

LA TURBULENCE ATMOSPHERIQUE

« *L'air est la plus mauvaise partie
de l'instrument...* »

ANDRÉ COUDER.

123. **Difficultés d'emploi d'un télescope de moyenne puissance.** - Nous voici en possession d'un télescope optiquement irréprochable et bien réglé. Allons-nous en retirer automatiquement les satisfactions promises par le diamètre de l'objectif ? Certainement pas ; la part de travail qui reste à faire est même la plus difficile et ceci est d'autant plus vrai que l'instrument est plus grand.

La technique de l'observation avec un moyen instrument mériterait un long exposé que nous ne pouvons songer à incorporer à ces notes de constructeur. On doit supposer que l'usager d'un télescope de 200 millimètres et plus possède déjà une certaine expérience d'observateur acquise plus facilement avec une petite lunette. Pointer l'instrument, mettre au point, suivre l'astre, éviter les vibrations de la monture, choisir l'oculaire, prendre un dessin, acquérir une éducation de l'œil sont des petits problèmes simples qu'un peu de pratique permet de dominer aisément. Tant que l'instrument est considéré comme collecteur de lumière, il n'y a pas de grosse difficulté à en retirer le résultat attendu, par exemple : l'observation d'étoiles variables avec des grossissements relativement faibles, la prise de photographies au foyer newton sont facilement praticables même pour les magnitudes limites que le miroir peut révéler. Les surprises arrivent au moment où l'on veut, de plus, exploiter tout le pouvoir séparateur théorique du miroir, l'observation d'étoiles doubles serrées et bien plus encore celle de faibles plages planétaires soulèvent des difficultés qui croissent très vite avec l'ouverture. La grande source de déboires à ce sujet est ce que l'on appelle en bloc : *la turbulence atmosphérique* et parce que cette question touche la responsabilité du constructeur, nous ne pouvons plus l'ignorer. Que nous le voulions ou non, l'air atmosphérique et tous ses défauts fait partie de l'instrument ; l'on n'en serait affranchi qu'en installant le télescope sur la Lune par exemple, au prix d'autres inconvénients. La turbulence atmosphérique n'est pas un petit phénomène, elle introduit des défauts des dizaines de fois plus grands que ceux laissés par l'opticien. Pour formuler un jugement valable sur la qualité d'un instrument essayé sur le ciel il faut posséder une longue expérience d'observateur et attendre, parfois plusieurs semaines, des conditions favorables. Nous voudrions dans ce qui suit donner suffisamment

d'éléments pour permettre au lecteur de comprendre l'image observée ; malheureusement le phénomène est inextricable et la lutte contre la turbulence l'une des plus décevantes que nous connaissons.

124. **Effets des défauts de l'air.** - Jusqu'ici nous avons supposé que les surfaces d'onde incidentes arrivant à l'objectif étaient planes (§ 3) ; en fait, avant de nous parvenir, les rayons lumineux venant d'une étoile doivent traverser l'atmosphère qui est loin d'être un milieu optique homogène, l'air chaud n'a pas le même indice de réfraction que l'air froid, des courants d'air à températures différentes déforment donc de façon variable et complexe les surfaces d'ondes transmises pour peu que l'on considère un faisceau un peu large. Lord Rayleigh a exprimé sous une forme commode ⁽¹⁾ le déphasage produit dans l'air sur une longueur de l centimètres par une différence de $t^\circ\text{C}$:

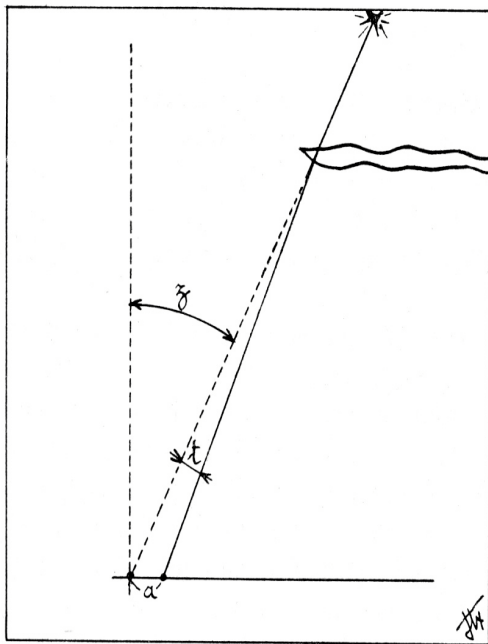


Fig. 148. - Angle de turbulence f .

$$\delta = 1,1 l t \times 10^{-6}.$$

Ainsi un écart de marche de $\lambda/4$ pour $0\mu 50$ peut résulter d'une inégalité de $0^\circ,13$ seulement sur une longueur de 1 mètre. L'étonnant est que l'on puisse encore obtenir une image au niveau du sol avec un faisceau de quelques décimètres de diamètre. L'étude d'une surface d'onde déformée est complexe ; on peut tenter pour simplifier en première approximation de caractériser la turbulence par le paramètre t , angle de déviation du rayon lumineux venant de l'étoile après traversée de la veine d'air hétérogène (fig. 148) dans l'aire définie par l'objectif t

prend des valeurs positives et négatives dont la limite, comparable aux aberrations transversales que nous connaissons bien, peut caractériser jusqu'à un certain point la gravité du phénomène.

L'œil reçoit un faisceau de quelques millimètres seulement de diamètre. Les déviations t étant de l'ordre d'une fraction de seconde d'arc les hétérogénéités proches de l'observateur n'ont aucun effet perceptible mais celles de plusieurs kilomètres entraînent des écarts a de plusieurs centimètres, l'énergie reçue par l'œil varie constamment, l'on dit que l'étoile *scintille*. Si la hauteur de l'étoile est faible il y a *scintillation chromatique* car les rayons de l'étoile, dispersés par la réfraction sous une forte incidence dans l'atmosphère, subissent des déviations non simultanées il y a fluctuation non seulement de l'éclat mais de la couleur dominante. Un disque planétaire sous-tendant $20''$ par

⁽¹⁾ *Scientific Papers*, vol. III, p. 102.

exemple ne scintille pas, sauf circonstances exceptionnelles, ce diamètre est déjà assez grand devant l'angle t pour que les fluctuations soient petites.

La scintillation observable à l'œil nu ou telle qu'on peut la mesurer avec un récepteur, photo-électrique par exemple, de petite ouverture n'est pas d'un grand secours pour l'étude de la turbulence qui affectera un grand instrument astronomique ; il faut étudier une surface d'onde assez grande et tenir compte de toutes les hétérogénéités, pas seulement de celles situées à plusieurs kilomètres dans l'atmosphère.

125. Altérations de l'image stellaire dans un petit instrument. - Dès que l'on utilise un objectif de quelques centimètres d'ouverture la scintillation disparaît, car la lumière collectée reste à peu près constante dans une aire suffisante. A un instant donné une fraction importante de la surface d'onde reçue peut être assimilée à un plan dont l'inclinaison n'est pas nulle, l'image est peu altérée mais se trouve momentanément déviée en bloc, c'est une *réfraction lente* ; un fil d'araignée bien réglé parallèle au mouvement diurne permet de suivre les déplacements de l'image stellaire observée avec un oculaire très fort.

