

ÉTUDE PHOTOMÉTRIQUE DES STRUCTURES FINES DE LA PÉNOMBRE D'UNE TACHE SOLAIRE

R. MULLER

Observatoire du Pic du Midi, 65 Bagnères de Bigorre, France*

(Received 25 June, 1973)

Resumé. L'analyse microphotométrique des structures fines de la pénombre d'une tache solaire, photographiée en lumière blanche au Pic du Midi avec une résolution de l'ordre de 0'3, permet d'en donner, à $\lambda 5280$, l'image suivante: elle est constituée d'un fond sombre (espaces interfilamentaires) de brillance $I_a/I = 0.6$ à peu près uniforme, avec un léger gradient radial, sur lequel se détachent des grains brillants alignés en filaments, de brillance moyenne $I_b/I = 0.95$, de largeur moyenne 0'36 (270 km) et qui recouvrent 43% de sa surface.

Abstract. The microphotometric analysis of the fine structure of a sunspot penumbra, photographed in white light with the 38 cm refractor of the Pic du Midi Observatory with a resolution very close to 0'3, allows to give from it, at $\lambda 5280$, the following picture: the penumbra appears to consist of bright grains, lined up in the form of filaments, with an average brightness $I_b/I = 0.95$ of average width 0'36 (270 km) and which cover 43% of its surface, showing up a dark background of brightness $I_a/I = 0.6$ nearly uniform.

1. Introduction

Généralement les observations des taches solaires ne se font pas avec une résolution suffisante pour en permettre l'étude des structures fines, qui est pourtant fondamentale pour leur compréhension. Cependant en lumière blanche, on arrive à les résoudre (Danielson, 1961; Krat *et al.*, 1972; Muller, 1973). Dans un premier article nous avons fait une étude morphologique et cinématique de la pénombre d'une tache. Mais pour expliquer de façon plausible les phénomènes observés, la connaissance de la structure physique fine fait défaut.

L'étude microphotométrique sur des clichés en lumière blanche, de haute résolution, permet d'en connaître la structure fine d'une de ces grandeurs physiques: la brillance (et donc la température, au niveau du continu). Dans cet article nous nous attachons principalement à l'étude de la pénombre en déterminant les brillances *réelles* des éléments qui la composent, c'est à dire des filaments (alignements de grains brillants) et du fond sombre sur lequel ils se détachent (espaces interfilamentaires). Une telle étude photométrique complète n'a encore jamais été faite, Krat *et al.* n'en ayant donné récemment (1972) qu'une ébauche en analysant des photographies de haute résolution obtenues au cours du troisième vol du Solar Soviet Stratoscope. Signalons cependant que Stellmacher et Wiehr (1971) ont obtenu une valeur pour la brillance du fond pénombrial par une méthode indirecte. Notre analyse se fait sur des clichés de haute résolution de l'ordre de 0'3, voisine de la résolution théorique de l'instrument, obtenue le 5 juillet 1970 à l'Observatoire du Pic du Midi, à travers un filtre de bande passante de 100 Å de large, centrée sur 5280 Å.

* Ce travail a été en grande partie réalisé alors que l'auteur faisait un séjour à l'Universitäts Sternwarte de Göttingen.

2. Détermination des brillances réelles

2.1. PHOTOMÉTRIE

Les enregistrements densitométriques ont été faits avec le microphotomètre digitalisé de l'Universitäts Sternwarte de Göttingen, en utilisant une fente de 0'04 de large et un pas de 0'07. Ils ont été transformés en intensités relatives à l'intensité moyenne de la photosphère par l'intermédiaire de la caractéristique du film dont le γ est de 5.5 (film Kodak, Microfile Orthochromatique, PE 009, développé au D 11 pendant 6 min

