

Paul Ledoux

*Forrières, le 8 août 1914 ; Liège, le 6 octobre 1988.
Correspondant de la Classe des Sciences en 1958 ;
membre en 1966 et directeur en 1973. – Astronome.
Professeur ordinaire à l'Université de Liège.*

par Léo HOUZIAUX

Professor Ledoux's stature has grown continuously during the four decades I have known him. Certainly he must be counted among the very few great representatives of astrophysics during the past half century.

S. Chandrasehhar, Prix Nobel de Physique

Lorsque Paul Ledoux s'est éteint le 6 octobre 1988, à l'âge de 74 ans, sa disparition a été ressentie comme une lourde perte par la communauté astronomique internationale. Il y comptait de nombreux amis et les témoignages de sympathie ont révélé à quel point il était apprécié par ses collègues de par le monde. Admis à l'éméritat en 1983, il gardait en effet de nombreux contacts avec le monde scientifique, notamment en tant que président du Conseil de l'Observatoire Européen Austral (ESO) et restait actif dans les sociétés savantes auxquelles il appartenait. Il était né d'un père forgeron à Forrières, aux confins de l'Ardenne et de la Famenne le 8 août 1914, benjamin d'une famille de cinq enfants à laquelle il resta toujours très attaché. C'est d'ailleurs dans ce pays de Lomme et de Lesse qu'il aimait venir se retremper au soir de sa vie. Il en avait connu tous les détours lorsque jeune adolescent il se rendait à l'École Moyenne de l'État à Rochefort, où sa vive intelligence frappa plus d'un de ses professeurs. À l'intervention de son instituteur, il y était arrivé à l'âge de 13 ans, après avoir fait une année complémentaire en primaire. Les études secondaires n'étaient certes pas une tradition dans ce milieu familial voué au travail manuel précoce. À Rochefort, il fit notamment la connaissance d'Aline Michaux, qui allait devenir



Paul Lévy

son épouse en 1939. À la suite d'une intervention auprès de ses parents de E. Fonck, alors directeur de l'École Moyenne avec section d'Athénée de Marche-en-Famenne, il put poursuivre ses humanités. C'est à Marche que se développa chez lui le goût des études scientifiques et qu'il acquit cette conviction que le développement de la physique réservait au monde des surprises capables de transformer l'histoire de l'humanité. Il noua à l'Athénée, parmi des condisciples admiratifs, des amitiés qui durèrent toute sa vie. Ses humanités terminées, nanti d'une bourse de la Fondation Universitaire, il s'inscrivit à la rentrée de 1933 en première candidature en sciences physiques à l'Université de Liège. Il fut proclamé licencié en sciences physiques à l'Université de Liège en 1937, après s'être vu décerner chaque année le grade le plus élevé et les félicitations du jury. Son mémoire, dont les résultats firent l'objet d'une note au *Bulletin de la Classe des Sciences*, t. XXIII, portait sur un sujet très en vogue à l'époque : la dissociation moléculaire au sein d'une atmosphère stellaire. C'est par le biais des cours d'optique et de spectroscopie que Ledoux fréquenta l'Institut d'Astrophysique, où il fit la connaissance de Marcel Migeotte, alors assistant de Pol Swings. La personnalité de Swings, ses qualités d'animateur, l'œuvre qu'il avait déjà accomplie le persuadèrent de solliciter son patronage pour diriger un mémoire de licence en astrophysique, domaine qui jusque-là ne l'avait pas spécialement intéressé. Il n'était pas astronome amateur et c'est la lecture de la « *Statistical Mechanics* » de R. H. Fowler qui lui ouvrit des perspectives dans le domaine de la physique du milieu stellaire. S'apercevant de son goût très marqué pour les études théoriques, Swings avait pris contact avec son collègue Svein Rosseland, de l'Institut d'Astrophysique Théorique d'Oslo. Lauréat du Concours des bourses du Gouvernement, classé premier ex-aequo, Ledoux obtint un subside qui lui permettait de séjourner huit mois à Oslo, subside renouvelable à l'intervention de la Fondation Francqui. Mais, à peine ses examens terminés, il est appelé sous les drapeaux pour un terme de dix-huit mois au régiment d'artillerie des Chasseurs Ardennais, alors caserné à Namur. Candidat sous-lieutenant, c'est à la salle d'études qu'il passe ses soirées à approfondir ses connaissances en lisant « *Die Mathematischen Hilfsmittel des Physikers* » et en perfectionnant son anglais. En février 1939, à peine mariés, les Ledoux s'embarquent à Anvers pour Oslo. Rosseland faisait cette année-là un cours sur la structure des corps fluides en rotation.

