

Spectrographes à réseaux asphériques par réflexion : les spectrographes Marly des observatoires de Haute-Provence et de Nanjing

Gérard LEMAÎTRE et Dominique KOHLER

Résumé — Plusieurs avantages incitent à considérer, pour la spectroscopie à moyenne et faible résolution, des combinaisons de type *catoptrique* tout comme il est d'usage en spectroscopie à haute résolution. De tels systèmes doivent nécessairement utiliser des réseaux *asphériques* permettant ainsi de réduire au *minimum* le nombre de surfaces optiques. Ce montage *anastigmat* très lumineux n'est pas limité quant au domaine spectral. Le premier instrument de ce type a été conçu pour le foyer primaire du télescope Canada-France-Hawaii où il est en opération depuis 1980 [1]. Les spectrographes Marly des observatoires de Haute-Provence et de Nanjing, décrits ici, ont des dispersions de 4 à 8 nm/mm dans le premier ordre. Une technique d'asphérisation des réseaux de diffraction par réflexion a été développée. Elle est basée sur les déformations élastiques d'une *optique active* et la réplification à partir de réseaux plans. Les spectrographes Marly sont très compacts. Leur champ est dépourvu de chromatisme. Ils sont également corrigés de la *distorsion* et fournissent des *dispersions linéaires*, propriétés qui confèrent à la combinaison un intérêt potentiel pour la spectroscopie multi-objets.

All-reflective aspherized grating spectrographs: the Marly spectrographs of the Haute-Provence and Nanjing observatories

Abstract — Several advantages incite us to consider optical design of the all-reflective type for medium and low resolution spectroscopy, as is usually used for high resolution. Such systems must necessarily include aspherical gratings, thus reducing to a minimum the number of optical surfaces. The anastigmat system has a high throughput and is not limited in spectral coverage. The first such instrument was designed by Lemaitre for the prime focus of the Canada-France-Hawaii telescope and has been in operation since 1980 [1]. The presently described Marly spectrographs of Haute-Provence and Nanjing observatories have dispersions of 4 and 8 nm/mm in the first order. An aspherization technique of making reflective diffraction gratings was developed. This consists of elastic bending of active optics and replications while starting from plane gratings. The Marly spectrographs are very compact anastigmats and have achromatic flat fields. They are also distortion free and give linear dispersions, properties conferring on the design a potential interest for multi-object spectroscopy.

Abridged English Version — The optical design of Marly spectrographs has been optimized for a new type of reflective grating. Dispersions are 4 and 8 nm/mm. The Marly of Haute-Provence Observatory has been in operation since 1982 and is presently installed at the newtonian focus of the 120 cm telescope. As a ground support of the *Hipparcos* satellite observing program, Fehrenbach *et al.* [2] have obtained radial velocities of B0 to F5 stars at 8 nm/mm. In a collaboration with China, Fehrenbach and Huang [3] and Huang [4] have obtained spectra of symbiotic stars; this gave rise to the construction of a second Marly instrument which has been operation since 1987 at the cassegrainian focus of the 120 cm telescope of the Nanjing Observatory.

Developments of relatively fast all-reflective spectrographs can be achieved by using the grating for correction of geometrical aberrations. Two types of corrective gratings were considered: (i) Plane gratings having variable spaced lines, such as type II Jobin Yvon (JY) holographic gratings. These have a low efficiency due to difficulties in blazing variable spaced profiles. They also exhibit a linear chromatic effect in λ , too large to permit the design of a broadband coverage instrument. (ii) Pseudo-plane aspherical gratings having constant spaced lines, such as JY type I. These are perfectly efficient and do not suffer

Note présentée par Charles FEHRENBACH.

from the preceding chromatic variation. For these reasons, only the latter have been considered.

