, est actionnée par l'aiguille A dont l'axe est protégé contre les chocs par le fourreau F. La lame de polarisation auxiliaire est manipulée par l'ergot E comme dans le polarimètre classique. L'oculaire polariscopique à franges de Savart est en P. L'opérateur obtient la distance nadirale désirée en tenant le polarimètre suspendu par le cordonnet C dont le point d'attache coulisse sur le cordon G ; ce point d'attache est préalablement repéré en allongeant le cordonnet parallèlement du cordon afin que l'un des cinq nœuds $N_1 \dots N_5$ soit en regard du nœud repère N. Les distances nadirales sont alors respectivement 30°, 45°, 60°, 75°, 90°.

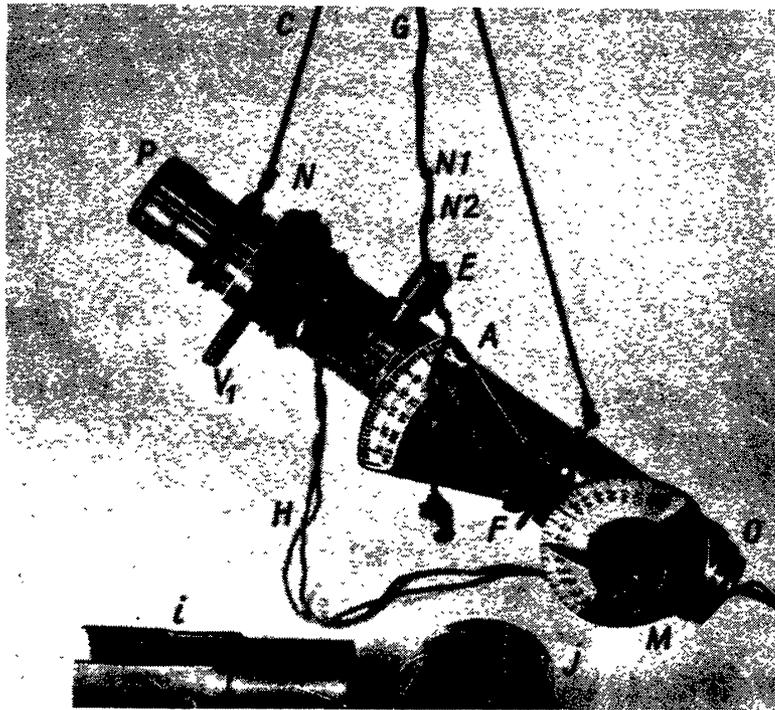


FIG. 8. — Polarimètre pour les mesures en plein air.

Pour déterminer l'angle de vision et orienter le polarimètre dans le plan de vision, l'opérateur observe l'image du soleil par réflexion vitreuse sur le miroir sphérique convexe M à travers le pinnule V_1 ; il amène cette image au centre de la croisée dessinée sur le miroir en tournant l'ensemble du polarimètre autour du cordonnnet vertical et autour de son axe optique ; le miroir M est porté par un axe et l'aiguille indique l'angle de vision sur le cadran. Si la polarisation est négative (vibration dans le plan de vision), l'opérateur tourne de 90° le miroir et le cadran qui sont montés à cet effet sur un tube emmanché sur la lunette, et il vise à travers un autre pinnule V_2 (caché sur la photographie). Des verres absorbants fixés sur les pinnules empêchent l'éblouissement de l'œil par l'éclat du soleil, déjà réduit par la réflexion vitreuse sur M.

La cordelière H maintient l'instrument au cou de l'opérateur lorsque celui-ci doit observer dans des situations périlleuses. Un compensateur supplémentaire constitué par deux lames en V (p. 23) peut encore s'emboîter devant l'objectif O pour compenser les très fortes polarisations. Un porte-filtre coloré à revolver se fixe sur l'oculaire P.

Conditions de l'observation en plein air :

L'objet mesuré reçoit à la fois la lumière du Soleil et celle de l'ensemble de l'atmosphère. Lorsque le ciel est pur, l'éclairement produit par la lumière atmosphérique, au moins dix fois plus faible que celui de la lumière solaire directe, voit sa polarisation en grande partie détruite par la symétrie de sa provenance ; les mesures ne sont pas sensiblement affectées par la lumière du ciel dans ce cas. Un temps légèrement brumeux ou partiellement nuageux altère la pureté des mesures qui perdent toute signification lorsque les ombres cessent de se projeter nettement sur le sol.

L'air interposé entre l'appareil et la substance examinée introduit une polarisation parasite, d'autant plus sensible que la surface est plus sombre et plus éloignée, maximum sous l'angle de vision 90° ; la proportion de lumière polarisée par un corps sombre peut déjà être altérée sensiblement à partir de quelques dizaines de mètres de distance seulement.

NOUVEAU POLARIMÈTRE PHOTOGRAPHIQUE

Lorsqu'il faut mesurer la polarisation de la lumière sur un astre de faible éclat, ou bien avec une partie du spectre inaccessible à la sensibilité de l'œil, il est nécessaire de renoncer au polarimètre visuel.

J'ai étudié un polarimètre photographique nouveau ; il permet d'atteindre dans un domaine d'application étendu la précision maximum compatible avec les propriétés granulaires des émulsions sensibles. L'erreur probable due aux fluctuations de la répartition des grains d'argent est inversement proportionnelle à la racine carrée du nombre des grains et de celle de la surface de la plage.

Anciens polarimètres photographiques :

De nombreux physiciens ont mesuré des polarisations en dédoublant l'image à l'aide d'un prisme biréfringent, selon les principes des polarimètres décrits jadis par Cornu et par Pickering.

Toutefois les opérations photographiques introduisent des causes d'erreurs souvent beaucoup plus importantes que celle provenant des fluctuations de la concentration des grains ; deux d'entre elles sont prépondérantes :

- La sensibilité des émulsions photographiques peut varier progressivement d'un point à l'autre de la plaque ;
- La détermination du facteur de contraste n'est pas toujours précise.

Certains polarimètres permettent d'éliminer l'une ou l'autre de ces erreurs :

1° **Le polarimètre photographique de B. Lyot** : Réalisé en 1924, il a été décrit en 1934. Cet appareil dérive du polarimètre de Cornu mais, par le jeu de l'alternance des poses successives, il élimine les effets des variations de sensibilité de l'émulsion, l'anamorphose du biréfringent sur l'image déviée et la polarisation parasite introduite par l'inégal pouvoir réflecteur du spath pour les deux composantes polarisées de la lumière. En effectuant la moyenne des déterminations sur les poses successives, la précision augmente d'abord comme la racine carrée du nombre d'images puis elle cesse de croître parce que le contraste est déterminé avec une précision limitée.

2° **Le polarimètre photographique de Y. Ohman** : Cet instrument élimine, au contraire, l'erreur provenant de la détermination du contraste de l'émulsion.

L'image de l'objectif est dédoublée avec un prisme biréfringent de Rochon suivi d'une lame de quartz épaisse de plusieurs millimètres dont l'axe parallèle aux faces fait, avec celui du biréfringent, un angle légèrement différent de 45° ; cette lame dépolarise partiellement.

ment les lumières des deux images pour l'ensemble de leurs radiations. Un deuxième biréfringent suit la lame, semblable au premier mais croisé ; il donne 4 images de l'objectif. Leurs densités respectives fournissent les valeurs de la polarisation sans l'intervention numérique du facteur de contraste.

Principe du nouveau polarimètre :

La disposition suivante élimine simultanément les erreurs attribuables au facteur de contraste et celles résultant des variations locales de sensibilité :

L'image de l'astre formée par l'instrument d'observation est isolée par un diaphragme D_1 (figure 9), suivi d'une lentille L_1 projetant l'image de l'objectif sur une grille polariscopique G à barreaux de cellophane demi-onde (cf. p. 8). Une lentille L_3 forme une petite image de cet objectif sur la plaque photographique P ; cette image est striée par les barreaux de la grille. La lame compensatrice inclinable en verre mince C permet d'introduire un contraste relatif réglable entre les barreaux successifs.

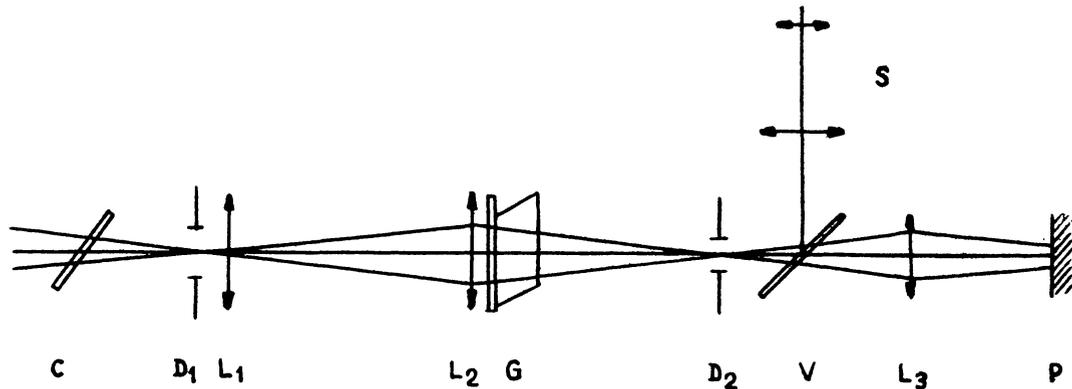


FIG. 9. — Polarimètre photographique à grille demi-onde.

Lame compensatrice C en celluloïd mince.

Diaphragme D_1 limitant le champ, de diamètre interchangeable compris entre 2 mm et 10 mm.

Lentille de champ L_1 de foyer 130 mm, formant l'image de l'objectif en G .

Lentille L_2 plane convexe de foyer 64 mm formant l'image de D_1 en D_2 .

Grille polariscopique G achromatique de 7 mm de côté contenant 7 barreaux de 0,5 mm coupés dans deux cellophanes avec axes à 40° , suivie d'un rhomboèdre de spath de 5 mm d'épaisseur, accolée à L_2 et portée par un tube coulissant pour mise au point.

Diaphragme D_2 interchangeable, amené par tube coulissant dans le plan de l'image de D_1 formée par L_1 .

Lunette de guidage S recueillant une faible partie de la lumière par la glace sans tein V .

Objectif L_3 formant l'image de G sur la plaque photographique P , de diamètre 18 mm et de foyer 35 mm ou bien 70 mm au choix, pour adapter le diamètre de l'image à l'éclaircissement et à la sensibilité de l'émulsion.

Plaque photographique P portée par un châssis à double glissière pourvu d'une mise au point, d'un porte-filtre et d'un obturateur.

La lentille supplémentaire L_2 collée contre la grille est destinée à former l'image du diaphragme D_1 au foyer D_2 de la lentille L_3 . L'appareil est encore complété par une glace sans tain V interposée après le polariscope pour renvoyer une faible partie de la lumière dans une lunette G destinée au guidage de l'instrument pendant les poses.

Pour utiliser ce polarimètre l'observateur réalise une série de poses successives ; entre chacune d'elles la plaque est déplacée dans son plan et l'inclinaison de la lame compensatrice est modifiée.

Après développement de la plaque, les images successives se montrent parcourues par des barreaux dont le contraste varie d'une image à l'autre ; dans l'ordre de la polarisation compensatrice croissante, le contraste est d'abord de plus en plus faible, puis nul lorsque la lame est inclinée sous l'angle qui compense exactement la polarisation à mesurer ; ce contraste s'inverse ensuite et augmente.

Un graphique portant en ordonnées ces contrastes et en abscisses les proportions de lumière polarisées compensatrices montre autant de points que de poses, sensiblement alignés le long d'une droite dont l'intersection avec l'axe des abscisses indique la proportion de lumière polarisée à mesurer.

Précision :

La connaissance du facteur de contraste de l'émulsion n'est pas nécessaire à la détermination du résultat. Les barreaux, petits, jointifs et imbriqués, sont mesurés sans perturbation attribuable aux variations locales de la sensibilité de l'émulsion.

Le seuil de précision introduit par la plaque provient donc des fluctuations mêmes de la granulation de l'émulsion et il a sa valeur maximum.

Soit $P = \frac{I_2 - I_1}{I_2 + I_1}$ les proportions de lumière polarisée

La densité étant reliée à l'éclairement par la relation : $D = \Gamma \log i \cdot t$

on a : $P = 2,3 \frac{D_1 - D_2}{\Gamma}$

L'erreur commise sur la détermination de la proportion de lumière polarisée s'écrit :

$$\sigma(P) = \frac{2,3}{\Gamma} \sigma(D)$$

$\sigma(D)$ résulte de la fluctuation du nombre de grains de l'émulsion ; il dépend de la granularité ΔG caractérisant l'émulsion, ainsi que de la surface δ de la plage étudiée :

$$\sigma(D) \approx \frac{\Delta G}{\sqrt{\delta}}$$

La surface qu'il faut donner à la plage pour obtenir le noircissement correct dans le temps de pose t est proportionnelle à cette durée d'exposition t , à l'éclairement E produit par la source sur l'objectif, à la surface de l'objectif de diamètre θ , à la sensibilité S de l'émulsion (inverse de la lamination nécessaire pour obtenir la densité donnée).

L'erreur diminue encore comme la racine carrée du nombre n des poses, d'où :

$$\sigma(P) = K \frac{\Delta G}{\Gamma \sqrt{s}} \frac{1}{\theta \sqrt{E \cdot n t}}$$

Le produit $n.t$ représente la durée totale T de l'utilisation de l'appareil pour la réalisation des poses successives ; $\sigma(P)$ dépend de cette durée totale T , et reste indépendant du nombre de poses élémentaires qui la fractionne ; ce nombre est choisi, par ailleurs, d'après des raisons de commodité.

Le facteur de proportionnalité K dépend encore de la transmission τ de l'ensemble de l'appareil ; du taux de contraste M de la grille dans le cas où la lame de cellophane qui la constitue ne serait pas exactement demi-onde pour la lumière utilisée ; du facteur d'utilisation U de la surface des images lors de la mesure des plages.

L'erreur de mesure sur la proportion de lumière polarisée s'exprime finalement ainsi :

$$\sigma(P) \approx \frac{1}{\sqrt{\tau \cdot M \cdot U}} \cdot \frac{\Delta G}{\Gamma \cdot \sqrt{S}} \cdot \frac{1}{\sigma \sqrt{ET}}$$

- le dernier terme dépend seulement des conditions d'observation ;
- le second terme est lié aux propriétés de l'émulsion photographique et à son rendement pratique ;
- le premier terme caractérise fonctionnellement l'instrument.

Les précautions suivantes permettent de conserver à ce premier facteur une valeur élevée :

Le coefficient de transmission τ est voisin de l'unité grâce à l'emploi du rhomboèdre analyseur (cf. p. 9), au collage des pièces optiques voisines, au choix de lentilles simples et minces, au traitement anti-reflet des surfaces libres.

Le taux de modulation M diffère également peu de l'unité avec la grille achromatique double, dans le domaine spectral compris entre $0 \mu 4$ et $0 \mu 8$ (page 11).

Le facteur d'utilisation U de la surface des images est diminué lorsque la mesure de l'image circulaire est réalisée avec le microphotomètre ; le spot explorateur balaye en

effet la plage selon le carré inscrit, dont la surface est $\frac{\pi}{4} = 0,79$ fois celle du cercle ; la

sensibilité est abaissée comme $\sqrt{0,79} = 0,89$. Le facteur U serait encore affaibli avec un télescope réflecteur ayant une obturation centrale.

Pour éviter cette légère perte du rendement, j'ai étudié les images sans le secours du microphotomètre ; des tirages photographiques agrandis sont réalisés très contrastés, en diapositifs sur verre ; ils montrent la granulation très apparente ; on sélectionne d'abord les deux images les plus contrastées dans chaque sens, l'une ayant les barreaux pairs les plus denses, l'autre, complémentaire, avec les barreaux denses impairs ; puis les autres images sont classées par interpolation. L'œil tient compte, dans son jugement, de toute la surface utilisable.

Une autre petite perte sur le facteur U provient des liserés perceptibles aux limites de séparation des barreaux. Pour la réduire, il convient de former sur la plage à examiner des bandes peu nombreuses, j'avais adopté finalement 4 barreaux entre 4 intervalles.

Réalisation :

J'ai construit plusieurs polarimètres photographiques selon ce principe, destinés à des buts différents : deux d'entre eux sont décrits p. 64 et p. 65.

Le premier appareil avait été réalisé en 1949 pour étudier à travers des filtres sélectifs la polarisation de la lumière globale des planètes. Ses caractéristiques sont données figure 9.

Le diaphragme D_2 peut être remplacé par le filtre polarisant décrit p. 16 associé à un polarisateur total.

L'instrument précédent a été utilisé sur la lunette de 32 cm de la Table Equatoriale de Meudon et les lunettes de 23 cm et 60 cm du Pic du Midi, ouvertes à $f/30$.

Un astre de magnitude 6 produit dans un télescope de 1 mètre un flux de 0,1 microlumen ; le polarimètre peut y déceler pendant une durée de pose totale de 20 minutes, une proportion de lumière polarisée voisine de 1 millième.

Sur les planètes plus brillantes, l'instrument permet de réaliser des mesures dans des intervalles de longueur d'ondes étroits, isolés par le filtre polarisant, pour tous les domaines spectraux accessibles aux émulsions photographiques.

En accumulant un nombre d'expositions très grand, ce polarimètre permet de réaliser des mesures avec une précision voisine de 1 dix millième, et même supérieure sur les sources produisant une lamination suffisante.

Compensation de la polarisation atmosphérique :

Au cours des observations recueillies pendant la journée, dans les crépuscules ou aux époques de clair de lune, la lumière du fond du ciel qui traverse toute la surface du diaphragme contribue à altérer la polarisation à mesurer. Pour compenser cette polarisation parasite, j'ai utilisé trois procédés :

Premier procédé : Les poses paires sont effectuées avec un diaphragme D_2 de surface s_1 , elles conduisent à la détermination de la proportion polarisée P_1 ; un autre diaphragme de surface s_2 est substitué pour les poses impaires fournissant la polarisation P_2 . Si P_f et I_f sont les polarisations et brillances du fond diffusé, P_o et I_o celles de l'astre, chacune des deux séries de poses donne, lorsque le flux venant de l'astre est prépondérant :

$$\text{d'où : } \left\{ \begin{array}{l} P_1 = \frac{P_o I_o + P_f I_f s_1}{I_o + I_f s_1} = P_o + P_f \frac{I_f}{I_o} s_1 \\ P_2 = \frac{P_o I_o + P_f I_f s_2}{I_o + I_f s_2} = P_o + P_f \frac{I_f}{I_o} s_2 \end{array} \right.$$

$$\frac{P_f I_f}{I_o} = \frac{P_2 - P_o}{s_2} = \frac{P_1 - P_o}{s_1}$$

La polarisation véritable est :

$$P_o = \frac{P_1 s_2 - P_2 s_1}{s_1 - s_2}$$

Deuxième procédé : Un prisme biréfringent est interposé contre la grille ; le diaphragme D_2 arrête l'image déviée de l'astre et transmet la lumière diffusée voisine de cette image.

La lentille L_3 doit avoir un diamètre suffisant pour recueillir complètement la lumière du faisceau dévié. La normale à la lame V destinée au guidage doit être contenue dans l'un des plans bissecteurs des deux directions de polarisation orthogonales des deux faisceaux ; s'il n'en était pas ainsi, la lame réfléchirait inégalement les deux faisceaux ce qui altérerait la compensation.

Troisième procédé : Le prisme biréfringent est remplacé par un rhomboèdre de spath suffisamment épais pour dédoubler complètement l'image de l'astre dans le plan du diaphragme D_2 , lequel sélectionne l'une d'entre elles et les deux images du fond lumineux. Les deux faisceaux restent confondus et la compensation de la polarisation atmosphérique est excellente dans la partie commune des deux images impressionnées par les deux faisceaux sur la plaque.

Ce procédé convient particulièrement bien pour l'étude des astres ponctuels, pour lesquels un rhomboèdre mince suffit à séparer les images.

J'ai généralement combiné l'un de ces deux derniers procédés avec le premier. L'égalité des mesures P_1 et P_2 obtenues avec les deux diaphragmes est un critère valable d'une compensation bien réalisée ; un réglage défectueux du prisme ou du rhomboèdre compensateur se décèle ainsi et la mesure reste utilisable après correction numérique.

CONDITIONS DES OBSERVATIONS POLARIMÉTRIQUES SUR LES CORPS CÉLESTES

Pour étudier la polarisation de la lumière sur des régions limitées de la surface des planètes, il fallait réaliser les mesures avec une grande lunette, en bénéficiant d'un pouvoir séparateur aussi élevé que le permettent les propriétés de l'atmosphère terrestre à travers laquelle il faut observer.

Pour examiner l'évolution de la polarisation avec la phase il faut de plus des circonstances favorables fréquentes.

Ces exigences sévères nécessitent une homogénéité de l'atmosphère qui ne se trouve pas toujours réalisée en chaque endroit.

Les observations de Mars que j'ai réalisées à Meudon en 1949 ont confirmé qu'en moyenne, malgré le diamètre réduit de l'objectif de 31 cm, une nuit claire sur 4 seulement montrait une turbulence suffisamment réduite pour justifier des mesures locales sur les petites tâches de la surface ; à l'examen, beaucoup de ces mesures manifestaient encore des traces de mélange de lumière entre les différentes régions voisines.

Il paraissait donc nécessaire d'utiliser une lunette située dans des conditions telles que les multiples causes de troubles atmosphériques soient moins nombreuses et chacune d'elles moins probables.

L'Observatoire du Pic du Midi :

Dès Décembre 1945, j'ai pu observer les planètes avec la lunette de 60 cm de l'observatoire de montagne du Pic du Midi. Cette installation astronomique était déjà connue par la stabilité de ses images télescopiques, qui résultent de son altitude et de l'isolement de la lunette, à 2.870 m. au sein de l'atmosphère.

J'ai étudié ailleurs (1953) les raisons qui président à la faible turbulence atmosphérique souvent rencontrée au Pic du Midi.

J'ai entrepris le présent programme d'études polarimétriques depuis Février 1948.

La lunette de 60 cm utilisée pour les mesures a été installée en 1943 à l'instigation de B. Lyot. La description en a été publiée en 1953.

Ce réfracteur est associé à un autre instrument dont l'objectif mesure 23 cm de diamètre et je l'ai utilisé quelque fois conjointement avec la grande lunette.

Dépolarisation par les objectifs :

En raison de la trempe dont les verres sont l'objet lors de la fabrication des lentilles les objectifs des réfracteurs peuvent acquérir des tensions internes qui rompent l'isotropie de la matière : une biréfringence apparaît de ce fait ; elle a pour résultat de réduire la proportion polarisée de la lumière qui les traverse et elle diminue la valeur mesurée par le polarimètre.

J'ai déterminé le coefficient de dépolarisation des réfracteurs sur lesquels le polarimètre avait été adapté. A cet effet, l'instrument est pointé vers le ciel pur, le jour, environ à 90° du Soleil ; la forte polarisation de la lumière du ciel est mesurée successivement, parallèlement à l'axe de la lunette, puis à travers celle-ci ; le rapport des deux déterminations est le coefficient par lequel il faut multiplier les indications du polarimètre pour obtenir la valeur réelle de la polarisation. Ce coefficient est très voisin de 1 avec l'objectif de 60 cm qui paraît peu biréfringent ; il atteint 1,26 avec l'objectif de 23 cm et il faut diaphragmer cette pièce optique de 15 cm pour restituer la proportion de lumière polarisée incidente sans altération sensible.

Polarisation par les miroirs :

Pour limiter l'encombrement, la lunette de 60 cm est montée en réfracto-réfecteur et la lumière se réfléchit sur deux miroirs plans après avoir traversé l'objectif ; le premier miroir au bas du tube, à 50 cm de diamètre ; le second, à côté de l'objectif, mesure 30 cm.

En 1948 et 1949, ces disques étaient recouverts d'une argenture chimique ; j'ai vérifié que leur présence dans le faisceau ne modifiait pas l'état de polarisation de la lumière. En Février 1950, ces miroirs ont reçu une aluminure sous vide. Après cette opération, en Mars 1950, la lunette montrait une très forte polarisation parasite ; la direction de la vibration tournait en même temps que chacun des miroirs et elle était attribuable à la réflexion sur la couche d'aluminium.

Une orientation convenable des disques permettait de croiser les plans de leurs polarisations propres, et par suite, de diminuer la proportion de lumière polarisée résultante.

Cette polarisation résiduelle conservait la valeur 23 millièmes ; je l'ai orientée de façon que sa vibration soit perpendiculaire au mouvement diurne, elle s'additionne alors à la polarisation des planètes et les observations entre Avril et Octobre 1950 ont été effectuées ainsi en corrigeant les mesures.

Ensuite les miroirs furent à nouveau démontés et l'aluminium remplacé par de l'argent projeté sous vide. L'argent déposé de la sorte n'engendrait pas de polarisation propre.

Cette polarisation parasite produite par l'aluminium déposé sous vide dans certaines conditions ne semblait pas connue antérieurement.

J'ai étudié la polarisation produite par les miroirs aluminés aux différents points de la surface en utilisant la source de lumière non polarisée qu'offrait Jupiter au moment de l'opposition. La lunette étant suivie du polarimètre muni d'un polariscope dépourvu d'oculaire, on pouvait réaliser des mesures sur les diverses régions de l'objectif illuminé. La figure 10 reproduit la répartition de la proportion et de la direction de la lumière polarisée ; la ligne pointillée oblique représente une région tachée correspondant à une dégradation locale de l'aluminium, qui séparait deux régions produisant des polarisations différentes. J'ai examiné ensuite au laboratoire ces deux pièces optiques séparément ; le miroir soumis à la mesure était recouvert d'un quadrillage de fils tendus destinés à repérer les différentes portions de la surface maintenue verticale. Chaque carré était successivement éclairé presque perpendiculairement à sa surface par la flamme d'une bougie dont la lumière non polarisée était étalée par un verre dépoli.

La figure 10 montre les distributions très variables de la polarisation et de son orientation sur les deux miroirs, son absence complète en certaines régions ainsi que la valeur considérable qu'elle atteignait près du bord du grand disque. Pour retrouver l'aspect résultant de l'association des deux pièces optiques, il faut regarder l'image du grand miroir dans une glace, l'orienter convenablement et considérer en outre la modification produite par le petit miroir ; le petit disque ne couvrait qu'une partie de la surface du grand miroir et laissait hors du champ la région très polarisée du bas, à droite.

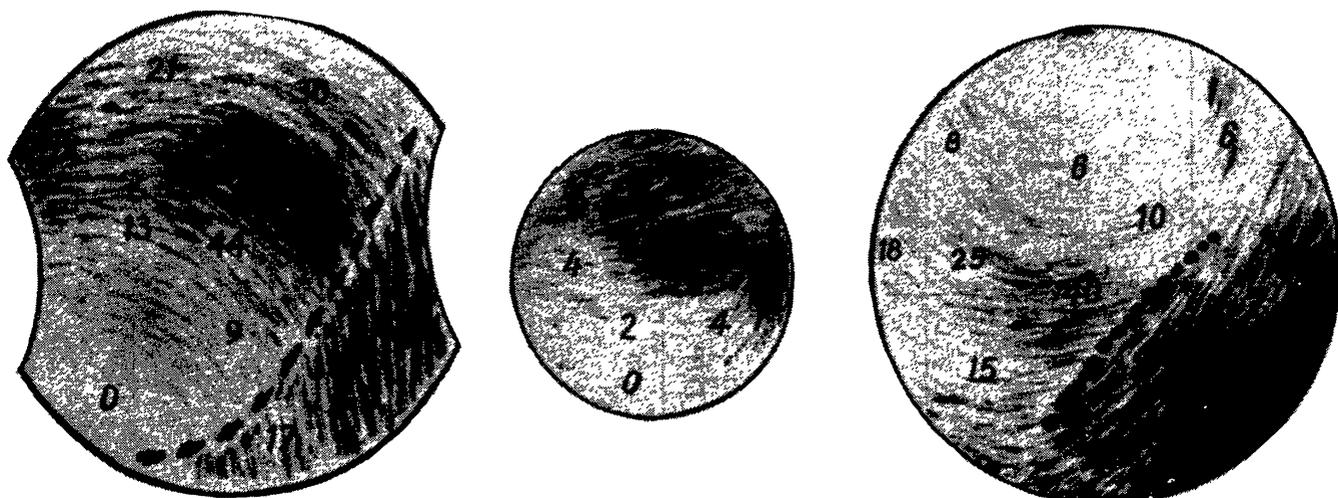


FIG. 10. — Polarisation par les miroirs aluminés de la lunette du Pic du Midi en 1950.

A droite : polarisation par le miroir de 50 cm.

Au centre : polarisation par le miroir de 30 cm.

A gauche : Polarisation par l'ensemble des deux miroirs montés sur la lunette.

La proportion de lumière polarisée est exprimée en millièmes.

J'ai examiné également le miroir de 53 cm de l'Observatoire de Haute Provence, fraîchement aluminé, et plusieurs autres miroirs aluminés dans des conditions et à des dates différentes ; certains montraient une assez forte polarisation et d'autres en étaient dépourvus complètement.

Ce phénomène n'est pas observé sur les couches d'argent ; il pourrait résulter de la diffusion par des stries de la surface ; il serait analogue, dans ce cas, à la forte polarisation manifestée par les réseaux de diffraction dans le sens des traits. J'ai essayé de frotter la surface d'un miroir sans parvenir à produire de la lumière polarisée ; il est possible que les frottements altèrent la surface seulement lorsqu'elle vient d'être fraîchement déposée.

Il y a lieu de porter la plus grande attention à la polarisation parasite que peut introduire certains miroirs aluminés, lorsqu'on effectue des mesures précises avec un télescope réflecteur.

POLARISATION DE LA LUMIÈRE DES PLANÈTES

RECHERCHES ANTÉRIEURES SUR LA POLARISATION DE LA LUMIÈRE DES PLANÈTES

Les premières applications des mesures de polarisation à l'étude des astres ont été dues à Arago (1811). Elles paraissaient devoir être très fructueuses, mais ne furent poursuivies, après Arago, que très sporadiquement. Secchi (1859), Lord Ross (1872), Landerer (1889), Pickering (1894), Salet (1906) apportèrent des contributions souvent contradictoires. Le principal travail d'ensemble sur la polarisation de la lumière des planètes est dû à B. Lyot. Publié en 1929, son mémoire englobe et dépasse les travaux antérieurs. Voici le résumé des résultats acquis par ce travail :

Polarisation de la lumière globale des planètes :

Lyot a déterminé la courbe de polarisation de la lumière de l'ensemble de la Lune pour tous les angles de vision ; celle de Mercure entre les angles de vision 3° et 130° ; celle de Mars entre 1° et 46° , seul intervalle accessible à l'observation. Ces trois courbes très semblables se retrouvent au laboratoire sur des substances granulaires très absorbantes, telles que les cendres volcaniques.

Sur Mars, des polarisations insolites révélèrent au début de l'année 1925 un état météorologique anormal dans l'atmosphère de cette planète. Sur Mercure, Lyot put établir que l'épaisseur d'atmosphère est inférieure à 0,02 fois celle de la Terre.

La courbe de polarisation de Vénus suggère l'existence, dans la haute atmosphère, d'un voile opaque permanent formé de très fines gouttelettes sphériques.

Les courbes de Jupiter et de Saturne, connues respectivement jusqu'à 12° et 6° seulement, semblent résulter de l'association de voiles de cristaux avec une atmosphère épaisse.

La polarisation de la lumière des anneaux de Saturne reste le siège de phénomène inexpliqués.

Étude régionale de la polarisation de la lumière sur la Lune :

La direction de la vibration polarisée est la même en tout point de la surface lunaire ; elle est soit exactement normale, soit exactement parallèle au plan de vision. La proportion de lumière polarisée varie grossièrement en raison inverse de l'albedo ; elle est irrégulière sur les mers, assez constante sur les terres. La polarisation est indépendante de l'angle que fait la normale à la surface lunaire avec la direction d'observation, cependant elle augmente un peu le long du terminateur, lorsque l'éclairement solaire est rasant. La lumière lunaire est donc presque dépourvue de polarisation par diffusion oblique et de polarisation elliptique.

Toutes ces propriétés s'observent également au laboratoire sur les cendres volcaniques.

Étude de la polarisation de la lumière aux différents points de disques planétaires :

Pour mesurer la polarisation sur les différentes régions de la surface des planètes, Lyot utilisa la lunette de 83 cm de l'observatoire de Meudon. Cependant la turbulence atmosphérique généralement forte masquait souvent les détails planétaires fins ; les mesures restèrent peu nombreuses et souvent peu homogènes.

Sur Mercure, Lyot ne put jamais mesurer autre chose que la polarisation globale.

Sur Vénus, il remarqua une polarisation pas toujours uniforme. A la quadrature, sur les cornes du croissant, la direction de la polarisation apparut déviée, et la proportion de lumière polarisée anormale ; elle était moins forte, en valeur algébrique, au terminateur qu'au limbe.

Sur Mars, les observations nécessitent de très bonnes images. Les propriétés des régions claires et sombres ne purent être distinguées. Des brumes de l'atmosphère martienne ont manifesté des polarisations particulières, sans qu'il soit possible de les préciser. Au bord du disque, des polarisations anormales semblaient dues à des nuages.

Sur Jupiter, la polarisation parut la même sur les bandes sombres qui parcourent le disque et sur les régions claires qui les séparent ; selon Lyot : « Dans la zone équatoriale de Jupiter, tous les points de la surface apparente ont le même état physique. Cet état ne doit pas varier sensiblement entre deux observations, mais il se modifie lentement, d'une année à l'autre, en même temps sur toutes les longitudes. L'observation visuelle et la plaque photographique nous font connaître une propriété analogue ».

Le long de l'équateur, la polarisation augmentait vers les bords du disque. Elle était « toujours plus forte algébriquement à l'Ouest qu'à l'Est, aussi bien avant qu'après l'opposition. Ce phénomène ne semble pouvoir être attribué qu'à une influence du rayonnement solaire sur la couche nuageuse supérieure de Jupiter ».

« Sur les calottes grises qui environnent les pôles de Jupiter, le plan de polarisation est indépendant des positions relatives à la Terre et au Soleil... La proportion de lumière polarisée paraît indépendante des conditions d'éclairement ; elle est maximum aux pôles, décroît régulièrement vers l'équateur ». Cette curieuse polarisation peut provenir de la diffusion multiple dans une atmosphère pure,... « par un mécanisme analogue à celui qui donne naissance aux points neutres et à la polarisation horizontale que l'on observe sur notre globe, dans la direction opposée au Soleil ». Elle indique, dans les régions polaires, une atmosphère presque complètement dégagée de nuages.

Saturne montre des phénomènes analogues mais plus variables, malgré la faible brillance et le diamètre apparent réduit de son disque.

Toutes ces observations ont été effectuées avec la lumière de l'ensemble du spectre, filtrée seulement par un écran jaune.

Autres recherches sur la polarisation de la lumière des planètes :

L'important travail de B. Lyot date déjà de 25 années pendant lesquelles nos connaissances sur la polarisation des planètes ne se sont enrichies que très peu.

En 1834, Wright mesura la polarisation de la lumière de la Lune avec un polarimètre visuel peu différent de celui de Lyot.

En 1949, Y. Ohman traça la courbe de polarisation de la région lunaire Mare Sereinitatis à l'aide d'un polarimètre photoélectrique. Ces mesures confirment les résultats de Lyot.

Y. Ohman examina aussi, avec un spectropolarimètre nouveau, la région polaire de Jupiter, dont la forte polarisation radiale avait été signalée par Lyot. Les mesures prouvent que la polarisation de ces régions polaires est la même pour les différentes radiations du spectre visible.

En 1952, G. P. Kuiper utilisa son spectromètre infrarouge avec cellule à sulfure de plomb pour mesurer la polarisation de la lumière de Vénus, dans l'infra-rouge, pour les radiations $1 \mu 6$ et $2 \mu 1$. Les mesures effectuées seulement pour les angles de phase $V = 10^\circ$ et $V = 90^\circ$ ne sont pas encore assez nombreuses pour être interprétées.

OBSERVATIONS POLARIMÉTRIQUES DE MERCURE

Conditions de l'observation de Mercure :

Le diamètre apparent de la planète Mercure, très faible, est compris entre $4,5''$ et $11''$; Pendant l'aube ou le crépuscule, la planète reste près de l'horizon et les images sont rarement bonnes. Au cours de la journée, l'astre s'élève plus haut dans le ciel, mais les poussières et gouttelettes en suspension dans l'atmosphère diffusent et produisent un fond lumineux polarisé qui altère les contrastes ainsi que la polarisation. Il faut bénéficier à la fois d'un ciel très pur et d'une turbulence atmosphérique réduite. A ce double point de vue, l'observatoire de montagne du Pic du Midi se révéla particulièrement bien situé.

Les secondes parties des journées montrent des images la plupart du temps agitées par les troubles atmosphériques provenant de l'échauffement des parois du Pic par le rayonnement solaire.

Dans les lueurs de l'aube, au contraire, l'image d'abord agitée s'améliorait progressivement lorsque l'astre s'élevait. Après le lever du Soleil, l'image restait calme un instant, puis de nouveaux troubles apparaissaient ; ils étaient localisés à l'intérieur du tube de la lunette. Le Soleil chauffant le tube créait des courants de convection.

Pour augmenter le pouvoir réflecteur du tube, je l'ai recouvert de plusieurs couches d'une peinture très blanche. Ce revêtement retardait l'apparition des remous ; la planète s'élevait haut dans le ciel et les images pouvaient devenir excellentes.

Mais dans ces conditions, le Soleil éclaire directement l'objectif de la lunette ; celui-ci réfléchit des images brillantes entre ses faces et diffuse par ses rayures et ses poussières, produisant un fond lumineux beaucoup plus brillant que celui du ciel pur ; de plus, les verres s'échauffent et acquièrent une aberration de sphéricité prohibitive. Il faut protéger l'objectif du rayonnement solaire direct à l'aide d'un parasoleil. Je l'ai réalisé à l'aide d'un disque d'aluminium de 70 cm de diamètre porté à l'extrémité d'un mat en cornières soudées à l'autogène, de 8 mètres de long. Celui-ci était fixé au rebord de la coupole afin d'éviter que les vibrations produites par le vent ne se transmettent à la lunette. Le parasoleil était manœuvré par un palan.

Mesures effectuées :

Pendant les mois d'avril, septembre et octobre 1950, j'ai examiné Mercure avec le polarimètre de Lyot muni du grossissement 900, suivi du compensateur de polarisation atmosphérique, et de deux filtres colorés au choix, l'un vert, l'autre rouge.

A cette époque, les miroirs de la lunette étaient recouverts d'une couche d'aluminium ; par suite, il fallait compenser ou corriger la polarisation instrumentale.

Au mois d'octobre, les circonstances furent remarquablement favorables ; à plusieurs reprises, les images absolument parfaites se projetaient sur un fond du ciel très sombre. Ces circonstances me permirent d'effectuer des mesures de polarisation locales pendant 16 journées, en vert et en rouge, et de mesurer même les taches sombres de la surface.

Courbes de polarisation du centre du disque :

Les mesures effectuées au centre du disque (ou bien au milieu du terminateur lorsque la phase dépasse 90°) définissent la courbe de polarisation de la figure 11. Elles correspondent aux régions claires de la surface.

