

Astrophysique théorique

M. Jean-Claude PECKER, professeur

Les champs de vitesse dans les atmosphères stellaires : le diagnostic

Les mouvements sont détectables dans les objets astronomiques soit par l'observation directe de ces mouvements en projection sur la sphère céleste (c'est le cas des protubérances solaires, par exemple), soit par l'observation des vitesses radiales, qui se traduisent par des déplacements en longueur d'onde des raies spectrales, voire par leur élargissement, dans les cas où il existe une certaine distribution statistique des vitesses.

C'est à ce dernier phénomène que s'est essentiellement consacré l'ensemble de ce cours. L'un des premiers, Eddington (vers 1926) avait noté la possibilité d'élargissement des raies par l'effet Doppler dû à la turbulence, à la rotation, à la température. Mais il avait rejeté provisoirement ces interprétations, faute de savoir si l'élargissement par collisions était, ou non, suffisant pour l'explication des observations. STRUVE, en 1932, vit mieux l'importance des mouvements non thermiques, mais pensait que c'était plutôt la rotation qui était à l'origine de l'élargissement des raies spectrales dans les étoiles A, B et O. Dans un article fondamental, datant de 1934, STRUVE et ELVEY montrent l'effet de la turbulence sur la hauteur du palier des courbes de croissance, et mettent en évidence d'énormes vitesses dans des cas particuliers (ainsi, pour 17 Lep, 67 km/s, ce qui est très supérieur à la vitesse thermique). Certes la théorie était aussi médiocre que les mesures. Aussi fallut-il aborder le cas du soleil pour pouvoir progresser, malgré la petitesse des effets dans ce cas particulier.

1. Le profil observé résulte d'une *convolution* du profil naturel de la raie par le profil en longueur d'onde de la *distribution des vitesses*.

Pour traiter le problème, il faut donc d'abord définir la distribution des vitesses à faire intervenir dans les calculs théoriques, ou plutôt *le type de distribution*. Pourvu que l'on prenne certaines précautions, c'est une distribution de GAUSS qu'il faut faire intervenir : on peut montrer en effet que la seconde fonction caractéristique d'une distribution aléatoire de vitesses tend vers la fonction caractérisant la distribution gaussienne, pourvu que le nombre n des variables aléatoires indépendantes soit assez grand : il y a tendance vers la loi de GAUSS, dans l'addition de variables aléatoires indépendantes.

Le second problème que l'on doit alors se poser est celui de l'échelle du champ de vitesses. La quantité à laquelle on se réfère est le libre parcours moyen du photon, qui peut varier considérablement entre le continu (environ 1 km) et le centre des raies intenses (environ 1000 Å au centre de la raie Lyman Alpha). La distribution de probabilité locale $p(\xi)$ des vitesses ξ a aussi une échelle dimensionnelle, définie par les corrélations entre les vitesses en différents points : on peut définir un *spectre de la turbulence*, et, dans les cas concrets, c'est l'analyse de FOURIER qui permettra de le construire, à partir de la distribution des vitesses : on définit alors les « macro-vitesses » et les « micro-vitesses » suivant que leur longueur d'onde caractéristique est nettement plus grande ou plus petite que le libre parcours moyen du photon. Il est clair que, suivant la partie du profil d'une raie étudiée, la distinction entre les deux types de champ de vitesses se situera en un point différent du spectre de la turbulence.

Accessoirement, un autre problème se pose : les profils naturels des raies ne sont pas gaussiens. Il faut donc savoir convoluer, plus généralement, un profil de Voigt par un autre profil de Voigt. On montre que cette convolution aboutit à un profil de Voigt dont les paramètres se calculent aisément.

2. Dans l'application astronomique, le premier problème qui se pose est celui de l'analyse des *courbes de croissance*. Notre analyse suppose, au début, que seuls des macro-mouvements et des micro-mouvements existent (et non les cas intermédiaires). La théorie des fonctions de poids et de saturation permet alors une discussion analytique. Les macro-mouvements affectent le profil des raies, mais non la courbe de croissance, au contraire des micro-mouvements.

Pour séparer les micro-mouvements des mouvements thermiques, il est possible soit d'utiliser des atomes de masses atomiques différentes, soit de calculer des courbes de croissance théoriques, ce qui suppose que l'on dispose d'un bon modèle d'atmosphère.

