

ÉTUDE MORPHOLOGIQUE ET CINÉMATIQUE DES STRUCTURES FINES D'UNE TACHE SOLAIRE

R. MULLER*

Fraunhofer Institut, Freiburg i.B., F.R.G.

(Received 30 May; revised 2 October, 1972)

Resumé. Une séquence de 34 photographies de la tache principale du groupe H 26 (*Daily Maps of the sun*, Freiburg 1970, Rome number 5847) a été obtenue avec le réfracteur de 38 cm, de l'Observatoire du Pic du Midi, avec une résolution égale ou très proche de $0''.3$. Un intervalle de 3h étant couvert, ces clichés, pris à environ 6 min d'intervalle, permettent l'étude des structures fines de la pénombre et des phénomènes associés:

(a) La pénombre apparaît constituée de grains brillants, généralement alignés en filaments, qui se détachent sur un fond sombre (voir Figure 1).

(b) Les grains brillants se forment dans la pénombre (voir Figure 5)

(c) Ils se déplacent vers l'ombre de la tache. Leur vitesse horizontale est nulle au bord photosphère-pénombre et maximum au bord de l'ombre (0.5 km s^{-1}) (voir Figures 3, 4 et 8). Ainsi ils ne peuvent entrer dans la photosphère ni en provenir.

(d) Ils disparaissent dans la pénombre elle-même ou bien, s'ils naissent suffisamment près de l'ombre et si leur durée de vie est assez longue, ils rentrent dans cette dernière tandis que leur aspect se rapproche de celui des points ombraux, pour finalement disparaître en s'estompant.

(e) La durée de vie des grains dépend de leur lieu d'apparition dans la pénombre: il est maximum et de l'ordre de 3 h ou plus dans la pénombre centrale, et de 50 et 40 min respectivement pour ceux formés dans les régions intérieures et extérieures de la pénombre.

Abstract. A sequence of 34 photographs of the main spot of the group H 26 (*Daily Maps of the Sun*, Freiburg 1970, Rome number 5847) has been obtained with the 38 cm refractor of the Pic-du-Midi Observatory, showing throughout a resolution very close or equal to $0''.3$. An interval of 3 hr is covered. The pictures taken at intervals of 6 min approximately permit to study the fine structure of the penumbra and associated phenomena:

(a) The penumbra appears to consist of bright grains, generally lined up in the form of filaments, showing up against a dark background (see Figure 1).

(b) The bright grains form all over the penumbra (see Figure 5).

(c) They move toward the umbra of the spot. Their horizontal velocity is zero at the border penumbra-photosphere and maximum at the umbral border (0.5 km s^{-1}) (see Figures 3, 4 and 8). Therefore, the grains never originate in the photosphere nor do they enter it.

(d) They disappear in the penumbra proper or, if they form near enough to the umbra and live long enough, they can enter the umbra and their appearance becomes similar to that of umbral dots.

(e) The life time of the grains is a function of their place of origin within the penumbra: It is maximum and of the order of 3 hr or more for those forming in the middle part of the penumbra, and 50 and 40 min respectively for the points formed in the inner and outer part of the penumbra.

1. Introduction

Une série de photographies en lumière blanche d'une tache solaire a été obtenue au moyen du réfracteur de 38 cm de l'Observatoire du Pic du Midi, avec une résolution

* Détaché des Observatoires du Pic du Midi et de Toulouse.

atteignant souvent $0''.3$, mais toujours assez voisine de cette valeur (Figure 1). Une telle résolution est nécessaire si l'on veut étudier l'évolution des structures fines de la pénombre et de l'ombre; et, au vu de la durée de vie moyenne des filaments pénombraux évaluée par Macris (1953) et Danielson (1961a) à 40 min environ, elle doit se maintenir au moins pendant 1 heure. Auparavant, seules les séries de photographies obtenues au cours du projet Stratoscope I, en 1959, atteignaient une telle résolution. Mais la durée de la séquence principale – 12 min –, à laquelle s'ajoutent quelques vues éparses, n'est pas suffisante pour faire une étude complète (Danielson, 1961; Schröter, 1962). Notre série couvre un intervalle de temps de 3 heures, les vues étant prises environ toutes les 6 min, et a ainsi permis de faire une étude descriptive et qualitative assez détaillée des phénomènes morphologiques pénombraux. Les résultats obtenus s'avèrent fondamentaux quant à la description même de l'effet Evershed.

2. Données d'observation et méthode de dépouillement

Les clichés ont été obtenus par la technique mise au point par Rösch (1957, 1959, 1962) qui permet de profiter des bonnes conditions atmosphériques se rencontrant parfois au Pic du Midi. La qualité des images variant, habituellement, très rapidement au cours du temps, des séquences d'une cinquantaine de vues sont prises avec une caméra cinématographique 35 mm à la cadence de 16 images s^{-1} , de façon à fortement augmenter les chances de saisir un intervalle d'au moins $\frac{1}{100}$ s (temps de pose utilisé) de stigmatisme et de stabilité de l'atmosphère. Parmi les vues d'une même séquence, seules les meilleures sont retenues pour notre étude. Elles constituent une série de 34 clichés de la tache principale du groupe H 26 (8 S 25 W, dans *Daily Maps of the Sun*, Freiburg; Rome No. 5847) espacées les unes des autres de 6 min en moyenne. Le champ utile représente $110'' \times 80''$ sur le soleil, c'est à dire que sur les négatifs (22×16 mm), 1 mm équivaut à $5''$. Nous avons employé un film à grain fin et à fort contraste (Microfile orthochromatique de Kodak) qui, développé au D 11 pendant 6 min 30 s, atteint un γ de 5.6.

L'étude morphologique proprement dite a été faite à l'aide d'agrandissements à l'échelle de 0.45 mm^{-1} , de ces 34 clichés originaux, sur plan-film transparent. Afin de déceler et de suivre le déplacement éventuel des éléments pénombraux, il est nécessaire de choisir un repère sur tous les agrandissements; nous en superposons deux consécutifs, la coïncidence se faisant sur la tache, et ainsi de suite; le repère sur une vue agrandie sert à tracer celui sur la suivante. Le procédé est très sensible du fait de la forme quasi-unidimensionnelle des filaments pénombraux: le moindre décalage par rapport à la position de superposition entraîne une diminution du contraste par leur élargissement et leur baisse de brillance simultanés. La seule difficulté provient du fait que, à cause d'une certaine distorsion des images, même des meilleures, il n'est pas possible de réaliser la superposition parfaite sur toute la surface de la tache. Ainsi nous sommes obligés de 'moyenner' la superposition, de façon à obtenir le minimum de décalage sur l'ensemble de la tache.

