

EMPLOI DE LA CAMERA ELECTRONIQUE GRAND CHAMP AVEC LES TRES GRANDS TELESCOPES.

EXTRAPOLATION DES RESULTATS OBTENUS AVEC LE TELESCOPE C.F.H.

Use of the large field electronographic camera with very large telescopes.

Extrapolation of the results obtained with the 3.6 m. C.F.H. Telescope.

G. Wlérick, L. Renard, D. Horville, F. Gex, J.M. Munier, Observatoire de Paris
et Laboratoire Associé n° 335 du C.N.R.S.,

G. Lelièvre, Société du Télescope C.F.H.,

A. Llebaria, Laboratoire d'Astronomie Spatiale, Marseille,

A. Bijaoui, Observatoire de Nice,

R. Dubout, Observatoire de Lyon,

M. Petit, Observatoire de Marseille.

Abstract : the large field Lallemand electronographic camera has proved to be an ideal receptor for bidimensional photometry with the C.F.H. 3.6 m. Telescope. It permits to measure faint stars up to about $B = 25$. Plates of a large variety of objects have been obtained ; for example : crowded fields such as the nearby galaxy Messier 33 ; fields where one must recognize faint galaxies from stars; objects for which a high spatial resolution is needed, such as the optical jet of Messier 87 or gravitational lenses. It is possible to predict the limits of the receptor with a very large telescope.

Résumé : associée au Télescope C.F.H. de 3,6 m., la caméra électronique Lallemand à grand champ s'est révélée être un récepteur idéal pour la photométrie bidimensionnelle. Elle permet la mesure d'étoiles jusqu'à environ $B = 25$. Des clichés d'objets astronomiques très variés ont été obtenus ; par exemple : des champs encombrés tels que le bras Sud de la galaxie Messier 33 ; des champs où on veut distinguer les galaxies très faibles et les étoiles ; des objets pour lesquels une résolution spatiale très élevée est nécessaire, tels que le jet optique de Messier 87 ou les lentilles gravitationnelles. Il est possible de prédire les limites du récepteur avec un très grand télescope.

Proceedings of the IAU Colloquium No. 79: "Very Large Telescopes, their Instrumentation and Programs", Garching, April 9-12, 1984.

1. Introduction.

Les limites de détection et de mesure des étoiles faibles ont été étudiées par Baum (1955) et Vernier (1958) :

1 - la magnitude limite augmente comme $-2,5 \log t$, où t est la largeur à mi-hauteur des images : un très grand télescope doit donc être placé dans un très bon site ("excellent seeing").

2 - lorsqu'on est loin de la saturation du récepteur, (par exemple clichés photographiques ou électronographiques pas trop posés), la magnitude limite augmente comme $2,5 \log D$, où D est le diamètre du télescope.

3 - lorsqu'il y a saturation, le diamètre du télescope n'apparaît plus explicitement dans les formules : la magnitude limite augmente comme $2,5 \log F$ où F est la longueur focale ; autrement dit la magnitude limite augmente avec la capacité de stockage ; pour que celle-ci soit élevée, il faut que F soit grand et donc, même avec un très grand télescope, il faut que (F/D) effectif soit aussi grand que possible.

Il y a donc un problème d'échelle : pour couvrir utilement un champ angulaire suffisant ($> 10'$), un très grand télescope doit être équipé d'un récepteur d'images de grandes dimensions ; la caméra électronique grand champ répond à ce critère, comme la plaque photographique ; sa détection est plus grande que celle de cette dernière et sa précision photométrique est plus élevée.

2. Rappel des avantages des récepteurs électronographiques.

- Grand format.
- Image continue.
- Très grand nombre d'éléments images (pixels).
- Bruit de fond négligeable.
- Pas de bruit de lecture.
- Pas de problèmes dus à la proximité d'une étoile très brillante.
- Haute résolution.
- Grande capacité de stockage.
- Logiciels disponibles pour traiter les données.

3. La caméra électronique grand champ à Hawaii.

Un ensemble de caméras électroniques Lallemand à grand champ (Lallemand et al., 1970) a été installé au foyer Cassegrain F/8 du télescope de 3,6 m C.F.H., en Décembre 1982 (Servan et al., 1983). Le champ est de 10'. Les caméras ont permis d'obtenir une série de clichés avec un rapport signal sur bruit très élevé et une excellente résolution spatiale. Les qualités du récepteur, ses propriétés photométriques et les premiers résultats astronomiques ont été décrits (Wlérick et al., 1983).

Dans ce qui suit, nous montrons quelques exemples qui permettent de prévoir les possibilités d'une caméra électronique au foyer d'un très grand télescope.

4. Premier exemple, un champ très encombré : le bras Sud de la galaxie Messier 33.

Le but du programme est la mesure des magnitudes U, B et V des étoiles pour déterminer leurs propriétés en fonction de leur position dans le bras (R. Dubout, 1984). La figure 1 présente un cliché en couleur U. La longueur focale de 30 m. permet de bien résoudre les étoiles. Bien que la bande spectrale soit large (80 nm), les régions HII, émettant la raie de $[OII] 3727 \text{ \AA}$, apparaissent avec une grande finesse et un bon contraste autour des étoiles chaudes, en particulier au front du bras.

La figure 2 montre la même région en couleur B. Avec des images de 1,2" et une pose de 120 minutes, une multitude d'étoiles apparaît. Ceci se voit encore mieux sur l'agrandissement de la figure 3 ; sur celle-ci, on remarque les zones opaques dues à des poussières, de plus, dans la partie supérieure du cliché, au-dessus du bras, c'est à dire dans la région de l'interbras, on note un très grand nombre d'étoiles qui n'avaient pas été observées auparavant.

Les figures 4, 5 et 5 bis sont relatives au traitement des données dans une partie de ce cliché (cf. figure 2). Les mesures sont difficiles pour au moins deux raisons : la multitude des étoiles et le fond très élevé dû aux nébulosités et aux étoiles non résolues. La figure 4 montre les premières phases du traitement : en a, un fichier brut (étoiles plus fond) ; en b, la détermination du fond continu ; en c, le même fichier après soustraction du fond continu. La figure 5 permet de vérifier que l'opération de soustraction du fond n'altère pas les fréquences spatiales élevées présentes dans le cliché. La figure 5 bis indique comment on peut effectuer la mesure de la magnitude d'une étoile par comparaison avec le profil type des étoiles du cliché.

