Adj.

N O T I C E

sur les

T I T R E S   E T   T R A V A U X   S C I E N T I F I Q U E S

de

JEAN LATOUR
Attaché de Recherche Agrégé du C.N.R.S.
Observatoire de NICE

mai 1974

CURRICULUM VITAE

LATOUR JEAN, Jacques, Lucien.

Né le 31 mai 1942 à ARLES sur Rhône (13).

Marié le 22 décembre 1964 avec Hélène PETIT.
Trois enfants.

Nationalité : Française.

Adresse : 13, avenue du Général Estienne, 06000 NICE.

ETUDES SECONDAIRES au Lycée Joffre de MONTPELLIER.

Baccalauréat Mathématiques Elémentaires		1959

ETUDES SUPERIEURES à la Faculté des Sciences de MONTPELLIER.

Certificats d'Etudes Supérieures

Propédeutique MPC	(B)	1961
Electrotechnique		1962
Electronique	(B)	1962
Electricité		1962
Techniques Mathématiques de la Physique	(TB)	1963
Optique	(B)	1963
Thermodynamique et Mécanique Physique	(AB)	1963
Astronomie	(B)	1963
Eléments de Physique Quantique		1964
Chimie Systématique		1965
Diplôme d'Etudes Supérieures d'Astronomie (TB et Félicitations du Jury)		1964
Agrégation en Sciences Physiques		1965
Attestation d'Etudes Approfondies en Physique Théorique	(AB)	1966

Doctorat d'Etat à l'Université de NICE
Soutenue le 25 novembre 1972
(Mention Très Honorable et Félicitations du Jury).

SERVICES

Enseignement Supérieur

Assistant Délégué	1/1/1964 au 30/09/1965
Assistant Agrégé titulaire	1/1/1965 au 31/12/1967

C.N.R.S.

Attaché de Recherche Agrégé depuis le 1/01/1968

Boursier E.S.R.O.

Lieu de recherche du 1/10/1970 au 30/9/1971
Goddard Institue for Space Studies
N.A.S.A.
NEW YORK
N.Y. 10025, U.S.A.

Activité d'Enseignement

Faculté des Sciences de MONTPELLIER.
Travaux Dirigés des certificats de Physique du Premier Cycle, du certificat d'Optique et de la préparation du C.A.P.E.S.

Faculté des Sciences de NICE (U.E.R.M.S.T.)
Cours de Structure Interne du D.E.A. du 3e Cycle d'Astronomie pendant l'année 1969-1970.

Observatoire de NICE.
Cours interne sur les modèles stellaires et l'hydrodynamique de la convection et des pulsations stellaires, mars 1974.

Activité d'encadrement de jeunes chercheurs.
A partir d'octobre 1974, responsabilité du travail de thèse de J. MASSAGUER, boursier E.S.R.O. à l'Observaoire de Nice pour l'année 1974-1975.

TRAVAUX SCIENTIFIQUES.

Mes premiers contacts avec l'Astronomie ont été ceux d'un observateur amateur : à la fin de mes études secondaires, au lycée de Montpellier, j'ai pu me construire un télescope standard de 21cm d'ouverture, dans le Club d'Astronomie du lycée animé par Monsieur VAURIOT, Professeur de Mathématiques et amateur passionné qui sut nous communiquer son enthousiasme pour l'Astronomie.

Avec lui, nous nous entraînions, dans ce groupe, à l'observation visuelle de quelques étoiles variables à longue période, du type Mira Ceti, et à la photographie.

Depuis, je me suis toujours intéressé à cette activité d'amateur avec d'autres observateurs, et à l'occasion d'évènements astronomiques ou pendant les journées "Portes ouvertes" auxquelles j'ai participé à l'Observatoire de Nice, j'ai eu de nombreuses occasions de mettre cet instrument à la disposition du public et de répondre aux questions de celui-ci.

Je pense continuer cet effort de vulgarisation, car je crois qu'un chercheur doit être en mesure d'expliquer, en termes compréhensibles par le public, les problèmes auxquels il est confronté chaque jour.