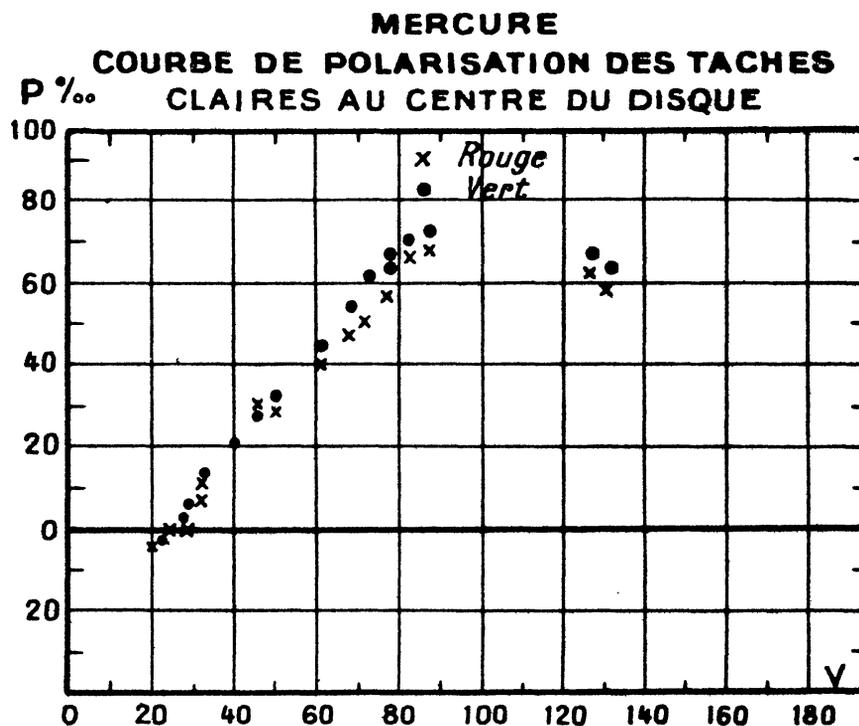


FIG. 11. — Mercure : Courbe de polarisation des taches claires au centre du disque.

Croix : En lumière rouge.

Points : En lumière verte.

Cette courbe s'écarte très peu de celle obtenue par Lyot pour la lumière de l'ensemble de l'astre, ainsi que de celle de la Lune.

Les mesures en lumière verte concordent avec les mesures en rouge pour les petits angles de phase, elles deviennent très légèrement plus fortes à mesure que la phase augmente. Nous verrons bientôt une explication de ce phénomène.

Polarisation des taches claires et sombres :

A la faveur des images exceptionnellement détaillées dont j'ai pu bénéficier, j'ai comparé la polarisation des taches sombres de la surface avec celle des régions claires voisines. Pour les petits angles de la phase, on ne peut déceler de différence sensible, mais à la quadrature, vers $V = 90^\circ$, la polarisation est nettement plus forte sur les taches sombres ; elle varie grossièrement en sens inverse de l'albedo.

Cette propriété qui s'observe également sur la Lune confirme encore la grande analogie entre les structures des sols dans ces deux astres.

Polarisation des cornes du croissant.

Pour les petits angles de phase, la polarisation dans les régions polaires, au bord du disque, est sensiblement celle des régions claires du centre de la planète. A mesure que la phase augmente, la polarisation s'accroît, un peu plus vite aux cornes du croissant qu'au centre du disque, et plus fortement en vert qu'en rouge. A la quadrature, la différence de polarisation entre les cornes et le centre atteint 6 millièmes en vert et 3 millièmes en rouge. Toutefois ces différences de polarisation sont irrégulières.

Explication de la polarisation des cornes du croissant :

Ces particularités de la polarisation des bords du disque, près des pôles, ne s'observent pas sur la Lune.

Pour les expliquer, j'ai supposé l'existence d'une faible atmosphère autour de la planète.

En effet, la brillance d'une atmosphère planétaire observée depuis la Terre augmente avec la distance θ au centre du disque, car l'épaisseur interposée est sensiblement :

$$1/\cos \theta$$

La brillance varie aussi avec la phase V , comme $\frac{1 + \cos^2 V}{2}$ et avec la longueur d'onde,

comme λ^4 . Si B_a est la brillance au centre du disque, à la phase nulle, avec la radiation λ_0 , la brillance de l'atmosphère en un autre point de la planète est :

$$B_a \left(\frac{\lambda_0}{\lambda} \right)^4 \frac{1 + \cos^2 V}{2 \cdot \cos \theta}$$

La lumière diffusée par cette atmosphère est polarisée dans une proportion : $P = \frac{\sin^2 V}{1 + \cos^2 V}$

Cette polarisation se compose avec celle du sol, et si $B_s \cdot \varphi(V)$, $\varphi(\theta)$ et $P_s(V)$ sont la brillance et la polarisation du sol, on observe la polarisation résultante :

$$P = \frac{P_s B_s + P_a B_a}{B_s + B_a}$$

soit encore sensiblement, puisque $B_a \ll B_s$: $P = P_s + \frac{B_a}{B_s} P_a$

Ainsi :
$$P(V, \theta, \lambda) = P_s(V) + \frac{B_a}{B_s} \frac{\sin^2 V}{\varphi V} \left(\frac{\lambda_0}{\lambda} \right)^4 \frac{1}{2 \cdot \psi(\theta) \cdot \cos \theta}$$

Cette relation permet d'exprimer la différence entre les polarisations mesurées en vert ou en rouge, en fonction de V et θ :

$$(P_V - P_R)_{V,\theta} = \frac{B_a}{B_s} \frac{\sin^2 V}{\varphi(V)} \frac{1}{2 \cdot \psi(\theta) \cdot \cos \theta} \left[\left(\frac{\lambda_R}{\lambda_V} \right)^4 - 1 \right]$$

De même, la différence entre les polarisations au centre du disque et à la distance de ce centre est :

$$(P_0 - P_\theta)_{V,\lambda} = \frac{B_a}{B_s} \frac{\sin^2 V}{2 \cdot \varphi(V)} \left(\frac{\lambda_R}{\lambda_V} \right)^4 \left[\frac{1}{\psi(\theta) \cdot \cos \theta} - 1 \right]$$

Les mesures sont effectuées avec le filtre vert tel que $\lambda_V = 0,54 \mu$,
et le filtre rouge tel que : $\lambda_R = 0,65 \mu$,
pour $\theta = 0^\circ$ et $\theta = 60^\circ$, le long du terminateur pour lequel $\psi(\theta) = 1$.

On a dans ces conditions les relations suivantes, fonctions de l'angle de phase V seulement :

$$\text{Au centre du disque : } (P_V - P_R)_{\theta=0} = \frac{B_a}{B_s} \cdot 0,55 \cdot \frac{\sin^2 V}{\varphi(V)}$$

$$\text{Aux cornes du croissant : } (P_V - P_R)_{\theta=90^\circ} = \frac{B_a}{B_s} \cdot 1,1 \cdot \frac{\sin^2 V}{\varphi(V)}$$

$$\text{En lumière verte : } (P_{60^\circ} - P_0)_V = \frac{B_a}{B_s} \cdot 1,1 \cdot \frac{\sin^2 V}{\varphi(V)}$$

$$\text{En lumière rouge : } (P_{60^\circ} - P_0)_R = \frac{B_a}{B_s} \cdot 0,50 \cdot \frac{\sin^2 V}{\varphi(V)}$$

La quantité $\varphi(V)$ peut se calculer à l'aide de la courbe photométrique de la lumière globale de Mercure. La colonne II du tableau ci-après donne, en fonction de V , les valeurs de cette courbe, en différences de magnitude, d'après A. Danjon (1949). La colonne III donne le rapport d'éclat E .

La surface éclairée de la planète varie comme $\frac{1 + \cos V}{2}$, elle est donnée par la colonne IV.

I V	II ΔM	III E	IV S	V $\varphi(v)$	VI $\frac{\sin^2 v}{\varphi(v)}$
0	0,00	1,00	1,00	1,00	0,000
20	0,68	0,53	0,97	0,55	0,213
40	1,21	0,33	0,88	0,38	1,09
60	1,74	0,20	0,75	0,27	2,78
80	2,45	0,10	0,59	0,18	5,25
100	3,05	0,061	0,42	0,14	6,80
120	3,93	0,027	0,25	0,11	6,90

La brillance moyenne globale $E/S = \varphi(v)$ ainsi que le rapport $\frac{\sin^2 v}{\varphi(v)}$ occupent les deux dernières colonnes.

Les graphiques de la figure 12 expriment les observations en fonction de : $\frac{\sin^2 v}{\varphi(v)}$

POLARISATION DE L'ATMOSPHÈRE

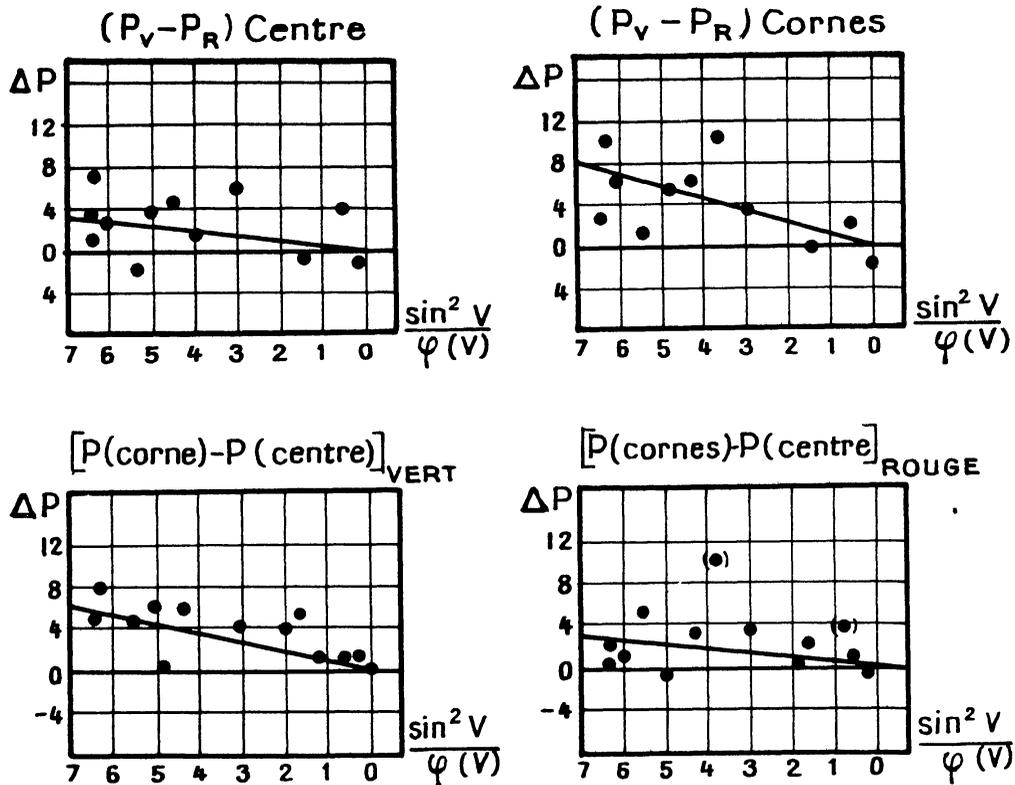


FIG. 12. — Mercure : Polarisation attribuable à l'atmosphère.

La dispersion des mesures est forte en raison principalement des taches de la surface. Cependant les mesures indiquent une relation linéaire entre les différences de polarisation et la variable $\frac{\sin^2 v}{\varphi(v)}$ conforme aux formules exprimant que les polarisations observées aux cornes sont attribuables à l'atmosphère de Mercure.

Au centre du disque, pour $V = 90^\circ$, la différence des polarisations en vert et en rouge est 4 millièmes. Au bord des cornes du croissant, cette différence est de 8 millièmes. Dans les deux cas, les équations donnent : $B_a/B_s = 1,2 \cdot 10^{-3}$

De même, la différence entre les polarisations aux cornes et au centre est 6 millièmes en lumière verte ; elle est 3 millièmes en rouge, et $B_a/B_s = 1,0 \cdot 10^{-3}$.

Ces déterminations de B_a/B_s s'accordent autour de la valeur $1,0 \cdot 10^{-3}$.

Ainsi, malgré la présence des taches sur la planète, la distribution de la polarisation le long du terminateur est celle que laisse prévoir l'existence d'une faible atmosphère.

Pour expliquer autrement les mesures, il faudrait supposer la surface du sol douée de propriétés spectrales et polarisantes différentes de celles de la Lune, lorsqu'on observe obliquement. Ou bien supposer la présence simultanée de plusieurs erreurs systématiques dans les mesures.

Ces deux éventualités paraissent l'une et l'autre peu probables.

Détermination de la pression atmosphérique :

B_a/B_s représente le rapport de la brillance de l'atmosphère au centre du disque à la brillance moyenne de la surface du sol déterminée au moment de l'opposition, en lumière rouge.

La brillance d'une atmosphère d'épaisseur h cm dans les conditions normales, soumise à l'éclairement E , est :

$$B = R \cdot E \cdot h \left(1 + \frac{1-\rho}{1+\rho} \cos^2 v \right)$$

soit pour $V = 0$ $B = 2 \cdot R \cdot E \cdot h$

R est la constante de Lord Rayleigh.

$$R = \frac{\pi^2 (\mu^2 - 1)}{2n\lambda^4} \cdot \frac{6(1+\rho)}{6-7\rho}$$

Avec : μ = indice du gaz = 1,00029 pour l'air.
 n = Nombre de mol. par $\text{cm}^3 = 2,9 \cdot 10^{19}$ dans les conditions normales.
 ρ = Coefficient de dépolérisation du gaz = 0,04 pour l'air.
 λ = Longueur d'onde = 0,62 μ avec le filtre rouge.

Dans le cas de l'air, on a pour le rouge :

$$R = 4,2 \cdot 10^{-9}$$

A la distance 1 U A, l'éclairement du Soleil est $E = 13,5$ phots, la brillance d'une atmosphère de composition analogue à celle de la terre, d'épaisseur h cm dans les conditions normales, est dans la direction de la source

$$B_{s\text{filb}} = 2 \cdot 4,2 \cdot 10^{-9} \cdot 13,5 \cdot h = 110 \cdot 10^{-9} \cdot h \text{ cm}$$

La brillance de la pleine lune est 0,32 stilb ; son albedo est 0,073, tandis que celui de Mercure est 0,063. Dans ces conditions, la brillance de Mercure serait :

$$B_s = 0,32 \frac{0,063}{0,073} = 0,28 \text{ stilb à 1 U.A.}$$

Puisque $B_a/B_s = 1,0 \cdot 10^{-3}$ l'épaisseur de l'atmosphère de Mercure est, dans les conditions normales, telle que :

$$\frac{110 \cdot 10^{-9}}{0,28} \cdot h \text{ cm} = 1,0 \cdot 10^{-3}$$

d'où : $h = 25$ mètres.

Cette épaisseur équivalente est environ trois millièmes de celle de l'atmosphère terrestre.

La pression au sol serait voisine de 1,0 millibars. Cette estimation numérique, très grossière, a seulement la valeur d'un ordre de grandeur.

Polarisation le long du limbe :

La polarisation de la lumière près du bord du disque, du côté du limbe, est généralement plus forte que sur les régions claires du centre du disque ; elle est de plus assez changeante. Elle résulte de deux phénomènes : le premier est l'existence de l'atmosphère, plus épaisse au bord du limbe. Le second est la présence de taches sombres, qui se lèvent ici lorsque la phase progresse. La polarisation de ces taches est plus forte que celle des régions claires ; de plus leur albedo est faible et l'atmosphère intervient pour une contribution plus grande dans la lumière qu'elles nous envoient, ce qui augmente encore la polarisation apparente.

Pour cette raison, j'ai renoncé à utiliser les mesures faites au bord du limbe pour déterminer la pression atmosphérique. La figure 13 montre les différences de la polarisation en vert et en rouge, au centre et au limbe ; elles sont portées en fonction de l'angle de phase V . La polarisation est maximum vers $V = 70^\circ$ pour la phase du matin. Compte tenu de la libration, cette présentation correspond au passage près du limbe d'une grande tache très sombre de la topographie du sol, ainsi que le montrent les dessins que j'ai réalisés en 1950 et le planisphère hermographique que j'ai pu dresser d'après les photographies de B. Lyot et H. Camichel (1953).

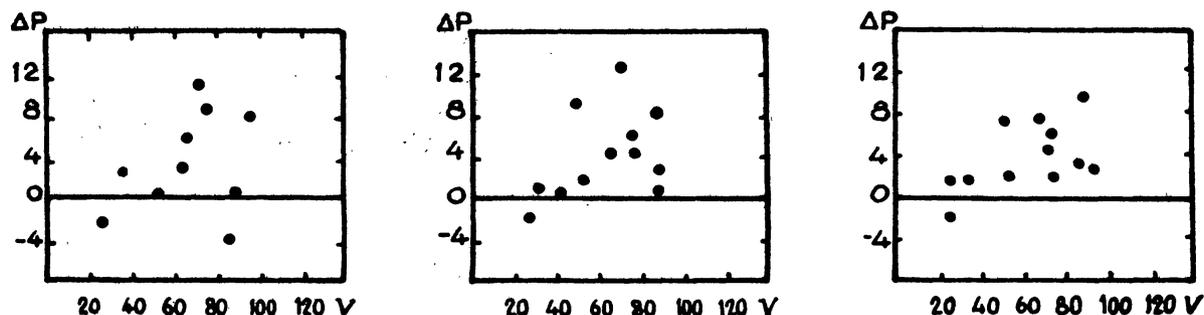


FIG. 13. — Mercure : Polarisation près du limbe.

A gauche : Différence de polarisation en vert et en rouge, au limbe.

Au centre : Différence de polarisation entre le limbe et le centre du disque en vert.

A droite : Différence de polarisation entre le limbe et le centre du disque, en rouge.

Polarisations anormales :

Le 5 octobre 1950, sous la présentation $V = 78^{\circ},5$, le pôle Nord se singularise avec une polarisation trop faible de 6 millièmes. Le 7 octobre 1950, pour $V = 69^{\circ},5$, tout le limbe montre une polarisation excessive, surtout à travers le filtre vert. Le lendemain 8 octobre, je n'observe plus rien d'anormal au limbe, mais le polarimètre indique une valeur trop faible au pôle Nord, d'environ 7 millièmes.

Ces observations sont difficiles à réaliser et, par suite, ne peuvent entraîner un caractère de certitude ; cependant, elles pourraient révéler l'existence de voiles passagers en suspension dans l'atmosphère, car un nuage de poussière soulevé par le vent affaiblit la polarisation sous ces angles de vision. De telles observations mériteraient d'être reprises et développées.

Recherches antérieures d'une atmosphère autour de Mercure :

De nombreux astronomes ont déjà tenté de mettre en évidence une atmosphère sur Mercure. Pendant le passage de la planète devant le disque solaire, une auréole claire a été observée (Antoniadi, 1934), elle s'explique par un effet de contraste physiologique.

En 1937, au moyen de son coronographe, B. Lyot a recherché l'arche lumineuse que produirait la réfraction dans une atmosphère sur le fond de la couronne solaire ; le résultat négatif indiquait une atmosphère inférieure au tiers de celle de la Terre.

En 1929, avec un polarimètre, B. Lyot a comparé les courbes de polarisation très semblables de Mercure et de la Lune, et conclu que l'atmosphère ne pouvait dépasser 21 millièmes de celle de la terre.

Au spectroscopie, les premiers résultats obtenus furent perturbés par les raies telluriques. Adams et Dunham (1932), Slipher (1933), dans le rouge, et Kuiper (1948) dans l'infra-rouge, ne purent ensuite déceler aucune bande particulière.

Cependant, à la lunette Denning (1882), Schiaparelli (1889), Fournier (1920), Antoniadi (1934) ont aperçu, sur la surface du disque, des voiles blafards qu'une très faible atmosphère suffirait à supporter.

OBSERVATIONS POLARIMÉTRIQUES DE VÉNUS

Conditions des observations polarimétriques :

J'ai examiné la polarisation sur Vénus avec le polarimètre de Lyot muni du polariscopie d'interfrange 10' derrière le réfracteur de 60 cm du Pic du Midi, grossissant 900 fois. Un filtre rouge (0,63 microns) et un filtre vert (0,54 microns) pouvaient être successivement interposés.

Pour étudier la répartition de la polarisation sur la surface du disque, il fallait localiser les mesures. Le croissant brillant dégradé de la planète étant privé de repères topographiques nets, je reportais les valeurs mesurées aux différents points de la surface sur un dessin. Ultérieurement, le document servait à déterminer et à tracer complètement les lignes d'égale polarisation, avec d'autant plus de détails que les mesures pouvaient être plus nombreuses et mieux distribuées.

Pour déterminer la direction de la polarisation, et plus particulièrement les déviations dont elle est l'objet dans certaines régions, le polarimètre était ensuite tourné de 45° dans le porte-oculaire ; un second dessin était établi, montrant les lignes d'égale polarisation dans cet azimut. En un point du disque où la proportion polarisée dans le plan de vision serait P_1 , et P_2 à 45° de ce plan, la direction de la polarisation ferait avec le plan de vision l'angle α tel que :

$$\operatorname{tg} 2\alpha = \frac{P_2}{P_1}$$

La proportion polarisée serait en ce point :

$$P = \frac{P_1}{\cos 2\alpha} = \sqrt{P_1^2 + P_2^2}$$

Dans certains cas, il était plus avantageux de rechercher directement la direction de la polarisation au point considéré de la planète.

Aux époques voisines de la quadrature, Vénus peut être observée de nuit, en l'absence de la polarisation parasite introduite par les lueurs crépusculaires ou diurnes, et sans précautions particulières. Les images ont été souvent trouvées meilleures le matin avant l'aube que le soir après le crépuscule. Aux angles de phase très éloignés de la quadrature, l'observation devait être faite dans les lueurs de l'aube et le compensateur de polarisation atmosphérique décrit p_{10} devenait nécessaire.

Vers les périodes voisines de la conjonction, il fallut observer en plein jour ; le pare-soleil était utilisé conjointement avec le compensateur, selon la technique décrite pour l'étude de Mercure.

Polarisation de la lumière de l'ensemble du disque :

J'ai examiné, pendant 12 matinées d'août et septembre 1953, la polarisation de la lumière de Vénus pour l'ensemble du disque, successivement à travers les filtres rouges et vert ; l'angle de vision restait compris entre 55° et 67° ; la proportion de lumière polarisée pour l'angle de vision 60° était —12 millièmes en lumière verte et —15 millièmes en lumière rouge et cette différence de 3 millièmes conservait systématiquement la même valeur lors des séances d'observation successives. Nous verrons que cet écart de polarisation caractérise sur Vénus la diffusion par l'atmosphère.

Répartition de la polarisation sur la surface du disque :

Bien que la surface du disque se montre presque privée de détails, le polarimètre y découvre des régions où la lumière est polarisée d'une façon particulière ; elles dessinent des taches, inégalement réparties et quelquefois bien localisées ; certaines de ces zones occupent des positions privilégiées, comme les régions polaires ; d'autres, éphémères, apparaissent en un point quelconque, se déforment ou disparaissent le lendemain ; d'un jour à l'autre, la distribution de cette polarisation est généralement modifiée complètement. Ces taches polarisées se manifestent en lumière verte et en lumière rouge, aux mêmes emplacements, avec des rapports de polarisation quelquefois différents.

La direction de la polarisation peut y être déviée de plusieurs degrés par rapport à celle de la lumière des régions voisines, soit dans un sens, soit dans l'autre.

Voici quelques observations précisant ces curieux phénomènes :

Observations sur le disque en quartier :

Lors des phases gibbeuses, vers $V = 60^\circ$, la proportion polarisée moyenne est négative avec la valeur -15 millièmes, pour la lumière de l'ensemble du disque.

Le plus généralement, les régions voisines des cornes du croissant montrent une polarisation beaucoup plus forte, dans le sens négatif, très variable ; cette polarisation particulière atteint souvent -20 millièmes et peut même dépasser -30 millièmes. Les régions polarisées de la sorte s'écartent souvent du voisinage précis des cornes et leurs contours évolue capricieusement. La direction de leur lumière polarisée subit des déviations par rapport au plan de vision, dans un sens ou dans l'autre et elles peuvent atteindre 18° . Cette étrange propriété avait déjà été remarquée en 1924 par B. Lyot.

Sur 17 observations complètes effectuées en août 1953 à l'élongation du matin, en vert et en rouge (figure 14), la région de la pointe Nord du croissant a montré une polarisation négative plus prononcée que la région Sud à 7 reprises ; moins prononcée à 5 reprises ; elle lui était égale 5 fois.

Au Nord, la direction du plan de polarisation a été notée déviée 6 fois dans le sens trigonométrique pour l'observateur à la lunette, 4 fois en sens inverse, 5 fois non déviée ; à la pointe Sud, respectivement 4 fois dans un sens, 4 fois dans l'autre et 3 fois non déviée.

Il ne semble pas qu'un sens privilégié dirige ces curieuses déviations.

En outre, la polarisation de la lumière varie souvent vers le terminateur et vers le limbe, les lignes d'égale proportion polarisée épousant la direction du contour du disque le long duquel elles se resserrent avec un gradient plus ou moins accusé. Le long de l'équateur, la proportion polarisée dans le sens négatif a été trouvée 7 fois plus élevée au terminateur qu'au limbe, 4 fois égale et 6 fois plus faible. La direction de la polarisation ne montrait pas de déviations.

Il semblait naturel de rapprocher les régions polarisées de celles des voiles révélés par l'observation visuelle et la photographie telles que je les ai décrites en 1955 dans « l'Astronomie » : la figure 14 confronte des mesures polarimétriques en vert et en rouge avec la position des nuages déterminée par comparaison des dessins et du planisphère obtenu par la synthèse des observations.

Je dois encore à l'amabilité de M. Camichel, les photographies ultra-violettes qu'il a bien voulu effectuer avec le réflecteur pendant que j'observais avec le réfracteur. Le rapprochement de tous ces documents ne révèle pas des analogies très frappantes ; les modifications d'aspect des taches polarisées paraissent aussi variées et rapides que celles des nuées visibles et ultra-violettes ; mais elles restent indépendantes dans leurs formes et leurs transformations.

On aurait pu prévoir une polarisation différente entre les nuages puisque l'atmosphère, traversée plus profondément, y apporterait une certaine contribution de lumière polarisée par des processus différents. Mais il ne semble pas qu'il en soit nettement ainsi ; la lumière polarisée paraît provenir en partie de voiles diffusants autres, répartis différemment.

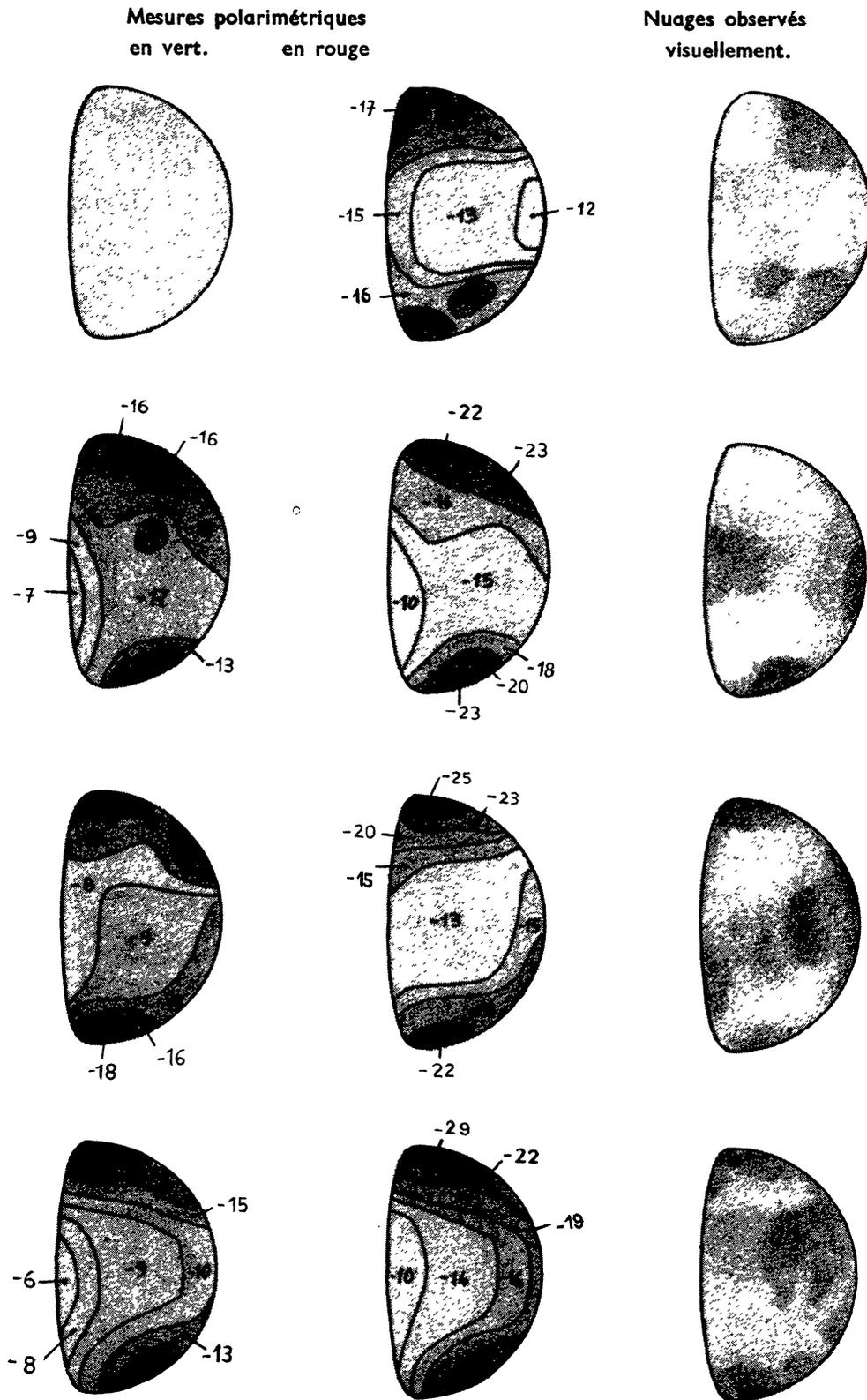


FIG. 14. — Vénus : Comparaison des observations polarimétriques, visuelles et photographiques.

29 août 1953	6 h. 30 m.	$V = 56^{\circ}6$
30 août 1953	6 h. 00 m.	$V = 56^{\circ}3$
31 août 1953	6 h. 30 m.	$V = 55^{\circ}8$
1 ^{er} septembre 1953	5 h. 30 m.	$V = 55^{\circ}3$

Entre les voiles observés visuellement et au-dessus de ceux-ci, l'atmosphère serait rarement complètement pure.

Observations sur le disque au moment de la première inversion :

J'ai examiné le détail de la répartition de la polarisation sur le globe de Vénus, en octobre 1950, alors que l'angle de vision variait autour de 10° , entraînant l'annulation puis le changement du signe de la polarisation.

Vénus étant à quelques degrés du Soleil seulement, il fallait réaliser ces observations particulièrement difficiles avec le pare-soleil, le compensateur de polarisation atmosphérique, et seulement par ciel très pur ; les miroirs aluminisés de la lunette créaient en outre la polarisation parasite décrite p. 33 et il fallait la corriger.

La figure reproduit quelques-uns de ces documents particulièrement significatifs ; ils montrent la manière dont s'est effectué, en 1950, le changement de la direction de la polarisation. La distribution de la polarisation est représentée dans ses formes et directions (il est malheureusement possible que les valeurs absolues soient erronées légèrement dans leur ensemble de quelques millièmes, si la correction de la polarisation instrumentale n'avait pas exactement la valeur adoptée pour les diverses couleurs).

La lumière est polarisée dans le sens positif sur certaines portions du disque ; elle est négative dans d'autres régions ; il arrive qu'elle soit orientée dans des sens contraires en lumières verte et rouge. Cette distribution se transforme d'un jour à l'autre en raison des circonstances atmosphériques et de la variation lente de l'angle de vision.

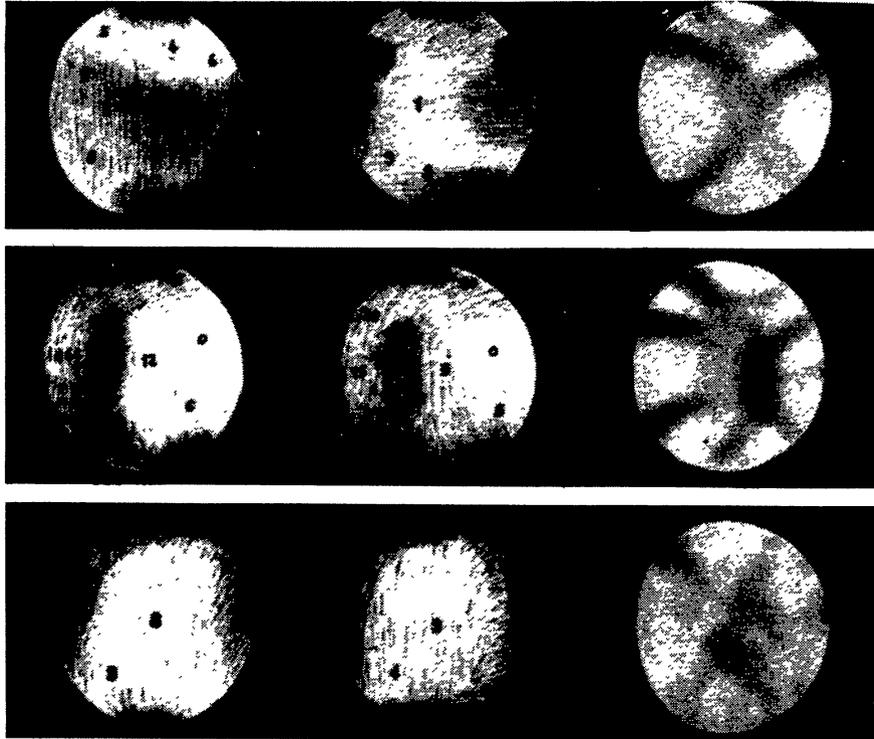


FIG. 15. — Vénus : Mesures polarimétriques vers l'angle de phase $V = 10^\circ$.

A gauche : Polarisation en lumière verte.
 Au centre : Polarisation en lumière rouge.
 A droite : Observation visuelle.

Les taches polarisées semblent souvent durer moins d'une journée ; elles ne correspondent à aucun détail visible sur les dessins effectués en même temps que les mesures (figure 15) ; le 5 octobre et le 20 octobre, ces taches se retrouvaient avec des formes semblables en lumière verte et rouge ; le 12 octobre, au contraire, la distribution de la polarisation n'était pas identique selon les deux couleurs ; les taches polarisées ont donc des courbes de polarisation différentes selon la longueur d'onde.

La direction de la polarisation est déviée sur les taches polarisées selon des écarts beaucoup plus élevés qu'aux époques de la quadrature. Près du terminateur, la direction de la vibration accompagne souvent le contour du disque. Les déviations du plan de polarisation ont lieu le plus souvent dans le même sens en lumière verte et rouge, cependant, le 12 octobre, près de la corne Sud, elles étaient opposées.

L'examen des figures 14 et 15 montre encore la polarisation anormale des régions polaires très élevée ; la direction de la polarisation y est presque toujours très fortement déviée et même jusqu'à 45° du plan de vision ; la cause de cette polarisation ne peut donc être la diffusion par l'air pur, comme le cas se présente dans les régions polaires de Jupiter ; il faut supposer ces régions recouvertes de nuages permanents. Les observations visuelles et photographiques confirment l'existence de telles formations.

Si la durée de rotation du globe est égale à la durée de révolution, tous les points du terminateur jouissent des mêmes conditions climatiques. Les études visuelles nous conduisent à cette conclusion (1955).

Les concentrations nuageuses polaires permanentes pourraient être expliquées dans ce cas par le relief du sol de Vénus.

Interprétation de la polarisation de la lumière de Vénus :

En 1929, B. Lyot avait cherché à expliquer la courbe de polarisation de la lumière de Vénus ; il concluait à la présence de voiles presque opaques dans la très haute atmosphère, formés de gouttelettes très petites, d'environ 3 microns de diamètre si l'indice de réfraction est celui de l'eau.

Les résultats apportés par les observations précédentes conservent la valeur de cette interprétation ; elles permettent de préciser le détail de la structure de cette couche, mais laissent difficilement invoquer une origine très différente à la polarisation observée. Cependant, de très petits cristaux transparents solides peuvent donner des polarisations semblables à celles des gouttelettes liquides, et cette structure paraît également vraisemblable.

Explication de la variation spectrale de la polarisation :

Les mesures décrites p. 45 révèlent une différence systématique de 3 millièmes dans la proportion de lumière polarisée globale, entre le vert et le rouge, au voisinage de l'angle de vision $V = 60^\circ$.

La courbe de polarisation globale présente un pallier vers cet angle de vision ; les phénomènes de diffraction, qui émoussent les courbes, restent donc sans effet et la proportion de lumière polarisée par les nuages dépend peu de la longueur d'onde. Au contraire, la lumière résultant de la diffusion moléculaire pure est fortement polarisée et sa brillance varie comme λ^{-4} .

Si B_a est la brillance de l'atmosphère observée et éclairée normalement, $B_n(V)$ et $P_n(V)$ la brillance et la polarisation produites par les nuages, la lumière polarisée atmosphérique se combine avec celle des nuages selon la relation semblable à celle de la p. 39 :

$$P = P_n + \frac{B_a}{B_n(V)} \left(\frac{\lambda_0}{\lambda} \right)^4 \frac{\sin^2 V}{2}$$

La différence entre les polarisations en vert et en rouge s'exprime par :

$$P_V - P_R = \frac{B_a}{B_n(V)} \cdot \frac{\sin^2 V}{2} \left[\left(\frac{\lambda_R}{\lambda_V} \right)^4 - 1 \right]$$

La brillance $B_n(V)$ de Vénus, sous l'angle $V = 60^\circ$ est 0,31 fois celle B_0 d'un écran blanc parfaitement diffusant éclairé normalement sous les mêmes conditions ; d'où numériquement :

$$0,003 = \frac{B_a}{0,31 \cdot B_0} \cdot \frac{0,75}{2} \cdot 0,9 \quad \text{et} \quad \frac{B_a}{B_0} = 0,0027$$

Dans les conditions normales, la brillance B_a d'une colonne d'air de h cm d'épaisseur, observée vers la source, rapportée à celle de B_0 d'un écran parfaitement diffusant, est pour la radiation rouge 0,63 microns :

$$\frac{B_a}{B_0} = 1,30 \cdot 10^{-8} \cdot h \text{ cm.}$$

L'atmosphère pure contribuerait donc à la lumière observée sur une hauteur h qui serait, dans les conditions normales :

$$0,0027 = 1,30 \cdot 10^{-8} h \text{ cm} \quad \text{soit } h = 2 \text{ kilomètres}$$

Cette valeur relative à l'ensemble du disque, caractérise l'atmosphère traversée sous des obliquités diverses et elle serait plus faible selon la direction verticale.