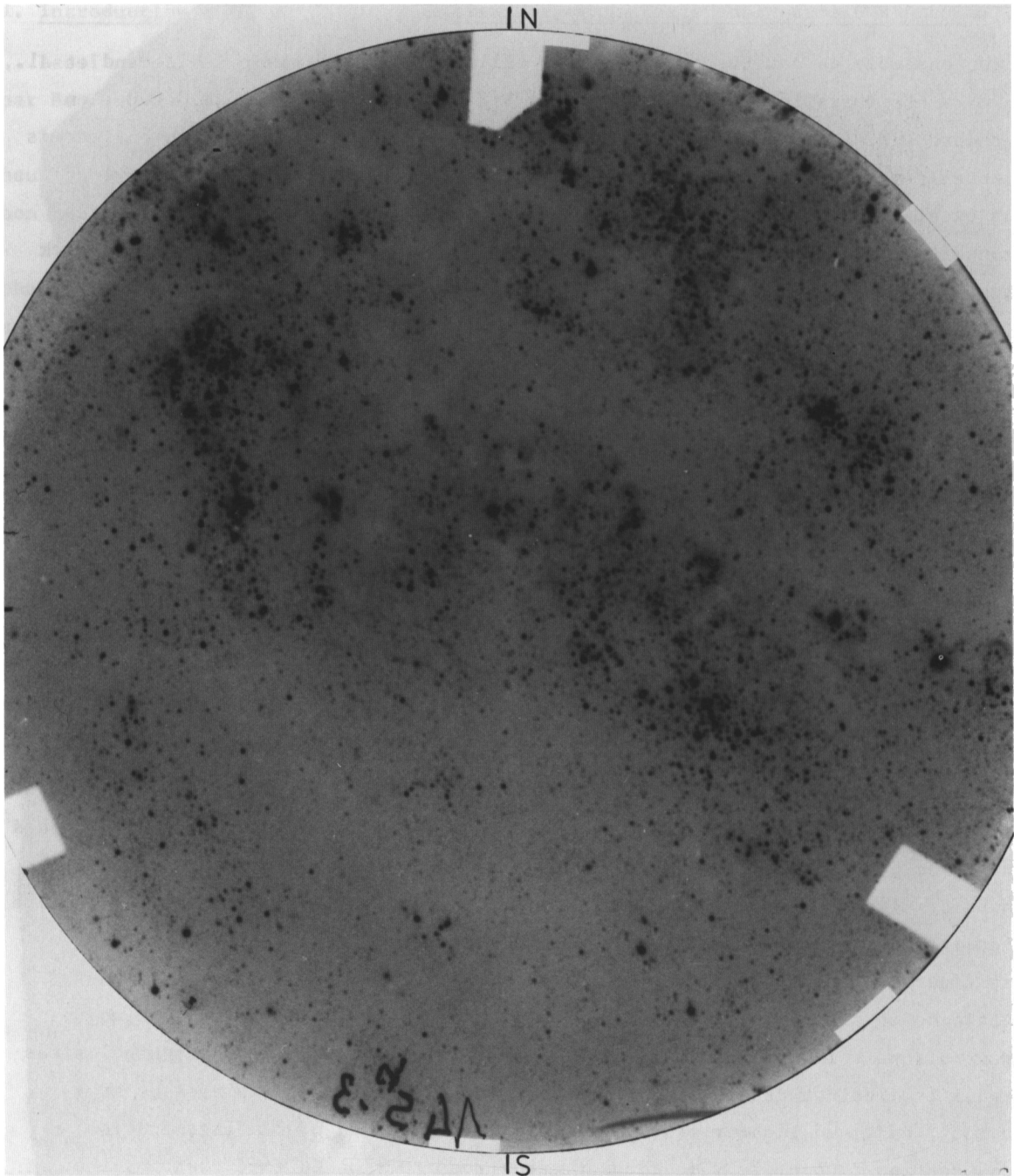


Figure 1 - Bras Sud de la galaxie Messier 33 ; couleur U ; pose 60 min ;
8 Novembre 1983, cliché n° HbY 80. Noter les nébulosités émettant $[OII] 3727 \text{ \AA}$
autour des étoiles chaudes.

Figure 1 - South arm of Messier 33 ; U colour ; exposure 60 min ; Nov. 8, 1983;
plate n° HbY 80. One sees the $[OII] 3727 \text{ \AA}$ emitting regions around hot stars.

