

Astrophysique théorique

M. Jean-Claude PECKER, professeur

Le problème général du transfert dans les atmosphères stellaires. II. — La formation des raies. — Au cours de l'année précédente, l'étude du problème de transfert avait conduit à la solution des équations du transfert radiatif, dans le cas de la diffusion pure. Ces méthodes avaient permis d'aborder le problème du spectre continu des planètes, de l'atmosphère terrestre, ... celui de la polarisation du rayonnement des atmosphères solaire et stellaires, etc.

Un exemple classique d'application de la solution du problème de transfert est l'obtention de *modèles d'atmosphères stellaires* : on suppose que l'équilibre radiatif est réalisé, et on déduit de cette condition la distribution des quantités physiques. Cet aspect de la question n'a pas été, et ne sera pas, traité dans le cours : il a fait l'objet d'un long article de synthèse dans *Annual Review of Astronomy and Astrophysics* (3, 1966).

Une fois connu le modèle, il importe de calculer le spectre de l'étoile étudiée : c'est là que la théorie trouvera dans l'expérience sa confirmation ou son infirmation, c'est comme cela que l'on pourra choisir les paramètres du calcul (température, gravité...) qui conviennent à telle étoile observée. Le calcul du spectre continu pose peu de problèmes ; aussi est-ce à la physique de la formation des raies spectrales, — et à leur calcul, qu'a été consacré le cours de cette année.

a) *Premiers travaux relatifs à la formation des raies* (d'Eddington à Unsöld). Une étude historique du développement des idées doit partir de la fin du siècle dernier. En même temps le spectre stellaire était reconnu comme ressemblant à celui d'un corps noir, — et on y observait des raies spectrales... Là était la première surprise : tout photon absorbé est réémis ; alors aucune raie ne devrait apparaître dans un milieu opaque !

Eddington fut l'un des premiers à réfléchir à ce genre de problème. Suivant le point de vue choisi pour lever le paradoxe, on peut prédire une raie très sombre au centre, ou au contraire un contraste faible. Eddington, en offrant les deux façons de voir, montra la voie ; on sait aujourd'hui que le problème est de connaître la *fonction-source* du rayonnement : ou bien elle est commandée par la distribution angulaire de la réémission des photons, et est alors indépendante des propriétés locales ; c'est ce qu'on a appelé le cas de la « diffusion », qui correspond à des contrastes élevés. Ou bien — c'est le cas de l'« absorption » —, elle est commandée par les propriétés locales (température) et indépendante des processus de réémission. En réalité, il est impossible de ramener la fonction-source à ces deux schémas simples. **Mais leur intervention, depuis Eddington, a joué un rôle considérable.**

Eddington se pose donc le problème de l'intensité restante, alors seule mesure utilisable, et dans le seul cas du soleil. Il écrit l'équation de transfert complète dans les raies, en introduisant notamment le coefficient ε ($0 < \varepsilon < 1$) qui est la fraction du rayonnement absorbé à la fréquence considérée, et transféré en énergie cinétique par des collisions « superélastiques » :

$$\mu \frac{d I_{\nu}(\theta)}{\rho dx} = -(\kappa + \kappa_{\nu}) I_{\nu}(\theta) + [(1 - \varepsilon) \kappa_{\nu} \mathcal{J}_{\nu} + \varepsilon \kappa_{\nu} \mathcal{J} + \kappa \mathcal{J}]$$

Il résout les équations de ce type grâce aux « approximations d'Eddington » sur la distribution angulaire du rayonnement.

Mais une autre hypothèse, sur la variation de l'opacité (dans la raie) avec la profondeur, était nécessaire à Eddington pour mener à bien une solution algébrique. Cette hypothèse concerne le rapport κ/κ_{ν} , nul de 0 à $\tau = \tau_1$, et de τ_2 à l'infini, constant pour $\tau_1 < \tau < \tau_2$ (couche « renversante »).

Malgré ces hypothèses très grossières (et aujourd'hui oubliées depuis bien longtemps), Eddington arrivait à montrer que dans le cas solaire (raies intenses), ε est certainement très petit, et le rapport κ/κ_{ν} très grand. De plus la couche renversante doit être superficielle.

La discussion, par Eddington, des raies d'émission, aboutit à la conclusion que le spectre chromosphérique implique un écart important à l'ETL, et des températures locales élevées. Là aussi, les vues d'Eddington étaient en avance d'un quart de siècle.