B. Lyot estimait déjà en 1929, cette hauteur à 1,5 km.

La lumière atmosphérique précédente peut provenir, d'une part, de l'atmosphère libre au-dessus de la couche nuageuse supérieure révélée par les observations visuelles et photographiques, d'autre part, en partie, des régions atmosphériques plus denses situées au-dessous de cette couche ; cette dernière lumière se trouve tamisée et fortement absorbée par les voiles nuageux.

Si on admet, par exemple, une contribution à peu près égale de ces deux lumières, l'épaisseur d'air au-dessus des nuages serait environ 800 mètres. Cette très faible valeur est le dixième seulement de l'épaisseur de l'atmosphère terrestre et la gravité de 0,88 fois celle de la surface de la Terre réduit la pression barométrique vers l'altitude de la couche nuageuse à la valeur :

$$1000 \times 0,1 \times 0,88 = 88 \text{ millibars.}$$

Les nuages supérieurs de Vénus sont donc localisés, comparativement à la Terre, à une altitude où l'air est déjà très raréfié.

L'épaisseur totale de l'atmosphère de Vénus, réduite dans les conditions normales, ne peut pas être exactement précisée par ce procédé : elle pourrait être raisonnablement de plusieurs kilomètres ; cet ordre de grandeur est compatible avec le résultat des observations photographiques ultra-violettes et avec le phénomène atmosphérique d'auréole lumineuse observé autour du disque au voisinage de la conjonction, en particulier par Edson (1950).

Interprétation des déviations de la direction de polarisation :

Pour expliquer les déviations de la direction polarisée, par rapport au plan de vision ou à la normale à celui-ci, il faut admettre que la couche nuageuse responsable de cette polarisation n'est pas isotrope. Cette anisotropie peut avoir lieu, soit à l'échelle des petites particules qui constituent le voile, soit à l'échelle plus grande des formations selon lesquelles elles sont groupées. Ce cas correspond aux formations nuageuses en bandes, en stries et en rouleaux. L'atmosphère terrestre nous montre de tels phénomènes au contact de deux masses d'air entraînées à des altitudes peu différentes par des vents opposés ; ce sont les stratus ou les strato-cumulus.

La lumière est renvoyée par de telles couches selon deux processus : d'abord, en raison du renvoi direct par chaque particule, la polarisation est parallèle ou normale au plan de vision ; ensuite, par les renvois multiples d'une particule sur l'autre, la direction polarisée étant orientée parallèlement ou perpendiculairement à la direction privilégiée de la structure striée.

Ces deux lumières polarisées différemment se composent selon une lumière douée d'une polarisation déviée. En particulier, le voisinage de l'angle de vision $V = 10^\circ$ correspond à l'annulation de la polarisation de la lumière directe et aux mesures de la figure 15 ; la polarisation de la lumière renvoyée plusieurs fois subsiste presque seule ; prépondérante, elle peut orienter la direction polarisée dans n'importe quelle direction.

L'origine de la structure striée que l'on doit supposer aux voiles de Vénus sur de grands espaces pourrait être recherchée dans les mouvements convectifs violents et étendus dont l'atmosphère de la planète semble être le siège.

Constitution des voiles nuageux :

Le polarimètre ne permet pas de distinguer la composition chimique des particules transparentes qui constituent les nuages.

Plusieurs constituants pourraient être invoqués ; le plus naturel semble être l'eau. Sans admettre nécessairement l'hypothèse de l'eau, examinons quelques-unes des conséquences qu'elle pourrait entraîner :

Le spectroscope ne montre pas les bandes d'absorption caractéristiques de la vapeur d'eau. Cependant, les mesures de polarisation précédentes ont montré que le voile nuageux, responsable de la plus grande partie de la lumière renvoyée par la planète, est nécessairement situé dans la très haute atmosphère, probablement à la limite supérieure atteinte par les mouvements convectifs de l'air.

Dans l'atmosphère terrestre, supposée complètement sèche, le gradient thermique adiabatique vertical est de 10° par kilomètre. Comme l'atmosphère terrestre contient de l'eau condensée, une partie de la chaleur est utilisée pour la condensation de la vapeur en nuages ; le gradient moyen devient voisin de 7° par kilomètre. Par ce mécanisme, la température atteint -60° C à la base de la stratosphère terrestre.

Sur Vénus, les conditions gravifiques sont comparables ; le gaz carbonique intervient pour une part plus importante dans la composition de l'atmosphère ; son gradient thermique vertical atteint 14° par kilomètre ; bien que nous ignorions encore les effets de la condensation de la vapeur, la valeur du gradient global semble raisonnablement comprise entre 5° et 10° par kilomètre. Mais la proximité du Soleil apporte deux fois plus de chaleur et la teneur plus élevée en gaz carbonique absorbe les radiations infra-rouges avec plus d'intensité ; l'équilibre thermique est réalisé avec la basse atmosphère plus chaude que sur la Terre ; la zone convective doit s'étendre jusqu'à une altitude comparativement plus grande et l'air se refroidir davantage.

On comprend donc que la température de la couche nuageuse supérieure puisse rester très basse. Sans pouvoir calculer cette température, il paraît raisonnable de penser qu'elle soit, par exemple, inférieure à -40° C.

En supposant l'air saturé, la pression de vapeur à cette température est 0,15 mm/Hg. D'après la formule de la page 107 la hauteur d'eau précipitable est :

$$h = 0,15 \times 286/233 = 0,2 \text{ mm par kilomètre.}$$

Les mesures polarimétriques indiquent un parcours moyen dans l'air d'environ 2 kilomètres ; si l'air est saturé le long de tout ce parcours, ce qui est un cas extrême, la hauteur d'eau précipitable que l'on peut espérer enregistrer au spectrographe serait au plus de 0,4 mm.

Au cours des nuits d'observation très sèches, l'atmosphère terrestre contient rarement moins de 10 mm d'eau précipitable le long du rayon visuel, soit une quantité 25 fois supérieure. La pression atmosphérique dix fois plus élevée accroît encore l'intensité des bandes spectrales telluriques qui se superposent aux bandes planétaires.

Les méthodes spectroscopiques utilisées à ce jour ne permettent donc peut-être pas encore de déceler avec certitude, à travers les bandes telluriques, la faible absorption spectrale planétaire qu'il suffirait d'invoquer pour expliquer, par la vapeur d'eau, les propriétés polarisées de la lumière de Vénus.

Des considérations analogues avaient été déjà suggérées dès 1922 par St-John et Nicholson, puis à nouveau tout récemment, par D. Menzel et F. Whipple (1954).

Convections dans l'atmosphère de Vénus :

Les constituants de l'atmosphère de Vénus, en particulier la vapeur d'eau, ne seraient pas nécessairement congelés dans leur totalité sur le sol froid de l'hémisphère non éclairé du globe.

En effet, la basse atmosphère échauffée sur l'hémisphère éclairée est le siège de mouvements convectifs ; la vitesse de rotation du globe étant négligeable, les forces mécaniques complémentaires ne perturbent pas le mouvement atmosphérique régulier que la chaleur solaire entretient. Une masse d'air élevée par la convection jusque dans les hautes couches

de la troposphère y parviendra très refroidie ; elle sera ensuite transportée jusque dans l'hémisphère obscur, sans échange appréciable de chaleur ; cette masse d'air s'affaissera alors en descendant vers le sol. La compression qui résultera de la diminution d'altitude dégagera de la chaleur et celle-ci sera utilisée pour vaporiser les particules d'eau solides ou liquides ; cette transformation est isotherme.

Lorsque toute l'eau sera vaporisée, la compression deviendra adiabatique et il y aura augmentation de la température. L'air parvenu ainsi au voisinage du sol, sera ensuite attiré vers l'hémisphère éclairé où il s'échauffera par rayonnement pour s'élever à nouveau et le cycle recommencera. Au voisinage du sol, l'air reste sec et pas très froid.

Le gaz carbonique, la vapeur d'eau, les nuages portés par l'atmosphère, ainsi que le dépôt de givre à la surface absorbant les radiations infra-rouges, contribuent aussi à limiter le refroidissement du sol par rayonnement.

Selon ce mécanisme, une chute de neige ou un dépôt de givre dans l'hémisphère obscur ne pourrait sans doute pas être alimentés au point de dessécher toute l'atmosphère ;

S'il commençait à en être ainsi, la circulation convective se rapprocherait des conditions adiabatiques pures, qui transportent le maximum de chaleur dans l'hémisphère obscure ; le sol serait réchauffé plus fortement et le mécanisme s'arrêterait.

L'état d'équilibre doit se produire lorsque les masses d'air qui s'affaissent dans la zone obscure volatilisent leurs produits condensés avant le niveau du sol ; dans le cas contraire, l'atmosphère entièrement saturée, prendrait une température égale et basse en tout point ; il y aurait disparition de la circulation convective ; le dépôt de l'eau sous forme solide sur le sol froid de la face obscure entraînant le retour aux mouvements convectifs et à l'état hygrométrique non saturé près du sol.

Pour cette raison, les nuages de l'hémisphère éclairé doivent occuper, sauf circonstances topographiques locales, les hautes régions de l'atmosphère seulement. Cette conclusion paraît conforme aux résultats de l'observation.

Les phénomènes précédents montrent que l'existence de l'eau dans l'atmosphère de Vénus ne paraît pas contradictoire avec l'ensemble des faits observés ; nous n'avons pas cependant la preuve directe de cette existence.

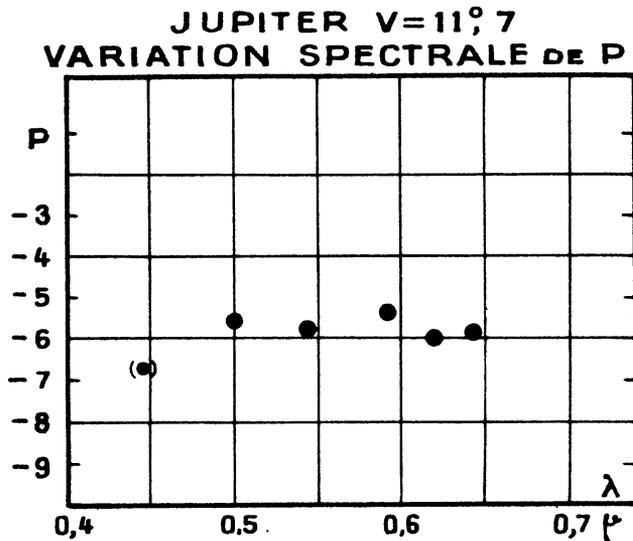
OBSERVATIONS POLARIMÉTRIQUES DE JUPITER

Introduction :

B. Lyot avait découvert, entre 1923 et 1926, que la proportion de lumière polarisée s'accroît fortement près des pôles, légèrement vers les bords du disque, mais n'est pas modifiée au-dessus des bandes sombres. Ces premiers résultats pouvaient être grandement développés, soit en localisant les mesures sur des régions plus petites du globe, soit en les étendant à des domaines spectraux mieux définis et plus variés.

Variation spectrale de la polarisation :

En 1952, l'angle de phase de Jupiter atteignait la valeur $11^{\circ}7$ voisine du maximum observable. J'ai examiné avec le réfracteur de 60 cm du Pic du Midi la polarisation de la lumière de l'astre, au centre du disque, dans des domaines spectraux compris entre 6.500 \AA et 4.500 \AA , à travers 6 écrans colorés différents.



25 mesures obtenues de la sorte donnent, par leurs moyennes, les points de la figure 16.

La lumière polarisée de Jupiter conserve sensiblement la même proportion dans les différents domaines du spectre visible, sous cet angle de vision.

FIG. 16. — Jupiter : Variation spectrale de la polarisation pour $V = 11^{\circ}8$.

Régions polaires :

En 1951, 1952 et 1955, avec la lunette du Pic du Midi, j'ai exploré les différentes régions de la surface de Jupiter, avec un bon pouvoir séparateur. Le polarimètre était suivi, au choix de trois écrans colorés. L'un, de couleur bleu clair, absorbait les radiations de longueur d'onde supérieures de $0\mu 53$; l'autre, vert, isolait le spectre aux environs de $0\mu 55$; le troisième, rouge clair, transmettait au-delà de $0\mu 62$.

En examinant ainsi la lumière polarisée le long du méridien central, on observait l'accroissement de la proportion polarisée près des pôles, découverte par B. Lyot ; la

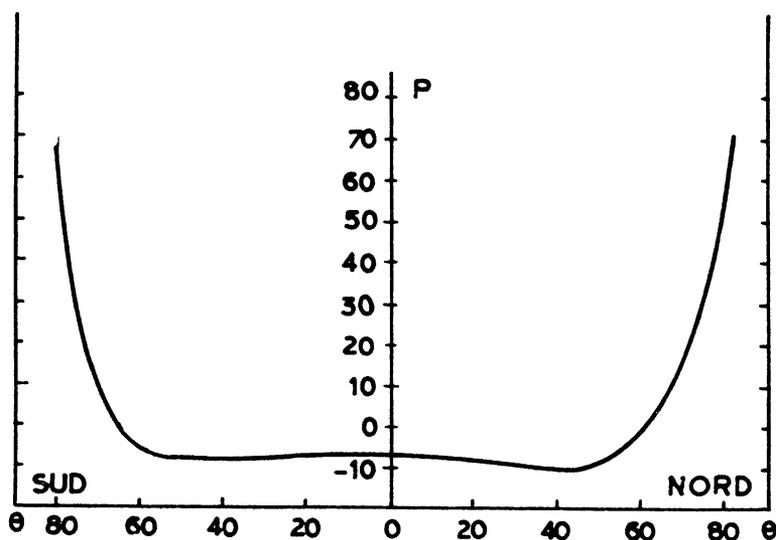


FIG. 17. — Jupiter : Polarisation moyenne le long du méridien central, en 1952 ($V = 11^{\circ}5$).

moyenne de plusieurs nuits d'observations ne montrait pas de différences appréciables entre les différentes couleurs.

En 1952, la polarisation atteignait 70 millièmes près des pôles (figure 17), les deux calottes présentant une étendue comparable. En janvier 1955, la proportion était 60 millièmes seulement, la région polarisée de la sorte était plus étendue autour du pôle Nord ; elle était, au contraire, très particulièrement exiguë au voisinage du pôle Sud.

Régions équatoriales :

Les mesures effectuées parallèlement à l'équateur, sur la bande équatoriale Nord et sur la zone équatoriale brillante, en bleu, en vert et en rouge, révélaient généralement peu de différences systématiques persistantes d'une observation à l'autre ; la proportion polarisée manifestée par la zone était quelquefois plus forte en vert qu'en rouge et elle se comportait quelque fois inversement, elle était tantôt plus accusée que celle de la bande sombre, tantôt moins accusée ; ces faibles écarts pouvaient être attribués en partie à la difficulté de la mesure et ils disparaissaient par la moyenne de plusieurs observations. Les figures 18, 19 et 20 montrent ces moyennes pour 6 observations du mois d'août 1953, comprises entre les angles de vision $9^{\circ}3$ et $10^{\circ}8$; pour 6 observations d'août 1952 et une de septembre 1953, entre les angles $11^{\circ}4$ et $11^{\circ}7$ voisins de la valeur maximum accessible à un observateur terrestre ; enfin, pour deux observations de la fin du mois de janvier 1955, lorsque $V = 2^{\circ}7$.

Ces déterminations établissent que la proportion polarisée dépend peu de l'éclat de la région et du domaine spectral isolé ; elle est fonction presque uniquement de la distance au centre θ et de l'angle de vision V .

La tache rouge, mesurée le 7 août 1952 à différentes distances du méridien central comprises entre 20° et 60° , ne révélait pas non plus de différences significatives par rapport aux régions voisines.

Interprétation des observations :

On admet souvent que l'atmosphère jovienne se comporte optiquement à la manière d'une couche nuageuse opaque surmontée d'une atmosphère pure assez dense. La polarisation et la brillance de ce gaz pur serait alors :

$$P_a = \frac{\sin^2 V}{1 + \cos^2 V} \qquad i_a = B_a \left(\frac{\lambda_0}{\lambda} \right)^4 \frac{1 + \cos^2 V}{\cos \theta}$$

celle de la couche nuageuse, compte tenu de l'absorption τ par l'atmosphère sus-jacente :

$$P_n(V) \qquad \text{et} \qquad i_n = B_n e^{-\frac{\tau}{\cos \theta}} \neq B_n \left(1 - \frac{\tau}{\cos \theta} \right)$$

Les nuages restant beaucoup plus brillants que l'air atmosphérique pur, la polarisation observée serait :

$$P_{\theta} - P_0 = \left(\frac{\lambda_0}{\lambda} \right)^4 \left[\frac{B_a}{B_n} \sin^2 V \cdot P_n \cdot \tau(\lambda) \right] \left(\frac{1}{\cos \theta} - 1 \right)$$

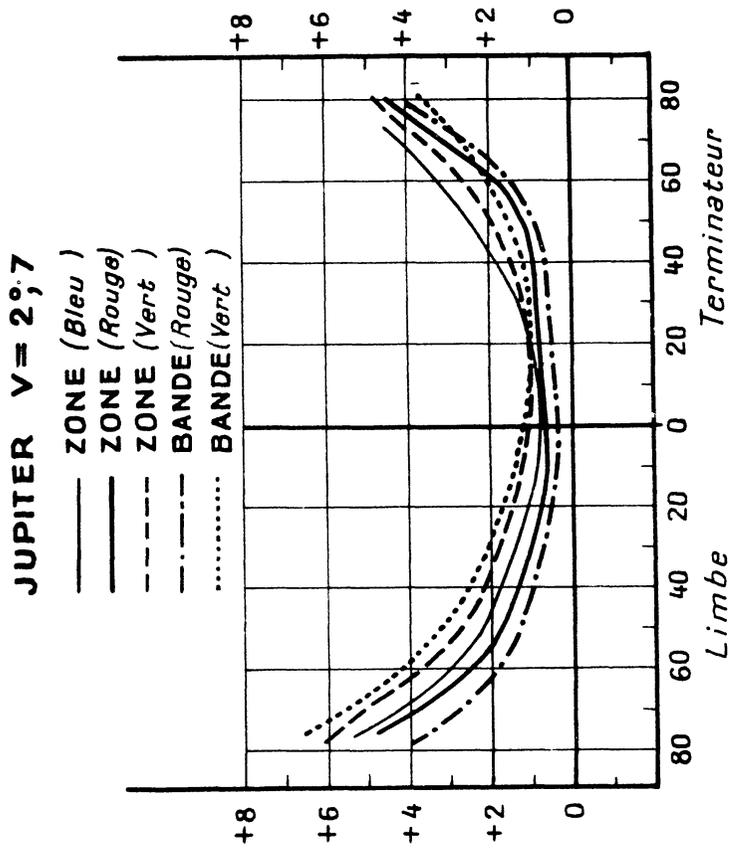
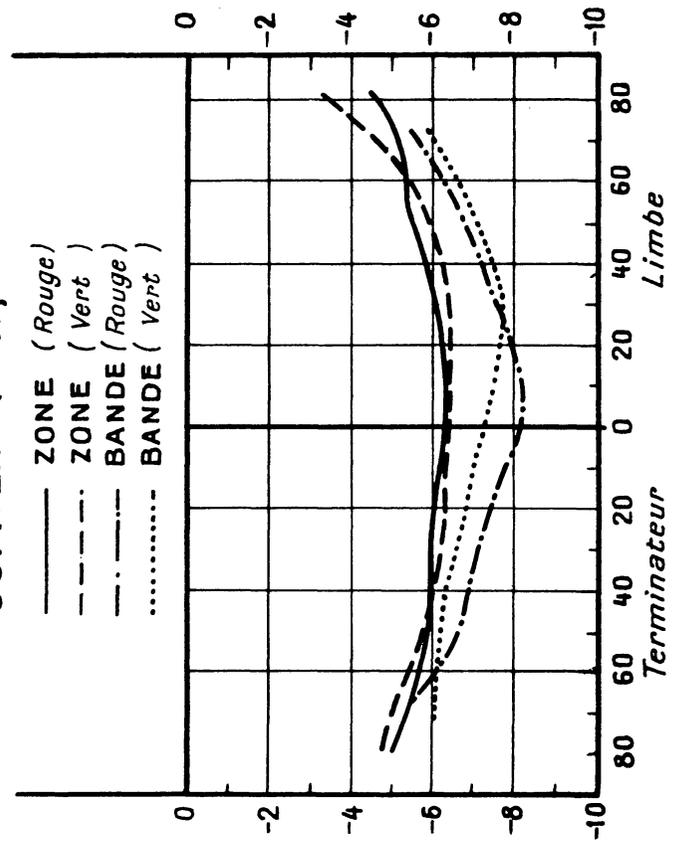
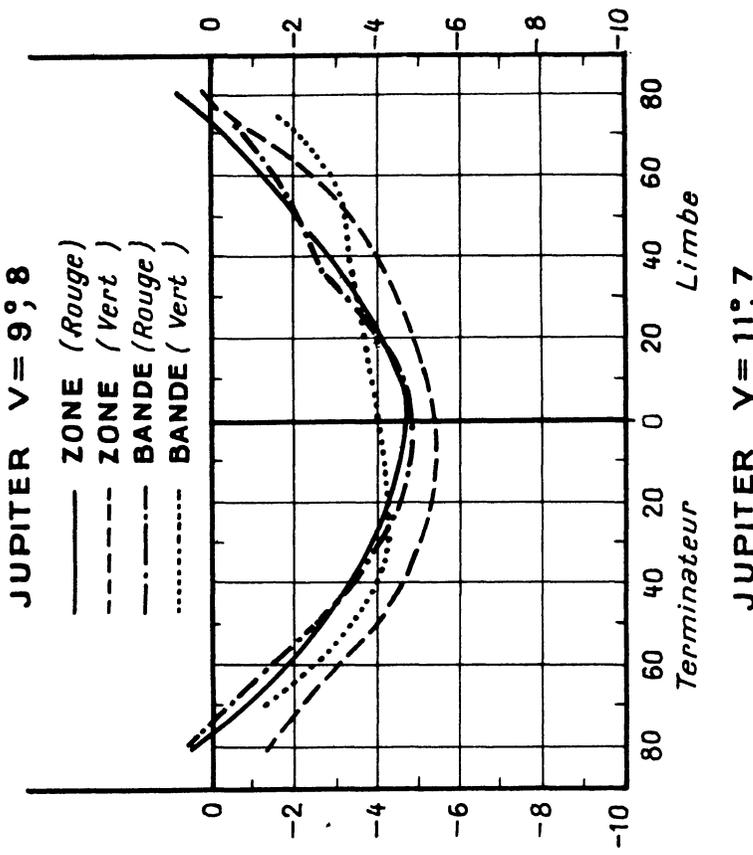


FIG. 18. — Jupiter : Polarisation moyenne, parallèlement à l'équateur en 1955, pour $V = 2^\circ 7$.

FIG. 19. — Jupiter : Polarisation moyenne, parallèlement à l'équateur, en 1953, pour $V = 9^\circ 8$.

FIG. 20. — Jupiter : Polarisation moyenne, parallèlement à l'équateur, en 1952 et 1953, pour $V = 11^\circ 7$.

Entre le centre du disque et une région distante de θ de ce centre, la différence de proportion polarisée s'exprimerait par :

$$P_{\theta} - P_0 = \left(\frac{\lambda_0}{\lambda}\right)^4 \frac{B_a}{B_n} \sin^2 V \cdot P_n \tau(\lambda) \left(\frac{1}{\cos \theta} - 1\right)$$

elle dépendrait de θ et devrait croître rapidement avec V et λ . L'observation montre qu'il n'en est pas ainsi.

Les observations polarimétriques ne permettent donc pas de conserver ce modèle d'atmosphère.

Pour expliquer les faits plus correctement, il faut supposer l'atmosphère surmontant la couche nuageuse chargée par de faibles voiles ; ces brumes seraient constituées par des particules suffisamment volumineuses pour être douées d'un pouvoir polarisant différent de celui des molécules. La brillance de cette brume serait $B_e(\lambda, V)$, sa polarisation $P_b(\lambda, V)$ et son pouvoir absorbant $\tau_b(\lambda)$

En supposant l'atmosphère et le voile peu brillant devant la couche nuageuse inférieure

$$P(V, \theta, \lambda) = \frac{1}{B_n [\cos \theta - \tau_e(\lambda)]} \left[B_a \left(\frac{\lambda_0}{\lambda}\right)^4 \sin^2 V + B_e(\lambda, V) \right] + P_n(V).$$

D'après les observations, la polarisation P varie peu avec la longueur d'onde λ dans l'étendue du spectre visible, lorsque l'angle de phase est voisin de 10° . Il faut en déduire que l'expression :

$$B_a \left(\frac{\lambda_0}{\lambda}\right)^4 \sin^2 V + B_e(\lambda, V) \cdot P_e(\lambda, V)$$

ne dépend pas beaucoup de λ pour cet angle de vision.

Le premier terme croît rapidement lorsque λ diminue, ainsi que la brillance $B_e(\lambda, V)$ des particules de brume ; il faut donc que $P_e(10^\circ)$ ait une valeur négative croissant en sens inverse de la longueur d'onde. Les calculs de la « Table of Scattering Functions » (1949) exprimés en fonction du facteur

$$\alpha = \frac{2\pi r}{\lambda}$$

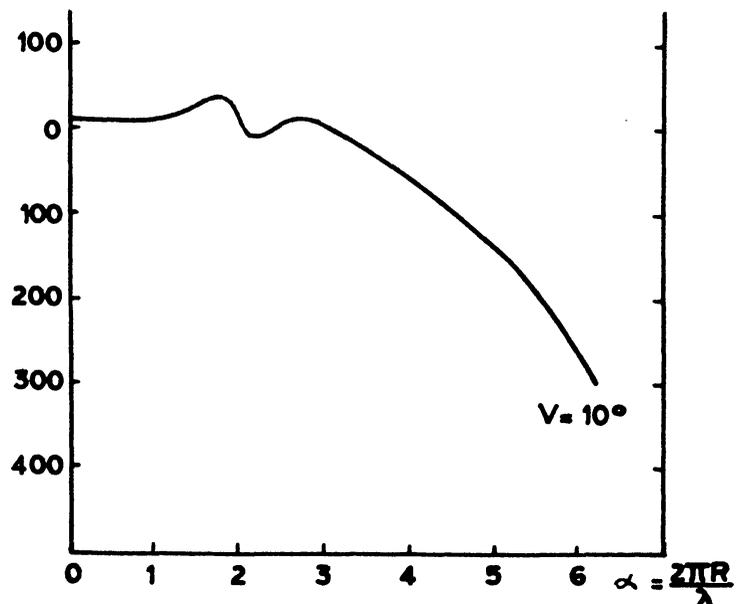


FIG. 21. — Calcul de la proportion de lumière polarisée par une gouttelette d'indice 1,33 en fonction du diamètre rapporté à la longueur d'onde.

montrent que des particules d'environ 1μ de diamètre se comportent ainsi : pour $V = 10^\circ$, leur polarisation serait 320 millièmes pour 5.000 \AA et 120 millièmes pour 6.500 \AA , lorsque l'indice est 1,33. En brouillard, ces gouttelettes polarisent en proportion plus faible, à cause des diffusions multiples. La polarisation atmosphérique serait en partie compensée par celle de la brume, plus ou moins exactement selon l'angle de vision. Les propriétés de la polarisation le long de l'équateur, sur les figures 18 à 20, s'expliquent de la sorte.

La conclusion précédente s'accorde avec les résultats des observations photographiques de Jupiter dans les différents domaines spectraux, telles qu'elles peuvent être déduites des documents recueillis en particulier depuis les recherches de Wright (1927). Les images obtenues avec les longueurs d'ondes plus grandes que le vert, montrent les détails des bandes ; elles caractérisent principalement la couche nuageuse inférieure ; l'assombrissement marqué vers les bords du disque résulte de l'absorption par l'air et les brumes sus-jacentes, accrue par la vision oblique.

Les images ultra-violettes montrent des détails différents, plus contrastés et non assombrés vers les bords, ils appartiendraient surtout à la brume générale répandue dans l'atmosphère.

Il faudrait supposer cette brume plus raréfiée au-dessus des bandes sombres de la surface nuageuse, et en partie résorbées, ainsi que les nuages, près des pôles.

OBSERVATIONS POLARIMÉTRIQUES DE LA LUMIÈRE CENDRÉE DE LA LUNE

Introduction :

Les propriétés de polarisation de la lumière cendrée de la Lune n'avait encore fait l'objet d'aucune étude. Par son faible éclat, et la proximité du croissant lunaire éblouissant, elle échappait à de telles observations. Or, sa polarisation reflète à la fois les caractères de la lumière diffusée dans l'espace par la Terre et par le sol lunaire ; les observations qui suivent vont permettre de préciser la courbe de polarisation de la Terre et la structure du sol de la Lune.

Observation de la lumière cendrée :

L'observation de la faible lumière cendrée de la Lune est gênée par la diffusion de la lumière du croissant lunaire dans l'atmosphère terrestre et dans l'instrument d'observation.

A mesure que l'angle de phase décroît, la lumière cendrée diminue d'éclat, tandis que le croissant augmente de brillance et de surface et il diffuse de plus en plus de lumière ; l'observation devient difficile aux angles de phase plus petits que la quadrature ; il faut, au-dessous de $V = 60^\circ$, un ciel très pur et une optique bien polie, dépourvue de poussières. Je n'ai pas connaissance qu'une observation ait pu être antérieurement réussie pour une phase inférieure à 40° .

Je dois à B. Lyot de m'avoir suggéré l'emploi du coronographe, sous le ciel privilégié de la haute montagne.

L'instrument de 20 cm installé au Pic du Midi m'a montré, à la faveur des nuits propices, la lumière cendrée au bord du terminateur lunaire jusqu'à 38 heures seulement avant la Pleine Lune.

Ces conditions d'observation particulières permettent la mesure de la polarisation de la lumière cendrée, généralement sans correction de la polarisation de la lumière diffusée.

Au préalable, voici quelques déterminations photométriques complétant les mesures nombreuses obtenues par A. Danjon (1928-1936) ainsi que celles de Dubois (1943-1944), (1947).

Photométrie de la lumière cendrée :

Le cache interposé au foyer principal du coronographe avait une forme de croissant, laissant dépasser la lumière cendrée ; ce cache était percé du côté du limbe lunaire par une ouverture devant laquelle étaient interposés deux filtres neutres absorbants, juxtaposés, dont les densités D_1 et D_2 avaient des valeurs voisines de 4 et de 6.



FIG. 22. — Photographie de la lumière cendrée débordant le cache du coronographe (à droite). Contre le bord du cache, les dernières montagnes le long du terminateur lunaire.

Les clichés photographiques effectués avec un foyer équivalent de 2, 8 mètres (fig. 22) montraient le cache du coronographe entouré de l'auréole de lumière diffusée, débordé par la lumière cendrée et les dernières montagnes éclairées le long du terminateur, et ajouré par l'ouverture encadrant l'image du limbe affaibli par les deux filtres (à gauche). Les plaques photographiques portaient en outre la marque d'un coin photométrique.

La durée de la pose pouvait dépasser 30 minutes, pendant lesquelles la lunette était guidée grâce à un petit prisme, interposé devant le cache, renvoyant l'image d'une partie de la surface lunaire dans un oculaire muni d'un réticule.

Un tracé microphotométrique radial montre, figure 23, une première branche de courbe AB correspondant à la lumière diffusée par le fond du ciel ; une deuxième branche CD caractérisant la lumière cendrée superposée à ce fond de diffusion ; entre D et E apparaissent les traces des montagnes le long du terminateur ; une troisième branche E et F caractérise le fond de la plaque derrière l'image du disque. Un autre tracé (non représenté) traverse ensuite l'image du limbe à travers les densités D_1 et D_2 .

Les comparaisons photométriques des déviations sur les images de plages lunaires de même nature, dans la lumière cendrée et près du limbe, déterminent le rapport

$$A = \bar{E}_0 / (E_{\ell s} + E_f)$$

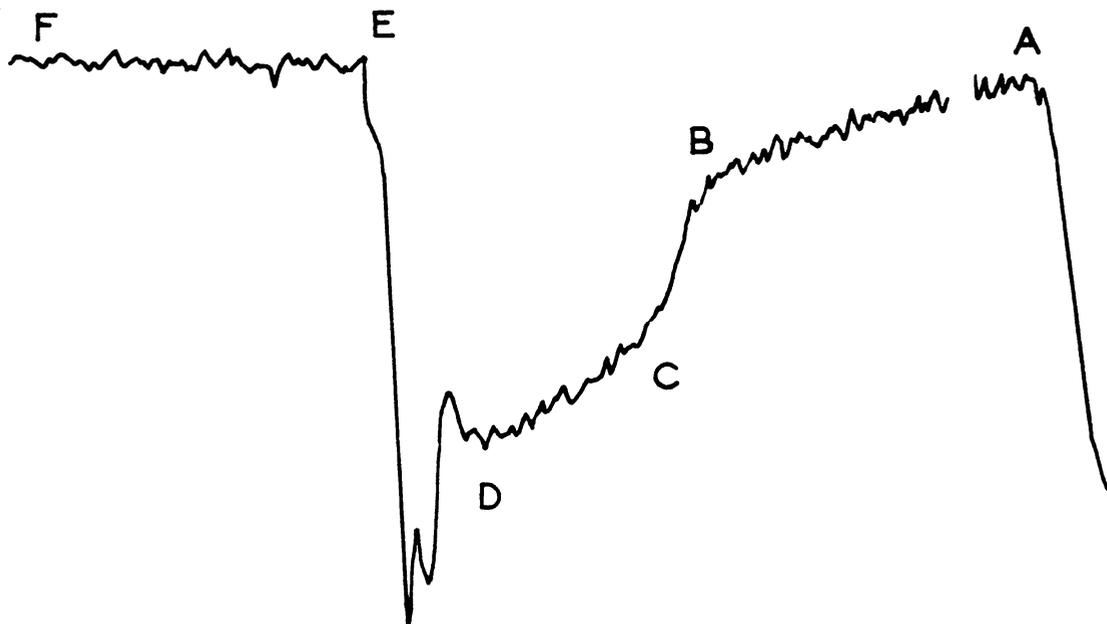


FIG. 23. — Enregistrement photométrique radial du cliché de la figure 22.

de la brillance E_0 du limbe à celle E_{lc} de la lumière cendrée à travers le fond diffusé E_{ℓ} . L'extrapolation de la branche AB du tracé donne en outre $B = E_0 / E_f$ et détermine

l'inconnu $E_{lc} / E_0 = \frac{1}{A} - \frac{1}{B}$

J'ai obtenu, par ce procédé, les cinq mesures résumées dans le tableau suivant :

PHOTOMÉTRIE DE LA LUMIÈRE CENDRÉE

Date	Heure	Phase	Δm
7 mai . . . 1949	0 h. 05 m.- 0 h. 20 m.	75°33'	10,0
9 mai . . . 1949	21 h. 40 m.-22 g. 30 m.	37°32'	11,9
10 mai . . . 1949	22 h. 50 m.-23 h. 20 m.	21°18'	15,9
14 mai . . . 1949	0 h. 25 m.- 0 h. 55 m.	20°15'	16,5
1 ^{er} janvier . . 1950	21 h. 17 m.-21 h. 45 m.	28°42'	15,5

Ces déterminations reportées sur la figure 24 prolongent, dans un domaine antérieurement inaccessible, les mesures continues que A. Danjon avait réalisées vers 1935 avec le photomètre à œil de chat et à champs superposés ; elles établissent que la lumière cendrée décroît très vite aux jours qui précèdent la Pleine Lune et elles fixent les ordres de grandeur nécessaires aux mesures de polarisation.

Des mesures plus nombreuses montreraient probablement pour ces petits angles de phase, une brillance variable, même en quelques heures, parce que la lumière cendrée est produite alors seulement par un très fin croissant lumineux sur le globe terrestre et que les conditions météorologiques peuvent varier sur les régions de la Terre successivement éclairées par suite de la rotation diurne.

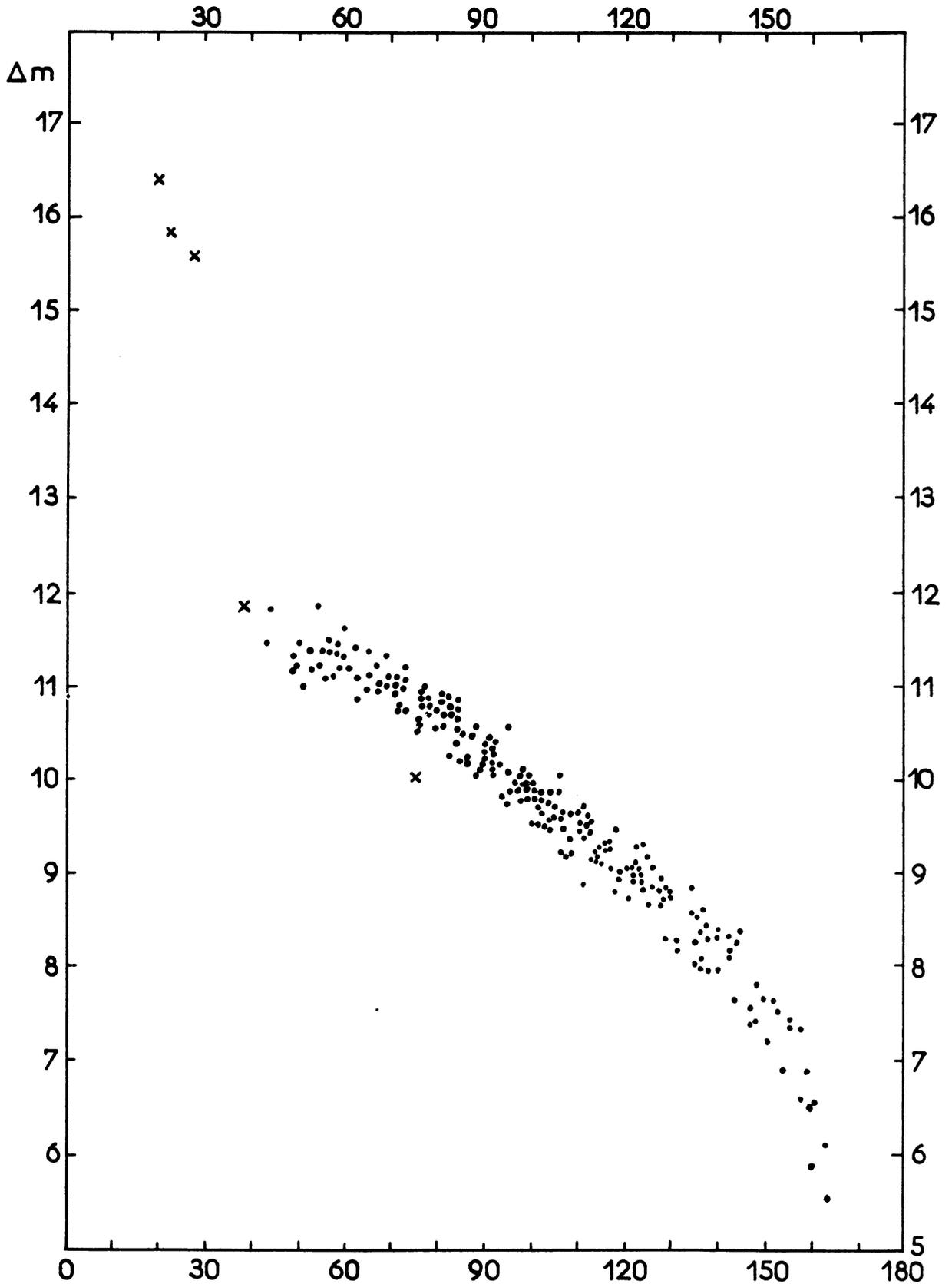


FIG. 24. — Courbe photométrique de la lumière cendrée.