Ledoux fut vivement intéressé par les ellipsoïdes de Jacobi à axes inégaux ; à cette époque cependant, Rosseland l'orienta vers le problème des pulsations des céphéides ; il avait été introduit dans le sujet par l'ouvrage fondamental de S. Chandrasekhar *An Introduction to the Study of Stellar Structure*, et après être tombé sous le charme d'Eddington avec la lecture de *The Internal Constitution of the Stars*, il eut accès à la littérature scientifique sur la convection dans les étoiles, ainsi que sur la génération thermonucléaire d'énergie, qui venait de faire, avec Bethe et von Weizsäcker, un pas décisif. Au contact de V. Bjerknæs et de C. Störmer, il comprit l'importance de l'hydrodynamique pour certains aspects du problème qu'il traitait. À l'aide de l'intégrateur différentiel de type analogique nouvellement acquis par l'Institut, il résolut l'équation régissant les pulsations radiales de différents modèles stellaires, ainsi que l'équation polytropique de la sphère isotherme pour les solutions singulières, en vue de la construction de modèles avec noyau dégénéré, suivi d'une zone isotherme surmontée d'une zone de génération d'énergie et d'une enveloppe radiative. Ces modèles auraient pu s'appliquer à des étoiles fortement évoluées ayant consommé leur hydrogène central. En marge de ce travail proposé par Rosseland, Ledoux, à la suite de la lecture de travaux d'Eddington, de Rosseland et de T. G. Cowling avait été conduit à reprendre la discussion de la stabilité vibrationnelle des étoiles en général. Il remarqua rapidement que celle-ci dépendait du rapport de l'amplitude dans les régions de génération d'énergie déstabilisantes à l'amplitude des mouvements dans les couches radiatives extérieures, qui, pour les opacités admises à l'époque, étaient toujours stabilisantes. C'est alors que Ledoux montra, en utilisant comme approximation le modèle standard d'Eddington, que les étoiles de la séquence principale avec génération d'énergie au centre par le cycle du carbone devenaient instables vibrationnellement pour des masses suffisamment grandes parce que le rapport d'amplitudes augmentait et tendait vers l'unité quand la masse, accroissant la pression de radiation, jouait un rôle de plus en plus important, réduisant le rapport généralisé des chaleurs spécifiques qui tendait alors vers $4/3$. En utilisant la composition chimique adoptée à l'époque, la masse critique était de l'ordre de 100 masses solaires. À première vue, la migration de la génération d'énergie du centre vers une zone plus extérieure aurait dû réduire cette masse critique. D'où l'intérêt témoigné aux modèles calculés à l'aide de l'intégrateur graphique.

Les événements internationaux interrompirent cependant brutalement ces travaux. Début avril, les troupes allemandes envahissent la Norvège et le retour en Belgique est promptement décidé, alors que la bourse de la Fondation Francqui devait leur permettre de séjourner jusqu'en août à Oslo. Les visas suédois et allemands tardent à venir et ne seront accordés que le 8 mai ; dès le 9, les Ledoux prennent le train pour rejoindre le ferry à Trelleborg, à l'extrême sud de la Suède. Lors de leur arrivée dans la petite ville le lendemain matin, ils apprennent par les journaux l'invasion de la Belgique et l'état de guerre avec l'Allemagne. Bloqués en Suède, ils sont finalement hébergés à l'Observatoire de Saltjöbaden, où une bourse permet à Ledoux de travailler quelques mois pendant lesquels il s'intéresse aux travaux du directeur B. Lindblad sur la dynamique stellaire. Il s'initie à l'établissement des diagrammes de Hertzsprung Russell pour les amas galactiques et globulaires, diagrammes qui deviendront plus tard la pierre de touche des théories sur l'évolution stellaire. Avec l'aide de P. Swings, alors en séjour au Yerkes Observatory de l'Université de Chicago, il obtient une bourse de Graduate Fellow de la Belgian American Educational Foundation pour travailler à ce même observatoire sous la direction de S. Chandrasekhar. Le 14 novembre 1940, les Ledoux s'envolent de Suède pour Moscou, et c'est un transsibérien bondé de réfugiés de toutes nationalités qu'ils quitteront dix jours plus tard à Vladivostok. Après quelques jours d'attente, un bateau japonais les emmènera à Tsuruta. Ils gagneront par le train Yokohama. Une attente forcée d'une semaine leur permettra de visiter Tokyo et Kamakura. Embarqués à bord du *Heisu-Haru*, ils atteindront à la veille de Noël le port de Seattle, après une courte escale à Vancouver. Quelques jours après, Ledoux était accueilli par Otto Struve, directeur du Yerkes Observatory. Il s'empressa d'exposer à Chandrasekhar les résultats obtenus à Oslo, et notamment l'expression approchée qu'il avait établie pour la fréquence du mode fondamental d'oscillation. Or, Chandrasekhar venait de recevoir de L. Pekeris un manuscrit abordant par une autre méthode le même problème. Les résultats convergents des deux études devaient donner lieu à un premier article en collaboration dans l'*Astrophysical Journal*, l'important travail sur la stabilité vibrationnelle avec dérivation d'une masse critique faisant l'objet d'un autre article dans le même volume. Ledoux travaillait à ce moment sur les modèles évolués à noyaux isothermes ou dégénérés suivis d'une zone iso-

therme, et projetait de rejoindre à Princeton son maître Rosse-land, qui, échappé de Norvège, s'y était vu offrir une situation. Il n'eut malheureusement pas le temps de synthétiser ses idées sur le sujet. Cette question fut d'ailleurs résolue par Schönberg et Chandrasekhar (masse limite du noyau isotherme), puis par Hoyle et Schwarzschild (modèles de géantes rouges). En effet, les Forces Belges se reconstituaient en Grande-Bretagne et Ledoux fut mobilisé au camp de Joliette, au Canada dès septembre 1941. Il devient « *regimental sergeant* » et débarque en Angleterre au deuxième bataillon belge caserné à Malvern, où il reçoit le grade de chef de peloton de signalisation. Convoqué à Londres par un officier belge, il y retrouve avec étonnement le Baron Albert de Dorlodot qui avait accueilli sa batterie d'artillerie lors du « Pied de Paix Renforcé » de 1938. Ce major, passé en Angleterre en 1940, cherchait à mettre sur pied un service météorologique belge au sein de la R.A.F. Après quelques stages dans des aérodromes, Ledoux se retrouva à la base de reconnaissance aérienne photographique de Benson. En juillet 1944, de Dorlodot annonce un prochain départ pour le Congo Belge. Parti en août alors que la libération du continent semblait proche, Ledoux n'arrive à Léopoldville qu'en octobre, après un stage dans une base de la R.A.F. au Nigeria. Stanleyville ayant été choisi comme centre principal du réseau météorologique de la colonie, c'est au voisinage de l'aéroport de cette ville qu'il s'installe. Il avait été forcé d'abandonner ses recherches depuis septembre 1941, mais était resté en correspondance avec Chandrasekhar. D'autre part, Swings lui envoya pendant toute la guerre l'*Astrophysical Journal*. À Londres, il était entré en contact avec quelques astronomes anglais, dont T. G. Cowling, qui devint un de ses grands amis. Chaque fois que son service le lui permettait, il assistait aux séances de la Royal Astronomical Society. Ainsi, il ne perdit pas, malgré les difficultés de l'heure, complètement pied en astrophysique. Au Congo cependant, l'isolement l'a amené, à partir de la relecture de quelques ouvrages qu'il avait emmenés avec lui, à repenser certaines méthodes fondamentales ; à partir d'une réflexion de Jeans dans *Astronomy and Cosmogony*, l'idée lui vint d'utiliser le théorème du viriel sous sa forme différentielle pour étudier les pulsations radiales d'une étoile, éventuellement animée d'une lente rotation solide. Il s'était ouvert de cette perspective à Chandrasekhar, qui l'encouragea à lui soumettre un texte qui parut dans l'*Astrophysical Journal* en 1945. Cette méthode se révéla

