

ÉTUDE PHOTOMÉTRIQUE ET POLARIMÉTRIQUE DES PHÉNOMÈNES SAISONNIERS DE LA PLANÈTE MARS

par Jean H. FOCAS
(Observatoire National d'Athènes)

RÉSUMÉ. — *Les phénomènes saisonniers des calottes polaires et des régions sombres de Mars sont étudiés par voie polarimétrique (2.500 déterminations) et photométrique (663 clichés ; 7.200 déterminations). Les époques de la formation et de la régression ainsi que la durée de vie des nuages et des dépôts polaires, comme aussi la variation de leur éclat et le facteur de diffusion sont établis.*

Le cycle saisonnier des phénomènes des régions sombres s'établit sous forme de deux vagues d'assombrissement issues alternativement des deux pôles. L'époque du début ainsi que l'amplitude, la durée totale et l'époque du maximum de l'assombrissement en fonction de la latitude aréographique des régions sombres sont étudiées en fonction de l'évolution des calottes polaires.

La structure fine des régions sombres est étudiée en fonction de leur assombrissement saisonnier.

SUMMARY. — *The seasonal phenomena of the polar caps and the dark areas of Mars are studied polarimetrically (2.500 determinations) and photometrically (663 negatives ; 7.200 determinations). The epochs of the formation and regression as well as the life time of the polar clouds and snow caps as well as the variation of their brightness and diffusion factor are established.*

The seasonal cycle of the phenomena of the dark areas is established under the form of two darkening waves alternatively issued from the two poles. The epoch of the beginning as well as the amplitude, the total duration and the epoch of the maximum of darkening are studied as a function of the evolution of the polar caps.

The fine structure of the dark areas is studied as a function of the cycle of their seasonal darkening.

Фотометрическое и поляриметрическое исследование сезонных явлений на планете Марс.

Резюме. — *Сезонные явления полярных шапок и темных областей на Марсе были изучены путем поляриметрии (2500 определений) и фотометрии (663 клише - 7200 определений). Установлены эпохи образования и регрессии, продолжительности жизни облаков и полярных осадков, а также вариация их блеска и фактор диффузии.*

Сезонный цикл явлений темных областей устанавливается в форме двух волн потемнения, исходящих попеременно из двух полюсов. Эпоха начала, также как и амплитуда, полная продолжительность и эпоха максимума потемнения, изучаются в функции эволюции полярных шапок.

Тонкая структура темных областей изучается в функции цикла их сезонного потемнения.

INTRODUCTION

Les régions sombres de Mars étudiées soit par la polarisation de la lumière qu'elles nous renvoient, soit par leurs propriétés photométriques, se révèlent être constituées de matières très absorbantes d'une structure granuleuse [5] ; elles présentent des variations saisonnières d'intensité et de structure apparemment liées au régime d'humidité de la planète.

Les variations d'intensité et de coloration de ces régions ont fait l'objet de vastes études au cours du siècle dernier [22] ; certains observateurs ont établi des cotes d'intensité des régions à étudier, ou fixé le temps écoulé pour le changement de leur coloration [1, 14, 18, 25]. Les observations relatives se rapportèrent surtout aux oppositions périhéliques de la planète, lorsque Mars nous présentait

son hémisphère austral. Les mesures consistant en des estimations visuelles effectuées directement sur la planète, sont sujettes à des erreurs systématiques de nature atmosphérique et instrumentale, c'est-à-dire de l'effet d'étalement de la lumière en proportion de l'étendue des plages à mesurer ; à ces erreurs s'ajoute l'équation personnelle des observateurs qui est très forte dans le cas d'estimations visuelles de l'intensité de plages hétérochromes ; les informations ainsi recueillies malgré l'étude très poussée des erreurs systématiques, sont discordantes ; elles permettent néanmoins des conclusions générales sur la manière dont les variations saisonnières des régions sombres de Mars ont lieu en fonction de l'état des calottes polaires.

Les travaux existant de photométrie photogra-

phique de la surface de Mars se rapportent surtout à l'étude de l'albédo des régions claires et sombres, de leur facteur de diffusion spectrale et en général de leurs propriétés photométriques [24] ; les travaux de ce genre sont basés sur un nombre limité de clichés.

Il n'existe pas de travaux systématiques de photométrie photographique sur les phénomènes saisonniers présentés par les régions sombres de Mars.

Le présent travail est fondé sur 7 200 mesures photométriques que j'ai effectuées sur 663 clichés de Mars pris à l'Observatoire du Pic-du-Midi surtout par H. CAMICHEL ainsi que par A. DOLLFUS et moi-même, au cours des apparitions de la planète de la période 1943-1958 inclus. Ces clichés, pris dans une station de haute altitude — 2 900 mètres — dépourvue de la turbulence de la basse atmosphère, par des images souvent parfaites avec un pouvoir séparateur de $0'',2$ et des émulsions photographiques permettant à la fois une grande résolution et un contraste approprié, constituent un matériel de recherche photométrique très homogène. Le travail en laboratoire réalisé aux observatoires de Meudon, du Pic-du-Midi et d'Athènes, m'a permis de recueillir des données numériques précises concernant :

- a) La variation saisonnière de la brillance des calottes polaires de Mars en fonction de leur état physique étudié par la polarisation.
- b) La variation saisonnière de la brillance des régions sombres et l'amplitude de l'assombrissement en fonction de la latitude et de la longitude aréographiques.
- c) Le cycle de l'assombrissement en fonction de la structure fine des régions sombres.

Qu'il me soit permis de remercier ici :

M. A. DANJON, Directeur des Observatoires de Paris-Meudon, qui a bien voulu s'intéresser à ce

travail et mettre à ma disposition les facilités de l'Observatoire de Meudon au cours de mes trois longs séjours à cet Observatoire.

M. J. RÖSCH, Directeur de l'Observatoire du Pic-du-Midi, qui a bien voulu mettre à ma disposition l'équipement instrumental si efficace de cet observatoire et m'accorder des facilités de toute sorte au cours de mes trois longs séjours au Pic-du-Midi.

L'Union Astronomique Internationale (Commission 38) qui a bien voulu me procurer les moyens financiers pour effectuer trois séjours aux observatoires de Meudon et du Pic-du-Midi.

Le Dr. G. P. KUIPER, Directeur des Observatoires de Yerkes et Mac-Donald, pour son vif intérêt pour la réalisation de ce travail ainsi que l'Université de Chicago qui a bien voulu financer mon quatrième séjour aux Observatoires du Pic-du-Midi et de Meudon.

M. Henri CAMICHEL, Astronome à l'Observatoire du Pic-du-Midi qui a bien voulu mettre à ma disposition la plus grande partie des clichés pris par lui au Pic-du-Midi.

M. Audoin DOLLFUS, Astronome à l'Observatoire de Meudon qui a bien voulu me suggérer la présente recherche, a mis à ma disposition les clichés pris par lui-même à l'Observatoire du Pic-du-Midi ainsi que les ressources de son laboratoire à l'Observatoire de Meudon. Pour sa précieuse assistance de toute sorte au cours de la réalisation de ce travail je lui exprime ma profonde reconnaissance.

Le Prof. S. PLAKIDIS, Directeur de l'Institut Astronomique de l'Observatoire National d'Athènes ainsi que le Conseil de cet Observatoire, de m'avoir autorisé à faire quatre longs séjours en France et à utiliser dans le présent travail le matériel d'observations que j'ai effectuées à l'Observatoire National d'Athènes.

LES CLICHÉS

Les clichés sélectionnés dans le cadre du présent travail, au nombre de 663, ont été pris avec un foyer de 50 mètres à l'aide du réfracteur de 60 cm d'ouverture et de 18 mètres de distance focale de l'Observatoire du Pic-du-Midi, pour $\lambda = 5800 \text{ \AA}$. Chaque plaque exposée au moyen d'un système à double coulisse, contient en moyenne 20 images de Mars à une échelle de $4''$ environ par millimètre.

Cette échelle a été établie par H. CAMICHEL [4] selon les données des émulsions choisies, afin de permettre la visibilité aisée sur les images photogra-

phiques de détails de $0'',3$ ou $0'',4$. Le photomètre, montrant Mars sous un grossissement de 700 fois permet de mesurer des surfaces impressionnées de l'ordre de $3''$. J'ai pu effectuer jusqu'à 16 mesures sur des disques de 6 mm ou $24''$ de diamètre planétaire apparent.

Les négatifs ont été sélectionnés selon les critères suivants :

- a) Fond des plaques sans voile appréciable vérifié au photomètre.
- b) Qualité des images photographiques de la

planète jugée d'après la finesse des détails visibles.

c) Délimitation correcte des régions sombres ou demi-tons sur l'image photographique, sans présence de liseré à leur bordure (effet EBERHARD) dû à un développement défectueux.

d) Absence de nuages ou voiles sur la planète. Dans certains cas douteux on a pu avoir recours à des observations polarimétriques simultanées.

e) Les variations locales de sensibilité des plaques, vu la petitesse de l'image photographique (6 mm au maximum) ont été considérées comme pratiquement inexistantes.

ÉTALONNAGE

L'appareil d'étalonnage réalisé par H. CAMICHEL consiste en un sensitomètre à tubes qui donne 10 pupilles d'un diamètre de 3 mm rangées en ligne droite ; l'intensité de lumière provenant d'une lampe étalon est réglée au moyen d'un système de diaphragmes interposés entre la lampe et les pupilles ; un obturateur permet de photographier les pupilles avec un temps de pose égal à celui de la prise des clichés. Les pupilles sont photographiées à travers un filtre analogue à celui de la chambre planétaire, au milieu de la plaque. L'intensité des 10 pupilles varie comme $0, \log \sqrt[4]{3}, 2 \log \sqrt[4]{3}, \dots, 9 \log \sqrt[4]{3}$. Tous les clichés utilisés dans le présent travail, ont été étalonnés au moyen du même appareil.

LE PHOTOMÈTRE

Le photomètre à franges conçu et réalisé par A. DOLLFUS [6] repose sur le principe suivant :

On observe à travers un oculaire précédé d'un prisme biréfringent l'image extraordinaire non déviée de la planète ainsi que l'image ordinaire déviée et superposée à la précédente d'une plage de comparaison ; l'oculaire est suivi d'un polariscope de Savart ; les deux images superposées apparaissent striées par les franges du polariscope ; on fait varier la luminance de la plage de comparaison jusqu'à disparition des franges sur la région planétaire mesurée ; on obtient ainsi égalité de luminance de la plage de comparaison par rapport à la région planétaire mesurée ; la luminance trouvée est rapportée à la luminance repère connue, de la plage de comparaison.