Aspherization of plane gratings has been carried out in collaboration with JY by development of an *active* optics method [5]. Figure 1 displays the two-stage process using a duplication technique and shows a test interferogram obtained with one of the gratings. A uniform air pressure q , applied inside the active master, produces a flexure Z of shape opposite to that of the optical figure giving correction for spherical aberration. The built-in aperture is larger than the clear aperture by a ratio $\sqrt{(3/2)}$; this choice is connected with optical optimization in the spectral field of view. The theory of small deformations of thin plates applies. In the case of a quasi-plane neutral surface, $t(r)$, E and ν being respectively the unknown thickness distribution, Young's modulus and Poisson's ratio, the equation connecting the thickness distribution to the deformation is

$$(1) \quad \nabla^4 Z(r) - q/D(r) = 0 \quad \text{with} \quad D(r) = E t^3(r)/12(1-\nu^2),$$

where ∇^2 is the laplacian operator and D the flexural rigidity. It can be shown that the asphericity, *e.g.* flexural terms higher than quadratic, is not dependent on a deviation from the ideal boundary condition of a perfect built-in zone. For axisymmetric grating figures defined by $Z_g = \sum B_{2n} r^{2n}/R^{2n-1}$, where R is the radius of curvature of the camera mirror, the thickness distribution of the active zone, as obtained by integration of equation (1), decreases slightly from the center toward the built-in zone

$$(2) \quad t^3(r) = \frac{3}{16} \frac{1-\nu^2}{B_4 + 9B_6 r^2/R^2 + \dots} \frac{q}{E} R^3.$$

The optical characteristics of the Marly-OHP spectrograph are given in the Table. The Marly-Nanjing spectrograph has a different collimator F-ratio. The main optical design is displayed by (Fig. 2). The mounting angle between the collimator and camera axes was taken to be 30° . Let us define F as the camera F-ratio; β the angle between the grating and camera axes and φ the half-field at the detector; these designs have an angular diameter of residual aberrations of

$$(3) \quad d = 3(\beta + \varphi)^2/256 F^3.$$

Plane spectra are obtained with a positive singlet lens located in front of the detector. Let us define n as its mean index, the two curvatures c_1 and c_2 are dependent on the curvature of the camera mirror $C=1/R$ as given by Petzval's condition

$$(4) \quad (n-1)(c_1 - c_2) + 2nC = 0.$$

The slight chromatic difference of focus due to the singlet lens in convergent beams has been corrected by using Wynne's condition, giving a second equation for the curvatures of the singlet lens. Curvatures c_1 and c_2 , the axial thickness of the lens and its axial separation from the focal plane, as given in the Table, have been determined with respect to these conditions. Coma and astigmatism introduced by the singlet lens have been corrected by respectively decreasing the axial separation between the grating and the camera mirror and taking c_2 slightly negative. Figure 3 displays the residual aberrations of these flat-flied *anastigmat* designs. Spot diagrams were obtained by a ray tracing program specifically developed for aspherical gratings.

The Marly-OHP spectrographs has produced 6,000 spectra. The radial velocity measurement of 2,000 stars has been completed with a typical standard deviation of 3 or 4 km.s⁻¹. Also at the instigation of Ch. Fehrenbach, another spectrograph of similar design, the Carelec, has been recently built and operated at the Cassegrain focus of the OHP 2 m

telescope. All these instruments provide *linear dispersion* and are *distortion free*. These unique properties, due to all-reflective optics, allow easy sky background substration. For faint object studies, this avoids data reduction problems due to the field distortion inherent in classical spectrograph designs, particularly in the multi-objet spectroscopic mode.

La combinaison optique des spectrographes Marly a été conçue et optimisée pour des réseaux par réflexion d'un type nouveau, qui fournissent des dispersions de 4 et 8 nm/mm. Mis en service en 1982, le Marly de l'Observatoire de Haute-Provence (OHP) est installé au foyer Newton du télescope de 120 cm. Il est utilisé pour la mesure des vitesses radiales en complément du travail effectué avec les prismes-objectifs de Fehrenbach. En accompagnement au sol du programme d'observation du satellite *Hipparcos*, Fehrenbach et coll. [2] ont obtenu, à 8 nm/mm, la vitesse radiale d'étoiles de type B0 à F5. La mesure est effectuée par une méthode de corrélation croisée, le type spectral étant déterminé au préalable par une méthode automatique. Fehrenbach et Huang [3] et Huang [4] ont obtenu un certain nombre d'étoiles symbiotiques avec le spectrographe. Cette collaboration avec la Chine s'est traduite par la construction d'un second instrument Marly qui est en opération, depuis 1987, au foyer Cassegrain du télescope de 120 cm de l'Observatoire de Nanjing.