par la suite d'un grand intérêt et fut généralisée (viriel tensoriel) principalement par Chandrasekhar lui-même.

En octobre 1945, Ledoux, enfin démobilisé, rejoint, après de nouvelles péripéties, Londres puis la Belgique ; il profite de son séjour pour déposer le manuscrit de sa thèse de doctorat, qu'il défend en janvier 1946 ; il est reçu docteur avec la plus grande distinction et s'active aussitôt à rejoindre Chicago. La Belgian American Educational Foundation a en effet renouvelé sa bourse à partir du 1^{er} mars. Après quatre ans et demi de séparation, il retrouve enfin son épouse et fait connaissance avec sa fille, née à Williams Bay en février 1942. À l'observatoire, l'amitié pleine de sollicitude de Chandrasekhar l'aide à se remettre efficacement au travail. Il s'intéresse alors à l'effet sur l'évolution stellaire des changements de composition chimique dus aux réactions nucléaires (proton-proton) dans les régions centrales des étoiles. Celles-ci engendrent une augmentation du poids moléculaire moyen et modifient l'opacité. À l'époque, le modèle courant consistait en un noyau convectif dans lequel ces réactions se produisaient et d'une enveloppe essentiellement radiative. Le noyau convectif, continuellement brassé, devait rester chimiquement homogène et le changement de poids moléculaire moyen devait se produire d'une manière discontinue à l'interface entre le noyau convectif et l'enveloppe radiative. Hoyle et Lyttelton avaient attiré l'attention sur les difficultés que ces changements brusques de composition chimique pouvaient entraîner dans l'application du critère de convection de Schwarzschild de part et d'autre de cette discontinuité, tout en tenant compte de la continuité des variables physiques appropriées, et notamment de la luminosité. Ledoux montra qu'il était vraisemblable que ces difficultés impliquent un mélange local turbulent à l'interface, conduisant à l'établissement d'une zone de transition à poids moléculaire moyen variable. Le gradient de température doit y être strictement égal à la valeur adiabatique correspondante, mais la zone est convectivement stable du fait de la décroissance du poids moléculaire moyen : l'expression mathématique correspondante a été appelée le *critère de Ledoux*, généralisant le célèbre critère de Schwarzschild dans une région à poids moléculaire moyen variable. Il est apparu par la suite que ces zones intermédiaires, dites *semi-convectives*, jouaient un rôle dans l'évolution des étoiles massives.

De retour en Belgique en mai 1947, Ledoux devient l'assistant de P. Swings, mais à partir du 1^{er} juillet, une place de conseiller

météorologique adjoint à la Régie des Voies Aériennes lui est proposée. Le service est dirigé par un de ses amis du temps de guerre, Odon Godart, qu'il avait connu à la R.A.F. Il reprend ses activités météorologiques en vue d'assurer la participation de la Belgique au réseau de stations créé dans l'Atlantique nord ; il se rend aux États-Unis pour négocier l'achat d'une frégate équipée d'un poste de radiosondage pour la mesure des vents en altitude. Il consacra une grande partie de son temps à la gestion, l'entraînement et l'entretien des instruments de bord, la frégate assurant le service d'une station située dans le golfe de Gascogne, à mi-temps avec les Hollandais. Il s'occupe aussi activement de l'école de prévisionnistes, ouverte à des jeunes gens ayant terminé leurs humanités, ainsi que de l'organisation de cours plus avancés et de séminaires pour les météorologistes diplômés universitaires. Au cours de cette période, Ledoux consacrait ses soirées à la rédaction de sa thèse d'agrégation, où il avait repris une discussion détaillée des zones semi-convectives. Il y ajouta un chapitre sur la stabilité dynamique des étoiles dans lequel l'existence de modes de gravité non-radiaux était explicitement liée à celle d'un gradient superadiabatique et à l'origine de la convection. C'est dans cette thèse qu'il traita pour la première fois des effets d'une faible rotation sur les oscillations non-radiales d'un modèle stellaire homogène compressible, montrant que la dégénérescence azimutale d'ordre $2l + 1$ des fréquences (où l est le degré de l'harmonique sphérique), est complètement levée par la rotation. La discussion révélait également des fréquences directement proportionnelles à la vitesse angulaire de rotation, mais le déplacement correspondant ne fut pas élucidé. Dans la suite, ces modes furent retrouvés et explicités sous le nom d'ondes de Rossby (pour l'atmosphère terrestre) et de mode -R (pour les étoiles).