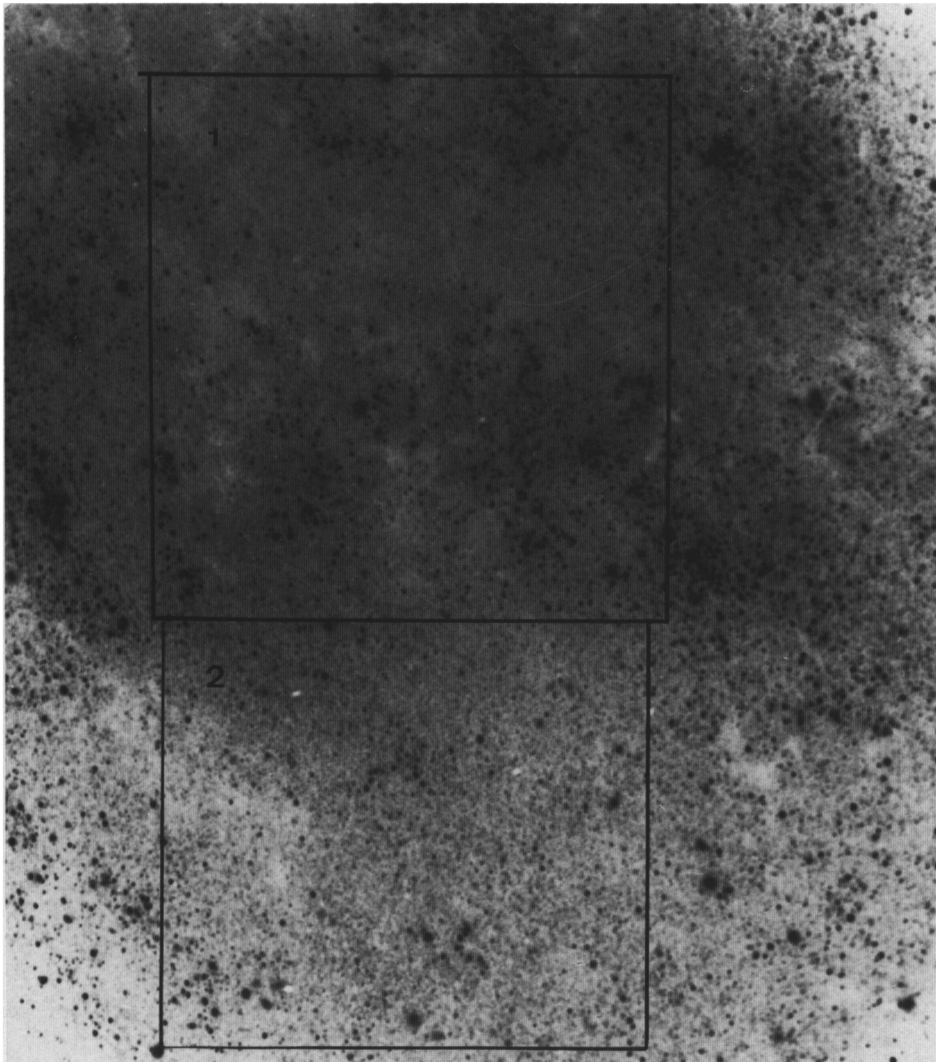


Figure 2 - Messier 33 ; même champ que sur la fig. 1 mais en couleur B ;
pose 120 min ; 10 Novembre 1983, cliché n° HbY 84. La région 1 est agrandie sur
la fig. 3 ; la fig. 4 montre le traitement numérique effectué sur la région 2.

Figure 2 - Messier 33 ; same field as in fig. 1 but in colour B ; exposure 120 min
Nov. 10, 1983 ; plate n° HbY 84. Region 1 is enlarged in figure 3 ; fig. 4
shows data handling made for region 2.

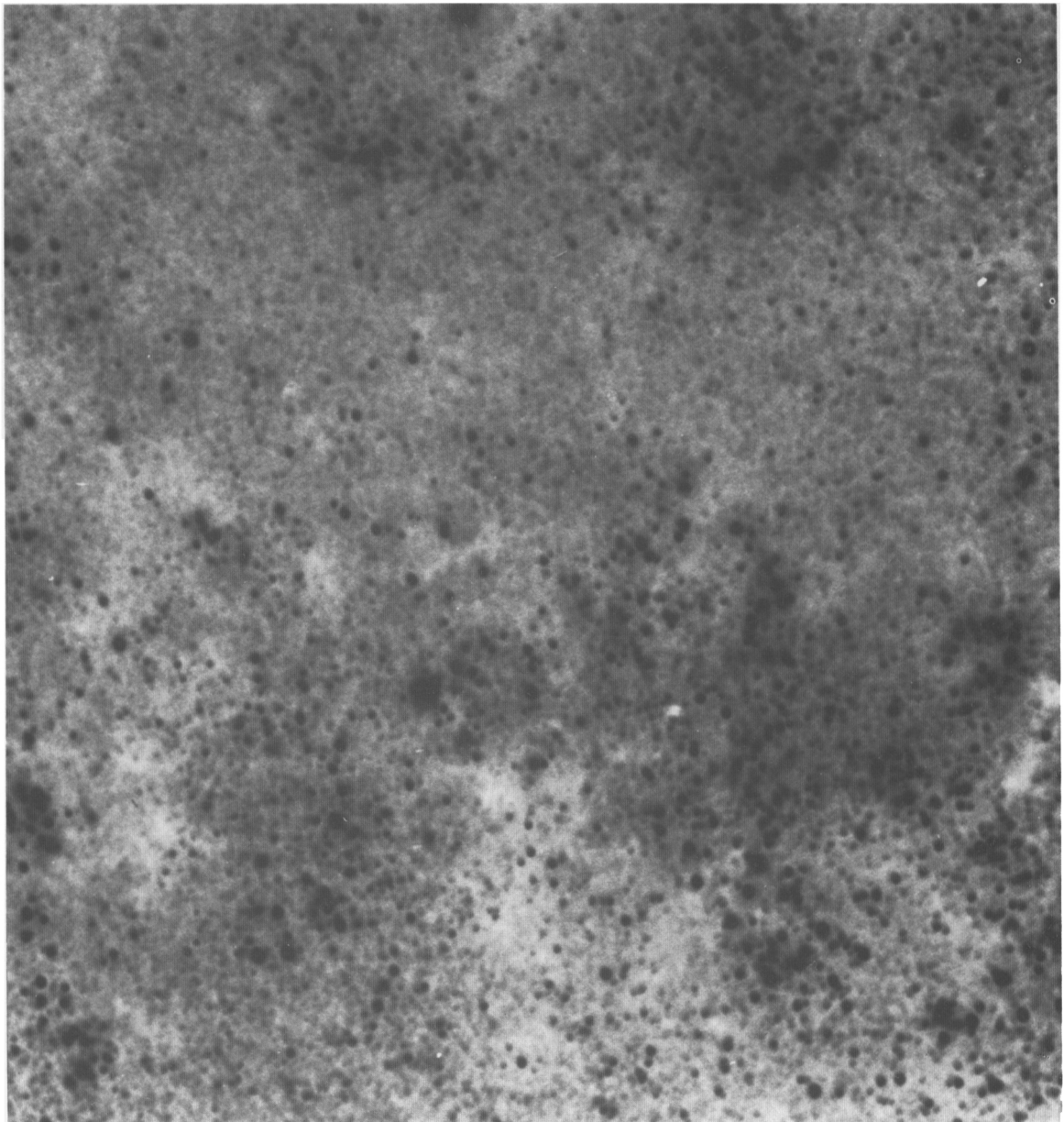


Figure 3 - Agrandissement d'une partie de la fig. 2. Au-dessus du bras, des étoiles très faibles apparaissent dans l'interbras.

Figure 3 - Enlargement of a part of fig. 2. Above the arm, many faint stars appear in the interarm region.

