

## ÉTUDE DE LA PLANÈTE MARS DE 1954 A 1958

par A. DOLLFUS

(Observatoire de Meudon. France)

**RÉSUMÉ.** — *Étude des observations visuelles, photographiques, photométriques et polarimétriques de la planète Mars recueillies au cours des apparitions de 1954, 1956 et 1958 au Pic-du-Midi et à l'aide des groupements d'observations effectuées grâce à l'U. A. I.*

*Mesures du diamètre et de l'ellipticité du globe.*

*Mécanisme des variations saisonnières des configurations du sol d'après la photométrie des taches, les observations à grande résolution et l'analyse des phénomènes exceptionnels.*

*Identification des nuages blancs à des brumes de cristaux de glace ; étude des voiles saisonniers et localisés ainsi que les brumes polaires.*

*Propriétés photométriques et polarimétriques du dépôt blanc polaire, courbe de régression et identification à une couche de givre.*

*Propriétés des voiles jaunes, étude de leurs développements et de leurs déplacements ; identification de ces voiles avec les envolées de poussière de quelques microns de diamètre ayant les mêmes propriétés photométriques et polarimétriques que la poudre d'oxyde de fer hydraté recouvrant le sol martien.*

*Mécanisme général de la circulation atmosphérique.*

**SUMMARY.** — *Study of the visual, photographic, photometric and polarimetric observations of planet Mars made at the Pic-du-Midi during the 1954, 1956 and 1958 appearances with the assistance of the grouping of observational data carried out through the I. A. U.*

*Measurements of the diameter and ellipticity of the globe.*

*Mechanism of the seasonal variations of ground features, according to the photometry of spots, observations at high resolution and the analysis of unusual phenomena.*

*Identification of the white clouds of ice crystal mists ; study of local and seasoned haze as well as of the polar units. Photometric and polarimetric properties of the white polar deposit, its regression curve and identification as a layer of frost.*

*Properties of the yellow haze, study of their development and movements ; identification of this haze as windswept clouds of dust particles several microns in diameter having the same photometric and polarimetric properties as the hydrated iron oxide powder covering the Martian surface.*

*General mechanism of atmospheric circulation.*

**Резюме.** — Исследование визуальных, фотографических и поляриметрических наблюдений планеты Марс полученных на Пик дю Миди во время явлений 1954, 1956 и 1958 г и при помощи группировок произведенных наблюдений благодаря М.А.С.

Измерения диаметра и эллиптичности шара.

Механизм сезонных изменений очертаний почвенной поверхности на основе фотометрии пятен и наблюдений с дальшим разрешением, анализ особенных явлений.

Отождествление белых облаков и мглы ледяных кристаллов, исследование сезонных и локализованных вуалей, а также полярной мглы.

Фотометрические и поляриметрические свойства белого полярного отложения, кривая регрессии и отождествление со слоем инея.

Свойства желтых вуалей, исследование их расширений и перемещений : отождествление этих вуалей со взлётами пыли в несколько микронов диаметра, имеющей те же фотометрические и поляриметрические свойства, что и пудра гидратной окиси железа, покрывающая твердую поверхность Марса.

Общий механизм атмосферного движения.

### I. LES OPPOSITIONS DE MARS EN 1954, 1956 ET 1958.

En septembre 1956, la Planète Mars et la Terre se sont rapprochées à la distance minimum que permettent leurs orbites. Le globe de Mars mon-

trait alors 24"8 de diamètre apparent. Les « oppositions périhéliques » ne se reproduisent que toutes les quinze années et la période la plus favorable aux observations ne dure chaque fois que peu de semaines avant et après le rapprochement maximum.

Lors de l'opposition presque périhélique de 1941,

les procédés d'observation étaient peu développés ; la physique planétaire n'était pas constituée en une discipline organisée de nos Observatoires ; la guerre mondiale éprouvait les nations capables d'observer. La Planète Mars ne s'offrit alors qu'à des initiatives individuelles.

L'opposition périhélique de 1956 a encore précédé le grand renouveau de la physique planétaire né du développement des recherches spatiales. Mais elle a déjà représenté le plus grand effort collectif international jamais entrepris au préalable au bénéfice de la physique planétaire.

Les États-Unis ont contribué par les Observatoires Yerkes et McDonald, Mt Wilson et Palomar, Lick, Lowell, Mauna Loa (Hawaï), etc.... Le Dr. E. C. SLIPPER a continué, à l'Observatoire Lowell et à Bloemfontain en Union Sud-Africaine, la remarquable étude photographique poursuivie régulièrement depuis 1905 et qui conduisit à la publication de l'ouvrage « Mars, a Photographic Story, 1905-1961 ».

Le « International Mars Committee » de l'Observatoire Lowell a coordonné en outre des observations photographiques à la Plata (Argentine), Helwan (Égypte), Naini Tal et Kodeikanal (Indes), Bosschia (Indonésie), Mt Stromlo (Australie).

En Afrique du Sud, l'Observatoire de Johannesburg a apporté une contribution photographique exceptionnelle.

Au Japon, le « Comité Japonais pour les Recherches sur la Planète Mars » (Japanese Mars Committee) a stimulé et groupé les contributions orientales.

Les études européennes ont été articulées autour des Observatoires de Meudon, du Pic du Midi, d'Athènes et de Nice. De larges appels ont été portés auprès d'observateurs privés, en particulier par la Société Astronomique de France, la British Astronomical Association, l'« Association for Lunar and Planetary Observers » des États-Unis, etc....

Tous ces travaux ont été coordonnés par la Commission 16 de l'Union Astronomique Internationale « Étude Physique des Planètes et Satellites ».

## II. LES CAMPAGNES D'OBSERVATION.

La présente étude concerne les oppositions de 1954, 1956 et 1958. Elle repose sur les observations reçues des stations précédemment nommées et particulièrement de la coopération organisée par l'Union Astronomique Internationale.

La lunette de 60 cm du Pic du Midi, spécialement étudiée par B. LYOT en 1943 pour l'observation des planètes en haute montagne avec un pouvoir sépa-

rateur élevé, continua à être l'instrument principal de cette coopération en Europe [1].

Les résultats antérieurs à 1954 recueillis grâce à l'exploration visuelle de Mars avec cet instrument ont déjà été exposés [2]. Après cette date, les principaux participants furent H. CAMICHEL, qui observa également à Nice, J. H. FOCAS qui travailla au Pic du Midi et à Athènes avec le réfracteur de 40 cm, G. DE MOTTONI, à Mérate et Gênes en Italie, et notre groupe de l'Observatoire de Meudon.

La figure 1 reproduit l'orbite de Mars et les portions de trajectoires décrites par la planète pendant les campagnes d'observation successives. La surveillance de 1954 commença au Pic du Midi, en avril, tandis que la planète occupait sur son orbite la longitude héliocentrique  $\eta = 230^\circ$ . L'équinoxe d'automne boréal martien survint pour  $\eta = 264^\circ$ , au mois de juin et les documents recueillis alternativement au Pic du Midi et à Athènes jusqu'en septembre couvrent la période de l'automne pour l'hémisphère nord.

En 1956, nous retrouvons la Planète Mars après une révolution presque complète autour du Soleil, à la longitude héliocentrique  $\eta = 309^\circ$ , à la saison où elle avait été laissée ; l'inclinaison de l'axe des pôles de près de  $20^\circ$  révélait l'hémisphère sud, au printemps. Après le solstice ( $\eta = 354^\circ$ ) et le déroulement de l'été, les observations cessèrent pour  $\eta = 45^\circ$ .

Les observations reprurent en 1958, sous  $\eta = 352^\circ$ , presque le jour du solstice martien ; elles correspondaient à l'été austral et l'hiver boréal et prirent fin peu avant l'équinoxe, sous  $\eta = 62^\circ$ .

Les observations de 1954, 1956 et 1958 concernent donc la Planète sur plus de la moitié de son orbite.

## III. MESURE DU DIAMÈTRE DU GLOBE.

En raison de sa faible distance à la Terre au moment des trois oppositions successives, la planète Mars s'offrait à des mesures micrométriques précises.

Les déterminations antérieures du diamètre du globe, obtenues généralement avec le micromètre à fil, s'accordaient avec une précision n'atteignant pas le centième ; elles restaient entachées par des erreurs systématiques liées aux procédés de mesure.

Depuis 1941, H. CAMICHEL avait déjà développé la méthode suivante [3] : la petite tache équatoriale *Juventae* Fons, bien visible sur de nombreux clichés, est entraînée par la rotation diurne

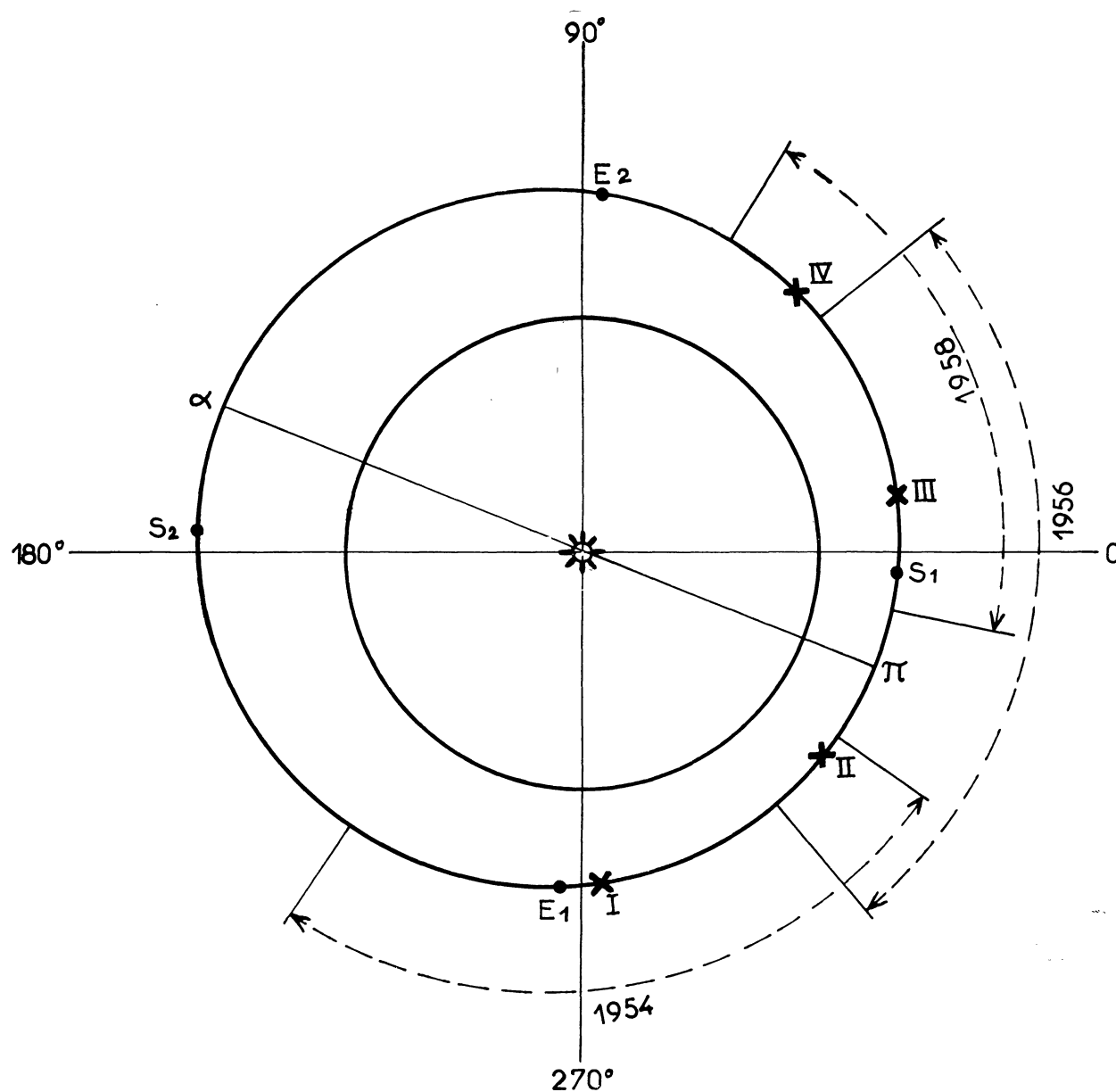


FIG. 1. — Orbits respectives de Mars et de la Terre, et périodes d'observations couvertes en 1954, 1956 et 1958.

S1 = Solstice d'été austral =  $356^{\circ}48'$  (longitude héliocentrique).

E2 = Équinoxe d'automne austral =  $86^{\circ}48'$ .

S2 = Solstice d'hiver austral =  $176^{\circ}48'$ .

E1 = Équinoxe de printemps austral =  $266^{\circ}48'$ .

$\pi$  = périhélie =  $334^{\circ}35'$ .

$\alpha$  = aphélie =  $154^{\circ}35'$ .

Période d'observation en 1954 : de  $230$  à  $326^{\circ}$ .

» » » 1956 : de  $309$  à  $45^{\circ}$ .

» » » 1958 : de  $350$  à  $65^{\circ}$ .

I = longitude de la carte (fig. 4) (1954) =  $275^{\circ}$ .

II = » (fig. 5) (1958) =  $320^{\circ}$ .

III = » (fig. 6) (1956) =  $10^{\circ}$ .

IV = » (fig. 7) (1958) =  $50^{\circ}$ .

de la planète ; la trajectoire apparente est un arc d'ellipse dont le grand axe donne le diamètre équatorial de la planète. La précision atteint 1 %. L'erreur sur le volume reste voisine de 3 %, ainsi que celle sur la masse.

Cependant, dans les meilleures conditions de l'observation visuelle la finesse des images dans la lunette du Pic du Midi donne un pouvoir séparateur voisin de 0''24, tandis que le diamètre apparent de l'astre aux oppositions périhéliques est 24''. Le flou naturel du contour dû à la diffraction de la lumière représente 1 % seulement du diamètre dans ces conditions favorables.

La position exacte du contour planétaire peut se définir avec beaucoup plus de précision. L'instrument approprié est alors le *micromètre biréfringent à grand dédoublement*. L'appareil donne deux images du disque planétaire, identiques, à distance réglable ; elles sont amenées tangentes ; les deux dégradés de diffraction se compensent alors et se détruisent exactement lorsque la juxtaposition géométrique précise est réalisée. L'erreur de pointé ne dépasse pas une faible fraction de la largeur du liseré de diffraction.

Il fallait un appareil capable de dédoubler de plus de 100 fois le pouvoir séparateur. Les micromètres à double images existant ne le permettaient pas. J'ai décrit par ailleurs le micromètre biréfringent nouveau qui fut réalisé dans ce but [4]. La figure 2 montre le *micromètre biréfringent à grand dédoublement* reproduit maintenant à plusieurs exemplaires.

L'étalonnage, qui dépend du filtre coloré, est réalisé en mesurant les barreaux d'une grille projetés par un montage optique dépourvu de distorsion ; la précision doit approcher le millième. Cet étalonnage fut contrôlé à l'occasion de chaque opposition. La distance focale de la lunette fut déterminée avec la précision du millième.

Pendant les quelques jours qui précédèrent et suivirent chacune des oppositions, et lorsque la turbulence était particulièrement réduite, MM. CAMICHEL, FOCAS ou moi-même alternions les observations [5].

L'accord interne resta généralement meilleur que le quart de la largeur du liseré de diffraction.

ANNÉE	D <sub>p</sub> (ORANGÉ)	D <sub>e</sub> (ORANGÉ)	D <sub>p</sub> (BLEU)	D <sub>e</sub> (BLEU)
1954 (5 séances)	9''30	9''41	9''28	9''38
1956 (9 séances)	9''35	9''46	9''38	9''48
1958 (8 séances)	9''29	9''41	9''28	9''45
Moyennes . . . . .	9''31	9''42	9''31	9''43

Cette précision se maintint d'une nuit sur l'autre et le plus souvent quel que soit l'observateur. Les diamètres apparents polaires D<sub>p</sub> et équatoriaux D<sub>e</sub> ramenés à la distance de 1 U. A. sont donnés dans le tableau joint.

En lumière orangée, la moyenne de D<sub>p</sub> est 9''31 à 1 U. A. et l'écart d'une année sur l'autre ne dépasse pas trois millièmes. Le diamètre polaire apparent de Mars vaut 6750 km à ± 20 km près.

Pendant les deux nuits seulement qui précèdent ou suivent l'opposition, la phase est suffisamment faible pour permettre la détermination du diamètre équatorial. Il faut un ciel clair et de très bonnes images à l'occasion de ces brefs intervalles de temps ce qui nous fut très heureusement donné à chacune des trois oppositions. Ajustant le dédoublement dans la direction polaire puis tournant l'instrument de 90° pour donner la direction équatoriale, il apparut immédiatement que le contact se détruisait d'une quantité que ne saurait expliquer la réfraction atmosphérique différentielle. Les diamètres équatoriaux, définitivement plus allongés, sont donnés dans la deuxième colonne du tableau ; la moyenne vaut 9''42 soit 6830 km.

Étant donnée la précision des déterminations précédentes, il devient nécessaire de tenir compte de l'atmosphère de la planète ; celle-ci intervient pour augmenter le diamètre apparent. Les mesures polarimétriques que nous avons relevées en 1948, 1950 et 1952 donnent la brillance de l'atmosphère pure Ba, rapportée à celle Bs du sol au centre du disque [6], soit Ba/Bs = 0,028. Nos mesures photométriques visuelles recueillies en 1952 avec le photomètre à franges donnent une valeur plus élevée [27], Ba/Bs = 0,053 moins précise, mais qui tient compte des impuretés atmosphériques. Calculons d'abord l'effet de l'atmosphère pour la valeur Ba/Bs = 0,025 (fig. 3). ABC représente le profil photométrique théorique du bord de la planète, supposée privée d'atmosphère et dépourvue d'assombrissement. ADE donne une valeur plus raisonnable de ce profil, compte tenu de nos mesures photométriques publiées en 1957 [26].

Nous calculons qu'une atmosphère de brillance  $\frac{Ba}{Bs} = 0,025$  donne le profil résultant FGHI. La planète est observée sous un diamètre apparent de 22'' dans la lunette résolvant 0''24. Le profil oblitéré par la diffraction devient JKLM. L'observateur muni du micromètre biréfringent juxtapose les bords opposés des deux images données par l'instrument, de façon que leurs dégradés s'opposent exactement ; le contour apparent est le point K, dont la brillance est la moitié du point L le plus

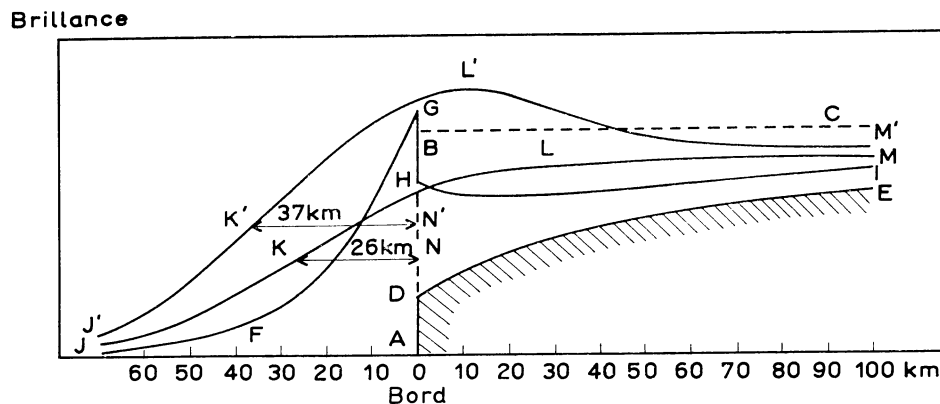


FIG. 3. — Mesure du diamètre de Mars : correction de la brillance de l'atmosphère.

ADE = profil photométrique du disque sans atmosphère.

FGHI = profil photométrique du disque avec atmosphère de brillance  $B_a = 0,025$  fois la brillance  $B_s$  du sol au centre du disque.

JKLM = Profil précédent oblitéré par la diffraction.

J'K'L'M' = Profil analogue correspondant à une atmosphère de brillance  $B_a/B_s = 0,050$ .