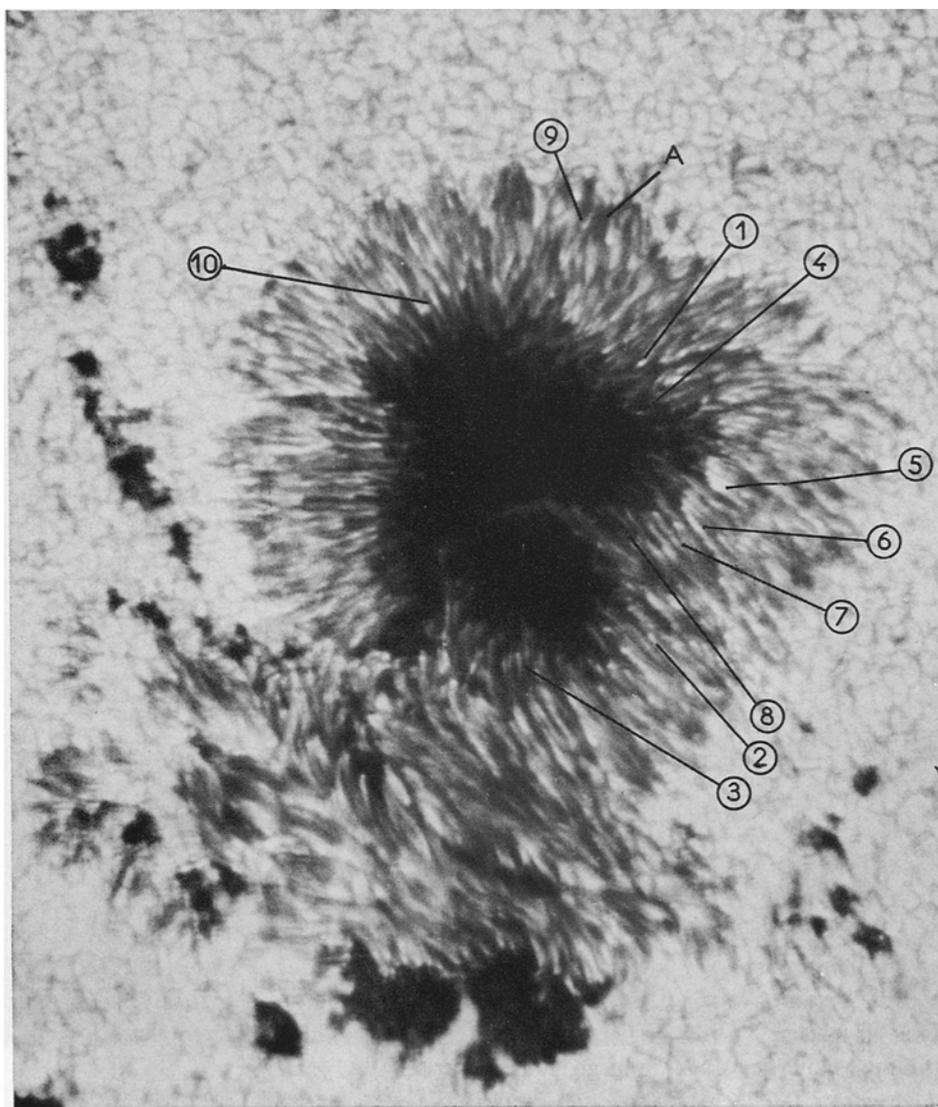


Fig. 1. Identification des grains pénombraux étudiés, A: plage pénombrale sombre.

30 s). Dans une première étape on a choisi 10 grains suffisamment individualisés et bien représentatifs de l'allure générale des phénomènes et offrant d'autre part un certain échantillonnage du point de vue de leur brillance maximale (Figure 1). Ces grains ont été analysés dans leurs deux dimensions, de façon à permettre la correction des effets de la détérioration de l'image et de la diffusion (fonction de correction). La comparaison des brillances corrigées ainsi obtenues avec les brillances observées des mêmes grains montre, comme nous le verrons plus loin, que, pour faire une étude plus complète de la distribution des brillances dans la pénombre, on peut se contenter d'enregistrements unidimensionnels perpendiculaires aux filaments.

2.2. DÉTERMINATION DES PROFILS CORRIGÉS

Elle est basée sur l'utilisation du programme de calcul de Wittmann (1971) qui est

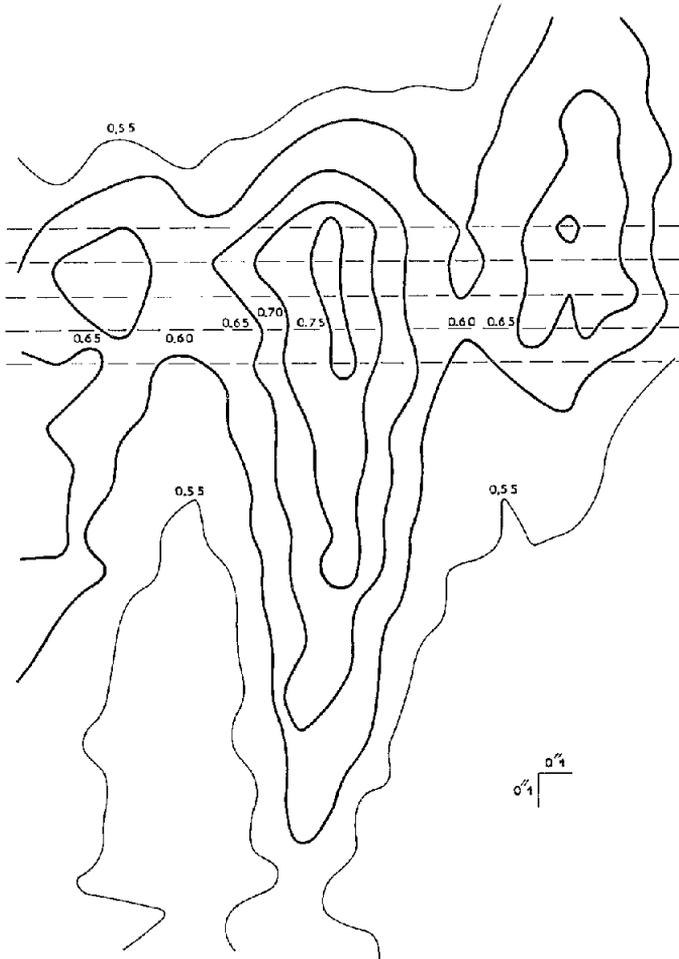


Fig. 2. Carte isophote du grain pénombrial No. 3. Les cinq droites en tirets représentent la position des profils transversaux qui ont été corrigés et dont on a tiré le profil moyen.