Une étude critique des déterminations publiées est faite à ce stade. CLAAS (1951) évalue ξ_m à 1,2 km/s dans le soleil (notons que des méthodes incorrectes, supposant une distribution de l'opacité du type Milne-Eddington, ou du type Schuster-Schwarzschild, aboutissent à des valeurs allant de 0,8 à 2 km/s. La valeur de CLAAS est certainement meilleure).

Une difficulté fondamentale subsiste : la vitesse ξ_m varie avec la profondeur, et la méthode des courbes de croissance ne permet d'obtenir qu'une valeur moyenne, à laquelle il faut encore savoir donner une signification.

3. La signification de la valeur moyenne de ξ_m obtenue à partir des courbes de croissance peut être précisée à partir de l'utilisation d'un théorème de la moyenne, et de la définition d'une *profondeur de formation* τ^* pour la vitesse.

On la défini. comme suit : $W(\bar{\xi}_m) = \int_0^{\infty} f[\xi(\tau)] d\tau = f[\xi(\tau^*)]$

Il est regrettable de constater que cette notion a été utilisée, on peut le dire, en dépit du bon sens, et que cet usage immodéré en a discrédité, injustement peut-être, un emploi raisonné.

Une discussion approfondie de ce problème est faite ; notamment le travail essentiel de Van REGEMORTER est rappelé.

Mais il reste que l'assignation d'une valeur de la vitesse $\bar{\xi}_m$, à une certaine profondeur τ , reste fort difficile, et criticable de toutes façons.

Qualitativement, les travaux de Ten BRUGGENCATE-HOUTGAST (variation entre le centre et le bord du disque solaire du palier de la courbe de croissance) (1941), ceux de M. BRETZ (1956) semblent indiquer une variation avec la profondeur, avec diminution de 2.0 km/s (vers $\tau_0 \sim 10^{-2}$) à 1 km/s (vers $\tau_0 \sim 10^{-3}$). Ceci n'a guère qu'une valeur qualitative ; cette détermination est affectée par l'hypothèse de l'ETL, par les effets de la rugosité, par l'influence du modèle, par les hypothèses sur l'isotropie du champ des micro-mouvements. Notons aussi le cas (extrême) de la valeur 4 km/s trouvée par ROUNTREE dans le cas du titane ionisé.

4. L'étude des *profils de raies* sensibles aux micro- et au macro-mouvements doit permettre de compléter ces déterminations.

On rappelle des résultats classiques. ROGERSON (1957) trouve une valeur de $\bar{\xi}_T$ (T pour « totale ») augmentant des raies faibles aux raies fortes (plus superficielles) ; ALLEN (1949) une valeur de 2,2 km/s au centre du disque contre 3,1 au bord du disque (c'est-à-dire dans des régions plus superficielles) ; Van REGEMORTER (1955) une valeur plus grande pour les raies de faible excitation (plus superficielles).

Ces résultats sont en contradiction avec ceux mentionnés à la fin du paragraphe précédent.

WADDELL (1959) pose clairement le problème : une anisotropie du champ de vitesses ne perturbe-t-elle pas fortement les résultats ? Son analyse aboutit à des vitesses $\bar{\xi}_{\text{tan}} \sim 3,0$ km/s et $\bar{\xi}_{\text{rad}} \sim 1,8$ km/s, constantes avec la profondeur.

L'analyse de SUEMOTO (1957) repose sur d'excellentes mesures également. Mais elle aboutit à une description différente : la composante tangentielle est forte en surface, la composante radiale en profondeur. Il s'agit certes de la vitesse totale, et cette description ressemble à ce à quoi une représentation de macro-mouvements convectifs pourrait aboutir.

Le moins qu'on en puisse dire, c'est que l'analyse est encore actuellement très provisoire.

5. Une intéressante discussion provient de GOLDBERG (1958), UNNO (1959) et permet une analyse systématique de *l'ensemble* d'un profil (les méthodes précédentes ne tiraient d'un profil donné qu'une valeur de la vitesse), en analysant simultanément les raies d'un même multiplet. Une méthode analogue analyse simultanément (JEFFERIES, ZIRKER) les profils des raies formés à différents points du disque solaire. Mais l'assignation d'une profondeur de formation à chaque valeur de ξ_T ainsi déterminée reste problématique. Ainsi que l'a montré RODDIER, une forte vitesse superficielle affecte les ailes, supposées, dans une discussion sommaire de la profondeur de formation, être formées en profondeur. De plus, l'hypothèse de l'ETL affecte fortement l'interprétation du profil.