Ayant défendu sa thèse avec succès en 1949, Ledoux put envisager avec plus de sérénité une carrière universitaire. Au 1^{er} octobre de la cette année, il démissionnait de ses fonctions au service météorologique de la Régie des Voies Aériennes pour se consacrer à ses tâches d'assistant. Il fut nommé chef de travaux au 1^{er} mai 1950, puis agrégé de Faculté au 1^{er} octobre 1951. Depuis 1949, il bénéficiait également d'un mandat d'Associé du F.N.R.S.

Avec sa première élève, M^{me} E. Sauvenier-Goffin, il s'attaqua à cette époque à la stabilité des naines blanches et à leurs oscillations radiales. Dans un article qui eut un grand retentissement, ils montrèrent qu'elles devenaient vibrationnellement instables cha-

que fois que les réactions nucléaires étaient responsables d'une fraction significative de leur luminosité. Ceci excluait la présence d'hydrogène dans le cœur de l'étoile et seule une proportion très faible de cet élément pouvait subsister dans les couches plus extérieures. En fait, une très petite quantité d'hydrogène, soit résiduelle, soit amenée par accrétion devait conduire à une augmentation des pulsations. Ces travaux ont permis plus tard de comprendre le comportement de certaines sources cosmiques de rayons X et les variables cataclysmiques comme les novae. Mais Ledoux avait gardé tout son intérêt pour le problème des oscillations non-radiales et il reprit la question à la suite de la lecture d'un article d'Otto Struve discutant une longue série d'observations des variations de vitesses radiales de l'étoile β Canis Majoris. Ces observations mettaient en évidence l'existence de deux périodes très voisines, dont l'une caractérisait aussi les variations du profil des raies spectrales. Le premier, Ledoux proposa d'attribuer ce comportement à des oscillations non-radiales de degré peu élevé, le dédoublement des fréquences étant dû à la rotation, et les profils variables à une combinaison de la rotation et des vitesses associées aux composantes de l'oscillation non-radiale. C'était la première fois, depuis les travaux d'Eddington en 1917, qu'il était fait appel à des oscillations non-radiales pour expliquer le comportement d'une classe d'étoiles variables. On sait que, depuis lors, ce type d'oscillation a été invoqué dans différents cas, surtout dans celui du Soleil qui est le siège d'une myriade d'oscillations de ce genre. C'est l'objet de son article célèbre intitulé : « The Non-radial Oscillations of gaseous Stars and the Problem of the β Canis Majoris », paru dans l'*Astrophysical Journal* en 1951, alors qu'« Higgins Research Fellow », il travaillait à l'Observatoire de l'Université de Princeton. Cette découverte contribua à le classer parmi les maîtres incontestés de la structure et de la stabilité des étoiles. Le travail qu'il va entreprendre lors de ce séjour montre à quel point son esprit inventif était toujours en éveil. Cette année-là, à Princeton, un des principaux cosmogonistes du système solaire, un américain d'origine hollandaise, G. P. Kuiper fait un cours sur les planètes et leur origine. Les propos de Kuiper incitent Ledoux à entreprendre l'étude de la stabilité gravitationnelle d'une nébuleuse isotherme stratifiée en couches planes et parallèles. C'est donc assez naturellement que l'éditeur du *Handbuch der Physik* s'adresse à Paul Ledoux pour écrire les chapitres sur la stabilité des étoiles. Il s'adjoint pour cette tâche la collabo-

ration du Hollandais Th. Walraven, qui signe avec lui la partie sur les étoiles variables. Ces deux contributions, qui totalisent 335 pages, au contenu extraordinairement dense sont devenues, au fil des années, les « classiques » du sujet. Elles ont été et sont toujours abondamment citées dans la littérature professionnelle et se retrouvent en tête des bibliographies de tous les ouvrages sérieux exposant ces questions. En 1960, dans une note au Bulletin de notre Classe des Sciences, Ledoux revint sur le problème de la stabilité séculaire des étoiles. Il se rendait compte dès cette époque des problèmes délicats qui allaient se poser dans le calcul de certaines phases de l'évolution stellaire et suggéra d'étudier parallèlement la stabilité séculaire (thermique) qui n'avait pas, jusque-là reçu, selon lui, suffisamment d'attention. Ses réflexions furent le point de départ de maints travaux, par lui-même et certains de ses collaborateurs, travaux qui permirent de clarifier les idées au sujet de la masse minimale des étoiles, de la limite de Schönberg-Chandrasekhar et du taux de déplacement dans le diagramme de Hertzsprung-Russell des étoiles produisant de l'énergie à partir de la combustion nucléaire de l'hélium. À partir de 1962, il devait ouvrir un nouveau champ d'investigation relatif au comportement asymptotique des oscillations radiales. À son contact, ses élèves ont largement profité de son expérience pour développer les connaissances dans ce domaine. Sa réputation avait d'ailleurs attiré à Liège plus de vingt chercheurs étrangers, souvent très réputés, qui effectuèrent des séjours de longue durée, soit comme « post doctoral fellows » ou en congé sabbatique. En parcourant sa liste de publications, on se rendra compte qu'il a été sollicité de nombreuses fois pour écrire des mises au point dans des compendiums d'astrophysique. Il a aussi écrit nombre de rapports introductifs, toujours substantiels et très fouillés pour des colloques, des écoles d'été, ou des réunions de l'Union Astronomique Internationale. On pourrait croire, à la lecture des paragraphes précédents, que la recherche constituait l'activité presque exclusive de Ledoux à l'Université de Liège. Il n'en est cependant rien. C'est au contraire une bien lourde charge que lui avait confiée la Faculté des Sciences, en le proposant pour l'enseignement de la mécanique analytique en licence, de la mécanique céleste, de l'astrophysique et de l'astronomie en candidatures et en licence. Ces tâches didactiques, qu'il accomplissait avec une conscience professionnelle rare, l'obligeaient à des horaires de travail très chargés, car il était toujours prêt à accueillir pour des

explications et des discussions scientifiques, les nombreux étudiants qui choisissaient de rédiger un mémoire sous sa direction. Il se faisait un devoir d'examiner tous les récipiendaires avec une attention et une patience infinies ; il n'était pas rare de le voir consacrer toute une matinée à l'examen de quatre ou cinq étudiants sur un cours de mécanique ou d'astrophysique.