L'accroissement de l'ouverture entraîne vite une grande sensibilité à la turbulence ; non seulement les inclinaisons élémentaires t deviennent plus grandes, en valeur relative, rapportées au rayon ρ de la tache de diffraction mais une surface d'onde de 20 centimètres et plus de diamètre comprend déjà un véritable chaos d'accidents, dont nous verrons plus loin l'étude par Foucaultage, contentons-nous pour l'instant d'enlever l'oculaire, de mettre l'œil au foyer et d'accommoder sur le miroir éclairé par une étoile brillante, nous voyons défiler un système de bandes ondulées alternativement grises et claires, ce sont les *ombres volantes*.

Pour des ouvertures modestes, comme celles des instruments d'amateurs considérés ici, disons moins de 50 centimètres, il est encore possible de relier simplement l'état de l'image au paramètre t , inclinaison maximum des éléments de surface d'onde admis ; c'est la méthode de A. Danjon, intéressante à connaître car elle permet d'évaluer la qualité d'une nuit et d'une station simplement par des estimations d'altérations de la figure de diffraction qui correspondent à des angles t mesurés une fois pour toutes par l'auteur à l'interféromètre ⁽¹⁾. Voici cette échelle, nécessairement très approximative puisque le phénomène réel, très compliqué, est essentiellement variable ; en outre il faut tenir compte de toute cause systématique de renforcement du premier anneau de diffraction, un résidu d'aberration sphérique correspondant à des aberrations transversales de $1,5 \rho$ par exemple ; pour les télescopes l'obstruction centrale rend l'instrument également un peu plus sensible à la turbulence, seul un télescope fermé de bonne qualité et à obstruction inférieure à $1/6 D$ est assimilable à un bon réfracteur à $f / 12$ pour cet usage :

⁽¹⁾ *Etude interférentielle de la scintillation* ; Réunions Institut d'Optique, 4^e année, p. 20, 1933, 2^e réunion. Voir aussi *Lunettes et Télescopes*, p. 82.

COTE	t	DESCRIPTION (voir fig. 149)
V	$t < 0,25 \rho$	Images parfaites, sans déformation sensible et à peine agitées.
IV	$t = 0,25 \rho$	Anneaux complets, parcourus par des condensations mobiles.
III	$t = 0,5 \rho$	Agitation moyenne, anneaux de diffraction brisés, taches centrales à bords ondulants.
II	$t = \rho$	Agitation vive, anneaux évanouissants ou absents.
I	$t > 1,5 \rho$	Image tendant vers l'aspect planétaire.

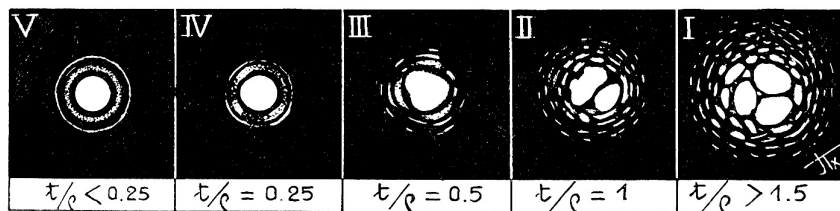


Fig. 149. – Echelle de cotation de la turbulence dans un petit instrument.

La turbulence croît un principe comme la sécante de la distance zénithale z (fig. 148) sauf s'il y a de notables phénomènes instrumentaux et locaux étudiés

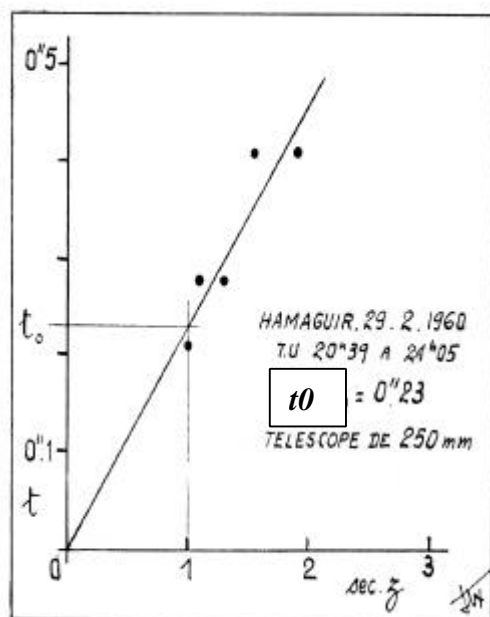


Fig. 150. – Graphique de réduction des cotes de turbulence.

z ; au zénith on a $sec. z = 1$ et la valeur particulière t_0 , qui est la turbulence zénithale. Le graphique de la figure obtenu avec un télescope

plus loin, acceptons cette loi provisoirement sans descendre cependant à moins d'une vingtaine de degrés de hauteur au-dessus de l'horizon ($z = 70^\circ$; $sec. z = 2,9$) pour ne pas être trop gênés par la dispersion atmosphérique et les anomalies locales. Un sondage sérieux comporte l'estimation dans l'échelle de I à V d'images d'étoiles (magnitude 3 environ pour un 200/250) prises à différentes hauteurs. Un rapporteur à fil à plomb installé sur le tube donne z . On sait que $\rho = 14''/D$ (p. 5) les valeurs correspondantes de t sont portées sur un graphique (fig. 150) en fonction des sécantes

newtonien de 250 dans une station désertique de la *Hamada* saharienne donne $t_0 = 0''23$, c'est une turbulence moyenne encore assez peu gênante dans un instrument de cette ouverture.

126. Altération de l'image stellaire d'un grand instrument. - L'image « planétaire » de cote I (fig. 149) ne semble guère tracasser les astronomes, elle mérite pourtant un examen spécial car *elle est de règle dans un grand instrument* et la politique de l'autruche n'a jamais conduit à des découvertes bien remarquables. C'est non seulement pour répondre à la curiosité des amateurs, qui se demandent ce que l'on voit dans un grand télescope, mais parce que leur simple 250 millimètres leur montrera hélas plus d'une fois le phénomène que nous effleurons le sujet ici.

Une étoile d'aspect vraiment planétaire s'observe parfois par conditions spécialement mauvaises telles qu'un vent froid comme le mistral peut en produire ;