6. L'étude de *l'asymétrie* des raies fournit un argument supplémentaire, lié évidemment aux macro-mouvements. Leur interprétation devrait être liée à l'existence d'inhomogénéités à grande échelle, généralement représentée par des modèles à 2 ou 3 « colonnes » de l'atmosphère solaire (BÖHM, 1954, VOIGT, 1956, SCHRÖTER, 1957, DE JAGER, 1959, HUBENET, 1960).

Les modèles inhomogènes sont liés, bien évidemment, aux observations de granulation (et de supergranulation). Les données mesurées sont très nombreuses.

7. Comment peut-on envisager une méthodologie réellement efficace ? Comment notamment tenir compte des écarts à l'ETL ? Un effort (très provisoire) a été fait à Meudon, entre 1952 et 1954 (DAYET - FEAUTRIER et CALMET - LAVAL) pour utiliser simultanément les intensités centrales et les profils. La méthode itérative suit la logique suivante : un champ de vitesses de première approximation, et la connaissance du modèle permettent de tirer des intensités centrales des raies d'un même multiplet des valeurs de la température d'excitation. Du profil de ces mêmes raies, — et du même modèle — on peut tirer aussi $T_{exc}(\tau)$ et par comparaison avec la première déduction, corriger le champ de vitesses ; et ainsi de suite jusqu'à la convergence. Celle-ci n'a d'ailleurs pas été obtenue (une seule itération !) et l'assignation des profondeurs de formation est sans doute — on l'a vu — très criticable, si bien que la dispersion des résultats est très forte.

Précisons qu'un champ de vitesses tel que celui de RODDIER (où ξ_T décroît nettement si τ croît) permet de réconcilier les mesures avec l'ETL et avec une absence de macro-vitesses. Mais il ne constitue peut-être pas une solution unique, compatible avec toutes les mesures !...

8. Les *dissymétries* des raies permettent de séparer les macro-vitesses des micro-vitesses.

Mais, nous l'avons signalé, l'étude de la granulation, des raies spectrales ondulées, les diagrammes de LEIGHTON, etc... permettent des déterminations directes. On déduit des raies ondulées (RICHARDSON, SCHWARZSCHILD) des

valeurs de l'ordre de $\xi_M \sim 0.37$ km/s. L'échelle est de l'ordre de 600 km, mais les incertitudes restent grandes ; selon Van REGEMORTER $\xi_M = 0$; selon d'autres auteurs, l'échelle est de l'ordre de 150 km (inférieure au pouvoir de résolution) et cette échelle est liée à la valeur réelle de ξ_M , la valeur ci-dessus n'étant qu'une valeur apparente.

L'analyse détaillée des fluctuations de spectre continu (RÖSCH, VASILYEVA, KRAT, SCHWARZSCHILD) des raies (LEIGHTON, MICHARD, EVANS, RODDIER) peut démontrer (ces travaux ont été analysés en détail) grâce à une analyse de FOURIER spatiotemporelle et à la critique des données, que la zone convective pénètre depuis les couches profondes jusqu'à $\tau_0 \sim 0.07$. Plus superficiellement, à partir de cette zone convective, des ondes se propagent, affectant la zone isotherme (4600°) de la région de transition chromosphère-photosphère, avec une période de 300 s. Ces ondes évanescentes se dissipent vers $\tau_0 \sim 10^{-6}$ - 10^{-7} et cette dissipation provoque une turbulence notable dans la chromosphère.

9. Une théorie est ébauchée pour tenir compte des écarts à la distribution gaussienne, et des échelles intermédiaires entre celles des macro- et des micro-mouvements, grâce à l'utilisation de fonction de VOIGT perturbée par des champs de vitesse quelconques. RYBICKI adopte une autre façon de voir les choses : il lie les fonctions *observées* de corrélation aux fluctuations du vecteur vitesse ; il note l'influence des effets à longue distance qui se manifestent dès que l'on tient compte de l'apport d'énergie mécanique, dus aux effets de la loi de conservation de l'énergie. Les équations stochastiques du transfert sont bien évidemment un cadre commode à la description du phénomène physique.

La conclusion du cours est une ouverture vers la suite (qui sera l'objet des leçons de 1969-70 ou même d'une année ultérieure), c'est-à-dire vers la théorie, à priori, (tout diagnostic mis à part) de la convection et de la turbulence dans les atmosphères, selon les idées de SPIEGEL et de SOUFFRIN par exemple.