Points : Mesures de A. Danjon.

Croix : Nouvelles mesures pour les petits angles de vision.

Polarimètre visuel pour la lumière cendrée :

Les mesures photométriques précédentes, jointes à celles de la Lune déterminées par Rougier (1933-1937), montrent que la lumière cendrée reste plus brillante que 10^{-6} stilb pour les angles de phase supérieurs à 35° . La mesure de la polarisation est donc accessible dans ce domaine avec le polarimètre à grille décrit page 8 et elle peut être effectuée visuellement.

L'appareil était fixé derrière le coronographe du Pic du Midi. Le polariscope à grille demi-onde constituée par 10 barreaux de 0,5 mm de largeur, est placé au foyer secondaire ; il recouvre une partie de l'image de la Lune, qui mesure 28 mm de diamètre ; le polariscope est précédé des lames de compensation et de polarisation auxiliaire du polarimètre de Lyot. Une lentille de 10 cm de foyer sert d'oculaire, elle grossit 30 fois l'image lunaire et forme une image de l'objectif de 5 mm de diamètre sur un œilleton.

Extension des mesures aux grands angles de phase :

Pour les angles de phase élevés, la Lune doit être observée dans les lueurs du crépuscule ; celui-ci produit un fond lumineux polarisé qui perturbe les mesures ; on élimine l'influence de ce fond en utilisant le compensateur de polarisation atmosphérique décrit page 19. Un prisme biréfringent interposé devant l'œil dédouble l'image de 3° ; on l'oriente de façon que les franges produites par le fond lumineux uniforme s'imbriquent et se détruisent dans la partie commune des deux régions du champ dédoublé. Les franges produites par la lumière cendrée ne sont pas altérées. J'ai pu observer ainsi jusqu'à la phase 158° , c'est-à-dire 36 heures après la Nouvelle Lune, et des circonstances atmosphériques très favorables permettraient d'observer pour des phases encore plus voisines de 180° ; il ne serait plus nécessaire alors d'utiliser un coronographe, une lunette ordinaire suffirait.

Extension des mesures aux petits angles de phase :

Lorsque l'angle de vision est inférieur à 35° , la brillance insuffisante ne permet plus de mesurer visuellement ; de plus, la lumière diffusée par la Lune cesse d'être négligeable et perturbe les mesures. On peut alors opérer photographiquement ; le polarimètre photographique décrit plus loin, page 64, permet de déterminer séparément les brillances du fond lumineux B_f et de la lumière cendrée B_c ainsi que la polarisation P_o résultant de leur composition ; la polarisation du fond diffusé P_f a même valeur que celle de la lumière de la Lune ; en corrigeant celle-ci par celle-là :

$$P_{lc} = \frac{P_o (B_{lc} + B_f) - P_f B_f}{B_{lc}}$$

Pour ces petits angles de vision, la polarisation est sans doute variable d'un jour à l'autre ou au cours d'une même nuit, comme la brillance, car elle caractérise de même la lumière renvoyée par un très fin croissant du globe terrestre le long duquel l'état météorologique peut changer considérablement d'une circonstance à l'autre ou par suite de la rotation de la Terre.

Courbe de polarisation de la lumière cendrée :

Les premières mesures ont été effectuées au Pic du Midi entre le 7 avril et le 9 mai 1949 pendant 8 nuits d'observation. J'ai développé ultérieurement ces mesures grâce à 10 nuits favorables en 1950 et 6 nuits en 1952, entre les phases $V = 36^\circ$ et $V = 138^\circ$. La polarisation est plus forte sur les taches sombres que sur les régions claires, car elle conserve la même valeur sur les régions d'éclat comparable au centre et au bord lunaire et ne dépend pas de l'obliquité de la surface.

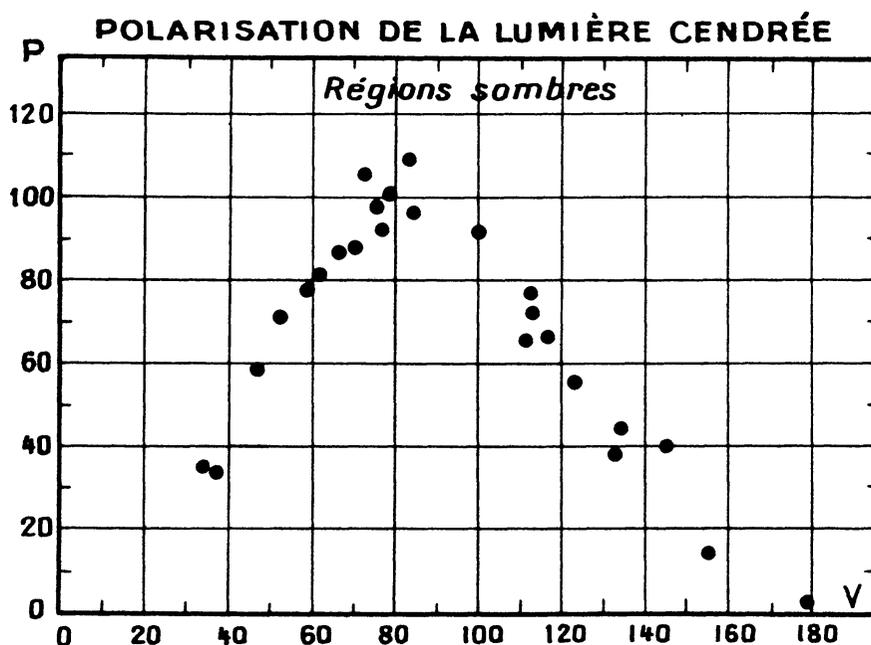


FIG. 25. — Courbe de polarisation de la lumière cendrée sur les régions sombres de la surface lunaire.

La figure 25 montre la courbe résultant des mesures réalisées sur les régions sombres, dont le pouvoir diffusant est voisin de 0,12. La proportion de lumière polarisée, maximum pour $V = 80^\circ$, atteint la forte valeur 100 millièmes. Les caractéristiques de cette courbe seront expliquées plus loin.

Polarisation de la lumière de la lune éclipsée :

Pendant les éclipses de lune, la partie plongée dans le cône d'ombre reste généralement assez lumineuse pour se prêter aux observations polarimétriques. Lors de l'éclipse du 13 avril 1949, la Lune conservait, dans l'ombre de la Terre, quelques traces de polarisation faible, 1 à 2 millièmes, variables d'un point à l'autre du disque.

En 1951, un polarimètre que j'avais réalisé pour l'Observatoire d'Athènes, permit à M. Focas d'étudier l'éclipse de la Lune du 29 janvier 1953, et de confirmer l'existence d'une faible polarisation dans la lumière de la lune éclipsée. Cette polarisation résiduelle est en partie attribuable au fait que l'angle de vision n'est pas nul, mais varie ainsi que le

plan de vision d'un point à l'autre de la surface lunaire éclipée ; elle provient aussi en partie de la polarisation acquise par la lumière incidente lors de la traversée de l'atmosphère terrestre : la réfraction subie près du limbe terrestre ne peut produire de polarisation que s'il y a création d'un faisceau réfléchi polarisé perpendiculairement et ce ne semble pas être le cas ; mais la lumière diffusée deux fois dans l'air pur par les molécules est presque totalement polarisée avec la vibration perpendiculaire au bord du limbe, elle peut éventuellement constituer une petite partie de la lumière, en grande partie réfractée cependant, qui éclaire la Lune.

Les mesures précédentes permettent d'ajouter deux points de plus à la courbe de la figure 25 pour les angles de phase 0° et 180° .

Polarisation de la lumière cendrée sur les différentes régions du sol lunaire :

La polarisation de la lumière cendrée est maximum sur les régions les plus sombres de la surface lunaire et elle est minimum sur les régions les plus claires ; pour une même tache, elle reste pour tous les angles de vision proportionnelle à celle des régions claires.

J'ai cherché à relier cette proportion à l'albedo du sol lunaire, en mesurant la polarisation lors de la quadrature sur plusieurs régions lunaires assez petites. L'observation visuelle ne se prêtait pas facilement à ces déterminations et j'ai préféré entreprendre une étude photographique.

Le polarimètre photographique pour la lumière cendrée repose sur le principe décrit page 26 ; il est composé d'une lame compensatrice suivie d'une grille polariscopique à lame demi-onde, construite avec des barreaux de 0,4 mm de large ; elle couvre la surface du rhomboèdre qui sert d'analyseur sur un champ en losange de 37 mm et 47 mm de diagonale. Cette grille est placée au foyer secondaire du coronographe sur l'image de la Lune qui mesure 28 mm de diamètre ; une lentille de champ de foyer 20 cm recouvre la grille et forme une image de la pupille sur un objectif de foyer 6 cm. Cet objectif projette l'image de la Lune sur la plaque photographique avec un diamètre de 12 mm. Le cache du coronographe laisse dépasser l'image de la lumière cendrée.

Un filtre jaune est ajouté dans le faisceau.

Le 5 octobre 1950, l'angle de vision était 78° . Entre 2 h. 35 m. et 3 h. 07 m., 8 clichés successifs ont été obtenus avec un temps de pose de 3 minutes, en introduisant avec la lame L, respectivement 8 valeurs différentes de la polarisation compensatrice. La figure 26 montre l'une des images de la lumière cendrée, dépassant le cache à bord rectiligne du coronographe ; elle est parcourue par les bandes de la grille polariscopique.

La précision est deux à trois millièmes sur des régions de la dimension de Mare Crisium.

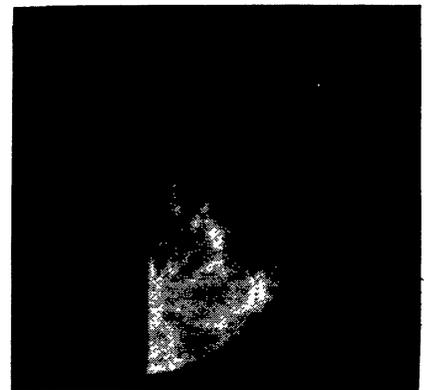


FIG. 26. — Photographie de la lumière cendrée débordant le cache du coronographe, striée par les bandes du polariscope.

Le cliché précédent a permis de réaliser les mesures suivantes :

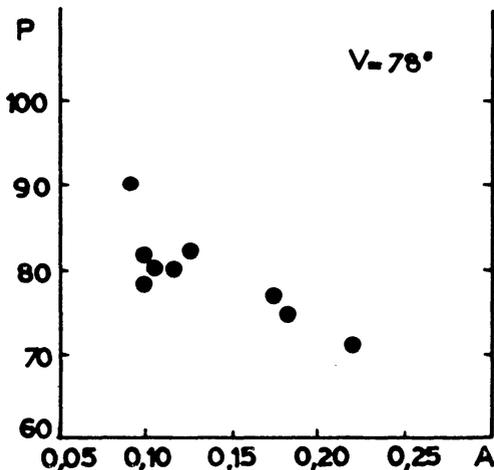
POLARISATION DES TACHES DE LA LUMIÈRE CENDRÉE

Région	Polarisation	Pouvoir diffusant
Faecunditatis M.	81 millièmes	0,110
Tranquilitatis M.	91	0,097
Serenitatis M.	80	0,114
Nectaris M.	81	0,127
Vaporum M.	79	0,100
Crisium M.	81	0,104
Région au N. de Crisium M.	78	0,18
Région Hipparque-Triesnecker	76	0,19
Région Tycho	71	0,222

La colonne III du tableau, donne le pouvoir diffusant de la région lunaire, ou rapport de la brillance de cette région, à celles qui donneraient, dans les mêmes conditions, un corps blanc parfaitement diffusant.

Cette valeur a été mesurée avec une petite lunette formant une image de la Pleine Lune de diamètre D_1 (environ 1 cm) sur une plaque photographique portée par un châssis à glissières ; quatre images successives sont exposées avec des éclairagements dans les rapports 1, 2, 4 et 8 en interposant des diaphragmes dont les diamètres sont en progression géométrique de raison $\sqrt{2}$. Une cinquième image est encore exposée en interposant une lentille dans le plan focal et en mettant la plaque au point sur l'image de l'objectif projetée par la lentille ; cette image est un disque uniforme de diamètre D_2 voisin de celui D_1 de la Lune ; son éclairagement correspond à celui de la lumière globale de la Lune multiplié par $(D_1/D_2)^2$.

Les opérations photométriques simples permettent la comparaison de la brillance de chaque région lunaire à celle de la brillance moyenne de la Lune qui vaut, d'après Rougier, 0,125 fois celle d'un écran parfaitement diffusant.



La figure 27 montre la relation qui associe la polarisation de la lumière cendrée au pouvoir diffusant du sol lunaire.

Cette courbe permettra de préciser la nature du sol lunaire (page 68).

FIG. 27. — Proportion de lumière polarisée par différentes régions de la Lune, dans la lumière cendrée, en fonction du pouvoir diffusant.

Angle de vision $V = 78^\circ$.

Variation spectrale de la polarisation de la lumière cendrée :

La polarisation de la lumière cendrée varie avec la longueur d'onde. Pour examiner cette propriété, j'ai réalisé le montage photographique suivant :

L'image de la lumière cendrée se projette au foyer secondaire du coronographe sur une lentille de foyer 100 mm et de diamètre 30 mm., elle forme l'image de l'objectif

sur la grille polariscopique de cellophane demi-onde. Cette grille couvre un carré de 12 mm de côté, ses barreaux ont 0,3 mm de large et elle est découpée dans une feuille de cellophane double (page 11).

Une deuxième lentille de foyer 100 mm projette l'image de la Lune sur une troisième lentille de foyer 58 mm qui forme finalement l'image de l'objectif du coronographe et de la grille sur la plaque photographique. Cette image finale de 7 mm de diamètre est striée par les barreaux du polariscope.

Au foyer principal du coronographe, le disque est remplacé par un écran opaque en papier noir plus grand que le champ, qui arrête toute la lumière du ciel ; il est percé d'une ouverture épousant la forme du croissant de la lumière cendrée. Différents filtres peuvent être interposés sur le trajet lumineux.

Au cours des séjours que j'ai pu effectuer au Pic du Midi, je n'ai malheureusement rencontré qu'une seule fois une nuit favorable pour l'emploi de cet instrument.

Le 6 octobre 1950, pour $V = 70^\circ$, un cliché à travers un filtre rouge de longueur d'onde moyenne $0 \mu 63$ a donné la proportion de lumière polarisée 35 millièmes, elle était 54 millièmes en lumière vert-jaune vers $0 \mu 55$.

La polarisation de la lumière cendrée, très sélective, diminue beaucoup dans le rouge.

Des mesures plus nombreuses à travers des filtres variés permettraient de préciser cette intéressante propriété.

Origine de la polarisation de la lumière cendrée :

Les résultats qui précèdent peuvent être expliqués de la façon suivante : la lumière diffusée par la Terre acquiert une forte polarisation maximum vers 90° du soleil ; elle est ensuite renvoyée par la surface du sol lunaire et en partie dépolarisée ; elle revient vers la Terre avec une polarisation diminuée.

Cette polarisation résiduelle varie avec l'albedo des taches, car la dépoliarisation par la surface lunaire dépend du pouvoir diffusant. Elle varie en sens inverse de la longueur d'onde car la contribution de la lumière atmosphérique terrestre polarisée augmente vers les courtes longueurs d'onde.

Courbe de polarisation de la Terre :

L'angle de polarisation de la Terre vue de la Lune est supplémentaire de celui de la Lune.

On obtient donc la courbe de polarisation de la Terre, vue de l'espace, en effectuant sur la figure 25 une symétrie par rapport à $V = 90^\circ$ et une affinité verticale qui compense la dépoliarisation par le sol lunaire.

Cette affinité peut être calculée grâce aux considérations suivantes :

Des observations effectuées en ballon (Dollfus 1956) montrent que, à 1000 m. d'altitude, par ciel pur, la polarisation de la lumière provenant de la diffusion atmosphérique est déjà largement prépondérante par rapport à celle venant du sol et des brumes basses ; il est à fortiori ainsi lorsqu'on s'élève encore plus.

La lumière de l'ensemble de la Terre provient donc, d'une part, des molécules de

l'atmosphère terrestre polarisée selon les lois de la diffusion moléculaire $P = \frac{\sin^2 V}{1 + \cos^2 V}$ et de brillance proportionnelle à $\left(\frac{\lambda_0}{\lambda}\right)^4 (1 + \cos^2 V)$; d'autre part, des nuages, de la mer et du sol, faiblement polarisée.

Les nuages de glace ont une polarisation beaucoup plus faible que celle de l'air, les nuages de gouttelettes se comportent également ainsi (sauf dans la direction faisant 40° avec le Soleil, pour laquelle la lumière renvoyée par le premier arc en ciel blanc est assez fortement polarisée) ; la polarisation de ces nuages est quelquefois plus forte que celle du sol, mais par contre ils masquent une partie de la basse atmosphère dont ils suppriment la contribution à la polarisation observée.

La mer renvoie une lumière provenant en partie de la réflexion sur la surface et en partie de la réfraction dans l'eau, suivie de la diffusion et de la sortie de la lumière avec une nouvelle réfraction, dont la polarisation est détruite pour l'ensemble du globe par la symétrie de sa provenance.

On peut finalement combiner la lumière atmosphérique polarisée avec celle faiblement polarisée provenant également des nuages, de la mer et du sol de la façon suivante :

La brillance de l'atmosphère pure est, dans les conditions normales, pour 1 cm d'épaisseur, $2,25 \cdot 10^{-8}$ fois celle d'un écran parfaitement diffusant ; la hauteur équivalente de l'atmosphère terrestre est 8 km ; au bord du disque elle offre un parcours oblique plus grand qui, pour l'ensemble du globe, est environ doublé. L'atmosphère terrestre a donc pour brillance $2 \times 8 \times 10^{+5} \times 2,25 \times 10^{-8} = 36 \cdot 10^{-3}$ fois celle de l'écran, pour $V = 90^\circ$ et sa lumière est totalement polarisée.

La brillance du sol, de la mer et des nuages est globalement celle de la Terre vue de l'espace, déduction faite de la brillance de l'atmosphère, soit, d'après A. Danjon, dans la direction de la source 0,38 fois celle d'un diffuseur parfait ; à 90° du Soleil l'éclat de la Terre est réduit 5,5 fois et la surface éclairée devient $1/2$, la brillance rapportée à l'écran est donc en moyenne $0,38 \frac{1}{5,5} 2 = 0,14$; la brillance du fond constituée par le sol, la mer et les nuages sous l'atmosphère, doit être environ 0,10 et sa proportion de lumière polarisée environ 0,10.

La proportion polarisée de la lumière diffusée par la Terre à 90° du Soleil a donc pour ordre de grandeur :

$$P = \frac{0,10 \times 0,10 + 0,036}{0,14} = 0,33$$

Ce calcul très sommaire a seulement la valeur d'une estimation. **La courbe de polarisation de la Terre se déduit donc de la figure 25, les angles de vision étant supplémentaires et les proportions de lumière polarisées multipliées par**

$$\frac{1}{0,33} = 3,3$$

La courbe n'est pas symétrique et le maximum a lieu pour $V = 100^\circ$; l'épaisseur d'atmosphère traversée est en effet plus grande au bord du disque terrestre qu'en son centre ; lorsque la Terre est vue comme un fin croissant l'épaisseur d'air traversée devient très grande.

Déterminations de la structure de la surface lunaire :

Les mesures polarimétriques de la lumière cendrée permettent de déterminer les propriétés de dépolarisation de la matière du sol lunaire.

La proportion polarisée de la lumière terrestre est, d'après le calcul précédent, pour $V = 90^\circ$ environ 0,33. En supposant cette proportion totale, la polarisation résiduelle R du sol lunaire s'obtient en divisant par 0,33 l'échelle des ordonnées de la figure 27 et se lit sur la figure 28 (cercles).

J'ai comparé cette propriété dépolarisante du sol lunaire avec celles que manifestent des échantillons minéraux. Eclairées en lumière incidente polarisée, seules les substances très absorbantes ont montré une polarisation résiduelle suffisamment forte ; sur les cendres volcaniques, en particulier, cette dépolarisation varie régulièrement avec le pouvoir diffusant. J'ai mesuré la dépolarisation sur des échantillons de cendres provenant d'éruptions connues. Je dois ces échantillons à l'amabilité de M. Cailleux.

ÉCHANTILLONS DE CENDRES VOLCANIQUES MESURÉES

Désignation	Provenance	R (millièmes)	Pouvoir diffusant
T† 120	La Guadeloupe - La Souvière 1838	177	0,32
T† 86	Alcatanago - Guatemala	415	0,22
T† 33	Vallon Keltha - Grande Comore 1918	435	0,09
T† 78	Ambrym-Marombe - Nouvelles Hébrides	405	0,09
T† 79	Cneig'Cove Ambrym - Nouvelles Hébrides	495	0,085
T† 12	Merapi - Badadov 1934	200	0,27
T† 82	Montevideo - Mandoza 1932	94	0,56
T† 14	Vesuve - Italie 1888	154	0,36

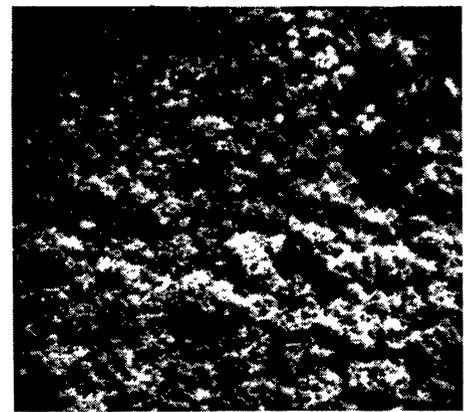
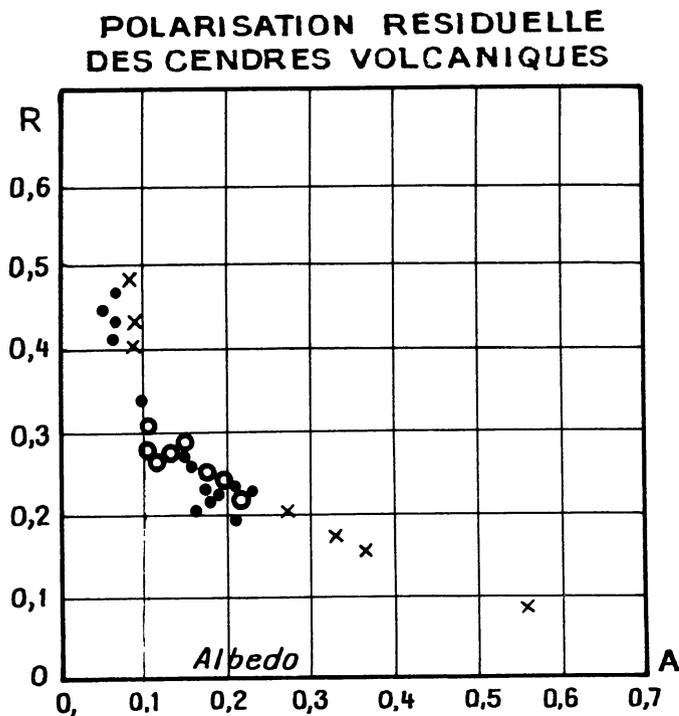


FIG. 29. — Structure microscopique d'un échantillon de cendre volcanique ayant la polarisation du sol lunaire.

FIG. 28. — Polarisation résiduelle du sol lunaire (cercles) et des échantillons de cendre volcanique (croix et points) dans la direction de la source, en lumière incidente polarisée.

Les coefficients de dépolarisation R sont reportés sur la figure 28 en fonction du pouvoir diffusant A pour ces échantillons (croix) et ceux mesurés antérieurement par Lyot (points) ; une courbe régulière apparaît, manifestant une liaison direction entre les facteurs R et A ; cette propriété semble caractériser seulement les substances granulaires très absorbantes et très diffusantes ; elle n'apparaît généralement pas sur les matières plus transparentes ou prises en masses non poudreuses.

Les mesures de dépolarisation relatives à la Lune (cercles) s'associent exactement au groupe des points correspondant aux cendres volcaniques (figure 28).

Ce résultat invite à la conclusion suivante : *la nature pulvérulente et très absorbante du sol lunaire est constituée dans ses premières couches, selon toute vraisemblance, par une matière ayant la structure des cendres volcaniques.*

La couche pulvérulente qui recouvre le sol peut n'être que très mince. Elle pourrait provenir d'une désagrégation sur place du sol lunaire, en raison des variations rapides et fréquemment répétées de l'échauffement par la radiation solaire.

Observée au microscope, une cendre volcanique ayant le pouvoir diffusant 0,13 et les proportions polarisantes et dépolarisantes du sol lunaire présente l'aspect de la figure 29.

Recherches antérieures sur la nature du sol lunaire :

La structure physique des premières couches de la surface du sol lunaire avait pu déjà être précisée grâce à l'analyse des propriétés de sa lumière.

Avec le thermo-couple, Nicholson et Pettit mesurèrent la température de la surface lunaire ; elle varie de $+100^{\circ}$ C à -150° C, en accord avec l'évolution de la phase. Au cours des éclipses de lune du 14 juin 1927 et du 28 octobre 1939, la variation de température accompagna très rapidement la variation d'éclairement. Par suite, la surface lunaire doit être peu conductrice de la chaleur ; Wasselink a déterminé (1948) qu'il fallait supposer pour cela la surface lunaire recouverte d'une poudre très fine, dont les grains ont moins de 0,1 mm de diamètre.

Avec le polarimètre, B. Lyot (1929) détermina la courbe de polarisation de la Lune et sa variation d'une région à l'autre de la surface. Il trouva au laboratoire des propriétés polarisantes semblables sur des cendres absorbantes en fins granules.

Avec le radio-télescope, Piddington et Minnett (1949) ont examiné la Lune avec les radiations de 1,25 cm de longueur d'onde et déterminé la température du sol lunaire à une profondeur plus grande que celle accessible avec le thermo-couple ; elle varie de $+30^{\circ}$ à -75° C seulement, et suit l'évolution de la phase avec un retard de plusieurs jours.

Il faut encore supposer la matière lunaire très peu conductrice, comme peut seule l'être une structure pulvérulente.

Les trois résultats précédents s'accordent avec la détermination nouvelle qui vient d'être donnée.

Remarque sur la nature pulvérulente du sol lunaire :

Les résultats qui précèdent suggèrent quelques précisions sur la structure et la tectonique lunaire.

a) Il existe pour les poudres un angle de pente limite, au delà duquel la substance s'éboule et laisse apparaître le socle sur lequel elle est posée : une modification de la polarisation pourrait en résulter sur les versants abrupts des failles ou des accidents du relief lunaire.

J'ai mesuré le « Mur Droit » et les lèvres de la « Vallée de Schroter », sous l'angle de vision $28^{\circ}5$ voisin de l'annulation de la polarisation, et sous 94° correspondant à la polarisation maximum ; dans les deux cas, je n'ai trouvé aucune différence de polarisation entre la région en déclivité et son voisinage. Ces résultats invitent peut-être à conclure à une adhérence de la poudre au sol : cette matière serait soumise dans ce cas à d'autres forces que la pesanteur.

b) Lors de la quadrature, l'intérieur des petits cratères, tels que Birt, manifestent une proportion de lumière polarisée plus faible que celle des régions volcaniques voisines ; les remparts du grand cirque Archimède montrent une polarisation moins accusée que le fond ; la pente interne polarise un peu plus faiblement que la déclivité externe. La nature du dépôt poudreux se trouve donc modifiée par place, selon les circonstances de la tectonique, ou celles de la formation des cratères.

c) Certaines régions comme Linné, montrent de curieux changements d'aspect au cours de la phase, qui ont souvent été pris pour des variations à la surface ; ils résultent généralement de la nature hétérogène du sol, constitué par des poudres dont les indicatrices de diffusion diffèrent. Les rapports de brillance de deux taches voisines peuvent s'inverser lorsque l'angle d'éclairage se modifie. La figure 30 montre un dépôt de cendre volcanique marbré par deux traînées obtenues en saupoudrant une cendre de nature différente ; en éclairage oblique la région paraît uniforme ; en éclairage normal, les traînées dessinent une croix claire.



FIG. 30. — Variation apparente de l'aspect d'une surface constituée par deux poudres ayant les propriétés de polarisation du sol lunaire.

A droite : Éclairé par un faisceau perpendiculaire à la surface - A gauche : Éclairé par un faisceau rasant

OBSERVATIONS POLARIMÉTRIQUES DE MARS

Conditions des observations :

J'ai examiné la polarisation de la lumière de Mars à l'Observatoire du Pic du Midi, avec la lunette de 60 cm, au cours des séjours suivants :

Du 3 février au 27 mars 1948, j'ai obtenu 350 mesures en 25 séances d'observation, comprises entre les angles de phase $V = 2^{\circ}8$ et 24° . Les images furent remarquables,

avec une persistance rencontrée rarement depuis. La longitude héliocentrique de Mars a varié de $\eta = 142^\circ$ à $\eta = 163^\circ$, elle correspondait au printemps de l'hémisphère boréal.

Du 28 décembre 1949 au 16 janvier 1950, l'angle de phase était 35° , avec la planète haute dans le ciel. La longitude héliocentrique a progressé de 145° à 155° . J'ai obtenu 80 mesures locales en 10 nuits d'observation, par belles images en général.

Du 23 mars au 11 mai 1950, entre $V = 3^\circ$ et 32° , j'ai pu avoir 220 mesures en 23 nuits, pour la période martienne de l'été boréal, entre $\eta = 183^\circ$ et $\eta = 202^\circ$. Pendant cette campagne d'observation la lunette possédait une polarisation parasite attribuable à l'aluminure des miroirs, qu'il a fallu corriger (cf. p. 33).

Du 5 mai au 16 juin 1952, entre $V = 11^\circ$ et $32^\circ 6'$, j'ai vu 24 fois Mars, au déclin de l'été boréal, pour η compris entre 230° et 244° et conservé 250 mesures, dont certaines ont pu être exécutées sur des régions planétaires de très petites dimensions.

Du 19 juillet au 19 août 1952, entre $\eta = 262^\circ$ et 269° , l'angle de phase atteignait la valeur élevée de 44° , tandis que le diamètre apparent restait supérieur à $10''$; par contre, la planète était basse, à travers les lueurs du crépuscule. Cependant, 5 soirées bénéficiant d'une turbulence acceptable permirent d'ajouter 80 nouvelles mesures, particulièrement significatives.

Du 5 avril au 25 avril 1954, 5 nouvelles observations montrèrent Mars sous la phase 36° au milieu de l'été boréal et donnèrent 56 mesures. J'ai pu ensuite laisser les instruments à M. Focas, venu de l'Observatoire d'Athènes pour continuer les mesures et il a pu prolonger la campagne d'observation jusqu'au 5 juillet. 41 séances d'observation lui permirent de réaliser 440 intéressantes mesures, qu'il étendit jusqu'à la longitude $\eta = 278^\circ$, au delà de l'équinoxe d'automne boréale.

L'ensemble des observations, réparties sur plus de 7 années, représente plus de 1500 mesures distinctes et elles ont été limitées surtout par les difficultés qui accompagnaient encore l'observation astronomique à près de trois mille mètres d'altitude, sous nos latitudes, avant l'installation du téléférique.

Origine de la polarisation de la lumière de Mars :

La proportion de lumière polarisée provenant des différentes régions de la surface de Mars résulte de l'ensemble de plusieurs processus liés respectivement au sol, à l'atmosphère, aux nuages blancs, aux brumes violettes, aux voiles de poussière.

Dans les régions où l'atmosphère de Mars était pure, j'ai observé la polarisation du sol combinée avec celle de l'atmosphère. J'ai pu ainsi déterminer la pression atmosphérique et corriger les mesures pour obtenir les courbes de polarisation réelles des différentes taches de la surface du sol. Les régions martiennes au-dessus desquelles l'atmosphère se montrait chargée de voiles s'offraient à l'étude de la polarisation par ces brumes. L'interprétation des observations fera l'objet du chapitre suivant.

Courbe de polarisation des régions claires au centre du disque :

La mesure des régions claires au centre du disque donne la ***courbe de polarisation avec observation normale***.

Les déterminations sont reportées, pour chacune des quatre oppositions 1948, 1950, 1952, 1954, sur les quatre figures 31, 32, 33 et 34, après élimination des mesures enta-

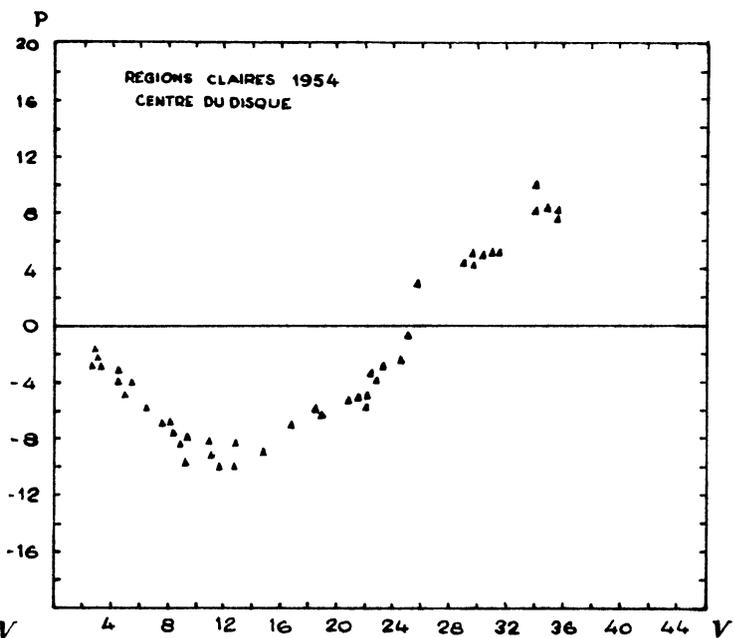
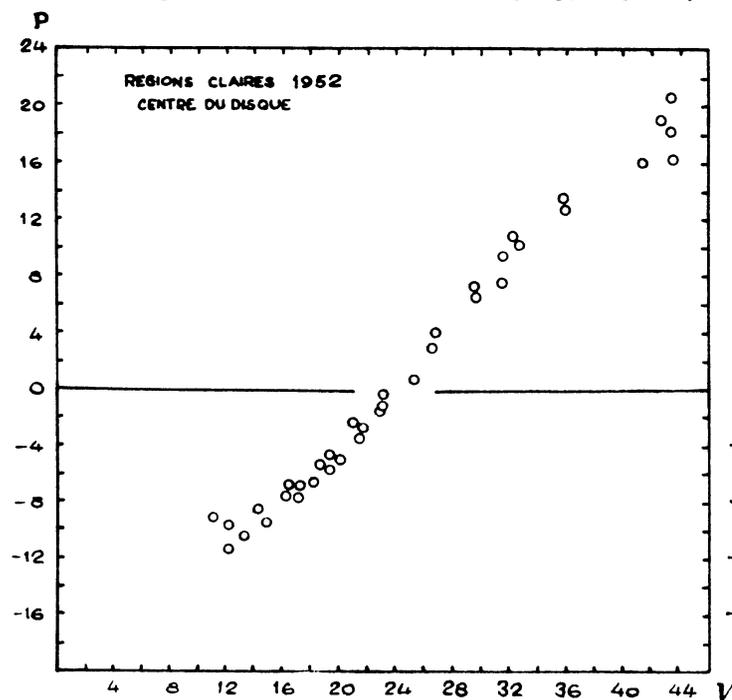
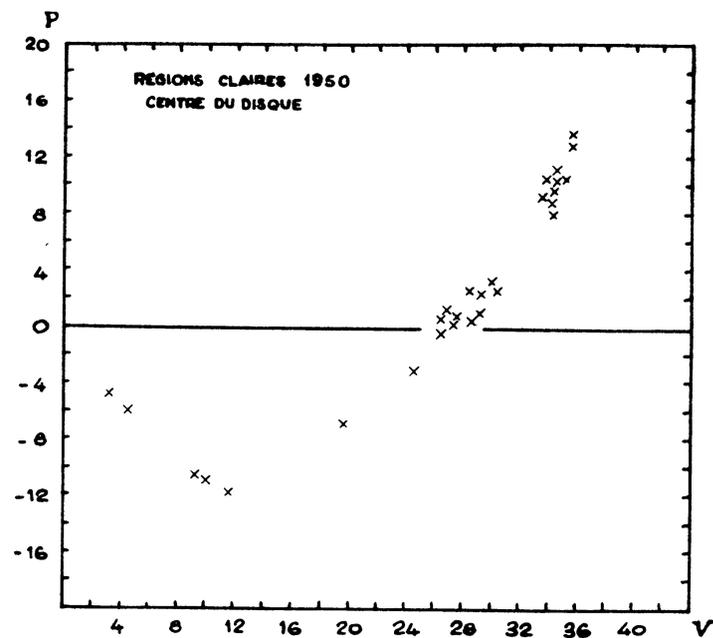
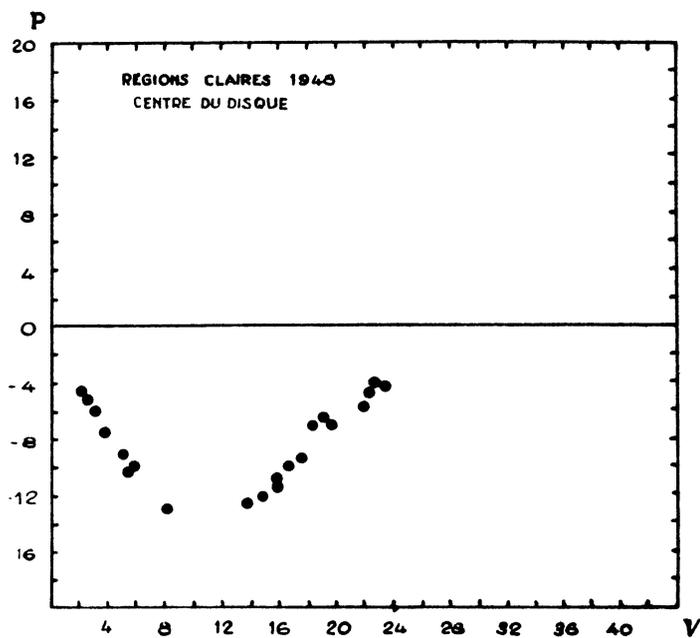


FIG. 31. — Mars : Courbe de polarisation des régions claires au centre du disque en 1948.

FIG. 32. — Mars : Courbe de polarisation des régions claires au centre du disque en 1950.

FIG. 33. — Mars : Courbe de polarisation des régions claires au centre du disque en 1952.

FIG. 34. — Mars : Courbe de polarisation des régions claires au centre du disque en 1954.

chées nettement par la présence de voiles nuageux décelés sur la planète. La figure 35 est la synthèse des quatre séries de mesures. L'accord entre les déterminations des quatre oppositions n'est pas complet ; les mesures de 1948 et de 1950 paraissent systématiquement plus basses que les autres.