A la fin de ma licence, à l'Université de Montpellier, j'entrepris un Diplôme d'Etudes Supérieures sous la direction de H. ANDRILLAT qui m'enseigna avec beaucoup de clarté les premières bases de l'astrométrie et de l'astrophysique. Ce travail me permit de connaître la technique de spectrophotométrie photographique, que j'appliquais sur les raies d'émission et sur le fond continu de la nébuleuse d'Orion et d'une nébuleuse planétaire.

J'en retiens les difficultés de cette technique qui est d'une faible précision sur les rapports d'intensités de raies, et qui conduit à un dépouillement relativement long des clichés. Même accélérée par l'usage d'un ordinateur, cette méthode de spectrophotométrie photographique reste fastidieuse, et constitue un frein à l'interprétation des observations. Ceci souligne tout l'intérêt des nouveaux moyens de dépouillement automatisés qui utilisent un microphotomètre digitalisé couplé à un ordinateur comme celui qui est actuellement mis en place à l'Observatoire de Nice.

Après ces débuts d'observateur, et après avoir passé l'agrégation de Sciences Physiques en 1965, et perfectionné mes connaissances en Physique Théorique, en 1966 et 1967, toujours à l'Université de Montpellier où j'étais Assistant en Physique, j'ai eu la chance de pouvoir entrer à l'Observatoire de Nice en qualité d'Attaché de Recherche au C.N.R.S. Je dois cette nouvelle orientation de ma carrière à J.-C. PECKER qui fut le maître d'oeuvre du développement actuel de l'Observatoire et à J.-P. ZAHN qui dirigea mes recherches sur la structure interne des étoiles, et plus particulièrement sur l'étude des zones convectives.

A mon entrée à l'Observatoire de Nice, en 1968, et après une période d'initiation à la structure interne dans le cadre du D.E.A. d'Astronomie, J.-P. ZAHN me proposa d'étudier comment se comportaient les zones convectives superficielles d'une étoile lorsque celle-ci est soumise au potentiel perturbateur d'une autre étoile dans un système double serré.

A cet effet, je mis au point un programme de calcul d'enveloppes stellaires, statiques, sur l'ordinateur relativement modeste dont disposait alors l'Observatoire : un ordinateur IBM 1130, de 8 k-mots de mémoire centrale, heureusement associée avec un disque en accès direct de 512 K. Je soignais tout particulièrement le calcul des limites des zones convectives telles qu'elles sont données par le critère classique de Schwarzschild, qui prédit l'instabilité convective en comparant simplement la grandeur relative des gradients de température adiabatique et radiatif.

Dans les zones convectives (gradient radiatif supérieur au gradient adiabatique), je décrivais la convection thermique par la théorie phénoménologique dite "de la longueur de mélange". Cette théorie, introduite par Prandtl, retient l'aspect "corpusculaire" de la convection et la décrit comme un mouvement de globules montants (plus chauds que le milieu ambiant), et descendants (plus froids) au sein du fluide. Son principal inconvénient est que la taille et la longueur du trajet de ces globules (ou longueur de mélange) restent assez arbitraires.

Je calculais une grille de modèles d'enveloppes pour diverses gravités et températures effectives, la masse restant fixée à 2 $M_{\odot}$, qui est celle des étoiles de type A. Ceci mit en évidence, dans la zone convective subphotosphérique, une zone présentant un gradient de densité inversé (densité décroissante avec la profondeur). Dans le diagramme H.R. cette inversion est maximum pour les étoiles de types A et F, et elle augmente lorsque la gravité diminue.

Au cours de cette étude, j'ai de plus testé l'influence des divers paramètres introduits dans la théorie de la longueur de mélange, et montré que, suivant les hypothèses adoptées dans ces modèles, le flux convectif prédit peut varier de neuf ordres de grandeur.

Ceci souligne la principale insuffisance de cette théorie : elle est appliquée, dans les modèles stellaires, à des zones convectives s'étendant sur plusieurs échelles de hauteur de la densité, alors que, la façon dont Prandtl l'a établie, suppose que l'épaisseur de la zone est petite devant cette échelle de hauteur, ce qui est bien le cas dans les expériences de laboratoire.