SÉMINAIRES

Les séminaires ont eu comme thème général : *Physique théorique et astrophysique*.

Les exposés ont été les suivants :

- *L'influence des collisions atomiques en astrophysique*, par R. Mc CARROL.
- *Spectres de Mg III et des transitions électroniques de OH en laboratoire*, par P. FELENBOCK et M.-C. ARTRU.

- *Traits généraux des réactions nucléaires à grande énergie (100 MeV) et réactions nucléaires dans les étoiles*, par M. KLAPISCH et H. REEVES.
- *Effet maser dans la molécule OH interstellaire*, par P. FELENBOK, et J. LEQUEUX.
- *Le rayonnement thermique cosmologique*, par J. HEIDMANN et J. AUDOUZE.
- *Physique des plasmas et dynamique stellaire*, par M. FEIX et M. HÉNON.
- *Stars in the computer*, par M. LECAR.
- *Sur l'élargissement des raies spectrales par chocs*, par S. SAHAL et H. Van REGEMORTER.
- *Le problème numérique des N corps et quelques-unes de ses applications en astrophysique*, par A. HAYLI.

Enfin la dernière séance a été consacrée à une discussion générale. L'esprit des séminaires, qui visait à instaurer un véritable dialogue entre la méthode ou la technique du physicien, et l'application astrophysique, s'est révélé d'une grande efficacité : la formule sera reprise en 1968-1969.

PERSONNEL ET EQUIPES DE RECHERCHES ASSOCIÉES A LA CHAIRE

Sans qu'on puisse parler d'une véritable association, fondée sur un contrat en due forme, les divers chercheurs dirigés par le Professeur, dans le cadre du C.N.R.S., de la Chaire, ou ayant activement participé aux activités de la Chaire, peuvent se classer en diverses équipes empiétant parfois les unes sur les autres, et définies par l'objet de leur étude. Les limites de ces équipes sont assez floues, et, clairement, leur définition repose essentiellement sur un accord mutuel, d'ailleurs temporaire.

a) *Définition administrative.*

1) *Personnel du Collège de France.*

M. Philippe DELACHE, maître-assistant au Collège de France, a soutenu sa thèse en 1967. Nommé astronome-adjoint à l'Observatoire de Nice, il a été remplacé au Collège par M. Avram HAYLI, nommé maître-assistant au Collège de France à la date du 1^{er} novembre 1967, et qui a assisté cette année le professeur dans l'organisation du séminaire. M. HAYLI poursuit ses recherches à l'Institut d'Astrophysique en vue de la soutenance d'une thèse sur des problèmes de dynamique statistique stellaire, sous la direction de M. HENON (voir bibliographie).

M^{me} Eva DECHARD, aide de laboratoire (chargée des fonctions), a assumé le travail administratif et de documentation. Elle a aidé les chercheurs dans la préparation de leurs publications.

2) *Personnel (C.N.R.S. et cadre des Observatoires) de l'Observatoire de Meudon.*

M^{lle} Y. CUNY et M^{lle} S. DUMONT, aides-astronomes à l'Observatoire de Meudon, ont soutenu leurs thèses de doctorat ès-sciences en 1967. Il en est de même pour M^{me} F. PRADERIE et M. R. KANDEL, attachés de recherches au C.N.R.S., M^{me} M. O. BAYLAC, attachée de recherches, a continué à travailler en vue de sa thèse.

Ce groupe de chercheurs faisait partie du « service » d'Astrophysique générale dirigé à l'Observatoire de Meudon, par M. CAYREL. La structure en « services » est en voie d'éclatement, mais, clairement, les équipes de recherches, qui se constitueront autour de thèmes divers, comprendront certains de ces chercheurs.

3) *Observatoire de Nice.*

A l'Observatoire de Nice, dont le professeur est directeur, un « service » d'Astrophysique théorique et spatiale existait ; mais ses activités sont trop distinctes des intérêts de recherche du Professeur qu'il ne paraît plus souhaitable d'en rendre compte dans le cadre de ce rapport : il s'agit désormais d'un groupe de chercheurs très complet et groupés sur plusieurs thèmes de recherches, en plusieurs équipes de recherches.