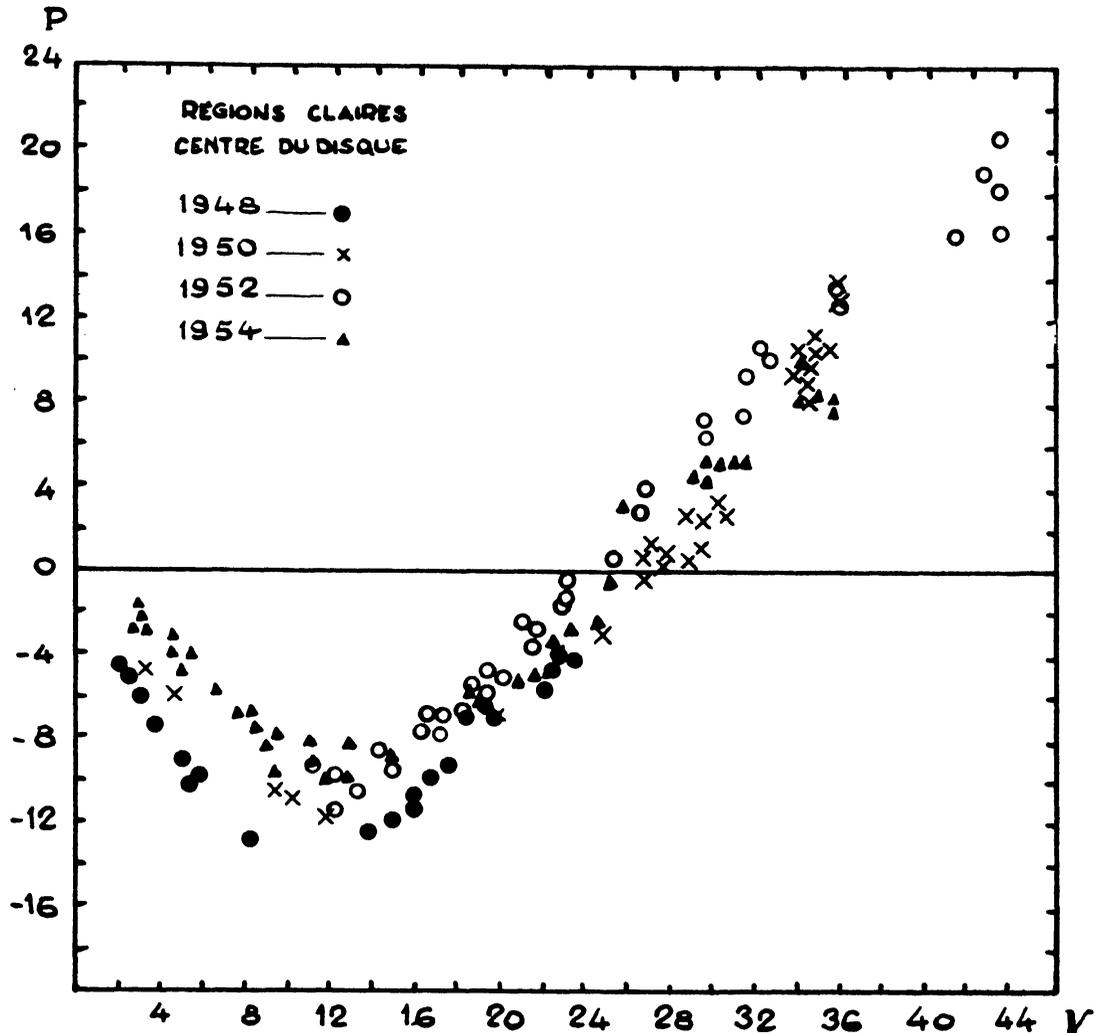


FIG. 35. — Mars : Courbe de polarisation des régions claires pour l'ensemble des observations.

Ces variations apparentes de la polarisation d'une année à une autre peuvent résulter d'une modification de l'état de pureté de l'atmosphère martienne ainsi que B. Lyot en avait observé sur la lumière globale de l'astre en décembre 1924, janvier et février 1925.

On peut aussi en rechercher l'explication dans d'éventuelles erreurs systématiques de mesures, comme le laisse supposer la régularité des courbes. Les mesures de 1950, entre $V = 0^\circ$ et $V = 31^\circ$ ont été effectuées lorsque les miroirs aluminés de la lunette produisaient une polarisation parasite ; il fallait effectuer une correction qui laisse nécessairement une part à l'incertitude.

Polarisation par les régions claires inclinées dans le plan de vision :

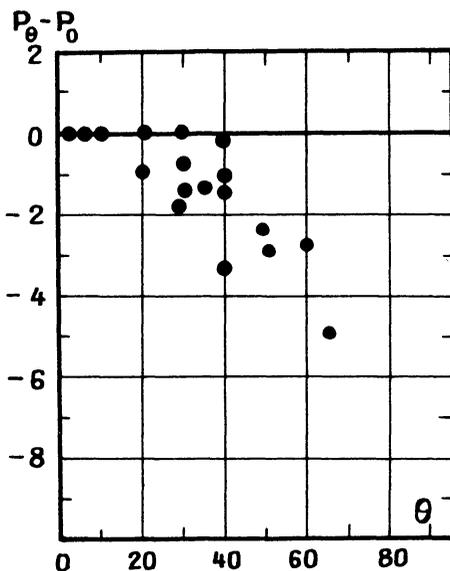
En examinant successivement la même région claire au centre du disque, puis à différentes distances du centre, le long de l'équateur, on observe une variation de la polarisation. Celle-ci est attribuable en partie à l'atmosphère martienne, qui est traversée

sous une épaisseur plus grande près des bords du disque ; en partie aussi aux images et voiles atmosphériques, plus denses aux bords levants et couchants ; enfin, en partie aux propriétés polarisantes du sol sous l'observation oblique.

La polarisation atmosphérique croît sensiblement comme le carré de l'angle de vision ; elle devient négligeable après sélection des mesures effectuées lorsque $V < 15^\circ$.

POLARISATION PAR DIFFUSION OBLIQUE

Taches claires



L'atmosphère martienne est quelquefois dégagée complètement de nuages ; l'inspection détaillée de la planète avec un oculaire fort, un filtre bleu ou un polarimètre permet d'examiner l'état météorologique et de sélectionner les mesures obtenues à la faveur d'un ciel martien particulièrement pur. Les mesures choisies de la sorte caractérisent alors la polarisation propre du sol et déterminent la courbe de polarisation des régions claires de Mars sous l'observation oblique (figure 36).

Pour un angle de vision nul le sol incliné avantage la vibration parallèle au plan contenant la ligne de visée et la normale à la surface ; la proportion polarisée semble être environ 4 millièmes pour une inclinaison de 60° . Une telle polarisation ne se manifeste pas sur la Lune, propriété qui révèle une différence notable dans les structures des sols de ces deux astres.

FIG. 36. — Mars : Polarisation par les régions claires en fonction de la distance au méridien central, à l'équateur.

Polarisation par les régions claires inclinées à 45° et à 90° du plan de vision :

J'ai essayé de mesurer les grandes régions claires (Amazonis en particulier) à différentes distances du centre, le long du méridien central ; mais les conditions météorologiques martiennes varient trop avec la latitude.

Les régions claires ont été examinées au bord du disque, à 45° de la direction du méridien, en tournant le polarimètre de 45° par rapport au plan de vision : la polarisation régulière du sol devient parallèle à l'axe cristallographique de la première lame du polariscope et n'est pas décelée. Seule une composante polarisée parallèlement ou perpendiculairement au plan contenant la ligne de visée et la normale à la surface, ou une polarisation elliptique, peut être observée dans ces conditions. 25 déterminations effectuées de la sorte dans différentes circonstances montrent de faibles polarisations, généralement inférieures à 3 millièmes, dont les vibrations sont tantôt radiales, tantôt tangentes au bord du disque et même quelquefois elliptiques.

Ces propriétés polarisantes semblent provenir principalement de faibles voiles nuageux ; en l'absence de toutes formations apparentes, la polarisation est souvent radiale et très faible, environ 1 millième ; elle provient soit du sol, soit des diffusions multiples dans l'atmosphère, soit de voiles très faibles qui peuvent échapper à l'observation.

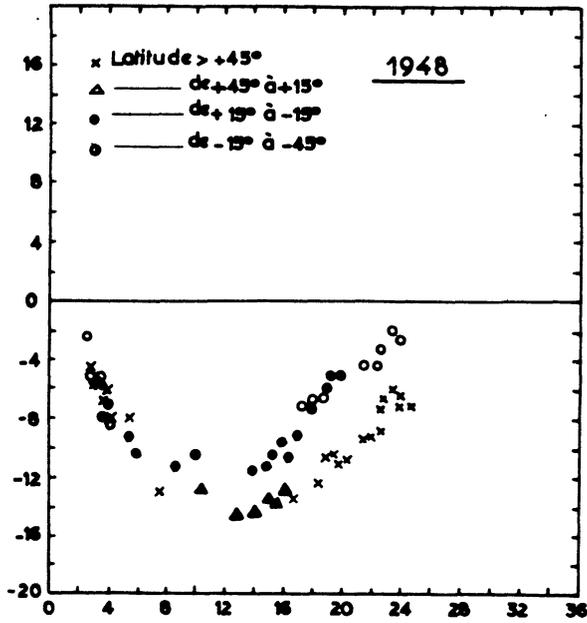


FIG. 37. — Mars : Courbe de polarisation des régions sombres en 1948.

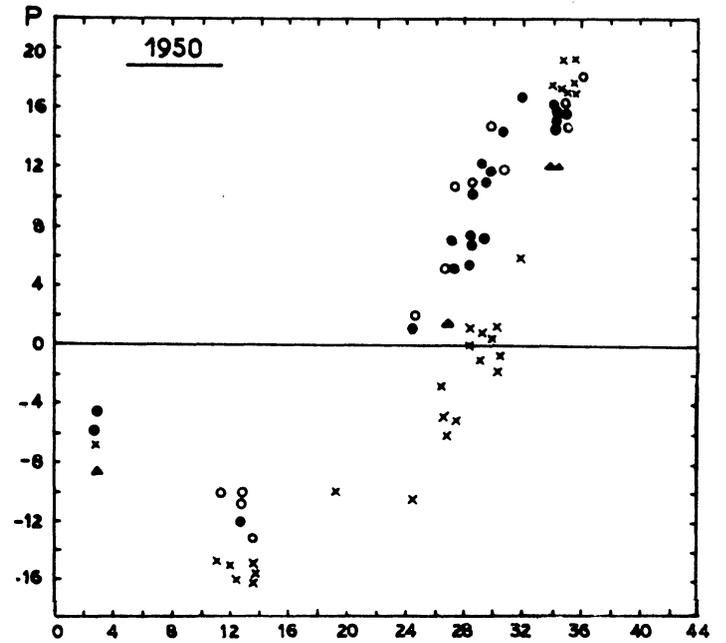


FIG. 38. — Mars : Courbe de polarisation des régions sombres en 1950.

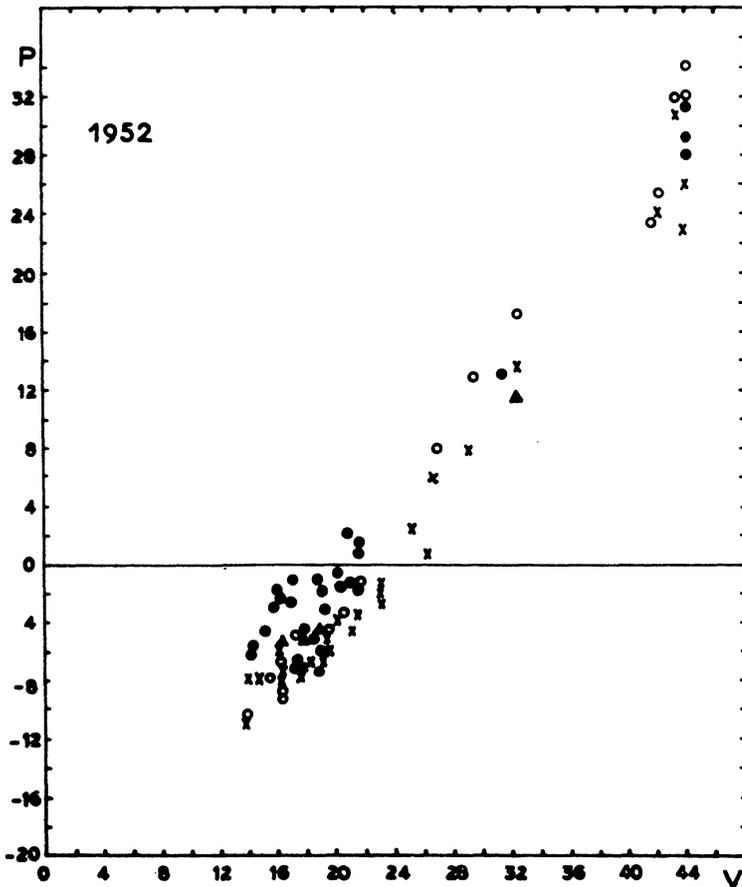


FIG. 39. — Mars : Courbe de polarisation des régions sombres en 1952.

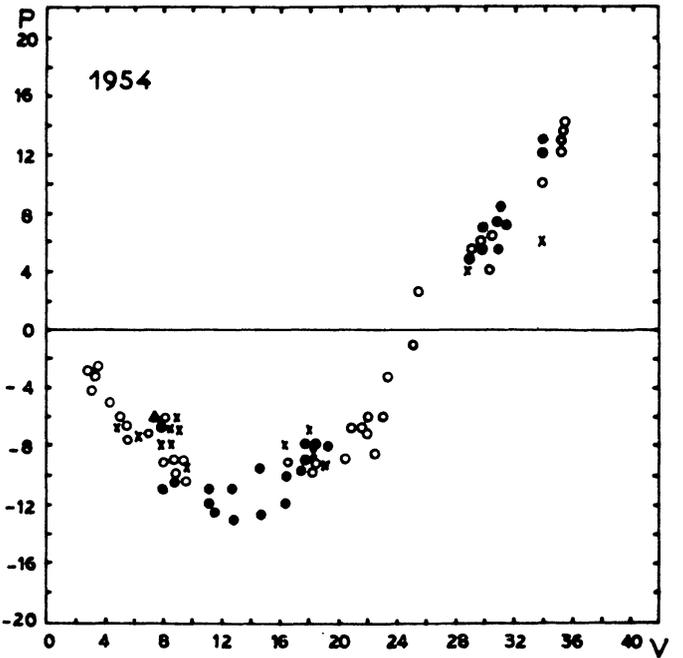


FIG. 40. — Mars : Courbe de polarisation des régions sombres en 1954.

Courbe de polarisation des taches sombres vers le centre du disque :

Les étendues sombres qui maculent la surface rouge de la planète selon une topographie familière, renvoient une lumière douée d'une polarisation variable selon la saison et la latitude.

L'évolution de cette polarisation semble accompagner le cycle saisonnier qui affecte annuellement le contraste et les colorations de ces contrées.

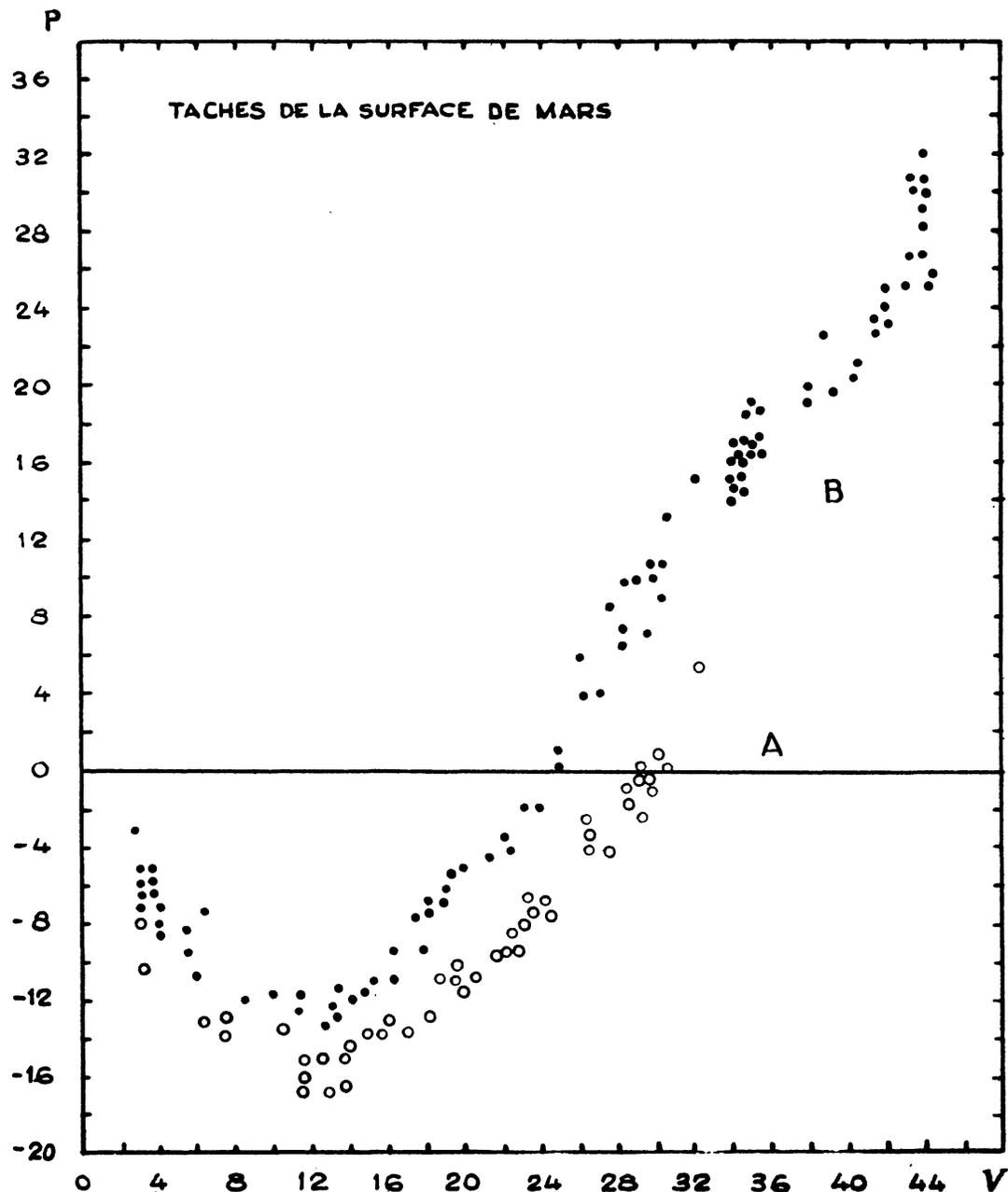


FIG. 41. — Mars : Courbe de polarisation des régions sombres.

Courbe A : Taches boréales au printemps.

Courbe B : Taches équatoriales et australes au printemps.

Les observations réalisées en l'absence de nuages martiens au cours des 4 oppositions de 1948, 1950, 1952, 1954 font l'objet des figures 37 à 40 ; les taches sombres ont été divisées en quatre groupes : le premier contient les pages dont la latitude est supérieure à $+45^\circ$ (Panchaïa, Boreosyrtris, Acidalium M.). Le second concerne les plages comprises entre $+45^\circ$ et $+15^\circ$ (Niliacus L.). Les contrées équatoriales constituent le troisième groupe, entre $+15^\circ$ et -15° (Syrtrir Major, Margaritifer S., Saebeus S.). Toutes les régions de latitude comprise entre -15° et -45° sont réunies dans le quatrième groupe (Tyrrhenum M. Cimmerium M., Sirenum M., Erythraeum M., Yapigia).

Les points se groupent en deux catégories, qui ont été séparées sur la figure 41. La courbe A caractérise la lumière renvoyée par les plages boréales de latitude supérieure à $+45^\circ$, à la fin du printemps martien de l'hémisphère Nord. La courbe B est celle des plages équatoriales ou australes, dans le courant du printemps et de l'été boréal.

Cette différence ne semble pas provenir de nébulosités persistantes qui pourraient affecter saisonnièrement l'atmosphère au-dessus de ces contrées ; elle est trop régulière et ne subit pas l'accroissement près des bords du disque qui résulterait de l'augmentation du parcours dans l'air ; elle appartient plus vraisemblablement au sol.

Le déroulement de l'évolution saisonnière des propriétés polarisantes de ces contrées se lit sur la figure 42. La différence entre les polarisations (interpolées à la valeur correspondant à l'angle $V = 25^\circ$) des taches sombres et celle des contrées claires voisines y est représentée en fonction de la longitude héliocentrique. (Je dois à l'amabilité de M. Focas les déterminations pour $\eta = 290^\circ$; elles résultent des observations qu'il a effectuées à l'Observatoire d'Athènes en 1954 avec le polarimètre que j'avais mis à sa disposition).

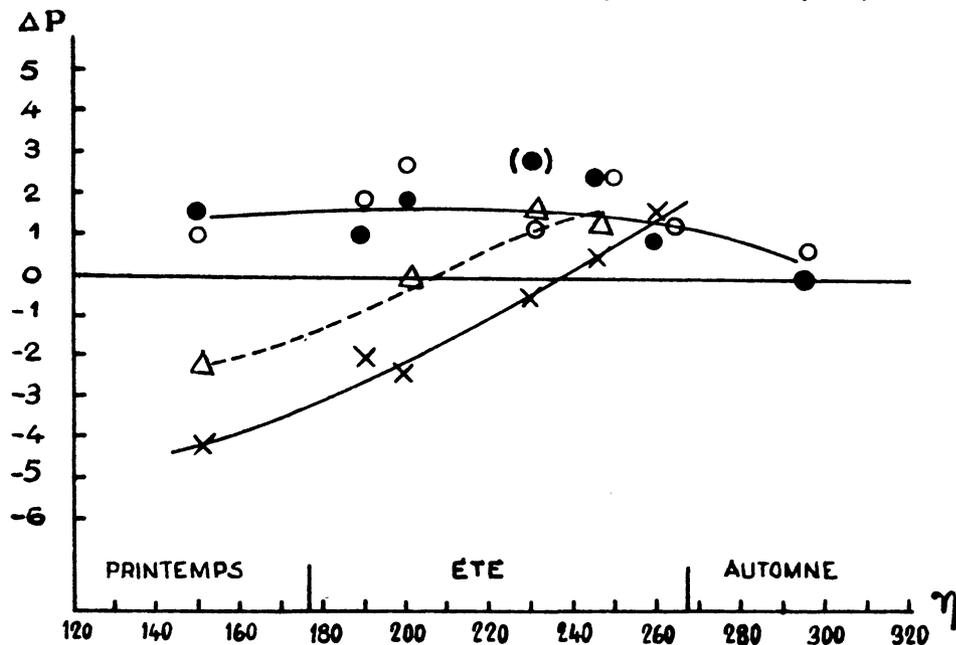


FIG. 42. — Mars : Variation saisonnière de la polarisation par les taches sombres.

Différence de polarisation entre les taches sombres et les régions claires, pour la phase $V = 25^\circ$, reportée en fonction de la longitude héliocentrique.

Croix : Taches de latitude supérieure à $+45^\circ$.

Triangles : Taches de latitude comprise entre $+45^\circ$ et $+15^\circ$.

Points : Taches de latitude comprise entre $+15^\circ$ et -15° .

Cercles : Taches de latitude comprise entre -15° et -45° .

Pendant tout le printemps et l'été boréal, les terrains sombres des régions équatoriales et australes conservent une proportion de lumière polarisée plus élevée que celle des déserts et manifestent la courbe de polarisation du type B ; les territoires du Nord possèdent une texture superficielle différente, qui polarise selon la courbe A. La propriété polarisante acquise au printemps se résorbe au cours de l'été, pour disparaître à l'équinoxe, date à laquelle toutes les taches sombres ont alors les propriétés répondant à la courbe B.

Les contrées de latitudes intermédiaires, comme Nilivus L., manifestent l'évolution saisonnière précédente avec une amplitude moins accentuée, tandis qu'au contraire les taches circumpolaires accusent cette évolution encore plus fortement (voir plus loin les mesures de la frange polaire). L'amplitude de la variation saisonnière semble donc décroître, dans son ensemble, avec la latitude. Les observations que l'on pourrait encore recueillir au cours des oppositions périhéliques achèveraient la description du cycle des transformations saisonnières de la structure superficielle du sol martien.

Ces variations, qui accompagnent les changements de contraste et de teinte que l'on connaît des taches martiennes, pourraient résulter d'une modification de l'état superficiel du sol sous l'action inégalement prolongée de l'éclairement solaire. Une interprétation d'origine végétale paraît séduisante et nous verrons p. 95 qu'elle résiste, malgré quelques restrictions, à un examen approfondi.

Polarisation par les taches sombres observées obliquement :

J'ai observé les taches sombres sous diverses inclinaisons, lorsqu'elles occupent différentes positions sur le disque. Les mesures donnent des valeurs très variables, en raison principalement des voiles atmosphériques ; leur importance relative se trouve accrue devant les régions les plus sombres. On ne peut dégager nettement la polarisation produite par le sol lui-même.

La polarisation des taches sombres par diffusion oblique ne saurait toutefois être forte.

Observées au bord du disque à 45° du plan de vision, le polarimètre étant tourné de 45° , les taches montrent des polarisations résiduelles très variables et probablement pour une grande part d'origine atmosphérique.

Polarisation par la frange polaire nord :

Un cerne noir semble entourer la calotte polaire lors de sa régression printanière. J'ai étudié la structure de ce liseré avec un grand pouvoir séparateur, à la faveur des nuits de très bonnes images. Cette bande, d'apparence quelquefois régulière dans les petits instruments, est en réalité constituée par les petites taches naturelles du sol ; celles-ci ont la propriété étrange de se trouver très assombries pendant quelque temps, après le moment où le retrait de la blancheur polaire les découvre au jour (A. Dollfus, 1953).

La polarisation mesurée plusieurs fois dans ce domaine grâce à l'excellente qualité des images, montre vers $V = 10^\circ$ une valeur négative forte, qui atteint -20 millièmes et qui semble s'annuler vers $V = 22^\circ$.

Cette polarisation est altérée partiellement par la présence de légers voiles atmosphériques dans la région polaire, durant la saison où se manifeste ce cerne ; les brumes ténues ont leur contribution accrue par la faible brillance du sol sur cette contrée ; néanmoins, la polarisation réelle du sol rappelle celle des régions sombres de la surface.

Cette polarisation diffère radicalement de celle que produirait, sous cet éclaircissement, une terre imbibée d'eau ; elle accompagne une recrudescence du contraste et semble s'apparenter aux variations saisonnières décrites.

Courbe de polarisation des calottes polaires :

Pendant les années d'opposition 1948, 1950 et 1952 la planète, fortement basculée en latitude, montrait son pôle Nord bien dégagé, au bord du disque. C'était au moment

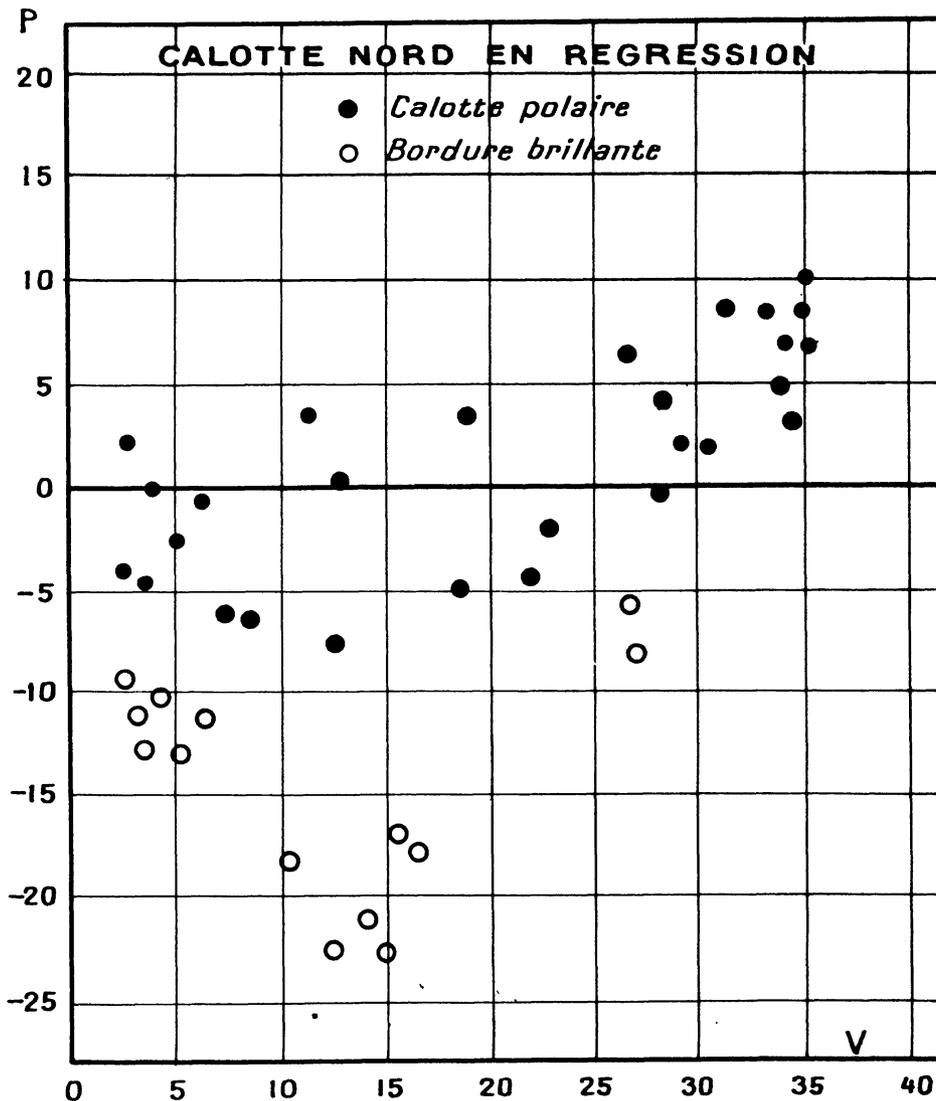


FIG. 43. — Mars : Courbe de polarisation de la calotte polaire Nord au printemps et des taches brillantes de la bordure.

de la régression printanière de la blancheur, entre les longitudes héliocentriques $\eta = 140^\circ$ et $\eta = 270^\circ$.

La tache polaire, petite, nécessitait, pour la mesure, une faible turbulence atmosphérique. En 1952, devenue trop exigüe, elle échappait aux observations polarimétriques.

Les déterminations restent souvent altérées par les brumes sus-jacentes, généralement difficiles à déceler visuellement. De tels voiles semblent exister presque en permanence dans les régions polaires au début de la régression et jusque vers $\eta = 170^\circ$.

Malgré cela j'ai pu sélectionner des mesures effectuées lorsque les circonstances atmosphériques terrestres et martiennes étaient simultanément favorables.

La figure 43 montre les déterminations retenues et la polarisation faible que manifeste toujours le dépôt blanc polaire.

La blancheur est quelquefois marbrée par des étendues plus ternes ; il a semblé que des régions de moindre éclat possédaient une polarisation faible.

On observe fréquemment sur le bord de la calotte des taches éclatantes généralement localisées le long du contour ; leur polarisation est très forte dans le sens négatif pour $V = 12^\circ$ et elle atteint -24 millièmes ; elle s'annule vers $V = 30^\circ$. Ces taches montrent les polarisations négatives les plus fortes qui aient pu être observées sur Mars et même sur toutes les autres planètes.

Polarisation des nuages blancs :

La diversité de ces nuages s'étend depuis les formations brillantes à développement vertical qui dépassent le bord du terminateur comme des protubérances, jusqu'aux brumes diffuses et aux voiles légers à peine visibles. Le polarimètre permet en outre de découvrir et de localiser des brumes si ténues qu'elles demeurent invisibles pour l'observateur ; elles se révèlent néanmoins, par l'altération de la polarisation qu'elles impriment à la lumière qui les traverse. Malgré leur apparence de diversité, toutes ces formations conservent des propriétés polarisantes liées par un caractère commun ; elles sont donc vraisemblablement toutes de même nature et se distinguent seulement par leur plus ou moins grande opacité.

La figure 44 résulte des mesures effectuées sur les nuages les plus denses des régions équatoriales et tempérées ; la grosseur des points du graphique est proportionnelle à l'éclat du nuage. La polarisation est minimum avec $P = -20$ millièmes vers $V = 12^\circ$; elle s'inverse vers $V = 20^\circ$ et atteint la valeur forte de $+40$ millièmes vers $V = 15^\circ$. La valeur de la proportion polarisée dépend d'ailleurs de l'opacité du nuage ; sur les voiles très ténus elle semble d'abord croître avec la concentration des particules, puis reste peu dépendante de cette densité sur les voiles d'éclats moyens de la figure 44 ; elle paraît souvent décroître ensuite sur les formations très brillantes.

Pendant l'hiver martien, la région polaire est recouverte d'un voile nuageux opaque, uniforme et permanent ; les mesures effectuées en 1954 par M. Focas permettent de tracer la courbe de polarisation de ce brouillard, figure 45. Le minimum a lieu pour $V = 16^\circ$ avec $P = -16$ millièmes et l'inversion pour $V = 25^\circ$, ce qui établit une légère différence de structure entre ce voile polaire hivernal et ceux formés dans les régions tempérées.

P POLARISATION PAR LA BRUME POLAIRE

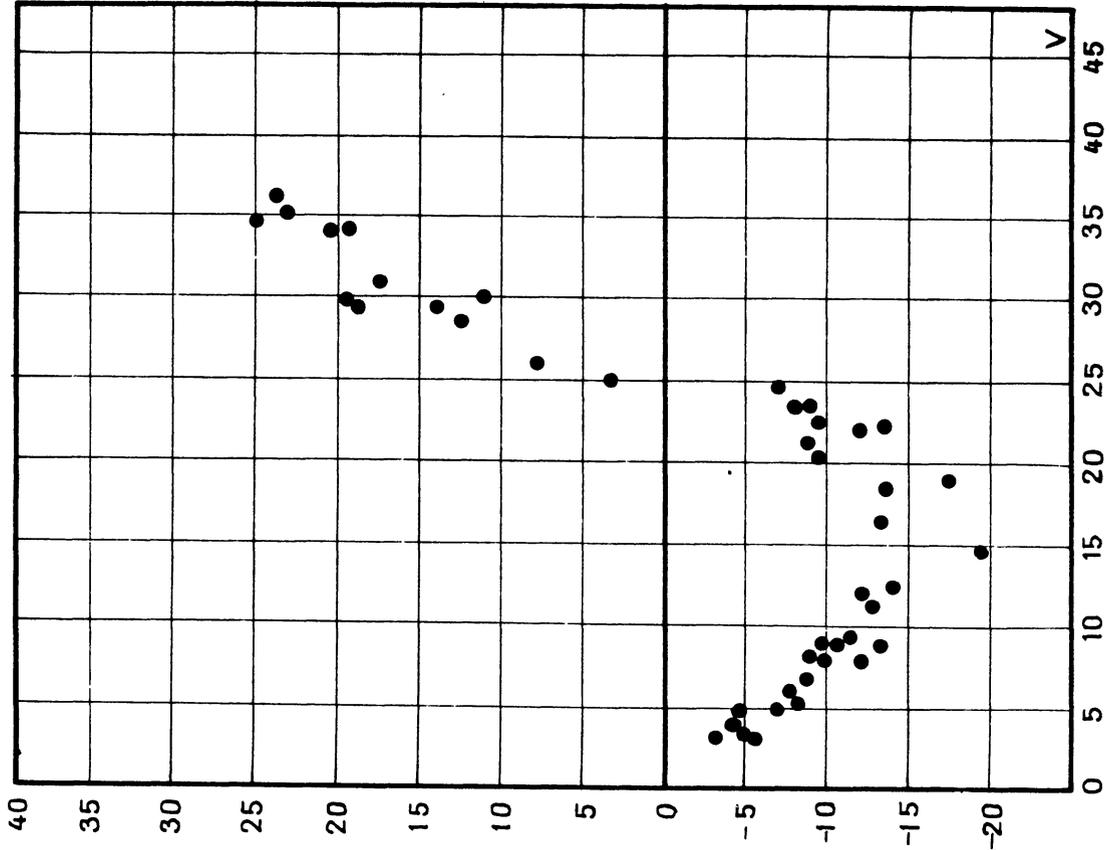


FIG. 45. — Mars : Courbe de polarisation du voile polaire hivernal.

POLARISATION PAR LES VOILES BLANCS

Région équatoriales et tempérées

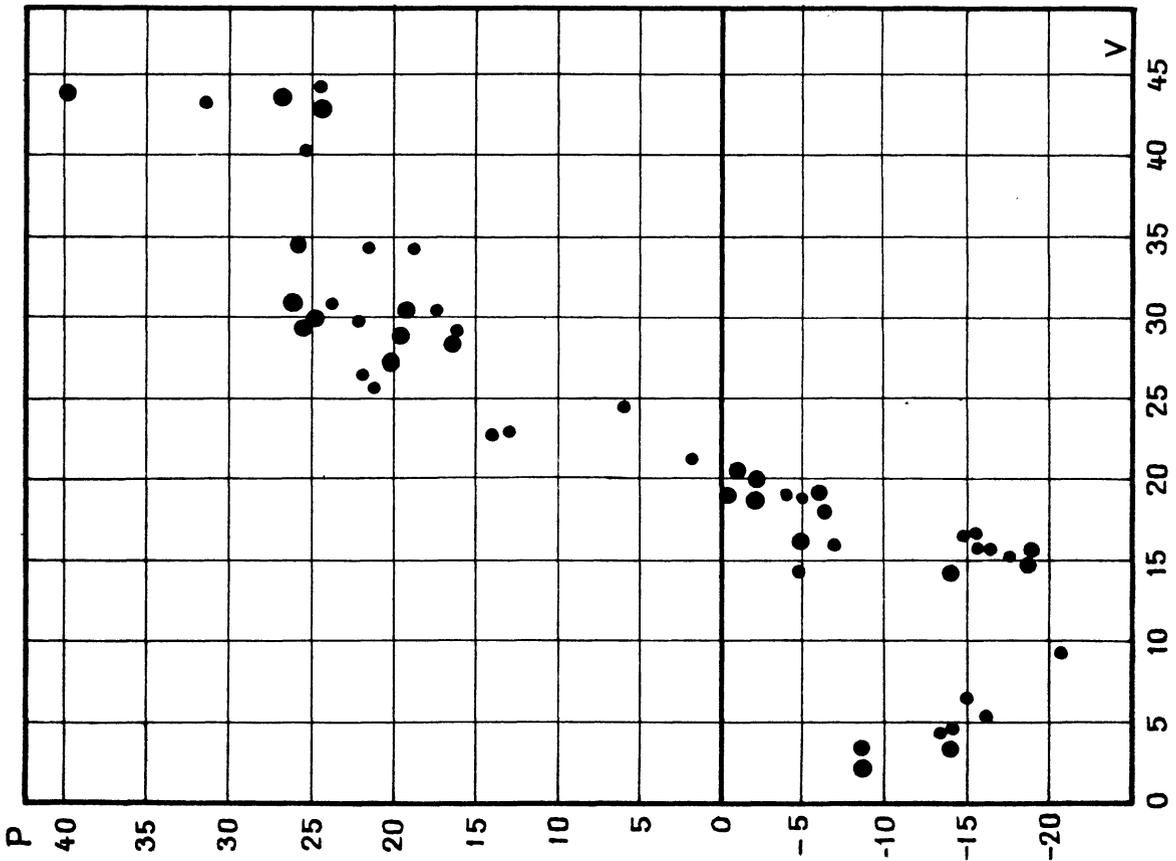


FIG. 44. — Mars : Courbe de polarisation des voiles blancs des régions équatoriales et tempérées. Le diamètre des points est proportionnel à l'éclat du nuage.