De plus, dans la théorie de Prandtl, la longueur de mélange elle-même, qui représente un libre parcours moyen des éléments turbulents, est définie par la distance du point considéré de la zone convective à son bord supérieur. Dans les modèles que j'ai calculés, c'est cette définition de la longueur de mélange qui donnait, pour les étoiles A, des flux convectifs très inférieurs à ceux obtenus lorsque cette longueur de mélange est rattachée à l'échelle de hauteur de la densité ou de la pression.

Ce travail montrait que dans la description de l'hydrodynamique stellaire, il était hasardeux de transposer simplement les théories établies pour les milieux incompressibles ou quasi-incompressibles qui peuvent être étudiés par les expériences de laboratoire.

Deux facteurs principaux différencient les approximations que l'on peut faire en hydrodynamique "de laboratoire" de celles de l'hydrodynamique "stellaire":

- d'une part les dimensions d'une étoile sont telles que les mouvements du fluide s'étendent sur un grand nombre d'échelles de hauteur de la densité, alors que, dans le cas terrestre, les dimensions caractéristiques des mouvements sont en général très petites devant cette échelle de hauteur (laboratoire) ou tout au plus du même ordre (atmosphère).
Dans un modèle stellaire, il est donc indispensable de tenir compte de la compressibilité qui joue un rôle important.

- d'autre part le milieu stellaire, plasma surtout constitué d'hydrogène et d'hélium ionisés, a des propriétés physiques très différentes de celles des gaz et des liquides habituels. Du point de vue de la convection, ces propriétés se résument à la valeur d'un nombre sans dimension, appelé nombre de Prandtl σ, qui mesure le rapport de la viscosité cinématique, au coefficient de conductivité thermique. Dans le cas des fluides ordinaires, les deux effets, viscosité et conductivité, sont d'origine moléculaire, et σ est de l'ordre de l'unité; alors que dans une étoile, le transport de chaleur est surtout radiatif et σ mesure en gros le carré du rapport de la vitesse du son à la vitesse de la lumière, ce qui conduit à des valeurs de l'ordre de 10^{-8} à 10^{-10}.
De ce seul fait, nous verrons plus loin qu'une approximation parfaitement justifiée pour des liquides ou l'air, n'est pas applicable au cas stellaire.

Je rappelerai brièvement à présent les approximations qui sont faites sur les équations de l'hyrdodynamique dans les théories de la convection thermique.

A part quelques expériences récentes de résolution de ces équations dans les trois dimensions d'espace, et dans le temps, il est en général nécessaire de réduire le nombre des dimensions d'intégration par un procédé de séparation des variables. Dans ce problème, la direction de la verticale (coordonée Z) est privilégiée du fait de la force de gravité, et il est naturel d'introduire des valeurs moyennes de toutes les grandeurs physiques suivant les plans horizontaux (x, y). Une structure régulière, périodique des mouvements du fluide, est supposée a priori. Elle est décrite par des fonctions trigonométriques $f_i(x, y)$ qui dépendent en outre d'un paramètre arbitraire a_i : le nombre d'onde horizontal (ou fréquence spatiale).

Ces fonctions f_i sont choisies pour avoir des propriétés d'orthogonalité et de normalisation lorsqu'elles sont intégrées sur tout le plan xy.

Cette approximation, jointe à l'intégration des équations suivant les coordonnées horizontales, permet d'établir des équations ne dépendant plus que de la coordonnée z et du temps, qui décrivent une convection cellulaire. Cette technique s'apparente à la méthode mathématique de Galerkin de développement en fonctions orthogonales.

Les structures en général chosies sont des rouleaux (variation sinusoïdale des fluctuations suivant la coordonnée x par exemple, valeur constante dans la direction perpendicualire y), ou des hexagones dont la structure dépend à la fois de x et de y. Ces formes de cellules sont effectivement observées dans les expériences de convection lorsque les conditions d'instabilité conduisent à un régime d'écoulement laminaire et stationnaire.

La solution la plus générale des équations peut alors être considérée comme la superposition de mouvements cellulaires d'extension horizontale différente, ou modes, ce qui introduit autant de nombres d'ondes a_i.