Description :

Utilisé pour la mesure de clichés au laboratoire, le photomètre se compose des parties suivantes (fig. 1) :

— Un porte-plaque à double coulisse N ayant

au centre de sa partie fixe le trou T recouvert d'une pile de verre dépoli VD laissant passer la lumière de l'ampoule L de 6 V. Le porte-plaque reçoit le négatif à mesurer, émulsion tournée vers l'observateur ; le système à double coulisse permet d'amener l'image planétaire à mesurer au centre du trou T qui se trouve sur le prolongement de l'axe optique de la lunette du photomètre.

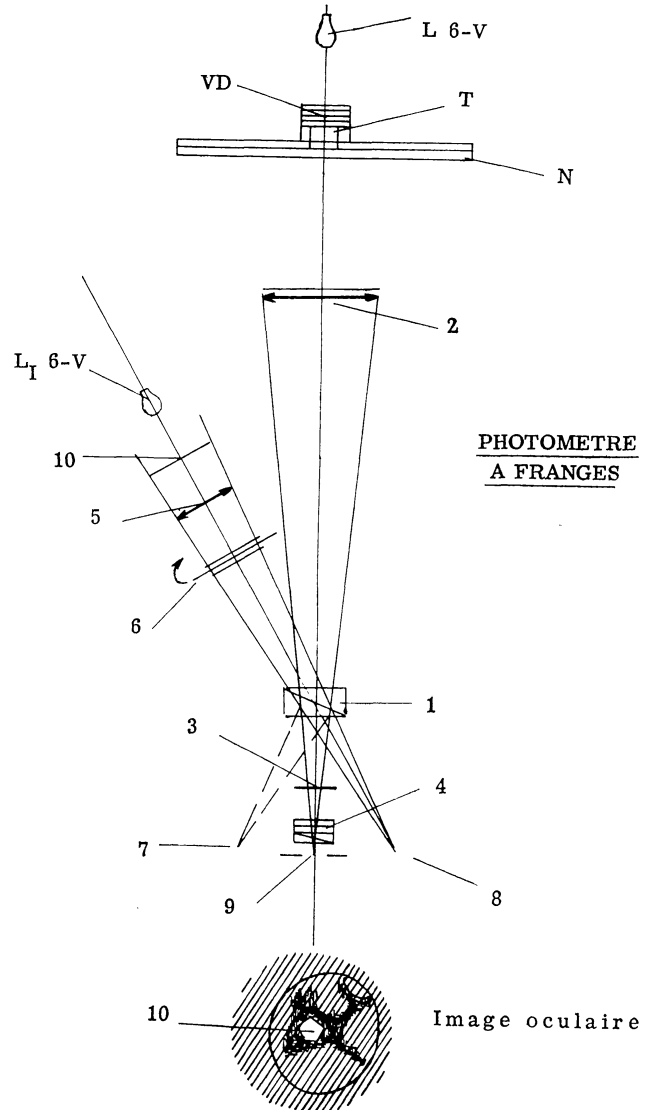


FIG. 1. — Principe du photomètre à franges de A. DOLLFUS.

— Un tube de 30 cm de longueur environ portant à son extrémité le barillet réglable de l'objectif de la lunette (2) de 3 cm d'ouverture. L'image photographique de la planète éclairée par l'ampoule L formée par l'objectif (2) est doublée par un prisme biréfringent (1) ; son image extraordinaire non déviée (9) est observée à l'aide de l'oculaire (3) suivi du polariscope de Savart (4).

L'image planétaire apparaît dans le champ oculaire striée par les franges du polariscope. L'oculaire est muni d'un filtre orangé.

— Un collimateur fixé sur le tube de la lunette latéralement (5) projetant au travers du biréfringent (1) l'image ordinaire déviée de la plage de comparaison (10) dans le champ de l'oculaire (3). L'image extraordinaire de la planète à mesurer et l'image ordinaire de la plage de comparaison se superposent dans le champ oculaire, l'image planétaire étant noyée dans la lumière de la plage de comparaison (10). Trois polaroïdes neutres (6), celui du milieu tournant au moyen d'une roue dentée et d'un pignon, permettent la variation de la luminance de la plage de comparaison jusqu'à disparition des franges sur la région planétaire mesurée.

— Un accumulateur de 6 V alimentant les ampoules L et L₁.

— Un support à double coulisse portant le photomètre, permettant le déplacement vertical et latéral de l'appareil pour le pointage des régions à mesurer sur l'image photographique de la planète.

Réglage :

a) Le polariscope enlevé, on établit à l'aide d'une loupe la coïncidence entre les pupilles des deux faisceaux projetés à travers le birefringent, en agissant sur trois vis antagonistes à ressort déplaçant l'axe de la lunette auxiliaire.

b) On assure le grandissement nécessaire de l'image photographique par rapport au grandissement de la plage de comparaison projetée sur la première, de manière à permettre la mesure des régions planétaires de quelques secondes d'arc.

c) On règle la brillance de l'image planétaire en faisant varier l'épaisseur de la pile de verre dépoli VD et la distance de l'ampoule L par rapport à la plaque pour assurer une visibilité aisée de la différence de brillance des régions à mesurer.

Méthode de mesure :

La rotation du polaroïde tournant entre les deux polaroïdes superposés (6) dont les sections principales forment un petit angle, permet la variation de l'intensité de la plage de comparaison.

Soient les lectures du tambour du polaroïde tournant :

- a_1, a_2 = lectures repère correspondant à l'extinction de la plage de comparaison.
- a_0 = lecture du fond de la plaque.
- $a \dots$ = lecture correspondant à la disparition des franges sur la région planétaire mesurée ou les pupilles d'étalonnage.

De même soient :

I_0 = l'intensité du fond de la plaque.

$I \dots$ = l'intensité de la région mesurée ou des pupilles d'étalonnage.

D'après la loi de Malus on a :

$I_0 = \sin^2(a_0 - a_1) \sin^2(a_0 - a_2)$ pour le fond de la plaque.

$\log I \dots = 2 \log \sin(a \dots - a_1) + 2 \log \sin(a \dots - a_2) - \log I_0$ pour chacune des pupilles d'étalonnage et les régions planétaires mesurées.

Le photomètre est installé à l'abri de lumières parasites. Les mesures sont effectuées de la manière suivante :

a) On obtient a_1 et a_2 en couvrant l'objectif de la lunette formant l'image de la planète. Dans le champ oculaire apparaît seulement l'image pentagonale de la plage de comparaison ; on tourne le polaroïde jusqu'aux deux positions donnant extinction totale de cette plage.

b) On obtient a_0 en amenant l'image de la plage de comparaison alternativement sur quatre points diamétralement opposés à proximité de l'image planétaire ; en tournant le polaroïde on fait disparaître les franges.

c) On obtient $a \dots$ en amenant l'image de la plage de comparaison successivement sur les dix pupilles d'étalonnage et ensuite sur les régions planétaires choisies au préalable en faisant disparaître chaque fois les franges.

d) Le grandissement de l'image planétaire permet la superposition de la plage de comparaison et de régions planétaires relativement vastes. Dans un tel cas, les franges disparaissent sur toute l'étendue de la plage de comparaison. Pour des régions planétaires plus petites que la plage de comparaison on fait disparaître quelques franges seulement sur la région à mesurer ; avec une certaine difficulté on arrive à isoler et faire disparaître jusqu'à deux franges sur les régions bien délimitées comme par exemple la calotte polaire en fusion avant sa disparition.

Sensibilité de l'appareil. Erreurs systématiques des mesures.

Chaque mesure est la moyenne de cinq pointés effectués dans les deux sens de rotation du tambour des polaroïdes. Les écarts entre les mesures individuelles sont inférieurs à un degré ; des lectures effectuées par plusieurs observateurs sur la même région, montrent des écarts de cet ordre ; l'équation personnelle de l'observateur n'intervient pas pratiquement dans ce genre de mesures.

En admettant que la sensibilité limite de l'œil

donne pour les rapports de brillance entre une région sombre et une région claire une erreur de lecture $\varepsilon = \pm 0,05$, on doit trouver des erreurs systématiques dans les mesures rapportées à la partie rectiligne de la courbe d'étalonnage, oscillant autour d'une valeur moyenne de $\pm 0,02$.

Il y a d'autres sources d'erreurs dont les principales sont :

— Des défauts locaux des surfaces de la plage de comparaison.

— La constance de la luminance de la plage de comparaison.

— Des défauts dans le système d'étalonnage des plaques.

— Le nombre de franges effacées sur la région planétaire mesurée. Cette erreur varie en raison inverse du nombre des franges utilisées ; elle est négligeable ou inexistante quand on utilise des franges couvrant la totalité ou jusqu'à la moitié de l'étendue de la plage de comparaison, ce qui est le cas usuel ; son influence devient évidente quand on utilise deux à trois franges, dans des cas très rares.

L'étude des erreurs systématiques des mesures dans leur ensemble au moyen de mires de densités connues donne :

Pour la sensibilité du photomètre i. e. sa possibilité de discerner de très faibles variations de brillance, une limite supérieure de 1 %.

Pour la précision des mesures i. e. l'exactitude avec laquelle de très faibles brillances peuvent être comparées, la valeur est de 1 à 2 %.

A titre de comparaison, trois types de photomètres ont été utilisés pour la mesure d'une série de mêmes clichés.

a) Le photomètre à franges décrit.

b) Le microphotomètre d'Hartmann de l'Observatoire d'Athènes.

c) Le microphotomètre enregistreur de Moll de l'Observatoire de Meudon.

Les valeurs des rapports d'éclat de deux mêmes régions mesurées au moyen de ces trois photomètres oscillent de 1 à 3 %.

Réduction des mesures :

Le présent travail a été réalisé comme une part du programme de recherche de physique planétaire commencée par B. LYOT aux observatoires de Meudon et du Pic-du-Midi, continué pour la photographie par H. CAMICHEL et développé dans les secteurs de la polarisation, photométrie directe et photographique etc., par A. DOLLFUS. Dans la réduction des brillances des régions sombres pour le centre du disque à la phase nulle, j'ai utilisé les résultats obtenus par A. DOLLFUS [7], [8].

Une longue série de mesures effectuées par A. DOLLFUS directement sur la planète au moyen du même photomètre à franges ainsi qu'une partie des mesures contenues dans le présent travail, lui ont permis de montrer que l'éclat $E(\theta)$ des régions martiennes diminue avec l'angle θ de la direction d'éclairement et la normale à la surface, selon l'expression :

$$E(0^\circ) - E(60^\circ) = 0,30E(0^\circ) - 0,07,$$

dans laquelle la constante 0,30 est l'assombrissement relatif Δ des régions sombres et claires pour la distance au centre du disque $\theta = 60^\circ$ quels que soient leur facteur de diffusion et l'éclat. Le terme 0,07 résulte de la lumière diffusée dans l'atmosphère de la planète.