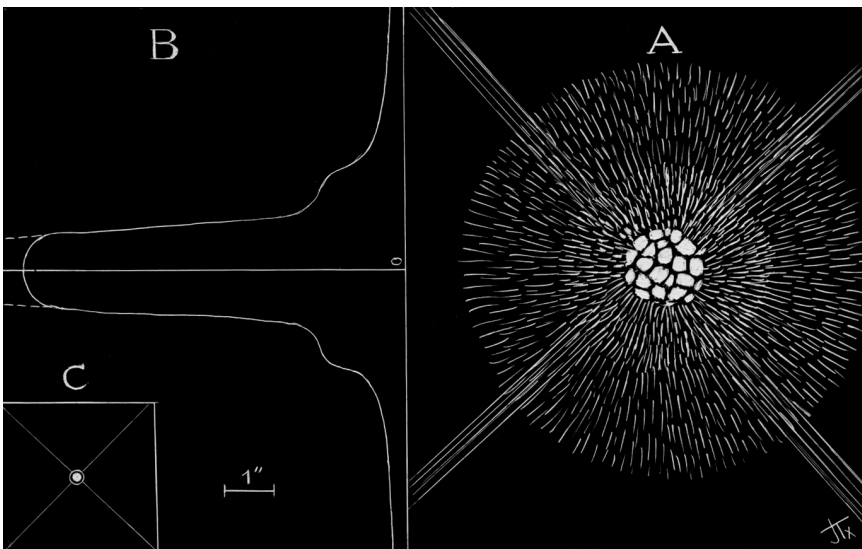
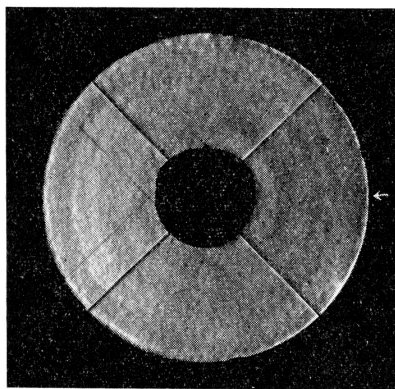


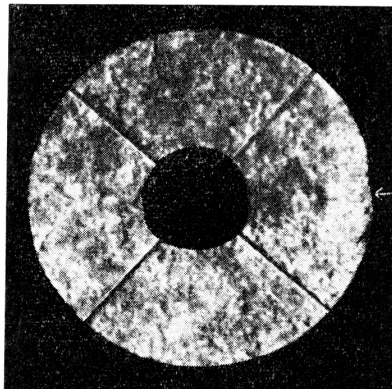
Fig. 151. - Étoile brillante observée dans un grand télescope.

l'on voit alors un disque flou à bords bouillonnant, explosant parfois d'un diamètre de $6''$ jusqu'à $20''$! sans maximum central bien marqué, un vrai plateau d'énergie à peu près uniforme. Nous nous intéresserons davantage à une altération, heureusement beaucoup moins grave et beaucoup plus fréquente, observable dans un télescope supérieur à un mètre d'ouverture par une nuit où l'on aurait noté t dans un petit instrument égal à $0''3$ environ. La figure 151 A est une tentative de représentation de l'image d'une étoile brillante - β Per. ; $m_v = 2,3$ - observée au télescope de 193 centimètres de l'Observatoire de Haute-Provence avec un grossissement de 960 ; c'est un épouvantable galimatias de concamérations grains et vermineux lumineux en mouvement rapide dont les régions centrales, seules bien visibles sont représentées ici, le phénomène entier s'étend sur plusieurs minutes sans rejoindre la noirceur du fond du ciel. Voyons encore le centre de cette région centrale, il

est constitué par des grains de quelques centièmes à quelques dixièmes, de secondes d'arc extrêmement intenses et mobiles qui forment un *paquet* qui sous-tend $0^{\circ}2$ à $2''$ suivant la nuit considérée, $1^{\circ}5$ dans les conditions présentes ; à l'extérieur du *paquet central* une région encore très claire dont les grains plus fins deviennent de plus en plus faibles et donnent ici un poudroier lumineux à deux paliers de $4/5''$ et $7/8''$ de diamètre. Les aigrettes de diffraction des lames support du plan secondaire sont elles-mêmes estompées de manière variable. La courbe B suggère, très approximativement, la répartition d'énergie ; nous espérons réaliser un jour de véritables mesures. Il faut combattre maintenant énergiquement une croyance tenace très répandue qui veut rendre les défauts du grand miroir responsables de cet étalement d'énergie ⁽¹⁾. Au moins



A) Pose 2 minutes



B) pose 1/100e de seconde

Fig. 152. – Foucaultgramme du télescope de 193 centimètres.

dans le cas du télescope de 193 centimètres employé ici et que nous connaissons parfaitement non seulement les défauts du grand et du petit miroir sont assez petits mais la combinaison complète en service, flexions et effets thermiques corrigés, donne une onde stigmatique à $\lambda/8$ (foucaultgramme, fig. 152 A), *il est certain qu'en l'absence d'atmosphère la figure de diffraction normale de $0^{\circ}15$ de diamètre (fig. 151 C) serait obtenue* : limité par l'albédo du papier, le dessin ne peut donner qu'une idée dérisoire de la fantastique énergie qui serait concentré dans cette image. Ce résultat est utopique, même l'air d'un grand laboratoire climatisé bien clos est déjà suffisamment hétérogène pour empêcher cette observation ; espérer le moment miraculeux idéal dans un grand instrument est insensé mais un étalement très relatif des accidents turbulents suffit pour produire une amélioration de définition foudroyante.

Prévenons une autre erreur qui serait de croire le grand télescope inférieur à un petit à cause de la turbulence. Le même phénomène destructeur extérieur existe pour les deux seulement dans le petit, on le distingue très incomplètement par manque d'énergie et importance de la figure normale de diffraction ; la

⁽¹⁾ J. DOMMANGET, Le projet de création d'un observatoire européen en Union Sud Africaine, *Ciel et Terre*, t. LXXIV, n° 7-8, p. 312.

supériorité en définition du grand télescope, impossible à exploiter par mauvaises images, est indiscutable par images *moins mauvaises* qu'il faut malheureusement attendre parfois deux ou trois mois avec un miroir de deux mètres.

Est-il bien nécessaire de souligner que ni les angles de turbulence t ni les écarts de tautochronisme, qui tendent tous deux vers une limite atteinte avant 50 centimètres d'ouverture, n'expliquent à *eux seuls* un éparpillement aussi grand de l'énergie ? Il faut obligatoirement faire intervenir maintenant la conséquence de l'extrême complexité de la surface d'onde reçue par le miroir. Une telle surface d'onde est un *réseau de phase* dont les accidents sont incomparablement plus grands, inclinés, mélangés que ceux dont nous avons donné les photographies figures 47 et 139 en contraste de phase par la méthode de Lyot. Ici la méthode de Foucault est inutilement sensible mais une difficulté subsiste à cause de la mobilité extrême des remous. Nous avons réussi au télescope de 193 centimètres, pointé sur Sirius, à obtenir de très petits foucaultgrammes posés au $1/10^{\text{e}}$ de seconde seulement (fig. 152 B). Un temps de pose de l'ordre du millième de seconde parviendrait seul sur une image assez grande à montrer fidèlement le phénomène, l'on distingue cependant assez bien sur cette image des sirops dans le tube même de l'instrument et des grandes nappes turbulentes beaucoup plus importantes à l'extérieur. Le foucaultgramme du même instrument exposé cette fois *deux minutes* (fig. 152 A) intègre tous les défauts atmosphériques mobiles et montre les vrais défauts optiques des miroirs en service dont l'amplitude, rappelons-le, ne dépasse pas $\lambda/8$.