Dans ce procédé de séparation des variables, les termes non linéiares conduisent à l'évaluation de moyennes des produits triples de fonctions $f_i f_j f_k$ soit C^{ijk} la valeur de ces intégrales. Elles obéissent, comme en mécanique quantique, à certaines règles de sélection, autrement dit certains de ces produits sont toujours nuls : c'est le cas pour les cellules bidimensionelles (rouleaux) qui n'interagissent pas entre elles (produits en nombres impairs de fonctions trigonométriques). Les hexagones, par contre,donnent lieu à des C^{ijk} non nuls.

L'un des tests d'une théorie de la convection est de comparer à l'expérience le flux de chaleur total transporté par le fluide. Ce flux, non dimensionalisé par celui transporté en l'absence de

mouvement dans les mêmes conditions, est le nombre de Nusselt N.

Les conditions de l'expérience : la différence de température imposée entre le haut et le bas du fluide, ainsi que ses propriétés thermiques, sont résumées dans un troisième nombre sans dimension : le nombre Rayleigh R, d'autant plus grand que l'instabilité convective est plus forte. Il doit dépasser une certaine valeur critique R_c qui dépend des conditions aux limites pour que l'instabilité apparaisse, et dans le cas stellaire, ce seuil est donné par le critère de Schwarzschild.

Les théories de la convection prédisent qu'au dessus de R_c un certain domaine continu de nombres d'ondes horizontaux a_i sont instables, et à l'intérieur de ce domaine d'instabilité, N dépend fortement des a_i. En général, N est maximum pour une valeur de a, mais les théories restent jusqu'à présent muettes sur la valeur de a qui sera choisie par la nature dans une expérience donnée.

Une autre approximation a été faite dès 1903 par Boussinesq pour l'étude hydrodynamique de la convection dans un fluide incompressible. Elle consiste à négliger les variations spatiales et temporelles de la densité ρ dans tous les termes des équations, sauf dans le terme responsable du mouvement : celui de la force d'Archimède de l'équation du mouvement.

Cette théorie a été portée à un haut degré de développement par MALKUS, SPIEGEL et VERONIS, qui vers la fin des années 1950 introduisirent une simplification de ces équations non linéaires : l'approximation "mean-field" qui néglige les couplages turbulents (termes d'advection) et qui est justifiée dans le cas où le nombre de Prandtl est grand devant l'unité.

Cette approximation prédit une loi du type $N \sim R^{1/3}$ lorsque R est très grand, qui est effectivement observée.

Récemment, toujours dans le cadre de l'approximation Boussinesq, SPIEGEL, TOOMRE et GOUGH ont appliqué des méthodes numériques très raffinées, (résolution en différences finies du second ordre) à ces équations et ils ont pu reproduire par le calcul la plupart des résultats de laboratoire.

De plus, les expériences montrent, lorsque R augemente, des changements de structure, ou points de transition, dans le mouvement du fluide : passage des rouleaux aux hexagones, puis à des structures variant périodiquement dans le temps, et enfin à la turbulence. Ceci a pu également être reproduit dans les expériences de GOUGH et TOOMRE en introduisant successivement plusieurs modes dans les équations (jusqu'à cinq).

L'addition de modes, qui dans ce cas permettent une description plus fine des couches limites, contribue à rapprocher la loi $N(R, \sigma)$ de celle qui est observée. GOUGH, SPIEGEL et TOOMRE ont également

déterminé analytiquement les formes asymptotiques de la loi $N(R, \sigma)$ pour les cellules bidimensionelles et tridimensionelles dans les divers domaines du nombre de Prandtl σ ($\sigma >> 1$, $\sigma \sim 1$, $\sigma << 1$).

Par là, ils ont ainsi démontré dans l'approximation de Boussinesq la validité et l'applicabilité de cette méthode qui est basée sur un développement en modes par une méthode de Galerkin.

Après ces résultats très encourageants, il était tentant de reprendre cette méthode mais en relaxant l'approximation de Boussinesq, afin de l'appliquer aux milieux compressibles. Lorsque l'on résoud les équations complètes de l'hydrodynamique, de nouvelles difficultés apparaissent comme le traitement des ondes de choc. Les mouvements de convection, dus à la force de gravitation, ont des temps caractéristiques qui correspondent aux très basses fréquences acoustiques et le traitement complet de la compressibilité qui inclut la propagation des ondes sonores (hautes fréquences acoustiques) n'est pas nécessaire dans ce problème.