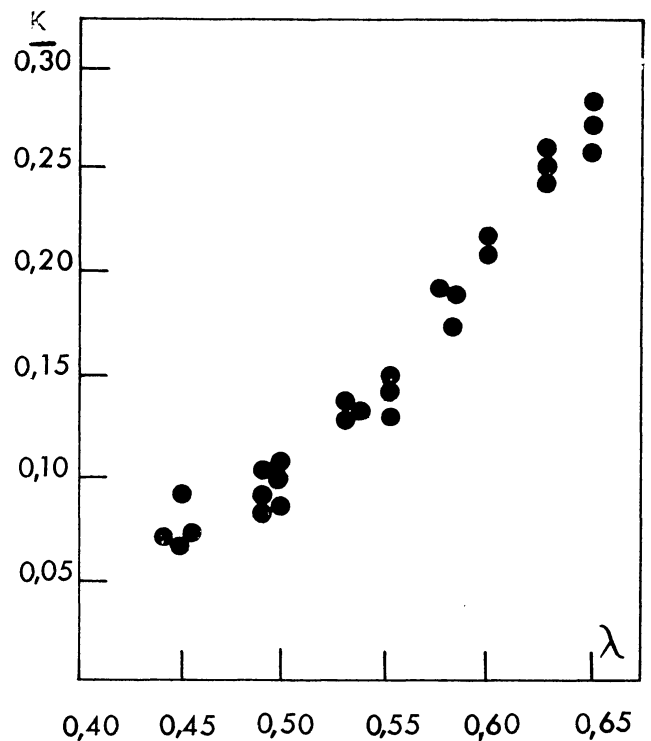


FIG. 2. — Variation spectrale du facteur de diffusion des régions claires de Mars pour le centre du disque à la phase nulle (d'après A. DOLLFUS).

Les régions sombres et claires de Mars, étant recouvertes de substances poudreuses absorbantes, renvoient la lumière solaire après réfraction, réflexion, diffusion et absorption dans les couches supérieures de ces substances ; ces effets combinés altèrent l'isotropie de la répartition spatiale de la lumière réfléchie et la variation de la brillance de ces régions ne suit qu'en partie la Loi de Lambert. L'assombrissement relatif Δ des régions sombres et claires en fonction de leur distance au centre du disque dépend principalement :

a) De leur facteur de diffusion K , pour différentes longueurs d'onde (rapport de la brillance d'une région mesurée au centre du disque à la phase nulle, à la brillance d'un diffuseur parfait d'albedo I éclairé dans les mêmes conditions).

b) De la lumière diffusée B_a par l'atmosphère planétaire. Des mesures analogues aux précédentes ont permis à A. DOLLFUS de déterminer :

1. La variation spectrale du facteur de diffusion K des régions claires pour $\theta = 0^\circ$ et $V = 0^\circ$ donnée par la figure 2.

2. La variation de K pour les régions claires en fonction des angles de phase $V = 10^\circ, 20^\circ, 30^\circ$ et la distance θ des régions au centre du disque pour $\lambda = 6300 \text{ \AA}$, donnée par la figure 3.

3. Que l'assombrissement relatif Δ pour les distances croissantes à partir du centre du disque est le même pour les régions claires et sombres et indépendant de leur facteur de diffusion K .

Les valeurs des brillances des régions sombres mesurées ont donc été calculées pour le centre du disque de la planète à la phase nulle, selon les données fournies par le diagramme de la figure 3.

L'albedo absolu des régions sombres n'entrant pas dans le but du présent travail, les mesures n'ont pas été corrigées de l'effet d'absorption

atmosphérique terrestre et martienne dans la direction de la normale à la surface de la planète.

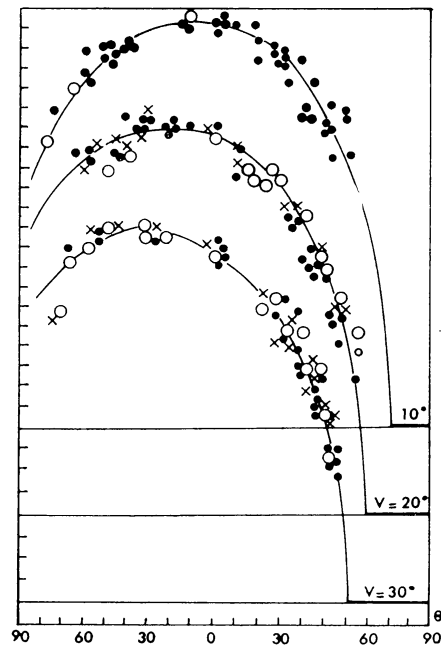


FIG. 3. — Variation du facteur de diffusion des régions sombres de Mars pour $i = 10^\circ, 20^\circ, 30^\circ$ en fonction de la distance θ au centre du disque (d'après A. DOLLFUS).

CALOTTES POLAIRES

DONNÉES SPECTROSCOPIQUES, PHOTOMÉTRIQUES ET POLARIMÉTRIQUES.

G. A. TICKHOFF pendant l'opposition de 1909 [24] a étudié photographiquement à Poulkovo la variation de la brillance de la calotte polaire australe pour diverses longueurs d'onde.

P. GOETZ en 1927 [16] par des mesures photométriques effectuées sur 2 clichés pris au Mont Wilson par VAN MAANEN trouve pour la calotte polaire australe pour $\lambda = 4300 \text{ \AA}$ un facteur de diffusion de 0,47 comparable à celui de la glace.

W. W. SHARONOW [23] par des mesures photométriques effectuées sur des clichés pris en 2 nuits à Tashkent établit pour la calotte polaire australe pour $\lambda = 4300 \text{ \AA}$ un facteur de diffusion de 0,45 comparable à celui de la glace.

B. LYOT [19] a étudié à Meudon la polarisation de la calotte polaire australe en 1922, 1924, et 1926 ; il en conclut la présence de cristaux de glace sur les calottes.

G. P. KUIPER étudia en 1948 [17] le spectre infrarouge de la calotte et le trouva comparable à celui d'une cuve d'eau de 1 mm d'épaisseur.

A. DOLLFUS [9] au Pic-du-Midi, au cours des

oppositions de 1948, 1949-1950, 1952, 1954 et 1956 a étudié la polarisation des calottes polaires en comparaison avec les propriétés de polarisation de dépôts de glace, neige et verglas formés sur la terre et en montagne ainsi que de givres artificiels. Il en conclut la présence, selon la saison, d'un nuage polaire constitué de cristaux de glace dont la courbe caractéristique de polarisation présente un minimum jusqu'à $-0,025$, l'inversion du plan de polarisation ayant lieu pour l'angle de vision de 25° , qui se résorbe laissant paraître un dépôt de givre dont la courbe caractéristique de polarisation présente un minimum jusqu'à $-0,005$, l'inversion du plan de polarisation ayant lieu vers l'angle de vision de 30° .

NOUVELLES MESURES

A) Polarisation :

Travaillant selon le programme de recherche développé aux observatoires de Meudon et du Pic-du-Midi, j'ai mesuré à l'aide du polarimètre Lyot [19] la proportion de lumière polarisée des calottes polaires ainsi que des régions claires et sombres de Mars au cours des périodes suivantes [14] :

DATES	STATION	INSTR.	LONG. HÉL. DE MARS	NOMBRE DE MESURES
1954, 21 avril-4 juillet	Pic.	60 cm	237°-278°	440
1954, 16 juillet-20 septembre	Athènes.	40 »	285 -326	262
1956, 11 juillet-7 septembre	Pic.	60 »	309 -346	587
1956, 22 septembre-13 décembre	Athènes.	40 »	355 - 44	301
1958, 5 août-21 octobre	Athènes.	40 »	252 - 39	266
1958, 1 novembre-2 décembre	Pic.	60 »	45 - 63	394

TOTAL : 2.250

Note : J'ai également utilisé dans la suite, les mesures de polarisation concernant la calotte boréale pour les longitudes héliocentriques de Mars 140°-250° tirées de la Thèse de M. A. DOLLFUS.

La variation de la proportion de lumière polarisée P mesurée en millièmes en fonction de l'angle de vision sur les calottes polaires sous une inclinaison de la normale perpendiculaire au plan de vision d'environ 70° est représentée par les courbes A, B, C sur la figure 4 pour la calotte aus-

trale et E, F, G, H, I, J pour la calotte boréale. J'ai également reporté en abscisses la longitude héliocentrique.

Ces courbes, d'après les données précitées [9] permettent les précisions suivantes :

Calotte polaire australe (fig. 4).