Au moment de son éméritat, Ledoux était encore à la tête d'une école d'astrophysique théorique nombreuse et prospère. Il n'a certes pas manqué d'être appelé à jouer un rôle important dans une série d'organismes nationaux et internationaux. Il a présidé le Comité National Belge d'Astronomie de 1972 à 1974. C'est au théoricien Paul Ledoux que fut confiée la présidence du Comité des Programmes d'Observation de l'Observatoire Européen Austral de 1972 à 1974. À partir de 1975, il devint représentant scientifique belge au Conseil de ce même observatoire européen et, preuve supplémentaire de l'estime dans laquelle le tenait ses collègues, il en assumait la présidence de juillet 1981 à décembre 1984. Il fut membre du comité des « Advanced Institutes » organisés par l'OTAN de 1972 à 1976, membre du Conseil Scientifique de l'Observatoire Royal de Belge, dont il fut nommé Astronome-Correspondant en 1984. De 1964 à 1967, il présida la commission 35 sur la Constitution Interne des Etoiles de l'Union Astronomique Internationale. Plusieurs institutions renommées l'appelèrent à dispenser un enseignement : outre qu'il se rendit comme Visiting Fellow à Princeton et à Boulder (Colorado), il devint Visiting Professor à l'Université de Californie à Berkeley (1963), titulaire de la Chaire Francqui à l'Université Libre de Bruxelles (1967-1968) et Visiting Professor à la Columbia University (New-York) puis à la University of Washington (Seattle) en 1974. Les distinctions les plus flatteuses, tant nationales qu'internationales, lui furent décernées : prix Francqui en 1964, il reçut en 1968 le prix décennal des Mathématiques Appliquées. En 1972, c'est la Royal Astronomical Society qui lui décernait la « Eddington Medal », avant de l'élire comme « Associate » en 1974. Il fut élu Associé Étranger de l'Académie des Sciences de Paris en 1984, après s'être vu décerner la Médaille Jules Jansen par cette Compagnie en 1976. Distinction assez rare pour un scientifique belge, il fut Docteur Honoris Causa de l'Université Libre de Bruxelles (1969) et de la Katholieke Universiteit Leuven (1985). C'est en 1959 qu'il fut élu correspondant de notre Classe des Sciences, avant d'en devenir membre en 1966 et président

pour l'année 1973. Bien d'autres sociétés savantes l'appelèrent à siéger en leur sein, telle l'*American Association for the Advancement of Science* (1980) et l'*Académie Européenne des Sciences, des Arts et des Lettres* (1980).

Ledoux aura exercé, de son vivant, par son travail scientifique, une influence considérable sur l'astrophysique contemporaine, dont il aura été une figure dominante. Homme affable autant que modeste, il s'est en outre dévoué sans compter à susciter autour de lui des vocations scientifiques. Intégrée à présent dans le patrimoine de l'astrophysique, son œuvre continue à être développée et assure ainsi la pérennité de sa mémoire.

* * *

Des hommages sont rendus à Paul Ledoux dans plusieurs publications. Sur son œuvre scientifique, on consultera avec profit :

- A. Noels and M. Gabriel. Paul Ledoux's scientific career, in *Proceedings of the 25th International Liège Symposium on Astrophysics*, Liège, pp. IX – XVI, 1984.
- E. Schatzman. La vie et l'œuvre de Paul Ledoux, *Comptes rendus de l'Académie des Sciences de Paris*, série générale, tome 6, 1989, pp. 597-599.
- P. Smeyers. in « Eredoctoraat in de Wetenschappen Prof. Dr. P. Ledoux », Leuven, K.U.L., 1985.

LISTE DES PUBLICATIONS

1. Note sur les Molécules de CaH et de CaO dans les Atmosphères des Étoiles froides (en coll. avec E. Bodson), *Bull. Soc. R. Sci. Liège*, **5**, 180, 1937.
2. Note sur l'Équilibre de Dissociation Moléculaire au sein d'une Atmosphère d'Étoile, *Bull. Acad. Roy. Belg., Cl. Sci.*, 5^e série, XXIII, 582, 1937.
3. Le Profil des Raies d'Absorption dans une Atmosphère Stellaire Stratifiée (en coll. avec P. Swings), *Bull. Soc. Roy. Sci. Liège*, 3-4, 179, 1938.
4. C.R. de « An Introduction to the Study of Stellar Structure » de S. Chandrasekhar, *Ciel et Terre*, **11**, 1939.