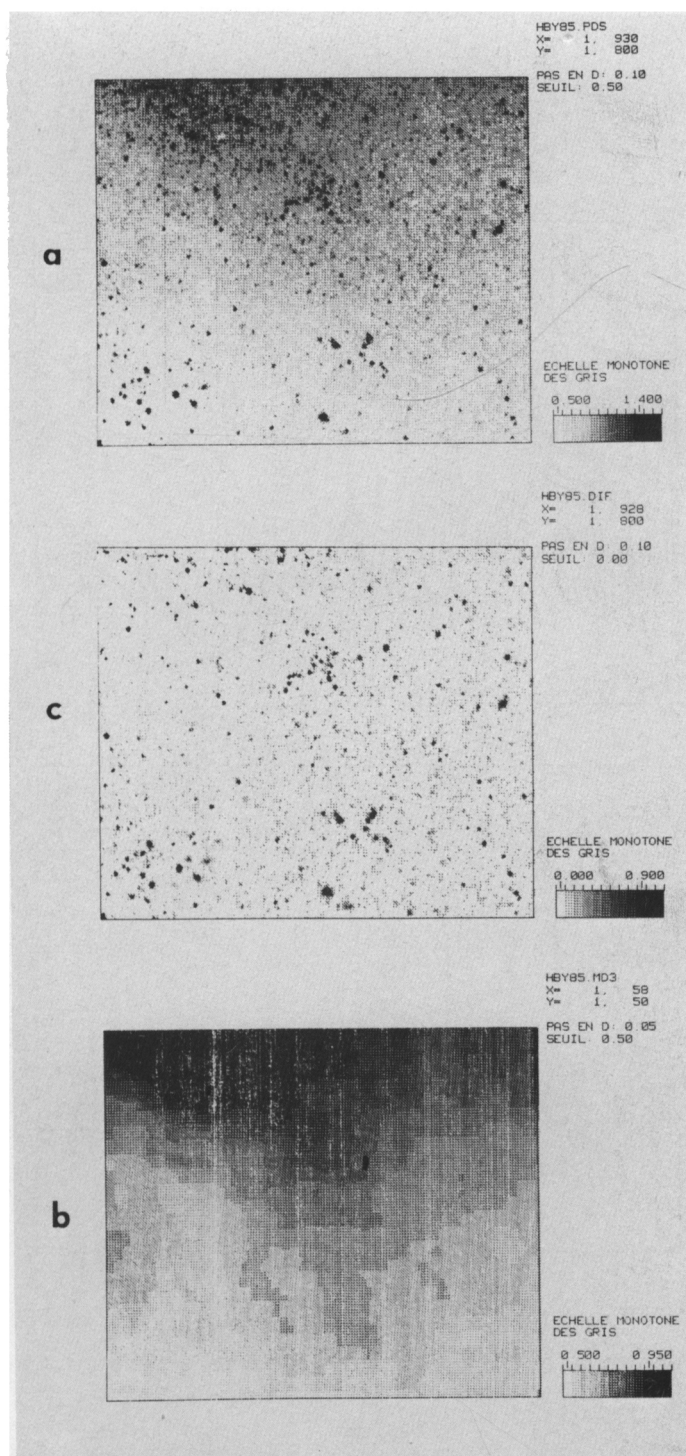


Figure 4 - a, représentation du fichier obtenu à partir de la région n° 2 de la figure 2. b, détermination du fond continu galactique. c, fichier obtenu après soustraction de ce fond continu.

Figure 4 - a, data obtained from scans of region 2 of figure 2. b, continuous galactic background. c, data obtained after subtraction of this background.

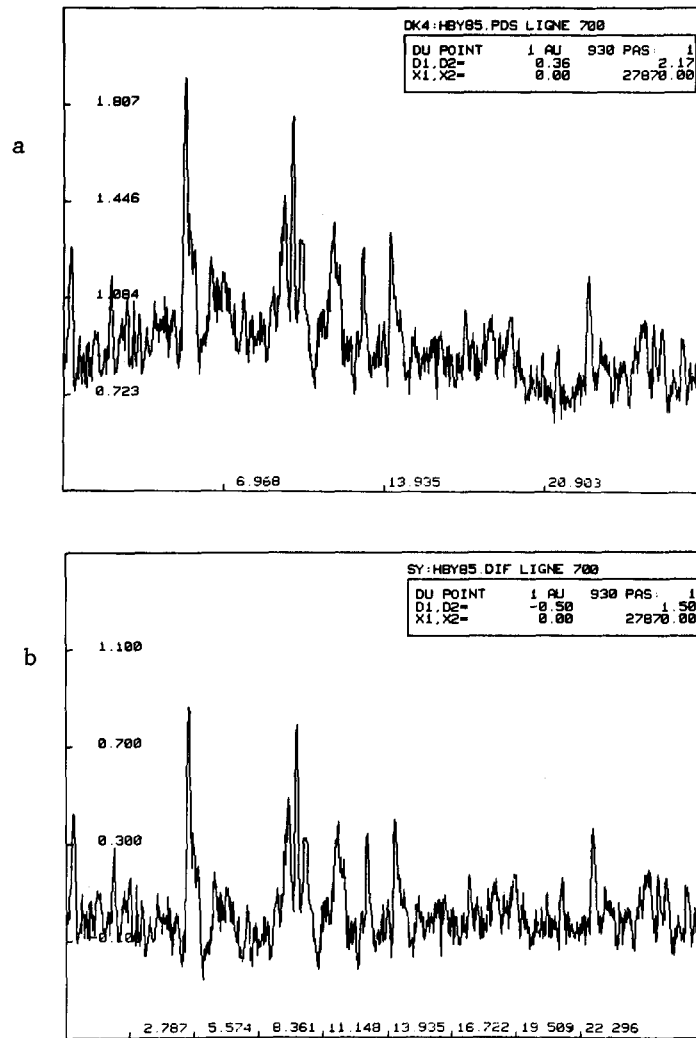


Figure 5 - a, examen d'une ligne du fichier présenté figure 4a. b, la même ligne après soustraction du fond continu ; on voit que cette soustraction n'affecte pas les hautes fréquences spatiales.

Figure 5 - a, display of a line of the data of figure 4a. b, same line after subtraction of the continuous background ; the high spatial frequencies are unaffected.