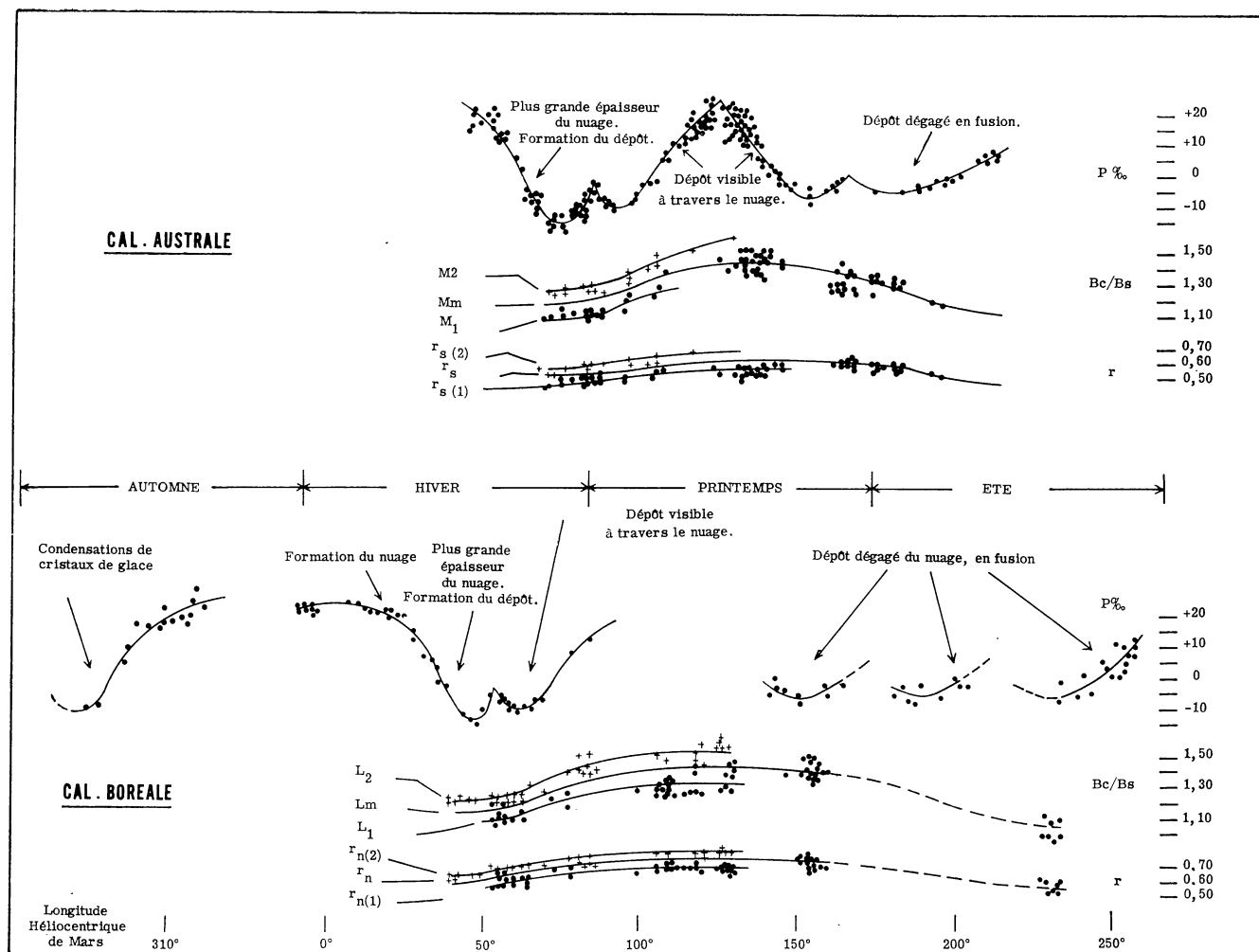


FIG. 4. — Évolution saisonnière des calottes polaires de Mars. Variation de : $P\%$ (polarisation), Bc/Bs (brillance), r (facteur de diffusion) montrant de gauche à droite la formation du nuage polaire, sa régression et l'apparition du dépôt polaire. On note un décalage et une durée différente de ces phénomènes aux deux hémisphères. Table 1 (d'après l'auteur).

La courbe *A* présente un minimum prononcé de $-0,020$ qui caractérise, selon A. DOLLFUS [13], un nuage opaque de cristaux de glace recouvrant la calotte entre les longitudes héliocentriques de la planète 230° - 270° (fin de l'hiver et début du printemps).

La courbe *B* présente un minimum de $-0,015$ qui caractérise un nuage moins opaque laissant paraître par transparence la calotte blanche pour les longitudes héliocentriques 270° - 310° (printemps).

La courbe *C* présente un minimum de $-0,008$ qui caractérise un nuage très ténu, la calotte étant presque dégagée, pour les longitudes héliocentriques 310° - 350° (fin du printemps-début de l'été).

La courbe *D* présente un minimum très faible de $-0,003$ qui caractérise un dépôt de givre dégagé nuage pour les longitudes héliocentriques 350° - 40° .

Calotte polaire boréale (fig. 4).

La courbe *E* révèle la présence de condensations de cristaux de glace recouvrant la région circum-

TABLE I

DONNANT L'ÉVOLUTION SAISONNIÈRE DES CALOTTES POLAIRES DE MARS
SELON LES RÉSULTATS DE LA POLARISATION ET DE LA PHOTOMÉTRIE

ÉVOLUTION	LONGIT. HÉLIOC. LIMITE	FRACT. ANNÉE MART.	POLAR. P ^o / ₁₀₀ MINIMUM	ÉCLAT APPAR. B _{cal} /B _s	$\rho = \frac{B_{cal}}{B_s} 0.170$	FACT. DE DIFFUSION $r = \rho/\cos i$
<i>Début du cycle</i>	—	—	—	—	—	—
<i>Condensations</i> de cristaux de glace, révélées par la polarisation, invi- sibles ou presque.						
Région polaire boréale	264-354	0.25	-0.010	—	—	—
<i>Nuage polaire visible</i> , bien déli- mité, atteint sa plus grande épaisseur ; formation du dépôt polaire.						
<i>Boréal</i>	15- 55	0.11	-0.013	1.07-1.14	0.18-0.19	0.46-0.50
<i>Boréal</i> : régions brillantes dans la calotte ou bordure vues par transparence	15-55	0.11	-0.025	1.22-1.26	0.21	0.52-0.60
<i>Austral</i>	?-270	?	-0.020	1.09-1.14	0.19	0.45-0.50
<i>Austral</i> : régions brillantes dans la calotte ou bordure vues par transparence	?-270	?	-0.025	1.25-1.29	0.21-0.22	0.55-0.60
<i>Commencement de l'amincissement du nuage boréal</i> 0.11 année mar- tienne en avance sur la phase cor- resp. du nuage austral.						
<i>Marche de l'amincissement des nuages pol.</i>						
<i>Boréal</i>	55- 90	0.10	-0.009	1.14-1.26	0.19-0.21	0.50-0.59
<i>Boréal</i> : régions brillantes dans la calotte ou bordure vues par transparence	55- 90	0.10	-0.015	1.25-1.50	0.21-0.23	0.60-0.68
<i>Boréal</i>	90-130	0.11	—	1.26-1.28	0.21-0.22	0.59-0.60
<i>Boréal</i> : régions brillantes dans la calotte ou bordure vues par transparence	90-130	0.11	—	1.50-1.56	0.23-0.27	0.68-0.70
<i>Austral</i>	270-310	0.11	-0.010	1.14-1.32	0.19-0.22	0.50-0.56
<i>Austral</i> : régions brillantes dans la calotte vues par transparence.	270-310	0.11	-0.010	1.29-1.56	0.22-0.27	0.60-0.68
<i>Dépôt polaire dégagé.</i>						
<i>Boréal</i>	130-160	0.08	-0.006	1.44-1.40	0.25-0.24	0.64-0.63
<i>Boréal</i>	160-235	0.21	-0.005	1.40-1.06	0.24-0.18	0.63-0.50
<i>Austral</i>	310- 10	0.17	-0.006	1.44-1.24	0.25-0.21	0.60-0.48

polaire boréale *après fusion du dépôt polaire du cycle précédent*. Nuage polaire en général invisible entre les longitudes héliocentriques 264° et 15° (automne début d'hiver).

La courbe *F* présente un minimum de $-0,013$ qui caractérise un nuage d'opacité réduite de cristaux de glace recouvrant la calotte pour les longitudes héliocentriques de 15° à 55° (Hiver).

La courbe *G* présente un minimum de $-0,009$ qui caractérise un nuage ténu laissant paraître par transparence la calotte blanche entre les longitudes héliocentriques de 55° à 90°.

Les courbes *H*, *I*, *J* présentent des minima autour de $-0,005$ qui caractérisent un dépôt de givre dégagé de nuage pour les longitudes héliocentriques de 140° à 250°.

D'après les résultats polarimétriques précités, le cycle saisonnier des phénomènes des régions polaires se présente comme suit :

1. Région polaire boréale :

a) Au cours de l'année martienne le polarimètre relève la présence permanente sur la région polaire et circumpolaire boréales, de vapeur d'eau sous forme de cristaux de glace (courbes *E*, *F*, *G*, *H*, *I*, *J*).

b) Au cours de l'automne boréal (long. hélioc. 264° à 354°) des condensations de cristaux de glace, en principe invisibles en lumière totale ou devinées en lumière bleue, forment progressivement un voile qui, au début de l'hiver, se développe en un nuage opaque de cristaux de glace qui recouvre complètement la région polaire.

Ce nuage devient visible et bien délimité à partir de la longitude héliocentrique 15° environ ou 200 jours terrestres après la fonte complète du dépôt polaire du cycle précédent.

c) La plus grande opacité du nuage est notée entre les longitudes héliocentriques 15° et 55° (première moitié de l'hiver).

C'est au cours de cette période (environ 80 jours terrestres) qu'a lieu la formation progressive du dépôt polaire, d'après toute évidence, aux dépens du nuage.

d) Entre les longitudes héliocentriques 55° et 120° le nuage s'amincit progressivement, présente des condensations brillantes selon les accidents du relief et se résorbe en laissant paraître le dépôt polaire boréal. Le maximum d'épaisseur du dépôt est éventuellement atteint vers la longitude héliocentrique 40°. Durée de vie probable du nuage visible (longitudes héliocentriques 15° à 130°) : 180 jours terrestres environ.

Le commencement de l'amincissement du nuage boréal a lieu 70 jours environ avant l'équinoxe du printemps.

e) Entre les longitudes héliocentriques 120° et 250° le dépôt polaire apparaît dégagé de nuage à l'exception d'apparitions temporaires de voiles et se sublime en 250 jours terrestres environ.

II. Région polaire australe.

f) Un nuage opaque recouvrant la calotte persiste jusqu'à la fin de l'hiver.

g) Entre les longitudes héliocentriques 270° et 310° le nuage s'amincit progressivement, présente des condensations brillantes selon les accidents du relief et se résorbe en laissant paraître le dépôt polaire austral.

Le commencement de l'amincissement du nuage austral coïncide avec l'équinoxe du printemps et présente un retard d'environ 70 jours terrestres par rapport à la phase correspondante du nuage boréal.

B) Photométrie.

a) J'ai mesuré la brillance des calottes polaires sur 440 clichés pris au cours des apparitions de Mars des années 1943-1944, 1946, 1948, 1950, 1952, 1954, 1956 et 1958 couvrant toutes les longitudes héliocentriques de la planète. Les techniques employées dans la prise et la mesure des clichés, ainsi que la méthode de réduction des mesures ont été exposées dans la première partie du présent travail.

b) J'ai calculé la valeur du facteur de diffusion des matériaux constituant les calottes polaires au cours de l'année martienne en supposant que le dépôt ainsi que le nuage obéissent à la relation simple :

$$r = \frac{\rho}{\cos i},$$

r est le facteur de diffusion rapporté au centre du disque.

$\rho = \frac{B_{cal}}{B_s} K$ où B_{cal}/B_s est le rapport des brillances mesurées sur les calottes et sur les régions claires au centre du disque de la planète.

$K_{(\nu=0^\circ, \lambda=5800, \theta=0^\circ)} = 0,170$ est le facteur de diffusion des régions claires au centre du disque à la phase nulle. Les valeurs de $K_{(\nu, \theta)}$ ont été calculées d'après les données présentées sur le graphique de la figure 3.

i est l'angle des rayons solaires incidents avec la normale à la région mesurée de la calotte. En fait, le dépôt de givre et les voiles de nuages doivent obéir à des lois d'assombrissement plus complexes que la précédente qui sont très mal connues.