5. La Machine à Intégrer de l'Institut d'Astrophysique Théorique de l'Université d'Oslo, *Ciel et Terre*, **11**, 1939.
6. Sur la Théorie des Oscillations Radiales d'une Étoile, *Astroph. Norvegica*, III, n° 8, 193, 1940.
7. Compte rendu du symposium tenu au Yerkes Observatory le 30 juin 1941 sur les raies d'absorption interstellaires, *Ciel et Terre*, **58**, 5, 1942.
8. A summary of the Symposium on the Interstellar Lines at the Yerkes Observatory on June 30, 1941, *Popular Astronomy*, XLIX, n° 10, 1941.
9. Radial Pulsations of Stars (en coll. avec C. L. Pekeris), *Ap. J.*, **94**, 124, 1941.
10. On the Vibrational Stability of Gaseous Stars, *Ap. J.*, **94**, 537, 1941.
11. On the Radial Pulsation of Gaseous Stars, *Ap. J.*, **102**, 143, 1945.
12. On the Dynamical Stability of Stars, *Ap. J.*, **104**, 333, 1946.
13. Stellar Models with Convection and with Discontinuity of the Mean Molecular Weight, *Ap. J.*, **105**, 305, 1947.
14. Contribution à « Le cinquanteaire de l'Observatoire Yerkes », *L'Astronomie*, p. 47, février 1948.
15. Sur la Structure Interne des Étoiles, *Ciel et Terre*, **59**, n°s 9-10, 1948.
16. Note sur la Structure et la Composition Interne du Soleil, *Ann. Astrophys.*, **11**, 174, 1948.
17. La Stabilité des Étoiles, *Ciel et Terre*, LXV, n°s 3-4, 1949.
18. Contribution à l'Étude de la Structure Interne des Étoiles et de leur Stabilité, *Mém. Soc. Roy. Sci. Liège*, 4^e série, T. IX, pp. 1-293, 1949.
19. Review of the « Pulsation Theory of Variable Stars » by S. Rosseland, *Ap. J.*, **110**, 515, 1949.
20. The Vibrational Stability of White Dwarfs (en coll. avec M^{me} Sauvenier-Goffin) *Ap. J.*, **111**, n° 3, 611, 1950.
21. *Sur les Oscillations Générales d'une Étoile Gazeuse*, III^e Congrès National des Sciences, Bruxelles, vol. II, sect. 3, 133, 1950.
22. Remarques sur un travail récent de E. A. Milne concernant le déphasage entre la courbe de lumière et la courbe de vitesse radiale des Céphéides, *ibid.*, p. 137.
23. The Non-radial Oscillations of Gaseous Stars and the Problem of Beta Canis Majoris, *Ap. J.*, **114**, 373, 1951.

24. Sur la Stabilité Gravitationnelle d'une Nébuleuse Isotherme, *Ann. Astroph.*, **14**, 438, 1951.
25. Note sur l'Asymétrie des Courbes de Vitesse Radiale des Céphéides, *Bull. Acad. Roy. Belg., Cl. Sci.*, 5^e série, **38**, n° 3, 352, 1952.
26. Note sur les Pulsations d'Étoiles à Grande Concentration Massique et le Problème des Céphéides, *Bull. Soc. Roy. Sci. Liège*, **11**, 408, 1952.
27. Les Étoiles Variables Intrinsèques, *Ciel et Terre*, **59**, n° 1-2/3-4, 1953.
28. L'Énergie des Étoiles, *Bull. Soc. Astron. de Liège*, n° spécial, mai 1953, p. 24.
29. Sur l'Existence d'un Noyau Convectif au centre des Étoiles, *C.R. Ac. Sc. Par.* **236**, 2381, 1953.
30. C.R. de « Basic Methods in Transfer Problems », by V. Kourganoff, *Ciel et Terre*, **59**, n^{os} 7-8, 215, 1953.
31. Résultats Récents sur les Vitesses Radiales à Différents Niveaux dans l'Atmosphère des Céphéides (en coll. avec J. Grandjean), *Rapport des Congrès de l'U.A.I.*, vol. VIII, p. 813, 1952.
32. La Stabilité Convective au centre des Étoiles, *Congrès de l'A.F.A.S.*, juillet 1953.
33. Introduction au V^e Colloque International d'Astrophysique « Les processus nucléaires dans les astres », *Mém. Soc. Roy. Sci. Liège*, T. XIV, 9, 1954.
34. Sur les Conditions d'Équilibre au centre des Étoiles et leur Évolution, *ibid.* p. 200, 1954.
35. La Répartition d'Énergie dans le Spectre η Aquilae et son Rayon (en coll. avec J. Grandjean), *Ann. Astroph.*, **17**, 161, 1954.
36. Développements en Séries de Fonctions Sphériques de la Pression Atmosphérique (en coll. avec I. Ottelet), *Bull. Soc. Roy. Sci. Liège*, **1**, 13, 1954.
37. Communication générale sur l'activité de l'Institut d'Astrophysique de l'Université de Liège (meeting of the R.A.S., London, Nov. 13, 1953), *The Observatory*, **74**, 1, 1954.
38. Sur les Oscillations Radiales de Modèles Stellaires à Grande Concentration Massique, I (en coll. avec J. Bierlaire et R. Simon), *Ann. Astroph.*, **18**, 65, 1955.
39. Idem, II, *Ann. Astroph.*, **18**, 232, 1955.