Eddington se pose le problème (1920-1930) : « Que peut-on tirer des mesures de raies » ? Rappelons que les mesures en étaient à un stade primitif, bien en retard sur la théorie ! Il suggère l'étude des séquences d'étoiles : telle ou telle raie passe par un maximum pour tel type spectral ; d'où l'estimation de la température, et de la densité électronique correspondante (un travail qui fut fait par Fowler et Milne). Le cas des raies de résonance est curieux (ainsi les raies H et K du Ca II) : il conduit à des valeurs faibles de la pression électronique. La discussion entre Fowler, Milne et Eddington aboutit à admettre l'origine extérieure (chromosphérique) de ces raies, ou du moins de leurs noyaux.

Mais les profils des raies étaient encore hors de la précision des spectrographes. La largeur des raies (10 Å pour K, 30 Å pour H α) conduisait Eddington et ses contemporains à parler d'effets Doppler, d'effet Stark, voire d'effet Compton. Eddington suggéra même (encore une idée d'avenir !) l'élargissement par les collisions.

Avec l'amélioration des mesures (largeurs équivalentes, et dans le cas solaire, profils et variations centre bord) les exigences de la théorie deviennent plus grandes.

Les incertitudes portent sur l'élargissement, sur les abondances, sur les modèles. L'étude de la variation centre-bord permet précisément d'éliminer

les deux premières inconnues et jouent le rôle d'un bon test du modèle et de la théorie ; d'où son utilisation très systématique.

L'époque 1939-1940, bien résumée par le livre d'Unsöld (Physik der Sternatmosphären, 1938) aborde ces questions avec un esprit peu différent de celui d'Eddington : la répugnance est évidente en face du « numérique » ; on veut des calculs algébriques, aboutissant à des expressions calculables sans intégration et simplement, même si c'est au prix d'hypothèses très simplistes. L'amélioration des mesures se traduit alors, nécessairement, par un formalisme compliqué de la théorie, — et parfois par une perte du sens physique !

L'équation de transfert est écrite sous une forme dite « générale » faisant intervenir des coefficients d'absorption (κ, κ_v), de diffusion (σ_v), d'extinction, — la diffusion peut être cohérente, ou non cohérente. La difficulté vient de ce qu'on ne sait calculer que la somme de ces coefficients, non leurs valeurs individuelles. Tout ce qu'on peut faire, c'est de les choisir de façon à ce que l'expérience soit représentée le mieux possible par la théorie : mais le sens physique est souvent absent de ces représentations formalistes.

Le formalisme du calcul des raies évite encore le numérique, nous l'avons dit : les approximations du genre de celles pratiquées par Eddington restent donc nécessaires. La fonction source est choisie linéaire, le rapport κ/κ_v est supposé constant dans un certain intervalle de profondeurs des paramètres, la variation centre-bord des intensités et des flux dans la raie, en chaque point de la raie. Deux modèles extrêmes d'absorption donnent lieu à des calculs raffinés, compliqués, et... sans véritable sens physique, sinon un sens d'orientation des théories à venir. Ces deux modèles sont ceux de « Milne-Eddington » ($\kappa/\kappa_v = \text{cste}$) et « Schuster-Schwarzschild » ($\kappa/\kappa_v = 0$ pour toute valeur de τ , sauf $\tau = 0$; pour $\tau \rightarrow 0$, le produit

$$x = \tau \frac{x_p}{x} \quad \text{garde une valeur finie.}$$

Un travail annonciateur des travaux ultérieurs de l'après-guerre, est celui de Strömgren : il chercha, dans le cas où κ/κ_v dépend de τ , à utiliser une valeur *moyenne* de cette quantité.

Un autre travail de pionnier fut celui qui aboutit aux relations d'Eddington-Barbier, où, sous une forme simple, on appliquait le théorème de la moyenne, en définissant une *profondeur optique moyenne de formation* τ^* , par des relations du type :

$$I = \int_0^\infty S(\tau) e^{-\tau/\mu} d\tau/\mu \sim S(\tau^*)$$

Cette technique permettait à Eddington de décrire le comportement centre-bord des raies, dans les différentes hypothèses (M-E, S-S), intermédiaires.