Sur la figure 4 :

Les courbes $L_{(1,m,2)}$ et $M_{(1,m,2)}$ montrent la variation de la brillance B_{cal} des calottes rapportées à celle B_s des régions claires au centre du disque et

les courbes $r_{n(1,2)}$ $r_{s(1,2)}$ celle de leur facteur de diffusion en fonction de la longitude héliocentrique de la planète. Chaque point ou croix représente en général la moyenne des mesures effectuées sur plusieurs clichés dans la même nuit pour des longitudes du méridien central voisines au cours de plusieurs oppositions. Les branches L_1 M_1 $r_{N(1)}$ $r_{s(1)}$ montrent respectivement la variation de la brillance et du facteur de diffusion du nuage polaire en cours d'amincissement. Les branches L_2 M_2 et $r_{n(2)}$ $r_{s(2)}$ montrent respectivement la variation de la brillance et du facteur de diffusion des régions brillantes vues dans les calottes et sur leur bordure par transparence à travers le nuage en cours d'amincissement.

La dispersion des valeurs B_{cal}/B_s pour les calottes dégagées du nuage, témoignent de la non-uniformité de leur brillance.

RÉGIONS SOMBRES

DONNÉES PHOTOMÉTRIQUES ET POLARIMÉTRIQUES

P. LOWELL [18] a cherché à rapprocher les phénomènes saisonniers de Mars et ceux de la Terre.

E. M. ANTONIADI [1] a étudié à Meudon les phénomènes saisonniers de Mars par le changement de coloration des régions sombres. Il conclut qu'une vague d'assombrissement se propage depuis les pôles vers l'équateur à la vitesse de 32 km/jour.

G. FOURNIER [14] a étudié visuellement à Sétif, le contraste des régions sombres de Mars par rapport aux régions claires ; il en donne des valeurs oscillant entre 0,13 et 0,60 pour les oppositions de 1914 et 1926.

P. GOETZ [16] en 1927 par des mesures photométriques qu'il a effectuées sur 2 clichés pris au Mount Wilson par VAN MAANEN en 1924, trouve pour $\lambda = 5200 \text{ \AA}$ un contraste de 0,25 entre les régions sombres et claires.

N. BARABASCHEFF et P. SEMEJKIN [2] d'après des mesures effectuées sur des clichés qu'ils ont pris le 25 Mars 1933, donnent pour $\lambda = 6490 \text{ \AA}$ pour les régions sombres un albedo de 0,133. Les mêmes auteurs [3] en 1940 trouvent des rapports de brillance entre les régions sombres et claires B_c/B_s pour $\lambda = 4610 \text{ \AA}$: 1,10-1,23 et pour $\lambda = 6480 \text{ \AA}$: 1,48-1,97.

F. G. FESSENKOFF [11] en 1944 d'après les mesures effectuées sur des clichés pris par SHARONOW, trouve les albedos suivants des régions sombres pour $\lambda = 4800 \text{ \AA}$: 0,087, $\lambda = 5600 \text{ \AA}$: 0,175, $\lambda = 6300 \text{ \AA}$: 0,165, $\lambda = 7300 \text{ \AA}$: 0,162.

W. W. SHARONOW [23] d'après les mesures de

La variation du facteur de diffusion des calottes polaires en supposant $r = \rho/\cos i$, montre que :

a) Les nuages polaires boréal et austral sous leur plus grande opacité (dépôt polaire invisible du travers) ont un facteur de diffusion oscillant entre 0,48 et 0,50 (d'après les tables de J. FRITZ [15] ce facteur de diffusion correspond à celui d'un nuage de Cirro-Stratus ; d'après les tables de NEIBURGER [19] l'épaisseur pourrait en être de l'ordre de 150 mètres environ).

b) Le facteur de diffusion du dépôt polaire dégagé, au cours de son éclat maximum s'élève à 0,60-0,64 et correspond [15] à celui d'un dépôt de neige ou de givre.

c) Le facteur de diffusion du dépôt polaire en fusion au cours de l'été s'élève à 0,45 environ. Le dépôt devient progressivement plus sombre que le nuage hivernal.

L. N. RADLOWA [21] et E. KRINOW trouve que le facteur de diffusion spectral des régions sombres augmente avec la longueur d'onde.

G. DE VAUCOULEURS [25] a étudié la variation de l'albedo des régions sombres de Mars visuellement en établissant des cotes d'intensité corrigées des erreurs d'observation. D'après ces mesures, une coulée sombre se propage au cours du printemps et de l'été austral depuis le pôle vers l'équateur à une vitesse de 45 km/jour.

B. LYOT [19] a étudié à Meudon la variation de la polarisation des régions sombres et claires ; il l'attribue à la présence sur les premières « d'une végétation trop clairsemée pour cacher le sol ».

A. DOLLFUS [7 et 8] a déterminé au Pic-du-Midi par des observations photométriques directes sur la planète et des mesures sur des clichés, le facteur de diffusion ainsi que la structure des régions claires et sombres et sa variation spectrale. Les conclusions en sont exposées dans la première partie du présent travail ; de même il a étudié l'évolution saisonnière des propriétés polarisantes des régions sombres (9 et 10) ; cette évolution accompagne exactement le cycle des phénomènes saisonniers d'assombrissement des régions sombres établi par des mesures photométriques [13].

NOUVELLES MESURES

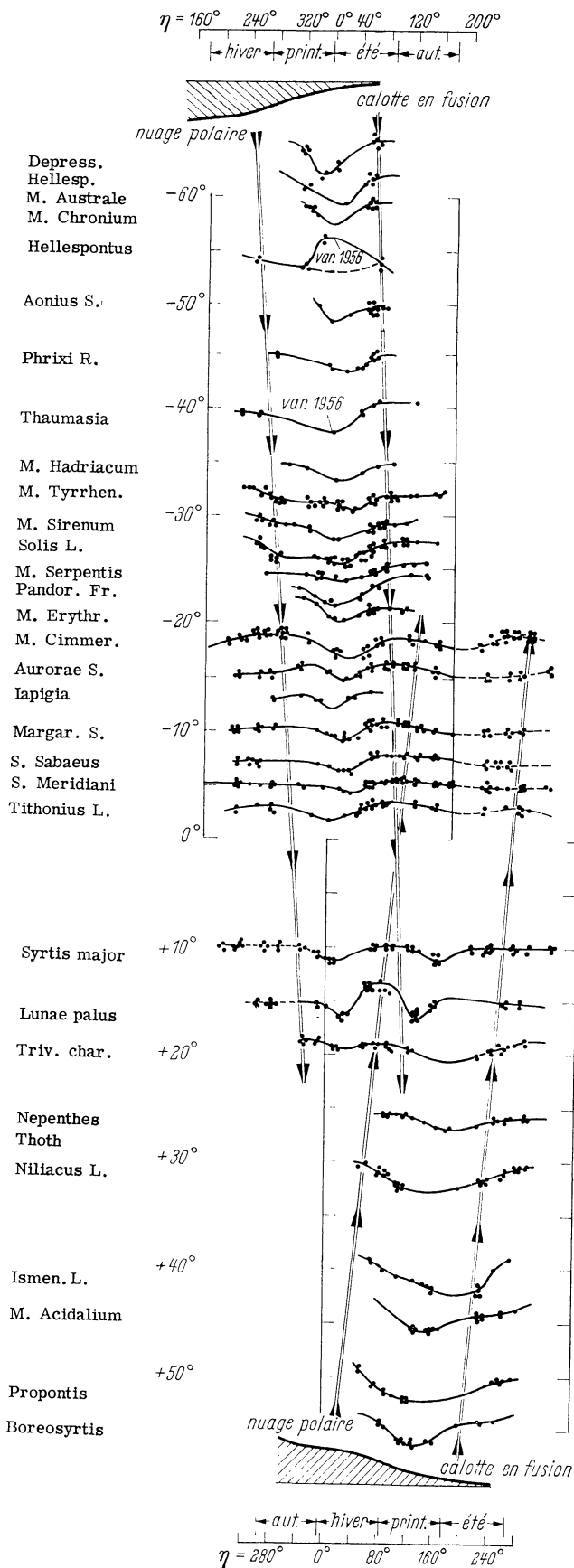
J'ai déterminé le rapport de brillance B_c/B_s entre 36 régions sombres et les régions claires de référence, par des mesures effectuées sur 663 clichés de Mars [13] réparties comme suit :

OPPOSITIONS	LONG. HÉLIOC. DE MARS	NOMBRE DE CLICHÉS	NOMBRE DE POINTS MESURÉS
1943-1944	4 ^o .102 ^o	136	950
1946	99 -131	110	820
1948	75 - 92		
	147 -170	47	520
1950	182 -204	26	290
1952	219 -272	57	690
1954	246 -301	49	700
1956	310 - 31	156	2.130
1958	40 - 65	82	1.100
TOTAL	663	7.200

TABLE II

DONNANT LES VALEURS MESURÉES DE MAXIMUM ET MINIMUM D'ASSOMBRISSEMENT DES RÉGIONS SOMBRES
AU COURS DE L'ANNÉE MARTIENNE (8 OPPOSITIONS CONSÉCUTIVES).

LAT. ARÉOGRAPH.	RÉGION	PREMIER MINIMUM		PREMIER MAXIMUM		SECOND MINIMUM		SECOND MAXIMUM	
		Bc/Bs	η	Bc/Bs	η	Bc/Bs	η	Bc/Bs	η
— 65 ^o	Depress. Hellespont....	0.66	288 ^o	0.48	343 ^o	0.80	60 ^o		
— 60	Mare Australe	0.80	280	0.52	23	0.75	86		
— 57	Mare Chronimum	0.67	328	0.56	353	0.73	57		
— 40	Aonius Sinus	0.67	353	0.55	0	0.70	75		
— 40	Hellespontus	0.75	255	0.55	310	0.75	344		
— 40	Phruxi Regio	0.70	280	0.57	22	0.70	84		
— 40	Thaumasia	0.60	260	0.45	350	0.85	126		
— 30	Mare Hadriacum.....	0.70	296	0.50	6	0.65	88		
— 30	Mare Sirenum	0.45	256	0.45	2	0.63	122		
— 28	Mare Tyrrhenum	0.70	260	0.52	28	0.65	160		
— 28	Solis Lacus.....	0.65	257	0.45	35	0.65	155		
— 22	Pandorae Fretum	0.73	318	0.48	23	0.83	116		
— 22	Mare Serpentis	0.57	263	0.45	45	0.65	126		
— 20	Mare Cimmerium	0.65	260	0.45	28	0.62	90	0.50	220
— 20	Mare Erythraeum	0.75	320	0.52	24	0.65	110		
— 10	Aurorae Sinus	0.63	322	0.47	23	0.63	90	0.53	226
— 10	Margaritifera Sinus.....	0.60	318	0.48	22	0.70	90	0.48	227
— 9	Sinus Sabaeus	0.55	350	0.45	28	0.60	100	0.55	230
— 9	Sinus Meridiani	0.50	320	0.44	30	0.55	100	0.50	180
— 9	Iapigia	0.70	310	0.50	6	0.67	80		
— 8	Tithonius Lacus	0.75	255	0.60	30	0.85	110	0.62	220
— 5	Syrtis Major	0.57	180	0.43	10	0.57	90	0.45	115
— 18	Lunae Palus	0.70	260	0.60	23	0.90	80	0.60	130
+ 20	Trivium Charontis	0.68	290	0.55	30	0.68	70	0.55	180
+ 25	Nepenthes-Toth	0.68	70	0.50	170	0.68	250		
+ 30	Niliacus Lacus.....	0.75	60	0.50	120	0.68	292		
+ 40	Ismenius Lacus	0.77	50	0.50	180	0.68	240		
+ 45	Mare Acidalium	0.55	100	0.43	140	0.55	280		
+ 45	Propontis	0.83	55	0.60	150	0.70	258		
+ 45	Boreosyrtis.....	0.70	85	0.57	140	0.73	287		
<i>Régions paraissant périodiquement recouvertes de légers dépôts de givre.</i>									
— 45	Argyre	0.85	228	0.73	261	1.25	18	0.95	127
— 45	Phaethontis	1.05	35	0.85	290	—	—	0.80	92
— 45	Electris	0.85	232	0.70	277	1.20	40	0.95	120
— 45	Eridania	0.87	238	0.70	268	1.18	30	0.85	90
— 40	Noachis	0.65	245	0.60	268	0.75	330	0.65	30
— 40	Hellas	0.75	230	0.77	267	1.25	30	0.92	154