Déviation du plan de polarisation par les nuages :

En orientant le polarimètre à 45° du plan de polarisation, on peut observer sur des régions voilées par des nuages blancs légers une polarisation résiduelle de quelques millièmes, variable en orientation et en grandeur selon les circonstances.

Une telle polarisation peut résulter d'une orientation privilégiée des cristaux dans le nuage ; elle peut prendre naissance aussi dans les formations nuageuses en bandes ou en rouleaux, ainsi qu'on les observe sur Terre.

Observation des nuages par la polarisation :

En révélant dans l'atmosphère martienne des nuages ténus au point d'échapper à l'observation visuelle simple, le polarimètre permet des études météorologiques nouvelles. Nous verrons p. 99 que ces voiles paraissent devoir être nécessairement constitués par des cristaux de glace comme nos cirrus. On pourra les considérer comme tels dans l'examen climatique suivant :

L'opposition de 1948 se déroulait au début du printemps martien, alors que la calotte polaire Nord commençait à accomplir son retrait saisonnier : le givre se sublimait en surface et chargeait l'atmosphère de vapeurs. L'air semblait transparent à l'observateur terrestre, mais le polarimètre montra des brumes très légères et presque permanentes au-dessus de la calotte polaire ainsi que dans ses parages ; elles s'étendirent fréquemment jusque sur les contrées de Boréosyrtis et de Acidalium M. et s'observèrent jusque vers le solstice d'été ($\eta = 176^\circ$). La polarisation de ces voiles ténus est plutôt celle des nuages hivernaux de la figure 45.

En 1950, au début de l'été (à partir de $\eta = 180^\circ$) ces formations boréales devinrent plus rares, mais on observait des voiles diffus en différents points du globe, particulièrement au-dessus de Syrtis Major.

En 1952, les observations commencèrent dans la seconde partie de l'été boréal. Je n'ai plus observé aucun voile dans la région Nord. Par contre, en reprenant les observations vers le début de l'automne boréal (pour $\eta = 260^\circ$), une nuée opaque s'était installée dans les régions opposées antarctiques. Les voiles, invisibles à l'œil, se manifestaient principalement dans l'hémisphère austral, en hiver.

Il en était de nouveau ainsi au début de l'opposition de 1954, sous une situation climatique voisine.

Ces voiles transparents appartiennent donc principalement au ciel d'hiver et de printemps.

Le polarimètre indique aussi que des voiles invisibles très ténus accompagnent souvent les formations nuageuses denses ; ils s'associent aux systèmes nuageux complets et peuvent alors s'étendre sur de grands espaces.

J'ai décelé quelquefois de faibles ***brumes matinales*** le long du bord levant ; elles semblent se résorber après les quelques premières heures qui suivent le lever du Soleil.

Les voiles transparents ont affecté souvent les contrées de Syrtis Major, de Acidalium M. et de Erythraeum M., qui semblent donc propices aux condensations nuageuses.

La région de Nix Olympica montra souvent la polarisation caractéristique des voiles atmosphériques, circonstance que pourrait expliquer une orographie de caractère montagneux dans ce pays. De même le territoire de Candor, généralement clair, apparut en 1954, d'un blanc éblouissant, bien délimité ; pour $V = 21^\circ$ la polarisation était de -5 millièmes et pouvait provenir soit d'un nuage créé par le relief, soit d'une couche de givre déposée par exemple sur des sommets.

Polarisation par les nuages bleus :

Les voiles atmosphériques, particuliers aux radiations visibles de courte longueur d'onde n'avaient été observés jusqu'ici que par le recours à la photographie en lumière ultra-violette.

J'ai pu les observer visuellement, et par suite étudier leur comportement, à l'aide d'un filtre bleu foncé et d'une disposition instrumentale déjà décrite (Dollfus 1953).

J'ai accompagné presque toujours les séances de mesures polarimétriques par des dessins reproduisant l'aspect des nuages bleus.

Ces nuages existent presque en permanence aux bords levants et couchants de la planète, près de l'équateur ; ils se désagrègent au milieu du jour. Ce sont des **brumes tropicales du soir et du matin**. Ils s'associent quelquefois aux formations nuageuses blanches ; les observations visuelles et polarimétriques montrent alors qu'ils sont situés à une altitude plus élevée.

Bien qu'inobservables en lumière orangée, ces formations produisent dans ce domaine spectral une polarisation sensible ; elle est nulle pour $V = 0^\circ$, devient positive, maximum

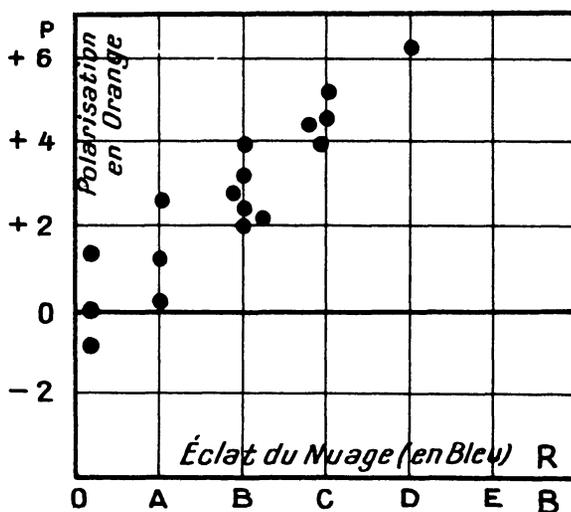


FIG. 46. — Mars : Polarisation par les nuages bleus (en lumière orangée), sous l'angle de vision $V = 15^\circ$ en fonction de l'éclat du nuage (observé en lumière bleue).

probablement vers $V = 14^\circ$, s'annule vers 25° et reste négative ensuite. La quantité de lumière polarisée est sensiblement proportionnelle à l'éclat du nuage, comme le montre la figure 46.

Observés plusieurs fois pendant 7 heures consécutives, ces voiles présentent de rapides fluctuations de forme et d'intensité, qui se traduisent simultanément par des fluctuations de la polarisation, pouvant dépasser 5 millièmes en 1 h. 30 m. Ils sont donc très variables.

La grande région désertique de Amazonis, qui a servi à déterminer la pression atmosphérique (cf. p. 91), s'est montrée souvent dégagée de voiles bleus au bord levant ; cette vaste contrée sèche est sans doute peu propice à la formation de telles nuées.

Polarisation par les voiles de poussière :

En 1924, un voile jaune d'une exceptionnelle densité enveloppa pendant plusieurs semaines une grande partie de la surface martienne. L'angle de vision était environ 42° et B. Lyot observa une diminution considérable de la polarisation de la lumière globale

de l'astre (thèse p. 55). Ces voiles sont peu fréquents ; j'en ai observé visuellement un vaste en 1944, il vint recouvrir une partie de la calotte polaire Sud ; je n'étais pas encore équipé à cette époque pour mesurer la polarisation.

Pendant les six années d'observations polarimétriques consacrées aux recherches martiennes, au Pic du Midi, j'ai rarement vu des formations jaunes caractéristiques. Il est arrivé plusieurs fois que des polarisations insolites s'expliquent difficilement par le jeu des phénomènes saisonniers, des nuages blancs et des voiles bleus ; ces observations particulières caractérisent peut être les voiles jaunes ; elles sont assez rares.

Voici un exemple de manifestation curieuse :

Le 18 mai 1952, la région de Meridianii Sinus s'approchait du méridien central, sous l'angle de vision $V = 15^{\circ}8$; la polarisation était à peu près normale aux divers points du disque, elle était -10 millièmes sur Arabia, -9 millièmes sur Acidalium M., -8 millièmes sur Meridianii S., elle devenait cependant -4 millièmes seulement sur Margaritifer S. près du bord du disque, valeur un peu forte, dans le sens positif, puisque l'observation ne décelait aucuns voiles blancs ni bleus. Le 20 mai, à 23 h. 20 m. sous la même présentation, le polarimètre accusait sur Margaritifer S. une valeur de $-2,5$ millièmes nettement trop forte et elle atteignait -1 millième au bord du terminateur sur Erythraeum M. La nuit suivante, la polarisation anormale atteignait $+6$ millièmes au bord du disque, -2 millièmes sur Margaritifer S., tandis que la région perturbée gagnait Meridianii S. dont la proportion polarisée devenait $-4,5$ millièmes, la valeur normale étant -7 millièmes. La nuit qui suivit, du 22 au 23 mai 1952, le phénomène ne progressa plus vers cette région ; le 23, Meridianii S. retrouvait la polarisation normale, le voile s'étant résorbé de ce côté ; par contre, cette formation s'accroissait encore sur Erythraeum M. où la polarisation atteignait $+9$ millièmes et elle s'étendait vers le Sud, jusque sur le territoire de Tempe ; la polarisation devenait $+12$ millièmes sur cette région claire perturbée vue obliquement, contre $-5,5$ millièmes au centre du disque non affecté.

Le 24 et le 25 mai, aux heures où les observations purent être pratiquées, la planète montra la région de Syrtis Major au méridien, la région perturbée n'étant pas visible sur le disque éclairé. Cependant, le 26 et le 27 mai, les étendues de Saebeus S. et de Pendorae Fretum, au bord du disque, se révélèrent à leur tour affectées, indice que la perturbation s'étendait à nouveau dans ces parages. Le 29 mai, à 22 h. puis à 24 h., les contrées de Hellas et de Hellespontus accusaient enfin une polarisation excessive près du limbe. Ces régions cessèrent ensuite d'être observables.

Pendant toute cette période, l'angle de vision restait voisin de 17° , et les voiles blancs devaient ne manifester qu'une polarisation très faible (figure 44) ; l'observation en lumière bleue n'indiquait aucune nuée particulière ; cependant, le caractère variable du phénomène, son accroissement très rapide vers le bord du disque sous la vision oblique, et ses déplacements, caractérisaient un phénomène atmosphérique.

Il s'agissait probablement d'un voile jaune très ténu. Le phénomène restait indécélable par les procédés d'observation autres que le polarimètre.

Polarisation de la lumière de Mars à travers un filtre vert :

Toutes les mesures qui précèdent ont été effectuées en interposant devant l'œil un filtre orangé, dont la longueur d'onde transmise avoisine $0,61 \mu$.

Voici maintenant le résultat des mesures réalisées à travers un filtre vert constitué par l'association d'une gélatine teintée Wratten 58 B et d'une autre gélatine bleu clair ; l'ensemble isolait un domaine spectral compris entre $0\mu 49$ et $0\mu 54$, avec un maximum de transmission vers $0\mu 52$. Le sol orangé de la planète est deux fois moins brillant en vert et le filtre absorbe la lumière ; il fallait donc réduire le grossissement à la valeur $G = 450$.

Les mesures concernant les régions claires au centre du disque, en l'absence de nuages, sont reportées sur la figure 47. La courbe tracée est celle de la polarisation avec filtre orangé. La différence entre les polarisations en vert et en orangé est portée en fonction de V sur la figure 48 pour les régions claires et pour les taches sombres. Cette différence sera expliquée par la contribution de la lumière diffusée par l'atmosphère martienne.

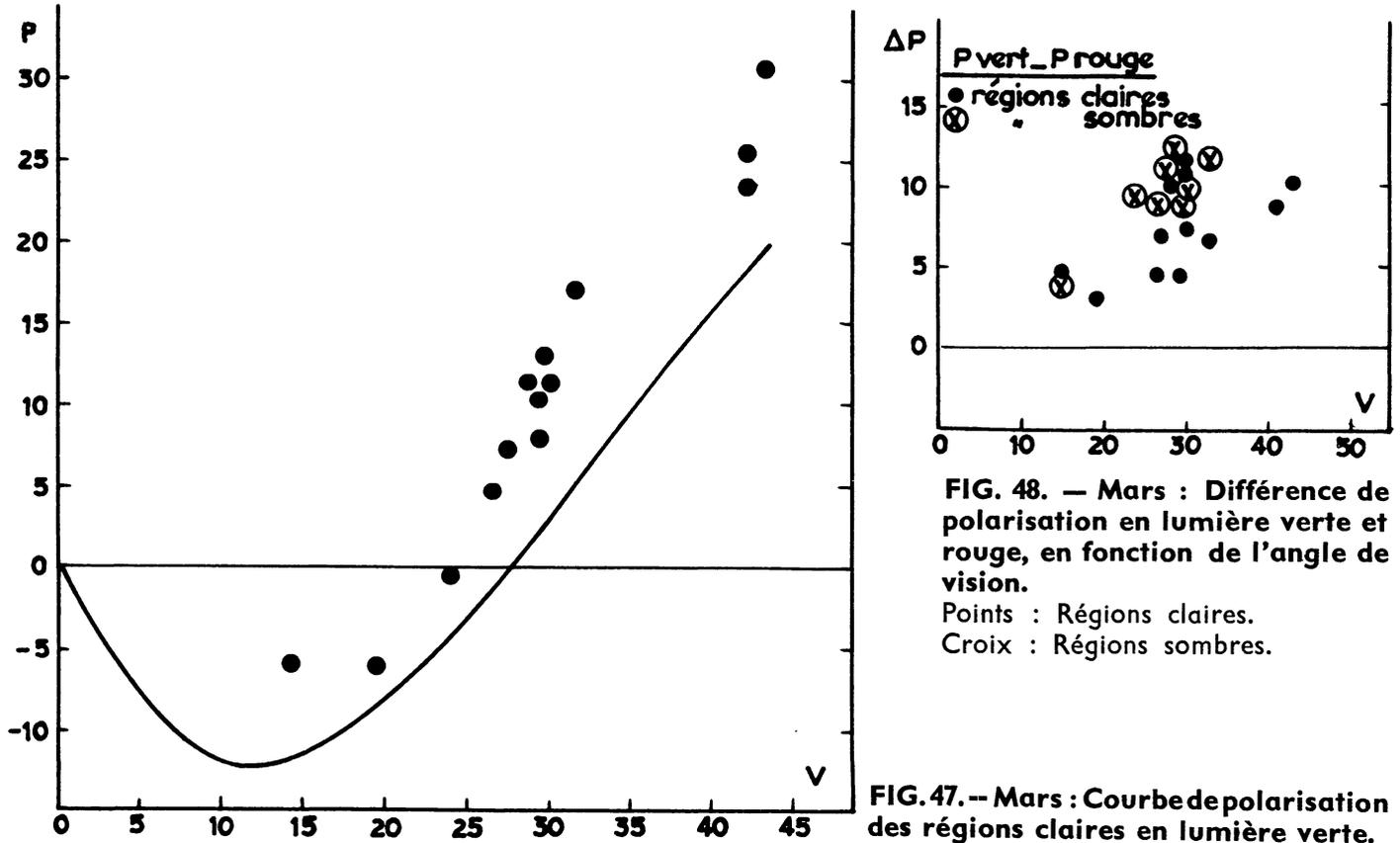


FIG. 48. — Mars : Différence de polarisation en lumière verte et rouge, en fonction de l'angle de vision.

Points : Régions claires.
Croix : Régions sombres.

FIG. 47. — Mars : Courbe de polarisation des régions claires en lumière verte.

Variation spectrale de la polarisation de la lumière globale de Mars ;

J'ai mesuré la polarisation de la lumière globale de l'astre entre $0\mu 40$ et $0\mu 85$ à l'aide de 8 combinaisons de filtres en verre ou gélatine teintés, étudiés de manière à n'isoler que des bandes spectrales étroites, environ 300 Å seulement ; les bandes ne se chevauchaient pas, la superposition de deux filtres étant toujours fortement absorbante.

Les longueurs d'onde de transmission maximum étaient :

$0\mu 400 - 0\mu 452 - 0\mu 485 - 0\mu 545 - 0\mu 574 - 0\mu 611 - 0\mu 663 - 0\mu 845$.

Malheureusement, ces filtres laissaient passer peu de lumière. Depuis, j'ai réalisé et expérimenté le petit filtre polarisant beaucoup plus lumineux décrit p. 16 . La substitution du filtre polarisant aux écrans colorés aurait permis d'augmenter encore sensiblement la précision.

Dans les domaines spectraux pour lesquels l'œil n'est pas sensible, j'ai opéré photographiquement.

Le polarimètre photographique réalisé dans ce but est décrit p. 27 .

En 1949 et en 1950, j'ai obtenu sur Mars 28 clichés, avec la lunette de 32 cm. de la table équatoriale de Meudon et avec la lunette de 23 cm. du Pic du Midi, au voisinage des angles de vision $V = 12^\circ, 25^\circ$ et 35° qui correspondent au minimum, à l'inversion et au maximum observable de la polarisation en lumière orangée.

Pour compléter ces déterminations photographiques, d'autres mesures ont été effectuées visuellement. Les dispositifs utilisés conjointement avec les filtres colorés ont été alternativement les suivants : polariscope de Lyot, polariscope à franges d'écart réglable et polariscope à grille. Pour les très faibles brillances, avec les filtres très sélectifs, ou dans les domaines spectraux voisins de la limite de la sensibilité, le polarimètre à grille reste seul praticable.

Les mesures retenues à la suite de ces mesures sont portées dans les graphiques de la figure 49, après avoir été ramenées à l'angle de vision correspondant, s'il y a lieu, par une légère interpolation.

Au chapitre suivant, la variation spectrale de la polarisation observée sera expliquée par la présence de l'atmosphère autour de Mars.

POLARISATION SPECTRALE DE MARS POUR $V = 12^\circ - 25^\circ - 35^\circ$

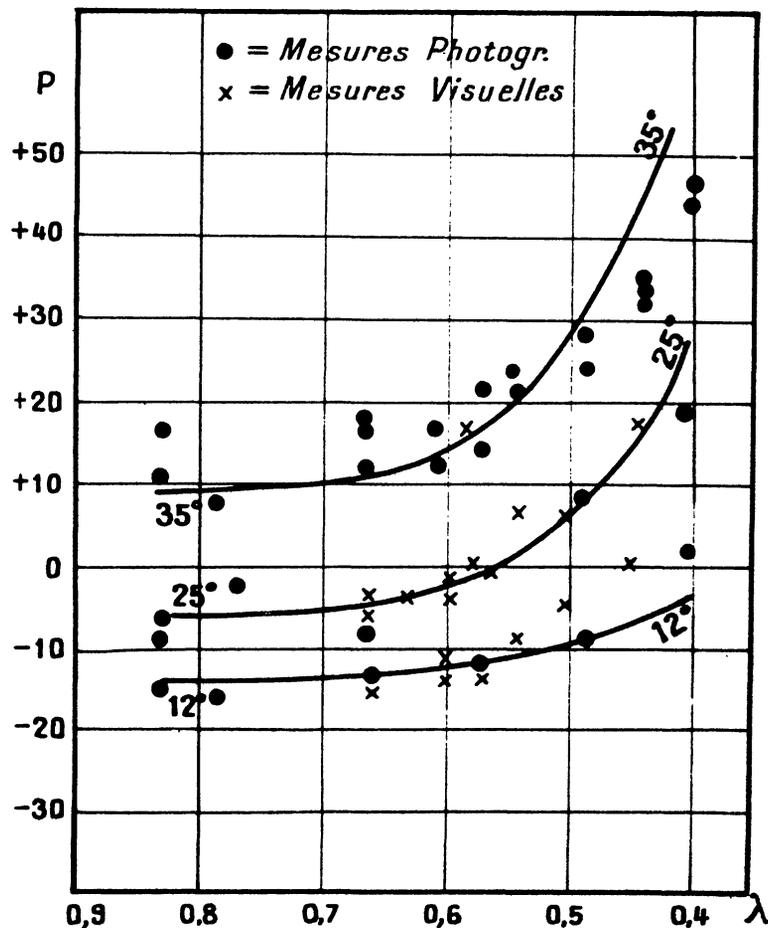


FIG. 49. — Mars : Variation spectrale de la polarisation, pour les angles de vision $V = 12^\circ, 25^\circ, 35^\circ$. Points : Mesures photographiques. Croix : Mesures visuelles.

INTERPRÉTATION DES OBSERVATIONS POLARIMÉTRIQUES MARTIENNES

LA PRESSION ATMOSPHÉRIQUE

Recherches antérieures sur la pression atmosphérique martienne :

La première tentative pour déterminer la pression atmosphérique sur la planète Mars paraît être due à D. Menzel (1926) ; comparant les albedos visuels et photographiques, il évaluait la pression à environ 65 millibars ; les prémices étaient alors fragiles.

En 1929, en comparant les courbes de polarisation de Mars et de la Lune, B. Lyot trouvait une limite supérieure de 25 millibars ; mais la polarisation par inclinaison du sol au bord du disque n'était pas encore connue. Barabasheff et Semeykin (1934) déterminèrent une pression de 50 millibars, par comparaison de l'assombrissement au bord en trois couleurs ; le diamètre des images photographiques était de 1 mm seulement. Sur des clichés en 5 couleurs pris en 1939, également très petits, W. Scharonow (1941) étudia la variation spectrale du contraste des taches de la surface et trouva 120 millibars. Puis par une étude plus complète, N. Sytinskaya (1944) obtint 107 millibars.

G. de Vaucouleurs (1945) estima visuellement le contraste des taches à diverses distances du centre et trouva une pression comprise entre 90 et 120 mb ; ces estimations sont sujettes à de nombreuses corrections systématiques.

Enfin, S. Hess (1948) étudia la thermodynamique des nuages martiens ; sa détermination de la pression, 80 mb. repose sur l'altitude des nuages, très mal connue en raison de l'assombrissement du disque le long du terminateur.

Ces différentes déterminations discutées par G. de Vaucouleurs (1951) étaient peu concordantes et ne semblaient pas permettre de conclure à un résultat solidement établi.

J'ai observé, le 18 janvier 1946, l'occultation de l'étoile BD + 26° 1615, de magnitude 9,2, par le disque de Mars du côté du limbe ; ce phénomène, très rare, ne peut se voir en moyenne que moins de une fois par an. L'étoile, après s'être affaiblie progressivement pendant 6 secondes environ, disparut dans la lunette de 60 cm avant d'avoir atteint le bord du limbe. Les calculs de Fabry (1938) montrent que ces conditions impliquent une atmosphère dont la pression au sol soit de plusieurs dizaines de millibars.

Les mesures polarimétriques permettent de préciser cet ordre de grandeur.

Détermination polarimétrique de la brillance de l'atmosphère de Mars :

La contribution de la lumière polarisée par diffusion moléculaire dans l'atmosphère augmente beaucoup vers les courtes longueurs d'onde, et elle s'accroît vers le bord du disque, sur un parcours allongé par l'obliquité.

La polarisation atmosphérique se compose avec celle du sol, selon la phase V , la longueur d'onde λ et la distance au centre du disque θ , suivant l'équation

$$P_s(V, \lambda, \theta) = P_\delta(V) + \frac{B_a}{B_\delta} \frac{B_o}{B_v} \frac{\sin^2 V}{2} \frac{B_o}{B_\theta} \frac{1}{\cos \theta} \left(\frac{\lambda_o}{\lambda} \right)^4$$

B_a/B_δ = Brillance de l'atmosphère rapportée à celle des régions claires du sol au centre du disque et à la phase nulle, pour λ_o .

B_v/B_o = Brillance du sol pour la phase V rapportée à celle de la phase nulle.

B_θ/B_o = Brillance du sol pour la distance θ rapportée à celle du centre du disque ($\theta = 0$).

Des observations appropriées permettent de discriminer la polarisation atmosphérique de la polarisation générale et de l'exprimer en fonction de la brillance B_a/B_δ de l'atmosphère rapportée à celle des régions claires du sol au centre du disque.

Premier procédé :

La polarisation de la lumière au centre du disque, sur une région claire, en l'absence de nuages, est pour λ_o :

$$P_o = P_\delta(V) + \frac{B_1}{B_\delta} \frac{B_o}{B_v} \frac{\sin^2 V}{2}$$

A la distance θ du centre, le long de l'équateur, cette polarisation devient, compte tenu de la polarisation par diffusion oblique du sol $\Delta(\theta)$:

$$P_\theta = P_\delta(V) + \Delta(\theta) + \frac{B_a}{B_\delta} \frac{B_o}{B_v} \frac{\sin^2 V}{2} \frac{B_o}{B_\theta} \frac{1}{\cos \theta}$$

La différence entre ces deux polarisations est :

$$P_\theta - P_o = \Delta(\theta) + \frac{B_a}{B_\delta} \frac{B_o}{B_v} \frac{\sin^2 V}{2} \left[\frac{B_o}{B_\theta} \frac{1}{\cos \theta} - 1 \right]$$

J'ai mesuré souvent la polarisation au centre et au bord du disque sur les régions claires ; généralement des voiles nuageux blancs ou violets perturbaient les mesures ; il fallait donc surveiller la planète pour saisir les circonstances atmosphériques favorables ; au cours des 3 oppositions de 1948, 1950 et 1952, sur les 87 séances de mesure, 14 observations seulement ont paru suffisamment dégagés de voiles.

J'ai admis pour $\Delta(\theta)$ les valeurs de la figure 36 ; B_o/B_v et B_o/B_θ sont donnés par les mesures photométriques effectuées en 1950 et 1952 avec un photomètre nouveau, non encore décrit. Sur la figure 50 les 14 mesures dessinent une droite dont la pente fournit la valeur $B_a/B_\delta \lambda$ **0,036**.

Deuxième procédé :

La brillance des régions claires du sol augmente avec la longueur d'onde ; celle de l'atmosphère diminue comme la quatrième puissance de cette longueur d'onde. Ce comportement établit une différence entre la polarisation mesurée sur une même région successivement à travers deux filtres colorés différents.

En l'absence de nuages, cette polarisation est, pour une plage de brillance $a(\lambda) \cdot B_\Delta$, avec la lumière de longueur d'onde λ :

$$P_{\lambda_0} = P_\Delta + \frac{B_a}{B_\Delta} \frac{B_0}{B_V} \frac{\sin V}{2} \frac{1}{a(\lambda_0)}$$

avec la lumière de longueur d'onde λ :

$$P_\lambda = P_\Delta \frac{B_a}{B_s} \frac{B_0}{B_V} \frac{\sin^2 V}{2} \frac{1}{a(\lambda)} \left(\frac{\lambda_0}{\lambda} \right)^4$$

La différence de ces deux polarisations est donc :

$$P_\lambda - P_{\lambda_0} = \frac{B_a}{B_s} \frac{B_0}{B_V} \frac{\sin^2 V}{2} \left[\frac{1}{a(\lambda)} \left(\frac{\lambda_0}{\lambda} \right)^4 - \frac{1}{a(\lambda_0)} \right]$$

La figure 48 résume les mesures de cette différence effectuées en lumière verte ($\lambda = 0 \mu 53$) et orangée ($\lambda_0 = 0 \mu 61$) en l'absence de nuages blancs ; l'angle de vision $V = 30^\circ$ pour lequel $B_V/B_0 = 0,93$ correspond à peu près à l'annulation de la polarisation produite par les voiles bleus. Pour les régions claires $a(\lambda_0) = 1$, $a(\lambda) = 0,63$, on lit $P_\lambda - P_{\lambda_0} = 7$ millièmes. La formule donne :

$$0,007 = \frac{B_a}{B_s} \frac{1}{0,93} \frac{0,25}{2} \left(\frac{1,7}{0,63} - 1 \right)$$

soit $B_a/B_s = 0,031$.

Pour les régions sombres moyennes, $P_\lambda - P_{\lambda_0} = 10$ millièmes, $a(\lambda_0) = 0,70$ et $a(\lambda) = 0,45$.

$$0,010 = \frac{B_a}{B_\Delta} \frac{1}{0,93} \frac{0,25}{2} \left(\frac{1,7}{0,45} - \frac{1}{0,7} \right) \quad \text{d'où : } B_a/B_\Delta \lambda \mathbf{0,030}$$

Troisième procédé :

La différence $P_\theta - P_0$ entre la polarisation d'une région claire mesurée au centre et au bord du disque est donnée, pour la lumière λ_0 , par la formule p. 88. Pour une lumière λ cette valeur devient :

$$P_\theta - P_0 = \Delta(\theta) + \frac{B_a}{B_\Delta} \frac{B_0}{B_V} \frac{\sin^2 V}{2} \left[\frac{B_0}{B_\theta} \frac{1}{\cos \theta} - 1 \right] \frac{B_0}{B_\lambda} \left(\frac{\lambda_0}{\lambda} \right)^4$$

B_o/B_λ étant le rapport des brillances du sol pour λ_o et λ . La différence entre ces deux mesures s'écrit :

$$(P_\theta - P_o)_\lambda - (P_\theta - P_o)_{\lambda_o} = \frac{B_a}{B_\Delta} \frac{B_o}{B_V} \frac{\sin^2 V}{2} \left[\frac{B_o}{B_\theta} \frac{1}{\cos \theta} - 1 \right] \left[\frac{B_o}{B_\lambda} \left(\frac{\lambda_o}{\lambda} \right)^4 - 1 \right]$$

Une seule nuit d'observation peut suffire à déterminer B_a/B_Δ , à la faveur d'une limpidité atmosphérique martienne particulière.

Le 16 avril 1950, avec $V = 19^\circ 3$, toute trace de voile semblait absente du côté du terminateur sur la grande région claire de Amazonis, qui offrait un fond particulièrement uniforme. J'en ai profité pour mesurer la polarisation à différentes distances θ du centre du disque, successivement avec deux filtres colorés transmettant les bandes spectrales $0\mu 61$ et $0\mu 63$. Pour $\theta = 60^\circ$, $P_\theta - P_o = +5$ millièmes en vert et -1 millième en rouge, avec $B_\theta/B_o = 0,7$ et $B_o/B_\lambda = 1,6$.

D'où $0,005 + 0,001 = B_a/B_\Delta \times 0,057 \times 2,8 (1,7 \times 1,6 - 1)$. Et $B_a/B_\Delta = 0,022$.

Le 8 juin 1952, sur la même région claire de Amazonis, vers le terminateur mais pour l'angle $V = 29^\circ 15$, $P_\theta - P_o = +14$ millièmes en vert et $+4$ millièmes en rouge, pour $\theta = 55^\circ$.

$0,014 - 0,004 = B_a/B_\Delta 0,129 \times 2,20 (1,7 \times 1,6 - 1)$ et $B_a/B_\Delta = 0,021$.

Enfin, le 19 juillet 1952, cette région claire favorable s'observait encore à travers une atmosphère apparemment dégagée de voiles, avec $V = 41^\circ 9$. Pour $\theta = 40^\circ$ vers le terminateur $P_\theta - P_o = +16$ millièmes en vert et $+6$ millièmes en rouge :

$0,016 - 0,006 = B_a/B_\Delta \times 0,25 \times 1,30 (1,7 \times 1,6 - 1)$ et $B_a/B_\Delta = 0,018$.

mais cette dernière détermination paraît moins précise.

Quatrième procédé :

La contribution de la polarisation atmosphérique peut se retrouver encore sur la lumière globale de l'astre ; elle devient importante dans les domaines spectraux violets et ultra-violets.

La formule approchée du haut de la p. 88 n'est plus entièrement valable et la composition de la polarisation atmosphérique P_a avec celle du sol P_Δ devient plus exactement :

$$P = \frac{P_s \cdot I_\Delta + P_a \cdot I_a}{I_\Delta + I_a}$$

$$P(V, \lambda) = \frac{P_\Delta(V) \cdot I_\Delta(V, \lambda) + \frac{\sin^2 V}{1 + \cos^2 V} I_a \left(\frac{\lambda_o}{\lambda} \right)^4 \frac{1 + \cos^2 V}{2}}{I_\Delta(V, \lambda) + I_a \left(\frac{\lambda_o}{\lambda} \right)^4 \frac{1 + \cos^2 V}{2}}$$

$$P(V, \lambda) = \frac{P_\Delta(V) + \frac{I_a}{I_\Delta} \frac{I_o}{I_V} \frac{\sin^2 V}{2} \frac{I_o(\lambda_o)}{I(\lambda)} \left(\frac{\lambda_o}{\lambda} \right)^4}{1 + \frac{I_a}{I_s} \frac{I_o}{I_V} \frac{1 + \cos^2 V}{2} \frac{I_o(\lambda_o)}{I(\lambda)} \left(\frac{\lambda_o}{\lambda} \right)^4}$$

$P(V)$ est donné par les courbes de polarisation de Mars. I_V et I_λ sont donnés en proportion de I_Δ par les mesures photométriques que j'ai obtenues par ailleurs (non publiées). J'ai calculé la courbe $P(\lambda)$ pour diverses valeurs de I_a/I_Δ et pour les angles $V = 12^\circ, 25^\circ$ et 35° qui correspondent aux mesures des figures 49.

La valeur $I_a/I_\Delta = 0,025$ semble donner le meilleur accord avec les mesures (figure 49, courbes tracées).

Cette valeur est le rapport de l'intensité globalement diffusée par l'atmosphère en direction de la Terre, à l'intensité de l'ensemble de la planète. Or, l'atmosphère est traversée plus profondément près des bords du disque, sensiblement comme $1/\cos\theta$. Pour tout le disque, l'épaisseur d'atmosphère est

$$H = H_0 \int_0^{2\pi} \int_0^R \frac{1}{\cos\theta} \rho \cdot d\rho \cdot d\alpha$$

$$H = H_0 \int_0^{\pi/2} R^2 \sin\theta \cdot d\theta = H \cdot 2\pi R^2$$

$$I_a = 2\pi R^2 \cdot B_a$$

L'intensité globale du sol est $I_\Delta = \pi \cdot R^2 \cdot B_s$. Donc

$$B_a/B_s = 0,5 I_a/I_\Delta$$

En fait, la distribution non uniforme de la brillance sur le disque complique le calcul ; en raison de la phase, les régions atmosphériques situées au delà du terminateur ne sont pas éclairées, ce qui diminue l'intensité apparente I observée. En admettant sommairement $B_a/B_\Delta = 0,7 \times I_a/I_\Delta$ on trouve :

$$B_a/B_\Delta = 0,018$$

Cette détermination résulte de l'analyse de la lumière de l'ensemble de l'astre, et elle englobe celle des voiles atmosphériques que l'atmosphère peut supporter ; elle ne possède pas le degré de certitude des déterminations précédentes, choisies à l'occasion des éclaircies atmosphériques, quoique moins étendues spectralement.

Détermination de la pression atmosphérique :

Les déterminations précédentes conduisent à des valeurs comparables pour la brillance de l'atmosphère rapportée à celle des régions claires, à l'opposition, au centre du disque et elle ne s'écarte sans doute pas trop de la valeur 0,028.

D'après une discussion de G. de Vaucouleurs, la magnitude globale de Mars à l'opposition est $M = -1,95$ à la distance 1,52 U.A. ; une source lumineuse de magnitude $-14,3$ produit un éclaircissement de 1 lux ; le diamètre de Mars à 1 U.A., est $9''4$; compte tenu de l'absorption atmosphérique terrestre la brillance du disque de Mars, à l'opposition moyenne, pour $\lambda = 0 \mu 55$, est 0,24 stilb.

Pour $0 \mu 61$ cette brillance devient, d'après les mesures photométriques non publiées 0,31 stilb. Au centre du disque, pour les régions claires, $B_\Delta = 0,35$ stilb. La brillance de l'atmosphère au centre du disque est $0,35 \times 0,028 = 0,010$ stilb, et à 1 U.A. elle serait $0,010 \times (1,52)^2 = 0,023$ stilb.

Le calcul de la page 42 établit que la brillance d'une atmosphère pure de composition analogue à celle de la Terre et d'épaisseur h km. dans les conditions normales est,

dans la direction de la source, pour $\lambda = 0,66 \mu$: $B = 0,56 \cdot 10^{-3} \times h$ stilb.

Pour $\lambda = 0,61 \mu$:

$$B = 8,65 \cdot 10^{-3} \times (0,66/0,61)^4 = 1,2 \cdot 10^{-2} \times h \text{ stilb.}$$

Si l'atmosphère martienne possède le même pouvoir polarisant que l'air pur, son épaisseur équivalente est, dans les conditions normales :

$$0,023/1,2 \cdot 10^{-2} = 1,9 \text{ km.}$$

L'épaisseur de l'atmosphère martienne serait environ le quart de celle de l'atmosphère terrestre.

Comme l'attraction de la pesanteur est 0,37 fois celle de la Terre, un **baromètre anéroïde indiquerait, au sol, la pression :**

$$1000 \times 0,37 \times 0,25 = 90 \text{ millibars.}$$

Un baromètre à mercure indiquerait 250 millibars, car le mercure pèse 0,37 fois son poids terrestre.

Ces déterminations établissent des ordres de grandeurs. La présence éventuelle dans l'atmosphère martienne de particules de dimensions plus petites que la longueur d'onde de la lumière pourrait échapper à l'observation et perturber néanmoins légèrement la brillance et la polarisation.

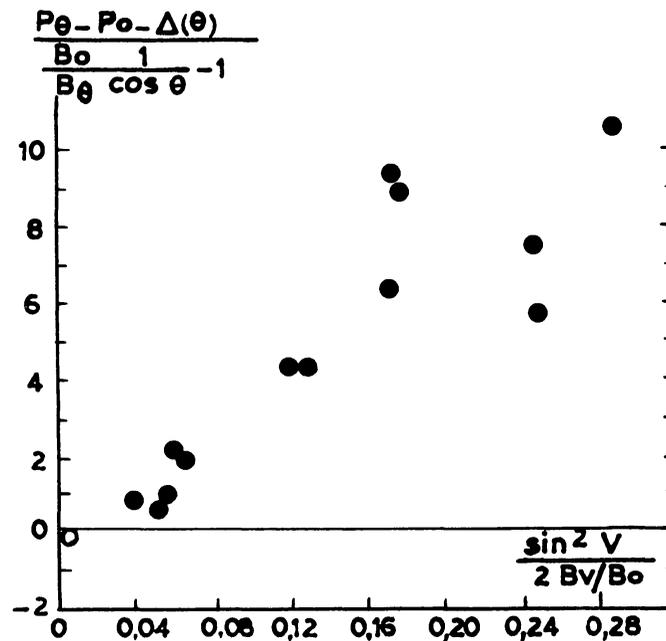


FIG. 50. — Mars : Polarisation par l'atmosphère.

LA STRUCTURE DES RÉGIONS CLAIRES

Les grandes contrées ocrées, qui constituent le sol de la planète entre les taches sombres, ont les propriétés polarisantes des deux figures 35 et 36. Après correction de la polarisation par l'atmosphère martienne interposée, la courbe de polarisation en fonction de V devient celle de la figure 53.