KN et K'N' = erreurs commises sur les mesures du diamètre.

brillant ; l'erreur de pointé est représenté par la longueur KN. Celle-ci vaut 26 km si l'atmosphère a pour brillance 0,025 fois celle du sol au centre du disque ; une couche d'air deux fois plus lumineuse donne le profil J'K'L'M' et l'erreur de mesure devient 37 km. L'enveloppe atmosphérique martienne étant très probablement comprise entre ces deux limites, la correction vaut environ 30 km. Cette correction n'intervient que sur un seul bord car l'angle de phase n'est jamais exactement nul lors des observations et l'atmosphère martienne n'est pas éclairée, au bord du disque, du côté de la phase résiduelle.

La discussion des mesures et de leurs corrections conduit finalement aux *valeurs corrigées des diamètres* :  $d = 6790$  km et  $d_p = 6710$  km.

Le volume de la planète, donné par la formule  $\frac{4}{3} \pi \frac{d \cdot (d_p)^2}{8}$  vaut  $1,620 \cdot 10^{26}$  cm<sup>3</sup> et il est obtenu à 1 %.

Selon D. BROUWER et G. M. CLEMENCE, la détermination de la masse de la planète d'après les mouvements des satellites vaut  $1/3008000$  la masse du Soleil, soit 0,1069 celle de la Terre, soit encore  $6,606 \cdot 10^{26}$  grammes. La densité moyenne du globe est donc 4,09, contre 5,52 pour la Terre.

#### IV. ELLIPTICITÉ DU GLOBE.

L'ellipticité du globe  $(d-d_p)/d$  déduite des mesures précédentes vaut 0,0117 ; elle est obtenue avec une précision de 10 %. La différence des

rayons polaires et équatoriaux atteint 40 km. Ce très fort aplatissement vaut 4 fois celui du globe terrestre.

L'étude des perturbations des orbites des satellites Phobos et Deimos donne une ellipticité dynamique de 0,0052, soit un accroissement du rayon équatorial de 18 km seulement [36]. La différence entre les aplatissements dynamiques et observés donne un renflement équatorial de 22 km qu'il faut expliquer.

Les impuretés de l'atmosphère pourraient intervenir dans l'aplatissement apparent ; il faudrait alors que l'atmosphère soit très limpide dans les deux régions polaires, et constamment chargée d'une brume de fines particules à l'équateur. Dans ce cas, la correction adoptée au chapitre précédent ne devrait s'appliquer qu'au rayon équatorial. La brillance de l'atmosphère pure aux pôles serait moins forte que celle déterminée par les méthodes polarimétriques, relatives à l'équateur.

S'il n'en est pas ainsi, le renflement équatorial appartient au sol ; il faut alors que les masses réparties à l'intérieur du globe comprennent un noyau dense enveloppé d'une couche de matériaux légers, beaucoup plus épaisse à l'équateur, pour respecter l'équilibre isostatique.

Dans ce dernier cas, la pression atmosphérique serait plus forte aux pôles qu'à l'équateur. L'échelle de hauteur de l'atmosphère martienne vaut  $KT/mg$  soit environ 24 km pour les propriétés de l'air terrestre. La différence de pression entre pôles et équateur vaudrait presque un facteur  $e$ , soit 2,7.

## V. OPACITÉ OCCASIONNELLE DE L'ATMOSPHÈRE.

L'atmosphère de la planète Mars est généralement transparente. Il arrive cependant que celle-ci se charge occasionnellement d'une certaine quantité de poussières, probablement soulevées du sol par le vent. On observe alors des « voiles jaunes », quelquefois suffisamment absorbants pour masquer même les taches du sol. En septembre 1956, l'atmosphère était exceptionnellement polluée par de tels voiles, au moment des observations ; le bord du disque paraissait jaune et légèrement plus brillant qu'à l'accoutumé. Les mesures de diamètres relevées avec notre micromètre, en rouge, en vert et en bleu, se montrèrent systématiquement plus élevées que celles des autres années, d'environ 30 km.

Voici une conclusion que l'on peut tirer de cette observation : Au centre du disque, où l'atmosphère est vue verticalement, l'observation montre que l'éclat moyen des voiles presque opaques est à peu près égal à celui du sol. Supposons la poussière répartie en altitude proportionnellement à la pression atmosphérique. L'éclat sera encore celui du sol jusqu'à une distance au dehors du bord du disque telle que le parcours rasant dans la haute atmosphère corresponde à l'épaisseur verticale de l'atmosphère. Le calcul donne, pour cette distance, 60 km. Au-delà, la brillance décroîtrait exponentiellement. L'erreur commise sur la mesure du diamètre atteindrait au moins de 60 km. Comme l'accroissement observé n'est que de 30 km, *les particules constituant les voiles jaunes opaques ne peuvent être réparties en altitude proportionnellement à la pression ; elles doivent être, en moyenne, concentrées de préférence dans les basses couches.*

## VI. TRANSPARENCE ATMOSPHÉRIQUE EN LUMIÈRE BLEUE.

Examinons maintenant la planète en l'absence de nuages de poussières, mais à travers un filtre bleu ; les détails du sol deviennent très pâles et généralement effacés ; de plus, de légères nuées « bleues » se surajoutent le long des bords levants et couchants. Les mesures de diamètre équatorial et polaire effectuées en lumière bleue sont reportées dans le tableau précédent. Leurs moyennes ne s'écartent pas de plus de 0"02 des valeurs trouvées en lumière orangée. (En 1956, pendant la présence des voiles jaunes, les mesures étaient plus fortes en bleu, dans la même proportion qu'en orange.) La correction due à l'atmosphère, en lumière bleue

au bord du disque, doit donc rester faible et ne pas dépasser sensiblement la limite des erreurs de mesures. L'accroissement du diamètre apparent de Mars en lumière bleue annoncée par WRIGHT d'après ses mesures photographiques n'est donc pas confirmée [8].

Les mesures en bleu sont malheureusement moins sensibles et la précision ne dépasse pas 25 km. Néanmoins, il faut conclure que *les nuages bleus en suspension dans l'atmosphère restent très ténus.*

## VII. DOCUMENTATION PHOTOGRAPHIQUE RECUEILLIE AU PIC DU MIDI.

Les aspects changeants de la topographie, les nuages, les calottes et les brumes polaires, ainsi que les variations photométriques ont été étudiés par la photographie. Les clichés du Pic du Midi furent exécutés seulement aux instants de la nuit où les couches atmosphériques sont suffisamment stables. La collection des négatifs recueillis depuis 1941 est l'œuvre principale de H. CAMICHEL.

Un laboratoire de photographie, constitué à l'Observatoire de Meudon, permit à une équipe de photographes d'accomplir des tirages positifs composites de chaque document. Les meilleurs parmi les vingt images impressionnées consécutivement sur une même plaque sont sélectionnées, puis tirées superposées en un positif unique qui les résume en une seule image agrandie et moins granulaire. Ces agrandissements transparents sur verre respectent l'échelle unique de 1" d'arc par millimètre ; ils représentent généralement la moyenne compositée entre 4 à 18 images. Le pouvoir résolvant effectif est presque toujours meilleur que 0"4 et il s'abaisse quelquefois au-dessous de 0"3.

Cette grande collection couvre les douze dernières oppositions de Mars depuis 1941 et contient plus de 1500 positifs distincts. Les images sont rangées dans un classeur, contenant 144 cases, réparties en 12 colonnes et 12 lignes. Chaque colonne contient les plaques d'une même opposition. Celles-ci sont divisées entre les 12 cases par intervalle croissant de longitude de 30° en 30°.

Cette classification permet plusieurs combinaisons :

— en examinant une image dans chaque case le long d'une même colonne, on reconstitue l'aspect de la planète sous différentes longitudes au cours d'une même opposition ;

— les clichés des cases le long d'une même ligne donnent les variations d'aspect d'une région au cours des années successives ;

— enfin, les variations rapides du sol, des calottes polaires et des nuages s'obtiennent en comparant les clichés d'une même case.

### VIII. DOCUMENTATION DES CENTRES DE L'U. A. I.

Lors de son Assemblée Générale de 1961 à Berkeley, l'Union Astronomique Internationale avait décidé la création de deux Centres de Documentation photographiques sur les Planètes, l'un en Europe à l'Observatoire de Meudon, l'autre aux États-Unis à l'Observatoire Lowell.

Ces centres ont pour objet de grouper pour consultation et études le plus grand nombre possible des clichés de surfaces planétaires recueillis depuis les débuts de la photographie planétaire. L'Assemblée Générale de l'U. A. I. de 1964 à Hambourg permit de mettre au point des procédures de groupement et d'échange des collections déjà existantes ou encore éparpillées.

La présente étude a bénéficié des documents groupés lors des premières phases de l'organisation du Centre de Meudon. Le Dr. FINSÉN a bien voulu adresser d'excellents tirages composites en noir et en couleur des clichés de Mars qu'il a réalisés en Afrique du Sud en 1954 et 1956. Le Dr. JEFFERS donna des copies des nombreux clichés qu'il avait obtenus à l'Observatoire de Lick de 1941 à 1956. Le Dr. E. C. SLIPHER nous remit de très belles séries de ses clichés de l'Observatoire Lowell et Bloemfontain ; son « Atlas Photographique de Mars » contient en outre plusieurs centaines de documents exceptionnels. Plus récemment les échanges de documents entrepris entre les deux Centres de Documentation de Lowell et de Meudon ont beaucoup enrichi les collections.

De très nombreux clichés obtenus par le Dr. LEIGHTON au Mt Wilson en 1956, et reproduits en composites à l'Observatoire Harvard nous sont également parvenus.

Plusieurs centaines de documents du Mt Wilson, de Palomar, du Pérou, de Tokio, d'Athènes, de Kwasan, de Stalingrad, de Brazzaville, d'Italie sont en outre parvenus au Centre de Meudon avant l'achèvement de la présente étude.

### IX. PLANISPÈRES TOPOGRAPHIQUES.

Les taches sombres du sol manifestent des changements de configuration. Certaines variations périodiques sont prévisibles. D'autres, fortuites ou erratiques, transforment à l'improviste certaines régions. Les processus de ces modifications peuvent s'étudier grâce aux documentations photogra-

phiques des Centres précédents. L'examen des clichés permet de discriminer les effets dus aux voiles nuageux pour ne retenir que les configurations propres à la topographie du sol.

Grâce aux photographies obtenues au Pic du Midi, et aux premiers clichés déjà reçus à Meudon pour le Centre mondial, G. DE MOTTONI a dessiné pour chaque opposition des cartes planisphères selon la projection de Mercator résumant l'aspect de la topographie martienne à la période considérée. Les huit premiers planisphères couvraient l'intervalle de 1941 à 1952 et ont déjà été publiés groupés [9].

En 1956, les transformations du sol et les voiles atmosphériques furent à ce point considérables que G. DE MOTTONI dût réaliser deux planisphères avant et après l'opposition ainsi que 9 cartes polaires en projection cônica (reproduites fig. 28, 29 et 30). Les figures 4, 5, 6 et 7 reproduisent les quatre planisphères relatifs à la période couverte par notre étude. Leurs dates moyennes correspondent à des longitudes héliocentriques régulièrement espacées sur l'orbite, à environ 45° les unes des autres, ainsi que le montre la figure 1.

En comparant ces cartes, le lecteur découvrira les variations saisonnières dont certaines contrées martiennes furent l'objet au cours des saisons successives. Les territoires de Solis Lacus et Thaumasia (90°, — 30°), de Mare Serpentis et Helle-spontus (320°, — 35°), de Pandora Fretum (340°, — 25°), de Syrtis Major (290°, + 10°) de Nepenthes, de Moeris Lacus (265°, + 8°) furent très particulièrement affectées.

### X. VARIATIONS PHOTOMÉTRIQUES DES TACHES DU SOL.

Malgré une très grande complexité, les modifications topographiques des contrées martiennes obéissent, dans leur ensemble, à la loi suivante : *Elles progressent régulièrement en latitude, depuis les pôles vers l'équateur.*

Le phénomène est dégagé grâce à des mesures photométriques. Les clichés de la planète réalisés par H. CAMICHEL portent les marques d'une calibration photométrique. Les négatifs originaux sont éclairés par transparence en lumière diffuse et examinés à quelque distance à l'aide d'une petite lunette ; l'oculaire montre la planète en négatif avec un grossissement apparent de 2000. Cette lunette est associée au *photomètre à franges* réalisé dans ce but en 1952 et décrit ailleurs [10].

L'image de la planète apparaît striée par les franges d'interférences serrées données par un

polariscope ; en faisant varier l'éclat d'une plage de comparaison, on réalise la disparition exacte des franges sur la région planétaire à mesurer. La précision de la lecture est voisine de 1 %.

Le contraste de la plaque photographique est donnée par les marques d'étalonnage, mesurées de la même façon. Les rapports d'éclats des différentes taches de la surface de la planète sont finalement obtenues à 3 % près.

Les taches de la surface ayant 2" de diamètre apparent peuvent être mesurées sur des bons clichés. Elles couvrent sur le globe de Mars des étendues de 500 km de diamètre seulement.

Tous les bons clichés de la planète Mars obtenus depuis 1943 ont été examinés au photomètre, généralement par J. FOCAS qui a relevé 7200 déterminations sur 663 négatifs [11].

Afin d'explorer quotidiennement et sans retard l'évolution des phénomènes sur la planète, et en particulier déceler immédiatement les voiles nuageux qui peuvent altérer le contraste de certaines régions, J. FOCAS mesurait les clichés directement, au Pic du Midi, au fur et à mesure de leur exécution, les matins mêmes qui suivirent les observations.

Le contraste moyen entre les régions sombres et les grandes contrées claires de la surface est généralement compris, pour la lumière jaune, entre 0,3 et 0,5. Les taches les plus denses, comme Syrtis Major et Mare Acidalium, peuvent atteindre 0,57. Ce contraste approche celui des taches claires et sombres de la surface de la Lune.

Les variations saisonnières apparaissent sur la figure 8. Les taches sombres sont classées verticalement selon leurs latitudes ; le Nord est en bas. L'éclat de chaque région sombre, comparé à celui des étendues claires voisines, est donné en fonction de la longitude héliocentrique reportée en abscisses. On lit encore le long des abscisses les limites des saisons pour chaque hémisphère ainsi que les courbes de régression moyenne des deux calottes polaires. Les assombrissements saisonniers donnent des minima dans les courbes [11]. Pour les régions polaires, l'assombrissement se produit dans le courant du printemps. L'époque du minimum d'éclat retarde vers l'Équateur ; il se décale aux tropiques jusqu'au début de l'été.

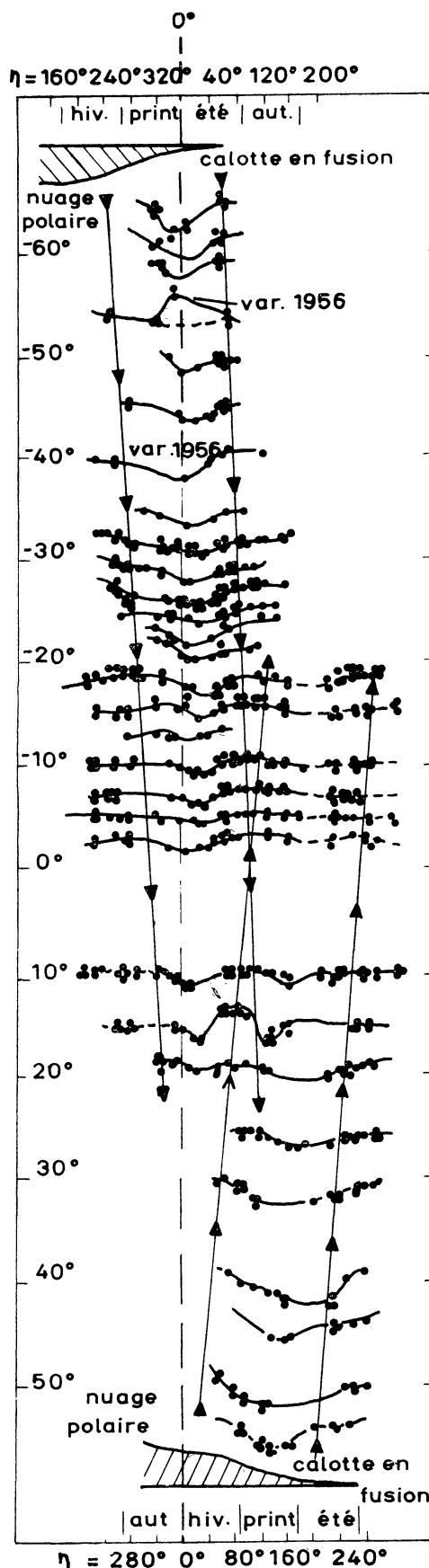


FIG. 8. — Propagation des vagues saisonnières d'assombrissement des taches du sol dans les deux hémisphères de Mars, d'après J. FOCAS.

En abscisses : la longitude héliocentrique et les limites des saisons.

En ordonnées : la latitude planétocentrique.

Les points et les courbes correspondent aux mesures photométriques sur les taches du sol aux différentes latitudes.



Le phénomène se déroule dans chaque hémisphère à la manière d'une propagation issue de la région polaire et qui gagne progressivement l'équateur. La vitesse de ce singulier déplacement est en moyenne de 35 km par jour terrestre.

Selon J. H. FOCAS, chaque vague dépasse l'équateur et s'estompe vers 20° de latitude dans l'hémisphère opposé. Les régions équatoriales entre + 20° et - 20°, comme par exemple Syrtis Major, sont intéressées successivement par les deux vagues issues alternativement des deux pôles ; elles montrent deux assombrissements chaque année. La figure 9 met en relief la diminution progressive de l'effet, au fur et à mesure de son déplacement vers l'équateur.

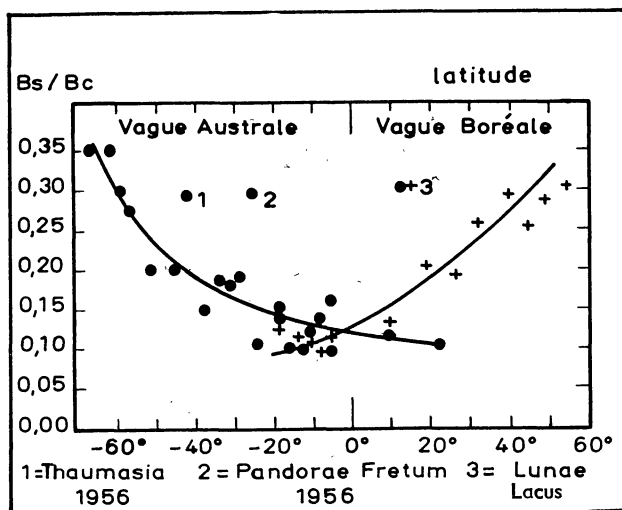


FIG. 9. — Variation de l'intensité de l'assombrissement des taches du sol en fonction de la latitude, pour les deux vagues saisonnières australes et boréales d'après J. FOCAS.

Ce curieux phénomène saisonnier, prend naissance dans les régions polaires au moment des désagréments printaniers du dépôt blanc polaire.

Les contrées martiennes ne sont pas toutes également affectées par le phénomène saisonnier (voir [11]). Mare Chronium, Hellespontus, Pandorae Fretum sont particulièrement marqués par la vague australe. Panchaia, Phlegra, Boreosyrtis et Niliacus demeurent très sensibles à la vague boréale. Le Lunae Palus se révèle exceptionnellement assombri pour chacune des deux vagues (voir [11]).

#### XI. ÉTUDE DÉTAILLÉE DES VARIATIONS SAISONNIÈRES.

L'examen attentif de la planète ainsi que des planisphères de G. DE MOTTONI (fig. 4 à 7) nous apprend que le phénomène demeure, dans le détail,

beaucoup plus complexe. On y remarque les variétés et les caprices qui caractérisent la nature. La simple description reste alors le meilleur outil de recherche ; il faut compléter l'étude photométrique par des observations visuelles.