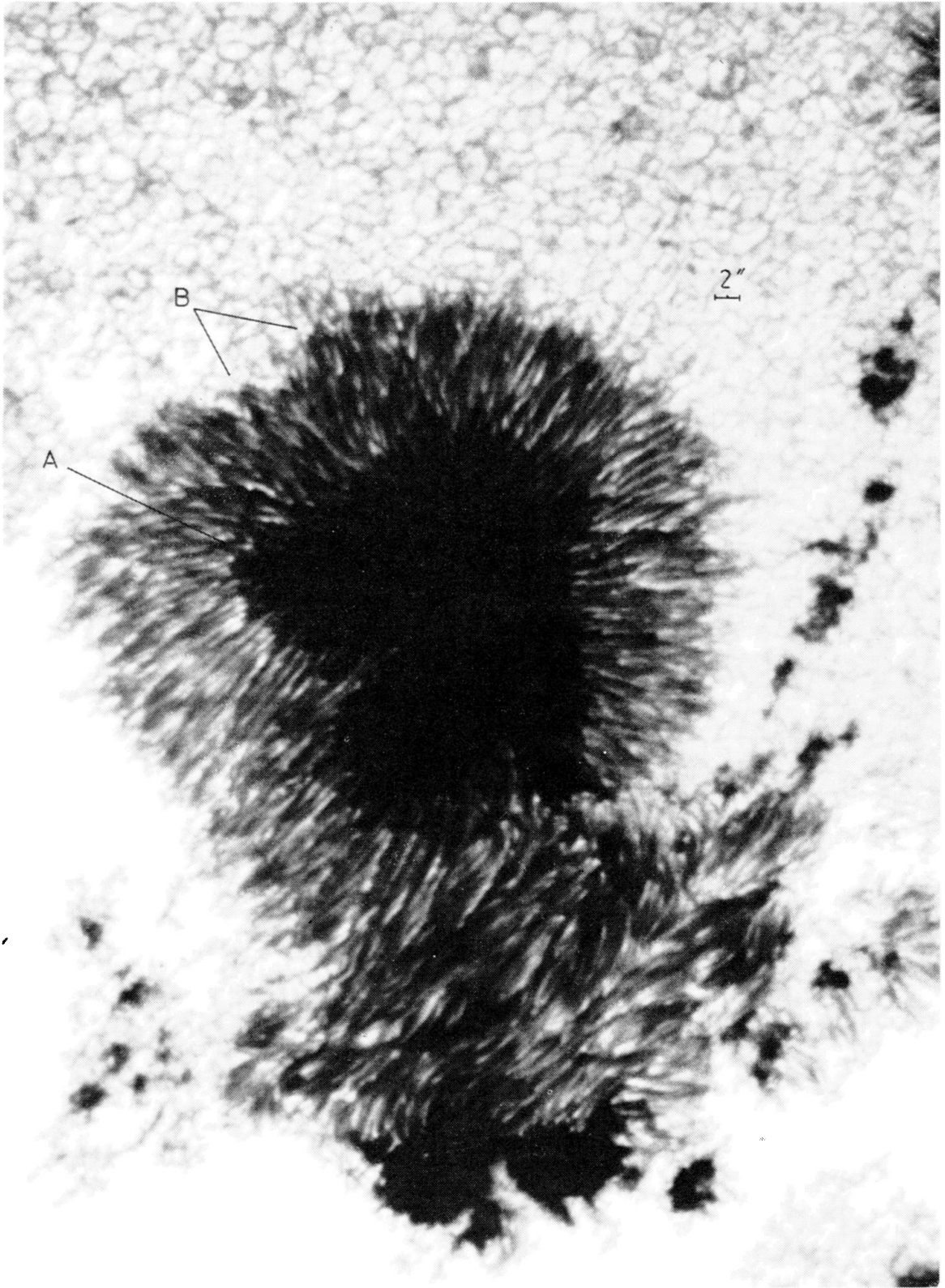


Fig. 1. Tache solaire photographée avec le réflecteur de 38 cm de l'Observatoire du Pic du Midi, le 5 juillet 1970 à 8 h 20 min TU.

3. Distorsion des images

Pour mettre en évidence le champ de distorsion des images, nous avons choisi les deux meilleures vues d'une séquence donnée, donc distantes dans le temps de quelques dixièmes de secondes. Les deux vues ont ensuite été agrandies sur support transparent; l'un des agrandissements est conservé en positif, et de l'autre est tiré, par contact, un négatif; puis on superpose le positif de la première vue avec le négatif de la seconde. Comme en un si court laps de temps il n'y a pas eu de changement perceptible des structures solaires, la superposition serait parfaite si les deux images n'étaient pas affectées par l'atmosphère, et elle apparaîtrait, alors uniformément grise. Si, par contre, les deux images sont entachées de distorsion, les filaments sont déformés et déplacés par rapport à leur position réelle, et si ces déplacements et déformations ne sont pas les mêmes pour les deux images, ils apparaîtront sur la superposition, les deux reproductions, claire et sombre, du filament ne se superposant pas (décalage) (Figure 2).

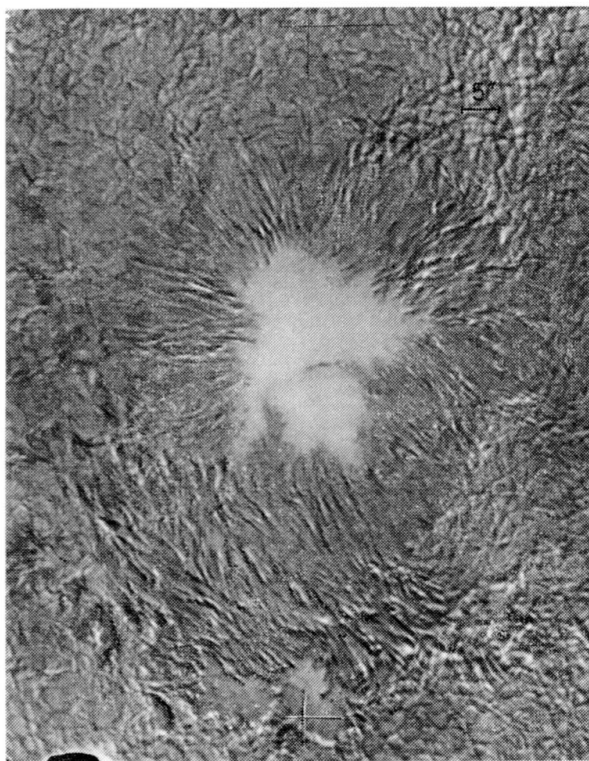


Fig. 2. Champ de la distorsion, d'origine atmosphérique, sur nos clichés.

Sur cette figure, obtenue en utilisant deux clichés parmi les meilleurs, séparés par 2 s, nous constatons que des plages, assez grandes, où la superposition est pratiquement parfaite, alternent avec des plages où un décalage apparaît, ce décalage étant maximum à peu près au milieu de cette plage. Comme son amplitude varie de zéro à sa valeur maximale de façon continue, sur une distance de quelques secondes, on peut en déduire que, à tout instant, deux grains voisins sont déplacés de quantités pratique-

ment identiques par la distorsion. Cette remarque est importante, car ainsi, comme nous le verrons par la suite, nous pourrions reconnaître un grain, d'une vue à l'autre, par sa position, relativement à ses voisins. Le déplacement maximum constaté sur cette figure est de $0''.6$; si l'on admet que ce filament a été déplacé, sur chaque vue, respectivement de $+0''.3$ et $-0''.3$ par rapport à sa position réelle, on en déduit que, dans ce champ, les déplacements provoqués par la distorsion restent, en valeur absolue, inférieurs ou égaux à $0''.3$. En appliquant ce même procédé sur un couple de vues, parmi les moins bonnes utilisées pour notre étude, dont la révolution est estimée à $0''.5$, les déplacements restent inférieurs ou égaux à $0''.4$. Ainsi la position d'un point sur le soleil est définie, sur nos images, à $\pm 0''.4$ près, ce qui est largement suffisant pour déceler les déplacements physiques que nous avons constatés dans la pénombre entourant l'ombre principale de la tache, seule région sur laquelle porte l'étude qui suit.

4. Structure morphologique de la pénombre

La pénombre apparaît constituée de grains brillants, généralement alignés en filaments, se détachant sur un fond sombre. Mais avant d'étudier l'évolution de ces éléments, il est évidemment nécessaire de bien les définir et les décrire, comme il est important de décrire la structure générale de la pénombre, dont l'aspect est en étroite corrélation avec les phénomènes observés.

A. GRAINS BRILLANTS PÉNOMBRAUX

Les grains sont, en fait, plus ou moins brillants: leur brillance peut, aussi bien, être voisine de celle de la photosphère que de celle des régions sombres (c'est le cas, en particulier, de grains brillants qui apparaissent ou qui disparaissent). En général, ils sont allongés radialement, leur longueur étant souvent comprise entre $0''.5$ et $1''$, atteignant parfois $2''$, tandis que leur largeur apparente n'excède pas $0''.5$. Souvent, ces grains brillants, principalement ceux situés dans la demi-pénombre intérieure, ont la forme d'un noyau brillant qui se prolonge, côté photosphère, par une base qui s'estompe doucement. Ainsi leur centre de gravité est déporté vers l'ombre (Figure 1a). Comme, en plus, dans cette région, ils sont souvent nettement séparés les uns des autres, ils donnent alors l'impression visuelle de sortir obliquement des profondeurs. Certains filaments courts, formés de quelques grains brillants, très rapprochés et à peine résolus, qui prennent naissance dans des régions sombres proches de l'ombre, ont ce même aspect.

B. FILAMENTS PÉNOMBRAUX

Les grains brillants sont généralement alignés en filaments, cette structure étant mieux définie vers l'ombre que vers la photosphère. Dans la pénombre principale, sauf dans la région en haut et à droite de la Figure 1, où ils sont courbes, ils sont toujours rectilignes et à peu près radiaux. Ils sont distants de $0''.5$ à $1''$ les uns des autres, et peuvent traverser la pénombre, de la photosphère à l'ombre. Leur base (on appellera base d'un filament son extrémité côté photosphère, en raison du sens de l'écoulement

des points brillants qui le constituent) prend souvent naissance dans une région sombre, soit en pleine pénombre, soit à sa limite extérieure. Dans ce dernier cas, il ne se prolonge que rarement, par quelques granules, dans la photosphère, cet état de fait étant alors de durée limitée (quelques minutes à quelques dizaines de minutes). Le long d'un même filament, les grains brillants sont plus ou moins rapprochés: alors qu'il arrive, surtout près de l'ombre, qu'ils soient suffisamment distants les uns des autres pour que leur base entière apparaisse, ils sont parfois si rapprochés qu'ils ne sont résolus que sur les meilleurs clichés. Au cours de leur évolution, il arrive même que certains grains brillants se dédoublent, soit qu'ils se scindent effectivement, soit, qu'en fait, ils soient formés de deux éléments très rapprochés, non résolus auparavant, qui s'éloignent l'un de l'autre.