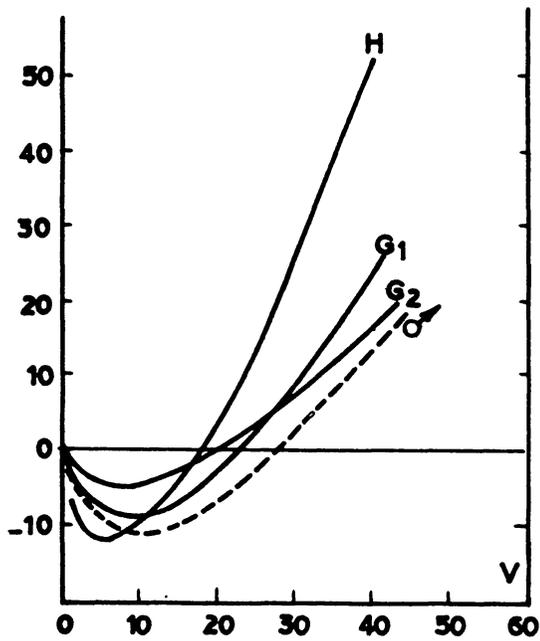


FIG. 51. — Courbe de polarisation des grès rouges (G_1 et G_2) et de l'hématite (H).

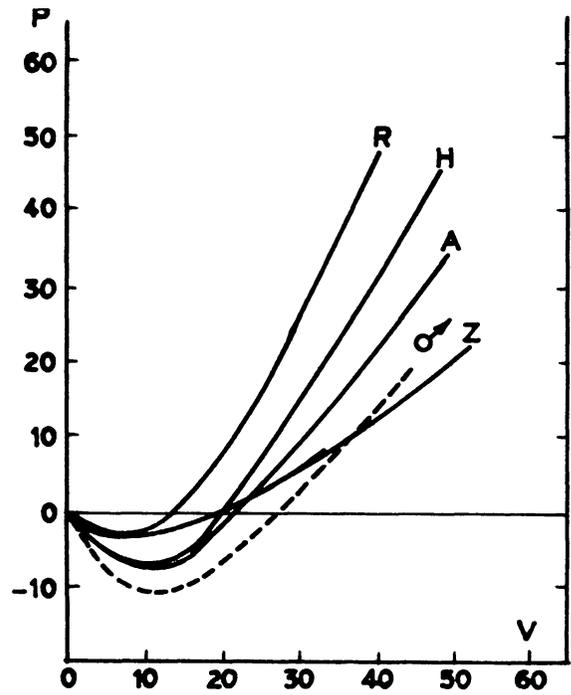


FIG. 52. — Courbes de polarisation du rutile (R), du Hornblende (H), de l'augite (A), du zircon (Z) comparées à celles de Mars.

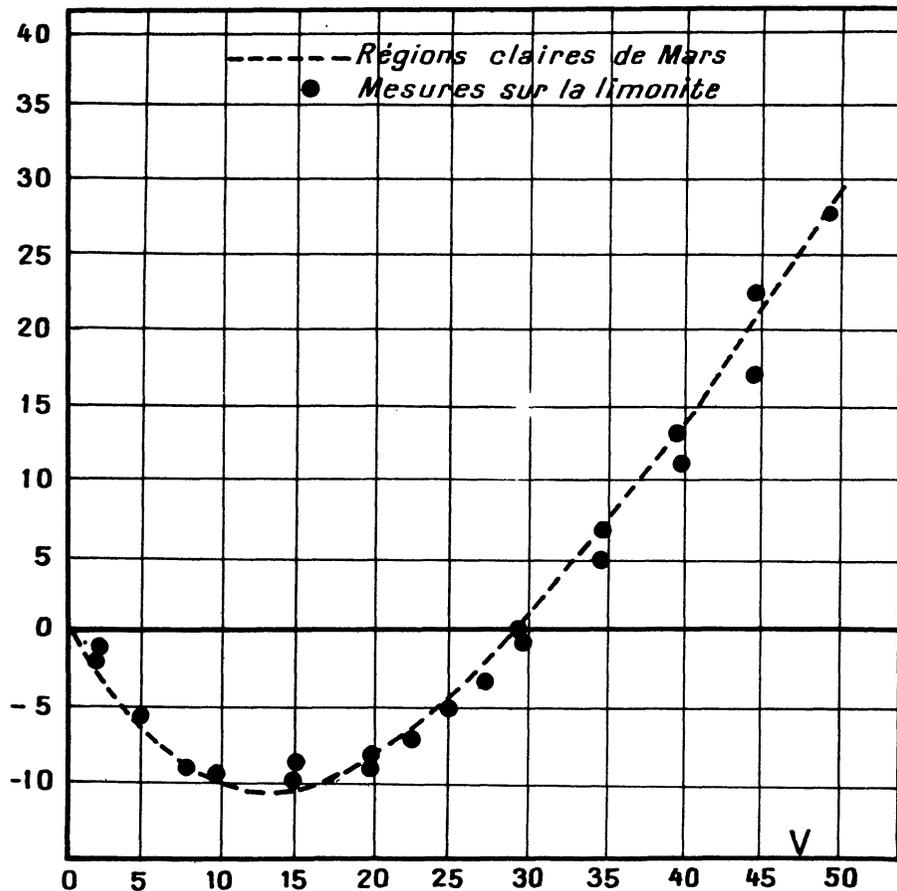


FIG. 53. — Courbe de polarisation de la limonite pulvérisée et des régions claires de Mars.

Les études développées au laboratoire montrent que de telles polarisations caractérisent nécessairement **une substance très absorbante, pulvérisée, opaque.**

Très peu de corps possèdent une inversion de polarisation pour un angle aussi élevé que 28° et cette matière doit posséder, en outre, une polarisation négative sous l'observation oblique, assez rarement associée à la propriété précédente. Ces caractères particulièrement spécifiques circonscrivent un domaine d'étude limité, favorable à la recherche de substances définies et même à la sélection d'un échantillon précis.

Différents **grès rouges** très absorbants, broyés, pulvérisés ou diversement tamisés ont été essayés, mais aucun ne manifeste une polarisation négative aussi prononcée que le sol martien et une inversion pour un angle de vision aussi élevé que 28° (figure 51, G 1 et G 2). Un seul grès rouge très particulièrement dense, pulvérisé puis aggloméré en granules pour augmenter la diffusion multiple responsable de l'inversion (cf. Dollfus 1956), se rapproche des propriétés des contrées claires de Mars, mais sans les atteindre.

Des silicates et des oxydes métalliques fortement teintés dans les tonalités jaunes ocrées ont été étudiés à l'état pulvérisé, tels les échantillons de la figure 52 :

- Pyroxène : **Augite** $\text{SiO}_2(\text{Fe}, \text{Ca}, \text{Mg})$ 0 en poudre brun jaune.
- Amphibole : **Hornblende** $\text{SiO}_2(\text{Al}, \text{Fe}, \text{Ca}, \text{Mg})$ 0 en poudre brun jaune foncée.
- Oxyde de Zirconium : **Zircon** SiO_2, ZrO en poudre jaune orangée très claire.
- Oxyde de Titane : **Rutile** TiO_2 en poudre brun rouge foncée.

Aucune de ces substances ne s'apparente, par la polarisation, aux propriétés du sol martien.

Des **cendres volcaniques** naturelles, mesurées sur de nombreux échantillons très divers, montrent quelquefois des courbes de polarisation en fonction de l'angle de vision identiques à celles des étendues claires du sol martien ; cependant, ces matériaux ne manifestent pas la polarisation caractéristique de ce sol sous l'observation oblique. De plus, les couleurs diffèrent généralement de la teinte jaune spécifique de Mars.

Les **Oxydes de Fer** en différentes variétés selon l'état d'hydratation peuvent montrer cette polarisation sous la vision oblique, avec l'angle d'inversion de 28° . Non hydratée, l'**Hématite** (fer oligiste) FeO en poudre rouge cerise ou broyée en petits grains, ainsi que la variété ocre rouge s'écartent encore du sol martien.

Mais les échantillons hydratés **goethite** $\text{Fe}_2\text{O}_3, \text{H}_2\text{O}$, en poudre jaune ou jaune ocrée et surtout la **Limonite**, $\text{Fe}_2\text{O}_3, 3\text{H}_2\text{O}$ jaune brun d'albedo 0,20, reproduisent la polarisation martienne dans ses détails (figure 53) :

Douée des mêmes propriétés polarisantes, ayant la même couleur et un pouvoir diffusant comparable, la **limonite pulvérisée** paraît reproduire très fidèlement les caractères des régions désertiques martiennes.

La structure fine montre l'aspect microscopique de la figure 54.

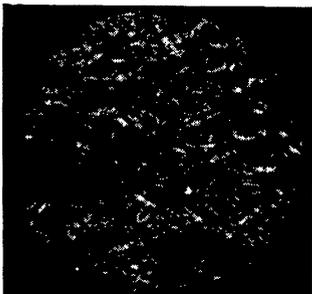


FIG. 54. — Aspect microscopique d'un échantillon de limonite pulvérisée reproduisant la polarisation de la lumière de Mars.

LA NATURE DES TACHES SOMBRES

La polarisation de la lumière renvoyée par les taches sombres de la surface du sol de Mars évolue en fonction de l'angle de vision selon les courbes de la figure 41. La proportion polarisée est celle de la courbe A, ou bien celle de la courbe B, selon la saison, et les propriétés polarisantes changent au rythme annuel du graphique de la figure 42.

Les formes des courbes A et B invitent à conclure à une structure en grains très opaques ; mais les variations saisonnières s'expliquent malaisément. Une étendue végétale recouvrant le sol pourrait manifester de tels changements. Cette hypothèse, déjà invoquée pour interpréter les modifications printanières de la couleur et du contraste de ces plages expliquerait aussi les changements incessants de l'aspect des petites taches qui constituent par leur synthèse les grandes régions sombres, telles qu'elles apparaissent dans l'observation au réfracteur de 60 cm. du Pic du Midi à la faveur des nuits propices (Dollfus 1953).

L'hypothèse végétale devait être considérée à la lumière des renseignements nouveaux apportés par l'observation de la proportion de lumière polarisée.

Polarisation par les végétaux phanérogames :

Les végétaux supérieurs à structure complexe, telles que les plantes vertes, possèdent généralement des tiges ou feuilles dont la surface réfléchit la lumière dans la direction spéculaire : elles polarisent fortement vers les directions brewstériennes et n'ont généralement pas les propriétés nécessaires pour manifester, par les diffusions multiples, la polarisation négative aux petits angles de vision.

Sur la figure 55 ont été groupées quelques courbes mesurées en été sur des surfaces recouvertes de forêts (I), parterres et ronces (II), plantes maraîchères (III), plantes basses telles que romarin (IV), origan (V), ou pâturages (VI). Ces courbes s'écartent toujours radicalement des mesures obtenues sur la planète Mars.

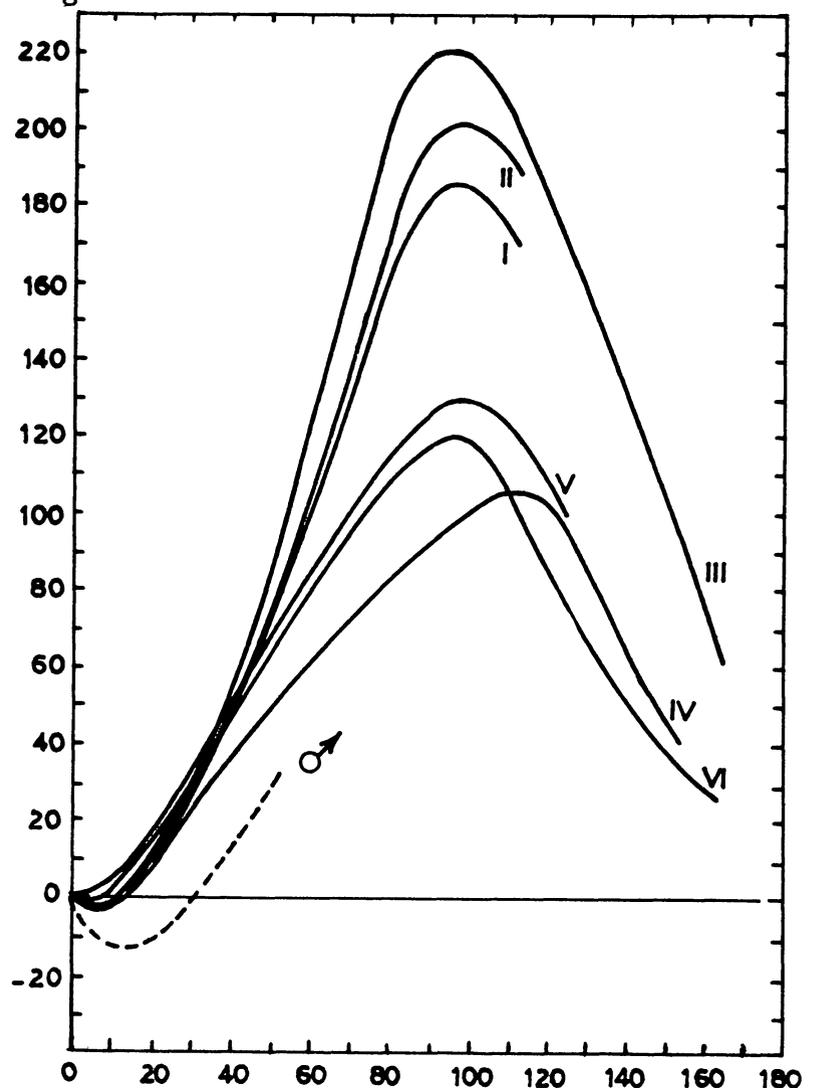


FIG. 55. — Courbes de polarisation de quelques plantes à feuilles.

La structure en feuille responsable de cette polarisation est d'ailleurs, par nature, très spécifique du développement végétal dans les conditions physiques et chimiques de la surface de la Terre ; ses fonctions hautement spécialisées pourraient être sans objet dans le cadre physico-chimique différent qui règne sur la planète Mars.

Polarisation par les végétaux cryptogames :

Les Cryptogames à petites feuilles, du type Muscinées, renvoient la lumière d'une feuille sur l'autre, selon une distribution complexe que traduit une polarisation essentiellement variable avec la direction de l'observation. La figure 56, relative aux mesures en fonction de l'angle de vision V , de l'inclinaison I de la normale à la surface dans le plan de vision, et de l'inclinaison L perpendiculairement à ce plan, montrent sur une mousse d'automne commune aux climats tempérés la divergence profonde entre ce comportement et celui des régions sombres de la planète ; les propriétés polarisantes des taches de Mars demeurent en effet quasi indépendantes de l'orientation de l'observateur.

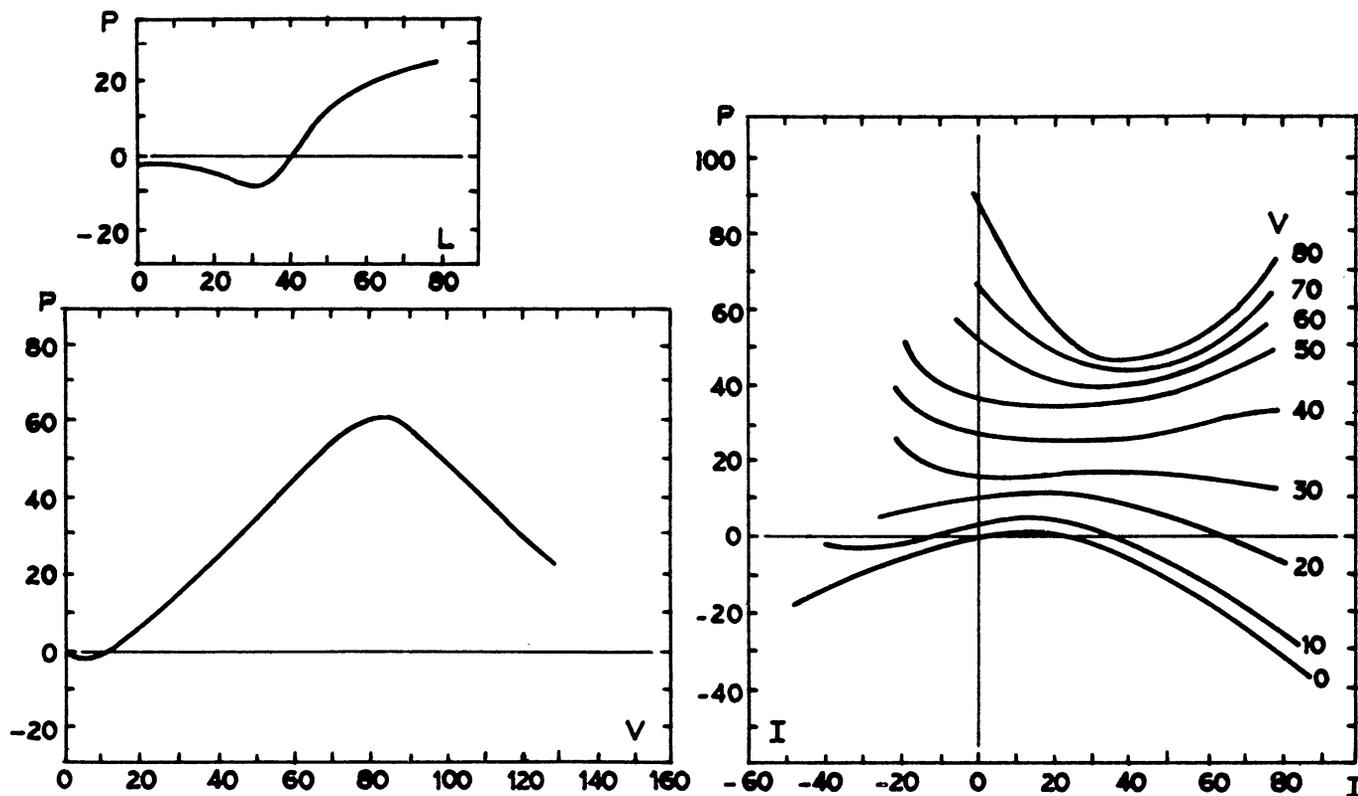


FIG. 56. — Courbes de polarisation d'un échantillon de mousse.

V = Angle de vision.

I = Angle d'inclinaison de la normale à la surface et du rayon visuel, la normale étant dans le plan de vision.

L = Angle d'inclinaison de la normale à la surface et du rayon visuel, la normale étant perpendiculaire au plan de vision.

Les Thallophytes ont été étudiées sur des Lichens vulgaires trouvés dans la nature, en France et en Scandinavie et mesurées « in situ » ou bien dans le laboratoire. Je suis redevables à MM. des Abbays et Lami, du Laboratoire de Cryptogamie de Rennes et du Museum d'Histoire Naturelle, de la vérification de certaines identifications.

Les échantillons suivants sont reportés sur la figure 57 :

Forme du Thalle	N° sur la figure	Désignation	Angle d'inversion	P min. (millièmes)
Folliacé . . .	I	<i>Parmelia perlata</i> Ach.	14°	—6
.	II	<i>Parmelia caperata</i>	10°	—6
Fruticuleux . .	III	<i>Cladonia coespititia</i> Pers. . .	12°	—7
» . .	IV	<i>Cladonia delicata</i> Fl.K. . . .	12°	—10
» . .	V	<i>Usnea barbata</i> L.	16°	—11
Crustacé . . .	VI	<i>Lecanora conyzea</i> Nyl.	18°	—10
» . . .	VII	<i>Boeomyces rufus</i> Runenh. . .	17°	—8
« . . .	VIII	<i>Caloplaca citrinia</i> Th. fr. . .	16°	—8

Les quatre derniers échantillons ont une polarisation négative assez prononcée et un angle d'inversion supérieur à 15°, leurs thalles étant poudreux ou incrustés d'abondants granules ; même dans ce cas, les courbes n'atteignent pas celles de Mars et toute tendance à l'étalement de la plante entraîne une exagération de cette différence.

Polarisation par les végétaux pulvérulents :

Les structures végétales terrestres prennent dans les états les plus élémentaires des formes simples d'organismes divisés, isolés, petits. Cette constitution se rencontre en particulier lorsque les conditions physiques ne sont pas propices au développement d'une morphologie plus élaborée.

Une substance végétale poudreuse absorbante, répandue éparsée sur le sol, altère peu la polarisation de ce support, ainsi que le montre la figure 58 : la courbe caractérise une couche de roche absorbante pulvérisée semblable à celle du sol clair de Mars ; elle est ensuite saupoudrée d'une couche de champignons microscopiques **Pleurococcus vulgaris** desséchée et étalée en quantité suffisante pour colorer le support ; la polarisation mesurée, représentée sur la figure par des points, caractérise à la fois le support et les grains et la courbe conserve une branche négative accusée.

Une morphologie en grains distincts, petits et très absorbants manifeste donc une polarisation avec branche initiale négative ; elle se combine avec celle du sol et peut donner une courbe de polarisation voisine de celle des taches martiennes.

Des êtres biologiques de ce type pourraient être un des constituants principaux, pas nécessairement exclusif, de la substance saisonnièrement variable qui recouvre les régions assombries de la surface martienne.

Je n'ai pas trouvé de substance, ni biologique, ni minérale, qui reproduise exactement la polarisation de la courbe A des régions martiennes au printemps (figure 41). L'angle d'inversion, très élevé, dépasse 30° après correction de la polarisation par l'atmosphère de Mars et cette singularité apparaît rarement sur nos substances terrestres. Des organismes vivants, il est vrai, peuvent acquérir dans les conditions physico-chimiques de la surface martienne une morphologie et une polarisation particulières.

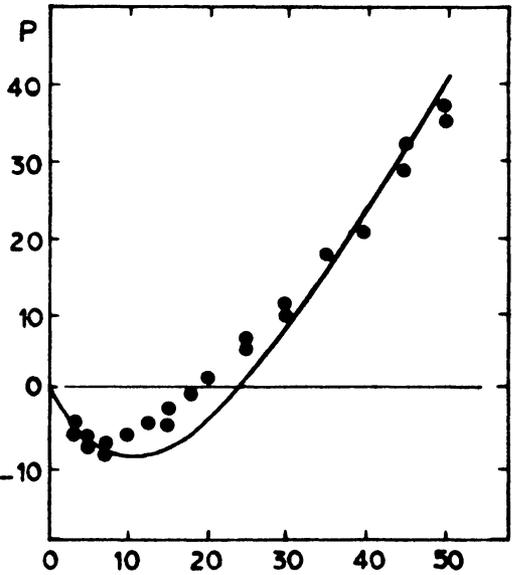
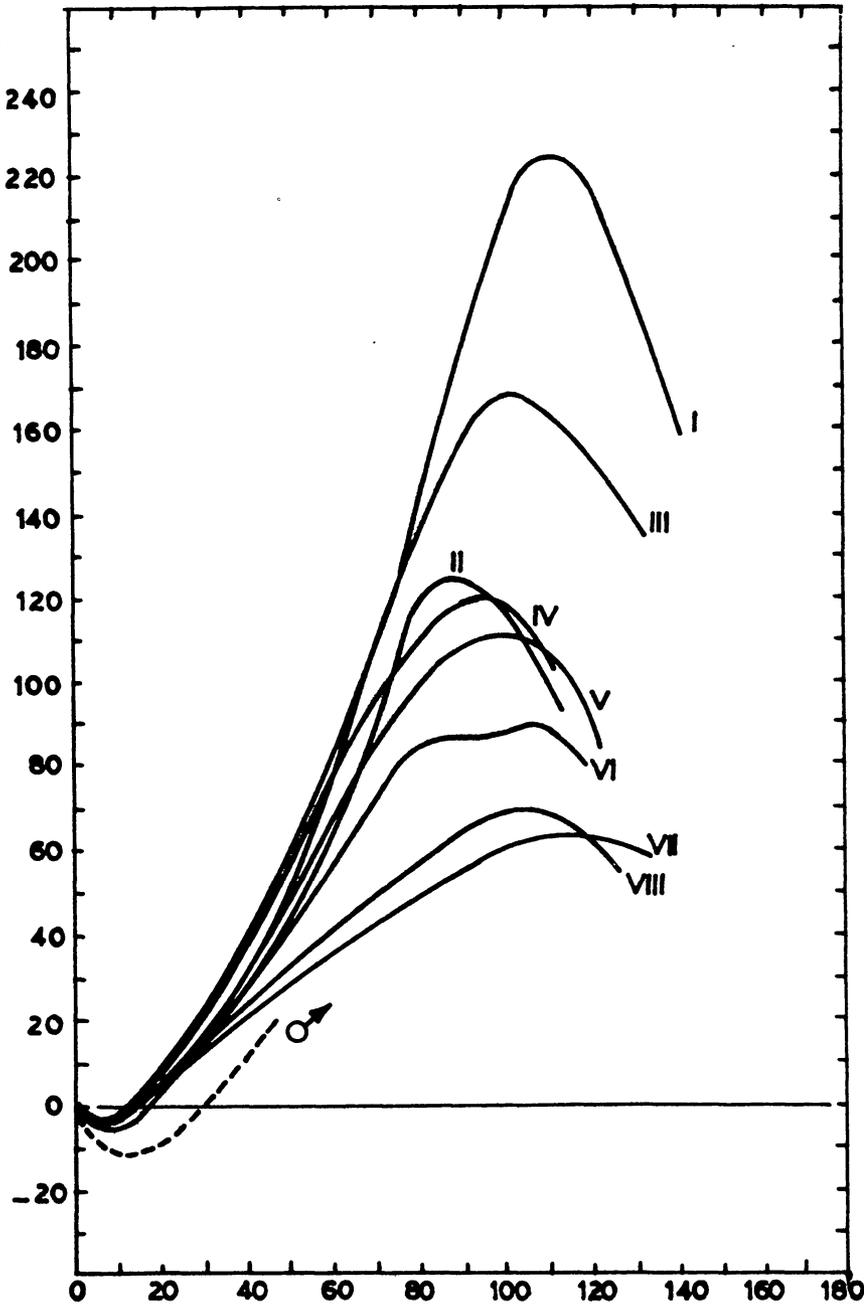


FIG. 58. — Courbe de polarisation d'un dépôt de limonite (trait) et mesures du dépôt recouvert de petits végétaux pulvérulents (*Pleurococcus vulgaris*).

FIG. 57. — Courbes de polarisation d'échantillons de lichens.

Les structures animées les moins élaborées possèdent les facultés d'adaptation les plus larges. Les mesures polarimétriques semblent indiquer sur Mars une telle constitution. Comme le climat y est peu hospitalier aux organismes plus développés, les observations polarimétriques sont donc plutôt favorables, dans ce sens également, à l'hypothèse biologique.

PROPRIÉTÉS SPECTRALES DES TACHES SOMBRES ANIMÉES

Le filtre polarisant décrit page 16, associé avec un écran jaune, isole avec l'une de ses images les deux seuls domaines spectraux entourant les radiations 6290 Å et 5320 Å. Ces longueurs d'onde sont comprises dans, et entre, les bandes d'absorption de la lumière diffusée par les végétaux chlorophylliens. Les plantes vertes, observées de la sorte sont

vues rouges ; du haut des airs, les régions terrestres couvertes de végétaux phanérogames se délimitent grâce à la couleur rose foncé qui contraste avec les tonalités incertaines des étendues voisines.

J'ai examiné la planète Mars avec le filtre ayant cette propriété. Les étendues désertiques jaune ocrées apparaissent rouges ; elles diffusent en effet sensiblement plus de lumière dans la canalure 6270 Å que dans le domaine 5320 Å.

Les régions sombres, au contraire, et principalement les taches vertes, se montrent gris-vert, ou dans des tonalités intermédiaires ; elles diffèrent en cela totalement du comportement chlorophyllien.

Le résultat précédent s'accorde avec les conclusions des observations en lumière infra-rouge développées par Tickhov (1910) et par G. P. Kuiper (1949).

Le comportement n'est pas contraire à l'existence sur Mars de végétaux, même chlorophylliens ; car la faible température du milieu, jointe à l'abondance du rayonnement ultra-violet, peuvent imposer aux organismes des réactions adaptrices, destinées à protéger la chlorophylle et à utiliser le rayonnement pour des fins plus économiques ; un pigment coloré superficiel peut assurer de telles fonctions.

Sur Terre, beaucoup d'algues se comportent ainsi et leurs courbes de polarisation doivent être semblables à celles de Mars ; plus particulièrement les algues monocellulaires très colorées, telles que les phéophycées du genre **Diatomées**, ou chlorophycées **Clamydomonas**, dont l'espèce **navalis**, en grains microscopiques absorbants, s'épanouit dans le climat rude des neiges de montagne et les colorent vivement sur de grandes étendues ; ces petits organismes chlorophylliens se protègent individuellement contre le rayonnement solaire par un pigment rouge, en même temps calorifique.

Certaines bactéries saprophytes dites chromogènes, élaborent des colorants denses, tels le **Micrococcus prodigosus** rouge ou le **Bacillus pyocyaneux** bleu violacé, dont le pigment peut diffuser au dehors de l'organisme et colorer le milieu voisin.

Bien que des structures d'une toute autre nature ne puissent être exclues, les organismes d'une constitution comparable aux précédentes, répandus sur le sol de la planète Mars, pourraient vraisemblablement manifester des propriétés polarisantes et spectrales peu différentes de celles des contrées de faible albedo affectées par des transformations saisonnières.

LA CONSTITUTION DES NUAGES

Nuages blancs :

Les voiles blancs étudiés p. 79 ne peuvent pas être attribués à des gouttelettes transparentes. Celles-ci montrent, en effet, le plus généralement, vers $V = 40^\circ$, une concentration de lumière très fortement polarisée provenant de la réflexion dans l'arc en ciel. Les nuages de gouttelettes transparentes qui ne manifestent pas cet arc polarisé sont nécessairement constitués par des gouttes très petites, qui détruisent le phénomène par diffraction ; mais, d'après les études de Lyot, leur polarisation a le signe inverse de celle des nuages martiens. Il faut donc renoncer aux gouttelettes.

On obtient des voiles de cristaux de glace à la sortie d'un vase de Dewar contenant de l'air liquide et un tube soufflant de l'air près de la surface. L'inversion de la polarisation se produit sur les voiles secs vers 22° et cet angle dépend légèrement des conditions de la formation. La polarisation est d'autant plus forte que le nuage est moins dense, les renvois multiples de la lumière ayant pour effet de détruire en partie celle-ci ; les voiles blancs martiens se comportent exactement ainsi, si on tient compte en outre de la lumière du sol transmise à travers le voile.

Les nuages blancs de l'atmosphère de Mars paraissent donc vraisemblablement constitués, comme nos cirrus, par des voiles de cristaux.

Nuages bleus :

La portion de courbe de polarisation accessible aux mesures diffère de celle des nuages de cristaux et de gouttelettes de dimensions habituelles.

Sur des brouillards de gouttelettes d'eau de très petit diamètre, environ 2,5 microns, examinés par Lyot, l'arc-en-ciel, complètement oblitéré par la diffraction et déplacé vers les petits angles de vision, produit une polarisation positive assez forte entre 5° et 15° qui s'annule vers 45° pour devenir négative ensuite.

La polarisation des voiles bleus en lumière orangée, se comporte à peu près ainsi, mais l'inversion se produit pour un angle plus petit, voisin de 25° . Il faut probablement supposer des gouttelettes encore un peu plus petites, d'environ 2 microns. Un voile clairsemé suffirait à manifester la polarisation observée.

La planète Vénus montre, pour ces petits angles de vision, exactement la polarisation précédente, annulée pour 25° . De plus, la planète possède la propriété semblable de montrer les voiles brillants en lumière de courte longueur d'onde. Lyot expliquait les propriétés polarisantes de Vénus par une couche nuageuse de gouttelettes de 2,5 microns, dont la polarisation était altérée par les diffusions multiples.

La structure de ce voile peut encore être rapprochée de celle des « nuages nacrés » que l'on observe et photographie en lumière bleue dans l'atmosphère terrestre polaire, vers 20 ou 30 km. d'altitude. Ces nuages se trouvent formés sur Terre, dans des conditions de température et de pression atmosphérique semblables à celles de la haute atmosphère martienne ; d'après C. Stormer, ils seraient constitués par des particules ayant un diamètre compris entre 1,5 et 3 microns.

Après la publication des premiers résultats de mes mesures de polarisation, S. Hess (1950) a cherché à expliquer ces nuages par la congélation du gaz carbonique dans les hautes couches de l'atmosphère martienne.

Couche violette.

Il y a lieu de bien distinguer entre les « nuages bleus » qui viennent d'être étudiés et la « couche violette », d'une autre nature, supportée en nappe homogène par la haute atmosphère martienne, probablement formée par des particules de plus petites dimensions. Cette dernière couche voile les détails du sol en lumière ultra-violette ; elle doit être très ténue car les propriétés photométriques des taches claires et sombres du sol martien, sélectives par nature et différemment, se rejoignent dans le violet, où les déserts ocrés s'y montrent déjà à peine plus clairs que les régions foncées. E. Schatzman (1951) a calculé

qu'un brouillard de particules d'eau de 0,3 micron de diamètre expliquerait ce comportement photométrique en lumière ultra-violette. G.-P. Kuiper (1952) a calculé la brillance et la polarisation d'un mélange de gouttelettes de dimensions voisines de la longueur d'onde d'après la table de diffusion de Sinclair. Il conclut aussi à un voile de gouttelettes d'eau de 0,3 et 0,4 microns de diamètre ; la polarisation calculée, toujours croissante entre $V = 0^\circ$ et $V = 40^\circ$, diffère de celle observée pour les nuages bleus ; cette couche raréfiée doit envoyer une quantité de lumière polarisée très faible ; elle est indiscernable en lumière orangée ; elle pourrait se confondre en partie avec la lumière polarisée atmosphérique et contribuer à altérer légèrement, dans ce cas, la valeur de la détermination de la pression atmosphérique de la page 87 , ainsi que me l'a signalé le Dr Kuiper. Cette couche, non observée polarimétriquement, est distincte des nuages bleus étudiés précédemment.

Nuages jaunes :

Ces formations, assez rares, ont été attribuées à des voiles de poussière, soulevés et transportés par les vents.

Une telle origine poussiéreuse paraît vraisemblable ; le polarimètre enseigne en effet que la structure de la surface du sol martien est pulvérulente ; l'observation polarimétrique du déplacement des nuages montre des vents rapides, capables de soulever la poussière.

Aux observations de mai 1952, sous l'angle de vision $V = 17^\circ$, ces nuages manifestaient une proportion de lumière polarisée positive. Or, l'étude au laboratoire de brouillards de grains (Dollfus 1956) montre que des petits corpuscules ou des petits grains, constitués en nuages, polarisent la lumière dans le sens positif plus fortement que le sol sous cet angle de vision.

Les mesures polarimétriques ne sont donc pas défavorables à l'hypothèse des voiles de poussière.

LES CALOTTES POLAIRES

Polarisation par des dépôts solides aqueux :

J'ai d'abord cherché à comparer les propriétés de polarisation des taches blanches des régions polaires martiennes avec celles des dépôts de glace, neige, givre et verglas formés sur la Terre en plein air en hiver, ou en montagne. L'éclairement était choisi semblable à celui des calottes polaires martiennes, en profitant de la hauteur du Soleil ou de la déclivité du terrain ; la normale devait être inclinée environ d'un angle $L = 60^\circ$ dans le plan orthogonal au plan de vision.

Les dépôts de glace, de verglas ainsi que les neiges de montagne refondues et glacées manifestent, sous cette incidence, une forte polarisation positive pour tous les angles de vision ; elle provient de la lumière revenant de l'intérieur de la glace, réfractée avec vibration avantagée perpendiculaire au plan de vision, et elle diffère radicalement des polarisations nulles ou négatives du dépôt martien.

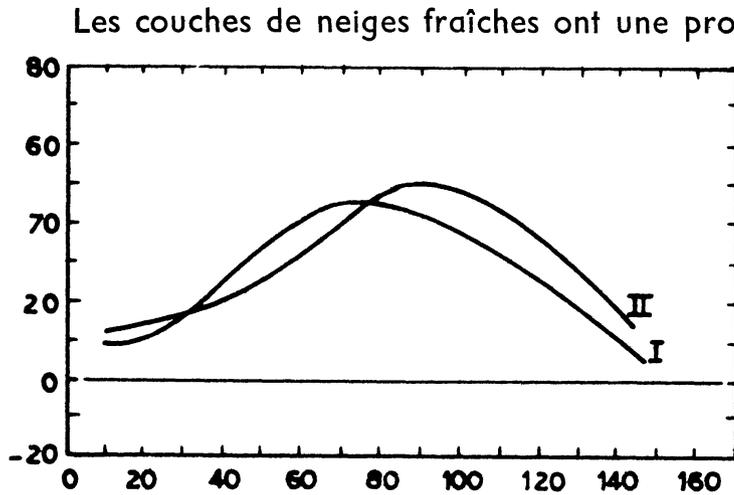


FIG. 59. — Courbes de polarisation de deux dépôts de neige fraîche, la normale étant inclinée de 60° dans le plan perpendiculaire au plan de vision.

Cependant, aucune des formations aqueuses solides naturelles précédentes ne manifeste la polarisation négative ou nulle des calottes polaires de Mars et il faut renoncer à les interpréter ainsi.

Polarisation par les givres artificiels :

J'ai étudié en détail la polarisation par le givre formé de petits cristaux distincts, en produisant de tels dépôts artificiellement : une tige de cuivre de 4 mm. de diamètre et 30 cm. de long plonge verticalement dans un vase de Dewar rempli d'air liquide ; à son extrémité supérieure est soudé un disque horizontal de cuivre mince de 3 cm. de diamètre. Par conductibilité thermique, la tige et le plateau se refroidissent ainsi que l'air environnant ; la vapeur d'eau devenue saturante se cristallise sur la surface du plateau ; on obtient du givre.

Pour mesurer la polarisation, le givre est éclairé en projetant sur sa surface l'image du filament d'une lampe, dont la polarisation résiduelle est préalablement détruite par interposition d'une lame double dépolarisante. La proportion polarisée est mesurée dans des directions repérées, avec le polarimètre muni d'un objectif pointant la surface.

Sous l'inclinaison de la lumière incidente $L = 65^\circ$ et sous l'angle de vision $V = 10^\circ$, les conditions des mesures rappellent celles des observations martiennes ; j'ai étudié de la sorte l'évolution de la polarisation produite par le givre au cours des phases successives de sa formation (figure 60, à gauche).