Le développement de spectrographes par réflexion relativement ouverts implique d'effectuer la correction des aberrations géométriques au niveau de réseau. Bowen avait indiqué la possibilité d'effectuer cette correction au moyen d'une lame par transmission placée sur le réseau. Toutefois une telle lame introduit du chromatisme et des pertes de lumière puisqu'elle est traversée deux fois. Il est proposé ici de corriger les aberrations directement avec le réseau.

Deux types de réseaux correcteurs ont été considérés : (i) Des réseaux plans, dont les lignes ont un espacement variable, issus d'un enregistrement d'un système de franges He-Ne dans une résine photo-sensible. Ce sont les réseaux holographiques Jobin Yvon (JY) du type II. Jusqu'à maintenant ces réseaux ne peuvent être blazés; leur efficacité est faible ou moyenne, ceci résultant du profil sinusoïdal des traits. Ils fournissent une correction parfaite pour la longueur d'onde centrale d'enregistrement mais présentent un important effet de chromatisme pour les autres longueurs d'onde. (ii) Des réseaux pseudo-plans asphériques, dont les lignes ont un espacement constant, obtenus à partir de réseaux plan gravés ou enregistrés holographiquement (réseaux JY de type I). Pour une densité de traits supérieure à 600 l/mm, JY a développé une méthode de blaze par érosion ionique. Ces deux types de réseaux ont une efficacité excellente et sont dépourvus de l'effet chromatique précédent. Pour ces raisons, les réseaux à espacement constant ont été uniquement considérés.

Des réseaux plans ont été *asphérisés* en collaboration avec JY et le Laboratoire d'Optique de l'Observatoire de Marseille en développant une méthode par *optique active* [5]. La figure 1 montre les deux phases du procédé d'asphérisation et de réplification ainsi qu'un interférogramme de contrôle d'un des réseaux des Marly. Une pression d'air uniforme q , appliquée à l'intérieur d'une matrice, permet d'obtenir une flexion Z de forme opposée à celle de la figure optique corrigeant l'aberration sphérique. La zone active est supportée par un anneau externe rigide réalisant une condition aux limites du type semi-encastrement. Le diamètre de l'encastrement est plus grand que celui de la zone d'ouverture optique (*voir plus loin*) d'un facteur $\sqrt{(3/2)}$. La théorie des faibles

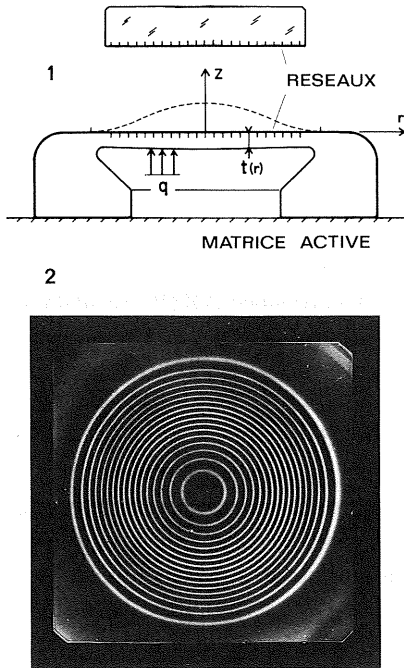


Fig. 1. — Schéma d'une optique active (1) permettant d'obtenir des réseaux asphériques. Un réseau plan est déposé sur la zone active. Une réplique sous contraintes est ensuite effectuée sur un substrat rigide. Interferogramme He-Ne (2) d'un des réseaux 600 l/mm éclairé dans l'ordre zéro par rapport à un plan. Ces réseaux sont asphérisés en collaboration avec Jobin-Yvon SA.