C. RÉGIONS SOMBRES PÉNOMBRALES

En plus des espaces interfilamentaires, on trouve dans la pénombre des régions sombres, de 1" à 2" de dimensions, où aucun point pénombral ne se distingue. Des filaments se terminent ou prennent naissance à leur bordure, tandis que les adjacents ne sont pas perturbés. Elles se forment et disparaissent selon la disparition ou l'apparition de grains brillants, et se déforment selon l'évolution des filaments ou des granules photosphériques voisins, car elles sont particulièrement nombreuses à la limite pénombre-photosphère.

D. LIMITE PÉNOMBRE-PHOTOSPHÈRE

À la limite entre la photosphère et la pénombre les granules sont souvent adjacents à de telles régions sombres pénombrales (Figure 1b). Lorsqu'ils sont prolongés par des grains brillants pénombraux, il est assez aisé de faire la différence entre ces deux espèces d'éléments, ces derniers étant moins brillants, plus petits et plus allongés que les granules moyens. Ainsi le passage de la structure photosphérique à la structure pénombrale est brutal, excepté en quelques endroits où il est moins facile de classer les éléments comme grains pénombraux ou comme granules photosphériques, leur aspect étant intermédiaire. On peut encore noter que les grains pénombraux proches de la photosphère sont, généralement, moins bien définis et forment un ensemble moins filamentaire que ceux proches de l'ombre.

E. LIMITE PÉNOMBRE-OMBRE

Comme on le sait (Rösch, 1957), l'ombre des taches solaires contient des points brillants; mais ils diffèrent des grains pénombraux par leur brillance bien plus faible, et d'autant plus faible, d'ailleurs, qu'ils sont plus proches du centre de l'ombre, comme nous avons pu le constater sur quelques unes de nos vues surexposées. Ils en diffèrent aussi par leur forme à peu près circulaire, leur plus grand espacement et leur non alignement (cependant il arrive que certains d'entre eux soient alignés, mais non radialement par rapport aux contours de la tache). Mais nous avons constaté que les grains pénombraux, en se rapprochant de l'ombre, deviennent progressivement moins

brillants, plus petits, moins allongés et plus espacés, de telle sorte que les plus avancés dans l'ombre se confondent avec les points ombraux avoisinants. Ainsi, morphologiquement, le passage de la pénombre à l'ombre est continu. Et si la séparation entre ces deux milieux apparaît nette, c'est que, d'une part, ce changement de structure se fait sur une courte distance (quelques secondes d'arc) et que, d'autre part, le gradient de brillance est grand. Ce qui, d'ailleurs, augmente encore cet effet, c'est qu'il arrive qu'entre un grain pénombrial assez brillant et les points ombraux les plus proches, il n'y ait pas de points de brillance intermédiaire.

5. Évolution des grains brillants pénombraux

A l'aide de notre série de 34 clichés agrandis sur film transparent, nous avons pu suivre le déplacement des grains brillants pénombraux, en pointant leur centre de gravité, à chaque vue, sur une feuille de papier transparent, dont le système de coordonnées était mis en coincidence avec celui de la tache. Ainsi, à l'échelle de ces agrandissements, d'un point qui se déplace rectilignement à 0.5 km s^{-1} pendant une heure, on relève sur le papier une trace longue de 5 mm et large de 1 mm. Cette largeur, qui traduit la précision avec laquelle le grain est repéré, atteint, pour quelques trajets, un maximum de 1.5 mm, soit $0.7''$. La principale difficulté est de reconnaître le grain étudié d'une vue à l'autre. Si c'est assez souvent aisé, par contre il arrive que ce soit plus délicat, le grain ayant notoirement changé de forme, de position ou même de brillance, du fait des 6 min d'espacement des vues et de la distorsion, ou étant devenu difficilement reconnaissable du fait de la résolution insuffisante: il faut alors avoir recours à l'observation de son environnement pour le reconnaître. Néanmoins, si quelques erreurs particulières ont pu être commises, les phénomènes généraux et les chiffres statistiques, qui résultent de l'étude de 220 grains brillants pénombraux, sont tout à fait représentatifs.

Cette méthode a ainsi permis de mettre en évidence le 'mode de vie' des grains brillants pénombraux et de déterminer, statistiquement, leur sens et leur vitesse de déplacement, ainsi que leur durée de vie moyenne.

A. DÉPLACEMENT DES GRAINS BRILLANTS PÉNOMBRAUX

En fait, par la méthode qui vient d'être décrite, c'est le déplacement du centre de gravité du grain qui est mesuré. Mais le déplacement de ce centre de gravité, relativement au grain, n'excède pas $0.5''$, puisqu'il reste dans la moitié avant de celui-ci, dont la longueur ne dépasse pas généralement $1''$, tandis que son déplacement absolu est de $3''$ en moyenne et peut même atteindre parfois $5''$. On peut donc en conclure que le grain se déplace réellement dans son ensemble, et que son déplacement est à peu près celui de son centre de gravité. Ainsi a été déterminé le résultat le plus fondamental de cette étude: *les grains brillants pénombraux sont animés d'un mouvement radial dirigé vers l'ombre de la tache*, la vitesse horizontale moyenne de ce déplacement augmentant de façon continue des abords de la photosphère, où elle est nulle, à la limite de l'ombre, vers laquelle elle est maximum et voisine de 0.5 km s^{-1} . Pour établir cette variation,

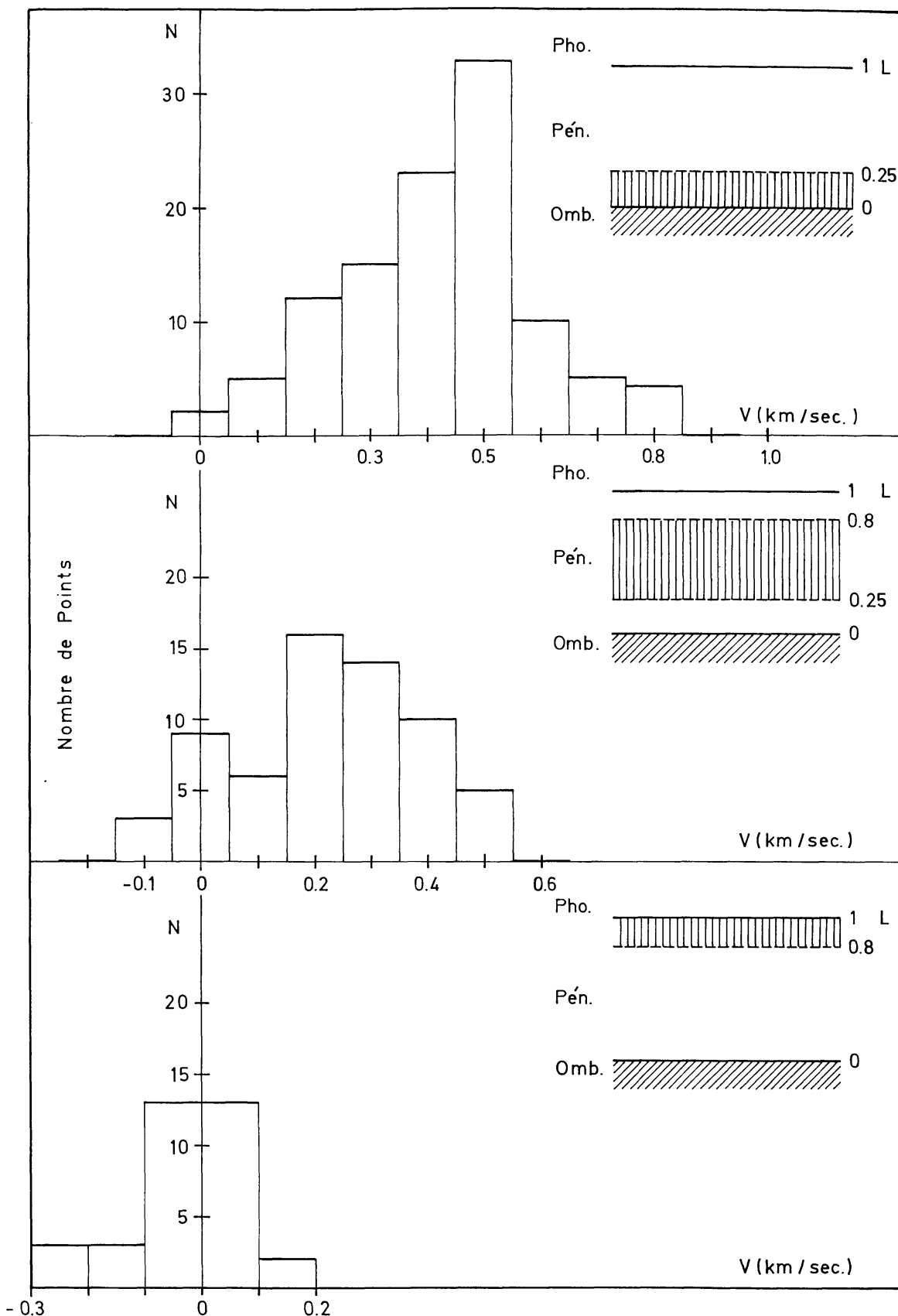


Fig. 3. Distribution des vitesses horizontales centripètes des grains dans les trois régions pénombrales indiquées sur la droite par des hachures verticales, entre la limite de l'ombre (Omb., 0) et la limite de la photosphère (Phot., 1).