Le terme *réseau* est habituellement réservé à une pièce d'optique gravée de sillons parallèles, très fins et réguliers, diffractant la lumière suivant une loi simple dans un spectre central d'ordre zéro et toute une série de spectres fortement déviés d'ordre 1, 2, 3, etc. Ici au contraire c'est l'anarchie presque complète, les défauts de tailles illégales sont mélangés, inclinés dans tous les sens et en agitation quasi brownienne mais ils sont tout de même des millions à avoir une taille à peu près égale et des milliers à un instant donné à avoir la pente nulle qui donnera la grande énergie centrale, ils diffractent dans un angle solide important atteignant facilement des dizaines de secondes d'arc suivant une loi complexe et variable, assez bien définie statistiquement toutefois pour donner l'image décrite plus haut pendant plusieurs heures. Un coup de mistral survient amenant une nappe de sirops fins laminés parallèlement à la direction du vent, aussitôt l'image explose et l'on observe que son diamètre perpendiculairement à la direction du vent est plus grand car le laminage des accidents cause une dissymétrie sensible dans les angles diffractés.

127. Altération de l'image de diffusion photographique. – L'image d'un point lumineux sur une émulsion photographique rapide ne descend pas en dessous de 20 à 25 μ de diamètre à cause de la diffusion de la lumière dans la gélatine : par ailleurs un miroir à F/6 donne une tache de diffraction de 8 μ de diamètre, le pouvoir résolvant voisin de ρ exigera un ajustage de ces valeurs par l'emploi d'un amplificateur focal portant F/D à 36 au moins et bien plus en pratique. Bien entendu la turbulence va jouer le rôle de trouble fête. Une appréciation subjective des résultats fait souvent dire que la photographie est incapable de fixer tous les « détails » visibles directement à cause du temps

de pose nécessaire trop long et de l'étalement corrélatif par les réfractons. En réalité, dans les grands instruments au moins, c'est l'œil qui exploite le moins bien le miroir. Prenons le télescope de 5 mètres, la turbulence limite le grossissement utile à 1 000 environ donc la pupille instrumentale mesure 5 millimètres mais elle est trouée d'une plage noire de près de 2 millimètres due à l'obstruction centrale.

Or la pupille de l'œil, éblouie par une planète ou une étoile brillante dans un tel instrument, se contracte à 2 millimètres environ ; si l'œil est bien centré sur

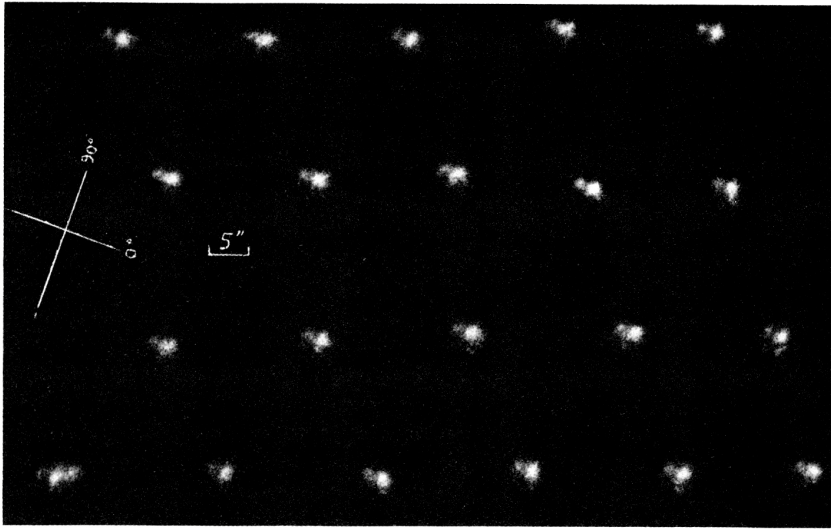


Fig. 153. – Photographies instantanées : 1/100 de seconde de l'étoile double α Gem. 'Castor) ; 8 avril 1955 ; télescope de 120 centimètres d'ouverture ; amplificateur Barlow x 3,1 ; agrandissement 10 ; longueur focale équivalente 219 mètres.

l'anneau oculaire il ne voit rien, il faut se déplacer un peu sur le côté et diaphragmer par l'iris le miroir à 2 mètres environ. Pour la question de la brièveté du temps de pose le contrôle expérimental est également facile car une étoile brillante au foyer d'un miroir d'un mètre, même muni d'un amplificateur, donne assez d'énergie pour poser 1/500 de seconde si l'on veut sur émulsion très sensible ordinaire, or il faut bien 1/10 de seconde à l'œil pour voir un « détail ». La figure 153 montre ainsi des images successives, posées 1/100 de seconde, de l'étoile double Castor, si jolie dans la moindre lunette de 75 millimètres, la turbulence assez favorable correspondait à un *paquet central* de l'ordre de la seconde. Non seulement la turbulence n'est pas éliminée mais l'effet des écarts aléatoires est particulièrement choquant ; certes l'on voit des détails « fins », mais absolument illusoire : aigrettes, compagnons fantômes, etc., tandis que la distance des vraies composantes ($2''4$) fluctue de plusieurs dixièmes de secondes et leur angle de position de près de 20° . Un temps de pose d'une seconde au moins serait nécessaire pour donner des images sérieusement mesurables. Les «détails» vus par l'œil paraissent psychologiquement plus vrais, c'est que l'œil est un récepteur très intelligent.

Nous pouvons donc réfuter deux croyances tenaces, il y en a d'autres, dans un grand ou un moyen instrument :

1° la diminution de temps de pose n'améliore pas le rendu de détails réels ;

2° c'est la turbulence proprement dite et non les réfractions accidentelles qui est responsable de l'étalement de l'image photographique.

Voyons enfin la photographie à longue pose directement au foyer de miroirs à F/6 environ où l'on ne prétend plus approcher le pouvoir séparateur théorique.

A première vue les 25μ de la diffusion photographique vont constituer la seule limite résolvente : pas du tout ! cette peste de turbulence intervient

même dans un modeste télescope d'amateur comme nous allons le voir. Quelques mots d'explication sur l'aspect macrophotographique des images d'étoiles faibles photographiées dans un télescope grand ou petit. La figure 154 est un féroce agrandissement négatif d'un très petit morceau d'un excellent cliché de la nébuleuse d'Andromède M31 obtenu au foyer du télescope de 120 centimètres de l'Observatoire de Haute-Provence. La lumière du fond du ciel nocturne et la population II non résolue de la nébuleuse voilent irrégulièrement le fond de la plaque constitué par des « gros » grains très clairsemés.

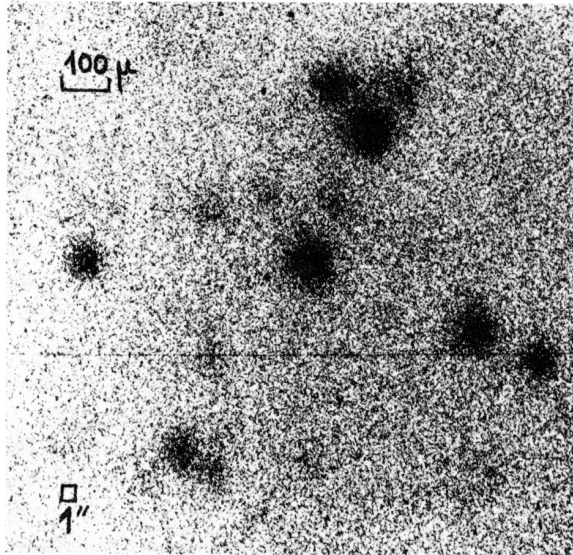


Fig. 154. – Images négatives d'étoiles très grossies, x 60.