Une pellicule d'eau liquide est primitivement étendue par capillarité sur le plateau de cuivre refroidi ; elle gèle et forme une couche de glace lisse, soit transparente, soit laiteuse ; la polarisation est très forte, par réfraction, + 100 millièmes dans le premier cas, + 80 millièmes dans le second (point A fig. 60). Au bout de quelques instants, la surface se dépolit légèrement ; on perçoit au microscope de très fins cristaux de givre déposés sur la surface gelée ; la polarisation descend rapidement à + 7 millièmes (point B). Puis les cristaux augmentent individuellement de diamètre ; ils deviennent visibles à la loupe tandis que la polarisation s'accroît de nouveau et passe par un maximum (C) lorsque les cristaux s'aperçoivent à l'œil nu. Leur volume croît encore mais le diamètre n'augmente plus

que lentement et la polarisation, variable, diminue dans l'ensemble pour s'approcher d'une limite D voisine de + 15 millièmes. Puis le phénomène change de nature par la naissance

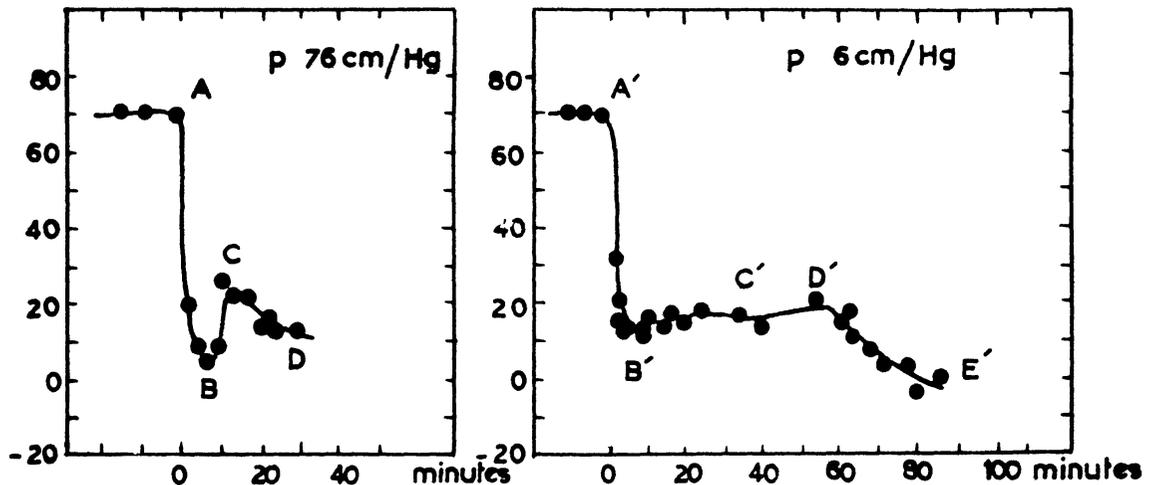


FIG. 60. — Polarisation par un dépôt de glace se couvrant de givre.

Angle de vision $V = 10^\circ$.

Inclinaison de la normale à la surface $L = 65^\circ$ dans le plan perpendiculaire au plan de vision.

A gauche : Pression atmosphérique 76 cm/Hg. - A droite : Pression atmosphérique 6 cm/Hg.

d'arborescences isolées, très fines, qui se développent aux sommets des cristaux précédents, s'enchevêtrent et recouvrent toute la surface. La couche augmente ensuite d'épaisseur en gardant cette structure aérée. La polarisation de cette dernière phase dépend de la structure du givre et elle varie d'un dépôt à l'autre. Les déterminations reportées sur la figure 61 caractérisent différents états d'arborescences, sous l'éclairement $L = 65^\circ$, pour les angles de vision V accessibles aux observations martiennes.

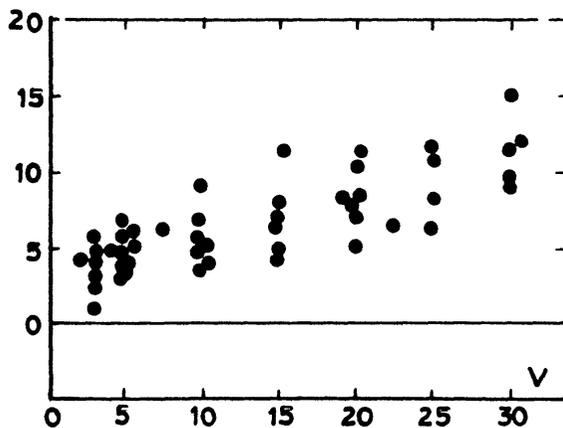


FIG. 61. — Courbe de polarisation de différents givres artificiels.

Inclinaison de la normale à la surface $L = 65^\circ$ dans le plan perpendiculaire au plan de vision. Pression atmosphérique 76 cm/Hg.

Quand la normale est contenue dans le plan de vision, on obtient les courbes de la figure 62 à droite qui indiquent une polarisation faible pour tous les angles de vision. Quand la normale est inclinée dans le plan perpendiculaire au plan de vision, les courbes pour diverses valeurs de l'inclinaison L (figure 62 à gauche) sont analogues à celles qui caractérisent les substances divisées en grains transparents étudiés ailleurs (Dollfus 1956).

On achève l'expérience en observant la disparition du givre sous l'effet d'un rayonnement calorifique : On projette sur la couche l'image du cratère d'un arc électrique ; les arborescences s'écroulent une à une comme coupées à la base et tombent en eau ;

puis les gros cristaux diminuent de volume ; de fines gouttelettes parsèment la surface, se multiplient, se soudent ; la polarisation varie constamment autour des valeurs de 10 mil-

lièmes et 15 millièmes. Un réchauffement du support obtenu par le retrait de l'air liquide entraîne une débâcle rapide.

Les phénomènes de polarisation que traduit la figure 60 s'expliquent ainsi : en A la lumière qui pénètre la couche de glace ressort avec une très forte polarisation positive par réfraction. Le très fin dépoli en B s'oppose à la pénétration de la lumière dans la couche glacée et réduit la réfraction. En C les cristaux devenus assez gros permettent la pénétration de la lumière dans leur intérieur même et leur sortie avec réfraction, malgré la diffraction.

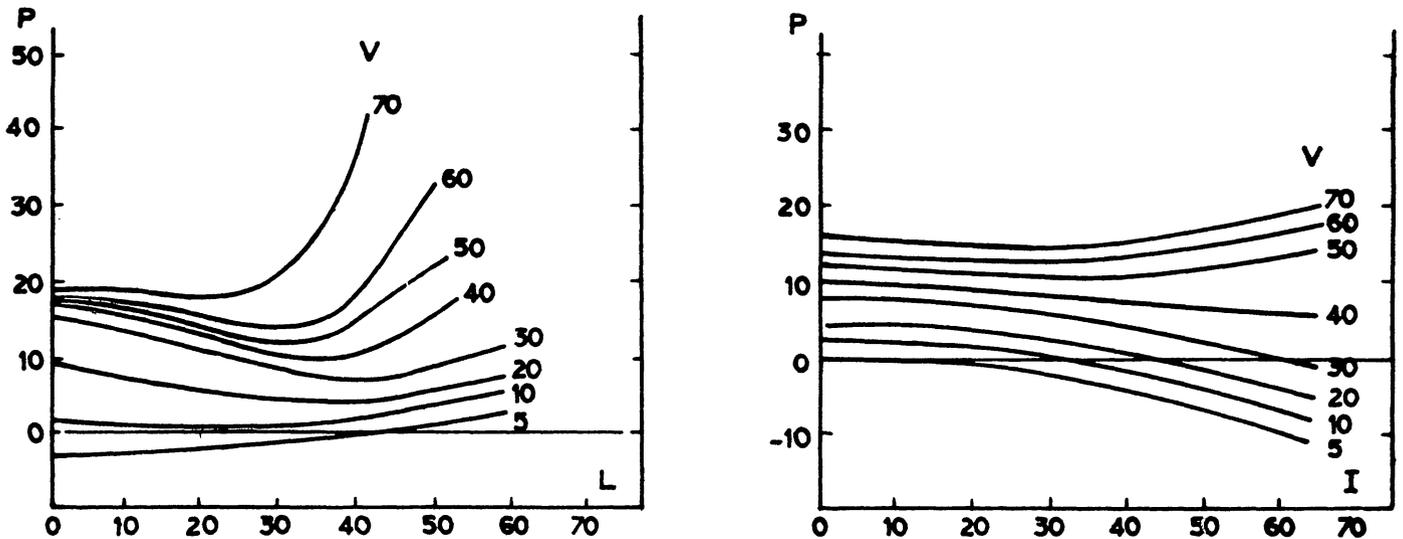


FIG. 62. — Polarisation par un dépôt de givre artificiel arborescent, sous différents angles de vision.

A gauche, en fonction de l'inclinaison L de la normale perpendiculairement au plan de vision.

A droite, en fonction de l'inclinaison I de la normale dans le plan de vision.

Les propriétés polarisantes de ces dépôts diffèrent encore de celles manifestées par les calottes polaires martiennes dont la vibration avantagée reste, au contraire, contenue dans le plan de vision.

Formation du givre sous pression atmosphérique réduite :

Les recherches précédentes n'excluent pas la présence d'un dépôt aqueux dans les régions polaires martiennes ; elles impliquent, selon cette interprétation, des conditions de structure différente de celles réalisées naturellement sur la Terre.

La pression atmosphérique au sol, sur Mars, paraît être, en effet, d'après la détermination de la page 92, environ le dixième de celle qui règne sur la Terre ; la contenance du givre pouvant s'en trouver modifiée, j'ai étudié sa formation et ses propriétés sous une pression de cet ordre.

La tige de cuivre qui supporte le plateau traverse une plateforme de matière faiblement conductrice de la chaleur, qui est coiffée par un ballon sphérique en verre, centré sur le milieu du plateau. Une pompe à vide règle la pression. De l'eau est répandue dans l'enceinte, en évitant sa congélation par un réchauffage de la base du ballon. Les mesures de polarisation sont conduites à travers le globe, les rayons incidents et émergents traversant les parois exactement selon la normale, afin d'éviter l'altération de la polarisation.

Le givre obtenu dans de telles conditions se forme beaucoup plus lentement que sous la pression atmosphérique ordinaire ; sous une pression de 1 cm/Hg le dépôt reste faible au bout de 30 minutes ; pour la pression utilisée de 6 cm/Hg la formation est déjà progressive. Les cristaux, plus réguliers, nourris plus lentement, acquièrent individuellement des diamètres plus gros ; les arborescences, rares, sont toujours formées de cristaux transparents, gros, joints par un liant de glace en apparence amorphe.

La variation de la polarisation mesurée pour $L = 65^\circ$ et $V = 10^\circ$ est représentée figure 60 à droite. La partie A' B' C' de la courbe est à rapprocher de la partie A, B, C de la figure 60 à gauche. Sur la figure 63 l'inclinaison de la normale est $L = 65^\circ$; la courbe A' est celle du support de glace, d'ailleurs très variable ; la courbe B' correspond au fin dépôt qui annonce le début de la formation du givre. Les courbes C' caractérisent différentes couches mesurées au début de la formation des arborescences. Toutes ces polarisations diffèrent encore sensiblement de celle appartenant au dépôt blanc des régions polaires martiennes.

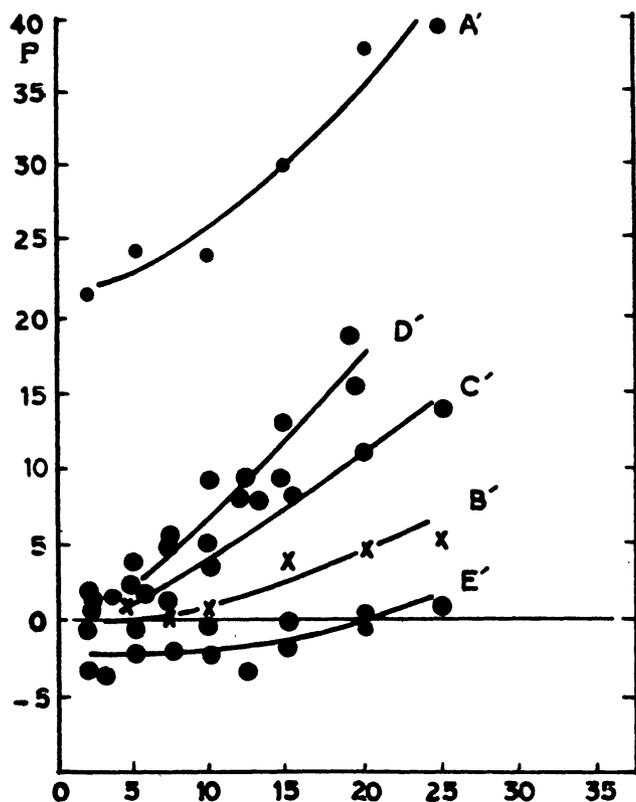


FIG. 63. — Courbes de polarisation de différents dépôts de givre sous la pression 6 cm/Hg Inclinaison de la normale à la surface $L = 65^\circ$ dans le plan perpendiculaire au plan de vision.

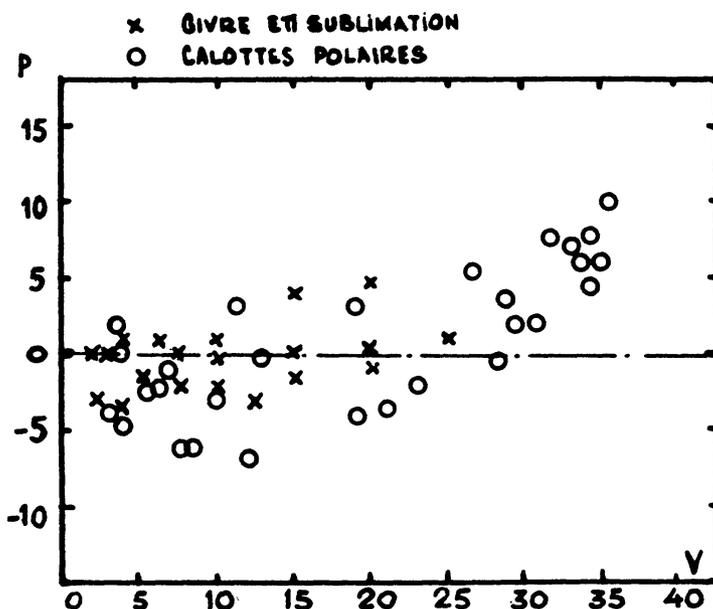


FIG. 64. Polarisation par les calottes polaires de Mars au printemps (points) et par des dépôts de givre artificiel sous pression atmosphérique 6 cm/Hg (croix) se sublimant sous l'effet d'un rayonnement calorifique.

Mais les calottes polaires sont observées pendant la journée alors que le rayonnement solaire les éclaire. Soumis au rayonnement calorifique de l'arc électrique, la couche ne fond pas ; contrairement au cas précédent, elle se sublime seulement ; les arborescences disparaissent ; puis les cristaux diminuent progressivement de diamètre ; ils restent soudés à la glace sous-jacente et celle-ci prend finalement l'aspect d'une surface de verre opale criblée par des pores presque jointifs et de nombreuses cavités.

L'albedo est alors plus faible. On ne peut observer de trace d'eau liquide que lorsque le réchauffement provient, par conduction, du support lui-même. Sur la figure 63, la branche D' E' correspond à la sublimation ; la polarisation est alors très comparable à celle des calottes polaires martiennes ; sur la figure 64 les mesures effectuées sur Mars et sur la couche de givre en sublimation sont indistinctement mêlées.

La structure superficielle de la matière blanche qui recouvre saisonnièrement les régions polaires martiennes paraît donc comparable, au printemps, à celle d'un dépôt de givre d'eau formé dans les conditions atmosphériques martiennes et soumis au rayonnement solaire. Ce dépôt se résorbe en surface par sublimation.

Origine des taches brillantes au bord de la calotte polaire :

Les mesures décrites p. 79 révèlent la nature particulière des taches très brillantes qui se forment souvent dans certaines régions privilégiées du contour de la calotte polaire.

Aucune des substances solides mesurées au laboratoire ne possède une polarisation négative aussi forte. Des nuages de cristaux de glace donnent cette polarisation. Il faut donc admettre que ces taches éclatantes sont des voiles nuageux.

Les nuées se conservent d'un jour à l'autre et semblent occuper des régions déterminées ; pour étudier cette localisation privilégiée, j'ai examiné leurs aspects successifs au cours de la régression, avec toute la finesse que permet le réfracteur de 60 cm. lors des instants de définition parfaite ; le pouvoir séparateur est alors voisin de 0''2 et le grossissement nécessaire atteint 900. Vingt et un dessins obtenus au cours des trois oppositions de 1948, 1950 et 1952 montrent le morcellement de la région blanche au cours de sa disparition ; il s'effectue chaque année martienne selon le même processus. J'ai décrit ailleurs cette évolution (Dollfus 1953).

Les avancées du contour de la région blanche caractérisent vraisemblablement des régions élevées, des hauts plateaux, ou bien des massifs accidentés qui retiennent plus longtemps le dépôt de givre. Or, précisément, les régions brillantes qui montrent une polarisation anormale occupent le plus généralement les emplacements mêmes de ces contrées. Elles seraient donc liées au relief. Au début de la régression printanière, vers la longitude héliocentrique $\eta = 140^\circ$ **les hauts plateaux montagneux de la région polaire Nord, encore recouverts par le givre déposé au sol, retiennent sur leurs sommets des formations nuageuses denses, qui les enveloppent.** Ces voiles seraient responsables de la polarisation particulière observée.

LA VAPEUR D'EAU DANS L'ATMOSPHÈRE

Quantité d'eau nécessaire :

Les observations polarimétriques des calottes polaires et des nuages martiens s'expliquent tout naturellement en supposant l'existence de l'eau dans l'atmosphère de la planète.

Or, les recherches spectroscopiques n'ont pas révélé la présence de la vapeur d'eau. Cependant, une quantité très faible suffit pour provoquer des nuages et des dépôts de givre dont le polarimètre révèle la nature. Nous allons montrer que les résultats spectroscopiques négatifs ne suffisent pas pour exclure l'existence de l'eau nécessaire pour l'interprétation des courbes de polarisation.

On peut déterminer une limite maximum de cette teneur en eau en supposant d'abord l'atmosphère complètement saturée à toute altitude. La hauteur d'eau précipitable dépend alors seulement de la température. Le gradient thermique vertical est le rapport g/c de la gravité par la chaleur spécifique à pression constante. L'azote, constituant vraisemblablement principal de l'air martien, à même chaleur spécifique que l'air terrestre ; le gradient thermique est sur Terre, en atmosphère sèche, 10° par km. ; sur Mars, il est modifié dans le rapport de la gravité et devient $3,7$ par km. La présence du gaz carbonique augmente ce gradient mais la saturation de l'eau le diminue. Dans le tableau suivant, colonne II, j'ai calculé la température de l'air aux différentes altitudes en admettant la décroissance $3,5$ par km. et la température -20° C près du sol. La colonne III donne la pression de vapeur saturante correspondant à cette température d'après la table de changement d'état de l'eau ; elle reste toujours inférieure à la pression atmosphérique. La colonne IV donne la hauteur d'eau précipitable correspondant à la saturation, pour chaque tranche de 1 km d'atmosphère, calculée par la formule

$$h \text{ (mm/Km)} = 286.p \text{ (mm/Hg)}/T.$$

z km	MARS (saturé)			TERRE (saturé)			(observé)	
	T	p mm/Hg	h mm/Km	T	p	h	p	h
0 km	-20° C	0,8	0,90	+15	12,7	12,5	7,5	7,5
1	$-23,5$	0,56	0,65	+8,5	8,3	8,3	5,5	5,5
2	-27	0,40	,46	+2	5,3	5,5	3,5	3,5
3	$-30,5$	0,30	0,35	$-4,5$	3,2	3,4	2,5	2,5
4	-34	0,20	0,24	-11	1,8	1,9	1,6	1,7
5	$-37,5$	0,15	0,18	$-16,5$	1,1	1,2	0,6	0,66
6	-41	0,10	0,12	-23	0,6	0,7	0,3	0,34
7	$-44,5$	0,06	0,07	$-29,5$	0,3	0,35	0,1	0,12
8	-48	0,04	0,05	-36	0,2	0,25		
Total		3,00			34		22

La somme des valeurs de la colonne IV donne 3,0 mm. ; c'est la hauteur maximum d'eau précipitable qu'une atmosphère martienne dont la base serait à -20° C pourrait contenir si elle était entièrement saturée.

Cette valeur dépend dans une très large mesure de la température admise pour l'air près du sol. Le calcul a été effectué pour diverses valeurs de T.

Température
à la base de l'atmosphère

$= 0^\circ$ C	Hauteur d'eau précipitable =	17,5 mm.
-10°		7,5
-20°		3,0
-30° C	Hauteur d'eau précipitable =	1,0
-40°		0,3

La température de la basse atmosphère martienne n'est pas connue ; elle est vraisemblablement plus froide que celle du sol et une température comprise entre -30 et -40° C, et même moindre, peut être supposée raisonnablement.

Les observations montrent que la saturation de l'eau n'est réalisée que rarement et localement, l'atmosphère, dans son ensemble, ne contenant qu'une quantité d'eau très inférieure à sa capacité maximum. Sur Terre, dans les déserts équatoriaux ou tempérés, un état hygrométrique moyen de 25 % au sol n'exclut pas la formation locale de brumes et de givres ; sur Mars, un tel état nécessiterait un abaissement de température de 14° pour amener la saturation, et dans une ascendance celle-ci se produirait vers $14/3,5 = 4$ kilomètres d'altitude seulement.

La hauteur d'eau précipitable serait, dans ce cas, une fraction de millimètre au plus : une valeur aussi faible suffit probablement à expliquer les nuages et le givre identifiés par le polarimètre.

L'atmosphère terrestre doit probablement posséder une teneur en eau précipitable comparable à la précédente, pour l'ensemble de ses couches, au-dessus d'une altitude voisine de 6.500 m. La température, à cette hauteur, est en moyenne voisine de -28° ; elle est probablement plus élevée que celle de l'air martien près du sol, mais le gradient thermique vertical, deux fois plus rapide, refroidit plus rapidement les couches supérieures et cette distribution peut compenser la différence. On observe encore des cirrus à cette altitude et l'état hygrométrique y est également comparable à celui de l'air martien. L'absorption spectrale de la vapeur d'eau doit être, vers 6000 ou 7000 m. semblable à celle manifestée par la planète elle-même.

Le 30 mai 1954, je me suis élevé vers cette altitude, de nuit, avec une installation astronomique, à bord d'un aérostat ; Charles Dollfus, mon père, m'accompagnait pour piloter le ballon ; le spectrophotomètre polarisant réalisé dans ce but et décrit ailleurs montra ; au lever du Soleil, une hauteur d'eau précipitable d'environ **0 mm. 25** (Dollfus 1954). La teneur en eau de l'atmosphère de Mars ne dépasse **probablement pas cette valeur** ; elle est certainement beaucoup plus faible encore dans les régions martiennes circumpolaires.

L'atmosphère terrestre contient, au contraire, une quantité d'eau importante : les colonnes V à X du tableau p. 107 donnent la hauteur d'eau précipitable dans deux cas :

- a) en supposant l'atmosphère standard complètement saturée, ce qui donne 34 mm. d'eau ;
- b) en adoptant pour la pression de vapeur à chaque altitude les valeurs moyennes observées réellement, d'après Humphrey (Physic of the Air), soit 22 mm. d'eau.

Pendant les nuits d'observation sèches et froides, par ciel pur, la teneur peut s'abaisser jusque vers 10 mm.

Dans ces conditions les plus favorables, la vapeur d'eau terrestre doit donc être environ cent fois plus abondante que celle traversée sur Mars par la lumière ; les bandes d'absorption tellurique, encore exagérées par la pression atmosphérique plus grande sur la Terre que sur Mars, sont vraisemblablement plusieurs centaines de fois plus denses que les bandes de la vapeur d'eau martienne et elles empêchent de déceler celle-ci,

même, semble-t-il, lorsque les raies sont déplacées par le mouvement radial de l'astre (W. S. Adams et C. E. St John 1934 ; S. Adams 1941).

Les résultats actuels de l'examen spectroscopique ne semblent donc pas infirmer l'interprétation des mesures polarimétriques.

La détection de la vapeur d'eau dans le spectre de Mars serait facilitée par l'emploi d'observatoires élevés ; le tableau p. 107 montre qu'à 3000 mètres la vapeur d'eau serait réduite 3,5 fois et les mesures que j'ai effectuées au Pic du Midi en 1953 avec un spectrophotomètre polarisant confirment cet ordre de grandeur. Il serait souhaitable de s'élever beaucoup plus haut. J'ai l'intention de continuer les recherches dans ce sens en observant en haute altitude, depuis la nacelle d'un aérostat (Dollfus 1954).

Circulation de la vapeur d'eau dans l'atmosphère de Mars :

Les observations polarimétriques semblent bien établir que l'eau n'existe pas en nappes liquides ; que les changements d'états sont des sublimations ; que la masse totale d'eau reste peu importante ; que la pression atmosphérique est faible. Par suite, en raison aussi de la longueur de l'année, le mécanisme de la propagation de la vapeur d'eau dans l'atmosphère reste beaucoup plus simple que sur la Terre. Dégagée des influences perturbatrices locales, la vapeur est sollicitée presque exclusivement par les variations climatiques saisonnières ; elle se voit rythmée par une circulation générale régulière.

1° - Évaporation de la calotte polaire :

Au printemps martien, l'atmosphère de la région boréale s'imprègne de vapeur d'eau au contact du givre polaire amené à l'état de sublimation. La vitesse de transformation du givre en vapeur s'exprime par la loi de Dalton :

$$v = K(F - f)S/H$$

S = surface d'évaporation
 F = pression de vapeur saturante
 f = pression de vapeur de l'air
 H = pression atmosphérique

La pression H au sol est environ 0,1 fois celle de la Terre. Toute chose égale d'ailleurs l'atmosphère se charge d'eau 10 fois plus rapidement sur Mars que sur la Terre.

2° - Diffusion de la vapeur d'eau :

La vapeur dont l'air boréal est chargé diffuse vers les régions équatoriales. La vitesse de diffusion moléculaire est proportionnelle au coefficient de Stephan :

$$D = K.T^2/H \quad T = \text{température absolue de l'air.}$$

En admettant la température moyenne 250° pour Mars et 290° pour la Terre, le transport par diffusion pure est 7 fois plus rapide sur la planète que dans notre atmosphère.

La plus grande partie de ce transport s'effectue par mélange turbulent ; celui-ci est d'autant plus rapide que le gradient thermique vertical demeure plus voisin du gradient adiabatique, selon l'expression $D' = K/(\Gamma_{\text{vrai}} - \Gamma_{\text{adiab.}})$

Sur Mars, la vapeur d'eau est rarement condensée et le gradient réel s'écarte peu de la valeur adiabatique réalisée dans une atmosphère sèche ; la diffusion par turbulence doit donc être aussi plus rapide que dans l'atmosphère terrestre. La tension de vapeur tend à s'uniformiser très rapidement.

3° Circulation générale de la vapeur d'eau :

Le schéma saisonnier est alors le suivant : au printemps de l'hémisphère Nord le dépôt polaire s'évapore : la vapeur d'eau diffuse vers les régions équatoriales plus chaudes et moins saturées ; une partie continue à progresser vers l'hémisphère austral, alors en hiver et très froid, et elle se dépose finalement sur le sol, selon le principe de la paroi froide ; elle constitue la calotte polaire Sud. La circulation s'inverse ensuite. ***La vague saisonnière manifestant les changements de tonalités, de colorations et de polarisations des contrées sombres serait associée, selon ce schéma, au passage de la vapeur d'eau d'un hémisphère à l'autre.*** Le comportement des voiles nuageux hivernaux décrit p. 82 trouve également une explication de la sorte.

J'avais communiqué en 1946 cette description de l'évolution de la vapeur d'eau à la Société Astronomique de France : « l'eau qui s'évapore de l'une des calottes diffuse vers l'équateur et est entraînée dans la région polaire opposée où elle se congèle sur le sol ; puis le mécanisme recommence en sens inverse ; la vapeur d'eau chemine constamment d'un pôle à l'autre ». On trouve maintenant l'accord de ces hypothèses avec le résultat des observations polarimétriques.

Depuis, en 1950, à l'Observatoire Lowell, S. Hess a été conduit à des conclusions analogues ; il a décrit et soumis au calcul le cycle saisonnier de l'évolution de la vapeur d'eau et l'a rapproché de celui des changements de contraste et de coloration des contrées sombres, déjà bien connu. En 1951, G. de Vaucouleurs a également développé sur les hypothèses semblables, de très intéressantes conclusions.

CONCLUSION

Les recherches exposées dans cet ouvrage ont contribué à perfectionner nos connaissances : — sur l'analyse des lumières faiblement polarisées. — sur les conditions physiques de la surface visible des planètes.

Voici les principaux résultats nouveaux :

A. — La mesure de la polarisation de la lumière sur les petites régions de la surface des planètes a fait appel à plusieurs nouveaux dispositifs :

1° un polarimètre visuel pour les faibles brillances, à grille demi-onde, décelant une proportion de lumière polarisée de 1 millième sur une source de brillance un dix millième de stilb ; la précision devient un pour cent pour chaque mesure sur les images ayant pour brillance un millionième de stilb seulement ;

2° un filtre monochromatique polarisant isolant la lumière d'une partie du spectre étendue sur 100 Å environ, ou bien 200 Å au choix, sans perte de lumière et sans la nécessité de polariser la lumière à l'entrée du filtre ;

3° un nouveau compensateur de polarisation atmosphérique permettant de réaliser commodément sur les planètes des mesures non altérées par les lueurs du crépuscule et la lumière du ciel diurne ;

4° un polarimètre photographique réalisé selon un principe étudié pour atteindre la sensibilité maximum imposée par le rendement quantique des meilleures émulsions ;

5° un compensateur de polarisation partielle et un polariscope de Savart dont les franges ont un écartement réglable ;

6° un petit polarimètre adapté pour mesurer en plein air la polarisation manifestée par les phénomènes naturels.

B. — Les observations effectuées avec les instruments astronomiques sur les planètes et sur la Lune ont conduit aux connaissances nouvelles suivantes :

1° La surface du sol de la planète **Mercure** polarise la lumière plus fortement sur les taches sombres que sur les régions claires, propriété analogue à celle de la surface lunaire. Les mesures polarimétriques laissent présumer l'existence d'une très faible atmosphère, dont la pression au sol serait quelques millièmes de celle de l'atmosphère terrestre ;

2° La polarisation de la lumière de **Vénus** indique une pression atmosphérique à l'altitude supérieure des nuages un peu inférieure au dixième de celle observée à la surface de la Terre. Le polarimètre révèle sur le disque des régions où la lumière est polarisée de façon particulière, selon des taches mouvantes éphémères ; la direction de la polarisation y est souvent déviée, en raison probablement de l'anisotropie de la structure de la couche nuageuse. Les positions de ces taches polarisées ne coïncident pas avec celles des voiles nuageux observés visuellement ; les régions polaires manifestent des polarisations particulières que l'on pourrait attribuer à l'influence du relief sur les formations nuageuses.

Les voiles peuvent être constitués par des particules d'eau car les mouvements convectifs réguliers doivent suffire à empêcher la congélation de la vapeur sur l'hémisphère non éclairé. La quantité d'eau nécessaire reste indécélable à l'aide des observations spectrographiques ordinaires ;

3° Les mesures polarimétriques réalisées sur **Jupiter** indiquent une atmosphère chargée par un brouillard léger de gouttelettes très fines, en suspension au-dessus de la couche nuageuse observée ; le diamètre de ces particules semble voisin de 1 micron seulement ;

4° L'observation, la photographie, les mesures photométriques et polarimétriques de la **lumière cendrée** de la Lune ont été réussies jusqu'aux angles de phase très faibles. La polarisation de cette lumière confirme la nature pulvérulente du sol lunaire, dont la structure apparaît analogue à celle de granules noirs opaques. La courbe de polarisation de la Terre vue de l'espace est déduite et expliquée.

5° La planète **Mars** apparaît recouverte, dans ses régions désertiques, par une matière poudreuse très semblable à la limonite pulvérisée. Les taches sombres, nécessairement pulvérulentes aussi, montrent une variation saisonnière de polarisation ; il semble possible d'expliquer cette évolution par une végétation, en la supposant constituée par des microorganismes très colorés.

Les calottes polaires s'entourent saisonnièrement de taches très sombres et manifestent, lors de la régression printanière, la polarisation d'un dépôt de givre se sublimant sous l'action d'un rayonnement calorifique.

L'atmosphère, dont la pression au sol se révèle le douzième de la nôtre, supporte des nuages et des voiles blancs, quelquefois très ténus, polarisant comme les brouillards de cristaux de glace. Le polarimètre révèle des voiles trop raréfiés pour se manifester directement ; il permet l'étude de leur évolution saisonnière ; certains voiles, en particulier le long du contour des calottes polaires, semblent la conséquence du relief martien.

Des brumes tropicales du soir et du matin diffusant la lumière ultra-violette polarisent comme des gouttelettes d'environ 2 microns de diamètre ; elles s'associent quelquefois aux voiles blancs, mais à une altitude supérieure ; d'autres phénomènes atmosphériques très ténus échappant aux observations visuelles et photographiques proviennent probablement de la poussière soulevée par le vent.

L'eau qui constitue vraisemblablement les calottes polaires et les nuages doit se transformer directement de l'état solide à celui de vapeur ; cette vapeur doit circuler annuellement par diffusion d'un hémisphère à l'autre pour se déposer au sol et constituer alternativement l'une et l'autre des calottes polaires ; elle paraît trop raréfiée et trop froide pour être décelable par les procédés spectrographiques ordinaires.

BIBLIOGRAPHIE

- ADAMS W. S. 1941 *Aph.Jl.* **93** p. 11.
 ADAMS W. S. et DUNHAM I. J. 1932 *P. A. S. P.* **44** p. 380.
 ADAMS W. S. et St JOHN C. E. 1934 *Aph. Jl.* **63** p. 133.
 ANDRÉ C. 1909 « Les planètes et leur origine » Gauthier Villars, Paris.
 ANTONIADI E. M. 1934 « La planète Mercure » Gauthier Villars, Paris.
 ARAGO 1811 voir « Œuvres » Legrand, Pouvrey et Crouzet, Paris, tome 10.
 1841 *C. R. Ac. Sc.* **13** p. 840 et p. 826.
- BARABASHEW N. P. et SEMEYKIN B. 1934 *Zeits f. Aph.* **8** p. 44.
 BOUWKAMP C. J. 1954 « Report on Progress in Physics » XVII - Physical Soc.
 1939 *C. R. Somm. Soc. Geol. Fr.* p. 175.
- DANJON A. 1928 *Ann. Obs. Strasbourg* **2** fasc. 1.
 1936 *Ann. Obs. Strasbourg* **3** fasc. 3.
 1949 *Bull. Astron.* XIV fasc. IV p. 331.
- DENNING W. F. 1882 *Astr. Nochr.* n° 2479.
- DOLLFUS A. 1948 *C. R. Ac. Sc.* **226** p. 996.
 1948 *C. R. Ac. Sc.* **227** p. 331.
 1948 *C. R. Ac. Sc.* **229** p. 383.
 1950 *C. R. Ac. Sc.* **231** p. 1430.
 1951 « l'Astronomie » **65** p. 8.
 1951 *C. R. Ac. Sc.* **231** p. 1066.
 1951 *C. R. Ac. Sc.* **233** p. 467.
 1952 *C. R. Ac. Sc.* **234** p. 2046.
 1952 *C. R. Ac. Sc.* **235** p. 1013.
 1953 « l'Astronomie » **67** février p. 61.
 1953 « l'Astronomie » **67** Mars p. 85.
 1954 *C. R. Ac. Sc.* **239** p. 954.
 1955 « l'Astronomie » **68** p. 413
 1956 « Orion » **53** p. 95
 1956 « La Météorologie » **42** p. 82
 1956 *Ann. Aph.* **19** p. 83
 1956 *Ann. Aph.* **19** p. 71
 1956 *Mem. Soc. R. Sc. Liège XVIII* – p. 142, 166, 198
- DOLLFUS A. et CAILLEUX A. 1950 *C. R. Ac. Sc.* **230** p. 1411.
 DOLLFUS A. et LYOT B. 1949 *C. R. Ac. Sc.* **228** p. 1773.
 1949 *C. R. Ac. Sc.* **229** p. 1277.
- DUBOIS J. 1943 « Ciel et Terre » **54** p. 375.
 1944 « l'Astronomie » **58** p. 136.
 1947 *Bull. Astr.* **13** fasc. 3 p. 193.
- EDSON J. B. 1950 « The Project for the Study of Planetary Atmosphere » Annual Report, Lowell Observatory.
- FABRY C. 1929 *Jl. des Observateurs* **7** p. 1.
 FOCAS J. H. 1953 *C. R. Ac.Sc.* **237** p. 296.
 FOURNIER G. 1920 « Observation des Surfaces Planétaires » **7** p. 273.
- GAUDEFROY 1943 *Bull. Soc. Fr. Mineralogie* **66** p. 301.

- HESS S. 1948 P. A. S. P. **60** p. 289.
1950 JI. of Meteorology **7** p. 8.
- HULST (Van de) H. C. (1946) Recherches Astronomiques Obs. Utrecht XV « Optics of Spherical Particles » Amsterdam, Duwaer et Zonen.
- KUIPER G. P. 1952 « The Atmosphere of the Earth and Planets » Chicago Press 2^e édition.
- LANDERER 1890 C. R. Ac. Sc. **11** p. 210.
- LYOT B. 1929 Thèse de Doctorat et Annales Obs. de Meudon.
1934 C. R. Ac. Sc. **199** p. 774.
1937 C. R. Ac. Sc. **205** p. 895.
1938 « L'Astronomie » Mai.
1953 « L'Astronomie » **67** p. 1.
- LYOT et DOLLFUS A. — Voir Dollfus et Lyot.
- MENZEL D. 1908 Aph. JI. **63** p. 48.
- MENZEL et WHIPPLE F. 1954 « Sky and Telescope » Nov.
- MIE 1908 Ann. Physik **25** p. 377.
- OHMAN V. 1941 Stockholm Obs. Annaler **13** n° 11.
1942 Stockholm Obs. Annaler **14** n° 4.
1942 Nordisk Astron. Tidskifst.
1947 Stockholm Obs. Annaler **15** n° 2.
1949 Stockholm Obs. Annaler **15** n° 8.
1954 Stockholm Obs. Annaler Meddelands n° 55.
- PICKERING 1894 « Astronomy and Astrophysic » The Sideral Messenger **13** p. 554.
- PIDDINGTON et MINNETT 1949 Australian JI. Sci. Res. A. 2. p. 65.
- RENSE W. 1950 J. O. S. A. **40** p. 550.
- ROSS (Lord) 1878 Proc. Royal Dublin Soc. **1** p. 19.
- ROUGIER G. 1933 Ann. Obs. Strasbourg II fasc. 3.
1937 Ann. Obs. Strasbourg III fasc. 5.
- SALET P. 1910 Thèse de Doctorat Paris.
1920 « l'Astronomie » p. 256.
1922 « l'Astronomie » p. 408.
- SCHARONOW W. 1941 Poulkovo Obs. Circ. **32** p. 62.
- SCHATZMAN E. 1951 C. R. Ac. Sc. **232** p. 692.
- SCHIAPARELLI 1889 Austr. Nachr. n° 2944.
- SECCHI 1859 Monthly Notices **19** p. 290.
- SINCLAIR D. 1947 J. O. S. A. **37** p. 476.
- SLIPHER V. M. 1933 Observatory **56** p. 247.
- St JOHN E. et NICHOLSON S. B. 1922 Aph. JI. **56** p. 379.
- SYTINSKAYA N. N. 1944 C. R. Ac. Sc. URSS **43** p. 147.
« Tables of Scattering Fonctions for Spherical Particles » 1946 Nat. Bureau of Standards Applied Math. II. 4.
- TICKHOFF G. A. 1911 Mitteil. Der Nicolai — Hauptsternuwarte zu Pulhowo **4** p. 73.
- VAUCOULEURS (de) 1945 « Ciel et Terre » **61**.
1951 « Physique de la Planète Mars » Albin Michel, Paris.
- WESSELINK A. J. 1948 Bull. Astron. Inst. Netherlands **10** p. 351.
- WRIGHT W. H. 1934 J. O. S. A. **24** 206.