Les météorologistes occupés par la circulation de l'atmosphère sur de grandes échelles de temps avaient déjà rencontré cette difficulté. OGURA et PHILIPS proposèrent en 1960 une approximation dite "anélastique" qui exclut la propagation des ondes sonores par une simplification de l'équation de continuité. (Supression de la dépendance temporelle des fluctuations de la densité) mais qui conserve cependant les modes de basses fréquences.

D. GOUGH et E. SPIEGEL avaient vérifié que cette approximation jointe à une linéarisation des fluctuations thermodynamiques conduisait à des équations consistantes du point de vue de la conservation de l'énergie.

C'est dans ce contexte que E. SPIEGEL, J.-P. ZAHN et J. TOOMRE me proposèrent d'appliquer leur méthode de calcul à l'étude d'une zone convective stellaire dans l'approximation anélastique.

Je pus mener ce travail à bien durant l'année 1970-1971 grâce à l'attribution d'une bourse de l'E.S.R.O. qui me permit de passer cette année à l'"Institute for Space Studies" de la N.A.S.A. à New York. Je dois à R.JASTROW l'hospitalité dans cet institut, et à R. STOTHERS l'accès à ses puissants moyens de calcul. Grâce à lui notre équipe a pu disposer d'un temps de calcul très suffisant sur l'ordinateur 360-95 IBM, cinq cents fois plus rapide que celui auquel j'avais accès à l'Observatoire de Nice.

L'exemple que nous avons retenu fut celui des zones convectives d'une étoile de type A. Plusieurs raisons ont motivé ce choix.

- Ces étoiles se situent dans la zone de transition entre les types à enveloppe convective très active (F, G) et ceux à enveloppe purement radiative (O et B).

- De ce fait, le flux convectif y est faible et les zones sont peu profondes : de l'ordre de l'échelle de hauteur, ce qui rend plus aisé le traitement numérique.

- De plus elles constituent un bon test pour la théorie puisque celle de la longueur de mélange s'y était avéré particulièrement sensible.

- Enfin ces étoiles sont le siège d'anomalies d'abondances des éléments métalliques dont l'explication en termes de diffusion dépend de toutes les causes d'instabilités hydrodynamiques susceptibles de mélanger certaines zones subphotosphériques. La pénétration de la convection dans les couches radiatives est un facteur important, un autre peut être l'instabilité des mouvements de rotation différentielle.

Ces étoiles ont la propriété intéressante d'avoir, au moins au début de leur évolution, deux zones convectives d'environ une échelle de hauteur d'épaisseur, séparées par un interzone stable vis-à-vis de la convection d'environ deux échelles de hauteur.

La zone sub-photosphérique est due à l'ionisation de l'hydrogène et à la première ionisation de l'hélium, et la plus profonde est due à la deuxième ionisation de l'hélium. C'est cette dernière zone qui se prête le mieux à notre étude. En effet, une différence essentielle avec les modèles de laboratoire est qu'il n'existe pas dans une étoile une limite fixe au bord de la zone convective, sur laquelle la vitesse s'annule. Ici, le champ de vitesses généré par l'instabilité convective pénètre dans les zones stables dans lesquelles il s'amortit. Dans un calcul hydrodynamique, il est donc nécessaire de placer les limites de la zone étudiée assez loin des limites naturelles de la zone d'instabilité pour permettre à cette pénétration (ou "overshooting") de s'exercer sans la contrainte d'une condition aux limites artificielles. Enfin, la zone convective de l'hélium II et les deux zones stables qui l'entouraient peuvent être traitées dans l'approximation de diffusion qui conduit à un calcul simple du flux radiatif.

La résolution des équations anélastiques fut obtenue par une méthode de différences finies. La plus simple à mettre en oeuvre est celle qui calcule seulement des différences du premier ordre (dérivées premières), et je pus bénéficier dans ce domaine de l'expérience d'un chercheur anglais, E. GRAHAM, qui travaillait sur la convection compressible à deux dimensions. L'introduction de l'équation d'état et de l'opacité du milieu fut faite sous forme de tables numériques à deux dimensions.