La figure 10 a été dessinée dans la soirée du 18 septembre 1964, sous la longitude héliocentrique 353°, avec un grossissement voisin de 1000. La vague saisonnière affectait les terres australes et les étendues complexes de *Mare Chronium*, en haut du dessin, à la latitude - 55°. La topographie de ces régions explosait alors en une myriade de petites taches et de formations enchevêtrées : les plus petits oasis sombres décelés mesuraient 60 km de diamètre. La teinte générale semblait vert sombre, mais les taches circumpolaires n'étaient pas colorées. Ce bourgeonnement contrastait avec la teinte gris bleuté de l'ensemble des contrées équatoriales, moins accidentées, telles que Mare Sirenum et Mare Cimmerium, encore partiellement atteintes seulement par le phénomène saisonnier.

L'année martienne suivante, en 1958, Mare Chronium, après s'être estompée, fut à nouveau frappé par la transformation saisonnière ; les configurations des taches changèrent en partie, les contrées de gauche devenant beaucoup plus tourmentées.

La région de *Solis Lacus* (90° — 28°) réagit fortement à l'assombrissement saisonnier. Ce territoire a les dimensions de la France. Le cliché de gauche de la figure 1 montre cette contrée, le 27 juillet 1956, sous la longitude héliocentrique  $\eta = 319^\circ$ . Elle n'est pas encore affectée par le phénomène saisonnier. 62 jours plus tard, le 28 septembre, sur l'image du centre, peu après le solstice austral d'été, la configuration profondément dénaturée est à peine reconnaissable. Après 40 jours encore (image de droite) le cataclysme est passé ; l'évolution ne se poursuit plus que lentement.

Explorons le détail de cette transformation avec les grossissements les plus élevés de nos instruments. J'ai réalisé le dessin de gauche, figure 12, le 29 août 1956 (je l'ai complété les deux jours suivants). Pour  $\eta = 340^\circ$ , la région subit les prémises du renouveau saisonnier ; les taches sont déjà ponctuées de noyaux complexes. Le 30 septembre (à droite) nous ne pouvons déjà plus reconstituer la succession de transformation qui ont tout bouleversé. L'assombrissement a surtout gagné entre les noyaux sombres précédents.

Le bouleversement s'est d'ailleurs accompagné de phénomènes nuageux que l'on retrouve sur les figures 28 et 29. Ces voiles ne semblent pas liés de façon déterminante à l'évolution observée.

Cette région de Solis Lacus ménage chaque année martienne une physionomie imprévisible. On retrouve celles-ci sur les cartes photographiques dressées par G. DE MOTTONI (fig. 4 à 7).

Le dessin détaillé, réalisé par J. FOCAS en novembre 1958 (fig. 13) montre la topographie finale de cette région, à comparer au dessin de gauche de la figure 12 obtenu une année martienne plus tôt.

La variation saisonnière australe la plus connue et la mieux analysée ces dernières années concerne le grand territoire allongé de *Hellespontus* et la bande sombre *Pandorae Fretum*. De nombreux observateurs privés, munis d'instruments modestes, l'ont très bien décrite et examinée. Les trois photographies de la figure 14 en établissent à nouveau les circonstances.

Ces exemples nous montrent la complexité des transformations saisonnières de la topographie martienne.

J'avais décrit en 1953 [2] les changements de structure des taches de l'hémisphère *boréal*, observés de 1946 à 1952. Ces observations nous montraient les variations liées à la propagation de la vague saisonnière boréale. Nous venons de les retrouver plus détaillées pour l'hémisphère austral.

## XII. CONTRÉE SINGULIÈRE : LE TERRITOIRE DE HELLAS.

Les variations de la surface martienne révèlent des cas particuliers difficiles à relier aux lois générales. La grande région dénommée *Hellas*, au sud de Syrtis Major, paraît être de celles-ci. Ce vaste territoire circulaire, couvrant 2400 km de diamètre, centré aux coordonnées (290°, — 40°), révèle des propriétés de blanchissement.

La figure 15 montre trois photographies de cette contrée : à gauche, le 16 juin 1954, sous la longitude héliocentrique 268° correspondant à l'équinoxe de printemps, ce territoire a nettement l'aspect assombri et marbré d'une « mer » relativement claire. En 1956, le 12 octobre, sous  $\eta = 359^\circ$ , peu après le solstice de l'été de l'année martienne suivante, la tache est un disque blanc, éblouissant ; elle est plus claire qu'aucune autre région de la planète. À droite, en 1958, après plus d'une nouvelle année martienne, le contour est encore complètement modifié.

Examinons plus en détail la surprenante apparition de 1956 :

En juillet et en août, avant le déclenchement des phénomènes saisonniers, nos clichés, ceux reçus de Johannesburg, de Bloemfontain, de Tokyo, de

Kyoto, du Mont Wilson, de Lick, montrent *Hellas* sous l'aspect habituel d'une région claire, d'éclat moyen, bordée à droite par la traînée très sombre de *Hellespontus* (fig. 16) (image de gauche le 19 août 1956).

À la fin d'août, un grand voile jaune a sévi dans ces régions. Lorsque, vers le début de septembre, il devint transparent, le territoire *Hellas* se devint circulaire et éblouissant (fig. 16, le 5 septembre 1956). L'aspect fut ensuite noté stationnaire jusqu'à la fin de novembre (fig. 16, deux dernières images).

Lorsque j'effectuais les deux dessins de la figure 17, Syrtis Major était bleutée ; les régions claires *Arabia*, *Aeria*, *Isidis* restaient orangées. *Hellas*, inhabituel, se montrait délicatement rosé. La plage était marbrée près de son centre par d'étranges traînées ponctuées, brune chocolatées. À droite, le contour exceptionnellement net débordait sur la traînée sombre *Hellespontus*. Cette anomalie se retrouvait sur la courbe d'éclat de *Hellespontus*, reportée figure 10.

Le vif éclat se maintenait pour tous les domaines spectraux visibles ; tandis que vers les courtes longueurs d'onde, les régions habituelles s'assombrissent le disque de *Hellas* paraissait de plus en plus contrasté vers le bleu. On retrouve cet effet sur les 3 photographies de la figure 18 provenant de clichés en couleur obtenus au Mt Wilson par R. LEIGHTON ; elles ont été reproduites en composites à l'Observatoire Harvard par A. YOUNG et G. DE VAUCOULEURS, à travers 3 filtres rouge (0,60  $\mu$ ) vert (0,55  $\mu$ ) et bleu (0,50  $\mu$ ).

Les mesures photométriques de la région *Hellas* furent effectuées par J. H. FOCAS à 5800 Å. Avant la transformation, la brillance valait 0,85 fois celle des régions claires, soit 0,17 fois celle d'un écran blanc parfaitement diffusant. Après le 5 septembre, cette valeur devenait 0,27. Ce dernier éclat est supérieur à celui de toutes les autres régions claires désertiques ; il rappelle celui des voiles ténus ou dépôts de cristaux de glace. Il reste inférieur à celui d'un revêtement de givre propre et uniforme.

Les mesures polarimétriques ont été perturbées par des voiles jaunes. Sous l'angle de vision 25°, la polarisation de *Hellas* était cependant comprise entre — 1 et — 2 millièmes. Pour 26°05, elle valait de + 2,5 à 3,5 millièmes. La craie, la magnésie, donneraient environ + 1 millième sous chacun des deux angles de vision et ne peuvent expliquer les observations. Des brumes de glace donneraient à peu près la polarisation observée, mais les phénomènes paraissent trop constants. Le givre, analogue à celui des calottes polaires donnerait + 1 et

+ 3 millièmes et semble convenir sous forme d'un léger dépôt clairsemé.

Cependant des brumes interviennent aussi de temps à autre dans cette région ; en novembre 1956, le territoire de Hellas était photographié éclatant, au bord du disque ; depuis Athènes, la polarisation fut trouvée aussi forte que + 22,8 millièmes sous l'angle de vision 38°7 et ne pouvait être attribuée qu'aux nuages de glace.

D'autres régions manifestent un blanchissement analogue au cours de l'été ; ce sont notamment Noachis, Argyre, Phaethontis, Electris, Eridania dont J. H. FOCAS a donné les courbes de variations saisonnières d'éclat [11]. Toutes ces régions claires sont situées aux latitudes tempérées, entre — 35° et — 55°.

### XIII. NATURE DES NUAGES BLANCS.

J'ai déjà décrit en 1955 [12] et 1956 [13] les propriétés des voiles blancs plus ou moins transparents que l'on observe souvent dans l'atmosphère martienne. Nos conclusions se sont confirmées lors des trois nouvelles campagnes d'observations de 1954, 1956 et 1958.

Le polarimètre visuel à franges de Lyot demeure encore l'instrument irremplaçable pour étudier les brumes atmosphériques ; il permet de découvrir de faibles formations complètement invisibles par les moyens classiques, de préciser leurs contours et de donner le détail de leurs évolutions.

Examinons à l'aide de cet instrument une contrée martienne bénéficiant d'un ciel limpide ; notre appareil donne la polarisation produite par le sol, légèrement modifiée par celle provenant de la diffusion dans l'atmosphère pure.

Une très légère brume transparente se forme maintenant ; l'aspect de la région n'est pas encore modifié ; mais l'imperceptible lumière ajoutée par le voile est très polarisée, de sorte que le polarimètre révèle une anomalie. Lorsque le voile devient moins ténu, quoique encore invisible, l'anomalie de polarisation s'accroît proportionnellement.

La nuée devient maintenant suffisamment dense pour donner un léger blanchissement ; le sol tamisé s'efface un peu et la polarisation se rapproche de celle donnée par le voile seul. Mais la diffusion multiple à l'intérieur du nuage augmente ; la lumière renvoyées plusieurs fois entre particules est issue de toutes les directions, et donne une polarisation résultante très faible (sauf au bord du disque) et elle diminue le taux de polarisation donnée par la simple réflexion. Ainsi lorsque le nuage augmente d'éclat, le rôle de la diffusion multiple

s'accroît et réduit l'accroissement de la polarisation.

Soit :

Bs = brillance du sol martien.

Ps = proportion de lumière polarisée par le sol martien.

$\tau$  = épaisseur optique du nuage =  $\tau_0/\cos \theta$ .

$\theta$  = distance planétocentrique par rapport au centre du disque.

Bn = brillance d'une région altérée par un nuage.

B<sub>o</sub> = brillance provenant de la diffusion simple pour un nuage d'épaisseur optique infinie.

Bm = brillance provenant de la diffusion multiple infinie.

Pn = proportion de lumière polarisée par la diffusion simple dans le nuage.

La polarisation par la diffusion multiple est supposée nulle, sauf au bord extrême du disque.

On a :

$$B_n = (B_o + B_m)(1 - e^{-2\tau}) + B_s \cdot e^{-2\tau}.$$

La proportion de lumière polarisée résultante est, sauf au bord extrême du disque :

$$p = \frac{P_n \cdot B_o (1 - e^{-2\tau}) + P_s \cdot B_s \cdot e^{-2\tau}}{B_o (1 - e^{-2\tau}) + B_m (1 - e^{-2\tau}) + B_s \cdot e^{-2\tau}}.$$

Au bord du disque la prédominance de la diffusion multiple horizontale crée une composante polarisée additionnelle avantagée dans la direction verticale, analogue à celle qui produit les points neutres dans l'atmosphère terrestre. L'expression mathématique de cette composante polarisée perpendiculaire au limbe est complexe, mais son observation est aisée ; il suffit de tourner le polarimètre de 45° par rapport au plan de vision pour ne plus observer la polarisation directe, et examiner le bord de la planète à 45° de la direction de la ligne des cornes. J'ai noté des valeurs comprises entre 1 et 3 millièmes.

Pour identifier la nature des nuages, j'ai sélectionné les mesures de proportion de lumière polarisée P sur les voiles masquant presque totalement les taches du sol. Reportant les valeurs P, exprimées en millièmes, en fonction de l'angle de phase V, les mesures dessinent la *courbe de polarisation* des nuages martiens (fig. 19).

L'identification se fait grâce aux mesures analogues effectuées en montagne sur nos nuages terrestres, et au laboratoire sur des aérosols artificiels. J'ai donné ailleurs quelques-unes des nombreuses courbes de polarisation obtenues de la sorte [14].

Aucun nuage de gouttelettes transparentes ne

reproduit la courbe de polarisation des nuages martiens.

Un vase de Dewar contenant de l'azote liquide se remplit d'une nappe de brume formée de petits cristaux de glace. En soufflant de l'air près de la surface, on soulève une grosse bouffée de nuages de cristaux. La polarisation de la lumière relevée sur ce brouillard de cristaux reproduit celle des brumes martiennes [12]. *Les voiles blancs de l'atmosphère de Mars sont donc constitués de cristaux de glace.*

#### XIV. BRUMES MATINALES PERSISTANTES.

Certains brouillards légers se forment quelquefois plusieurs nuits consécutives au-dessus d'une contrée martienne et disparaissent chaque jour, dans le courant de la matinée. Voici un exemple : nous sommes au Pic du Midi entre le 8 et le 13 octobre 1956. Nous examinons chaque soir le territoire de Margaritifer Sinus. Quatorze séances de mesures de polarisation recueillies pendant ces 6 nuits consécutives totalisent 16 heures de surveillance. Chaque nuit, Margaritifer Sinus a pu être observé sur le bord levant. Chaque fois la polarisation de la lumière s'est montrée fortement altérée sur cette région qui était donc couverte d'une fine brume. Cette nappe, formée pendant la nuit martienne, s'est chaque fois désagrégée dans les trois heures qui suivirent le lever de Soleil sur cette région. Le phénomène cessait quelques heures plus tard lorsque ce territoire humide, entraîné par le mouvement diurne, s'éloignait du bord levant.

Ce léger brouillard matinal pouvait être décelé photographiquement comme le prouve l'examen des clichés du Centre de Documentation de Meudon. A travers un filtre bleu, le bord levant paraissait brillant.

L'angle de phase  $V$  était voisin de  $25^\circ$ . La figure 19 montre que cette valeur correspond à l'annulation de la polarisation des nuages. Cependant, nos brumes matinales donnaient encore une polarisation négative d'environ  $-5$  millièmes ; la polarisation change donc de sens, sur ces nuées, pour un angle de vision supérieur à  $25^\circ$  ; il faut que les cristaux de glace aient des dimensions différentes, qui les singularisent des autres nuages.

Cherchons des raisons à ces brouillards nocturnes et matinaux. La longitude héliocentrique  $\eta = 7^\circ$  est celle du début de l'été. Selon les mesures photométriques de la figure 8, les régions sombres équatoriales s'intensifient à ce moment. Margaritifer Sinus, en particulier, vient d'acquiescer le maximum de son assombrissement saisonnier. *La forte teneur de l'air en vapeur d'eau semble coïncider avec*

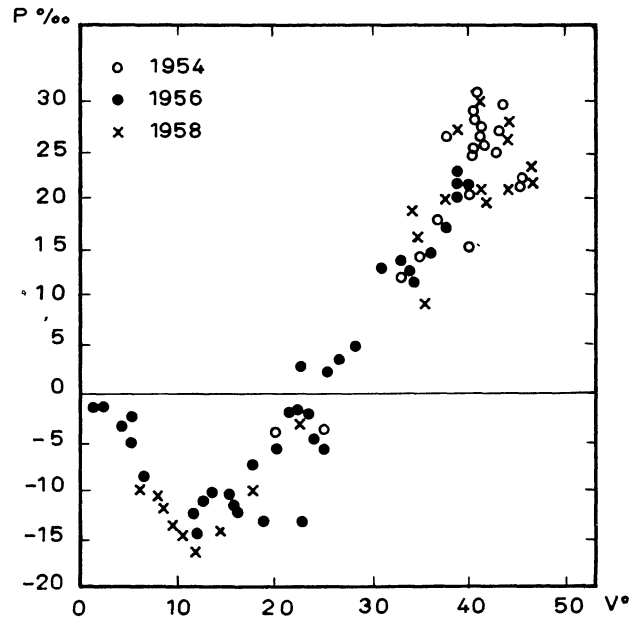


Fig. 19. — Courbe de polarisation des voiles blancs de l'atmosphère de Mars.

En abscisses : l'angle de phase  $V$ .

En ordonnées : la proportion de lumière polarisée en millième  $P$ .

Mesures sur les voiles semi-transparentes presque opaques.

*l'assombrissement saisonnier des taches sombres, et avec la propagation vers l'équateur de la vapeur libérée par la sublimation printannière du givre des calottes polaires.*

#### XV. PETITS NUAGES LOCALISÉS PERSISTANTS.

D'autres phénomènes prennent naissance dans l'atmosphère martienne à l'occasion de concentrations particulières d'humidité : ce sont les petits nuages localisés. Le dessin du haut de la figure 20 a été réalisé le 2 septembre 1956 avec le grossissement de 1000 ; on reconnaît Margaritifer Sinus, Aurorae Sinus, Erythraeum Mare. Les plus petites taches isolées mesurent moins de 60 km de diamètre ; le célèbre petit lac Juventas Fons est divisé en deux composantes bien distinctes. Le deuxième dessin, du 30 septembre, ne montre pas de modifications sensibles de la topographie, mais une formation claire très brillante borde Aurorae Sinus, au-dessus de Protei Regio. Elle mesure 700 km de long et 130 km de large. Une autre formation éclatante recouvre Ophir et masque seulement la composante Sud de Juventae Fons. Un troisième voile clair, plus diffus, s'étend sur Pyrrhae Régio. Ces trois ensembles nuageux très brillants restèrent localisés au-dessus des mêmes emplacements aussi longtemps que ces régions restèrent accessibles à

nos observations, c'est-à-dire du 11 septembre au 13 octobre. On les retrouve sur la figure 31.

*Les contours, les éclats de ces petits nuages peuvent se modifier capricieusement, mais ils persistent aux mêmes emplacements.*

La polarisation de la lumière de ces blancheurs exclut l'hypothèse d'un dépôt de givre ; elle confirme la structure de voiles de cristaux. Ces petits nuages se forment parce que l'atmosphère est particulièrement humide dans cette région, et souvent en même temps que les brumes matinales. Contrairement aux brumes ces nuées persistent toute la journée ; après la disparition des brouillards de la matinée, le polarimètre précise que l'atmosphère reste dépourvue de toute trace de cristaux en dehors de ces nuées localisées. *Ces formations doivent leurs persistances à des raisons de topographie locale.*

On pourrait imaginer, soit des dépressions profondes, remplies d'air froid et de brouillard glacé, soit de hauts plateaux enveloppés de nuées.

Voici la raison qui fait préférer cette dernière interprétation : la tache du désert Amazonie située à  $(130^\circ + 18^\circ)$  et dénommée Nix Olympica devient quelquefois très brillante ; il s'agit d'un groupe de petits nuages topographiques. En 1948, cette région était au bord couchant, j'observais une protubérance brillante élevée dépassant le terminateur. Le nuage ne peut donc remplir le fond d'une cuvette mais doit couronner un sommet élevé.

Le lecteur pourra suivre l'évolution d'une autre petite formation de 400 km de diamètre en étudiant la figure 21 (nuages du Edom).

Ces nuages de relief semblent être observés de préférence pendant le maximum saisonnier de l'humidité ; ils apparaissent alors en de nombreux emplacements.

#### XVI. RÉGIONS POLAIRES AUSTRALES : ÉTAT DE L'ATMOSPHÈRE.

L'opposition de 1954 concernait la fin de l'hiver et la première moitié du printemps austral. Les terres antarctiques restèrent couvertes, à cette saison, comme chaque année martienne, du grand voile nuageux polaire hivernal. L'analyse polarimétrique des régions polaires australes donne le graphique de la figure 22, établie par J. H. FOCAS, d'après l'ensemble des observations. La longitude héliocentrique est reportée au bas de la figure le long des abscisses ainsi que les limites des saisons. L'échelle supérieure donne les angles de vision.

La première branche de courbe ABC concerne le

voile polaire hivernal ; elle caractérise un nuage opaque de cristaux de glace.

Après l'équinoxe, ce voile devient plus léger et partiellement transparent ; on devine au travers le dépôt blanc polaire recouvrant le sol ; la polarisation se trouve fortement diminuée (branche de courbe CDE).