simple et pratique, mais qui présente dans notre cas particulier deux inconvénients: d'une part la longueur du temps de calcul force à n'utiliser pour les corrections que des points suffisamment espacés, ce qui réduit la précision et, pour chaque grain, limite la correction à quelques profils transversaux seulement; d'autre part, comme le font remarquer Wittmann (1971) et Bloss *et al.* (1971), les points où la courbure du profil transversal est relativement forte (Figure 5) sont surcorrigés et le bruit fortement amplifié, et ce d'autant plus que les points de mesure sont espacés. Ainsi, après correction, les valeurs les plus intéressantes (maximum et minimum du profil) ne sont en fait que mal restitués. Nous avons donc été conduits à procéder comme suit pour obtenir les profils transversaux corrigés: pour atténuer le bruit, on prend la moyenne de cinq profils transversaux voisins autour du profil qui atteint l'intensité maximum, ce qui est légitime du fait que le gradient de brillance des grains dans le sens radial est faible (Figure 2); puis, sachant que les valeurs du maximum et des minima adjacents sont surcorrigés, on détermine un premier profil approché par la méthode de Wittmann, dont on fait le produit de convolution par la fonction de correction; on

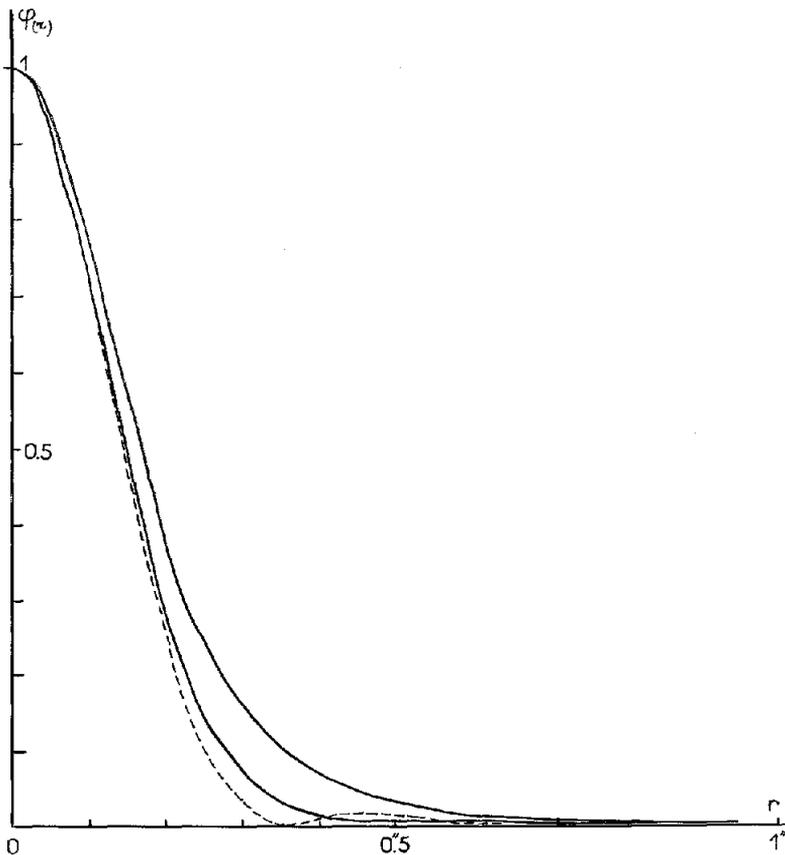


Fig. 3. Fonctions de correction $\varphi_m(r)$ et $\varphi_M(r)$ (—) et profil théorique de l'instrument (---).

l'ajuste ensuite empiriquement de façon à ce que le profil obtenu coïncide avec le profil observé.

2.3. DÉTERMINATION DE LA FONCTION DE CORRECTION

La fonction de correction exacte n'est évidemment pas connue, mais il est possible de trouver une fonction de correction minimale et une fonction de correction maximale qui fournissent des limites entre lesquelles doivent se trouver les intensités réelles. Ces fonctions sont prises de la forme:

$$\varphi(r) = N[(1 - A) e^{-(r/a)^2} + A e^{-(r/b)^2}]$$

où le premier terme donne essentiellement le cœur, et le second terme les ailes, de la fonction. N est un facteur de normalisation. Comme la résolution obtenue sur les clichés est voisine de la résolution théorique de l'instrument, on prendra pour cœur le profil théorique, ce qui fixe a : $a = 0''.177$ (Figure 3).

Fonction de correction minimale (φ_M). Elle est choisie telle que ses ordonnées aux abscisses des premier et second maximum secondaires de la fonction d'Airy soient égales à la moitié de ces maximums, d'où $A = 0.022$ et $b = 0''.4$.