L'exploitation du programme fut commencée dès l'été 1971, et continuée au cours d'un deuxième séjour de deux mois, janvier et février 1972.

Les solutions stationnaires obtenues concernent surtout l'approximation meanfield à un seul mode. Elle équivaut à ne considérer que des cellules bidimensionnelles (rouleaux) alors que lorsque les termes d'advection ne sont pas négligés, c'est le cas des cellules tridimensionnelles qui est envisagé.

J'ai obtenue quelques solution stationnaires dans ce dernier cas, mais des difficultés numériques liées à une résolution spatiale insuffisante de certaines zones m'ont empêché d'explorer totalement le domaine d'instabilité.

Les détails des méthodes ci-dessus et des résultats sont décrits dans ma thèse que je soutins en novembre 1972.

Parallèlement à ce travail, J. TOOMRE et J.-P.ZAHN mettaient au point un programme plus performant, dérivé de celui utilisé par J. TOOMRE et D. GOUGH dans l'approximation Boussinesq, permettant de traiter pour la convection compressible les interactions entre plusieurs modes. Ce programme est plus rapide car il traite des différences finies du second ordre (deux fois moins d'équations simultanées et la variable d'intégration peut être aisément changée de façon à introduire plus ou moins de points dans certaines zones). La définition des différences finies en est meilleure, et la convergence plus aisée. Avec ce programme, en décembre 1972, juin 1973, août et septembre 1973, J.-P. ZAHN, puis moi-même avons obtenu avec J. TOOMRE une exploration plus systématique des solutions possibles pour les rouleaux et les hexagones dont je résume ici les traits essentiels:

1) deux types de solutions stationnaires existent : le mode fondamental qui n'a pas de noeud de la vitesse verticale dans la zone instable, et le premier harmonique qui en a un : ce qui équivaut à une superposition de deux cellules.

   Aux grands nombres de Rayleigh, seul le premier harmonique est stable, car l'évolution temporelle du fondamental conduit toujours vers cette deuxième solution.

   Ces deux modes ont été calculés pour les rouleaux et les hexagones.

2) dans tous les cas, la pénétration de la convection dans les zones stables existe : elle est relativement faible pour les rouleaux; la convection engendre dans ces zones d'autres cellules plus petites dont les vitesses sont faibles comparativement à la cellule principale.

   Le cas des hexagones est plus intéressant : la pénétration est très dissymétrique entre le haut et le bas, et cette dissymétrie

dépend du signe des constantes de couplage C^{ijk}. Pour la zone convective considérée (He II, étoile de type A) qui couvre une échelle de hauteur, cette pénétration peut s'étendre jusqu'à deux échelles de hauteur, en dessous, et probablement plus vers le haut (en changeant le signe des C^{ijk}), ainsi que je l'ai montré dans ma thèse sur quelques solutions. Nous n'avons pas exploré totalement ce dernier cas, car il aurait fallu traiter en même temps la zone convective photosphérique.

3) L'approximation "meanfield" n'est pas valable lorsque le nombre de Prandtl est très petit (10^{-9}). Dans ce cas nous avons montré que le couplage non linéaire prépondérant (qui détermine l'amplitude des solutions) est celui de la pression turbulente, et non celui du flux convectif. Ce couplage génère des solutions dans lesquelles les vitesses horizontales peuvent être supersoniques et où la vitesse verticale qui ne dépend pas du nombre d'onde a_1 a une valeur de l'ordre des trois quarts de la vitesse du son. Ces résultats sont en contradiction avec l'hypothèse fondamentale de l'approximation anélastique qui suppose des vitesses petites devant celle du son. Au contraire lorsque cette approximation est relaxée (cellules hexagonales) les couplages non linéaires prépondérants sont bien ceux du flux convectif et du flux d'énergie mécanique. La pression turbulente ne joue pratiquement aucun rôle et les vitesses sont petites devant la vitesse du son (nombre de Mach inférieur à 10^{-1}).