40. C.R. de « Les Principes Fondamentaux de Classification Stellaire », *Ciel et Terre*, **72**, 87, 1956.
41. Sur l'Application de la Méthode de Rayleigh-Ritz à la Détermination des Fréquences d'Oscillations Radiales d'Étoiles Gazeuses à Grande Concentration massique (en coll. avec H. Elsen), *Bull. Soc. Roy. Sci. Liège*, **24**, 239, 1955.
42. Oscillations Quasi-statiques dans l'Atmosphère de η Aquilae (en coll. avec J. Grandjean), *Bull. Acad. Roy. Belg., Cl. Sci.*, 5^e série, **41**, 1010, 1955.
43. Viscosité et Oscillations d'Étoiles Gazeuses (en coll. avec J. Counson et R. Simon), *Bull. Soc. Roy. Sci. Liège*, **25**, 144, 1956.
44. Possible Source of Instability in Stars, *I.A.U. Symposium*, n^o 3, p. 186, Cambridge Univ. Press, 1957.
45. Note sur le Calcul Numérique des Pulsations Stellaires (en coll. avec Ch. Whitney), *Bull. Acad. Roy. de Belg., Cl. Sci.*, 5^e série, **43**, 622, 1957.
46. Sur les Oscillations d'une Étoile Gazeuse possédant un Champ Magnétique Faible (en coll. avec R. Simon), *Ann. Astroph.*, **20**, 185, 1957.
47. Some Remarks on the Mechanism at Work in the Beta Canis Majoris Stars, *Ap. J.*, **128**, 336, 1958.
48. Variable Stars (en coll. avec Th. Walraven), *Handbuch der Physik*, **51**, 353-604, 1958.
49. Stellar Stability, *Handbuch der Physik*, **51**, 605-688, 1958.
50. Remarque sur la Théorie des Oscillations d'une Masse Fluide Incompressible en présence d'un Champ Magnétique (en coll. avec G. Dricot), *Bull. Soc. Roy. Sci. Liège*, **28**, 115, 1959.
51. Les Champs Magnétiques en Physique Cosmique, *Scientia*, 6^e série, 1, nov. 1959.
52. Détermination des Premiers Modes d'Oscillations Radiales d'une Étoile gazeuse (en coll. avec J. Lambert et Ch. Whitney), *Comptes Rendus du Congrès de Mons 1958: « Les Mathématiques de l'Ingénieur »*, p. 361.
53. Introduction au 9^e Colloque International d'Astrophysique de Liège, *Mém. Soc. Roy. Sci. Liège*, 5^e série, **3**, 9, 1960.
54. La Stabilité Vibrationnelle d'Étoiles formées à partir d'Hydrogène pur (en coll. avec A. Boury), *Mém. Soc. Roy. Sci. Liège*, 5^e série, **3**, 298, 1960.

55. Note sur la Stabilité Séculaire des Étoiles, *Bull. Acad. Roy. Belg., Cl. Sci.*, 5^e série, **46**, 429, 1960.
56. Stellar Evolution in *Present Problems concerning the Structure and Evolution of the Galactic System*, Nuffic International Summer Course, Nyenrode, 1960.
57. On the Spectrum of Turbulent Convection (en coll. avec M. Schwarzschild et E. A. Spiegel), *Ap. J.*, **133**, n° 1, 184, 1961.
58. L'Évolution Stellaire. *Revue des Questions Scientifiques*, 5^e série, **22**, 153, 1961.
59. *Velocity Fields and Associated Thermodynamics Variations in the External Layers of Intrinsic Variable Stars* (en coll. avec Ch. Whitney), I.A.U. Symposium n° 12, Suppl. Nuovo Cimento, 1961.
60. Sur la Forme Asymptotique des Pulsations Radiales Adiabatiques d'une Étoile, I, *Bull. Acad. Roy. Belg., Cl. Sci.*, 5^e série, **48**, 240, 1962.
61. Qu'est-ce qu'une Céphéide, quelle est la cause de la Relation Période-Luminosité ?, *Ciel et Terre*, n°s 9-10, 1962.
62. Rapport sur le mémoire de M. L. Houziaux intitulé « Contribution à l'étude des étoiles à enveloppe », *Bull. Acad. Roy. Belg., Cl. Sci.*, **4**, 1229, 1962.
63. Sur la Forme Asymptotique des Pulsations Radiales Adiabatiques d'une Étoile, II. Comportement asymptotique des amplitudes, *Bull. Acad. Roy. Belg., Cl. Sci.*, **49**, 286, 1963.
64. Effets de la Convection sur la Stabilité Vibratoire des Étoiles Massives (en coll. avec A. Boury et M. Gabriel), *Ann. Astroph.*, **27**, 92, 1964.
65. Les Céphéides, *Scientia*, 1-7, janvier 1964.
66. Stellar Stability and Stellar Evolution, *Rend. Scuola Intern. Fisica « E. Fermi » XXVIII corso*, p. 394, 1963.
67. Some General Comments on the Problem of Stellar Stability, *Astroph. Norv. Vol. IX, n° 20, oct. 1964*, pp. 187-197.
68. Commission de la Constitution interne des Étoiles, Rapport du Président, 1964, *Transactions of the IAU*, Vol. XII A, pp. 577-597 (1965).
69. Stabilité Vibratoire des Étoiles d'Hélium pur (en coll. avec A. Boury), *Ann. Astroph.*, **28**, 353-356, 1956.
70. La Génération d'Énergie dans un Noyau Convectif (en coll. avec M. Gabriel et L. Denis), *Ann. Astroph.*, **28**, pp. 643-647, 1965.

71. Stellar Stability, Chap. 10. « Stars and Stellar Systems», Vol. VIII, University of Chicago Press, 1965.
72. Sur le Spectre des Oscillations Non-radiales d'un Modèle Stellaire (en coll. avec P. Smeyers), *C.R. Acad. Sci. Paris*, **262**, 841-844, 1966.
73. La Constitution des Étoiles – *Compte-rendu des séances de la Comm. 35 de l'U.A.I.*, vol. XII B, 329-333, 1966.
74. Magnetic Stars (en coll. avec P. Renson), *Ann. Rev. Astronomy and Astrophysics*, **4**, 293-352, 1966.
75. « La Structure et l'Évolution des Galaxies » (revue), *Rev. Quest. Scientif.*, **138**, 71, 1967.
76. « Oscillation Theories of Magnetic Variable Stars » in « *The Magnetic and Related Stars* », AAS-NASA, Symposium-Greenbelt, U.S.A. ed. R. C. Cameron (Mono Book, Baltimore, 1967).
77. « Instabilité Gravitationnelle et Formation des Étoiles, des Galaxies et de leurs structures caractéristiques » – Introduction au XIV^e Colloque International d'Astrophysique de Liège, *Mém. Soc. Roy. Sci. Liège*, Tome XV, 9, 1967.
78. L'Origine de l'Hélium dans l'Univers, *Bull. Acad. Roy. Belg., Cl. Sci.*, 5^e série, **56**, 1613, 1966 ; cf. also 1965 Solvay Conference, *The Structure and Evolution of Galaxies* (London : Interscience), p. 85.
79. Le Problème de la Formation de l'Hélium dans l'Univers et dans la Galaxie, *Ciel et Terre*, LXXXIII^e année, n^{os} 3-4, mars-avril 1967.
80. Sur la Stabilité Séculaire des Modèles à Noyaux Isothermes (en coll. avec M. Gabriel), *Annales d'Astroph.*, Tome **30**, pp. 975-984, 1967.
81. Le Problème de la Stabilité des Étoiles, *Physique du XX^e siècle*, vol. VIII, 1963, Cours internationaux post-universitaires de perfectionnement pour docteurs et licenciés en physique.
82. Synthesis of Helium in Massive Stars, Comm. to the 1967 Herstmonceux Conference, *The Observatory*, **87**, 207, 1967.
83. Commission de la Constitution Interne des Étoiles, Report of the President Transactions, *IAU XIII*, 763-800, 1967.
84. Couches Extérieures et Structure Interne des Étoiles, *Highlights of Astronomy*, XIII^e I.A.U. General Assembly, 12-32, 1968.
85. Instabilité Vibrationnelle des Étoiles Massives et Formation