Fonction de correction maximale (φ_M). Elle est déterminée (ou plutôt ses ailes) par des considérations physiques: on suppose seulement que l'intensité réelle dans l'ombre de la tache ne diminue pas lorsqu'on s'éloigne de son centre. On étudie alors l'effet de la fonction de correction sur l'espace interfilamentaire à droite du filament 8 (Figure 1), car il se prolonge directement par l'ombre et est suffisamment long. L'intensité observée y est croissante lorsqu'on avance dans la pénombre (Figure 4). Pour une fonction de correction φ donnée, on fait la correction en plusieurs points dans cet espace interfilamentaire, en remarquant qu'à $1''$ de l'extrémité du filament, dans l'ombre, l'intensité n'est plus modifiée par la correction. Cette intensité, égale à 0.18, (toutes les intensités sont rapportées à l'intensité moyenne de la photosphère), est prise comme référence, et d'après notre hypothèse, les intensités plus avant dans

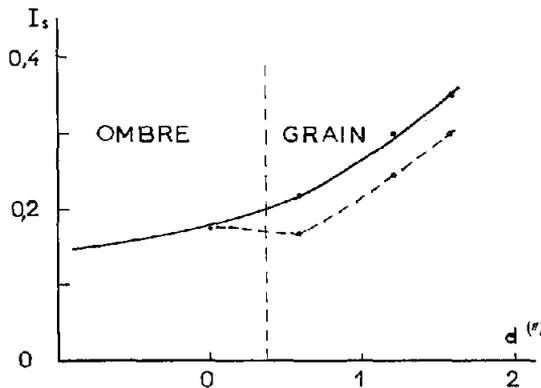


Fig. 4. Profil longitudinal de l'espace interfilamentaire à droite du grain No. 8 et de son prolongement dans l'ombre. Profil observé (—) et corrigé par φ_M (-----).

la pénombre ne doivent pas être abaissées au dessous de cette valeur lorsque les ailes de la fonction augmentent, ce qui limite cette fonction à une valeur que nous prendrons pour ϕ_M , d'où $A=0.242$; $b=0.4$. D'autres combinaisons A, b auraient été tout aussi plausibles (car b a en fin de compte assez peu d'influence), mais étant donné qu'à l'échelle des filaments c'est le cœur de la fonction qui est prépondérant, les résultats auraient été peu modifiés, d'autant plus qu'ils ne visent qu'à des valeurs limites.

Ces deux fonctions ϕ_m et ϕ_M sont appliquées à chacun des 10 profils transversaux

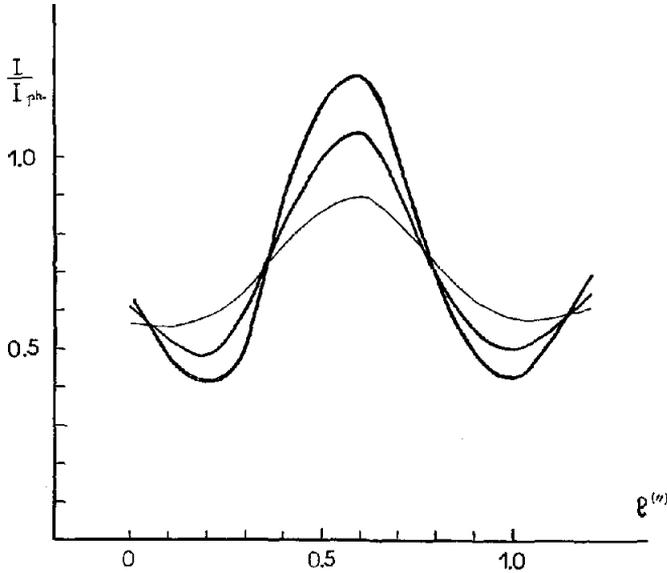


Fig. 5. Profils transversaux, observé (—) et corrigés par ϕ_m (---) et ϕ_M (-·-) du grain No. 1.

TABLEAU I

Intensités observées et corrigées des 10 grains pénombraux étudiés: I_b^o et I_s^o représentent les intensités observées au maximum et aux minima de chaque profil transversal; I_b^m et I_b^M sont leurs valeurs corrigées par les fonctions minimale ϕ_m et maximale ϕ_M ; I_b et I_s représentent les valeurs moyennes entre les intensités corrigées minimale et maximale précédentes

Filament No.	I_b^o	I_b^m	I_b	I_b^M	I_s^o	I_s^m	I_s	I_s^M	I_s^o	I_s^m	I_s	I_s^M
1	0.905	1.07	1.15	1.22	0.56	0.48	0.45	0.42	0.58	0.50	0.47	0.43
2	0.84	1.00	1.07	1.14	0.70	0.64	0.59	0.53	0.69	0.63	0.62	0.61
3	0.71	0.76	0.80	0.84	0.56	0.52	0.49	0.46	0.56	0.52	0.49	0.46
4	0.68	0.88	1.03	1.18	0.28	0.28	0.28	0.28	0.30	0.30	0.29	0.28
5	1.065	1.18	1.22	1.25	0.74	0.66	0.63	0.60				
6	0.96	1.02	1.07	1.12	0.65	0.58	0.55	0.52	0.75	0.70	0.67	0.65
7	0.82	0.88	0.92	0.97	0.71	0.65	0.62	0.59	0.71	0.65	0.63	0.61
8	0.58	0.64	0.68	0.72	0.35	0.35	0.34	0.33	0.40	0.36	0.36	0.35
9	0.82	0.87	0.90	0.92	0.68	0.62	0.60	0.58	0.63	0.62	0.62	0.62
10	0.86	0.92	1.00	1.06	0.64	0.58	0.55	0.52	0.58	0.55	0.50	0.50