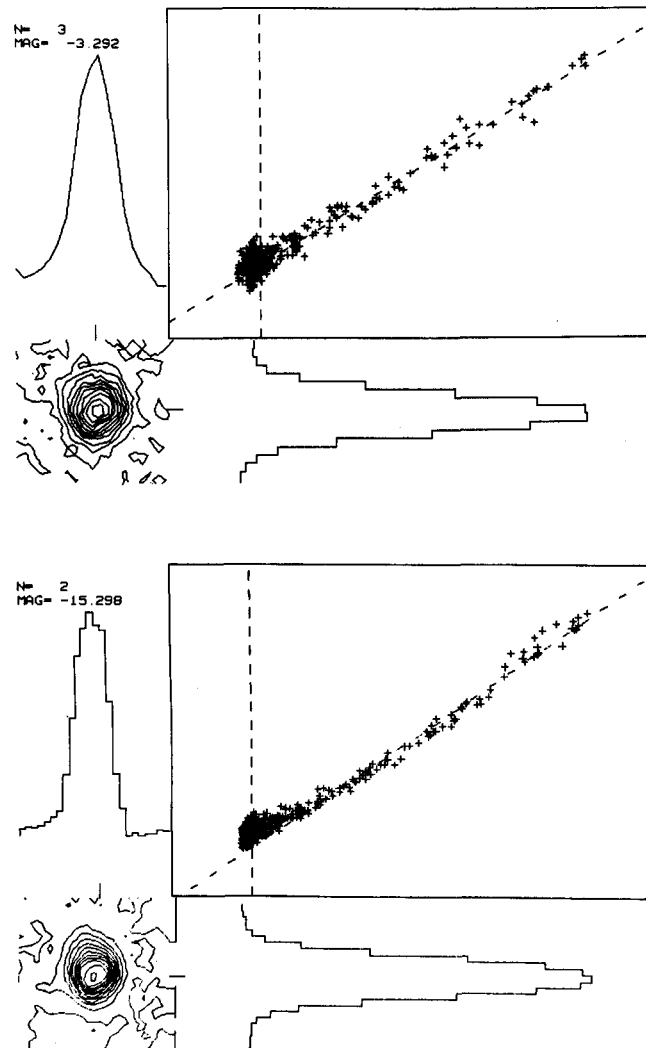


Figure 5^{bis} - Calcul de magnitude pour deux étoiles d'éclat différent. On compare chaque astre avec une "étoile type" obtenue par addition des images de plusieurs étoiles du cliché, ayant chacune un bon rapport signal sur bruit.

Figure 5^{bis} - Determination of the magnitude of two stars of different brightness. The stars are compared to a "standard star", obtained by adding the images of a few stars, each having a good signal to noise ratio.

Cet exemple montre que le télescope C.F.H., équipé d'une caméra électronique grand champ, permet la prise de clichés plus poussés que ceux obtenus à ce jour et qu'il existe des logiciels qui permettent d'extraire l'ensemble des informations contenues dans ces clichés.

5 - Deuxième exemple : un autre champ encombré, l'amas globulaire Messier 5.

Pour déterminer l'abondance de l'Hélium dans les amas, G. et R. CAYREL utilisent certaines particularités du diagramme Herzprung-Russel (V, B-V) et se servent de la magnitude U comme critère d'appartenance à l'amas. Des clichés U, B, V permettant de mesurer, avec précision, l'éclat des étoiles jusqu'à $V = 22,5 - 23$ sont nécessaires. La figure 6 reproduit un cliché de Messier 5, posé 90 min en couleur U ; avec des images de $1,08''$, la magnitude limite atteinte est $U_{lim} = 24,4$.

6 - Troisième exemple : discrimination entre étoiles et galaxies très faibles.

Trois facteurs favorisent cette discrimination : la grande longueur focale, ≈ 30 mètres ($1'' \approx 142 \mu m$), les images assez piquées ($0,9''$ à $1,3''$) et le rapport signal sur bruit très élevé des poses moyennes ou longues. A titre d'exemple, nous présentons, figure 7, un cliché représentant une partie du champ Sandage-Véron-Braccisi dans lequel plusieurs sondages ont été effectués par divers auteurs, pour déterminer la densité des quasars faibles. En couleur B, avec une pose de 46 min. et des images de $1,37''$, on obtient pour les étoiles la magnitude limite $B_{lim} = 25,2$. Les formules de Baum et de Vernier permettent de calculer qu'avec des conditions courantes (largeur des images $1,0''$, pose 60 min., rendement de la cathode 10 %), la magnitude limite aurait été : $B_{lim} = 26,1$. Le cliché montre également les pastilles de calibration utilisées pour établir la courbe de calibration "éclairage-densité optique".

7- Quatrième exemple : saisir les bonnes images.

Pour bénéficier vraiment des périodes où la turbulence atmosphérique est faible, il faut disposer d'un ensemble télescope-récepteur puissant, permettant d'atteindre un rapport signal/bruit élevé, en un temps de pose pas trop long. Nous avons mis à profit cette possibilité pour enregistrer, à haute résolution, les jets optiques du quasar 3C 273 et de la radiogalaxie Messier 87. Le jet de Messier 87, observé en 10 min, avec des images de $0,62''$, est présenté figure 8 ; ce cliché et d'autres plaques du même objet ont permis de trouver des propriétés nouvelles (Lelièvre et al., 1983) : existence d'une condensation L contigue au noyau, oscillations du jet dès son origine, mesure des dimensions de toutes les condensations, observation du fait qu'au delà de la condensation G, le jet est défocalisé,...