Ces travaux, en général, faisaient l'hypothèse de l'absorption pure, sans diffusion. L'intervention totale ou partielle de diffusion posait un problème,

que seule l'itération semblait permettre de résoudre : la fonction source S dépend de l'intensité I . Donc, il faut choisir une intensité I_1 de première approximation, puis calculer S_1 , en déduire I_2 , puis S_2 , etc. Mais avec les approximations usuelles à l'époque (sur l'opacité : M-E ou S-S; sur l'anisotropie du rayonnement : approximation d'Eddington ; sur la fonction source : fonction linéaire de τ) on arrivait à des relations algébriques dont les conséquences quantitatives rejoignaient les estimations antérieures d'Eddington sur ϵ , sans vraiment aller beaucoup plus loin.

En somme, on arrive toujours à faire coïncider une théorie et un jeu de mesures, par un choix convenable de paramètres. Mais la recherche de la signification physique de ces paramètres est escamotée, si bien que l'on ne peut savoir ni ce qui se passerait avec une théorie sans approximations mathématiques, ni ce qui se passerait avec une réflexion physique préliminaire sur les κ , κ_v , σ , etc.

C'est d'abord dans le sens de la rigueur numérique et mathématique que devraient s'orienter les chercheurs.

b) *Les fonctions de poids et de saturation.* L'introduction par Minnaert des fonctions de poids devait permettre une telle rigueur. Il est possible, sans approximation d'ordre algébrique ou numérique, d'écrire le profil ou la largeur équivalente des raies dans le cas des raies suffisamment faibles sous la forme :

$$\chi(0, \mu) = \int_0^{\infty} g(\tau, \mu) \frac{\chi_\nu}{\chi} d\tau \quad (1936)$$

Cette théorie, sous des formes variées, permet des calculs simples pourvu que l'on connaisse la fonction de poids

$$g(\tau, \mu) = G(\tau, \mu) e^{-\tau/\mu}$$

Celle-ci dépend essentiellement de la fonction-source. Si celle-ci correspond à « l'absorption pure », alors g est proportionnel au gradient de la fonction-source; sinon (diffusion pure ou partielle), g ne peut être aisément calculé en toute rigueur.

Cette théorie des fonctions de poids est satisfaisante dans la mesure où elle permet la séparation de l'influence du continu et de celle de la raie (donc le calcul a priori de g). Il est clair qu'elle permet de retrouver les résultats essentiels obtenus avec les modèles M-E ou S-S de distribution de l'opacité, mais qu'elle les dépasse. Appliquée par Minnaert au cas solaire, la théorie est généralisée par Unsöld au cas stellaire.

La théorie de Minnaert-Unsöld ne valait, on l'a dit, que pour les raies faibles — ou pour les ailes des raies fortes. Les applications sont diverses. On a notamment déterminé l'abondance des éléments (Minnaert, Claas, inter-

prété les variations centre-bord de raies faibles (Pecker, 1948-51 : cas des bandes moléculaires), et des ailes des raies fortes (Houtgast, 1942-1950). De ces dernières recherches, on pourrait conclure à l'importance des phénomènes de diffusion non-cohérente. Enfin, il convient de noter les importantes déductions que tirait Minnaert de la considération des profondeurs de formation τ^* des raies, tirées de la définition

$$W = 2 \int_0^{\tau^*} g(\tau, \mu) K(\tau) \frac{d\tau}{x}$$

et qui dépendent étroitement du type des raies choisies, et, par l'intermédiaire de g , de la longueur d'onde.

L'extension de la théorie exacte au calcul des raies fortes a été possible grâce à l'introduction de la fonction de saturation (Pecker, 1950). Cette théorie généralisée permet le calcul des courbes de croissance, dans tous les cas pratiques. Il est intéressant de voir comment, avant ces développements, la théorie des courbes de croissance avait évolué. On montre notamment à quels types d'approximations mathématiques correspondent les théories antérieures dues à Minnaert, Menzel, Baker. Il est montré comment le nouvel outil de la théorie des fonctions de saturation permet de déterminer les abondances des éléments avec une grande sûreté — dans la mesure où l'on sait calculer les fonctions de poids, et si l'on connaît la turbulence.

Muni de ce type de théorie, plusieurs questions s'imposent. Tout d'abord quelles en sont les limites, quelles sont les erreurs ? Ensuite quelles en sont les possibilités techniques ? Enfin peut-on l'appliquer sous des formes simplifiées conservant un sens physique ?

On montre que les approximations qu'implique l'usage de la fonction de saturation sont de deux sortes. L'application du théorème de la moyenne à la fonction de Voigt $H(a, \nu)$ conduit à une erreur de l'ordre de 2 % au maximum sur W , cependant que l'erreur due à l'application à la fonction a (amortissement) de ce même théorème peut être levée (par la théorie détaillée de Van Regemorter) au prix d'une complication un peu grande des calculs. Il est à noter que dans les théories précédentes, les approximations du type S-S ou M-E peuvent conduire à des erreurs d'un facteur 2 ou 3 !