observés pour lesquels sont ainsi obtenus deux profils limites, le profil réel de chacun d'eux se situant entre ces deux extrêmes (Figure 5). Le Tableau I donne l'intensité maximale corrigée de chacun de ces 10 grains et les intensités corrigées dans les espaces interfilamentaires adjacents. On remarque que l'intensité moyenne de la photosphère est souvent atteinte, et même parfois nettement dépassée (1.22) par certains grains. Pour la suite du travail I^o désignera des intensités observées, I des intensités corrigées et les valeurs moyennes entre les intensités maximales et minimales seront prises comme intensités réelles. Les I_b représenteront des intensités de grains brillants (maximales ou moyennes) et les I_s des intensités dans les espaces interfilamentaires.

En portant sur un graphique I_b en fonction de I_b^o et I_s en fonction de I_s^o (Figure 6)

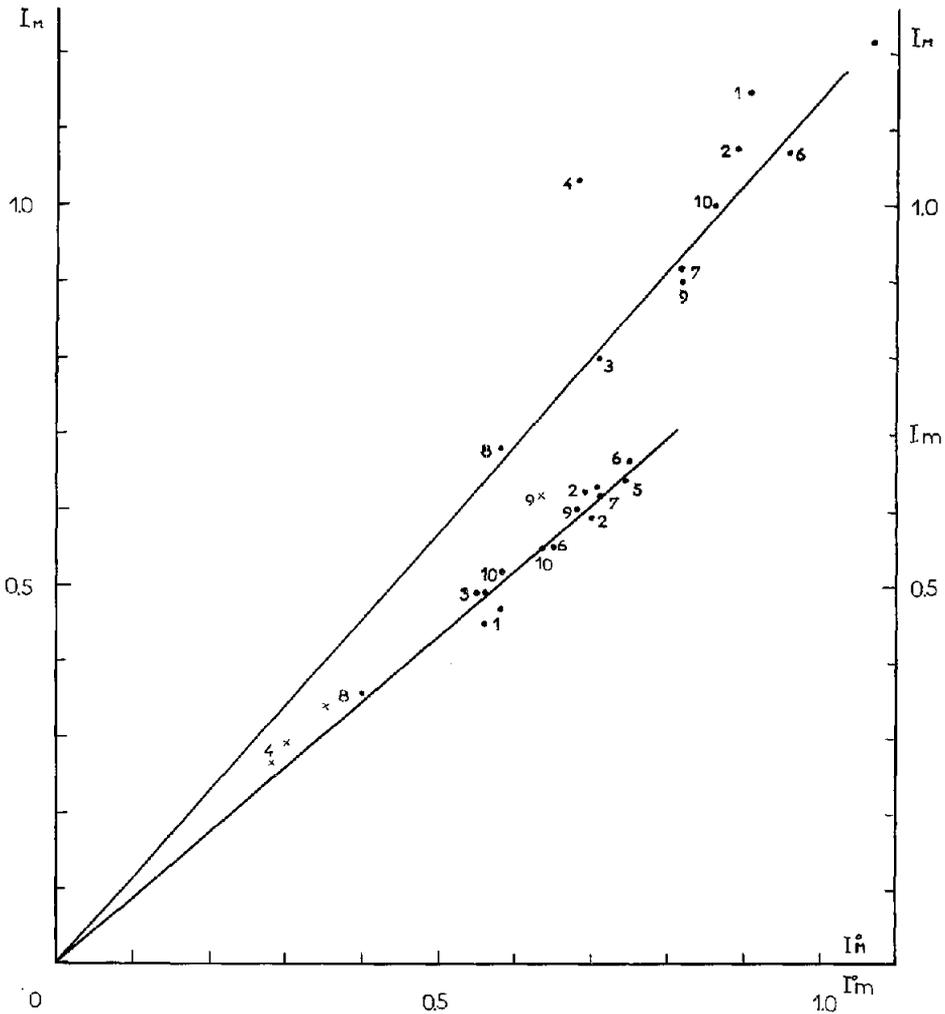


Fig. 6. Proportionnalités entre les intensités observées (maximales I_M^o et minimale I_m^o) et les intensités corrigées (I_M et I_m) par $\bar{\varphi}$, fonction de correction moyenne entre φ_m et φ_M .

on constate que les points représentatifs sont pratiquement alignés (c'est à dire que les I sont proportionnels aux I^o), du moins pour les grains qui sont à une distance moyenne des grains adjacents; par contre, les points correspondant aux grains 1 et 4 (pour les I_b) et aux grains 4, 8, 9 (pour les I_s), qui sont entourés par des espaces interfilamentaires plus larges que la moyenne, sortent de l'alignement. Une telle proportionnalité avait déjà été constatée et utilisée par J. Rösch (1959) entre les constrates corrigés et observés des granules photosphériques. La propriété des intensités réelles d'être proportionnelles aux intensités observées est très avantageuse car elle permet d'obtenir la distribution des brillances réelles dans la pénombre, simplement à partir des brillances relevées sur des enregistrements linéaires pénombraux *perpendiculaires* aux filaments. Dans le but de comparer les propriétés photométriques de la pénombre intérieure et de la pénombre extérieure, de tels enregistrements linéaires ont été effectués dans ces deux régions.