Les images d'étoiles faibles mais certaines (ici m_{pg} 21 environ) sont des plages, constituant un léger palier de densité, où les gros grains sont simplement un peu plus nombreux ; si l'étoile est moins faible le palier est plus élevé et mieux dessiné par un apport de grains plus fins, un maximum central se développe permettant au mesureur « optimiste » d'annoncer une bonne performance ; au contraire aucune tricherie possible avec l'étoile à l'extrême limite, qui cesse d'être significative faute de gros grains assez nombreux pour dépasser nettement les fluctuations du fond, mais *sans diminuer de diamètre*. Ce diamètre est celui du *paquet central* décrit § 126 et figure 151. Lui seul apporte suffisamment de photons pour rendre développables les gros grains dans le cas d'une étoile faible. Le diamètre de l'image photographique se mesure aisément à 5 ou 10 % près au moyen d'une petite machine à mesurer, grossissement optimum du microscope 20 environ. Nous trouvons 60μ sur le cliché en question soit $1''7$, valeur très supérieure au diamètre de 22μ imposé par la seule diffusion photographique

sur l'émulsion employée (IIaO, Kodak Rochester) ; d'où vient cette perte sévère de pouvoir résolvant ? S'agissant du meilleur document obtenu, après des années de soins méticuleux, où l'on est certain de la qualité surabondante de l'optique, vérifiée avant et après la pose ; de la perfection et de la stabilité de la mise au point, de l'exactitude du guidage surveillé et corrigé en permanence ; l'on peut parler sinon d'une limite absolue du moins d'une limite

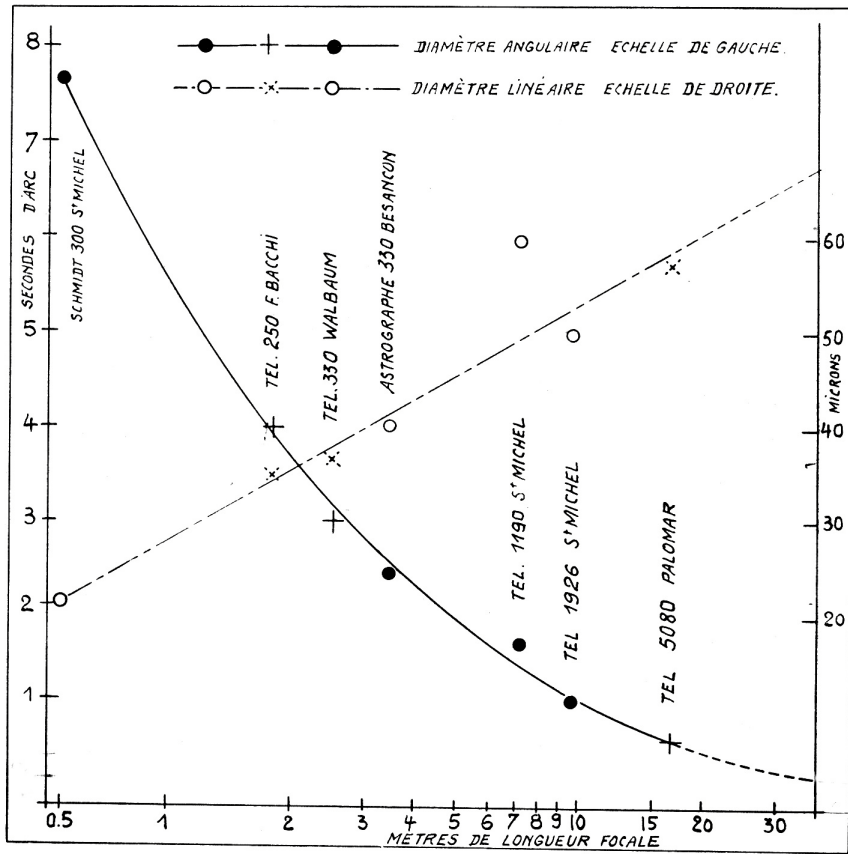


Fig. 155. - Diamètres des plus petites images photographiques d'étoiles en fonction des dimensions instrumentales.

expérimentale pratique presque impossible à dépasser. Cette limite ne peut provenir que de la turbulence, c'est presque la même que nous avons trouvée sur les clichés instantanés à échelle beaucoup plus grande, essayons de voir comment elle varie en fonction des dimensions des instruments. Pour que cette comparaison soit pleinement significative il faudrait être certain que les meilleures conditions sont remplies dans tous les cas et que l'on mesure bien un document type pratiquement parfait. Sur le graphique de la figure 155 les cercles désignent des clichés personnels les meilleurs que nous possédons, tous pris sur émulsion 103aO ou IIaO et dans des conditions sûres ; les croix concernent un choix

de deux clichés d'amateurs empruntés aux collections de nos collègues F. Bacchi (télescope de 250) et Walbaum (télescope de 330), ces documents, fruits de plusieurs années d'efforts dans les deux cas, nous ont paru offrir des garanties suffisantes ; la dernière croix enfin concerne une photo prise par Baade au télescope de 5 mètres du Mont Palomar et montrant la résolution en population II de la nébuleuse elliptique NGC 205 ⁽¹⁾ dont la qualité paraît également difficile à dépasser. Naturellement les longueurs focales portées en abscisses - sur une échelle logarithmique pour la commodité - entraînent des ouvertures correspondantes croissantes car les instruments, sauf exception, sont à peu près homothétiques.

Les sites des différents instruments ne sont pas équivalents, même dans une station donnée, le micro-climat produit, très localement, des anomalies qui peuvent affecter spécialement un instrument - voir notamment le point anormal sur le graphique, concernant le télescope de 120 centimètres de Saint-Michel - ceci montre l'utilité de l'étude, faite plus loin, des étages turbulents.

Ces réserves faites il reste incontestablement une amélioration de la résolution photographique dans les grands télescopes, comment concilier cela avec notre explication par la surface d'onde en réseau de phase puisque les accidents, extérieurs aux instruments, restent les mêmes et diffractent de la même lumière ? Il faut considérer le résultat global qui est l'image dont l'amélioration est due au moins à trois causes :

1° Le centre de dispersion de l'énergie, c'est-à-dire la figure de diffraction normale a un diamètre plus petit avec un grand miroir , ceci n'explique qu'une faible part du gain et ne s'applique pas aux miroirs de 3 mètres (Lick) et de 5 mètres (Palomar) dont les qualités optiques sont suffisantes pour donner une bonne image photographique mais pas le faux disque théorique ⁽²⁾.

2° Au grand miroir correspond une surface d'onde composée d'accidents plus nombreux, la courbe de répartition de l'énergie (fig. 151 B) est mieux dessinée dans ses détails ; en particulier le *paquet central* responsable du pic est constitué par des grains plus nombreux qui dessinent un sommet plus élevé et plus pointu (amorce de cette courbe en pointillé à gauche de la figure), *la section de ce pic au niveau juste capable de franchir le seuil de l'émulsion a un diamètre plus petit.*

3° Les fluctuations de position du pic central sont plus rares et de plus faibles amplitudes avec une surface d'onde grande devant les accidents élémentaires. Ceci est facile à comprendre, si l'objectif n'est pas beaucoup plus grand que les éléments inclinés la probabilité pour qu'un de ces éléments couvre, à un instant donné, une bonne fraction de la pupille est grande ; il n'y a pas destruction mais déplacement ou déformation de l'image. Au contraire la loi de répartition d'un grand nombre d'accidents d'inclinaisons comprises entre 0 et t est plus ou moins gaussienne, *le pic central est d'autant plus stable que le miroir est plus grand et les accidents plus nombreux.*

(1) Voir *L'Astronomie*, couverture du numéro de décembre 1953.