Le principal usage des fonctions de poids et de saturation est de donner un sens aux courbes de croissance empiriques. Le palier de celles-ci fixe la quantité

$$\overline{G\sqrt{T}_{\text{cin}}}$$

cependant que la détermination de la constante d'échelle des abscisses permet d'atteindre les abondances. On peut même généraliser les courbes de croissance MILNE-EDDINGTON en leur donnant un sens précis grâce à la comparaison avec la théorie exacte.

Il est certain que si ces méthodes ont eu un rôle essentiel dans les années 1950-60, aujourd'hui en revanche l'existence de grands ordinateurs permet de calculer point par point les profils et de procéder à leur intégration numérique pour obtenir les largeurs équivalentes. Mais l'utilisation des fonctions de poids et de saturation reste d'un intérêt pédagogique évident.

Une discussion des courbes de croissance empiriques, compte tenu de ce que nous apprend la théorie des fonctions de poids et de saturation, conclut cette seconde partie du cours. Elle met en évidence, notamment, les contradictions qu'impliquent encore l'analyse : contradiction dans la façon dont les turbulences dépendent de la profondeur, différences entre courbes de croissance construites à partir de différents multiplets. La solution physique des problèmes posés par ces contradictions est malheureusement limitée par l'imprécision des mesures physiques (f) et astrophysique (W) et par les indéterminations liées au fait que, souvent, la précision des mesures ne donne que la pente des courbes de croissance empiriques, non leur courbure, faute d'un intervalle suffisant de variation de la quantité gfl , d'une raie à l'autre d'un multiplet.

c) *Développements de la théorie : écart à l'ETL, inhomogénéités.*

Une troisième partie du cours est consacrée aux améliorations (essentiellement physiques) qu'il faut apporter à la théorie physique et à la complexité des modèles astrophysiques pour rendre compte correctement des observations.

Il est clair que la première amélioration est l'introduction de fonctions-sources réalistes tenant compte (voir cours 1965-1966) des écarts de l'ETL : ces fonctions-sources S_{ν} peuvent dépendre de la fréquence par l'intermédiaire du terme j_{ν}/φ_{ν} dont la théorie préliminaire est donc nécessaire : la méthode de THOMAS est (à quelques détails près) ce qu'on peut actuellement faire de mieux ; mais elle n'est pourtant que très partielle. THOMAS montre que, le plus souvent, $j_{\nu}/\varphi_{\nu} = 1$. Reste donc à calculer T_{exc} , puisque

$$S_{\nu} = \frac{j_{\nu}}{\varphi_{\nu}} B_{\nu}(T_{exc})$$

Les méthodes sont aujourd'hui bien au point (Y. CUNY, 1967, dans le cas de l'hydrogène, par exemple).

Cette analyse montre que le problème s'est compliqué de la façon suivante : Dans l'hypothèse ETL, les raies sont des images simples du modèle. Pour un élément donné, on peut tirer des mesures, les abondances, la turbulence, la valeur de T_{exc} , l'amortissement, — d'une façon indépendante, à partir des différents paramètres de la courbe de croissance. Au contraire, hors ETL, tout est couplé ; on ne peut pas déterminer les abondances sans déterminer aussi les turbulences, les écarts à l'ETL, l'amortissement. Le découplage est devenue une opération compliquée au point de vue de l'analyse numérique. En supposant que toutes les quantités physiques dépendent d'un seul para-

mètre de profondeur, on a montré comment on pouvait espérer un tel découplage, grâce à la théorie de la fonction-source.

Mais il ne faut pas oublier que l'atmosphère de l'étoile est un milieu inhomogène, affecté par les « granulations » de toutes les échelles de dimension, par la rotation, par les champs magnétiques, par les phénomènes d'expansion, de vents, d'accrétion... Le premier problème est celui du diagnostic ; on doit déterminer les distributions des quantités physiques (T , p_e) et des vitesses, l'échelle géométrique et temporelle de ces distributions, et enfin leur topologie et même leur géométrie. Le second problème est de savoir tenir compte de ces inhomogénéités pour tirer parti des spectres et pour déterminer les abondances, les amortissements, etc. Le troisième problème, le plus important est d'en faire la théorie, c'est-à-dire de comprendre la distribution des quantités physiques et même de savoir la prévoir. Le fait que, localement, toutes les quantités dépendent du temps ne simplifie pas le problème !