4) *Divers.*

Des rapports étroits ont continué avec les chercheurs (R. BONNET, P. LEMAI-RE) du service d'Aéronomie du C.N.R.S., avec P. LENA, maître-assistant à la Faculté des Sciences d'Orsay, actuellement à l'Observatoire de Kitt Peak, aux U.S.A., avec M. FEAUTRIER, astronome à l'Observatoire de Meudon, qui a soutenu sa thèse de doctorat en 1967, et avec les équipes de l'Institut d'Astrophysique de Paris (M. SCHATZMAN), celles de l'Observatoire de Meudon (M. CAYRELJ), celles d'Istanbul (M^{me} GOKDOGAN), celles de l'Institut d'Astrophysique de Liège (M^{me} GREVESSE-GUILLAUME a soutenu sa thèse en 1967, à l'Université de Liège).

b) *Thèmes de recherches.*

1) *Problèmes de transfert hors ETL*

M^{lle} CUNY et M^{lle} DUMONT ont achevé la mise au point de méthodes de solutions strictes du problème couplé des équations de transfert et des équations de l'équilibre statistique, la première dans le cas de l'hydrogène, la seconde dans le cas du calcium. M. FEAUTRIER a tenu compte des écarts à l'ETL dans la construction de modèles en équilibre radiatif et a ainsi obtenu des remontées superficielles de température, véritables chromosphères.

2) *Problèmes de transfert*

M. PECKER a présenté une théorie de la formation des raies (cas de l'ETL) dans les atmosphères d'épaisseur optique finie.

3) *Atmosphère solaire*

L'exploration de la région de transition chromosphère-photosphère, telle qu'on l'observe dans le continu ultra-violet (BONNET), dans les raies du magnésium ionisé (LEMAIRE), du calcium ionisé (DUMONT), de l'hydrogène (CUNY), dans le continu infra-rouge (LENA) a été faite en un effort commun concrétisé, au colloque de Bilderberg (Pays-Bas), par des interventions remarquées. Les expériences de MM. BONNET et LEMAIRE ont été faites dans le cadre du service d'aéronomie du C.N.R.S. (Directeur : M. BLAMONT), celles de M. LENA à l'Observatoire National de Kitt Peak (Arizona, U.S.A.).

L'explication des différences d'abondances entre la photosphère et la couronne a été trouvée par M. DELACHE d'une façon claire grâce à une théorie faisant intervenir la diffusion thermique et le vent solaire. Une collaboration féconde à Nice, entre M. DELACHE et M. BELY, s'annonce comme devant conduire à une meilleure interprétation des observations coronales.

4) *Spectres solaires. Problèmes évolutifs*

M. KANDEL a achevé son étude des chromosphères épaisses d'étoiles dMe. M^{me} PRADERIE celle d'étoiles Am et Ap. Le rôle évolutif de ces étoiles, leur situation dans l'évolution, par rapport aux étoiles de la série principale, est, dans les deux cas, d'une fondamentale importance. M. KANDEL est reparti aux U.S.A. après la soutenance de sa thèse. Mais M^{me} PRADERIE a entrepris une étude systématique des étoiles δ Scuti, β CMa, qui prolonge sa thèse (en coopération notamment avec M^{lle} BAGLIN, de l'I.A.P.), ainsi (avec notamment R. BONNET) qu'une recherche sur le spectre UV des étoiles A à G, où des compositions anormales doivent influencer fortement le spectre.

De plus, M^{me} BAYLAC et M. PECKER ont mis en évidence une anomalie du comportement et de la discontinuité de Parthen des étoiles A : s'agit-il d'une utilisation de modèles insuffisants, de mesures affectées d'erreurs systématiques, ou au contraire d'un effet des écarts à l'ETL dans l'ion H⁻ ? Les études se poursuivent en coopération avec M^{me} ANDRILLAT, de l'Université de Montpellier.

5) *Etoiles jeunes (avant la série principale)*

Ces étoiles (O de forte masse, T Tauri de faible masse) sont sans doute encore entourées de poussières circumstellaires. Dans sa thèse, M^{me} GREVESSE a étudié la stabilité de tels nuages, dont la durée de vie est sans doute comprise entre 10^6 et 10^7 années, et où les particules ont une distribution fonction de leurs dimensions. M. LEFEVRE, à Nice, a effectué des mesures,

sur des poussières de Fer et d'autres matériaux, devant permettre d'obtenir les constants physiques utiles à la théorie de l'équilibre des poussières dans le milieu circumstellaire. D'autres recherches sont en préparation.

c) *Missions et Congrès*

Plusieurs des chercheurs nommés ci-dessus ont effectué des missions en France ou à l'étranger. La liste ci-dessous ne concerne que les chercheurs parisiens ou meudonnais, et reste sans doute incomplète.