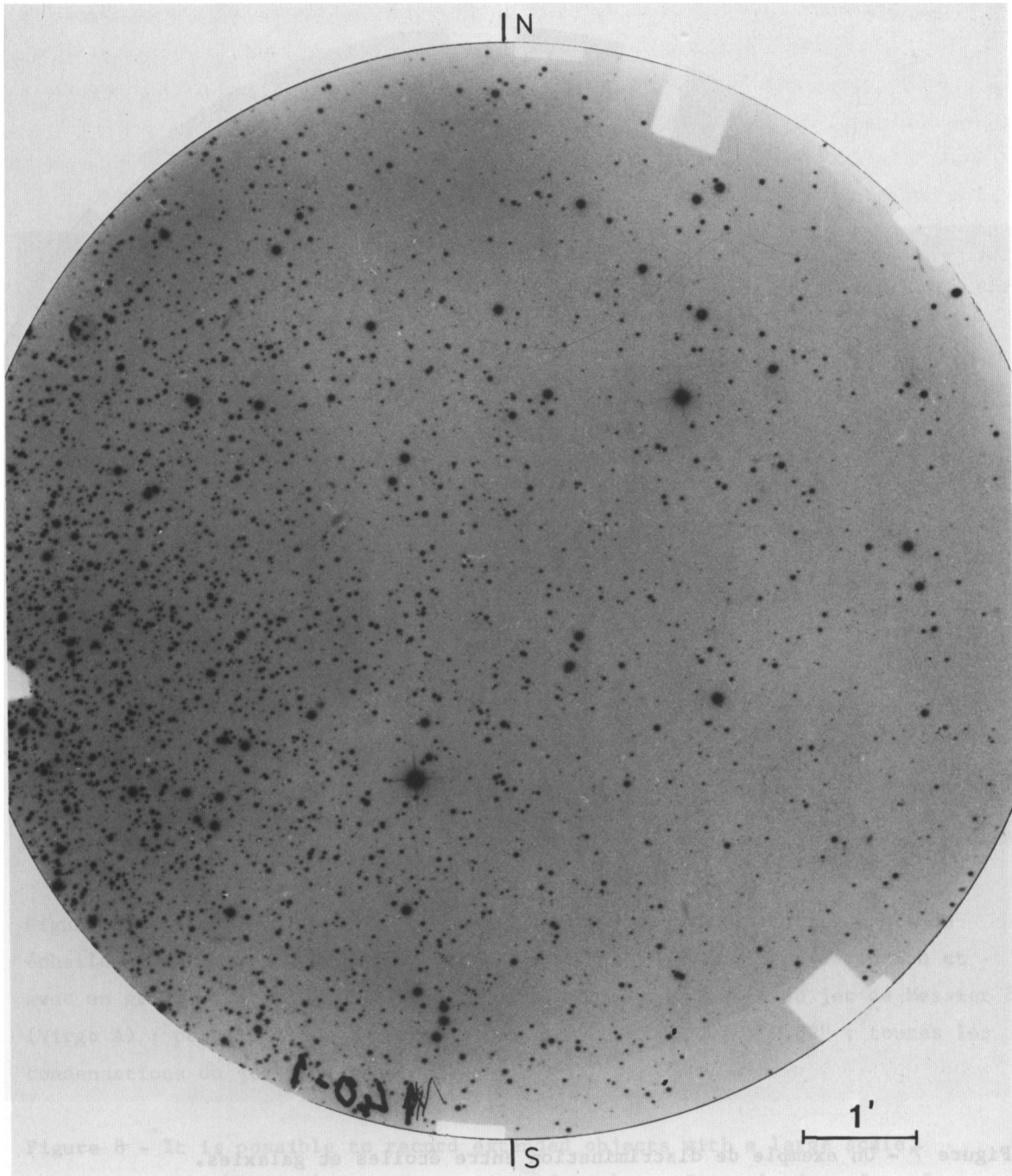


Figure 6 - Un autre exemple de champ encombré : la partie ouest de l'amas globulaire Messier 5 ; couleur U ; pose 90 min ; 12 Mars 1983; cliché n° HbY 43; magnitude limite $U_{lim} = 24,4$.

Figure 6 - Another example of crowded field : the west part of the globular cluster Messier 5 ; U colour ; exposure 90 min ; March 12, 1983; plate n° HbY 43; limiting magnitude $U_{lim} = 24.4$.

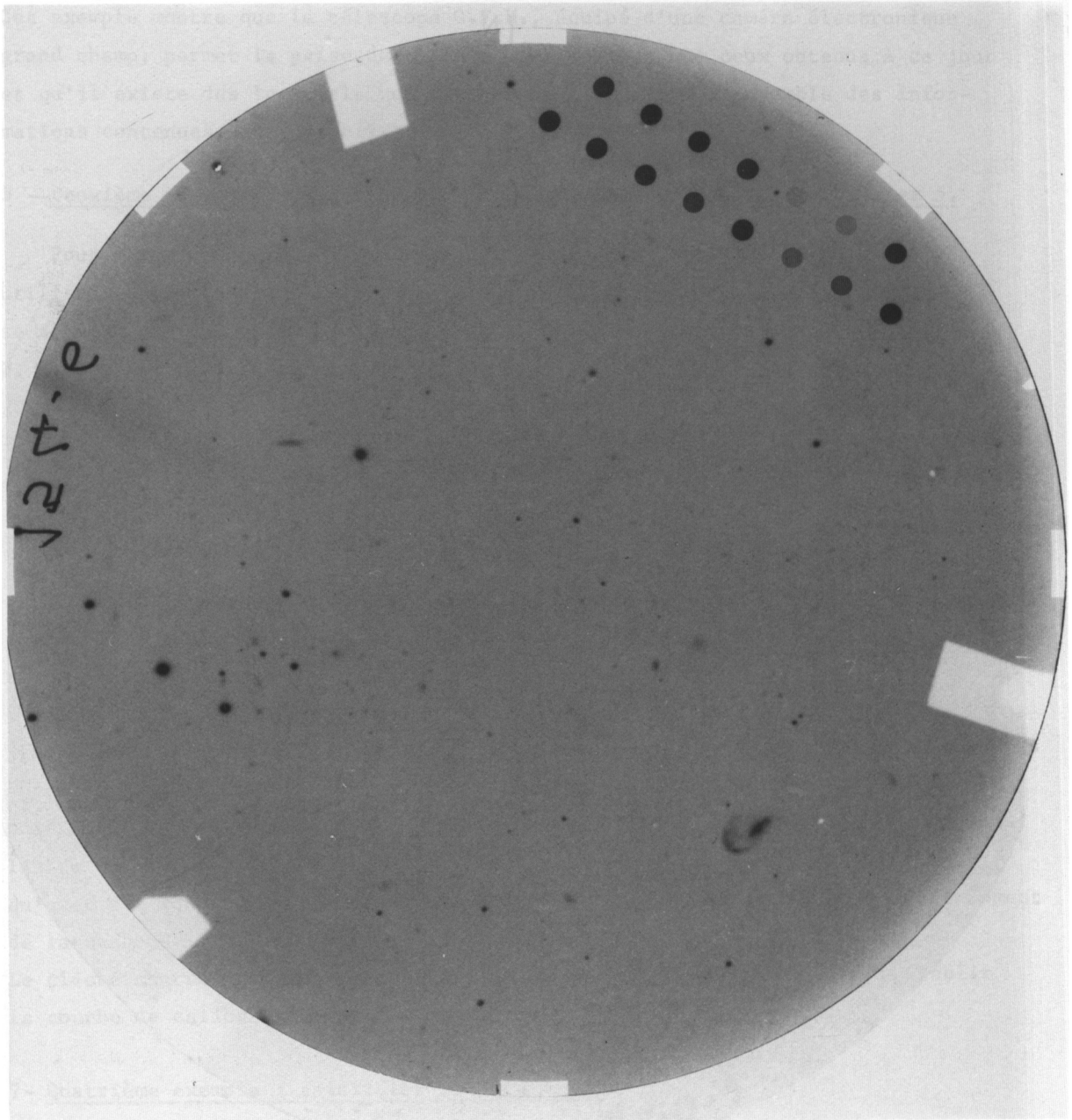


Figure 7 - Un exemple de discrimination entre étoiles et galaxies.
 Champ Sandage - Véron - Braccési ; couleur B ; pose 46 min, 31 Mars 1984 ;
 magnitude limite pour les étoiles : $B_{lim} = 25,2$.

Figure 7 - The large scale permits to distinguish faint galaxies from stars.
 Field Sandage - Véron - Braccési ; B colour ; exposure 46 min ; March 31, 1984 ;
 limiting magnitude for stars : $B_{lim} = 25.2$.