nous avons distingué, en appelant L la largeur de la pénombre, trois zones caractéristiques définies par les distances à la limite ombre-pénombre: la pénombre voisine de l'ombre, de 0 à $0.25 L$; la pénombre moyenne, de $0.25 L$ à $0.80 L$; la pénombre proche de la photosphère de $0.8 L$ à L . Les vitesses moyennes des grains brillants se trouvant dans chacune de ces trois zones sont respectivement: 0.5 km s^{-1} , 0.2 km s^{-1} , 0 km s^{-1} (Figure 3).

Le 'champ de vitesse' a d'ailleurs pu être mis directement en évidence par une méthode photographique (Figure 4). Pour cela, un agrandissement négatif, sur film

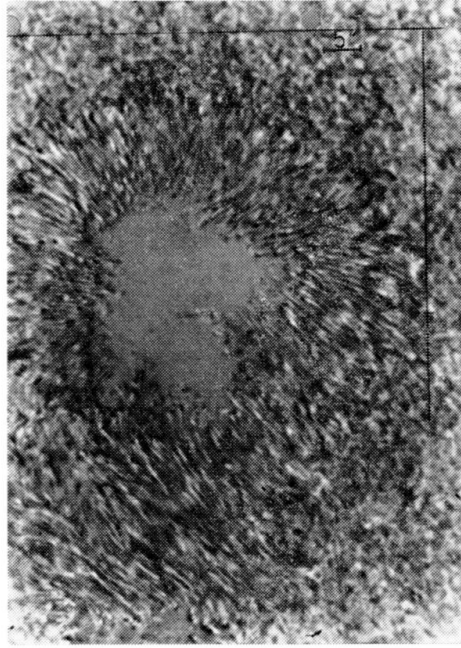


Fig. 4. Champ des vitesses de déplacement des grains brillants de la pénombre.

transparent, de la tache à l'instant t , a été superposé avec un agrandissement positif de cette même tache à l'instant $t + 10 \text{ min}$, 10 min étant l'intervalle de temps le plus adéquat à cette opération. Le γ des deux films étant à peu près le même, un élément qui ne s'est pas déplacé d'une vue à l'autre apparaîtra gris. Par contre s'il s'est déplacé vers l'ombre, sur le tirage papier de l'ensemble superposé, il aura l'aspect d'une tête noire soulignée de blanc vers la photosphère. C'est ce qui apparaît de façon évidente sur la Figure 4 où l'on remarque que le maximum de déplacement, donc de vitesse, se situe bien près de l'ombre, tandis que vers la photosphère aucun déplacement d'ensemble n'est décelé. Pour confirmer ce résultat, la vue à l'instant t a été superposée avec celle à l'instant $t - 5 \text{ min}$, et l'aspect inverse a été effectivement observé: des têtes blanches sont alors soulignées de noir vers l'extérieur. De plus cette méthode a été répétée à divers instants t et a toujours conduit à ce même résultat. On pourrait avancer que la cause de ce déplacement constaté est une contraction, d'origine instrumentale, de la tache. Mais alors, le maximum de déplacement se situerait à la limite de la photosphère, ce qui n'est pas le cas, et, à la vitesse de ce déplacement, la tache

aurait tôt fait de devenir un point. Nous sommes donc bien en présence d'un phénomène physique réel.

On notera aussi, sur ces assemblages, les régions à dominance claire ou sombre, à la limite pénombre-photosphère, traduisant des déplacements de celle-ci par suite du changement, en 10 min, du champ granulaire photosphérique directement adjacent à la pénombre.

Nous pouvons déjà conclure de cela qu'un grain brillant qui se forme près de la photosphère ne participera pas au mouvement centripète d'ensemble, ni ne rentrera dans la photosphère d'ailleurs, tandis qu'un autre qui se forme près de l'ombre y rentrera, pourvu que sa durée de vie soit suffisante.

B. APPARITION DES GRAINS BRILLANTS PÉNOMBRAUX

Le terme 'apparition' sera employé, de préférence à 'formation', car, avant d'apparaître visuellement dans la pénombre, sur nos clichés, un grain brillant a pu se former dans une autre couche. Ceci étant précisé, le résultat important est qu'ils apparaissent dans la pénombre elle-même, aussi bien près de l'ombre ou de la photosphère, qu'en plein champ pénombral. Leurs modes d'apparition, bien qu'assez divers, peuvent être classés en deux catégories:

(α) Apparition dans un espace interfilaire ou dans une région sombre: dans ces zones, où l'on ne distingue, à l'origine, aucune structure, apparaît une petite plage d'abord diffuse, qui devient de plus en plus brillante, bien définie, et allongée (Figure 5).

(β) Renforcement de la brillance de la base d'un autre grain pénombral: elle augmente jusqu'à atteindre à peu près celle du noyau, pour laisser apparaître deux grains brillants distincts (Figure 6).

Les deux modes d'apparition sont à peu près aussi fréquents l'un que l'autre près de l'ombre, tandis que le premier devient nettement prépondérant près de la photosphère. Bien que les grains brillants puissent apparaître à peu près n'importe où dans la pénombre, les écoulements déjà existants, matérialisés par les filaments, représentent, néanmoins, des domaines d'apparition préférentiels. Dans ce cas, c'est aussi bien à l'avant, à l'intérieur ou à l'arrière du filament qu'ils apparaissent. Puis ils s'écoulent le long de celui-ci tout en se développant, pour atteindre leur aspect normal, généralement en moins d'une quinzaine de minutes. Au cours de leur vie, leur forme se modifie plus ou moins par des allongements, des raccourcissements, des déplacements du centre de gravité relativement à leur moitié avant et d'autres déformations, tandis que leur brillance évolue aussi (l'étude quantitative de l'évolution de leur brillance pendant leur durée de vie est en cours de préparation).

C. DISPARITION DES GRAINS BRILLANTS PÉNOMBRAUX

Un grand nombre des grains brillants qui apparaissent dans la pénombre, à une distance inférieure à $0.5 L$ de l'ombre, et la quasi-totalité de ceux qui apparaissent à une distance inférieure à $0.25 L$, se déplacent jusqu'à la limite intérieure de la pénombre, puis rentrent dans l'ombre tandis que leur brillance diminue, qu'ils s'écartent de leurs suivants tout en restant dans leur alignement, et qu'ils se mêlent aux points ombraux