En 1956, après une année martienne, nous retrouvons ces territoires antarctiques de nouveau au milieu du printemps. La brume légère s'éclaircit rapidement et n'est déjà plus discernable visuellement. Mais le polarimètre révèle encore des anomalies prouvant que l'atmosphère reste altérée par de légers voiles. La courbe FGH s'écarte encore de celle HIJ, donnée par le dépôt polaire lui-même. Ces brumes légères résultent évidemment de la vapeur d'eau que le dépôt polaire libère dans l'atmosphère pendant cette période de sublimation et de désagrégation. Il n'y a pas de condensations nocturnes et matinales comme dans les régions équatoriales au début de l'été, mais, à la fin du printemps, une brume légère et transparente se maintient dans les régions polaires, indiscernable sans le polarimètre. Elle se résorbe vers  $\eta = 335^\circ$  seulement, peu avant la fin du printemps austral.

#### XVII. ÉTUDE PHOTOMÉTRIQUE DU BROUILLARD POLAIRE.

Le photomètre à franges mentionné plus haut fut utilisé pour rapporter la luminance  $B$  des blancheurs polaires australes à celle  $B_0$  des régions claires au centre du disque. Les mesures effectuées sur les clichés photographiques du Pic du Midi par J. H. FOCAS sont reportées au bas de la figure 22, au regard des mesures de polarisation.

La branche de courbe KL correspond au voile polaire hivernal. Le nuage polaire, à la fin de l'hiver, est vu sous la luminance relative  $B/B_0 = 1,12$ . Comme le facteur de diffusion  $B_0$  des territoires clairs au centre du disque est 0,19, l'éclat du nuage donne  $1,12 \times 0,19 = 0,21$  fois celui d'un écran blanc parfaitement diffusant éclairé normalement. Cette valeur paraît faible, mais le nuage est éclairé et observé sous l'incidence  $70^\circ$ . Supposons le cas idéal d'un nuage de cristaux délimité dans sa partie supérieure par une zone de transition parfaitement plane ; la profondeur optique unité est supposée faible devant l'épaisseur de la couche. La réflexion directe par les cristaux reste négligeable devant les réflexions multiples et la couche plane idéale obéit à peu près à la loi de Lambert. Si  $B(0^\circ)$  est le facteur de diffusion au centre du disque,

on aura sous l'incidence  $\theta$  :  $B(\theta) = B(0^\circ) \cos \theta$ .

Les nuages terrestres formés de gouttelettes donnent un facteur de diffusion  $B(0^\circ)$  compris entre 0,7 et 0,8. Les voiles de cristaux d'alto-stratus donnent 0,5 ; de tels nuages en nappes opaques parfaitement lisses et planes, donneraient sous l'angle d'éclairement de nos observations martiennes  $B(70^\circ) = 0,50 \cos(70^\circ) = 0,17$ . Cette valeur représente un minimum, car la formule néglige

la lumière renvoyée directement par les cristaux dont l'éclat est indépendant de l'angle d'éclairement. Mais la formule implique surtout une nappe nuageuse parfaitement plane et horizontale.

Supposons la couche modelée par de très légères irrégularités. J'ai calculé le cas de pyramides à bases carrées, jointives, pour diverses valeurs faibles raisonnables de l'angle des faces et de la base. Les résultats sont les suivants :

NATURE DE LA SURFACE	$B(70^\circ)/B(0^\circ)$	$B(70^\circ)$ POUR $B(0^\circ) = 0,50$	REMARQUE
Plane et lisse .....	= 0,34	0,17	Cas théorique.
Pyramides d'angle $10^\circ$ .....	0,38	0,19	Ondulations à peine perceptibles.
» » $20^\circ$ .....	0,48	0,24	Mer de nuage calme.
» » $30^\circ$ .....	0,55	0,28	Altocumulus jointifs.
Voile polaire de Mars en hiver.			$B(70^\circ)$ observé = 0,21.
Taches claires dans le voile ...			$B(70^\circ)$ observé = 0,25.

Le brouillard de l'hiver polaire donne  $B(70^\circ) = 0,21$  ; il est semblable à une nappe nuageuse terrestre de cristaux de glace dont la surface demeure *exceptionnellement peu tourmentée*.

La lumière doit pénétrer profondément dans les brumes martiennes car la faible densité de l'air entraîne une faible concentration de cristaux. Les aspérités de la surface de la couche de dimensions plus petites que le trajet de la lumière deviennent pratiquement transparentes et la couche peut obéir à la Loi de Lambert malgré de petites irrégularités de sa surface.

Mais par contre, la convection thermique sur Mars doit engendrer des structures nuageuses à une échelle de dimension beaucoup plus vaste que celles que l'on observe sur nos voiles nuageux terrestres, lesquelles mesurent déjà quelques dizaines ou centaines de mètres ; le gradient thermique vertical de l'atmosphère martienne vaut en effet 3,7°/km, contre 7°/km pour notre air, ce qui accroît les dénivellations verticales des ondulations attribuables à la convection. Les structures convectives martiennes doivent donc très probablement conserver des dimensions non négligeables devant la pénétration de la lumière, et par suite donner un accroissement de l'éclat de la couche observée obliquement. Nous ne voyons pas cet accroissement au pôle. *La convection par turbulence est donc probablement faible dans les régions polaires en hiver.*

On observe souvent dans le voile polaire de l'hiver des taches brillantes, mouvantes ou passagères,

qui ressemblent à des nuages plus lumineux. Les mesures photométriques relevées sur ces voiles donnent la courbe K'L' (fig. 22). L'éclat vaut 0,135 fois celui des régions claires du sol, soit  $B(70^\circ) = 0,26$ . Si ces blancheurs correspondaient à des nuées donnant une meilleure réflexion de la lumière, leur facteur de diffusion devrait être  $0,26/\cos 70^\circ = 0,76$  et il serait supérieur à tous ceux de nos nuages de cristaux connus. Il faut donc que ces taches blanches correspondent à des régions où la couche nuageuse est plus tourmentée.

Au début du printemps, le brouillard polaire devient beaucoup plus brillant, ainsi que le montrent les courbes LM et L'M. Le voile nuageux se raréfie en effet et laisse alors apercevoir progressivement la couche de givre qui recouvre le sol.

#### XVIII. NATURE DE DÉPÔT POLAIRE.

Depuis la fin du printemps jusqu'au milieu de l'été, le ciel antarctique reste parfaitement limpide. La polarisation de la lumière donne la courbe HIJ (fig. 22) ; celle-ci caractérise la structure même du dépôt blanc constituant la calotte polaire. Elle permet de reconstituer sa nature.

Les expériences avaient été développées à l'Observatoire de Meudon de 1950 à 1954 pour interpréter les mesures relevées sur la calotte australe ; elles ont déjà été publiées [12]. Aucune neige, aucune glace, aucun givre artificiels ou naturels ne permirent de retrouver cette polarisation. Les mesures relevées en haute montagne ne donnèrent

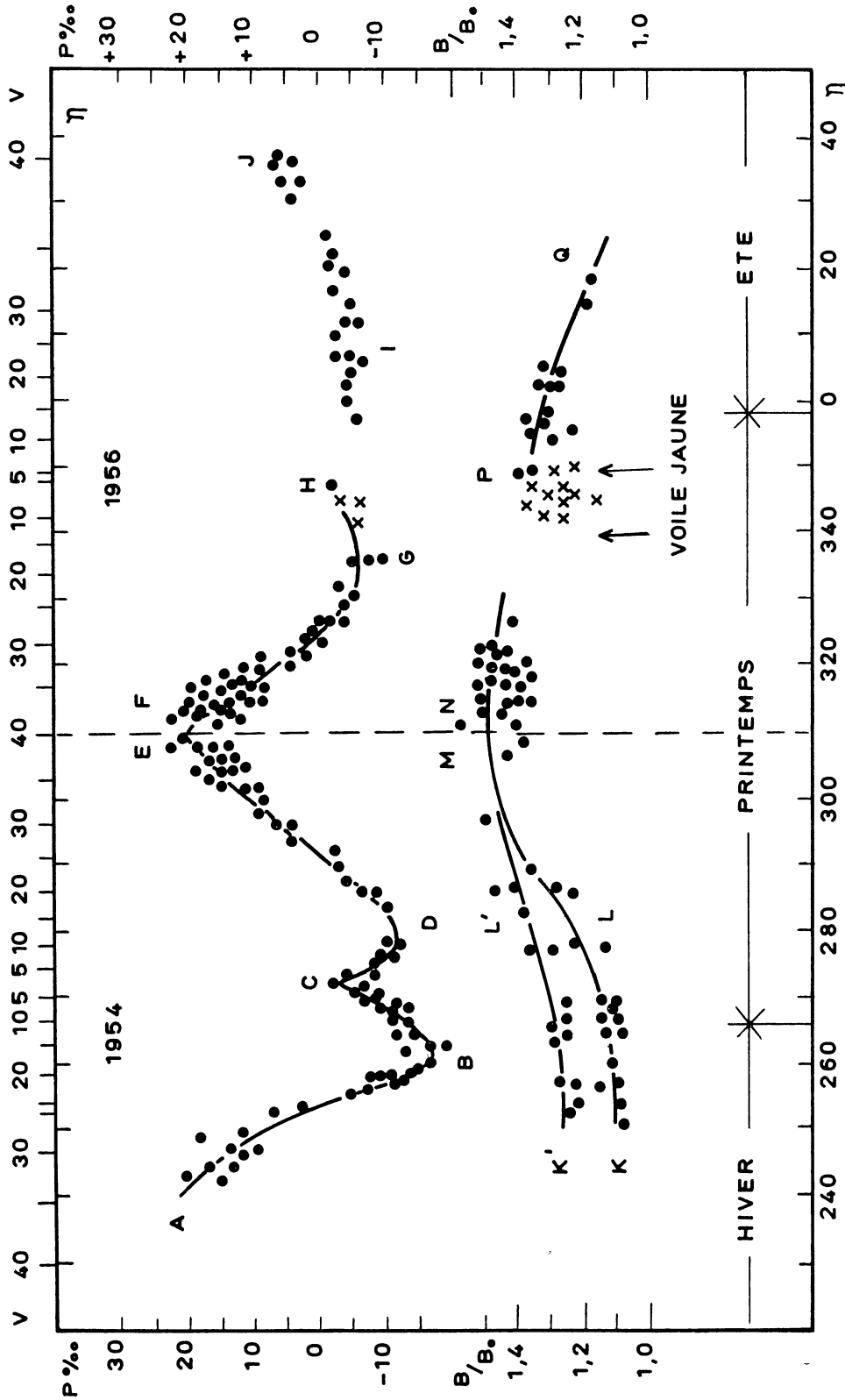


Fig. 22. — Variations de l'éclat et de la polarisation de la lumière de la calotte polaire australe de Mars en 1954 et 1956. Adapté d'après J. H. FOCAS.  
 En abscisses : la longitude héliocentrique et les saisons (en haut, l'angle de phase).  
 En ordonnées : en haut, la proportion de lumière polarisée en millèmes. En bas, la brillance de la calotte polaire rapportée à celle des régions claires au centre du disque.  
 ABCDE : courbe de polarisation en 1954. FGHLJ : courbe de polarisation en 1956.  
 KLM : courbe de l'éclat en 1954. NPQ : courbe d'éclat en 1956.  
 K/L/M : taches brillantes sur la calotte.

pas plus de résultats. Il fut nécessaire d'opérer dans les conditions mêmes où se trouve le sol martien. Du givre artificiel fut fabriqué sur un socle refroidi par de l'azote liquide, dans une enceinte où la pression atmosphérique réduite était rendue comparable à celle de l'atmosphère martienne. Un rayonnement infrarouge projeté sur le dépôt rendait les effets de l'échauffement solaire. Le givre se sublimait alors superficiellement, sans fusion ; il prenait une contexture grenue très particulière et polarisait alors la lumière de la même façon que les calottes polaires martiennes.

La figure 23 donne l'ensemble des mesures de polarisation relevées sur la calotte polaire australe dégagée de nuages. La courbe est beaucoup plus complète que celle anciennement relevée sur la calotte boréale [12] ; elle confirme encore l'interprétation précédente : *le dépôt est un givre d'eau dont la structure singulière résulte de la faible pression atmosphérique et de l'évaporation superficielle.*

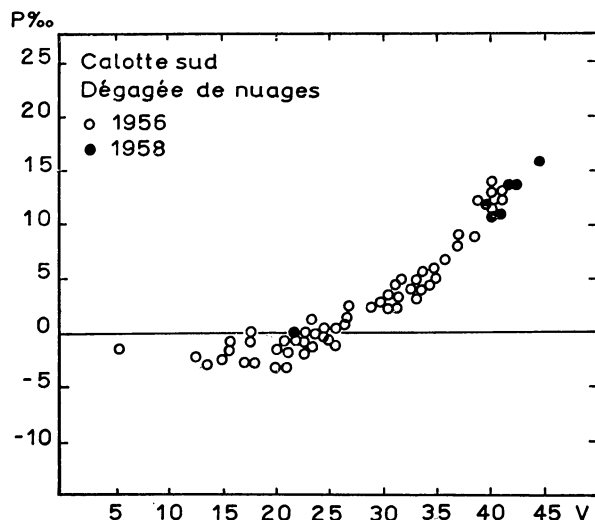


FIG. 23. — Courbe de polarisation du dépôt blanc polaire austral dégagé de voiles et de brumes.

D'autre part, l'eau n'existe pratiquement pas à l'état liquide sur la planète Mars ; on la trouve sous forme soit de vapeur, soit de givre ou de nuages de cristaux. L'évaporation du dépôt polaire se produit par sublimation. *Il n'y a pas d'étendue d'eau liquide.*

Voici quelques résultats de l'étude photométrique du dépôt polaire. Lorsque, en N (fig. 22), le dépôt blanc transparait complètement à travers la brume polaire, l'éclat  $B/B_0$  vaut 1,5 et correspond au facteur de diffusion 0,28 sous l'angle d'éclaircissement  $65^\circ$ . La loi de Lambert donnerait au centre du disque 0,67 ; mais il ne semble pas que la couche

de givre obéisse à la loi de Lambert. L'examen microphotométrique d'un cliché de la calotte au bord du disque révèle un assombrissement sous l'inclinaison croissante moins rapide que ne le prévoit cette loi simple. Par suite, le facteur de diffusion normal de ce givre doit être inférieur à 0,67.

Les reconstitutions de givre polaire martien effectuées au laboratoire de l'Observatoire de Meudon conduisirent, en effet, à une surface très grenue, dont le facteur de diffusion n'était pas très élevé.

Au début de septembre 1956, un voile de poussière est venu recouvrir la région polaire Sud, et tamiser la calotte, puis la masquer complètement. (Points P de la fig. 22.) Après réapparition du dépôt, l'éclat tombait à  $B/B_0 = 1,30$ , donnant un facteur de diffusion  $B(68^\circ) = 0,25$ . La couche de givre dans la suite, a continué à se ternir ; en novembre (point Q de la courbe)  $B(70^\circ)$  valait 0,22. Cette baisse d'éclat se manifeste directement à l'observation visuelle ; en effet, sur la figure 2, le dessin du 15 août montre la surface de givre presque aussi brillante que les petits nuages localisés sur son pourtour ; le 30 septembre, le dépôt est beaucoup plus terne qu'un petit nuage analogue.

*Ce salissement du givre au cours de sa longue exposition à l'air semble résulter de la présence des voiles de poussière ; les particules transportées par les vents se déposent sur la couche et s'y accumulent. Le givre s'évapore et les poussières se concentrent progressivement.*

Lorsque le givre s'est complètement résorbé, la poussière doit subsister seule sur le sol ; son facteur de diffusion normale  $B(0^\circ)$  doit être celui des déserts martiens, soit 0,19 ; mais cependant les taches sombres du pourtour de la calotte ne paraissent nullement masquées par ce dépôt poudreux clair ; au contraire, elles se montrent particulièrement assombries par le processus saisonnier ; le noircissement exceptionnel qu'elles acquièrent de la sorte ne semble aucunement affecté par le dépôt superficiel de ces poussières claires. Ce comportement est étrange.

#### XIX. RÉGRESSION DU DÉPÔT POLAIRE.

La courbe de régression du dépôt polaire austral, en 1956, est représentée figure 25. 158 clichés ont été mesurés au micromètre à fil ; ils proviennent des Observatoires du Pic du Midi, Johannesburg, Lick, Nice, Mt Wilson, Bloemfontain, Lowell. Nous avons déterminé sur chaque image photo-



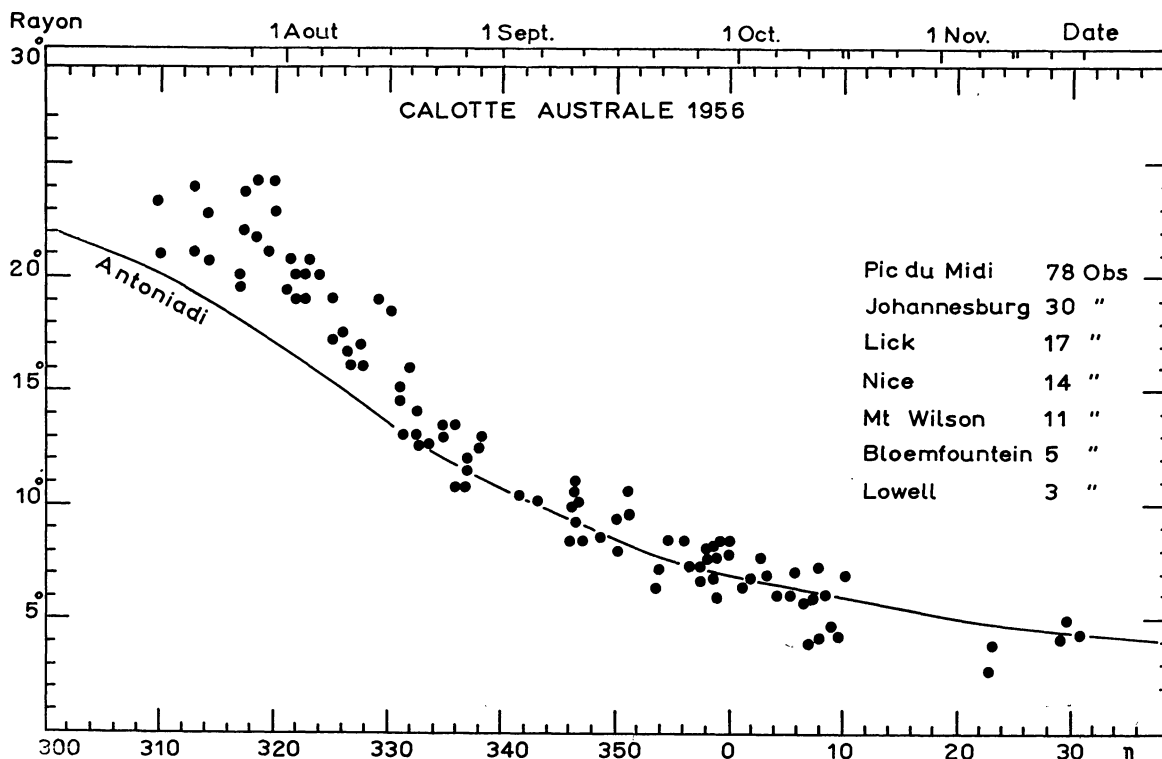


FIG. 25. — Courbe de régression de la calotte polaire australe en 1956.

En abscisses : longitude héliocentrique.

En ordonnées : rayon moyen du dépôt blanc polaire.

D'après les mesures micrométriques sur 158 clichés provenant de différents observatoires.

La courbe au trait est établie d'après les valeurs moyennes données par ANTONIADI.

graphique l'angle planétocentrique sous-tendu par le diamètre de la calotte polaire ainsi que la latitude du contour le long du méridien central. Les points du graphique sont généralement la moyenne entre ces deux déterminations, et souvent la moyenne entre plusieurs clichés rapprochés.

La courbe de régression normale, établie par ANTONIADI d'après l'ensemble des oppositions périhéliques antérieures à 1926 [16] est représentée en traits fins. Le dépôt polaire de 1956 était plus développé qu'à l'ordinaire à la fin de l'hiver martien. La première phase de sa désagrégation fut aussi plus rapide. Par suite, la quantité d'eau libérée dans l'atmosphère fut plus importante. Nous verrons qu'un grand voile jaune s'est alors formé dans l'atmosphère martienne et recouvrit la région polaire antarctique vers le 1<sup>er</sup> septembre. Après cet événement, le cours de la régression redevint normal.