Fig. 1. — Schematic view of an active optic system (1) as developed for producing aspherical gratings. A plane grating is deposited over the active zone. While applying inner pressure, the active zone is replicated onto a rigid substrate. He-Ne interferogram (2) of one of the 600 l/mm gratings, with respect to a plane surface, as illuminated in the zero order. These gratings are aspherized in collaboration with the Jobin-Yvon Corp.

déformations des plaques minces est valide. Pour le cas d'une surface neutre quasi-plane, si $t(r)$ est la distribution d'épaisseur recherchée, E et ν le module d'Young et le coefficient de Poisson de la matrice, l'équation reliant l'épaisseur aux déformations est

$$(1) \quad \nabla^4 Z(r) - q/D(r) = 0 \quad \text{avec} \quad D(r) = Et^3(r)/12(1-\nu^2),$$

où ∇^2 est le laplacien et D la rigidité à la flexion. Il peut être montré que l'asphéricité, *e. g.* les termes d'ordre supérieur à 2 de la flexion, n'est pas influencée par un écart à la condition idéale que serait un encastrement parfait. Des matrices métalliques en acier martensitique AISI 420, $E = 2.10^{11}$ Pa et $\nu = 0,3$ ont été réalisées par l'OHP. Les facteurs déterminants étaient une haute limite élastique (gain de 10 à 15 par rapport au verre *i. e.* une plus grande possibilité d'asphérisation), une linéarité contrainte-déformation en accord avec la loi de Hooke, et la possibilité d'avoir une charge élevée pour obtenir la meilleure précision de déformation. Le diamètre de la pupille du miroir primaire du télescope projetée sur le réseau, a été choisie égal à 70 mm. Le diamètre d'encastrement des matrices est de 85,7 mm. Pour des profils de réseaux ayant la symétrie de révolution, définis par $Z_g = \sum B_{2n} r^{2n}/R^{2n-1}$, où R est le rayon de courbure du miroir de chambre, la distribution d'épaisseur obtenue pour intégration de l'équation (1) est légèrement décroissante du centre vers l'encastrement

$$(2) \quad t^3(r) = \frac{3}{16} \frac{1-\nu^2}{B_4 + 9B_6 r^2/R^2 + \dots} \frac{q}{E} R^3.$$

Deux matrices d'épaisseur centrale $t(0) = 5,658$ mm, ont permis d'asphériser les réseaux JY 600 l/mm et 1 200 l/mm sur des substrats en zérodur. Le réglage interférométrique de l'amplitude des déformations a pris en compte le retrait de 6% de la résine. Les charges étaient respectivement de 4,16 et 4,24. 10^5 Pa.

Les caractéristiques optiques du Marly de l'OHP sont données dans le tableau. Le Marly de l'Observatoire de Nanjing diffère par le collimateur. Le schéma de l'optique principale est représenté (*fig. 2*). L'angle de calage entre le collimateur et la chambre est