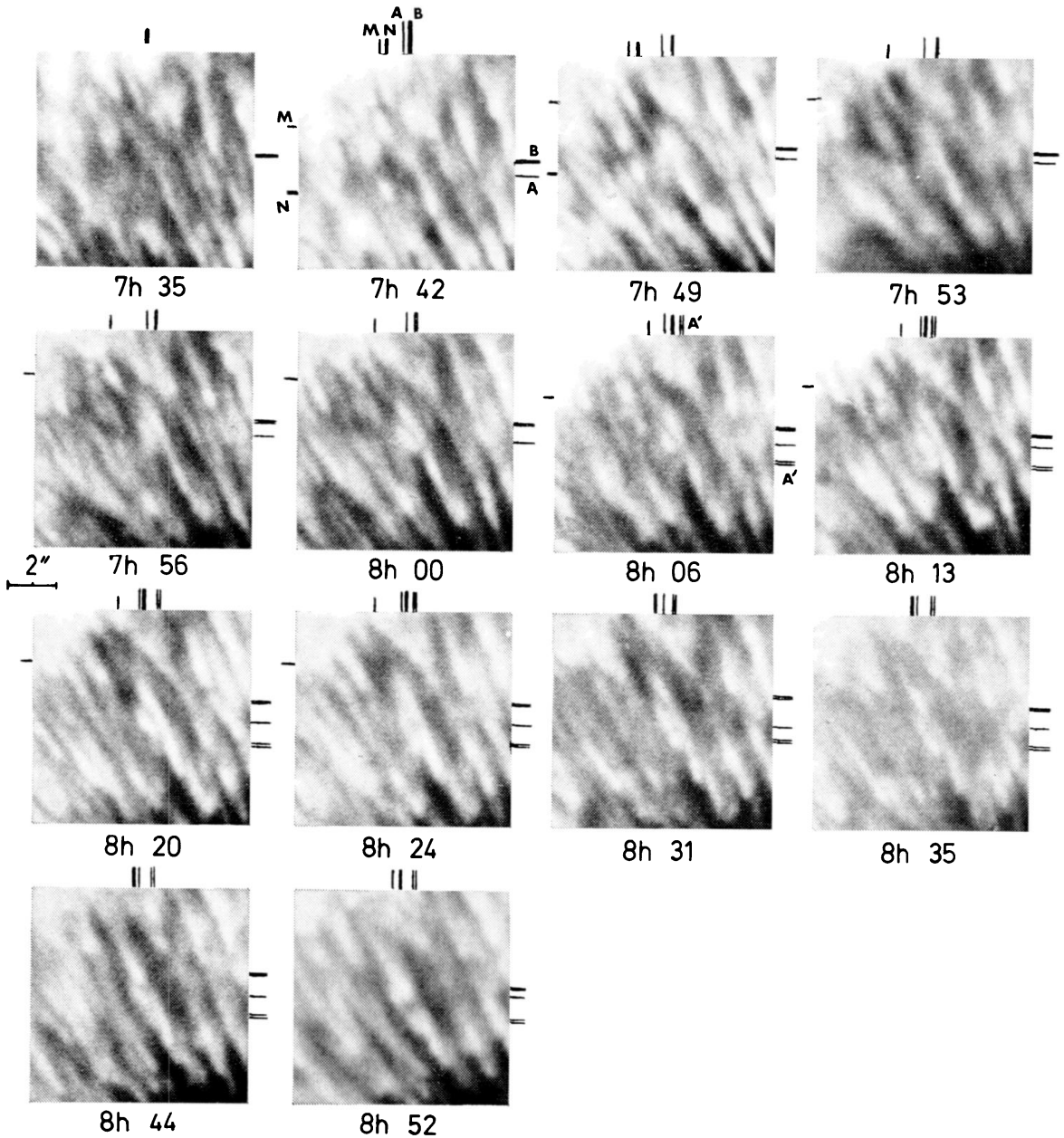


Fig. 5. Apparitions et disparitions de grains brillants dans la pénombre moyenne. Un grain brillant *A* apparaît dans l'espace interfilaire à 7 h 49 min (traits de repère fins). Sur la vue précédente, sa position d'apparition dans cet espace interfilaire est facilement reconnaissable par sa situation vis à vis des grains *M* et *N* (traits de repère courts). Le grain *B* de l'écoulement voisin (traits de repère épais) prend forme en même temps, alors qu'auparavant ce n'était qu'une petite zone de matière peu brillante, diffuse et sans forme bien définie, apparue là à 7 h 25 min. A 8 h 06 min, il apparaît à l'avant de *A*, dans l'espace interfilaire, un nouveau grain *A'* (traits de repère doubles). Ils s'écoulent tous les deux vers l'ombre avec des vitesses respectives de 0.2 km s^{-1} et 0.3 km s^{-1} tandis que *B* s'écoule avec une vitesse de 0.12 km s^{-1} . Le grain *M* (traits de repère courts), qui semble apparaître à 7 h 42 min près de la photosphère, disparaît à 8 h 13 min en laissant place à une zone sombre, dans laquelle un grain est à nouveau visible de façon éphémère à 8 h 20 min.

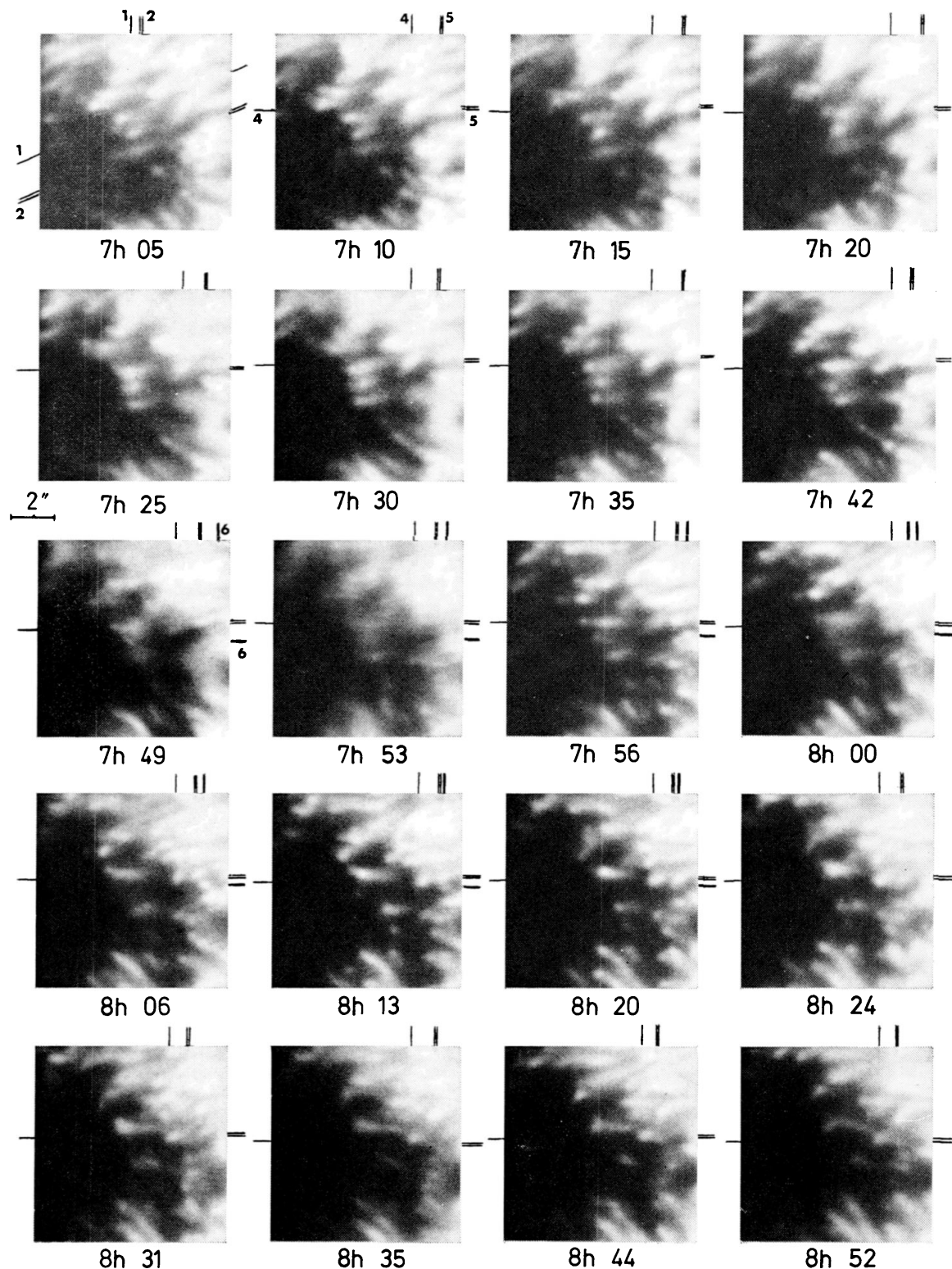


Fig. 6. Apparitions et disparitions de grains brillants près de l'ombre.

Filament 1 (traits de repère obliques courts et simples). A 7 h 05 min il est formé de deux grains brillants pénombraux *A* et *B*. Ils avancent tous deux vers l'ombre, le premier y disparaissant à 7 h 30 min. Dans le même temps la brillance de la base de *B* augmente pour laisser apparaître un nouveau grain *C* qui, à 7 h 42 min, d'ailleurs, est devenu plus brillant que *B* qui commence à s'estomper pour disparaître à 7 h 49 min. A 7 h 56 min apparaît *D* à la base de *C*, lequel disparaît dans l'ombre à 8 h 20 min, tandis qu'à 8 h 13 min, toujours par le même processus, la base de *D* se ren-

déjà présents, dont ils prennent alors l'aspect, avant de disparaître complètement sur nos négatifs surexposés. Ainsi disparaissent, en s'estompant les uns à la suite des autres dans l'ombre, les grains d'un même filament, tandis que d'autres apparaissent et s'écoulent à leur tour. De courts filaments, formés de 2 à 4 grains qui prennent naissance dans des régions sombres pénombrales proches de l'ombre, sont typiquement représentatifs de ce phénomène (Figure 6): tandis que ces grains pénombraux s'écoulent vers l'ombre pour y disparaître, à la base du dernier s'en forme un nouveau qui s'écoule à son tour, et ainsi de suite, la cadence de formation, et donc de disparition, étant de 30 min en moyenne.