   De plus, dans ce cas, la vitesse et le flux convectif sont indépendants de la viscosité du milieu, alors que dans l'approximation "meanfield" ils en dépendaient fortement.

4) Dans le cas des cellules hexagonales, le flux maximum prédit pour le mode fondamental est de 10^{-1} fois la valeur du flux total. Pour le premier harmonique (probablement le seul stable bien que dans ce cas nous n'avons pas testé sa stabilité) ce flux maximum est seulement de 10^{-4}. Ce résultat se rapproche de celui donné par la théorie de la longueur de mélange en choisissant l'hypothèse de Prandtl ℓ = distance au bord supérieur de la zone.

5) Dès à présent nous pouvons affirmer que l'inter zone radiatif des étoiles de type A n'est pas une zone sans mouvement. Bien que cette zone s'étende sur plus de deux échelles de hauteur, la pénétration des deux zones convectives est suffisante pour le maintenir homogène chimiquement par un mélange continu. Ce résultat est important en regard des phénomènes de diffusion vers la surface des éléments métalliques qui semble bien être à l'origine des anomalies d'abondances des étoiles A.

   C'est cette hypothèse qui a été retenue dans un travail récent de G. VAUCLAIR sur la diffusion de l'hélium vers l'intérieur de l'étoile.

Dans l'avenir nous comptons étendre ce traitement hydrodynamique de la convection à d'autres types stellaires, et en particulier au Soleil pour lequel il existe encore bien des controverses sur la profondeur de la zone convective. Pour ce type d'étoiles à zone convective profonde il sera nécessaire de considérer plusieurs modes simultanément.

Jusqu'à présent ces calculs hydrodynamiques ont tous été faits sur l'ordinateur de l'Institut for Space Studies de New York dont nous n'avons pas d'équivalent en France. Celui du C.I.R.C.E. est cependant maintenant assez puissant pour pouvoir traiter ce genre de problème.

A l'Observatoire de Nice, à l'aide du 7040 IBM, puis du terminal qui nous donne accès au 360-65 de Meudon, je me suis tourné vers un problème de convection pénétrative plus simple, puisqu'il se situe dans l'approximation Boussinesq.

C'est R. VAN DER BORGH de l'Université de Melbourne qui, lors de son passage à Nice en septembre 1972, nous souligna l'intérêt de ce travail. J.-P. ZAHN et moi-même collaborons avec lui sur cette question.

Nous considérons une zone convective entourée de deux zones stables, d'extension infinie, et imposons un flux total constant d'énergie à travers ce milieu, ce qui imite les conditions stellaires, et différe des expériences classiques de convection dans lesquelles ce sont les températures des limites qui sont imposées.

L'étude linéaire est achevée et a précisé certains travaux antérieurs en particulier sur l'évaluation des nombres de Rayleigh critique R_c pour différentes stabilités et instabilités des trois zones du modèle.

L'étude non linéaire a été faite pour les cellules bidimensionelles et pour un régime faiblement supercritique, $R \lesssim 10\ R_c$ et dans ce modèle où l'extension de la zone convective est fixée a priori, il n'existe pas de solution non linéaire en dehors du domaine d'instabilité prédit par la théorie linéaire.

Par contre, des expériences de laboratoire de MUSMAN et des calculs numériques à deux dimensions de N.O. WEISS et D. MOORE ont montré l'existence de telles solutions (instabilité d'amplitude finie) pour un autre exemple de convection pénétrative obtenue dans de l'eau au voisinage de son maximum de densité à 4 °C. Cela tient essentiellement au fait que dans la solution non linéaire l'étendue de la zone instable est plus grande que lorsque le mouvement n'est pas encore établi (cas linéaire) et le nombre de Rayleigh effectif s'en trouve augmenté.

En ce moment j'explore le domaine plus fortement supercritique, $R > 10\ R_c$ afin de voir comment se comporte la pénétration.

Une étape très prochaine est celle du traitement de deux cellules hexagonales couplées de la façon la plus simple de manière à annuler certains termes non linéaires.

Tel est donc l'état actuel de mes recherches sur la convection en équipe avec J.-P. ZAHN, J. TOOMRE, E. SPIEGEL et R. VAN DER BORGHT.