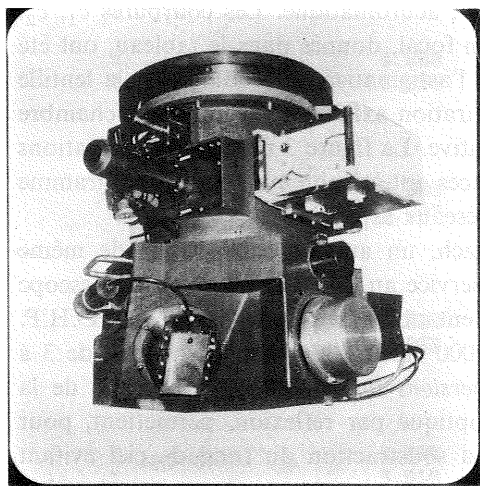
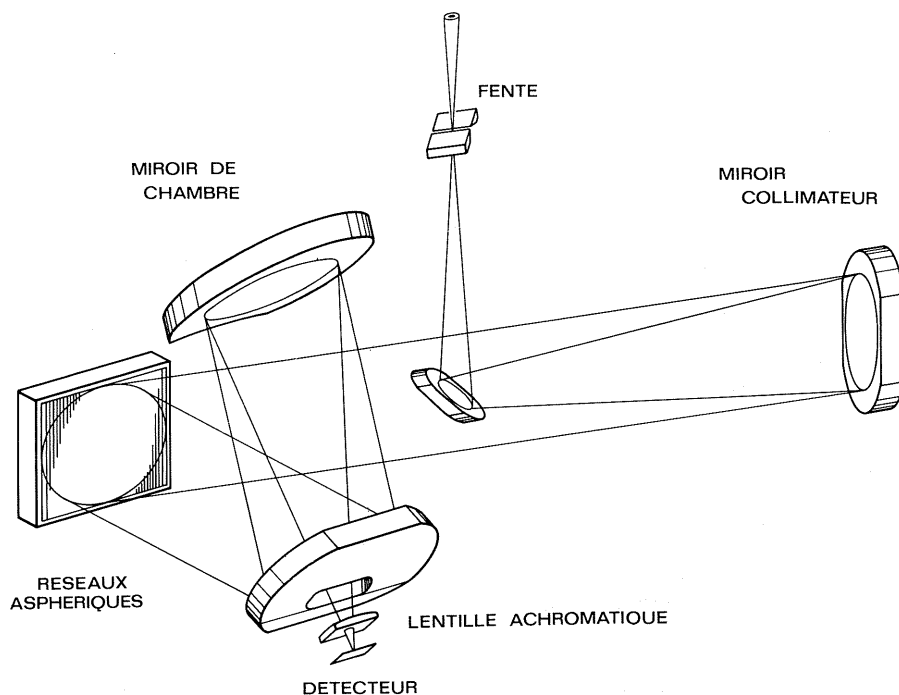


Fig. 2. — Schéma de l'optique principale des spectrographes Marly.

Fig. 2. — Main optical design of the Marly spectrographs.

de 30° . Les réseaux corrigent la somme des aberrations sphériques du miroir de chambre et de la lentille aplanisseuse. L'optimisation du profil des réseaux en fonction du terme de courbure conduit à choisir une zone de puissance nulle en dehors de l'ouverture utile par un facteur zonal de $\sqrt{(3/2)} = 1,225$. On peut montrer que ce profil correspond à une variation minimale des pentes dans l'ouverture utile. Si β est l'angle entre la normale au réseau et l'axe de la chambre, φ l'angle de demi-champ sur le détecteur, pour un rapport d'ouverture de chambre égal à F , le diamètre angulaire des aberrations résiduelles du montage est voisin de

$$(3) \quad d = 3(\beta + \varphi)^2 / 256 F^3.$$

Cette résolution reste pratiquement valable lorsqu'on ajoute avant le détecteur une lentille positive, d'indice moyen n , dont les courbures c_1 et c_2 , sont liées en fonction de la

TABLEAU
Caractéristiques optiques des spectrographes Marly F/3.
Optical characteristics of the Marly spectrographs F/3.

Élément	Rayon de courbure (mm) ^(a)	Séparation axiale (mm)
Fente		420
Miroir collimateur	- 840	420
Réseau asphérique	Z ^(b)	331,50
Miroir de chambre	- 420	198,448
Lentille aplanisseuse	69,5	2,91
de champ (Silice)	-8 000	7,75
Plan focal	∞	

^(a) Les courbures sont négatives pour un dioptre concave vers la lumière incidente.

^(b) Le profil des méridiennes est donné par $Z = u(A_2 r^2 + A_4 r^4)$; $A_2 = -6,945 \cdot 10^{-6}$; $A_4 = 1,86 \cdot 10^{-9}$. Le paramètre u est un facteur de sous-corrrection voisin de l'unité: $u = 0,981$ pour le réseau 600 l/mm et $u = 1$ pour le réseau 1 200 l/mm.