Les techniques employées dans la mesure des clichés et la méthode de réduction sont exposées dans la première partie du présent travail.

Dans la table II sont résumées les valeurs maxima et minima de Bc/Bs. Ces valeurs, ainsi que les points sur les courbes de la figure 5 représentent des moyennes résultant de mesures effectuées sur plusieurs clichés pris dans la même nuit au cours de plusieurs oppositions, pour les longitudes héliocentriques correspondantes de la planète.

Les courbes de la figure 5 montrent l'évolution de l'assombrissement dans les deux hémisphères de Mars pour toutes les longitudes héliocentriques de la planète ; les mesures couvrant les huit oppositions de la période 1943-1958 y sont comprises.

CYCLE D'ASSOMBRISSEMENT

La tonalité des régions sombres de Mars présente des variations périodiques. Le cycle de ces variations se manifeste d'abord sur les régions circumpolaires de chacun des hémisphères de la planète et successivement sur les régions de latitude aréographique décroissante, i. e. en direction de l'équateur. Les caractères de ce cycle sont les suivants :

a) Aspect général :

D'après la figure 5, les courbes d'assombrissement des régions circumpolaires et tempérées présentent *un seul minimum* (maximum d'assombrissement). Celles des régions équatoriales présentent *deux minima* (maxima d'assombrissement).

b) Amplitude de l'assombrissement :

La figure 6 montre la variation de l'amplitude de l'assombrissement en fonction de la latitude aréographique dans les deux hémisphères.

D'après la partie A du graphique :

Toutes les régions sombres atteignent des maxima d'assombrissement oscillant entre 0,43 et 0,56.

Toutes les régions sombres entre les latitudes aréographiques $\pm 25^\circ$ et $\pm 65^\circ$ atteignent des minima d'assombrissement oscillant entre 0,65 et 0,80 (à l'exception du Mare Acidalium).

Toutes les régions sombres entre les latitudes $+ 25^\circ$ et $- 25^\circ$ atteignent des minima d'assombrissement oscillant entre 0,55 et 0,67.

FIG. 5. — Vagues d'assombrissement saisonnier des régions sombres de Mars, issues alternativement des deux pôles ; elles s'estompent vers 22° de la latitude de l'hémisphère opposé. Les régions circumpolaires et tempérées sont soumises à une seule vague ; les régions équatoriales sont successivement soumises aux deux vagues et restent en permanence les régions les plus sombres. Table II (d'après l'auteur).

Dés variations accidentelles ne sont pas comprises dans ce schéma.

D'après la partie B du graphique :

La valeur d'amplitude B_c/B_s de l'assombrissement

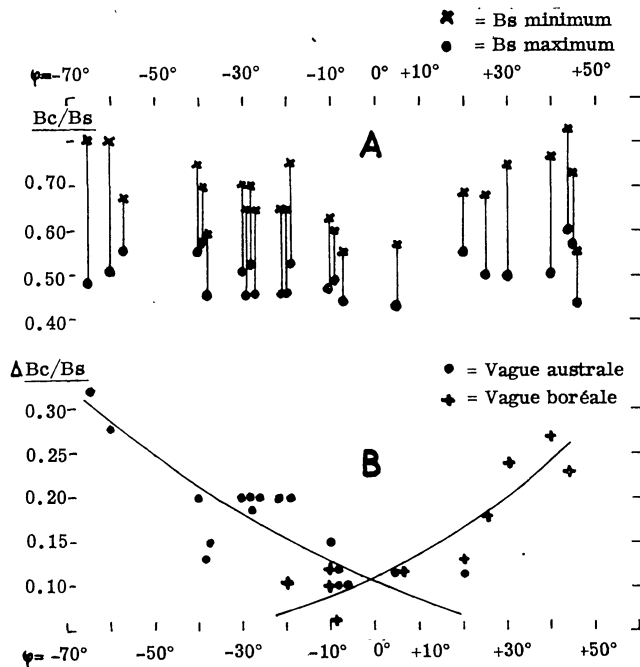


FIG. 6. — Amplitude de l'assombrissement ; elle diminue depuis les pôles en direction de l'équateur et tend vers zéro à 22° de latitude de l'hémisphère opposé (d'après l'auteur).

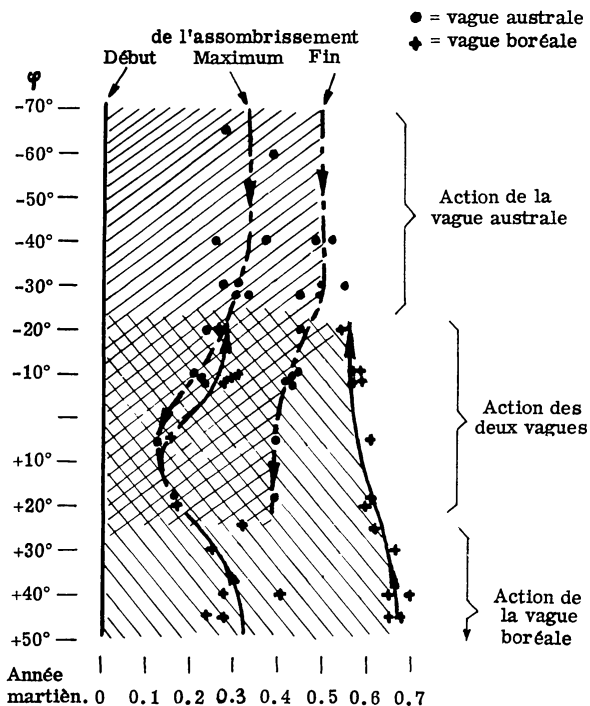


FIG. 7. — Durée totale de l'assombrissement ; elle décroît depuis les pôles vers l'équateur étant plus longue dans l'hémisphère boréal.

Le maximum d'assombrissement s'effectue deux fois plus vite sur les régions sombres soumises successivement aux deux vagues (d'après l'auteur).

ment saisonnier pour chacun des hémisphères présente une diminution progressive très prononcée depuis les pôles vers l'équateur et tend vers zéro vers la latitude de 25° environ de l'hémisphère opposé.

c) Propagation de l'assombrissement :

D'après les figures 5 et 6A l'assombrissement saisonnier des régions de Mars se manifeste sous la forme de deux vagues issues alternativement des deux pôles, qui, après avoir dépassé l'équateur s'estompent vers 22° de latitude de l'hémisphère opposé.

Les régions circumpolaires et tempérées sont soumises à l'action d'une seule vague.

Les régions équatoriales sont soumises successivement à l'action des deux vagues issues des deux pôles.

Les régions soumises à l'action d'une seule vague présentent une forte amplitude d'assombrissement temporaire (à l'exception du Mare Acidaliium). Les régions soumises à l'action des deux vagues présentent une faible amplitude d'assombrissement et restent toute l'année martienne les régions les plus sombres de la planète.

d) Durée de l'assombrissement :

D'après la figure 5 :

Dans l'hémisphère austral le début de l'assombrissement est noté vers la longitude héliocentrique de la planète de 240°, i. e. lorsque l'épaisseur du nuage recouvrant la région polaire australe atteint son maximum (table 1) ; dans l'hémisphère boréal le début de l'assombrissement est noté vers la longitude héliocentrique de 30°, c'est-à-dire également lorsque l'épaisseur du nuage polaire boréal atteint son maximum (table 1).

D'après la figure 7, la durée totale de l'assombrissement par la vague australe oscille autour de 0,50 année martienne pour les régions circumpolaires et 0,40 année martienne pour la latitude de 25° de l'hémisphère opposé où s'estompe cette vague.

Dans l'hémisphère boréal la durée totale de l'assombrissement oscille entre 0,67 année martienne pour les régions circumpolaires et 0,55 pour la latitude de 25° de l'hémisphère opposé où s'estompe la vague boréale.

La durée totale de l'assombrissement décroît donc depuis les pôles en direction de l'équateur, étant plus longue dans l'hémisphère boréal d'environ 0,15 année martienne.

e) Décalage du maximum d'assombrissement :

D'après la figure 7 :

Aux deux hémisphères et dans les régions circumpolaires et tempérées le maximum d'assombrissement

ment a respectivement lieu en moyenne entre 0,35 et 0,30 année martienne après le début de l'assombrissement.

Dans la région équatoriale le maximum a lieu après le début de l'assombrissement entre 0,30 et 0,15 année martienne cette dernière valeur correspondant à l'équateur.