(2) MAYALL, VASILEVSKIS : Quantitative test of the Lick observatory 120 inch mirror, *The Astronomical Journal*, Vol. 65, n° 5, June 1960, p. 304.

LS. BOWEN, Final adjustments and tests of the Hale telescope, *P.A.S.P.*, Vol. 62, n° 366, June 1950, p. 91.

A une surface d'onde parcourue par de larges accidents correspond une image mieux concentrée mais subissant des réfractions d'ensemble notables tandis que si les accidents sont fins l'image est plus étalée mais son centre parfaitement stable. Dans les deux cas l'avantage est au grand miroir.

L'échelle logarithmique du graphique dissimule l'énormité de l'effort instrumental à fournir pour gagner une fraction de seconde d'arc en définition. L'extrapolation de la courbe - en pointillé - à un télescope d'une dizaine de mètres de diamètre montre que l'on pourrait en espérer des images photographiques d'étoiles descendant à 0"4 ou 0"5, ce gain peut paraître peu convaincant par rapport aux 0"7 du 5 mètres, en réalité il est fondamental pour le progrès de nos sondages de l'univers. En effet, outre la turbulence, il existe une seconde cause atmosphérique de limitation des performances d'un grand instrument : c'est la lumière du fond du ciel nocturne qui constitue une source parasite étendue de magnitude 22 par seconde carrée d'après Baum ⁽¹⁾. Or une seconde carrée c'est la surface couverte par une image d'étoile faible au 5 mètres si les conditions ne sont pas exceptionnellement bonnes ; une étoile de magnitude 22 double l'éclairement et donne une forte image, mais une 23 n'ajoute que 40% et une 24, 16% seulement ; l'on ne va pas au delà, non parce que le récepteur manque de sensibilité mais parce qu'il faut concentrer l'énergie utile dans une aile de ciel plus petite *et seul un plus grand miroir peut le faire*.

Nous voici arrivés à des tonnages instrumentaux bien éloignés des télescopes d'amateurs mais dans ce domaine le graphique apporte aussi des renseignements réconfortants. Les instruments de nos deux collègues se placent très correctement dans la hiérarchie des performances et une personne non prévenue serait étonnée de leur efficacité vu la modestie extrême des moyens. Les magnitudes 17 à 18 sont atteintes et les images sont seulement 3 ou 4 fois plus grosses que celles données par un colosse de 500 tonnes ! Sans doute l'amateur n'a ni le désir ni les moyens de faire progresser les connaissances de l'univers mais les résultats possibles sont déjà spectaculaires et avec un peu de méthode ils pourraient participer à de véritables recherches comme la découverte et la surveillance des supernovae dans les galaxies. La sympathie pour les monstres, seuls capables d'atteindre l'ultime limite, ne doit pas faire sous-estimer l'énormité du travail à faire encore avec des instruments moyens et petits servis par de nombreux observateurs.

128. Premier étage de turbulence : l'instrument. - Il est commode pour l'analyse de la turbulence de distinguer trois étages qui n'ont pas nécessairement une frontière nette mais se prêtent à des degrés très divers à une intervention positive de l'observateur.

Pour la turbulence dans l'instrument même il est temps de reprendre expérimentalement la discussion du § 87 sur l'utilité d'une lame de fermeture.

Pointons le télescope sur une étoile brillante ou mieux sur une planète dont le diamètre apparent est de 10 à 20" de préférence. Enlevons l'oculaire et faisons l'expérience de Foucault (§§ 29-31) en utilisant en guise de lame de couteau improvisée par exemple le bord d'une carte de visite appuyée sur la monture

⁽¹⁾ Some photoelectric problems, Otto STRUVE, *Sky and telescope*, Vol. XIV, n° 5, March 1955, p. 188.

du porte-oculaire. Même avec une monture azimutale un peu d'habitude suffit pour bissecter l'image pendant une seconde ou deux et rectifier la mise au point de notre couteau d'après le sens du déplacement de l'ombre. Au lieu de l'extinction uniforme du miroir qui devrait s'observer comme au centre de courbure d'un sphérique, on voit passer devant le miroir des ombres très

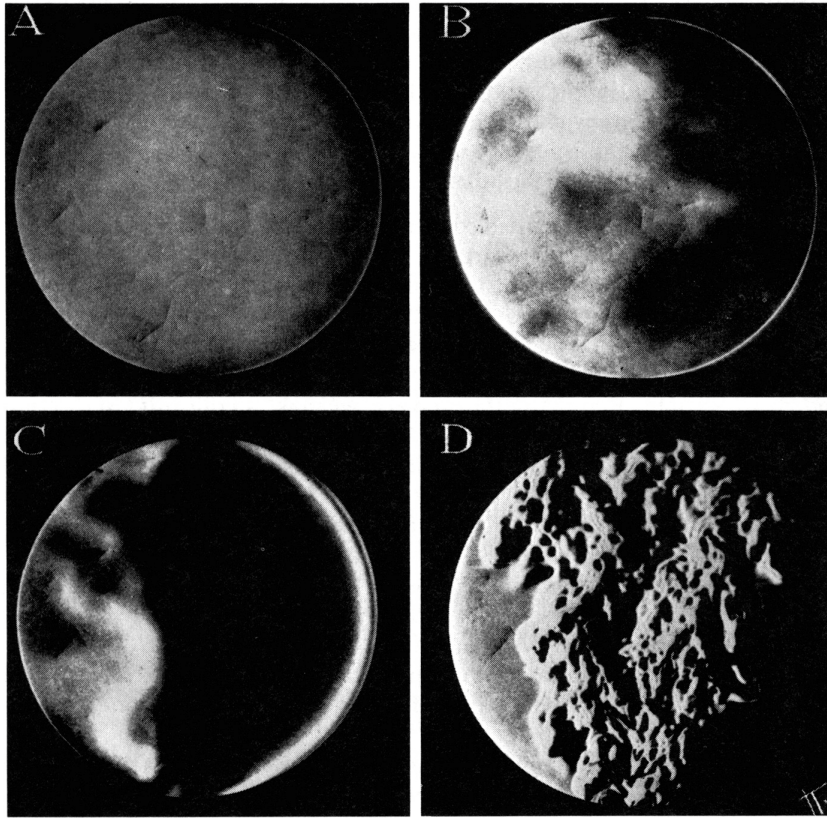


Fig. 156. – Turbulences d'origine instrumentale (miroir sphérique de 500 millimètres).

A.- Air calme, remous très lents. Fente 5 μ . Pose 1 seconde.

B.- Remous rapides de ventilateur. Fente 15 μ . Pose 1/50 de seconde.

C.- Remous lents et gaine du tube. Fente 15 μ . Pose 1/25 de seconde.