Le tracé extérieur de la figure 26 donne le contour de la couche blanche au début de la régression, dans les premiers jours d'août, sous la longitude héliocentrique 323°. La courbe intérieure concerne le dépôt vers le début d'octobre 1956 sous la

longitude héliocentrique  $\eta = 4^\circ$  correspondant au début de l'été. Le contour a évolué entre ces deux limites. On reconnaît l'excentrement prononcé des derniers résidus blancs.

Nous savons que, chaque année martienne, le contour reproduit approximativement les mêmes irrégularités, les mêmes saillies, les mêmes chenaux sombres, et se désagrège selon un processus comparable. Les détails de ce comportement ont été parfaitement décrits dans le passé, en particulier par G. FOURNIER [15], E. M. ANTONIADI [16] etc. Les nouvelles observations permettraient d'examiner cette évolution avec beaucoup plus de précision encore. Nous donnons dans ce but la reproduction de quelques-uns des meilleurs documents que nous avons recueillis (fig. 24). Nous laissons au lecteur le soin d'extraire la description des phénomènes.

#### XX. LE RELIEF DES RÉGIONS ANTARCTIQUES.

Les saillies brillantes qui émergent du contour et forment des promontoires sont généralement localisées au-dessus des territoires clairs de la sur-

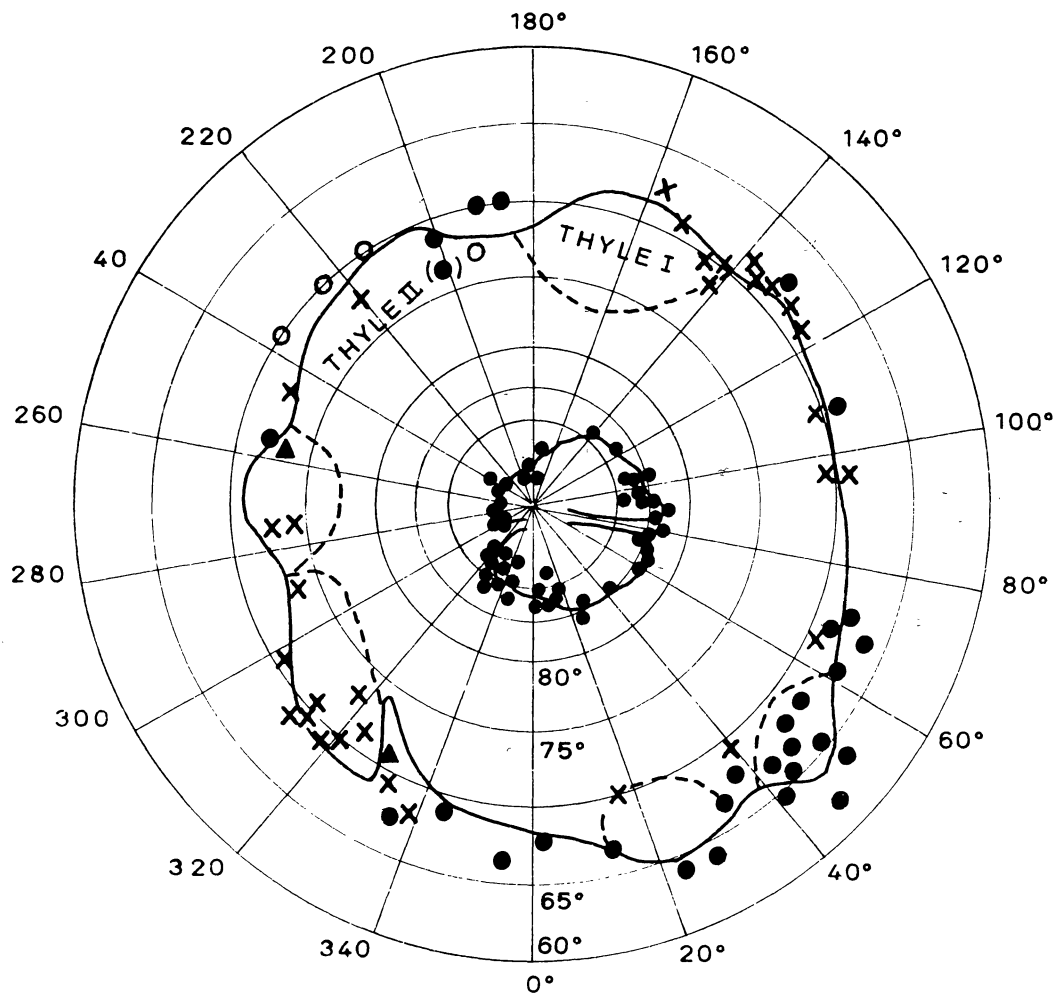


FIG. 26. — Deux stades extrêmes du contour de la calotte polaire australe en 1956 (d'après les mesures sur les clichés du Pic du Midi).

Courbe extérieure : début d'août 1956,  $\eta$  moyen = 323°.

Courbe intérieure : début d'octobre 1956,  $\eta$  moyen = 04°.

face du sol. Au contraire, les brèches entraînant chaque année la dislocation du dépôt démasquent des terrains sombres. ANTONIADI attribuait déjà les irrégularités du contour de la calotte à l'existence d'un relief. En voici une preuve supplémentaire : sur les régions susceptibles de se détacher du contour pour constituer des saillies brillantes, le polarimètre révèle souvent des anomalies de polarisation ; celles-ci se produisent généralement dans la période qui précède l'apparition de la saillie. La proportion de lumière polarisée relevée sous différents angles de phase, sur ces très petites régions, donne la courbe de polarisation de la figure 27. Cette courbe est semblable à celle de la figure 19 relative aux nuages de cristaux de glace. Les régions qui vont retenir le dépôt de givre donnent donc naissance d'abord à des brumes de cirrus,

persistantes et bien localisées. On imagine de hauts plateaux, ou des sommets, recouverts de givre, et enveloppés d'une nappe persistante de brume.

On pourrait envisager aussi des dépressions, ou cuvettes, retenant un brouillard permanent ; la brume absorberait suffisamment le rayonnement solaire pour ralentir l'évaporation du givre couvrant le sol. Mais voici une observation qui fait préférer la première interprétation : le 29 août 1956, un voile de poussière est venu recouvrir la calotte polaire ; ce voile était partiellement transparent, et masquait le dépôt blanc incomplètement (fig. 24). L'un de ces petits nuages localisés, particulièrement étendu et brillant, restait parfaitement visible par-dessus le voile absorbant ; son éclat paraissait encore plus brillant et la polarisation de sa lumière ne présentait aucune altération. Ce

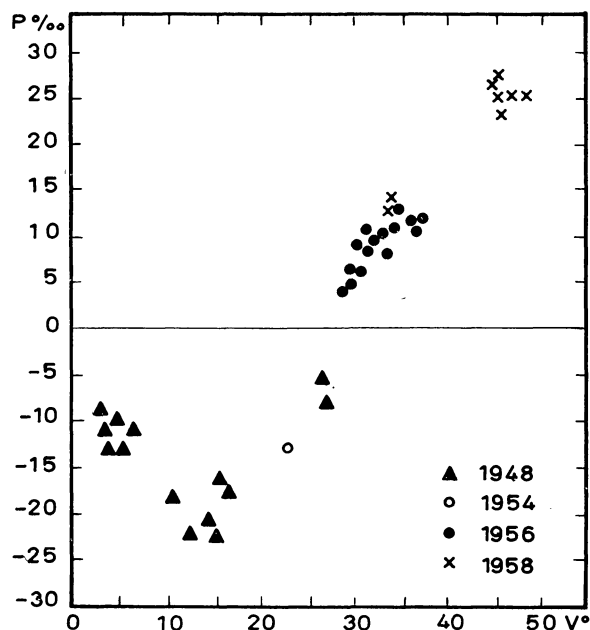


Fig. 27. — Mesures de polarisation relevées sur les saillies brillantes du rebord des calottes polaires et correspondant à des voiles nuageux localisés.

nuage émergeait évidemment au-dessus de la nappe polluée.

## XXI. LES GRANDS VOILES JAUNES DE 1956.

Nous savions par les travaux de G. FOURNIER, E. M. ANTONIADI, E. C. SLIPHER, etc..., que l'atmosphère de Mars perd quelquefois sa limpidité et se charge de légers voiles jaunes absorbants.

Ces nuées furent attribuées à de la poussière soulevée du sol par le vent. Ces voiles assez rares, semblaient avoir une prédilection saisonnière car ils furent décelés surtout lors des oppositions périhéliques, au déroulement du printemps de l'hémisphère Sud.

L'opposition périhélique de 1956 révèle le développement simultané de plusieurs voiles jaunes d'une singulière ampleur. Cette manifestation exceptionnelle intéressa tous les territoires de l'hémisphère Sud à la fois. Il fut nécessaire d'examiner la planète sous tous ses méridiens, et grouper pour cela les observations recueillies par nos Observatoires sous différentes longitudes. L'Union Astronomique Internationale fut particulièrement utile pour l'établissement de cette coopération.

L'institution par l'U. A. I. du Centre de Documentation Photographique Planétaire à l'Observatoire de Meudon a déjà fourni pour cette étude la série des clichés photographiques dont voici la liste :

Pic du Midi (France) .....	154 clichés par H. CAMICHEL, J. H. FOCAS et A. DOLLFUS.
Johannesburg (Union Sud-Africaine) .....	48 clichés par W. S. FINSEN.
Bloemfontain (Union Sud-Africaine), Lowell Observatory (Arizona U. S. A.) .....	120 clichés par E. C. SLIPHER et H. GIGLAS.
Lick Observatory (California U. S. A.) .....	36 clichés par H. M. JEFFERS.
Mt-Wilson (California, U. S. A.) .....	8 clichés par R. RICHARDSON.
Stalingrad (U. R. S. S.) .....	70 clichés de R. LEIGHTON.
Tokio (Japon) .....	10 clichés de V. A. BRONSTEIN.
Brazzaville (Congo) .....	7 clichés par S. MURAYAMA.
Milano-Merate (Italie) .....	10 clichés par C. BOYER.
Gênes (Italie) .....	8 clichés par P. BROGLIA, G. DE MOTTONI.
	4 clichés par G. DE MOTTONI.

Nous devons à G. DE MOTTONI l'établissement, à Gênes en Italie, de cartes planisphères très soignées grâce à l'ensemble de cette documentation. Certaines de ces cartes, présentées en coordonnées polaires, ont déjà été publiées [17]. Une nouvelle étude permet d'améliorer encore les cartes qui sont reproduites figures 28, 29 et 30. Ces documents divisent la période intéressante en courts intervalles de temps.

Outre cette collection internationale de photographies, nous avons utilisé pour cette étude les

1300 mesures de polarisation de la lumière recueillies sur de petites régions martiennes de juillet à décembre 1956 au cours de 103 séances d'observations au Pic du Midi et à Athènes par J. H. FOCAS et l'auteur.

Nous avons utilisé aussi les mesures photométriques effectuées sur 140 clichés du Pic du Midi en lumière jaune sur les taches claires et sombres de la planète.

Nous avons tiré parti de dessins, relevés de couleurs, estimations de contrastes et de jaunissements

du limbe recueillis visuellement au Pic du Midi par J. H. FOCAS et par l'auteur, aux États-Unis par G. P. KUIPER [18], au Japon par S. MIYAMOTO, S. EBISAWA, S. MURAYAMA, etc... [20], en Union Soviétique par N. BARABASHEV, W. BRONSTEIN [21 et 22], en Allemagne par W. D. HEINTZ [23] et par de nombreux autres observateurs (cf. 24).

## XXII. ÉVOLUTION DES VOILES JAUNES EN 1956.

Dès le début des observations, à partir du 10 juillet 1956, le contraste des taches sombres parut légèrement altéré au centre du disque, et plus fortement encore le long du limbe, indiquant une atmosphère martienne légèrement polluée par des impuretés. La polarisation de la lumière fut notée anormale, sur l'ensemble du disque comme le montre la branche GH de la figure 37, et plus particulièrement le long du limbe. La lumière polarisée, différait de celle donnée par les habituels nuages de cristaux mais caractérisait une pollution générale et persistante par de légers voiles jaunes.

Brusquement, à la fin d'août et au début de septembre, trois formations nuageuses jaunes opaques distinctes prirent naissance indépendamment, sur Noachis, Phaethontis et Lybia.

Sur *Noachis*, les Japonais décelaient le 10 août un nuage très brillant qui fut noté blanc, c'est-à-dire formé non pas de poussières mais de cristaux de glace. Cette identification reste cependant douteuse, car les observatoires japonais n'étaient pas encore équipés en 1956 des polarimètres qui auraient pu lever l'ambiguïté.

Dès le 23, le territoire de Argyre, à 2000 km au Sud-Ouest, était vu d'Europe recouvert d'un voile opaque blanc teinté de jaune très brillant (fig. 28). La polarisation de la lumière indiquait un nuage de cristaux de glace altéré par de la poussière jaune débordant sur une plus grande étendue.

Un vent régulier de 20 km/h, soufflant de Noachis vers Argyre, permettrait d'associer ce voile au précédent. Il expliquerait le transport et la dissémination de la poussière.

Après le 23 août, le nuage de Argyre continua à se déplacer dans le même sens avec la même vitesse ; les voiles blancs disparurent, les formations jaunes seules persistèrent, progressèrent sur Mare Australe puis bifurquèrent vers le Sud en contournant *Depressio Hellespontica* (fig. 28).

Les formations jaunes entouraient alors *Depressio Hellespontica* à la manière d'une couronne circulaire de 1000 km de largeur (fig. 28). Le vent

tournant qui dépassait en certains points 35 km/heure, montre que le territoire sombre de *Depressio Hellespontica* se comporte comme un anticyclone. La circulation autour d'un noyau de forte pression est dextrogyre puisque nous sommes dans l'hémisphère Sud.

Les jours suivants (fig. 29), nous assistons à l'apparition de voiles sur Hellas, à la lente régression du voile polaire continuant à se mouvoir vers Phaethontis, à la désagrégation des formations sur Noachis et Argyre, et à la dissémination rapide d'une fine poussière au loin, radialement car *Depressio Hellespontica* resta remarquablement peu affecté, au centre de l'ensemble.

Après le 8 septembre, les voiles opaques issus de Argyre disparurent mais laissèrent une très fine poussière dans l'air, décelée grâce aux polarimètres, laquelle persista encore quelques jours en s'éparpillant (fig. 29).

Sur *Phaethontis*, les premières manifestations nuageuses décelées au Texas le 30 août 1956 par G. P. KUIPER [18] formaient un voile jaune, opaque, clair, bien localisé, représenté figure 28. Les jours suivants, la perturbation s'étira vers l'Ouest le long de *Electris* et *Eridania* à la vitesse apparente de 40 km/heure (fig. 29). De nombreux autres voiles jointifs apparurent à l'Est sur *Claritas*, *Aonius Sinus*, *Thaumasia*, *Syria*, sans qu'il soit possible de mettre en valeur des déplacements ; un vent rapide peut en effet ne soulever la poussière que sur certaines régions seulement, ou même propager les soulèvements dans la direction d'où il provient et donner l'apparence d'un déplacement de sens inverse.

Du 7 au 12 septembre (fig. 29), les formations évoluèrent aux mêmes emplacements de façon complexe et répandirent à distance une fine poussière. De nouveaux voiles s'étendirent sur *Eridania* et *Ausonia*, le long des frontières Sud de *Cimmerium* et *Tyrrenum Mare*, couvrant aussi *Nepenthes* et gagnant *Isidis Regio*. Après le 14 (fig. 30), toutes les formations s'affaiblirent sauf la bande nuageuse allongée sur *Electris*, *Eridania* et *Ausonia* qui ne disparut que vers le 20.

Le nuage de *Lybia* fut vu le 5 septembre (fig. 29) ; il était nettement blanc, formé de cristaux de glace, quoique peut-être sali de poussières jaunes. Cette formation vira ensuite au jaune en devenant plus diffuse. Un bras nuageux relia *Lybia* à *Ausonia* et *Eridania* au-dessus de *Tyrrenum Mare* et *Hesperia* qu'ils manquèrent (fig. 29 et 30). Il a semblé que le vent nécessaire soufflait depuis *Ausonia* vers *Lybia*.

Un autre bras nuageux était visible le 14, reliant

Hellas à Isidia Regio le long du méridien 275°. Ces formations disparaissent vers le 17 septembre.

### XXIII. CARACTÈRES DES VOILES JAUNES.

Les observations précédentes établissent plusieurs propriétés des voiles jaunes dont voici les principales :

a) Les voiles jaunes opaques de 1956 ont toujours été engendrés *au-dessus des contrées claires*.

b) La comparaison de certains clichés avec les planches des pages 109 et 119 de l'ouvrage « Mars » de E. C. SLIPHER permet de retrouver, en 1924, 1941 et 1943, les mêmes configurations nuageuses aux mêmes saisons et aux mêmes emplacements ; ces voiles se forment donc de préférence *dans certaines régions claires privilégiées*.

c) Les voiles jaunes apparaissent de préférence dans les latitudes tempérées, et au printemps ; ces circonstances correspondent au moment où *l'atmosphère est la plus chargée de la vapeur d'eau* issue des calottes polaires en sublimation.

d) Les premières manifestations de voiles jaunes sont souvent *associées à des nuages blancs de cristaux de glace* ; l'humidité de l'air pourrait donc intervenir pour provoquer le soulèvement des poussières du sol. La vapeur d'eau absorbe les radiations thermiques émises par le sol et modifie l'équilibre radiatif ainsi que la température du sol ; les nuages modifient le gradient thermique vertical de l'atmosphère ; il pourrait y avoir augmentation du vent, instabilité, ascendance. Le P<sup>r</sup> MIYAMOTO a étudié ces effets [19].

e) Après la première apparition d'un voile, *une fine poussière est disséminée* par le vent, et s'éparpille jusqu'à de très grandes distances. Celle-ci persiste de 3 à 10 jours après la disparition de tout voile discernable. Il y a probablement décantation des poussières, les plus fines persistant dans l'atmosphère le plus longtemps.

f) Nous avons déjà montré par l'interprétation des mesures de diamètre que les voiles jaunes *ne s'élèvent pas haut dans l'atmosphère*. Nous en avons d'autres preuves : certains nuages blancs brillent quelquefois au-dessus de la couche polluée. La figure 24 en donne un exemple. Cependant les poussières les plus fines doivent s'élever le plus haut car le nuage blanc vu sur Argyre le 23 août au début du soulèvement de poussières était déjà terni et le devint de plus en plus.

Toutes ces observations s'expliquent bien en supposant les voiles jaunes formés par de la poussière soulevée du sol. Nous allons voir que les mesures physiques confirment encore cette interprétation.

### XXIV. DIMENSIONS DES PARTICULES CONSTITUANT DES VOILES JAUNES.

Nous supposons que la dernière phase de l'évolution d'un voile jaune est une décantation des grains de poussière par simple gravité ; nous négligeons les effets de répulsion électrostatiques toujours possibles. La chute d'un petit grain sphérique dans l'air obéit à la formule de Stokes généralisée par EPSTEIN et CUNNINGHAM au cas des atmosphères raréfiées pour lesquelles le libre parcours moyen des molécules devient grand devant le diamètre des particules [34]. En se limitant au cas classique de la validité de la formule de Stokes :

$$V = \frac{2}{9} \frac{g(\sigma - \rho)}{\eta} r^2,$$

$\sigma$  = densité du sphérule.

$\rho$  = densité de l'air.

$g$  = constante de gravitation.

$\eta$  = viscosité cinématique.

$r$  = rayon du sphérule.

En négligeant  $\rho$  devant  $\sigma$ , et introduisant le facteur correctif de Cunningham

$$V = \frac{2}{9} g \frac{\sigma}{\eta} r^2 (1 + K\lambda/2r).$$

$\lambda$  = libre parcours moyen.

$K$  = coefficient très voisin de 1.