Quant aux grains qui se forment dans la pénombre à plus de $0.5 L$, ils disparaissent en général avant d'atteindre l'ombre. C'est évidemment le cas de ceux tout proches de la photosphère, qui ne se déplacent pratiquement pas pendant leur vie. Lorsqu'ils font partie d'un filament, et c'est souvent le cas, et qu'ils sont assez loin de la photosphère pour s'écouler, ils disparaissent, soit en restant dans l'écoulement, soit en rentrant dans un espace interfilamentaire voisin. D'ailleurs les grains isolés qui s'écoulent dans des espaces interfilamentaires peuvent aussi s'y estomper et disparaître. Enfin des grains brillants disparaissent dans les régions sombres pénombrales qui jouent, à cet effet, le même rôle que l'ombre principale.

force pour laisser apparaître E , D disparaissant à 8 h 52 min. Pendant leur vie tous ces grains se déplacent vers l'ombre. Caractéristiques de ces différents points: t_1 = heure d'apparition; t_2 = heure de disparition; τ = durée de vie; V_m = vitesse moyenne horizontale de déplacement.

A :	$t_1 = 6 \text{ h } 15 \text{ min};$	$t_2 = 7 \text{ h } 30 \text{ min};$	$\tau = 1 \text{ h } 15 \text{ min};$	$V_m = 0.57 \text{ km s}^{-1}$
B :	6 h 00 min;	7 h 50 min;	1 h 50 min;	0.50 km s ⁻¹
C :	7 h 30 min;	8 h 20 min;	0 h 50 min;	0.22 km s ⁻¹
D :	8 h 00 min;	8 h 50 min;	0 h 50 min;	0.40 km s ⁻¹
E :	8 h 15 min;	8 h 50 min;	0 h 35 min;	0.48 km s ⁻¹

Filament 2 (traits de repère obliques courts et doubles). A 7 h 05 min il est formé d'un grain A , brillant, suivi d'un autre, B , dont la brillance augmente par la suite jusqu'à dépasser celle du premier qui s'estompe et qui disparaît à 7 h 30 min. A partir de cette même heure, la base de B devient plus brillante et un nouveau point C apparaît, tandis que B devient plus petit et s'estompe lentement pour disparaître à 8 h 30 min. A 7 h 05 min à l'avant de A et à la limite de l'ombre se trouve un petit grain A' , apparu là à 7 h 00 min, et qui disparaît à 7 h 20 min.

A' :	$t_1 = 7 \text{ h } 00 \text{ min};$	$t_2 = 7 \text{ h } 20 \text{ min};$	$\tau = 0 \text{ h } 20 \text{ min};$	$V_m = 0.45 \text{ km s}^{-1}$
A :	6 h 00 min;	7 h 30 min;	1 h 30 min;	0.36 km s ⁻¹
B :	7 h 05 min;	8 h 30 min;	1 h 25 min;	0.57 km s ⁻¹
C :	7 h 30 min;	8 h 50 min;	1 h 20 min;	0.32 km s ⁻¹

Filament 3 (situé entre les deux précédents). Il est constitué d'un seul grain, apparu à 6 h 40 min derrière un autre grain (disparu 6 h 55 min), qui rentre dans l'ombre en s'estompant pour finalement disparaître à 7 h 44 min. $\tau = 1 \text{ h } 05 \text{ min}$; $V_m = 0.30 \text{ km s}^{-1}$.

Grain brillant pénombral 4 (traits de repère droits longs et simples). On le voit avancer vers l'ombre de 7 h 05 min à 8 h 52 min, avec une vitesse moyenne de 0.33 km s^{-1} . Au début de cette séquence il est précédé d'un grain moins brillant qui disparaît à 7 h 42 min dans la région sombre pénombrale après s'être déplacé avec une vitesse de 0.32 km s^{-1} .

Grain brillant pénombral 5 (traits de repère droits longs et doubles). Il avance vers l'ombre avec une vitesse moyenne de 0.50 km s^{-1} . A partir de 8 h 24 min il commence à s'estomper et il n'est plus qu'à peine visible à 8 h 52 min.

Grain brillant pénombral 6 (traits de repère droits et épais). Il fait partie d'un écoulement, mais à partir de 7 h 50 min il s'en écarte et rentre dans un espace interfilamentaire pour y disparaître à 8 h 24 min. Il s'est déplacé avec une vitesse de 0.57 km s^{-1} .

D. DURÉE DE VIE DES GRAINS BRILLANTS PÉNOMBRAUX

Cette étude de l'évolution des grains pénombraux a conduit, tout naturellement, à connaître leur durée de vie dont la détermination ne pose pas de difficultés, puisqu'ils restent des objets bien individualisés depuis leur apparition jusqu'à leur disparition, du moins ceux qui ont été étudiés (ceux, généralement peu brillants et mal définis, que la résolution ne permettait pas d'identifier pendant toute leur vie n'ayant pas été retenus).

Dans cette étude, trois cas peuvent se présenter :

- un grain apparaît et disparaît entre le début (t_1) et la fin (t_2) des observations;
- un grain apparaît avant t_1 (disparaît après t_2) et disparaît (est apparu) entre t_1 et t_2 ;
- un grain apparaît avant t_1 et disparaît après t_2 .

L'intervalle $t_2 - t_1$ exploité étant de l'ordre de 2 h 40 min, la plupart des grains se trouvent dans le premier cas, et on peut déterminer leur durée de vie moyenne τ . A cet effet, on suppose qu'ils sont tous nés au même instant zéro et on trace la courbe de disparition en fonction du temps; τ est le temps au bout duquel $N/2$ des N grains initiaux ont disparu (ou encore: $N/2$ des N grains initiaux ont une durée de vie supérieure ou égale à τ). La Figure 7 montre en a, b, d, e et f de telles courbes.

Par contre, pour les grains entrant dans le second cas, qui forment une part importante du total, on doit opérer différemment: on prend comme origine des temps (l'instant $(t_1 + t_2)/2$) et on dénombre à cet instant N grains; on compte ceux de ces grains existant encore après un intervalle Δt , ou qui existaient déjà à un instant antérieur de Δt , et on trace la courbe donnant ce nombre en fonction de Δt , négatif ou positif. C'est la courbe c de la Figure 7. La longueur de la corde d'ordonnée $N/2$ est la durée de vie moyenne τ .

L'ensemble de ces courbes montre que les grains qui apparaissent dans la pénombre centrale ($0.25-0.8 L$) ont les durées de vie les plus longues (≥ 3 h en moyenne), tandis qu'elles deviennent sensiblement plus courtes pour ceux qui apparaissent dans les régions proches des limites. Pour vérifier que cette décroissance est bien fonction de la distance aux limites, nous avons distingué, dans la région voisine de l'ombre ($0-0.25 L$), les points apparaissant juste à la limite ($0-0.05 L$) des autres ($0.05-0.25 L$): celle des premiers est sensiblement plus courte que celle des seconds: 40 min contre 1 h 15 min. Nous pouvons alors en déduire la loi de variation de la durée de vie des grains selon leur position d'apparition dans la pénombre (Figure 8): elle croît de façon continue depuis la limite de l'ombre, où elle n'est que de 40 min, pour atteindre un maximum compris entre 3 h et 4 h vers $0.5-0.6 L$; puis elle décroît continuellement jusqu'à la limite de la photosphère, sa valeur moyenne étant de 50 min entre 0.8 et $1 L$. Il est alors intéressant de comparer cette dernière valeur à celle de 17 min des granules photosphériques directement adjacents à la pénombre, ainsi qu'à celle de 14 min des granules distants de $1.5 L$ de la limite ombre-pénombre que nos clichés nous ont permis de déterminer. Ces deux dernières valeurs ne sont cependant données qu'à titre indicatif car, par suite de l'espacement de 5 min des vues, il n'est pas très aisé de voir apparaître ou disparaître un granule. De plus elles sont peut-être un peu sures-