3. Résultats: Distribution des brillances dans la pénombre

3.1. INTENSITÉ DU FOND DE LA PÉNOMBRE

La moyenne des intensités dans les espaces interfilamentaires relevées sur les enregistrements linéaires (en éliminant de ces espaces ceux qui se trouvent entre deux grains trop rapprochés ou trop éloignés et qui s'écartent donc des conditions normales d'environnement) fournit l'intensité moyenne corrigée dans les espaces interfilamentaires: $I_s=0.62$ dans la pénombre extérieure et $I_s=0.54$ dans la pénombre intérieure. Les intensités au centre de plages pénombrales (Figure 1) de dimensions supérieures à $1''.5$, qui ne sont pratiquement pas modifiées par la correction, sont comprises entre 0.58 et 0.63 dans la pénombre extérieure et 0.50 et 0.55 dans la pénombre intérieure, ce qui confirme les résultats précédents. On peut cependant en conclure que la fonction de correction moyenne $\bar{\varphi}$ utilisée jusqu'ici est légèrement sous-estimée par rapport à la fonction de correction réelle φ . Pour la suite du travail c'est cette dernière qui sera utilisée. Les enregistrements sur la pénombre extérieure se situent en moyenne à $4''$ de la photosphère; la pénombre y reçoit donc un peu de lumière diffusée qui n'a peut-être pas été totalement corrigée par la fonction φ . Des clichés pris au Pic du Midi au cours d'éclipses partielles par J. Rösch et ses collaborateurs le 20.5.1966 (dépouillés par M. Levy, 1971), ainsi que par R. Muller le 25. 2. 1971 par des conditions atmosphériques nettement moins bonnes, présentent un taux de lumière diffusée de 0.02 à $4''$ du bord lunaire. Ainsi l'influence de la lumière diffusée d'origine photosphérique peut être négligée. A la suite de ces remarques, on adoptera pour *intensité réelle du fond de la pénombre*:

$$\begin{array}{ll} \text{pénombre extérieure:} & I_s = 0.60 \quad \Delta\theta_s = 0.095 \\ \text{pénombre intérieure:} & I_s = 0.52 \quad \Delta\theta_s = 0.121. \end{array}$$

On peut encore noter que l'intensité du fond de la pénombre, à une distance donnée du centre de la tache, est assez uniforme car on remarque que, d'une part, les in-

tensités varient peu d'une plage sombre à une autre et que généralement, d'autre part, sur les enregistrements linéaires, l'intensité mesurée dans un espace interfilamentaire semble bien être la somme d'une quantité constante et des ailes provenant des grains brillants adjacents.

3.2. DISTRIBUTION DES GRAINS PÉNOMBRAUX EN FONCTION DE LEUR BRILLANCE MAXIMALE

La Figure 2 donne un exemple typique de la distribution des brillances sur l'étendue d'un grain, allongé et présentant un gradient radial nettement plus fort du côté de l'ombre. Nous étudierons ici la fréquence de la brillance maximale des grains dans la pénombre. La proportionnalité entre les brillances observées et corrigées permet d'obtenir cette fréquence pour les brillances corrigées à partir de celle des brillances

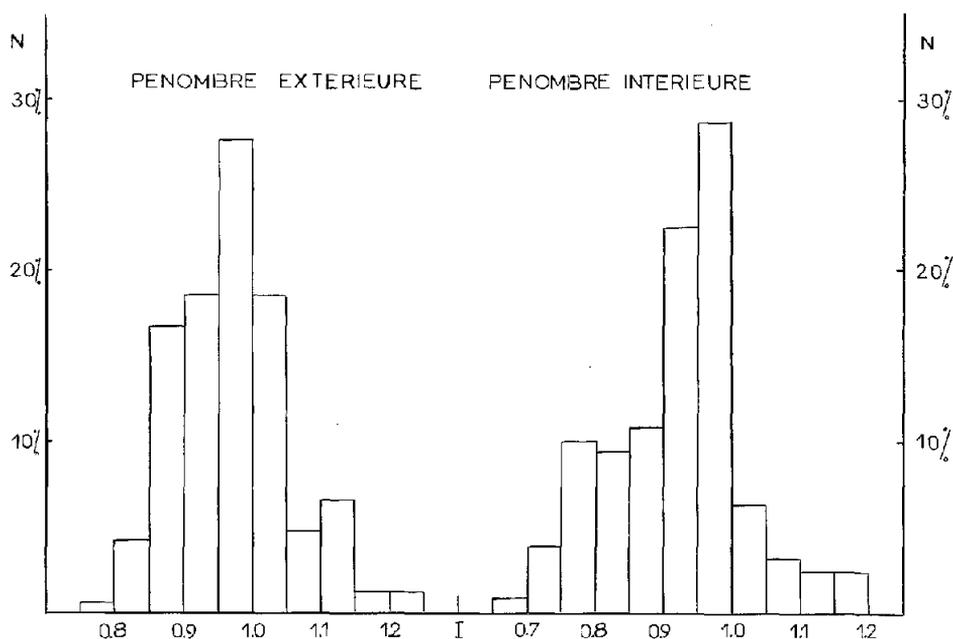


Fig. 7. Distribution des grains pénombraux en fonction de leur brillance maximale: N est le pourcentage de grains dont la brillance est comprise dans un intervalle donné.