La vitesse de chute dans le cas de particules de silice ( $\sigma = 3,5$ ) sous la gravité martienne  $g(\text{Mars}) = 0,37 g(\text{Terre})$  a été calculée par G. P. KUIPER [30] qui donne pour les valeurs de la pression atmosphérique 55 mb et 11 mb le tableau suivant :

$2r$	V POUR 55 mb	V POUR 11 mb
0,02 (microns)	0,0002 cm/s	0,001 cm/s
0,10 »	0,0011 »	0,005 »
0,20 »	0,0024 »	0,011 »
1 »	0,014 »	0,06 »
2 »	0,033 »	0,12 »
10 »	0,5 »	0,8 »
20 »	1,7 »	2,5 »

L'analyse de nos documents montre que les poussières moyennes disparaissent en quelques jours et doivent s'abaisser d'environ 500 à 1000 mètres par jour, soit de 0,5 à 1 cm/s. Leurs diamètres doivent donc être *de l'ordre de 10 à 15 microns*. Les grains les plus ténus, décelables seulement au polarimètre

ou sur les bords extérieurs du limbe, persistent beaucoup plus longtemps et doivent mesurer *quelques microns de diamètre seulement*.

Récemment, J. A. RYAN [35] est parvenu aussi à des conclusions semblables et a analysé en outre les vitesses de vent nécessaires pour soulever les poussières depuis le sol, pour différentes hypothèses sur la pression atmosphérique.

Pour vaincre l'adhérence des poussières au sol et les soulever dans l'air malgré la faible pression atmosphérique martienne, il faut un vent à terre très fort, ce qui explique la faible quantité de voiles de poussières observées sur Mars, malgré l'extrême sécheresse et la nature poudreuse du sol.

#### XXV. PROPRIÉTÉS PHOTOMÉTRIQUES DES VOILES JAUNES.

Les voiles de poussière doivent leurs éclats à la diffusion directe sur chacun des granules ainsi qu'à la diffusion multiple entre granules.

Au moment de l'opposition, la diffusion directe  $B_0$  est indépendante de l'orientation de la surface ; la diffusion multiple  $B_m$  varie sensiblement selon la loi de Lambert, c'est-à-dire proportionnellement au cosinus de l'angle  $\theta$  de la normale à la surface avec la direction d'éclairement. Le facteur de diffusion du voile est :

$$B(\theta) = B_0 + B_m \cos \theta.$$

Les premiers jours de septembre 1956, lorsque le voile jaune vint recouvrir la calotte polaire Sud, le facteur de diffusion du voile rapporté à un écran blanc parfaitement diffusant et mesuré à l'aide du photomètre à franges valait au bord extrême pour  $\theta = 75^\circ$  :

$$B(75^\circ) = 0,20.$$

Au centre du disque, pour  $\theta = 0^\circ$ , les voiles jaunes opaques semblables donnaient :

$$B(0^\circ) = 0,23.$$

Résolvant les équations, nous trouvons

$$B_0 = 0,19,$$

$$B_m = 0,04.$$

Le facteur de diffusion  $B_0$  des grains de poussières supposés isolés vaut donc 0,19 dans la direction de la source, pour la lumière jaune orangée. Les régions désertiques martiennes donnent, au centre du disque et dans les *mêmes conditions* 0,20. *Les particules en suspension dans l'air ont donc à peu près le même pouvoir réflecteur que les régions claires du sol.*

Cette identité peut être poussée plus loin ; les mesures polarimétriques avaient montré [12] que la surface du sol martien est analogue à un dépôt rugueux de poudre d'oxyde de fer  $Fe_2O_3$  (*limonite*) finement broyée et pulvérisée. Le matériau en échantillon brut, noir et presque métallique, absorbe parfaitement la lumière. Concassé en grains de quelques dizaines de microns de diamètre, il donne une poudre encore foncée mais orangée parce que les grains cessent d'être complètement opaques sur l'épaisseur de leurs diamètres. En tamisant les grains plus petits, jusqu'à quelques dizaines de microns, on obtient une pulvérulence plus claire, jaune orangée, de pouvoir diffusant 0,20. Enfin, les grains les plus fins, donnent la couleur encore plus claire jaune citron. Or, les brumes martiennes les plus légères, sous-produits de décantation de voiles jaunes après plusieurs semaines, observables seulement en incidence rasante au bord du limbe, sont un peu plus brillantes que le sol martien et nettement *jaune clair*.

Seuls les matériaux aussi absorbants que le carbone, les métaux ou la limonite, produisent encore un effet coloré sur des grains aussi fins que quelques microns.

Voici encore quelques propriétés photométriques des voiles jaunes en lumière bleue. La figure 32 montre en haut deux images obtenues en jaune et en bleu à l'Observatoire Lowell le 25 août 1956 ; l'atmosphère de Mars était dépourvue de voiles jaunes et le cliché bleu (domaine de 4000 à 4500 Å) laisse deviner confusément les taches du sol, avec en outre, au bord levant à droite, de faibles « nuages bleus » formés de petites particules transparentes. Les deux clichés du dessous obtenus le 2 septembre 1956 montrent le voile jaune opaque apparu sur Claritas ; en bleu, tout le disque est déjà altéré par une fine nappe voilant les détails du sol et la calotte polaire. Les paires d'images du bas furent obtenues au Mt Wilson le 11 septembre quelques jours après la disparition apparente du grand voile jaune engendré le 20 août sur Argyre ; toute la surface visible du disque était encore légèrement altérée par les vestiges éparpillés de très fines poussières en suspension dans l'air, l'image bleue était alors uniformément brillante, privée de détails et l'éclat moyen semblait supérieur à la moyenne.

#### XXVI. PROPRIÉTÉS POLARIMÉTRIQUES DES VOILES JAUNES.

La polarisation de la lumière des voiles jaunes se compose avec celle du sol, selon les mêmes lois que dans le cas des nuées blanches, et l'expression ma-

thématique est celle donnée au chapitre XIII. Toutefois, le facteur de diffusion directe  $B_0$  des voiles jaunes vaut seulement 0,19 ; la diffusion multiple  $B_m$  vaut 0,04 et joue beaucoup moins de rôle, le facteur  $B_m$  est presque négligeable.

Par contre, la décantation des poussières intervient : la polarisation  $P_n$  dépend de la dimension des grains et, par suite, de l'ancienneté des voiles jaunes et par conséquent aussi de leur opacité.

Sur la figure 33, j'ai reporté en fonction de l'angle de phase  $V$  les mesures de proportion de lumières polarisées  $P$  relevées sur les voiles jaunes assez

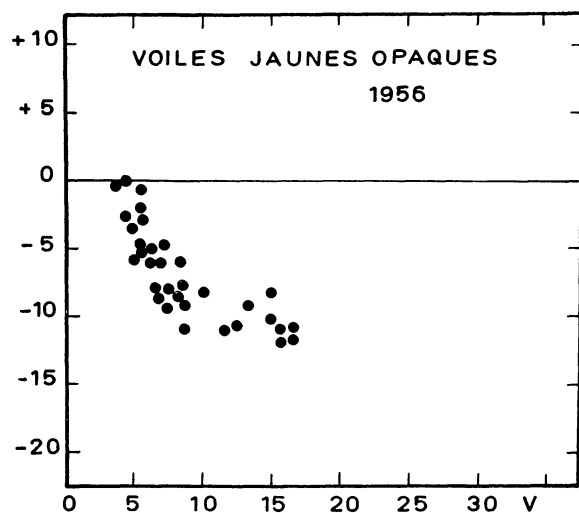


FIG. 33. — Mesures de polarisation sur les voiles jaunes opaques de l'atmosphère de mars en 1956.

opaques pour masquer complètement le sol. La dispersion des mesures traduit l'hétérogénéité des diamètres moyens des poussières. La courbe de polarisation de ces voiles jaunes débute par une *branche forte dans le sens négatif*, c'est-à-dire avec la vibration avantagée contenue dans le plan de vision. Pour les angles de vision supérieurs à  $18^\circ$ , nous n'avons plus pu observer de nuées opaques, mais seulement de faibles voiles transparents ; ils affaiblissaient la polarisation positive du sol comme le montre la branche GH de la figure 37. Ils donnaient une polarisation négative de plus en plus forte vers les bords du disque alors que les brumes étaient traversées obliquement sous une épaisseur plus grande. La branche de courbe de la figure 33 se prolonge donc dans le sens négatif jusque pour des angles de vision supérieurs à  $40^\circ$ .

Pour expliquer cette courbe, j'ai d'abord calculé, à l'aide des tables de SINCLAIR [25], la polarisation donnée par des sphérules transparentes dont le diamètre  $2.a$  vaut quelques longueurs d'ondes. La figure 34 donne les courbes de polarisation pour des

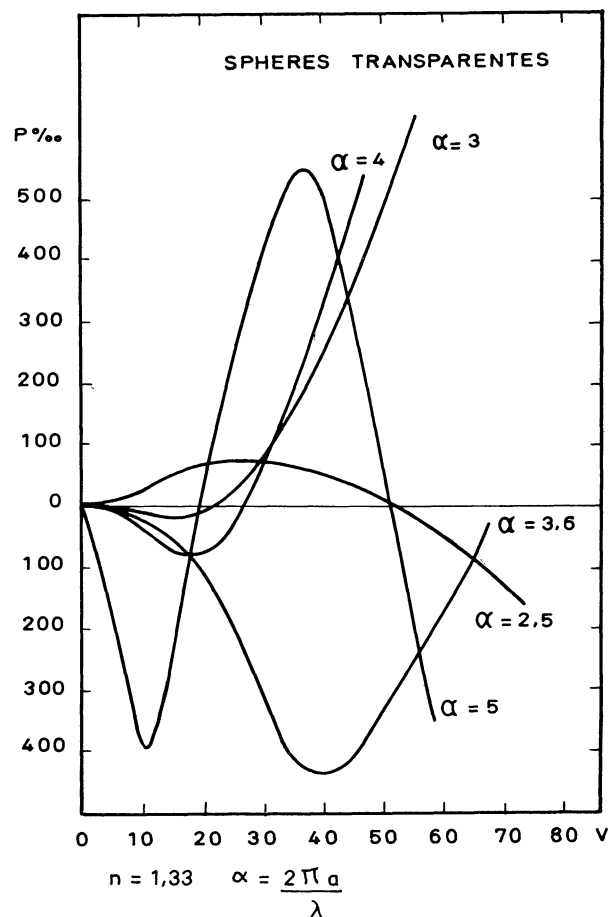


FIG. 34. — Courbes de polarisation calculées pour des sphères transparentes d'indices 1,33 et différentes valeurs du rayon  $a$ , défini par le coefficient  $\alpha = \frac{2\pi a}{\lambda}$ , Calcul pour une sphère isolée.

valeurs de  $\alpha = 2\pi a/\lambda$  comprises entre 2,5 et 5,0. La polarisation est trop forte et trop variable selon la longueur d'onde et les dimensions des grains. *Les sphères transparentes ne peuvent convenir.*

La poussière naturelle, déposée au fond d'un bocal cylindrique en verre et soulevée à l'aide d'un piston perforé enfoncé dans le récipient, donnent une bouffée grise. Les plus grosses poussières retombent en quelques secondes ; les plus fines persistent quelques dizaines de secondes ; leurs diamètres sont compris entre 5 et 20 microns ; leurs formes microscopiques sont complexes et les plus petits grains sont presque transparents. Le piston nettoie chaque fois les parois du bocal. Le récipient est placé sur l'axe d'un goniomètre qui porte la source et le polarimètre. La courbe de polarisation est reproduite figure 35. La vibration avantagée est toujours perpendiculaire au plan contenant la source et le polarimètre, c'est-à-dire de signe positif ; elle est inverse de celle donnée par

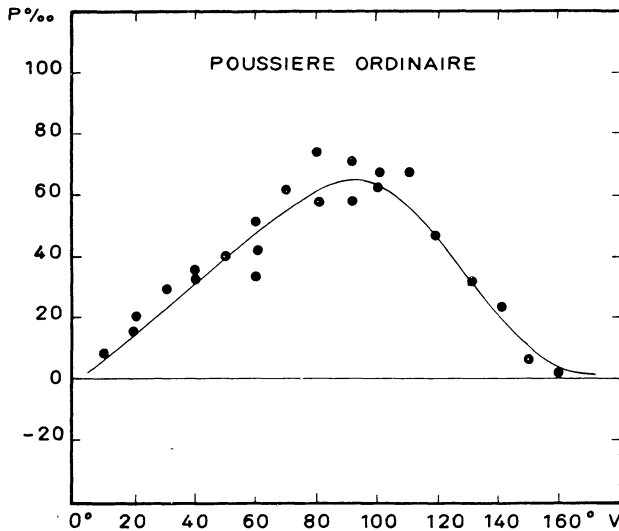


Fig. 35. — Mesures polarimétriques au laboratoire sur un brouillard de fines poussières naturelles de roches.

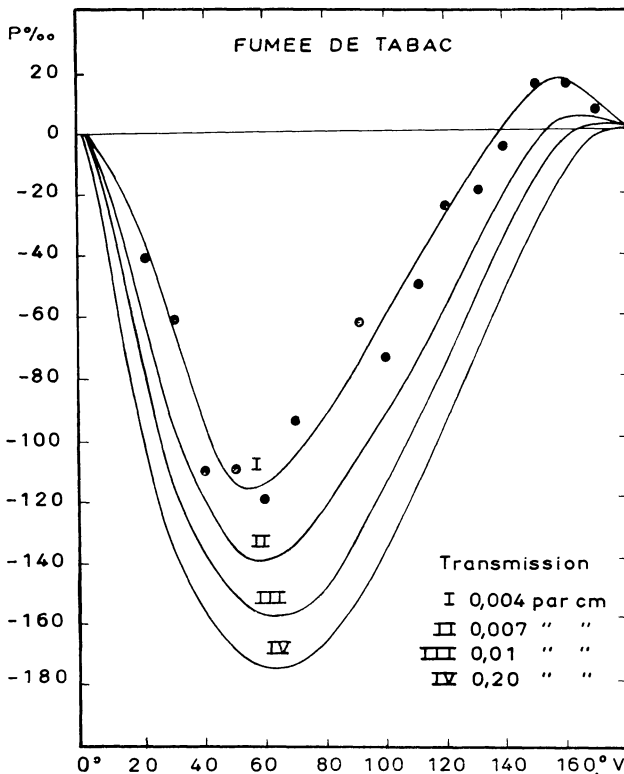


Fig. 36. — Mesures polarimétriques sur un bocal rempli de fumée de tabac. Courbes de polarisation pour différentes valeurs de la transmission.

les brumes jaunes observées sur Mars. Les grains sont encore beaucoup trop transparents.

J'ai mesuré le brouillard de très fines particules opaques donné par de la fumée du tabac. Le flacon est fermé par un bouchon muni d'une double tubulure. La fumée d'une cigarette est soufflée par l'une

des ouvertures. Le brouillard remplit le bocal, s'éclaircit ensuite lentement et se résorbe en plusieurs minutes. La transmission à travers le bocal de 6 cm de diamètre est mesurée photoélectriquement. Les déterminations polarimétriques sous différents angles de vision sont alternées avec les mesures de transmission. Les courbes de polarisation données figure 36 correspondent à quatre valeurs différentes de la transmission comprise entre l'opacité presque totale et la brume transparente. La vibration avantagée est contenue dans le plan de vision, comme dans le cas des voiles martiens. Le brouillard de carbone polarisé de la même façon que les brumes de Mars, mais un peu plus fortement. La bouffée opaque donne  $P = -30$  millièmes pour  $V = 20^\circ$ , tandis que le voile martien laisse prévoir  $P = -15$  millièmes. Cependant la diffusion multiple doit diminuer plus la polarisation sur Mars que dans le bocal. La polarisation de la fumée de carbone n'est donc pas très différente de celle des voiles jaunes de Mars ; elle correspond à des *particules sombres et opaques mesurant quelques microns de diamètre*.

#### XXVII. CIRCULATION ATMOSPHÉRIQUE DÉDUITE DE L'ÉTUDE DES VOILES JAUNES.

L'étude de l'évolution des voiles jaunes donne les déplacements des masses d'air ; celles-ci caractérisent un type d'écoulement atmosphérique particulier. La circulation est essentiellement influencée par les taches topographiques de la surface du sol. Elle ne possède pas du tout les caractères du régime cyclonique de notre atmosphère terrestre, composée des chaînes de dépressions circumpolaires, dont C. G. ROSSBY a donné la description [32]. La circulation atmosphérique martienne, pendant l'été, n'est pas gouvernée par la turbulence propre de l'atmosphère comme dans le cas de la Terre. *La circulation de l'été est du type laminaire régulier et permanent, influencée seulement par les faibles forces perturbatrices constantes engendrées par les taches claires et sombres de la surface du sol.*

Cet intéressant résultat est à rapprocher des théories de la circulation des atmosphères planétaires, en particulier, celle développée récemment par Y. MINTZ [33]. Une certaine quantité de chaleur doit être transportée constamment de l'équateur vers les pôles. Le mode de transport dépend du gradient de variation de la température  $T$  avec la latitude  $\varphi$ , lequel dépend du rayon de la planète, de la gravité, de la vitesse de rotation et de  $\sin \varphi$ . Si  $\Delta T/\Delta \varphi$  est assez élevé, le régime d'écoulement



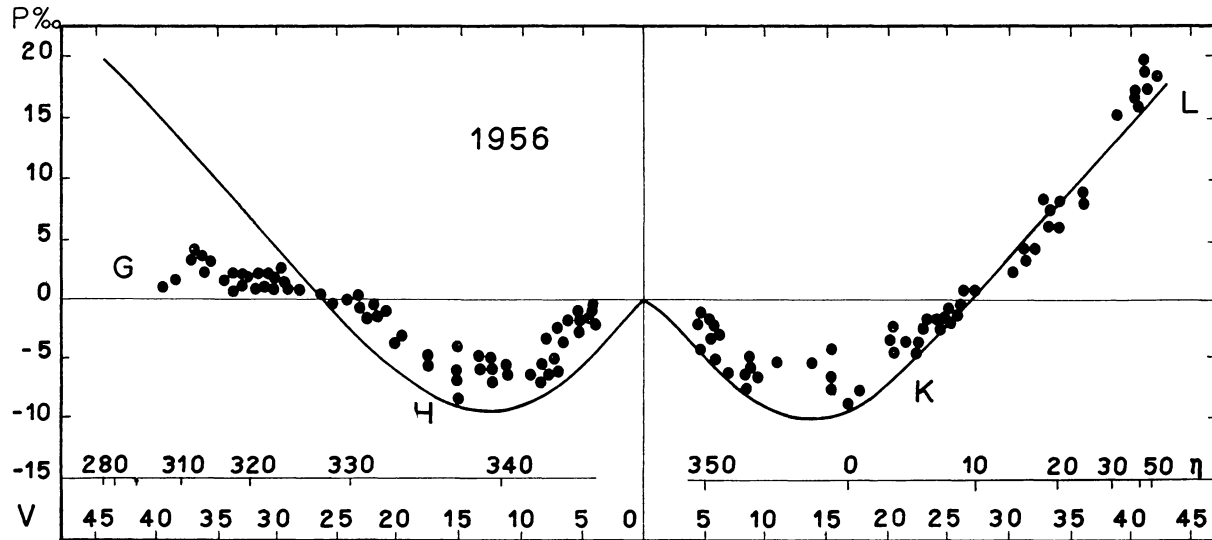


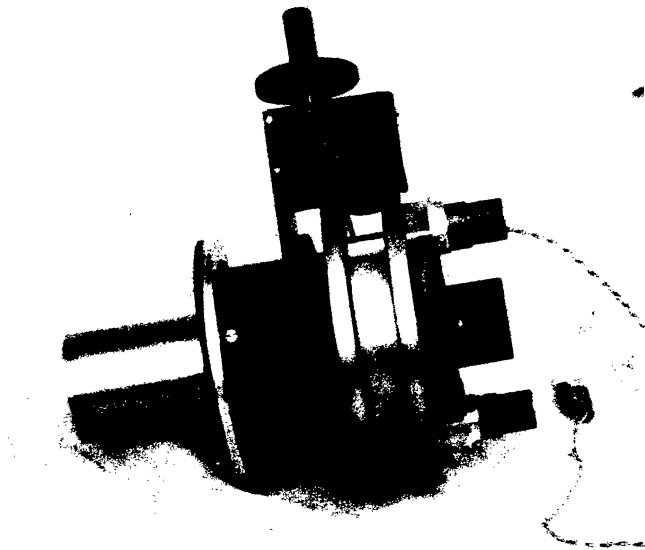
Fig. 37. — Mesures polarimétriques recueillies sur la planète Mars, régions claires au centre du disque, en 1956 et courbes moyennes du sol à travers l'atmosphère martienne pure. Les écarts caractérisent de légers voiles atmosphériques et plus particulièrement des poussières volantes.

nécessaire pour transporter la quantité de chaleur requise est du type turbulent, avec chaînes de dépressions circumpolaires, comme dans le cas de la Terre. Si  $\Delta T/\Delta\varphi$  reste inférieur à une certaine valeur limite, l'écoulement est laminaire et régulier ; cet écoulement est alors seulement influencé par les sollicitations faibles mais permanentes apportées en particulier par les circonstances topo-

graphiques. Selon Y. MINTZ le calcul difficile d'ordre de grandeur de la valeur critique de  $\Delta T/\Delta\varphi$  pour le cas de Mars donne un résultat intermédiaire, plutôt favorable au régime turbulent en hiver, et au régime laminaire en été. Les résultats d'observations précédents indiquent que le régime est nettement du type laminaire pendant le printemps et l'été martien.