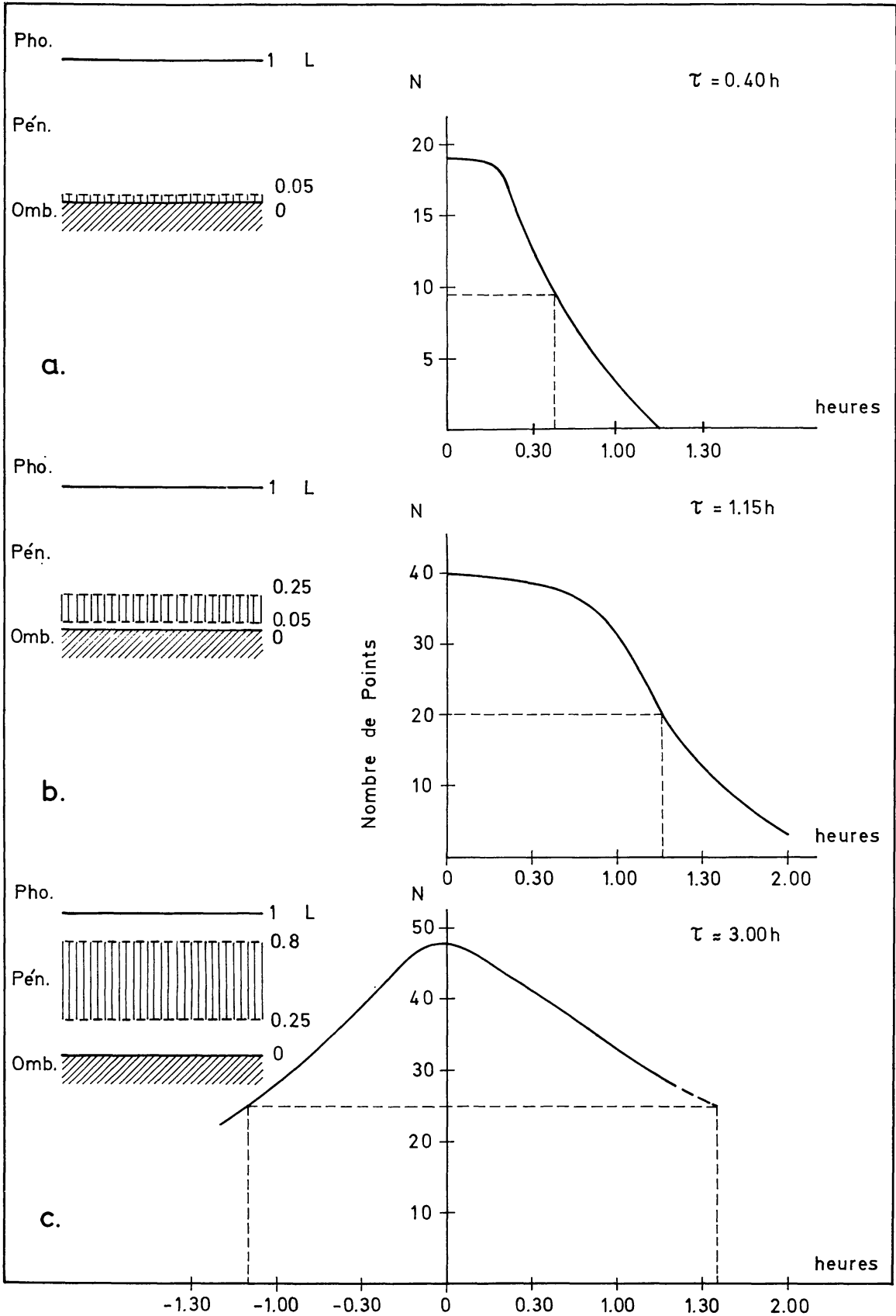


Fig. 7. (a, b, c). Courbes de visibilité des grains brillants pénombraux et des granules photosphériques apparaissant dans les régions indiquées par des hachures verticales. Voir explications dans le texte, notamment pour 7c.

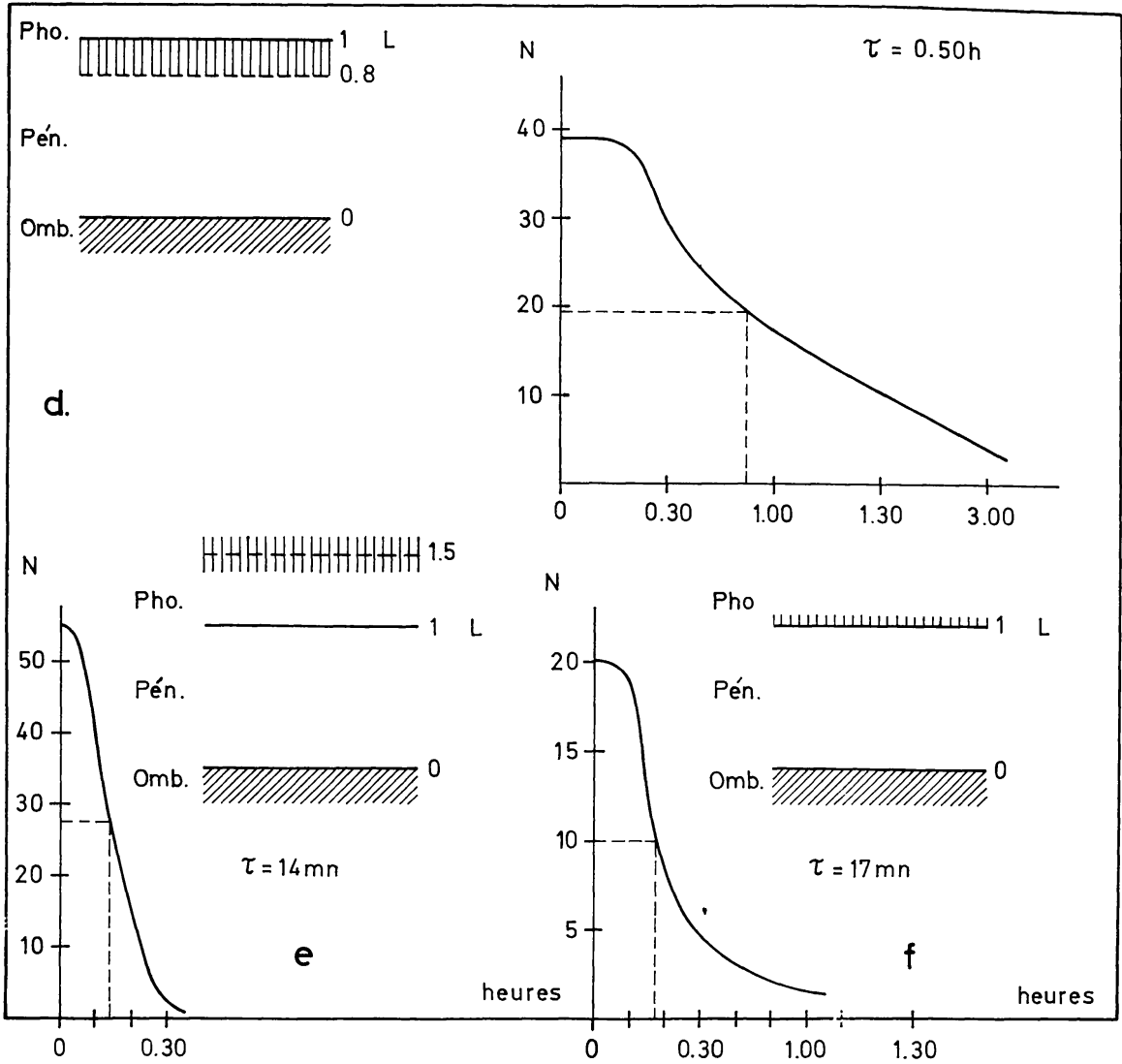


Fig. 7. (d, e, f). Voir légende précédente.

timées, surtout la dernière, car des granules de durée de vie inférieure à 5 min ont pu éventuellement être omis.

6. Conclusion

Les grains brillants apparaissent dans la pénombre elle-même, aussi bien au voisinage de ses limites qu'en son milieu; ils se déplacent alors vers l'ombre, avec une vitesse horizontale qui atteint un maximum de 0.5 km s^{-1} à son voisinage, tandis qu'elle est nulle près de la photosphère; leur durée de vie est maximum, et de l'ordre de 3 à 4 h, s'ils apparaissent vers le milieu de la pénombre. Il est possible, cependant, que les phénomènes puissent se décrire, de la photosphère vers l'ombre, par les étapes suivantes:

(a) une valeur critique de certains paramètres physiques fait cesser la structure en 'granules photosphériques' et apparaît les 'grains pénombraux' alignés en filaments, cette structure étant mieux définie vers l'ombre que vers la photosphère.