observées tirée des enregistrements linéaires. Il faut cependant tenir compte du fait que les enregistrements linéaires ne passent pas nécessairement par le maximum d'intensité de chaque grain. Pour cela on a écarté de la statistique ceux qui étaient trop éloignés de cette condition et appliqué une correction moyenne d'intensité pour les autres. Quant à l'influence de l'amplitude du pas de mesure (0,07), elle est négligeable. Ainsi les distributions de brillance (Figure 7) montrent que ce sont les grains dont l'intensité maximale est comprise entre 0,95 et 1,00 qui sont les plus fréquents, et ce dans toute la pénombre.

3.3. INTENSITÉ MOYENNE DES GRAINS PÉNOMBRAUX

La grandeur qui entre le plus souvent en compte dans les observations courantes (rapport d'intensité des composantes Evershed, modèle de pénombre à deux composantes, etc. ...) n'est pas l'intensité maximale des grains, mais leur *intensité moyenne* \bar{I}_b . Cette dernière valeur se retrouve à partir des enregistrements linéaires puisque ceux-ci coupent chaque grain en une position quelconque de leur profil longitudinal; on obtient les valeurs \bar{I}_b corrigées suivantes par l'intermédiaire de la correspondance linéaire entre les intensités corrigées et observées:

$$\text{pénombre extérieure: } \bar{I}_b = 0.95 \quad \Delta\theta_b = 0.0094$$

$$\text{pénombre intérieure: } \bar{I}_b = 0.90 \quad \Delta\theta_b = 0.0196.$$

Ces valeurs moyennes portent respectivement sur 167 et 135 grains pénombraux. On en déduit les valeurs du *contraste moyen*:

$$\text{pénombre extérieure: } I_s/\bar{I}_b = 0.63$$

$$\text{pénombre intérieure: } I_s/\bar{I}_b = 0.61.$$

Le contraste ne varie donc pas sensiblement entre le bord de l'ombre et le bord de la photosphère.

3.4. LARGEUR ET SURFACE DES GRAINS PÉNOMBRAUX

La largeur à une intensité médiane entre les maxima et minima a une valeur observée, sur les 10 grains individuellement observés, de 0'43, tandis que leur largeur corrigée moyenne est de 0'36, soit 270 km.

Toujours à l'aide des enregistrements linéaires, d'après la largeur et le nombre des grains coupés, il est aisé d'en déduire la *surface couverte* par les grains brillants (S_b) relativement à la surface totale:

$$S_b = 0.43$$

$$S_s = 0.57.$$

On peut alors calculer l'intensité moyenne de la pénombre:

$$\bar{I} = \bar{I}_b S_b + \bar{I}_s S_s$$

$$\text{pénombre extérieure: } \bar{I} = 0.75$$

$$\text{pénombre intérieure: } \bar{I} = 0.70$$

On retrouve bien les valeurs tirées de mesures directes sur des clichés de faible résolution.

4. Conclusion

Ces résultats photométriques, associés aux observations morphologiques de cette même tache (Muller, 1973) permettent d'en compléter la description de la pénombre :

(a) elle apparaît constituée d'un fond sombre de brillance 0.6 à peu près uniforme, avec un léger gradient radial, sur lequel se détachent des grains brillants alignés en filaments, de brillance moyenne 0.95, qui recouvrent 43% de sa surface.

(b) Ces grains, qui se forment dans la pénombre elle-même, se déplacent radialement vers l'ombre, avec une vitesse horizontale qui atteint un maximum de 0.5 km s^{-1} à la limite ombre-pénombre.

(c) Ceux de durée de vie maximale (3 à 4 h) se forment vers le milieu de la pénombre, et plus ils se forment près de l'ombre, plus leur durée de vie diminue, s'abaissant à 50 min à cette même limite ombre-pénombre. La Figure 8 rassemble toutes ces caractéristiques de la pénombre d'une tache solaire