Ce triple problème fera l'objet du cours des années 1967-68 et suivantes.

SÉMINAIRES

Les séminaires ont eu comme thème général *l'étude du Soleil actif, et des couches extérieures de l'atmosphère solaire.*

Les exposés ont été les suivants :

— *Polarisation des raies interdites dans la couronne solaire*, par M. P. CHARVIN.

— *Particularités et origine des centres actifs anormaux*, par M^{me} M.-J. MARTRES.

— *Hydrodynamique des couches extérieures du Soleil*, par M. P. SOUFRIN.

— *Couplage entre la photosphère et la chromosphère ; discussion qualitative*, par M. E. A. SPIEGEL.

— *Mouvements convectifs dans la photosphère normale et active*, par M. F. RODDIER.

— *Champs magnétiques dans les régions actives*, par MM. M. SEMEL et J. RAYROLLE.

— *Observations du Soleil dans l'ultra-violet lointain*, par M. R.-M. BONNET.

— *Détermination optique des paramètres physiques des condensations coronales*, par M. G. WLÉRIK.

— *Caractéristiques générales de la couronne d'après les observations radio-astronomiques*, par M. A. BOISCHOT.

— *Rayons X solaires*, par M. R. MICHARD.

Enfin, le Professeur Lubos PEREK, de l'Institut astronomique de l'Académie des Sciences tchécoslovaque, a donné au Collège de France une conférence sur le sujet suivant : *Recent developments in stellar dynamics*, le 26 mai 1967, à 10 h 30.

COMPOSITION DU GROUPE DE RECHERCHES

Peu de modifications ont été apportées par rapport à la composition du groupe de recherches tel qu'il est défini à la page 80 de l'Annuaire du Collège de France, 66^e année, pour 1966-67. Les modifications intéressent principalement l'Observatoire de Nice et la Faculté des Sciences de Nice. Le service théorique et spatiale de cet Observatoire s'est étendu. En plus de M. LEFÈVRE et de M^{me} FRANÇOIS, M. J.-P. ZAHN, astronome adjoint, et M. O. BELY, chargé de recherche au C.N.R.S., M^{me} F. BELY, boursière du Centre national d'Etudes spatiales, se sont installés à Nice où se développent leurs travaux sur l'intérieur des étoiles, l'évolution des étoiles, la physique des milieux fortement ionisés, et ses applications astrophysiques. A la Faculté des Sciences de Nice, sous la direction de M. F. RODDIER et de M. LEVY-LEBLOND, maîtres de conférences de physique, un troisième cycle d'astronomie et d'astrophysique s'est développé. L'enseignement y a été donné par les chercheurs et astronomes de l'Observatoire, en plus de l'enseignement assuré par MM. RODDIER et LEVY-LEBLOND.

TRAVAUX DE RECHERCHES

C'est toujours dans le domaine de la physique des atmosphères solaires et stellaires que s'est principalement orientée l'activité de l'équipe, ainsi que dans celui du milieu interstellaire.

M^{lle} Y. CUNY a maintenant achevé sa thèse, les applications récentes au cas du Soleil ont montré l'importance des méthodes précises qu'elle a mises au point pour l'explication correcte du spectre de Balmer du Soleil. Celui-ci dépend fortement de la structure chromosphérique et, grâce à la théorie exacte, un bon accord peut être obtenu avec l'expérience. M^{lle} S. DUMONT est arrivée également, par l'étude des raies H et K, dans le cadre de la théorie développée par M^{lle} CUNY, à rendre compte du spectre observé. Ces données ainsi que celles de M. BONNET dans l'ultra-violet solaire (spectres et images solaires obtenus en fusées) et de M. LENA dans l'infra-rouge (spectres obtenus à l'Observatoire national de Kitt Peak aux Etats-Unis) laissent penser que le

minimum de température entre la photosphère et la chromosphère est très « plat ». Cette conclusion a été récemment confirmée par la réunion à Arnhem de la semaine d'étude de la photosphère et de la basse chromosphère, organisée par l'Observatoire d'Utrecht.

Le laboratoire envisage pour l'avenir un programme systématique d'étude théorique des chromosphères stellaires. M. KANDEL a notamment appliqué déjà, dans le cadre de son travail de thèse, la théorie de M^{lle} DUMONT à l'obtention de spectres calculés d'étoiles froides. Il trouve un bon accord entre la théorie et les observations de Wilson-Bappu, pourvu que soient faites certaines hypothèses sur les chromosphères stellaires ; il s'agit là certainement d'un travail qui donnera lieu à d'importants développements.