^(a) Curvature are negative for a concave surface toward the incident light.

^(b) Meridian profiles are given by $Z = u(A_2 r^2 + A_4 r^4)$; $A_2 = -6,945 \times 10^{-6}$; $A_4 = 1,86 \times 10^{-9}$. The u parameter is an under-correction factor close to unity: $u = 0,981$ for the 600 l/mm grating and $u = 1$ for the 1,200 l/mm grating.

courbure C du miroir de chambre, par le théorème de Petzval

$$(4) \quad (n-1)(c_1 - c_2) + 2n C = 0,$$

permettant d'obtenir des spectres plans. Wynne a donné les conditions pour qu'une lentille simple utilisée en faisceau convergeant soit achromatique. Les courbures c_1 , c_2 , l'épaisseur axiale de la lentille et le tirage au plan focal, donnés dans le tableau, ont été déterminés en fonction de ce critère. La coma et l'astigmatisme introduits par la lentille sont respectivement corrigés en diminuant la séparation axiale réseau-miroir de chambre et en choisissant une courbure c_2 légèrement négative. La figure 3 montre les aberrations résiduelles de la combinaison *anastigmat*. Les traces ont été obtenues par un programme de passage de rayons développé pour le cas des réseaux asphériques.

Également sous l'instigation de Ch. Fehrenbach, un autre spectrographe de même conception, le Carelec, a été construit et mis en service au foyer Cassegrain du télescope de 2 m de l'O.H.P. Les 6 000 spectres actuellement obtenus avec le Marly de l'O.H.P. ont permis de déterminer la vitesse radiale de 2 000 étoiles. L'erreur typique est de 3 à 4 km.s⁻¹. Ces instruments fournissent des *dispersions linéaires* et sont corrigés de la *distorsion*. Ces propriétés uniques, dues à une optique par réflexion, permettent, pour l'étude d'objets faibles, d'effectuer simplement la soustraction du fond de ciel évitant ainsi les problèmes de réduction dus à la distorsion du champ des spectrographes classiques qui constituent une limitation dans le mode spectroscopie multi-objets.

Note remise le 7 novembre 1988, acceptée le 23 novembre 1988.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] G. LEMAÎTRE et L. VIGROUX, *Instrumentation for ground-based optical astronomy*, Robinson, Santa-Cruz, Springer-Verlag, 1987, p. 275-295.
- [2] Ch. FEHRENBACH, R. BURNAGE, M. DUFLLOT, A. PETON, L. ROLLAND, V. GENTY et C. MANNONE, *Suppl. Ser.*, 71, 1987, p. 263-274.
- [3] Ch. FEHRENBACH et HUANG CHANG-CHUN, *Astron. Astrophys.*, *Suppl. Ser.*, 46, 1981, p. 257-261.
- [4] HUANG CHANG-CHUN, *Proceedings of workshop on stellar activity and observational techniques Sino-Japan*, Publications of the Beijing Astronomical Observatory, 1985, p. 70-76.
- [5] G. LEMAÎTRE, *Current trends in optics*, Taylor & Francis, Londres Conférence ICO 12, 1981, p. 135-149.

G.L.: Observatoire de Marseille, 2, place Le Verrier, 13248 Marseille;
D.K.: Observatoire de Haute-Provence, 04870 Saint-Michel-l'Observatoire.