Le maximum d'assombrissement s'établit deux fois plus vite environ sur les régions qui se trouvent sous l'influence successive des deux vagues ; celles-ci sont en permanence les régions les plus sombres de la planète par rapport aux régions influencées temporairement seulement par une seule vague d'assombrissement.

f) *Vitesse de propagation de l'assombrissement :*

La propagation du début de l'assombrissement en latitude se fait à une vitesse variable autour d'une valeur moyenne de 35 km par jour terrestre.

g) *Distribution de l'assombrissement en longitude :*

D'après la figure 8 les vagues d'assombrissement se propagent en longitude uniformément en suivant des méridiens. La densité des hachures montre

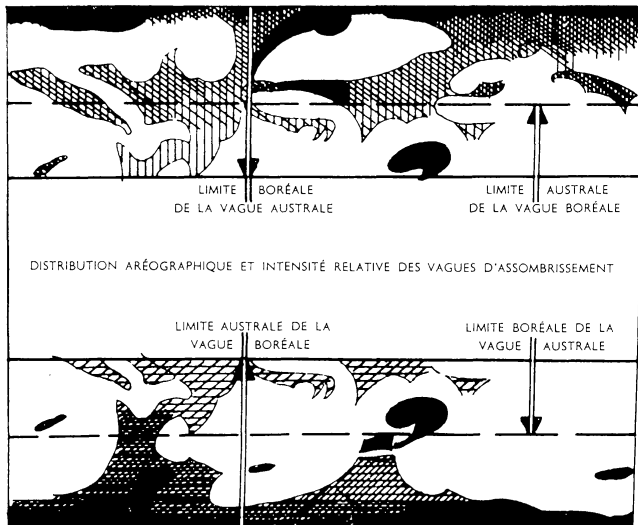


FIG. 8. — *Distribution de l'assombrissement en longitude.* L'assombrissement se propage uniformément en suivant des méridiens. La densité des hachures en montre l'importance (d'après l'auteur).

l'importance locale de l'assombrissement dans chacun des hémisphères depuis les pôles jusqu'à 25° de latitude de l'hémisphère opposé. Les régions d'Helespontus — Pandorae Fretum dans l'hémisphère austral et Niliacus Lacus — Nilokeras — Lunae Palus dans l'hémisphère boréal, marquent éventuellement des lieux de préférence de la propagation de l'assombrissement.

h) *Régions à variation d'éclat particulière :*

La figure 9 montre la variation de l'éclat des

régions demi-ton de Argyre, Phaethontis, Electris, Eridania, Hellas et Noachis, au cours de l'année martienne.

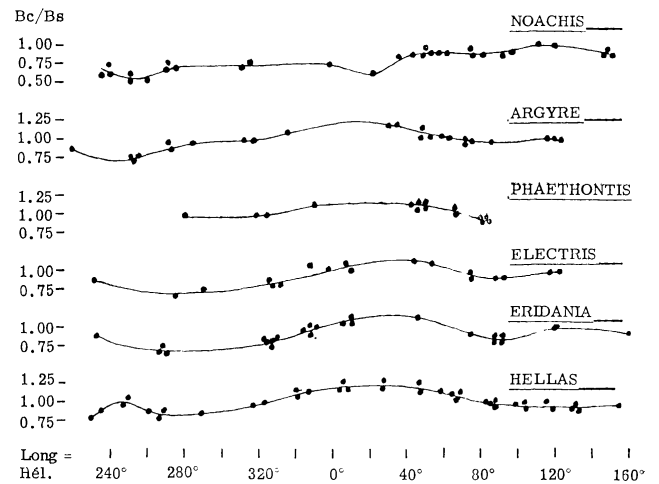


FIG. 9. — *Régions à variation d'éclat particulière ; leur polarisation au cours de l'été austral semble indiquer la présence de légers dépôts de givre ; la régression du dépôt sur Hellas s'effectue depuis sa bordure australe en direction de l'équateur (d'après l'auteur).*

Ces régions montrent un léger assombrissement qui suit le cycle précité jusqu'au début de l'été. Au cours de l'été ces régions blanchissent fortement et leur polarisation (— 3 à — 4 millièmes) pour l'angle de vision de 15° semble indiquer la présence d'un léger dépôt de givre. La régression complète de ce dépôt s'effectue jusqu'au début de l'automne et le cycle de l'assombrissement se rétablit. Des mesures photométriques et de polarisation que j'ai effectuées en 1958 montrent que la régression du dépôt sur Hellas s'effectue depuis la bordure australe de cette région en direction de l'équateur. J'ai vérifié ce phénomène en examinant la collection des clichés de Mars pris au Pic-du-Midi depuis 1941. La région de Noachis suit le cycle d'assombrissement des autres régions et se recouvre d'un léger dépôt de givre depuis la fin de l'été jusqu'au milieu de l'automne austral. La présence de dépôts de givre sur ces régions pourrait être liée au relief (hauts plateaux).

i) *Le cycle d'assombrissement étudié par la polarisation :*

Une série d'observations polarimétriques effectuées par A. DOLLFUS et moi-même aux observatoires du Pic-du-Midi et d'Athènes au cours des douze dernières années, comprenant 3700 mesures, a permis à A. DOLLFUS [13], [16] d'étudier le cycle d'assombrissement saisonnier des régions sombres de Mars.

Sur la figure 10 les courbes à trait fin représentent l'évolution de l'assombrissement étudié

par la photométrie dans le présent travail et les deux courbes à trait épais la même évolution étudiée par la polarisation.

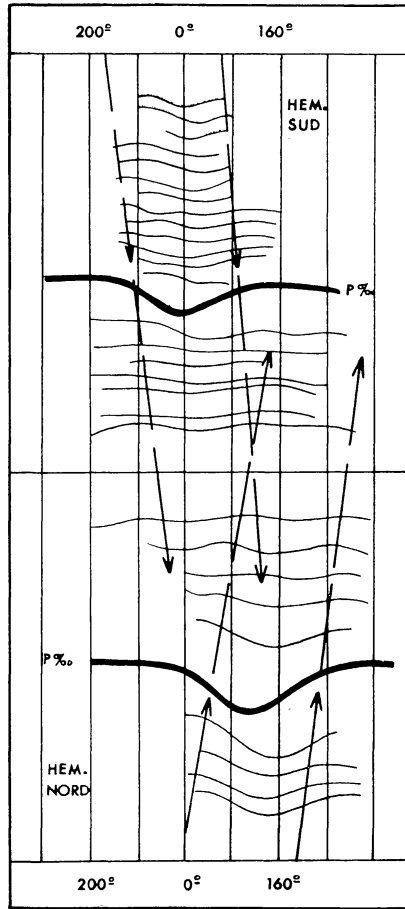


FIG. 10. — Comparaison des résultats polarimétriques et photométriques sur l'évolution saisonnière de l'assombrissement des régions sombres de Mars.

Courbes à trait fort : polarisation d'après A. DOLLFUS.
Courbes à trait fin : photométrie d'après J. FOCAS.

STRUCTURE FINE DES RÉGIONS SOMBRES.

Les observations photographiques et visuelles combinées que j'ai effectuées à l'Observatoire du Pic-du-Midi à l'aide d'un réfracteur de 60 cm d'ouverture et de 18 m de distance focale par des images souvent parfaites et grossissements jusqu'à 1200 x m'ont permis de dresser les cartes 11 et 12 et d'étudier la structure fine des régions sombres de Mars.

Cette étude permet de déterminer :

a) Comment se présente la structure fine des régions sombres avant et pendant leur assombrissement saisonnier.

b) Si la position et les dimensions des taches individuelles contenues dans les régions sombres varient au cours de l'année martienne.

c) Dans quelle mesure les éléments d'intensité variable contenus dans les régions sombres sont

responsables de l'assombrissement saisonnier de ces dernières.

Au cours du *minimum* d'assombrissement, la structure fine des régions sombres de Mars se présente comme il suit : *Un fond d'une tonalité profonde d'apparence granulaire parsemé de taches sombres de diverses grandeurs ; celles-ci constituent les noyaux fondamentaux de la matière recouvrant ces régions.*

Au cours du *maximum* d'assombrissement les régions sombres dans toutes les latitudes montrent en général *une tonalité à peu près uniforme*. Au cours de cette phase, les noyaux restent visibles, la différence de leur tonalité par rapport à celle des interstices étant faible.

Les noyaux *conservent plus ou moins la même position* dans les régions sombres indépendamment de la phase du cycle d'assombrissement et ne disparaissent en général jamais. Des observations analogues effectuées au cours d'apparitions précédentes par A. DOLLFUS confirment ce fait.

La carte de la figure 11 montre la structure fine des régions sombres de Mars d'après mes observations photographiques et visuelles au Pic-du-Midi entre le 2 novembre et le 2 décembre 1958, sous un diamètre apparent de la planète d'environ 19".

La phase d'assombrissement des régions par rapport à la propagation saisonnière pendant la période couverte par les observations se présente comme suit :

Les régions circumpolaires et tempérées australes montrent leur minimum d'assombrissement. Des noyaux épars de matière sombre restent visibles sur un fond plus clair. L'action de la vague australe a cessé. Ces régions montrent de fortes fluctuations d'intensité au cours du cycle saisonnier et sont influencées d'une seule vague. *Les noyaux sombres sont de grandeur petite ou moyenne.*

Les régions équatoriales se montrent un peu après leur maximum d'assombrissement ; elles sont constituées de noyaux sombres *de grandes dimensions* séparés par des interstices faibles. Ces régions sont alternativement affectées par les deux vagues d'assombrissement, montrent de faibles fluctuations d'intensité et *restent les régions les plus sombres* au cours de l'année martienne.

Les régions tempérées boréales se trouvent être au début de leur assombrissement saisonnier sous l'action de la vague boréale dont la propagation commence.

La carte de la figure 12, montre la structure fine des régions sombres de Mars d'après mes observations photographiques et visuelles effec-



FIG. 11. — *Structure fine des régions sombres de Mars. Observations par l'auteur au Pic-du-Midi. Opposition de 1958.*

Régions circumpolaires et tempérées australes. L'action de la vague d'assombrissement australe cesse ; des noyaux de matière sombre persistent sur un fond demi-fon.

Régions équatoriales peu après leur assombrissement maximum ; elles montrent en permanence des noyaux très sombres de plus grandes dimensions séparés par des interstices faibles. Région soumise à l'action des deux vagues d'assombrissement.

Régions tempérées boréales. L'action de la vague d'assombrissement boréale commence ; détails faibles ; canaux à peine visibles.