#### RÉFÉRENCES

- [1] LYOT B., janvier 1953, *l'Astronomie*, 1.
- [2] DOLLFUS A., mars 1953, *l'Astronomie*, 85.
- [3] CAMICHEL H., Thèse Bulletins Astronomiques Gauthier-Villars et Cie, Paris 1954, 18, 81 et 191.
- [4] DOLLFUS A., 1952, *C. R.*, 235, 1477.
- [5] DOLLFUS A., 1962, *C. R.*, 255, 2229.
- [6] DOLLFUS A., 1951, *C. R.*, 232, 1066.
- [7] BROUWER D. et CLEMENCE G. M., 1962, *The Solar System*, 3 G. P. Kuiper Editeur, University of Chicago Press.
- [8] WRIGHT F. E. *Lich. Os. Bulletin* 1925, n° 366 et 1927, 13, n° 389.
- [9] DE MOTTONI G., Cf. A. DOLLFUS, *The Solar System*, 3, G. P. Kuiper Editeur, University of Chicago Press, 1962, chap. 15.
- [10] DOLLFUS A., 1956, *C. R.*, 243, 1833.
- [11] FOCAS J. H. *Ann. d'Astr.* 1961, 26, 309.
- [12] DOLLFUS A., Thèse, Paris, 1955, Suppléments d'Astrophysique, Traduction Anglaise NASA, Report Ann.
- [13] DOLLFUS A., *La Météorologie*, Paris 1956, 42, 81.
- [14] DOLLFUS A., *The Solar System*, 3, G. P. Kuiper Editeur, University of Chicago Press, 1962, chap. 9.
- [15] FOURNIER G., Observations des surfaces planétaires, I à X Gauthier et Villars et Cie, Paris 1908 à 1946.
- [16] ANTONIADI E. M., *La Planète Mars*, Paris Hermann 1930.
- [17] DE MOTTONI G., 1965, *Pub. Obs. Astr. Milano-Merate*, Nuova Seria n° 14.
- [18] KUIPER G. P., 1957, *Ap. J.*, 2, 307.
- [19] MIYAMOTO S., 1957, *Cont. Kwasan Obs.*, n° 71.
- [20] EBISAWA S., MIYAMOTO S., avril 1958, *l'Astronomie*, 159.
- [21] BARABASHEV B., 1956, *Astron. Circ. U. R. S. S.*, n° 172.
- [22] BRONSTEIN W., 1957, *Astron. Circ. U. R. S. S.*, n° 77.
- [23] HEINTZ W. D., *The Observatory*, 78, n° 906, 203.
- [24] Cf. *l'Astronomie*, janvier 1959-mars 1959 ; 1942, *Jl. B. A. A.*, 68, n° 4 ; ALPO Reports "The Strolling Astronomer".



**Fig. 2 :** Le micromètre biréfringent à grand dédoublement A. Dollfus (modèle R. Danger).

DOLLFUS



Fig. 4 : Planisphère moyen de la planète Mars en 1954 dessinée par G. de Mottoni d'après les clichés du Centre de Données Photographiques sur les Planètes de l'Observatoire de Meudon. Longitude héliocentrique moyenne : 275°.



Fig. 5 : Idem pour 1956, première partie, avant le développement des voiles jaunes. Longitude héliocentrique moyenne = 320°.



Fig. 6 : Idem pour 1956, deuxième partie, après le développement des voiles jaunes. Longitude héliocentrique moyenne = 10°.

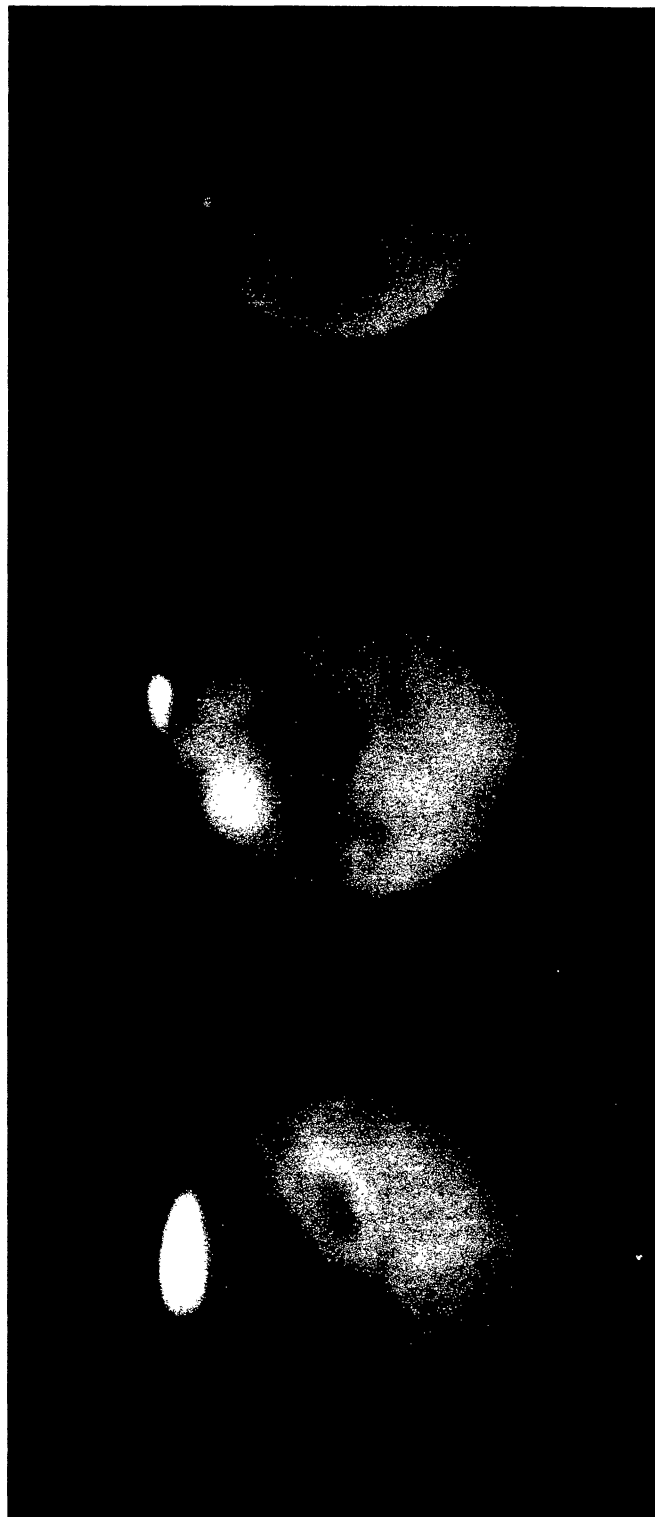


Fig. 7 : Idem pour 1958. Longitude héliocentrique moyenne : 50°.



**Fig. 10** : Dessin de la planète Mars par A. Dollfus. Lunette de 60 cm du Pic du Midi, le 18 septembre 1956. Longitude du méridien central  $\omega = 195^\circ$ . Latitude du centre du disque  $\varphi = -20^\circ, 0$ . Diamètre apparent du disque  $d = 24'', 1$ . Longitude héliocentrique  $\eta = 353^\circ$ .

**Fig. 11** : Variations rapides dans la région Solis Lacus en 1956 (printemps martien austral). A gauche : 27 juillet 1956 à 4 h 34 m  $\eta = 319^\circ$ . Au centre : 28 septembre 1956 à 21 h 13 m  $\eta = 359^\circ$ . A droite : 6 novembre 1956 à 20 h 38 m  $\eta = 73^\circ$ . Observatoire du Pic du Midi, lunette de 60 cm-H. Camichel, J. Focas, A. Dollfus.





**Fig. 12** : Variations rapides dans la région Solis Lacus en 1956. Dessins par A. Dollfus. Lunette de 60 cm du Pic du Midi. A gauche : 29 août 1956 et jours suivants  $\omega = 71^\circ$ ,  $\varphi = -19^\circ,14$ ,  $d = 24'',36$ ,  $\eta = 340^\circ$ . A droite : 30 septembre 1956  $\omega = 70^\circ$ ,  $\varphi = -20^\circ,2$ ,  $d = 22'',5$ ,  $\eta = 01^\circ$ .



**Fig. 13** : Aspect de la région Solis Lacus en 1958. Dessin par J. Focas, lunette de 60 cm du Pic du Midi, le 11 novembre 1958 et jours suivants.

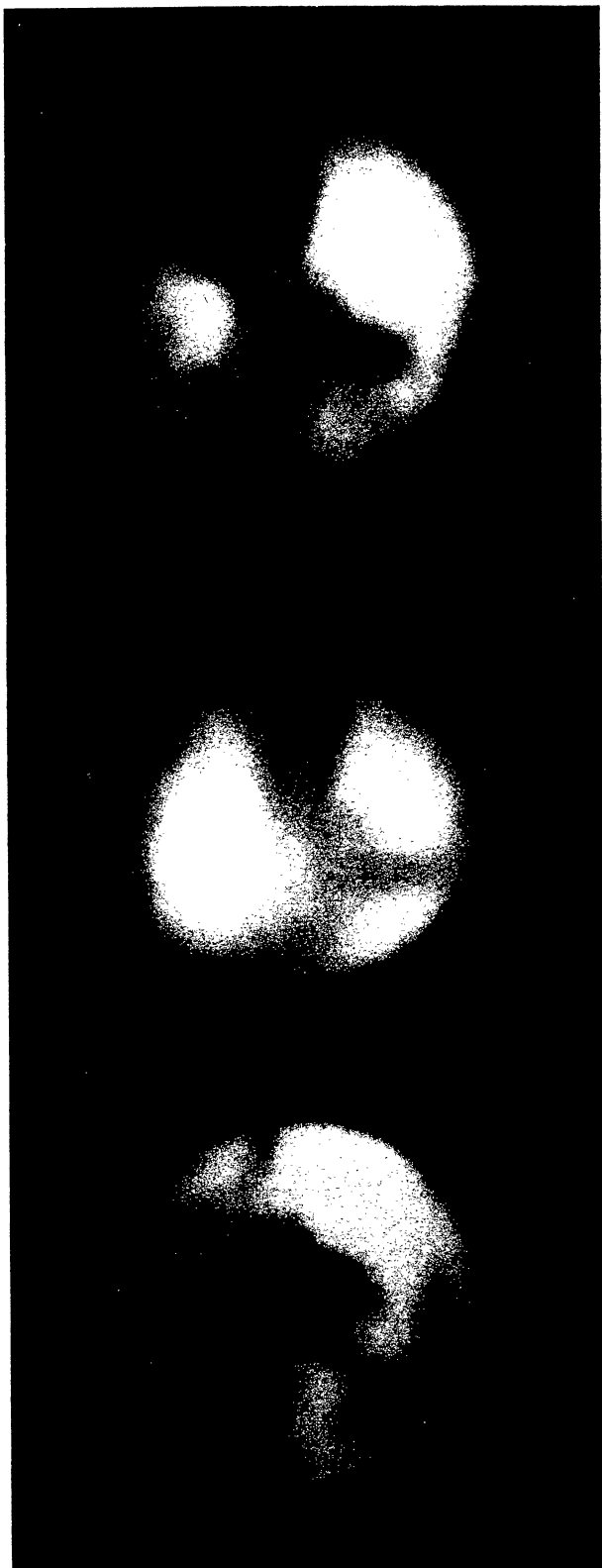
DOLLFUS



**Fig. 14 :** Variation saisonnière de *Depressio Hellespontica*, *Hellespontus* et *Pandorae Fretum* en 1956, d'après les 3 clichés du Pic du Midi (H. Camichel, J. Focas, A. Dollfus).

A gauche : 31 juillet 1956 (milieu du printemps austral)  $\omega = 355^\circ$ ,  $\eta = 329^\circ$ . Au centre : 8 octobre 1956 (début de l'été austral)  $\omega = 347^\circ$ ,  $\eta = 6^\circ$ . A droite : 17 novembre 1956 (milieu de l'été austral)  $\omega = 263^\circ$ ,  $\eta = 30^\circ$ .

DOLLFUS



**Fig. 15 :** Aspects successifs de Helix en 1954, 1956 et 1958, d'après 3 clichés du Pic du Midi. A gauche : 16 juin 1954, 1 h 20 m T.U.  $\omega = 279^\circ$ ,  $\varphi = -0^\circ,6$ ,  $\eta = 268^\circ$ . Au centre : 12 octobre 1956, 20 h 34 m  $\omega = 320^\circ$ ,  $\varphi = -21^\circ,2$ ,  $\eta = 8^\circ$ . A droite : 5 décembre 1956, 20 h 35 m  $\omega = 171^\circ$ ,  $\eta = -24^\circ,9$ ,  $\varphi = 40^\circ,5$ .

DOLLFUS

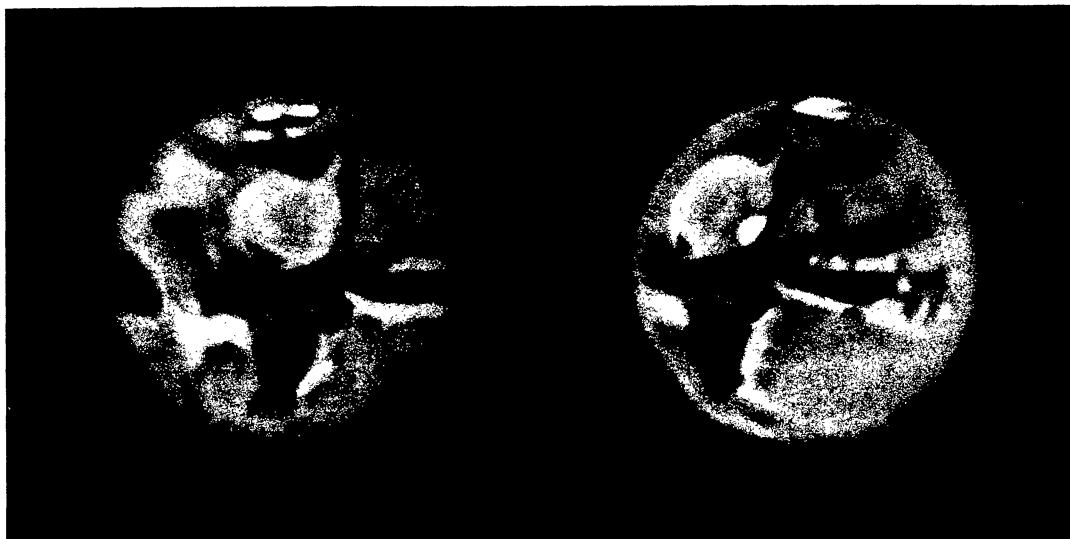




**Fig. 16** : Aspects successifs de Hellas pendant le printemps martien de 1956. D'après les documents du Centre de Données Photographiques sur les Planètes de Meudon.

19 août 1956 à 9 h 39 m : Bloemfontain (E.-C. Slipher);  $\omega = 282^\circ$ ,  $\eta = 30^\circ,3$ ;  
 5 septembre 1956 à 20 h 44 m : Johannesburg (W. Finsen);  $\omega = 294^\circ$ ,  $\eta = 348^\circ,0$ ;  
 13 octobre 1956 à 21 h 31 m : Pic du Midi (H. Camichel);  $\omega = 325^\circ$ ,  $\eta = 8^\circ,8$ ;  
 17 novembre 1956 à 18 h 45 m : Pic du Midi (H. Camichel);  $\omega = 317^\circ,0$   $\eta = 29^\circ,9$ .

DOLLFUS

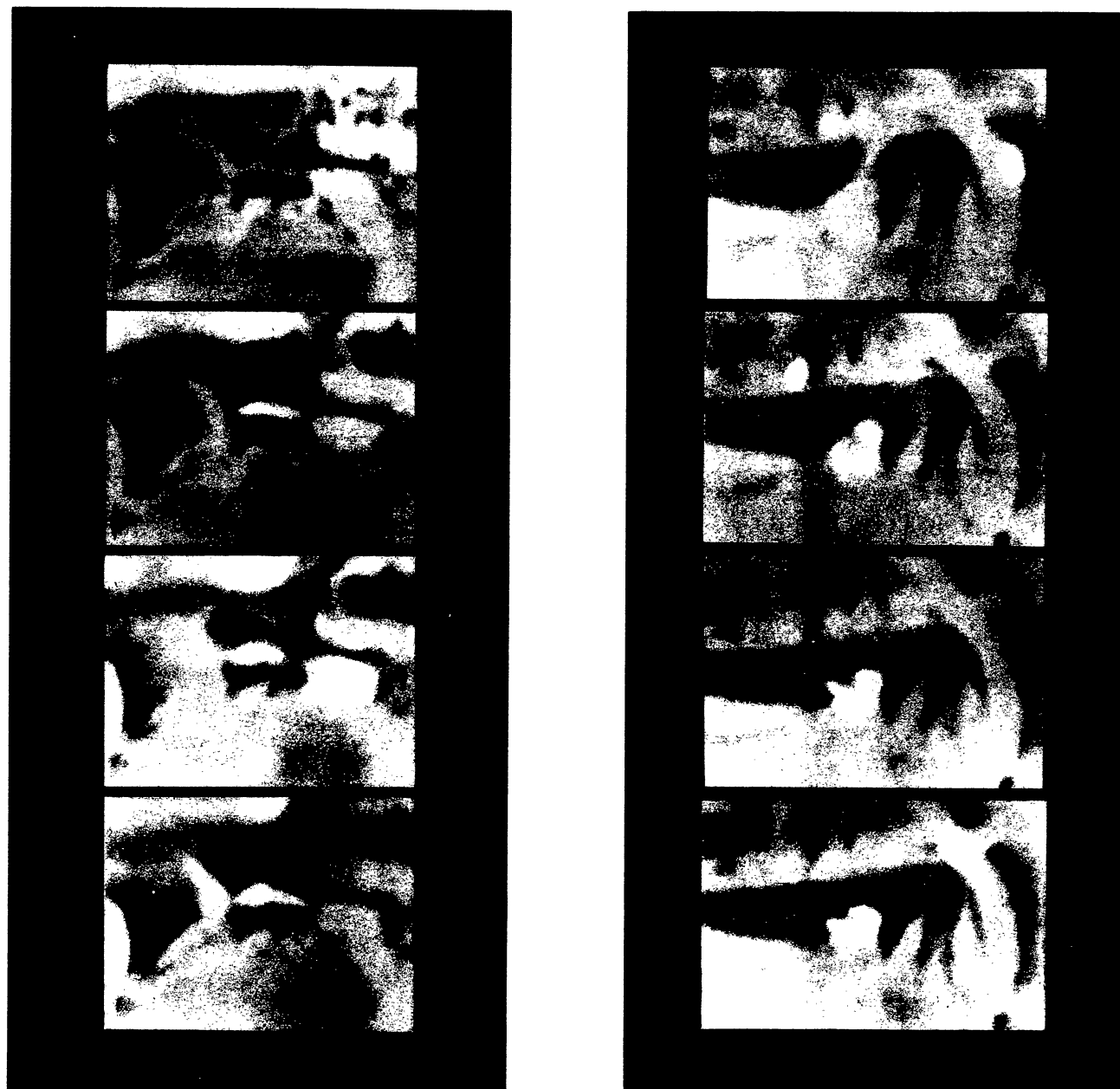


**Fig. 17** : Dessin de la planète Mars par A. Dollfus. Lunette de 60 cm du Pic du Midi.  
 A gauche : 14 septembre 1956  $\omega = 290^\circ$ ,  $\varphi = -19^\circ,4$ ,  $d = 24'',5$ ,  $\eta = 350^\circ,7$ .  
 A droite : 13 septembre 1956  $\omega = 320^\circ$ ,  $\varphi = -19^\circ,4$ ,  $d = 24'',6$ ,  $\eta = 350^\circ,0$ .