Assemblée Générale de l'UAI, Prague, août 1967 :

MM. DELACHE, HAYLI, PECKER, M^{lle} DUMONT.

Colloque de Bilderberg, avril 1967, Utrecht (Pays-Bas) :

MM. BONNET, DELACHE, LEMAIRE, LENA, PECKER, M^{lles} CUNY, DUMONT.

Colloque UAI sur le problème des N corps, Paris, août 1967 :

M. HAYLI.

Conférence de Harvard sur les atmosphères stellaires, Cambridge, Mass. (8-11. 4.68) :

M^{me} PRADERIE.

Séjours aux U.S.A. :

M^{lle} CUNY (octobre 1967 - septembre 1968) (Harvard College Observatory ; JILA).

M. LENA (octobre 1966 - octobre 1968) (Kitt Peak ; JILA).

Autres missions à l'étranger :

M. PECKER (février-juin 1968) : Mexique, Australie, etc.

Missions d'observation :

M^{me} BAYLAC (Montpellier : mai 1967, OHP novembre 1967, Gornegrat, Suisse : août 1968).

PUBLICATIONS

M. O. BAYLAC, J.-C. PECKER, *Sur l'importance théorique de l'étude de la discontinuité de Paschen dans le spectre des étoiles* (C. r. Acad. Sci., Paris, 266, p. 517, 1968).

Y. CUNY, *Contribution à l'étude du spectre solaire de l'hydrogène* (Solar Physics, 3, p. 204, 1968).

— *Influence of the Lyman α wing absorption on the solar spectrum in the wavelength range 1 500 Å to 8 000 Å* (sous presse).

— *Influence of the non-LTE on the solar spectrum between 1500 Å and 1680 Å* (sous presse).

Ph. DELACHE ¹, *Contribution à l'étude de la zone de transition chromosphère-couronne* (Thèse) (*Ann. Astrophys.*, 30, p. 827, 1967).

— *Some problems of radiative transfer in an atmosphere having a stellar wind* (*J. quant. Spectrosc. radiat. Transfer*, 8, p. 317, 1968).

— *Un chapitre important de la Recherche Spatiale en France : la physique solaire* (Rapport français à l'Assemblée Générale du COSPAR, Tokyo, 1968).

S. DUMONT, *Contribution à l'étude de la zone de transition entre la photosphère et la chromosphère à partir des raies de résonance de Ca II et de Mg II* (Thèse) (*Ann. Astrophys.*, 30, p. 421 et 861, 1967).

— *Quelques remarques sur la formation des raies de Ca II et de Mg II dans la basse chromosphère* (*Ann. Astrophys.*, 31, p. 101, 1968).

Ch. GREVESSE, Thèse, Liège, 1967.

A. HAYLI, *Le problème des N corps dans un champ extérieur. Application à l'étude dynamique des amas ouverts* (*Bull. astr.*, 3^e série, 3, 1968).

R. KANDEL, *Contribution à l'étude des atmosphères des étoiles naines froides* (Thèse) (*Arch. orig. Centre Document. CNRS*, n° 1624, 6 juin 1967).

— *Contribution à l'étude des atmosphères des étoiles naines froides. II. Les chromosphères des étoiles naines froides* (*Ann. Astrophys.*, 30, p. 999, 1967).

J. LEFÈVRE, *Etude de poussières de fer et de carbone* (*Ann. Astrophys.*, 30, p. 731, 1967).

J.-C. PECKER, S. R. POTTASCH, C. R. TOLBERT, . *RS Ophiuchi : Reduction of spectra from the 1958 outburst* (*Bull. astr. Inst. Netherlands*, 19, 17, 1967).

F. PRADERIE, *Analyse d'étoiles à raies métalliques. I. Observation de 5 étoiles à raies métalliques. Etat physique des atmosphères* (*Ann. Astrophys.*, 30, p. 773, 1967).

— *Analyse d'étoiles à raies métalliques. II. Composition chimique de ζ Lyr A. Spectre infra-rouge proche de 5 étoiles A_m* (*Ann. Astrophys.*, 31, p. 15, 1968, thèse).

— *Sur l'interprétation du phénomène « étoile à raies métalliques »* (*Ann. Astrophys.*, à paraître).

(1) Figure déjà dans le précédent Annuaire avec la mention « à paraître ».