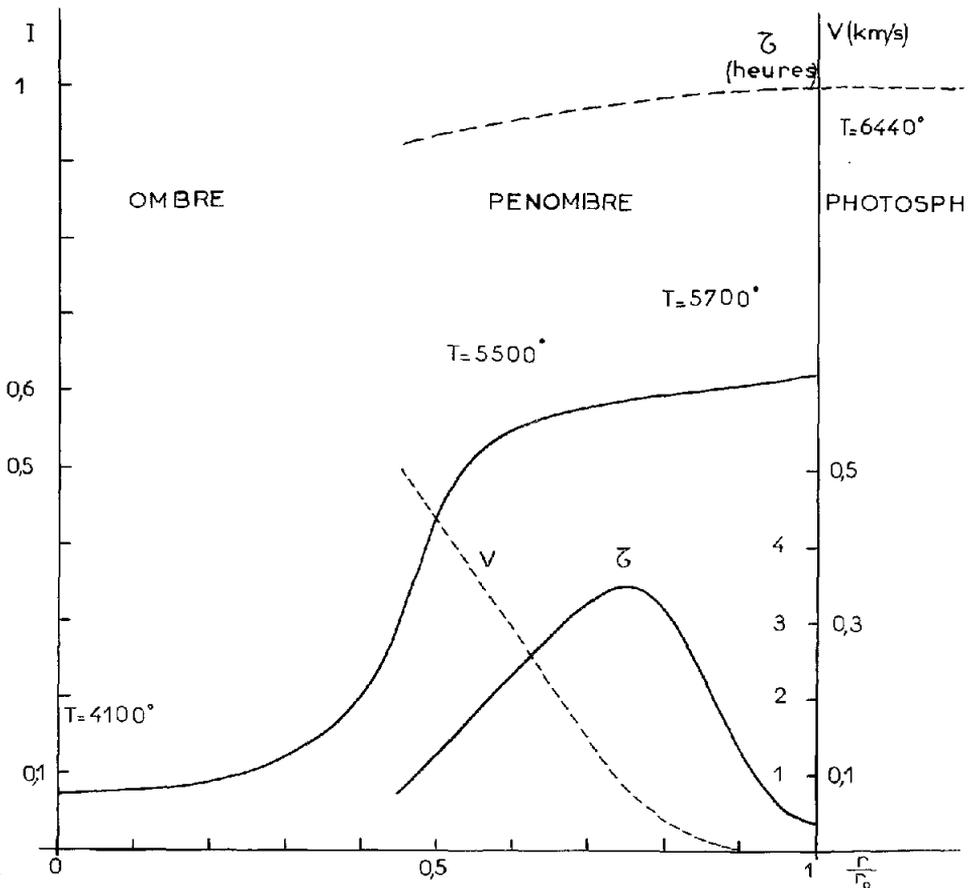


Fig. 8. Propriétés de la pénombre d'une tache solaire: profil photométrique: (—) fond sombre, (---) grains pénombraux; τ et v : distribution des durées de vie et des vitesses de déplacement des grains à travers la pénombre. r/r_0 est la distance au centre de la tache, son rayon étant l'unité.

En prenant comme référence le modèle photosphérique de Bilderberg, Gingerich *et al.*, 1968) on tire, du profil photométrique, la distribution des températures à travers la pénombre de la tache, à $\tau=1$. On constate que le fond de la tache présente un fort gradient de température dans la zone de transition entre l'ombre et les espaces interfilairentaires pénombraux. Du même coup la différence de températures entre les grains et le fond s'accroît fortement vers cette limite, où justement leur durée de vie devient minimale, tandis que leur vitesse de déplacement devient maximale. On peut se demander si cette rapide diminution de température ne joue pas un rôle dans leur vitesse de disparition.

Pour terminer il faut souligner que la haute résolution des clichés utilisés permet d'atteindre des objets qui, comme le montre clairement la carte isophote d'un grain pénombrial (Figure 2), présentent certains caractères bien définis, que la fonction de dissipation ne fait pas disparaître, dans le cas présent, parce qu'elle est assez concentrée (allongement, dissymétrie du gradient radial). Ces objets, les grains pénombraux, sont donc des individus auxquels on peut attacher des propriétés intrinsèques au même titre qu'aux granules de la photosphère non perturbée. Ce sont ces propriétés et celles du milieu dans lequel ils baignent dont il faudra poursuivre et améliorer l'observation et que tout modèle de tache, pour être réaliste, devra expliquer l'existence, la nature et l'évolution.

Remerciements

Je tiens à exprimer ici toute ma gratitude au Prof. Schröter, qui a eu l'amabilité de m'accueillir à l'Universitäts Sternwarte de Göttingen, dont le photomètre digitalisé et les moyens de calcul ont été mis à ma disposition, et pour les conseils et suggestions qu'il m'a donnés au cours de ce travail. Pendant ce séjour, financé par la DAAD, j'ai pu être intégré au sein de son équipe, ce qui m'a donné l'occasion d'avoir de nombreux et fructueux entretiens, et je tiens en particulier à remercier le Dr Wittmann, non seulement pour m'avoir si obligeamment prêté son programme de correction IMAGE, mais aussi pour l'aide qu'il m'a apportée pour la mise en route de ce travail. Enfin je remercie le Prof. Rösch, Directeur des Observatoires du Pic du Midi et de Toulouse d'avoir suivi ce travail avec autant d'attention, ainsi que pour ses conseils et encouragements.

Bibliographie

- Bloss, W. H., Bauer, K., Metz, S., et Saackel, L. R.: 1971, *Nachr. Techn. Z.* **2**, 77.
 Danielson, R. E.: 1961, *Astrophys. J.* **134**, 175.
 Gingerich, O. et De Jager, C.: 1968, *Solar Phys.* **3**, 5.
 Krat, V. A., Karpinsky, V. N., et Pravdjuk, L. M.: 1972, *Solar Phys.* **26**, 305.
 Levy, R.: 1971, *Astron. Astrophys.* **14**, 15.
 Müller, R.: 1973, *Solar Phys.* **29**, 55.
 Rösch, J.: 1959, *Ann. Astrophys.* **22**, 584.
 Stellmacher, G. et Wiehr, E.: 1971, *Solar Phys.* **17**, 21.
 Wittmann, A.: 1971, *Solar Phys.* **21**, 237.