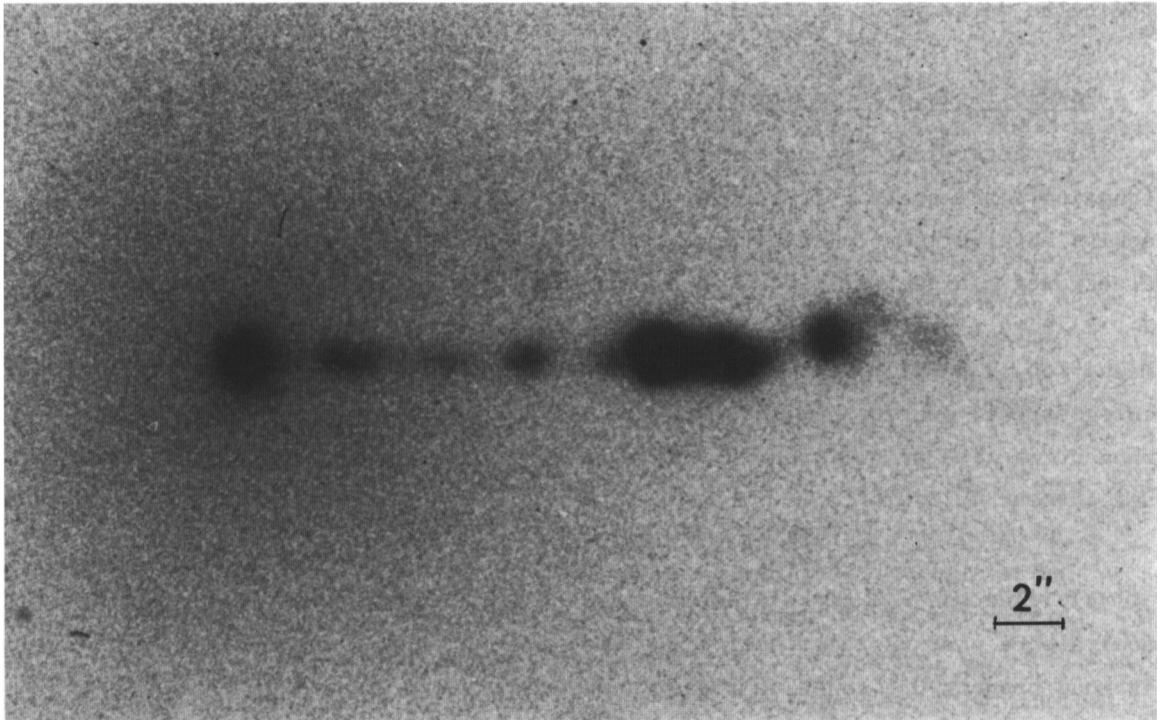


Figure 8 - L'électronographie permet de prendre des clichés avec une grande échelle et donc d'enregistrer les astres étendus sans perte de résolution et avec un grand rapport signal/bruit. Ici, cliché en couleur U du jet de Messier 87 (Virgo A) ; pose 10 min ; largeur des images à mi-hauteur : 0,62" ; toutes les condensations du jet sont résolues.

Figure 8 - It is possible to record extended objects with a large scale, permitting a high signal to noise ratio and no loss of resolution. Jet of Messier 87 (Virgo A) in U colour ; exposure 10 min ; full width of images at half maximum : 0.62" ; all the condensations of the jet are resolved.

De même, des résultats nouveaux ont été obtenus sur la lentille gravitationnelle PG 1115 + 080 dite "quasar triple" (Vanderriest et al., 1983) : en particulier, il a été observé que les composantes de l'image ont présenté une forte variation entre 1981 et 1983, le rapport de flux des images restant à peu près constant, ce qui s'interprète bien comme une lentille gravitationnelle dans laquelle les différences de temps de trajet entre les images sont petites par rapport à l'échelle de temps de variabilité du quasar.

8 - Possibilités d'enregistrement d'astres faibles avec un très grand télescope.

Pour déterminer ces possibilités, il faut faire des hypothèses sur le site (qualité des images, noirceur du ciel), sur le télescope (diamètre, focale équivalente) et sur le récepteur (rendement quantique équivalent, émulsion électronique utilisée). Les hypothèses suivantes sont raisonnables :

a) Site : nous supposons que sa qualité est au moins égale à celle de Mauna Kea, à Hawaï. Pour être très conversatif, nous admettons que les images enregistrées, pour des poses de 30 minutes à 4 heures, ont une largeur à mi-hauteur de 1,0" et que, pour des poses de 5 à 20 minutes, elles ont, fréquemment, une largeur de 0,8".

Pour le ciel, nous admettons : $B(\text{ciel}) \approx 22,2/[1'']^2$

b) Télescope : à titre d'exemple nous choisissons la même longueur focale équivalente pour un télescope de 3,6 m. et pour un télescope de 8 m. : $\mathcal{F} \approx 30$ mètres et nous prenons une longueur focale double pour un télescope de 15 m. : $\mathcal{F} \approx 60$ m.

c) Récepteur : nous utilisons l'émulsion commerciale courante, Kodak Electron Microscope, développée normalement (D19, 4 min, 20°) et effectuons le calcul de magnitude limite avec 2 rendements quantiques équivalents de la photocathode : 10 %, c'est à dire le rendement obtenu actuellement dans les couleurs B et U, avec la cathode S 11. 30 %, rendement indiqué par les constructeurs pour certaines cathodes bialcalines.

Pour être réaliste, nous imposons, par ailleurs, deux limitations :

a) Densité du ciel : nous limitons la densité du fond du ciel : $D_{\text{ciel}} \leq 1,4$

b) Contraste : nous imposons un contraste $C \geq 0,01$, c'est à dire que, pour des images de 1,0", nous limitons la magnitude atteinte à 27,2 et pour des images de 0,8", nous limitons cette magnitude à 27,7.

Pour un rendement quantique de 10 % et un ciel B 22,2 [1]² nous admettons, pour une pose de une heure, les densités suivantes du fond du ciel sur le cliché :

$$D (\text{Bleu}) \simeq 0,7$$

$$D (\text{Ultraviolet}) \simeq 0,16$$

Les calculs sont effectués suivant la formule de Vernier (1958) :

$$m_1 = 12,7 + 0,5 m(\text{ciel}) + 1,25 \log R + 2,5 \log D + 1,25 \log T - 2,5 \log t$$

R, rendement quantique équivalent, D diamètre en mètres, T temps de pose en minute, t largeur des images en ". Nous avons vérifié que, pour nos clichés, en bleu, nous retrouvons, à 0,1 magnitude près, le coefficient numérique 12,7 prédit par Vernier. Les magnitudes calculées apparaissent dans le tableau I.

On aurait pu faire des hypothèses un peu différentes ; par exemple, on pourrait considérer un développement "grain fin " qui diminue la densité, augmente la capacité de stockage, permet donc des poses plus longues et des magnitudes limites un peu plus élevées.