J'ai également consacré une partie de mon temps à des activités d'intérêt général et d'encadrement.

En 1969-1970, j'ai assuré l'enseignement de la structure interne dans le cours du D.E.A. d'Astronomie de l'Université de Nice en remplacement de J.-P. ZAHN alors aux Etats-Unis.

Ce D.E.A. a été malheureusement supprimé, faute de débouchés à offrir aux étudiants et l'enseignement se restreint à présent aux chercheurs. Cette année, j'ai fait une série d'exposés à l'Observatoire de Nice sur la structure interne, la convection thermique et les pulsations radiales. A l'extérieur j'ai fait plusieurs séminaires sur nos résultats récents concernant la convection pénétrative, dans les observatoires de Meudon et de Lyon, et au Laboratoire de Météorologie Dynamique.

A partir du mois d'octobre prochain, j'aurai la responsabilité du travail de thèse d'un jeune chercheur espagnol, J. MASSAGUER, de l'Université de Barcelone, qui viendra se joindre à notre équipe. Il vient d'obtenir une bourse d'un an de l'E.S.R.O., et a déjà commencé une étude analytique sur la convection dans un milieu où la conductivité thermique dépend de la température. Je compte examiner avec lui le problème de la convection dans un milieu optiquement mince que l'on rencontre pour les zones convectives photosphériques.

En vue du calcul de modèles stellaires, nécessaires aux observateurs comme aux théoriciens, j'ai amélioré les performances de mon programme d'enveloppes. J'ai répondu à plusieurs demandes de calcul de modèles particuliers et rédigé un mode d'emploi de ce programme qui peut être mis à la disposition de toute personne intéressée. Il calcule à chaque niveau une soixantaine de paramètres physiques, incluant toutes les grandeurs thermodynamiques importantes.

Je projette, en collaboration avec G. VAUCLAIR, de mettre au point un programme hydrodynamique d'évolution stellaire. Le code actuel, seul disponible en France, résoud le système différentiel de la structure interne par une méthode de tir, et il ne permet pas le calcul de l'évolution très au delà de la séquence principale. Plusieurs équipes seraient intéressées par un tel programme afin d'obtenir des modèles jusqu'au stade de géante rouge.

PUBLICATIONS

1) *Envelope Models for A-type stars. The density inversion zone with the mixing length theory.*
Astron. and Astrophys. 9, 277-287, 1970.

2) *"Un modèle anélastique pour la convection thermique. Application aux étoiles de type A."*
Thèse de Doctorat, Université de Nice,
25 novembre 1972.

Autres publications en cours de rédaction :

en collaboration avec Messieurs E.A. SPIEGEL, J. TOOMRE et J.-P. ZAHN.

3) *The Structure of Stellar Convection Zones*
I : Approximations.

4) *The Structure of Stellar Convection Zones*
II: Application to A-type Stars.

à paraître dans l' "Astrophysical Journal".

en collaboration avec Messieurs J.-P. ZAHN et R. VAN DER BORGHT.

5) *On Penetrative Convection.*
I : Linear Approximation, Compressible and Incompressible Cases.

6) *On Penetrative Convection.*
II: Non Linear, Incompressible Case.

PARTICIPATIONS A DES CONGRES

1969	Ecole d'Astrophysique de Saas-Fée "Structure Interne et Evolution des Etoiles" Cours organisé par l'Association Vaudoise des chercheurs en Physique.
juillet 1970	Colloque de Liège. "Pre-main Sequence Evolution".
mai 1972	Colloque du C.N.R.S. "Origine du système solaire".
avril 1974	Ecole d'Astrophysique de Saas-Fée "Magnétohydrodynamique. Cours organisé par les chercheurs des Observatoires de Genève et de Bâle.
avril 1974	Participation à l'organisation des journées de prospective du Groupe Spécialisé n°2 "Etoiles" à La Colle sur Loup.
mai 1974	Journées d'etudes sur la turbulence. Organisées par l'Institut de Mécanique de Grenoble.
juillet 1974	Colloque de Liège "Problems in Stellar Hydrodynamics"