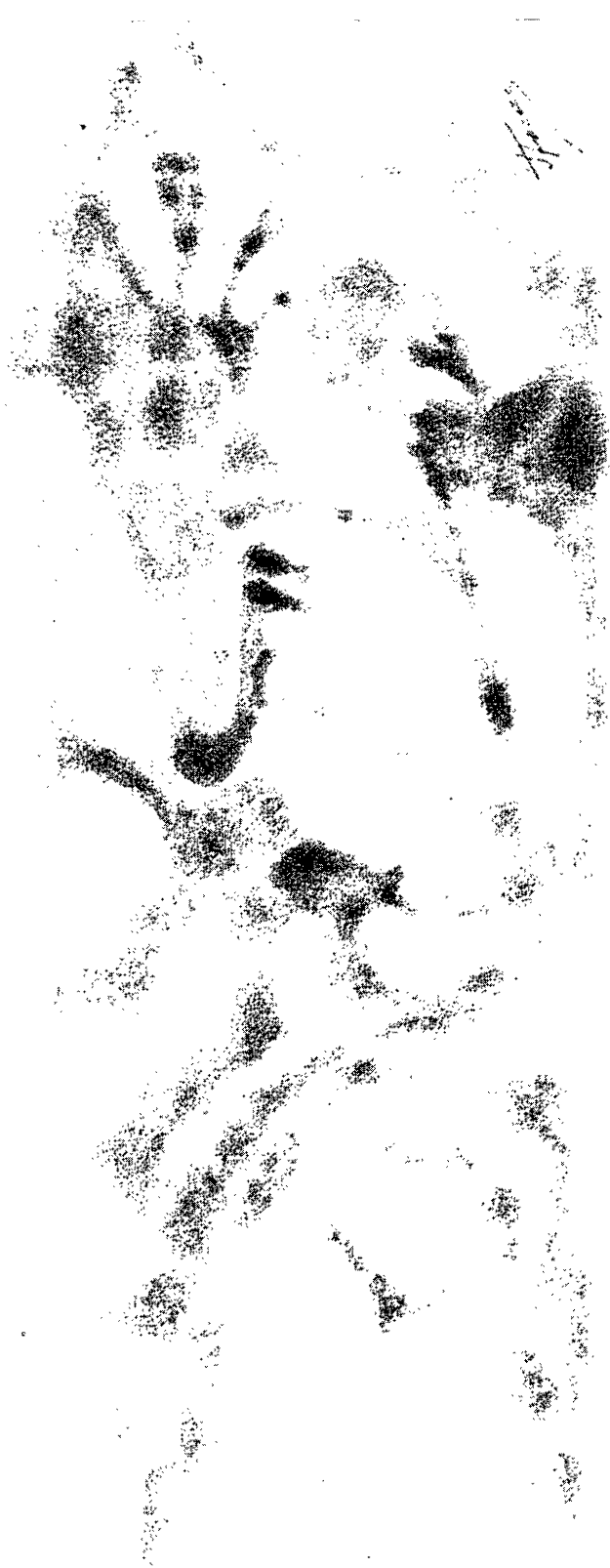


FIG. 12. — *Structure fine des régions sombres de Mars. Observations par l'auteur au Pic-du-Midi. Opposition de 1960-1961.*

Régions tempérées australes. État de sécheresse avancée; noyaux faibles séparés par des interstices demi-ton.

Régions équatoriales; noyaux très sombres de plus grandes dimensions.

Régions tempérées et circumpolaires boréales; Maximum d'assombriement sous l'action de la vague boréale; noyaux très sombres de grandes dimensions séparés par des interstices faibles; canaux très prononcés.

tuées au Pic-du-Midi entre le 12 janvier et 15 février 1961, sous un diamètre apparent de la planète d'environ $13''$.

Les régions sombres dans l'hémisphère austral se trouvent dans un état de sécheresse avancée (automne) et présentent des noyaux faibles séparés par des interstices demi-ton ; les très petits noyaux sombres observés dans ces régions à la fin du printemps ou en été sont invisibles. Les grands noyaux conservent pratiquement les mêmes positions aréographiques par rapport à celles observées au cours des oppositions précédentes.

Les régions équatoriales soumises à l'action de la vague boréale montrent des noyaux sombres des plus grandes dimensions.

Les régions sombres de l'hémisphère boréal atteignent leur assombrissement maximum sous l'action de la vague boréale et présentent une tonalité presque uniforme ; des noyaux sombres de grandes dimensions sont séparés par des interstices étroits.

Les « canaux » sont très prononcés sous l'action de la vague boréale.

En général, la structure fine des « canaux » est granulaire et suit le cycle saisonnier des régions sombres.

La distribution aréographique par grandeurs des noyaux, considérés comme étant les éléments fondamentaux des régions sombres, montre que leur grandeur dépend de la durée de l'action des vagues d'assombrissement.

CONCLUSION

Dans le présent travail, le cycle saisonnier des phénomènes présentés par les calottes polaires et les régions sombres de Mars, a été étudié à l'aide de longues séries d'observations polarimétriques directes sur la planète et photométriques sur des clichés en laboratoire. L'abondance et l'homogénéité du matériel d'observation dont j'ai disposé m'ont permis d'établir des données numériques et de déterminer les phases du cycle saisonnier dont il s'agit, avec une précision supérieure à celle obtenue jusqu'ici par d'autres spécialistes moins favorisés à l'égard du matériel disponible.

Les principaux résultats nouveaux sont les suivants :

A) Calottes polaires :

1. Des condensations de cristaux de glace se révèlent en permanence sur les régions circumpolaires et polaires de la planète.

2. Le nuage polaire devient visible un quart d'année martienne après la fonte complète du dépôt polaire du cycle précédent.

3. Le nuage polaire atteint sa plus grande opacité 0,11 année martienne après le début de sa formation. Le dépôt polaire semble se former au cours de cette période aux dépens du nuage.

4. Le commencement de l'amincissement du nuage polaire boréal et l'apparition du dépôt par transparence ont lieu 0,10 année martienne avant l'équinoxe du printemps.

5. Le commencement de l'amincissement du nuage polaire austral a lieu au début du printemps et présente un retard d'environ 0,11 année martienne par rapport à la phase correspondante du nuage boréal.

6. La durée de vie du nuage boréal visible,

s'élève à 0,25 année martienne environ. Celle du nuage austral 0,18 environ.

7. Les nuages hivernaux recouvrant les calottes polaires ont un facteur de diffusion oscillant entre 0,48 et 0,50 qui correspond à celui d'un nuage de Cirro-Stratus.

8. Les dépôts polaires hivernaux dégagés des nuages ont un facteur de diffusion oscillant entre 0,60 et 0,64 qui correspond à celui d'un dépôt de neige ou de givre.

B) Evolution des taches sombres :

9. Les mesures photométriques couvrent presque une révolution entière de la planète et permettent l'étude complète du cycle saisonnier de la variation de la brillance des régions sombres.

10. Un assombrissement saisonnier se manifeste sous la forme de deux vagues issues alternativement des deux pôles, qui après avoir passé l'équateur, s'estompent à 22° environ de latitude aréographique dans l'hémisphère opposé.

11. L'amplitude de l'assombrissement présente une diminution prononcée depuis les pôles vers l'équateur et tend vers zéro aux latitudes aréographiques de 25° environ de l'hémisphère opposé.

12. Les régions circumpolaires et tempérées sont soumises seulement à l'action de la vague d'assombrissement issue du pôle correspondant.

13. Les régions équatoriales sont successivement intéressées par les deux vagues issues des deux pôles et constituent les régions les plus sombres de la planète.

14. Le début de l'assombrissement est noté lorsque l'épaisseur du nuage recouvrant la calotte correspondante atteint son maximum.

15. La durée totale de l'assombrissement décroît depuis les pôles en direction de l'équateur, étant plus longue dans l'hémisphère boréal d'environ 0,15 année martienne.

16. La durée totale de l'assombrissement dans l'hémisphère austral oscille entre 0,50 près du pôle et 0,40 année martienne à l'équateur ; dans l'hémisphère boréal elle oscille respectivement entre 0,67 et 0,55 année martienne.

17. Le maximum d'assombrissement s'effectue deux fois plus vite dans les régions qui se trouvent sous l'influence de deux vagues, par rapport aux régions influencées par une seule vague d'assombrissement.

18. Les vagues d'assombrissement se propagent à une vitesse de 35 km/jour.

19. L'assombrissement se propage en général en longitude en suivant des méridiens.

20. Des régions demi-ton situées le long du 45^e parallèle austral se recouvrent saisonnièrement

d'un dépôt de givre, dont la régression s'effectue en direction de l'équateur.

21. La variation saisonnière de la brillance des régions sombres est étroitement liée aux variations saisonnières de polarisation décrites par A. DOLLFUS.

C) *Structure fine des taches sombres.*

22. La structure fine des régions sombres de Mars montre un fond d'une tonalité profonde, parsemé de noyaux sombres.

23. Les noyaux sombres se reconnaissent aux mêmes emplacements, dans les régions sombres, leur tonalité ainsi que celle des interstices étant variables, au cours du cycle saisonnier.

24. Les dimensions des noyaux dépendent de la durée de l'action des vagues d'assombrissement. Les régions équatoriales traversées par deux vagues, contiennent les noyaux de plus grandes dimensions.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] ANTONIADI E. M., *La planète Mars*, Herman, 1930.
- [2] BARABASCHEFF N. P. et SEMEJKIN D., 1904, *Zeitschrift für Astrophysik*, **8**.
- [3] BARABASCHEFF N. P. et TIMOSHENKO J., 1940, *Astron. Journal U. R. S. S.*, **17**.
- [4] CAMICHEL H., 1955, *Thèse, Bulletin Astronomique*.
- [5] DOLLFUS A., 1957, *C. R.*, **244**, 1458.
- [6] DOLLFUS A., 1956, *C. R.*, **243**, 1833.
- [7] DOLLFUS A., 1957, *C. R.*, **244**, 162.
- [8] DOLLFUS A., 1957, *C. R.*, **244**, 1458.
- [9] DOLLFUS A., 1955, *Thèse. Suppl. Annales d'Astrophysique*.
- [10] DOLLFUS A., 1960, *C. R.*, **250**, 463.
- [11] FESSENKOFF B. G., 1944, *Astron. Journal U. R. S. S.*, **21**.
- [12] FOCAS J. H., 1958, *C. R.*, **246**, 1665.
- [13] FOCAS J. H., 1959, *C. R.*, **248**, 1626.
- [14] FOURNIER G., 1946, *Observ. des Surf. Planétaires* 1926, **7**, 10.
- [15] FRITZ J., *Compendium of Meteorology*, Boston 26.
- [16] GOETZ P., 1927, *A. N.*, **230**, 554.
- [17] KUIPER G. P., 1949, *Contr. McDonald Observatory*, n° 161.
- [18] LOWELL P., 1909, *Mars et ses Canaux*, Paris.
- [19] LYOT B., *Thèse, Annales Observ. de Meudon*, **8**.
- [20] NEIBURGER J., *Meteorology*, **6**, 98.
- [21] RADLOWA L. N., 1940, *Astr. J. U. R. S. S.*, **17**.
- [22] SCHIAPARELLI, BARNARD, FLAMMARION, FOURNIER, LOWELL, MAGGINI, PICKERING, SLIPHER, etc.
- [23] SHARONOW W. W., 1941, *Poukovo Observ. Circ.* n° 52.
- [24] TIKHOFF, 1911, *Mitt. Poulkovo*, **4**, fasc. 6, n° 42.
- [25] VAUCOULEURS G. DE, 1950, *Physique de la planète Mars*. Albin Michel.