L'essentiel est cependant ailleurs :

1°) Le tableau I montre la puissance d'un très grand télescope, en ce sens que cet instrument permet d'atteindre des magnitudes élevées en des temps de poses relativement courts. De même qu'il y a 30 ans, avec le télescope du Mont Palomar et la plaque Kodak 103 a0, on a atteint B = 23,2 en 30 min, de même, avec les télescopes de 8 à 15 m. et un récepteur électrographique, on atteindra des magnitudes limites : B \simeq 26,5 - 27, en des temps de pose de 5 à 20 minutes.

2°) Pour D > 8 mètres, si on limite la longueur focale équivalente à 30 mètres, la magnitude limite plafonne vers 26,5 et les temps de pose deviennent extrêmement courts, au moins dans les bandes larges B et V. Si on veut atteindre des magnitudes de l'ordre de B = 27,5, il faut donc, parmi les combinaisons qui existeront, qu'il y en ait au moins une qui corresponde à une longueur focale sensiblement plus grande.

TABLEAU I

Magnitude atteinte par un récepteur électrographique en un temps
de pose donné.

Limiting magnitude of an electronographic receiver for a given
exposure time.

Diamètre du Télescope en m.		3,6		8		15	
Longueur focale équivalente en m.		30		30		60	
Ouverture numérique		F/8,3		F/3,75		F/4	
Rendement quantique de la cathode en %		10	30	10	30	10	30
Couleur	Durée de pose en min.						
Bleu	60	26,1	26,3	26,6	26,4	27,3	27,1
	30						
	20						
	5						
UV	240	25,2	25,4	25,6	25,6	26,2	26,2
	120						
	90						
	30						

9- Caractéristiques présentes du récepteur. Quelles améliorations sont souhaitables?

Le tableau II résume les paramètres actuels et les modifications possibles.

TABLEAU II

Caractéristiques de la caméra électronique grand champ.

Parameters describing the large field electronographic camera.

Paramètres	maintenant	modifications possibles
Diamètre	81 mm	peut être augmenté
Rapport F/D minimum	5	peut être diminué
Distance frontale	160 mm	peut être diminuée
Nb de plaques	9	peut être fortement augmenté
type de cathode	S 11 et S 20	également cathodes bialcalines
Résolution	14 μm	peut être porté à 10 μm
Nombre d'éléments-images (pixels)	30 . 10 ⁶	peut être fortement augmenté

Le tableau I montre qu'avec les très grands télescopes, les temps de pose seront relativement courts ; il est donc souhaitable d'augmenter fortement le nombre de plaques. Même si on conserve une longueur focale de 30 mètres, il est souhaitable d'augmenter le champ angulaire (actuellement 10') et donc le champ linéaire de la caméra ; ceci est vrai, a fortiori, si on doit travailler avec une focale plus longue ; la galaxie Messier 33 et l'amas globulaire Messier 5 sont des exemples typiques de l'intérêt qu'il y a à augmenter le champ. Enfin, il faut pouvoir travailler avec des rapports F/D < 5 et donc diminuer la distance frontale. La chance veut que, dans le cas de la focalisation magnétique, il n'y a pas de limitation sévère à la dimension utile du récepteur. On peut donc concevoir sans difficultés majeures une caméra grand champ parfaitement adaptée à un très grand télescope dont les paramètres seraient définis.

10- Conclusion.

L'électronographie est une méthode bien adaptée à la photométrie bidimensionnelle dans les champs linéaires étendus et encombrés. Il est possible de construire une caméra électronique ayant un champ supérieur à 10' au foyer d'un très grand télescope ; cette caméra permettra d'atteindre, avec des poses courtes, des magnitudes de l'ordre de $B = 26,5 - 27$.

10 - Conclusion :

Electronography is well suited for bidimensional photometry in extended and crowded fields. It is possible to produce an electronographic camera, having a field greater than 10' at the focus of a very large telescope ; this camera shall be able, even with short exposures, to reach magnitudes in the range $B = 26,5 - 27$.

Remerciements.

L'ensemble de caméras grand champ pour le Télescope C.F.H. a été réalisé et mis en oeuvre grâce à de nombreux concours : le Département "Optique et Photométrie" et, particulièrement, B. SERVAN, responsable technique du projet, J. FROMAGE, les membres du laboratoire des photocathodes et de l'atelier de Verrerie ; le Bureau d'Etudes et l'atelier de Mécanique de l'Observatoire ; le GRECO "Récepteurs" du C.N.R.S. ; à tous nous adressons de vifs remerciements. Nous remercions aussi l'I.N.A.G. qui a financé la réalisation du projet et les missions à Hawaii.

REFERENCES

- Baum, W.A., " The Detection and Measurements of faint astronomical Sources", dans " Astronomical Techniques ", éd. par W.A. Hiltner, Univ. Chicago Press, 1962.
- Dubout, R., Thèse, Université de Provence, Marseille, 21 Juin 1984.
- Lallemand, A., Servan, B., Renard, L., " Sur une caméra électronique à grand champ destinée à la photométrie astronomique ", Comptes-Rendus Acad. Sci. Paris, 270, p. 385, 1970.
- Lelièvre, G., Nieto, J.L., Wlérick, G., Servan, B., Renard, L. et Horville, D., " Etude à haute résolution du jet optique de Messier 87", Comptes-Rendus Acad. Sci. Paris, 296, Série 2, p 1779, 1983.
- Servan, B., Wlérick, G., Renard, L., Lelièvre, G., Cayatte, V., Horville, D., Fromage, J., "Installation d'une caméra électronique grand champ au Télescope Canada-France-Hawaii", Communication au 8ème Symposium "Photoelectronic Image Devices", Londres, 5-7 Septembre 1983, à paraître dans "Advances in Electronics and Electron Physics".
- Vanderriest, C., Wlérick, G., Tartag, A., Lelièvre, G., Servan, B. et Michet, D., "Structure et Photométrie du mirage gravitationnel PG 1115 + 080 " dans : " Quasars and Gravitational Lenses ", Université de Liège, Institut d'Astrophysique, p. 182, 1983.
- Vernier, P., "Sur l'action photographique des électrons. Applications aux observations astronomiques", Bull. Astron., 22, p. 83, 1958.
- Wlérick, G., Lelièvre, G., Servan, B., Cayatte, V., Michet, D., Renard, L., Horville, D., "Utilisation astronomique de la Caméra électronique grand champ", Proceedings of S.P.I.E., 445, "Instrumentation in Astronomy V ", p. 143, 1983.