L'étude détaillée des étoiles de la série principale a progressé. La thèse de M. KANDEL sur les étoiles dMe et sur leur chromosphère, celle de M^{me} PRADE-RIE sur les étoiles A, à raies métalliques et normales, apportent de nouveaux résultats. Leurs travaux font l'objet de deux thèses qui seront soutenues dans le courant de l'année 1967. Le tri des éléments, sous l'influence conjuguée de la diffusion thermique et du vent solaire, dans les régions coronales, a permis à M. DELACHE d'expliquer de façon quantitative toutes les particularités du spectre de la couronne solaire. La thèse de M. DELACHE sera, elle aussi, soutenue en 1967.

M^{me} BAYLAC continue à étudier le spectre infra-rouge des étoiles O à G, et complète ses premières recherches par une discussion serrée des expériences actuellement disponibles, notamment des expériences de OKE. De plus, avec l'aide de M^{me} ANDRILLAT d'une part, et de M. LEQUEUX d'autre part, elle prépare une série de nouvelles expériences, les unes à Saint-Michel, les autres en ballon, afin d'améliorer des déterminations expérimentales de l'infra-rouge stellaire, et notamment de la discontinuité de Paschen.

La thèse de M^{me} GREVESSE-GUILLAUME a été soutenue en 1967 à Liège ; le jury était présidé par le Professeur SWINGS. Ce travail a mis en évidence l'importance possible des nuages circumstellaires, et a précisé de façon générale nos connaissances sur le rougissement par les poussières interstellaires et sur la nature des poussières responsables de ce rougissement. De son côté, M. LE-FÈVRE a abordé le même problème, en fabricant au laboratoire des poussières dans des conditions susceptibles de donner des informations sur la physique interstellaire. Il a pu montrer que la formation de mono-cristaux était préférentielle et que ces mono-cristaux (probablement en raison de leurs moments magnétiques) s'associent de préférence en chaînes. La dimension des mono-cristaux, si on ne leur laisse pas le temps ou les possibilités de se recombinaison, correspond à une distribution très « pointue ». Ce problème reste fondamental dans la mesure où les nouvelles expériences de M. COURTÈS prouvent que les idées antérieures exprimées par le Professeur sur le rôle des poussières interstellaires de petites dimensions pourraient bien rester pleinement valides. Il n'est pas exclu qu'une proportion importante de la masse de la Galaxie soit, en

effet, attribuable à ces petites poussières, inobservables dans les longueurs d'onde du rayonnement visible.

MISSIONS ET CONGRÈS

La liste ci-dessous ne concerne que les chercheurs parisiens du groupe.

Y. CUNY est allée à Palo Alto (Californie), le 23 février 1967, au Symposium on Radiative Transfer.

M^{me} O. BAYLAC est allée plusieurs fois en mission à Montpellier, travailler avec M^{me} Y. ANDRILLAT.

Y. CUNY, Ph. DELACHE, S. DUMONT, J.-C. PECKER, ont participé à la semaine d'Etude consacrée à la photosphère moyenne à Arnhem (Pays-Bas) au mois d'avril 1967.

Ph. DELACHE est allé à l'Observatoire de Nice au mois de février 1967.

PUBLICATIONS

Y. CUNY, *Détermination exacte de la structure stationnaire d'une atmosphère d'hydrogène - Problèmes hors de l'équilibre thermodynamique local* (*Ann. d'Astr.*, **30**, 143, 1967).

S. DUMONT, *Formation des raies du Ca II et du Mg II dans la basse chromosphère* [*Ann. d'Astr.*, 1967 (à paraître)].

F. PRADERIE, *Sur les raies de l'hydrogène. I. Profils quasi-statiques dans les atmosphères stellaires* (*Ann. d'Astr.*, **30**, 31, 1967).

— *Sur les raies de l'hydrogène. I. Importance respective des domaines impact et quasi statique pour les électrons* (avec N. FEAUTRIER et H. VAN REGEMORTER) (*Ann. Astr.*, **30**, 45, 1967).

R. KANDEL, *Modèles d'atmosphères pour les étoiles naines froides* (*Ann. Astr.*, **30**, 439, 1967).

Ph. DELACHE, *Contribution à l'étude de la zone de transition chromosphère - couronne* (Thèse) [*Ann. d'Astr.*, 1967 (à paraître)].