(b) Près de la limite photosphère-pénombre, ces grains ont une durée de vie déjà très supérieure à celle des granules photosphériques (au moins double) et cette durée de vie croît rapidement lorsqu'on s'éloigne de la photosphère, atteignant trois heures vers le milieu de la pénombre.

(c) les grains pénombraux ont une vitesse centripète presque nulle au bord de la photosphère, et croissant vers l'ombre.

(d) les grains pénombraux disparaissent après un court trajet s'ils sont nés près de la photosphère.

(e) s'ils sont nés dans la moitié intérieure de la pénombre, leur vitesse est telle

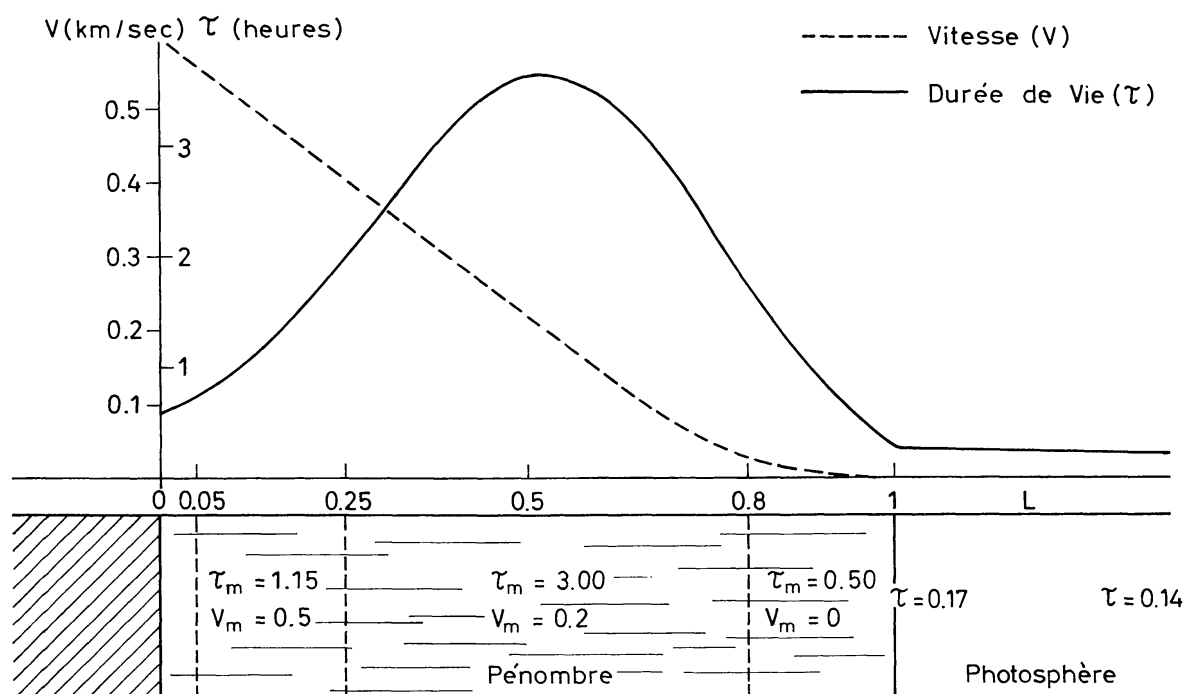


Fig. 8. Distribution des durées de vie et des vitesses des grains brillants dans la pénombre. L est la largeur de la pénombre.

qu'ils atteignent l'ombre, où ils disparaissent par intervention d'une nouvelle valeur critique, ce qui limite du même coup leur durée de vie. (Figure 9.)

Il apparaît ainsi une évolution continue des structures depuis la photosphère non perturbée jusqu'au centre de l'ombre, bien que le passage de la structure photosphérique à la structure pénombrale soit généralement brutal. En particulier, la pénombre voisine de la photosphère et cette dernière ont comme propriété commune le fait que leurs éléments brillants apparaissent et disparaissent sur place, tandis qu'ils diffèrent par leur durée de vie et leur aspect (forme, arrangement et brillance apparente). Cette région de la pénombre apparaît ainsi, par ces propriétés, comme une zone de transition entre la photosphère non perturbée et la pénombre intérieure.

La cinématique des grains brillants pénombraux est à rapprocher de l'effet Evershed

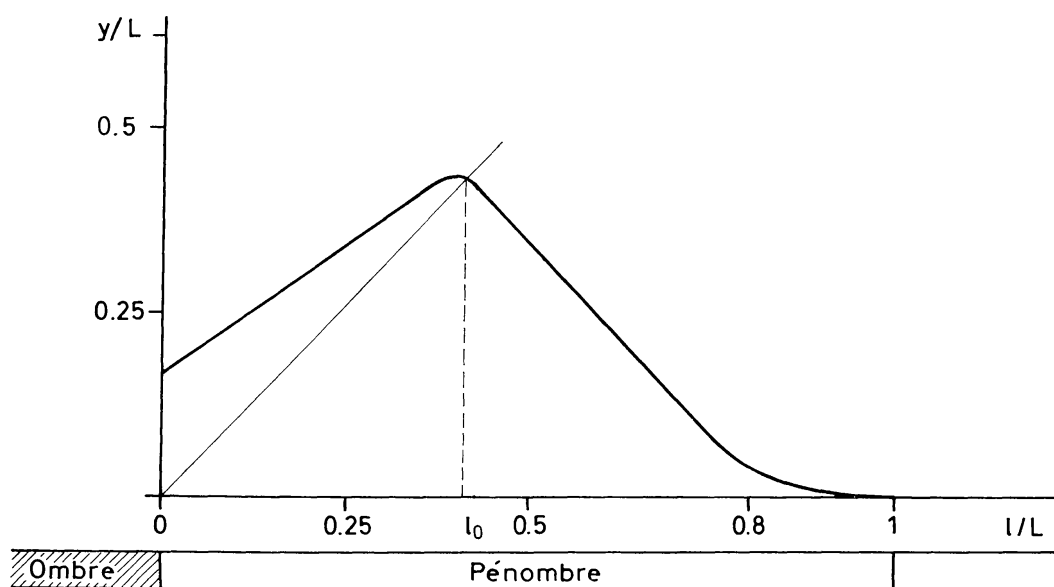


Fig. 9. Trajet y parcouru par un grain brillant apparu à une distance l du bord de l'ombre (y est calculé à l'aide des données des Figures 3 et 7). L est la largeur de la pénombre. L'intersection de la courbe avec la première bissectrice fournit l_0 , distance au delà de laquelle les grains qui naissent n'atteignent plus l'ombre. Les grains parcourent les trajets les plus longs sont ceux qui disparaissent juste en bordure de l'ombre.

décrit à partir des mesures de vitesses radiales. Au vu, non seulement du sens de déplacement, mais aussi de la position des maximums de vitesse respectifs, il semble que nous soyons en présence de deux aspects distincts, à moins que la tache étudiée ne soit pas le siège d'un effet Evershed normal. Cependant, une étude des déplacements des grains brillants de la pénombre de la tache principale du groupe G8 (7S 15E, in: *Daily Maps of the Sun*, Freiburg; Rome No. 6156), à l'aide de quelques clichés de bonne résolution obtenus le 1.7.71 à l'Observatoire du Pic du Midi, a montré que leur déplacement était aussi dirigé vers l'ombre et que leur maximum de vitesse était situé à son voisinage. Il reste donc à établir un modèle de tache rendant compte à la fois de l'effet Evershed classique et des présents résultats en lumière blanche.

Remerciements

Qu'il me soit permis de remercier M. Rösch, Directeur des Observatoires du Pic du Midi et de Toulouse pour m'avoir donné la possibilité d'effectuer ce travail et pour ses suggestions, et M. Kiepenheuer pour l'hospitalité qu'il m'a accordée au Fraunhofer Institut.

Je tiens aussi à remercier MM. Hugon et Carlier pour leur aide et leurs conseils, et M. Mehlretter avec qui j'ai eu de fructueuses discussions.

Bibliographie

Bray, R. J. and Loughhead, R. E.: 1964, *Sunspots*, Chapman and Hall Ltd.

- Danielson, R. E.: 1961, *Astrophys. J.* **134**, 275.
Macris, C.: 1953, *Ann. Astrophys.* **16**, 19.
Rösch, J.: 1957, *L'Astronomie*, **71**, 129.
Rösch, J.: 1959, *Ann. Astrophys.* **22**, 571.
Rösch, J.: 1962, in *Symposium on Solar Seeing*, Roma, Consiglio Nazionale delle Ricerche.
Rösch, J.: 1966, in *Atti del Convegno Sulle Macchie Solari*, Barbera (ed.), Firenze.
Schröter, E. H.: 1962, *Z. Astrophys.* **56**, 183.