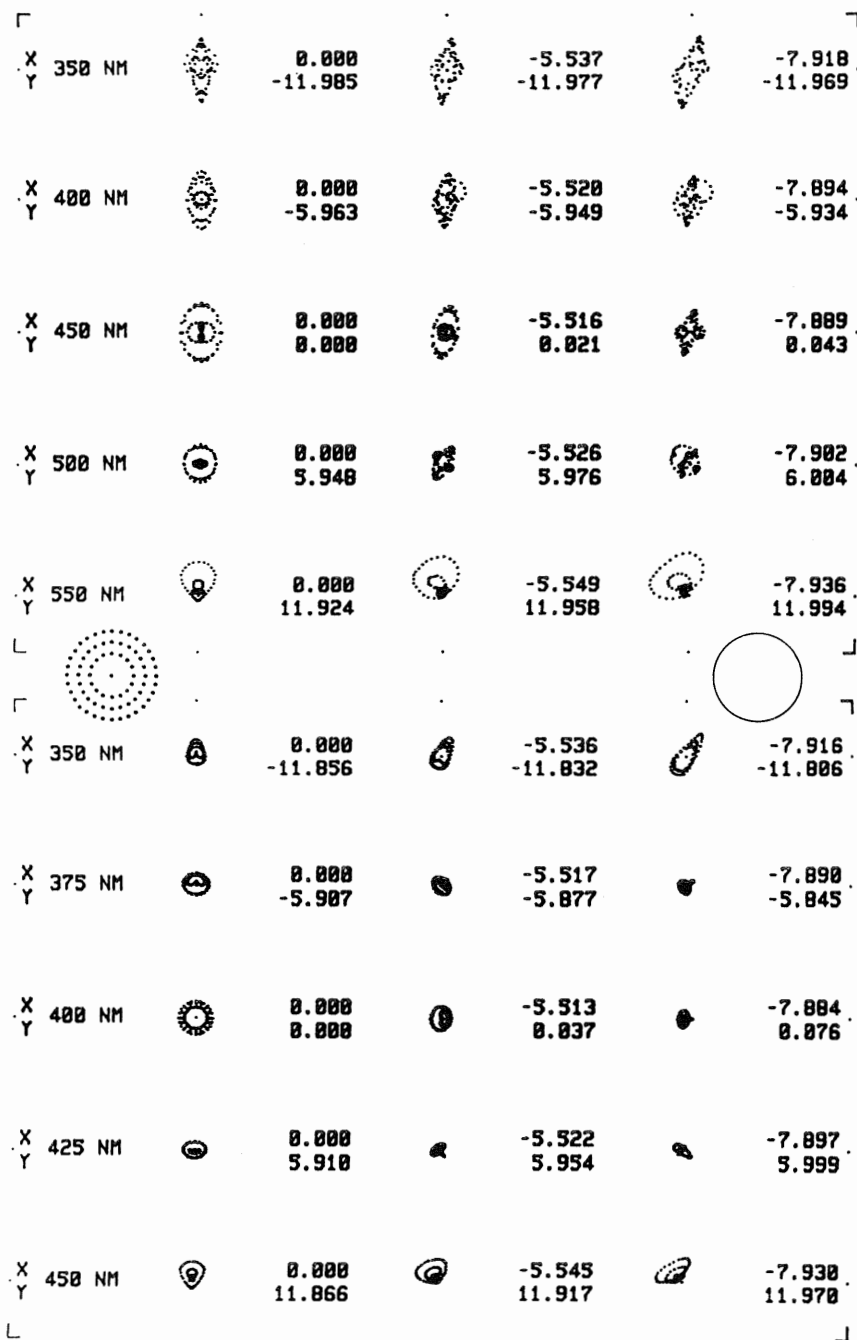


Fig. 3. — Diagramme de traces de rayons montrant les aberrations résiduelles pour trois positions de spectres et cinq longueurs d'ondes avec le réseau 600 l/mm (en haut) et le réseau 1200 l/mm (en bas). Au centre sont représentés la pupille considérant 73 rayons et un cercle de 7,5 μ m donnant l'échelle. Y est la direction de la dispersion.

Fig. 3. — Spot-diagrams showing residual blur images for three spectra positions and five wavelengths obtained with the 600 l/mm grating (top) and the 1,200 l/mm grating (bottom). At the center are shown the pupil considering 73 rays, and a circle of 7.5 μ m in diameter giving the scale. Y is the direction of dispersion.