D.- Forte turbulence rapide (bougie 30 centimètres en dessous de l'onde). Fente 45 μ . Pose 1/250 de seconde.

Méthode de Foucault : couteau à droite dans tous les cas.

contrastées produites par les veines d'air optiquement hétérogènes. Nous donnons figure 156, quelques exemples d'aspects possibles imités au laboratoire avec un miroir sphérique d'atelier de 200 millimètres de diamètre, 5 500 millimètres de rayon de courbure n'ayant en propre que des défauts de 2/100 d'onde environ.

La formule de Rayleigh montre assez qu'il ne faut pas compter obtenir avec l'instrument en service une absence totale de perturbation appréciable.

La figure 156 A montre les remous faibles ($\lambda/10$ env.) larges et très lents qui existent dans une cave ; un temps de pose de plusieurs minutes serait nécessaire pour les intégrer et révéler les défauts de forme réels du miroir.

Des anomalies de ce genre altèrent à peine l'image de diffraction d'une étoile, on observe seulement des petits changements d'éclat, sur le premier anneau de diffraction et des déformations passagères du faux disque (fig. 149 IV et III). Supposons tout de même que l'on espère réaliser une homogénéité encore meilleure en brassant l'air près du miroir au moyen d'un ventilateur. La figure 156 B (ventilateur de 20 centimètres de diamètre placé 60 centimètres à gauche du miroir) montre le piteux résultat obtenu : des remous rapides partagent l'onde en fragments de 5 à 6 centimètres fortement inclinés, les déphasages sont de l'ordre de $\lambda/2$. La cote de l'image (fig. 149) tombe à II, l'énergie éparpillée dans les premiers anneaux de diffraction brisés en arcs mobiles très brillants, le faux disque reste cependant visible mais la détection d'un compagnon faible serait fortement compromise. Ce n'est que pour des turbulences dans le tube encore plus graves que le ventilateur pourrait apporter une amélioration.

Les parois du tube du télescope, très longues dans le sens des rayons incidents, sont le siège d'échanges thermiques qui peuvent être très gênants. L'aspect photographié figure 156 C a été produit par un morceau de tube court (10 centimètres) n'ayant qu'un centimètre de plus en diamètre que le miroir et une température 5° plus élevée que celle de l'air ambiant. On constate la formation de larges remous à déplacements lents, intéressant des fractions notables de la surface d'onde, en outre une gaine épaisse de 3 centimètres environ borde les parois du tube et produit ici au bord droit du miroir un déphasage sensiblement supérieur à une frange. L'image est onduleuse mais reste utilisable, elle est bien entendu affectée de la notable aberration zonale produite par la gaine.

Des effets beaucoup plus néfastes s'observent à l'intérieur du tube métallique trop étroit, les remous sont alors rapides et nombreux, la gaine existe en permanence au bord d'une paroi métallique, pour l'éviter, il faut donner au tube un diamètre 10 centimètres plus grand que celui du miroir. Le tube du télescope standard malgré sa section un peu juste donne de bons résultats, en partie à cause de sa forme carrée, mais surtout à cause de ses panneaux de contreplaqué très peu émissifs. Des effets thermiques moins graves s'observent au bord des pièces métalliques inévitablement interposées dans le faisceau : monture du miroir secondaire et lames support. Le lecteur trouvera dans *L'astronomie* ⁽¹⁾ un article spécial de M. A. Couder sur ce sujet.

La figure 156 D montre un exemple de perturbations énormes, extrêmement rapides, très étroites, très inclinées, qui existent 50 centimètres au-dessus de la flamme d'une bougie. Il est à peine besoin de dire que l'image de diffraction s'évanouit en une plage 50 fois plus large constituée par un poudroiement de vermicelles lumineux. Une destruction aussi radicale de l'image n'est pas nécessaire pour empêcher toute observation utile, des veines turbulentes pratiquement aussi nuisibles s'élèvent des pièces métalliques d'une monture équatoriale, du sol et de ce remarquable radiateur que constitue l'observateur. Tous

(1) *L'Astronomie*, t. 63, sept. oct. 1949, p.253.

les tailleurs de miroirs se sont amusés en foucaultant à observer les remous qui s'élèvent de la main d'une personne interposée dans le faisceau près du miroir.

La turbulence instrumentale peut et doit être combattue au moins à partir de 250 d'ouverture, les solutions possibles font l'objet du § 67.

129. Deuxième étage : la turbulence locale. - Naturellement, au voisinage de l'instrument et jusqu'à plusieurs centaines de mètres existent des sources de troubles que nous ne pouvons plus détourner du faisceau. Cependant la respiration de l'observateur peut encore être écartée avec un déflecteur léger prolongeant de 40 centimètres environ le tube proprement dit. Le vent latéral attaquant obliquement l'ouverture du télescope produit des graves tourbillons spiralés particulièrement marqués si l'air a léché un toit chaud. Les plus mauvaises conditions locales sont atteintes dans une pièce d'appartement en pointant l'instrument à travers une fenêtre, même après un équilibrage thermique approximatif de la pièce, il subsiste un régime tourbillonnaire irrégulier mais permanent qui ne laisse pas grand espoir d'utiliser avec fruit des grossissements supérieurs à 100 ou 150. Malgré tout, ceux qui ne peuvent observer autrement auraient tort de se décourager, avec un peu de persévérance, ils trouveront des circonstances favorables à certaines époques de l'année (souvent au printemps) ou à la fin de la nuit. Quand le régime thermique est renversé et que l'air extérieur est plus chaud que l'intérieur, il est possible d'obtenir d'excellentes images. S'il n'en était pas ainsi, presque tous les instruments astronomiques placés dans une coupole seraient inutilisables pour les travaux nécessitant un grand pouvoir résolvant. En plein air, les conditions sont généralement meilleures, il faut éviter les terrasses bétonnées très larges exposées au soleil pendant la journée, les murs et de façon générale, tous les radiateurs proches de grande capacité. La configuration du terrain est également importante, l'air chaud remonte suivant les lignes du thalweg, les situations à flanc de coteau et à vue partiellement masquée par une colline sont *a priori* défavorables, cependant il n'y a pas de règles absolues et c'est à l'expérience de décider dans tous les cas. L'air chaud ou refroidi circulant près d'une source éloignée produit des aspects faciles à confondre avec la turbulence à haute altitude, l'essai de Foucault ne montre plus de remous nets relativement lents mais des fluctuations larges trop rapides pour être interprétées par l'observation directe. Avec un oculaire, il n'est pas possible de mettre au point sur les remous comme nous l'indiquons plus loin. Pour nous les meilleures conditions locales (le choix du milieu géographique est une autre affaire) seraient obtenues en terrain plat avec sol gazonné, l'instrument monté sur un pilier à plusieurs mètres de hauteur, le plancher d'observation porté par une charpente légère à claire-voie en bois, l'abri supporté par la même charpente beaucoup plus grand et plus haut que l'instrument, cloisons et toit à double parois, toit roulant vers le nord. La figure 131 montre un abri de ce genre, à la fois pratique et économique, tout au moins si l'on recule devant la haute charpente qui porterait le tout à plusieurs mètres du sol. Les coupoles les moins mauvaises ont également des cloisons calorifugées, un diamètre très grand par rapport à l'encombrement de l'instrument et une large trappe que l'on peut espérer dépourvue de graves remous dans la moitié centrale.