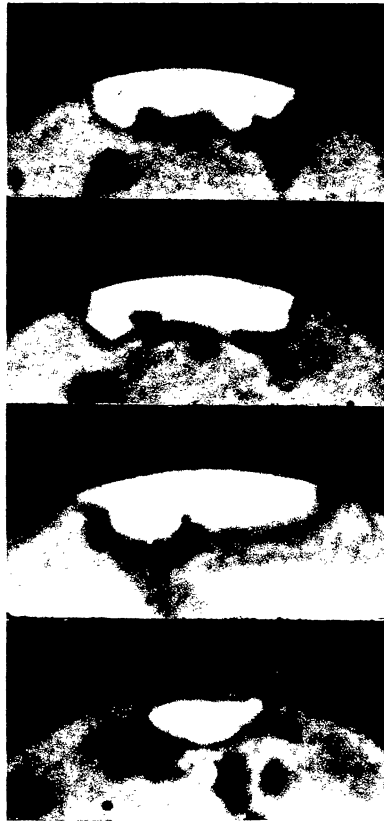
**Fig. 18** : Aspect de la région Hellas en plusieurs couleurs le 17 septembre 1956 à 5 h 33 m. Clichés composites effectués à Harvard College Observatory (G. de Vaucouleur et A. Young) à travers 3 filtres colorés, d'après les photos en couleur effectuées au Mt. Wilson par R. Leighton. A gauche : filtre rouge. Au centre : filtre vert. A droite : filtre bleu-vert.  $\omega = 326^\circ$ ,  $\varphi = -19^\circ,5$ ,  $d = 24'',3$ ,  $V = 6^\circ,8$ ,  $\tau = 352^\circ$ .

DOLLFUS



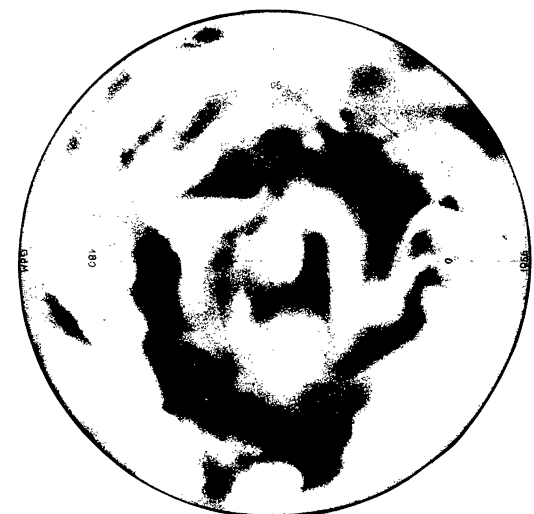
**Fig. 20** : Exemple de petites formations nuageuses persistantes localisées sur des régions topographiques définies. (De haut en bas) : 2 septembre 1956 : pas de nuages. 30 septembre 1956 : nuage sur Aurorae Sinus, voiles sur Pyrrhae Regio et Ophir. 4 octobre 1956 : nuage sur Aurorae Sinus, voile sur Pyrrhae Regio, nuage sur Ophir. 8 octobre 1956 : nuages sur Aurorae Sinus et Pyrrhae Regio. Dessins par A. Dollfus, lunette de 60 cm du Pic du Midi. **Fig. 21** : Autre exemple de petites formations nuageuses localisées, sur la région Edom : (de haut en bas) 7 septembre 1956, 8 octobre 1956, 12 octobre 1956, 13 octobre 1956. Dessins par A. Dollfus, lunette de 60 cm du Pic du Midi.

DOLLFUS



**Fig. 24 :** Aspects de la calotte polaire australe en 1956. Dessins de A. Dollfus. Lunette de 60 cm du Pic du Midi. 15 août 1956, 1 h 40 m à 1 h 51 m,  $\omega = 202^\circ$ ,  $\eta = 331^\circ,1$ ; 16 août 1956, 2 h 05 m à 2 h 25 m,  $\omega = 200^\circ$ ,  $\eta = 331^\circ,6$ ; 29 août 1956, 0 h 45 m à 1 h 05 m,  $\omega = 65^\circ$ ,  $\eta = 340^\circ$ ; 30 septembre 1956, 23 h 55 m à 24 h 10m,  $\omega = 120^\circ$ ,  $\eta = 0^\circ,8$ .

DOLLFUS



5-18-VIII-1956



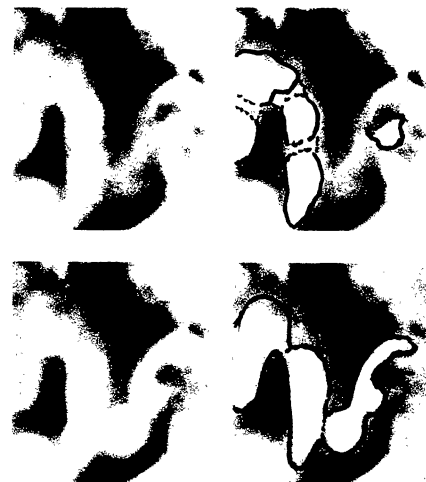
19-29-VIII-1956



26-VIII-1-IX-1956

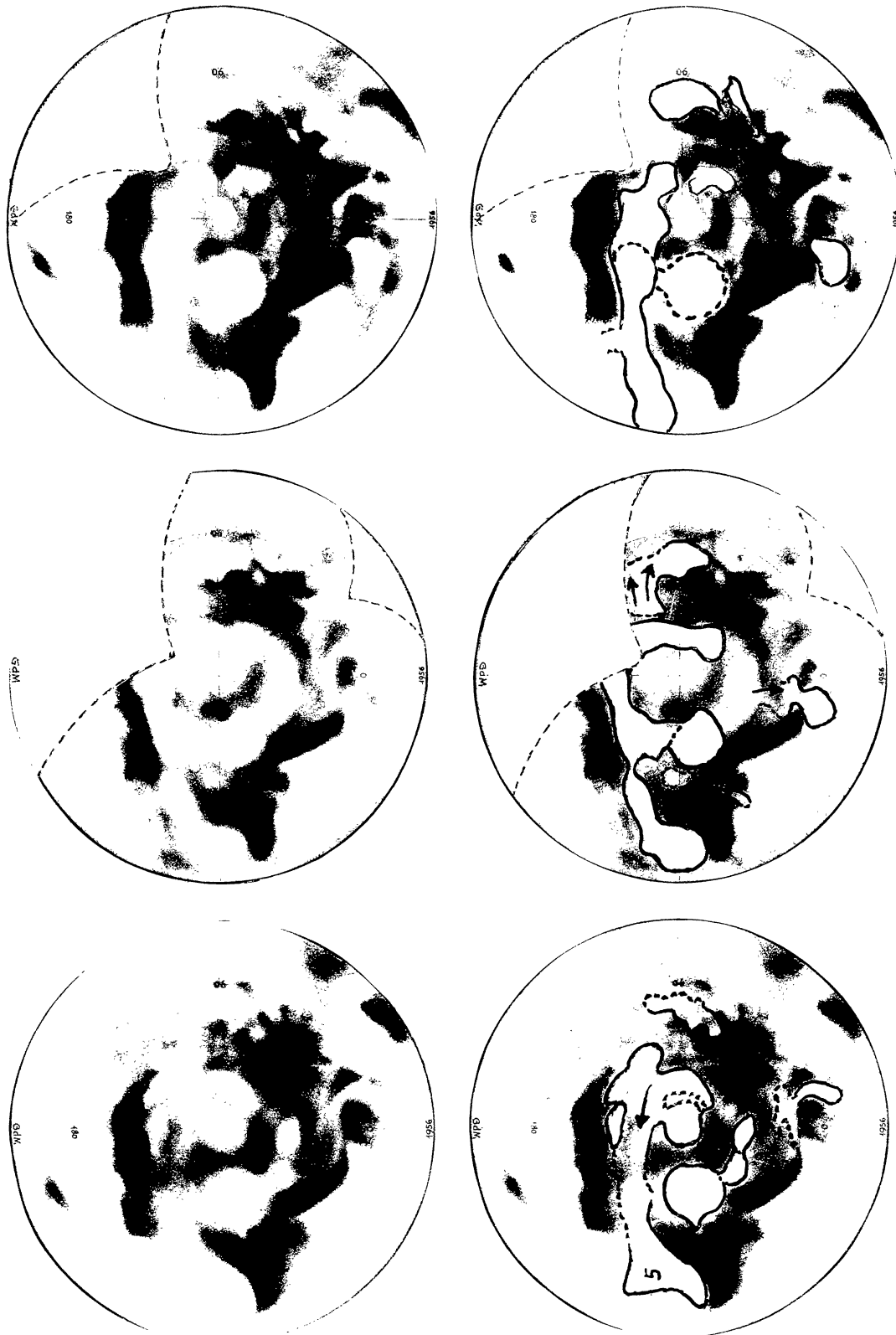


30-VIII-1956



29-VIII-1956

**Fig. 28 :** Évolution des voiles jaunes dans l'atmosphère de Mars 1956. Cartes en coordonnées polaires dessinées par G. de Mottoni d'après l'ensemble des clichés du Centre de Données Photographiques sur les Planètes de Meudon. En haut : carte originale montrant les taches du sol et les voiles nuageux. En bas : les mêmes cartes, précisant les contours et les déplacements des voiles. En cartouche à gauche, évolution particulière des voiles sur Noachis et Deucalionis Regio.



9-15-IX-1956

7-12-IX-1956

2-8-IX-1956

Fig. 29 : Suite de la figure 28.

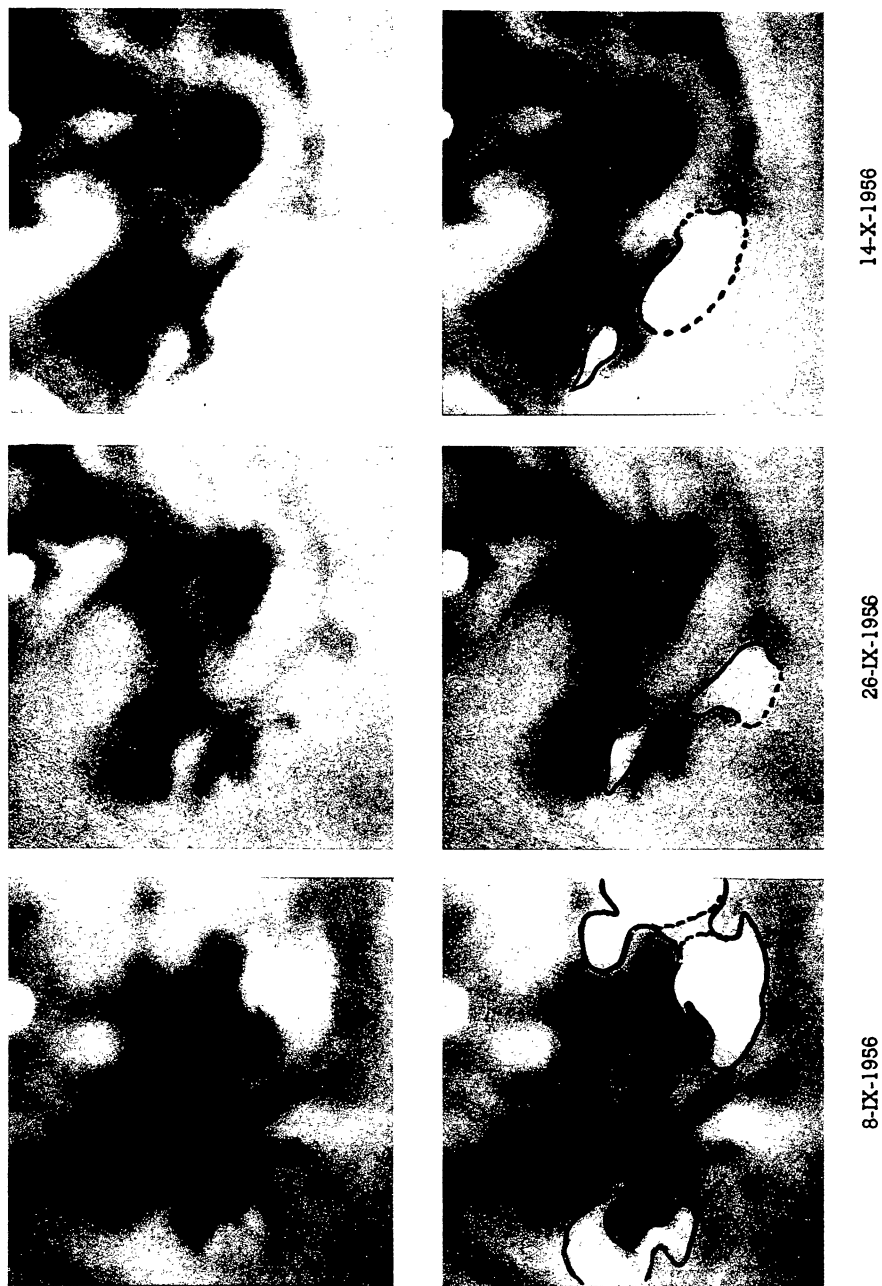
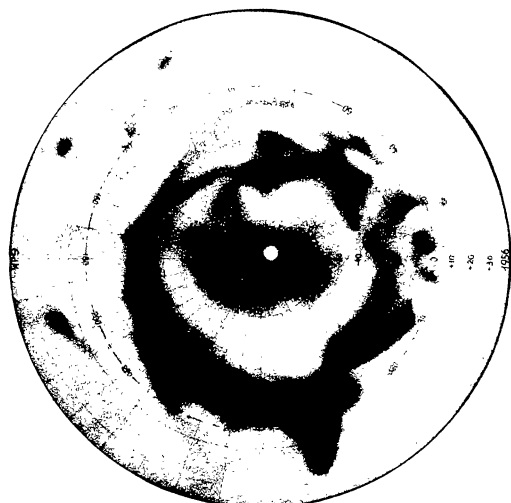


Fig. 31 : Complément des figures 28-29 et 30. Évolution particulière des nuages sur Solis Lacus, Ophir et Pyrrhae Regio.

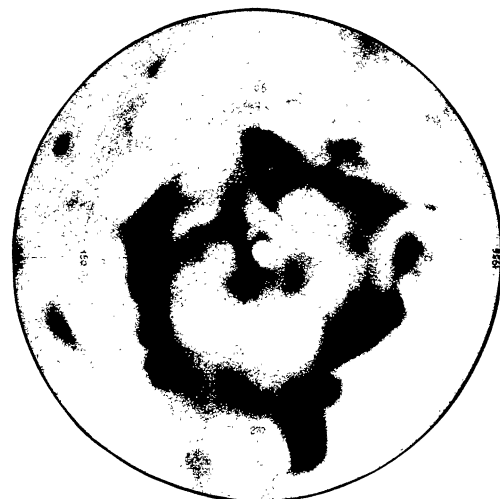


15-30-X-1956

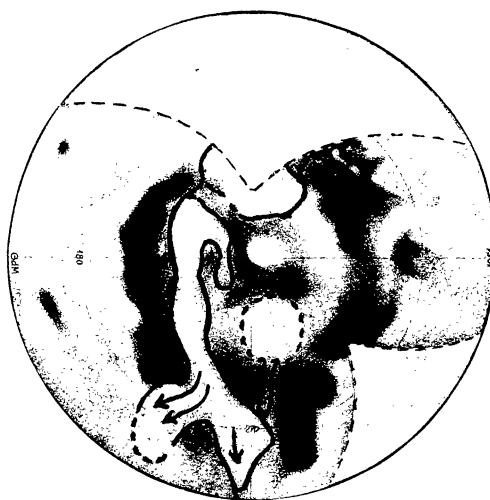
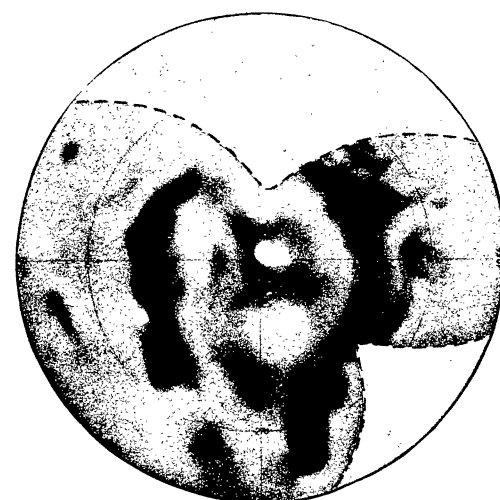


12-IX-1956

8-IX-1956



16-26-IX-1956



13-17-IX-1956

Fig. 30 : Suite des figures 28 et 29. Jusqu'après la disparition de la plupart des voiles. En cartouche à droite, évolution particulière des voiles sur Hellas et Lybia.





DOLLFUS

- [25] VAN DE HULST, Light Scattering By Small Particles, John Wiley and Son, New-York, 1957.
- [26] DOLLFUS A., 1957, *C. R.*, **244**, 162.
- [27] DOLLFUS A., 1957, *C. R.*, **244**, 1458.
- [28] DOLLFUS A., 1956, *C. R.*, **243**, 2023.
- [29] DOLLFUS A., *Handbuch der Physik*, LIV 180, Springer-Verlag 1962.
- [30] KUIPER G. P., 1965, *Communication Lunar and Planetary Laboratory*, n° 31.
- [31] DOLLFUS A., 1951, *C. R.*, **233**, 467.
- [32] ROSSBY C. G., The Atmospheres of the Earth and Planets, G. P. Kuiper Editeur, University Chicago Press 1950.
- [33] MINTZ Y., 1961, The Atmosphere of Mars and Venus, *U. S. Nat. Acad. Sci.* Pub. n° 944,
- [34] KENNARD, Kinetic theory of gases, McGraw Hill Book Co 1938.
- [35] RYAN J. A., 1964, *Res.*, 69, 3759.

FIG. 32. — Aspects comparatifs de la planète Mars en lumière jaune (à gauche) et bleue (à droite) lors de l'apparition des voiles jaunes en 1956.

*En haut :*

25 août 1956 avant l'apparition des voiles jaunes. — Observatoire Lowell (Giglas).

A gauche : en jaune 8 h 29 m.  $\omega = 211^\circ$ .  $\eta = 337,5^\circ$ .

A droite : en bleu 8 h 08 m.  $\omega = 206^\circ$ .  $\eta = 337,5^\circ$ .

*Au centre :*

2 septembre 1956, lors de l'apparition des premiers voiles jaunes. — Observatoire Lowell (A. G. WILSON).

A gauche : en jaune 8 h 33 m.  $\omega = 141^\circ$ .  $\eta = 342,3^\circ$ .

A droite : en bleu 8 h 00 m.  $\omega = 133^\circ$ .  $\eta = 343,3^\circ$ .

*En bas :*

11 septembre 1956, lors du développement maximum des voiles jaunes. Observatoire Mt Wilson (R. RICHARDSON).

A gauche : en jaune, 8 h 05 m.  $\omega = 117^\circ$ .  $\eta = 343,8^\circ$ .

A droite, en bleu, 6 h 28 m.  $\omega = 94^\circ$ .  $\eta = 343,8^\circ$ .