130. **Troisième étage : la turbulence en altitude.** - Pointons le télescope sur le limbe lunaire ; mettons un oculaire de grossissement moyen $G = 200$ sur un standard ; faisons une mise au point soignée sur les détails lunaires et notons le tirage exact du coulant au moyen d'un régllet divisé. La turbulence rend le limbe lunaire onduleux ; tirons l'oculaire légèrement en arrière, les ondulations deviennent plus contrastées, plus nettes, il semble bien que l'on arrive à mettre au point sur les remous. Au premier tirage obtenu correspond la longueur focale F du miroir ; le second tirage $F+a$ est la distance conjuguée d'un objet turbulent dont la distance réelle est p' l'on a :

$$p' = \frac{Fp}{p-F} \text{ et en pratique } p' = \frac{F^2}{a}$$

L'on trouve parfois p' de quelques centaines de mètres seulement s'il y a un vent froid au sol, du genre Mistral, la turbulence locale rejoint alors la turbulence en altitude, mais le plus souvent on localise une couche assez bien définie dont l'altitude est voisine de 3 500 mètres. Bien entendu cela n'est pas si simple. Un collègue amateur, M. Boyer, a fait à Cotonou une longue étude portant sur 5 000 sondages environ obtenus avec un télescope de 190. Les cotes dans l'échelle Danjon réduite statistiquement en fonction des directions des vents à toutes altitudes mirent en évidence non seulement la couche classique, trouvée à 3 400 mètres, mais une seconde couche troublée très nette à 5 500 mètres. Les sondages météorologiques disponibles ne dépassaient pas 6 000 mètres mais il est certain qu'il existe d'autres étages d'anomalies. Lors des expériences de J. Blamont comportant la création de nuages de sodium, éjecté à haute altitude par des fusées Véronique, nous avons pu photographier, à l'aide d'un télescope newtonien de 250, des flocons de moins de 2 minutes d'arc produits à 80 kilomètres d'altitude dans un vent transversal de 36 mètres par seconde !

Il ne faut donc pas espérer d'amélioration décisive sur la turbulence globale en choisissant un site élevé. La turbulence locale, souvent prépondérante, subsiste toujours et le focaultage d'un instrument fermé dans lesquels on fait le vide montre qu'une amélioration sérieuse exige une pression résiduelle d'une fraction de millimètre de mercure seulement. Les photographies à haute définition de la granulation solaire, prises en ballon avec des ouvertures de 30 centimètres seulement environ, n'ont donné des résultats vraiment meilleurs qu'au sol jusqu'à des altitudes d'environ 25 kilomètres. L'observatoire élevé est surtout intéressant pour la meilleure transparence atmosphérique ; quelquefois un concours heureux de circonstances fait qu'il est également supérieur à la moyenne au point de vue de la qualité des images, c'est le cas de quelques pics isolés (Mont Hamilton, Pic du Midi) ou de plateaux choisis (Mont Palomar).

Le site terrestre idéal pour un grand instrument est une utopie, il faudrait quitter la Terre et s'installer sur la Lune par exemple ! Toutefois la prospection, la recherche de l'endroit le moins mauvais conserve un intérêt certain si elle est conduite avec un esprit réaliste et pas trop subordonnée à des considérations extra-techniques. L'instrument de prospection, très mobile, doit avoir un diamètre d'au moins 50 centimètres pour permettre des études visuelles et surtout photographiques extrapolables à de grandes dimensions. En particulier des photographies à longue pose techniquement parfaites classeraient

immédiatement la station par report sur un graphique du genre de la figure 155. Le site général choisi, après une étude systématique portant au moins sur une année entière, l'implantation des bâtiments devrait surtout être conçue de manière à éviter le plus possible la création de turbulence locale - coupoles bien isolées dans la végétation et les plus hautes possibles.

Une fois de plus nous avons débordé largement du domaine habituel de l'amateur, une information surabondante paraissant nécessaire sur un sujet qui domine toutes les possibilités de l'astronomie. D'ailleurs nous connaissons des amateurs de choc capables de prospector le site à choisir pour les vacances ou la retraite en tenant compte de la qualité des images. Les plus nombreux qui subissent les phénomènes tels qu'ils sont à leur domicile doivent se dire après cette analyse que la complexité de l'atmosphère est telle qu'en aucun point de la terre il faut s'attendre à des miracles tandis que les stations à première vue les plus disgraciées bénéficient parfois de conditions supérieures à la moyenne. Par exemple au-dessus de l'agglomération parisienne s'élève une brume crasseuse très défavorable pour la transparence mais *excellente du point de vue de la turbulence*, elle joue le rôle d'une serre immense où les échanges d'air sont souvent beaucoup moins violents.

131. **Conclusion.** - Avant de lâcher l'amateur dans sa recherche personnelle des curiosités du ciel, nous avons voulu l'armer complètement pour lui donner les meilleures chances de comprendre. Beaucoup n'utiliseront qu'une faible part des données et certes ni les bulletins de contrôle scrupuleux, ni les lames de fermetures, les équatoriaux et l'analyse de la turbulence ne sont indispensables pour admirer des détails lunaires ou les nébuleuses. D'autres au contraire attendent maintenant de nouvelles précisions sur les télescopes de Schmidt, les Maksutov et les Brachytes, sur les réflecteurs et les coronographes, sur les filtres monochromatiques polarisants, etc... car la marotte une fois lancée est insatiable, elle ne peut être limitée que par le temps des loisirs disponibles et encore... ! Laissons les plus acharnés sur leur faim puisque le sujet est de toutes manières, inépuisable ; d'ailleurs ceux qui ont franchi déjà toutes les étapes actuelles ont acquis une expérience qui leur permet des initiatives originales souvent valables, ils peuvent se passer maintenant d'instructions détaillées.

Le curieux se lançant dans l'étude du ciel à l'oculaire de son télescope est un véritable touriste franchissant la frontière d'un pays nouveau pour lui. Il n'est pas nécessaire pour un touriste d'avoir construit son automobile mais ce n'est pas nuisible et cela peut être utile en cas de panne. Tout en voyageant pour son plaisir et à sa fantaisie notre touriste peut s'intéresser à des choses très diverses : monuments, curiosités naturelles, habitants, cultures, restaurants à étoiles (celles du guide) ; il peut voir les choses à fond ou superficiellement, il peut aussi simplement ne rien voir du tout ou voir des choses qui n'existent que dans son imagination.

Reste la question de trouver un carburant adapté à son moteur, nous voulons dire des ouvrages de documentation convenables. A défaut d'une bibliographie détaillée nous croyons utile de donner un court lexique de deux mots souvent employés dans les jugements sur les ouvrages :

Clair, *avec une nuance de satisfaction* : se dit d'un mémoire court de préférence réduit à un groupe de formules ou mieux une formule unique rigoureusement inintelligible par elle-même. Par extension la clarté concerne des exposés très condensés dont les finesses sont hautement appréciées des spécialistes qui connaissent déjà la question à fond.

Complicé, *associé à une nuance péjorative de confusion* : se dit d'un long exposé dont les développements sont directement intelligibles au commun des mortels.