- d'Hélium (en coll. avec A. Boury), in *Origin and Distribution of the Elements*, L. H. Ahrens Ed., 39-41, Pergamon Press Oxford and New York, 1968.
86. Rapport sur le mémoire « Analyse des Orbites des Satellites Terrestres sous l'Influence de Forces Perturbatrices Dérivant d'un Potentiel » par MM. Y. Génin et A. Thyse, *Bull. Acad. Roy. Belg., Cl. Sci.*, **54**, 1553, 1968.
 87. *Questions récentes d'Astrophysique Théorique (leçons dans le cadre de la Chaire Francqui, Bruxelles 1967-1968)*, Université Libre de Bruxelles, 1968.
 88. Rapport sur le mémoire de Mr. P. Renson intitulé : « Variations du Champ Magnétique d'Étoiles A périodiques », *Bull. Acad. Roy. Belg., Cl. Sci.*, **54**, 1128, 1968.
 89. Couches Extérieures et Structure Interne des Étoiles (en russe), *Terre et Cosmos*, n° 6, pp. 14-20, 1969.
 90. Avant-Propos du 16^e Colloque d'Astrophysique de Liège : *Pre-Main Sequence Evolution*, Mém. Soc. Roy. Sci. Liège, XIX, 1970.
 91. Stellar Stability and Stellar Oscillations, Circular Letter n° 8, Commission 35 (Stellar Constitution) of the International Astronomical Union, mai 1970.
 92. Oscillations et Stabilité Stellaire, in « *La Structure Interne des Étoiles* » XI^e Cours de perfectionnement de l'Association Vaudoise des Chercheurs en Physique, Saas-Fee, pp. 44-211, 1969.
 93. Prestellar Evolution, in *Structure and Evolution of the Galaxy*, D. Reidel Publ. Cy., Dordrecht, 208-235, 1971.
 94. L'Astronomie à un Nouveau Tournant, *Ciel et Terre*, **87**, pp. 13-26, 1971.
 95. Rapport sur le mémoire de P. Cugnon « Orientation des Particules Solides de la Matière Interstellaire et Conséquences pour la Polarisation de la Lumière des Étoiles », *Bull. Acad. Roy. Belg., Cl. Sci.*, **56**, 1393, 1970.
 96. Structure et Évolution des Étoiles, Chap. 2, 2^e partie (pp. 240-257) dans *La Nouvelle Astronomie*, Ed. J.-C. Pecker, Hachette, Paris, 1971.
 97. Non-radial Oscillations and Vibrational Stability of a 0.5 M_☉ Star (en coll. H. Robe et A. Noels), *Astron. and Astrophys.*, **18**, 424, 1972.
 98. Some Comments on Secular Stability Criteria and Applica-

- tions (en coll. avec J. Demaret), *Astron. and Astrophys.*, **23**, 111-116, 1973.
99. La Nouvelle Astronomie, *Bull. Acad. Roy. Belg., Cl. Sci.*, 5^e série, **59**, 1221-1243, 1974.
 100. Non-radial Oscillations, in *Stellar Instability and Evolution*, IAU Symp., n° 59, 135-174, 1974.
 101. Pol Swings, *Bull. ADION* (Observatoire de Nice), n° 11, pp. 58-68, 1974.
 102. Note sur les Oscillations Non-Radiales du Modèle Standard (en coll. avec H. Robe), *Bull. Acad. Roy. Belg., Cl. Sci.*, 5^e série, **61**, 198, 1975.
 103. Vibrationnel Stability of a $1 M_{\odot}$ Star towards Non-Radial Oscillations (en coll. avec A. Boury, M. Gabriel, A. Noels et R. Scuflaire), *Astron. Astroph.*, **41**, 279, 1975.
 104. Avant-Propos au 19^e Coll. Intern. d'Astrophysique de Liège, 8-10 juillet 1974, *Mém. Soc. Roy. Sci. Liège*, 6^e série, Tome VIII, p. 9, 1975.
 105. Vibrationnel Stability of g^+ Modes towards Non-radial Oscillations of Solar Models, 19^e Coll. Int. d'Astrophysique de Liège (en coll. avec A. Noels, M. Gabriel, A. Boury et R. Scuflaire), *Mém. Soc. Roy. Sci. Liège*, 6^e série, Tome VIII, p. 317, 1975.
 106. Dynamical Instabilities in Stars, in *Problems of Stellar Convection*, IAU Coll., n° 38, Nice, 1976 ; pp. 87-102, Ed. E. Spiegel and J. P. Zahn, *Lectures Notes in Physics*, **71**, Springer Verlag, Heidelberg, 1977.
 107. Stellar Stability, in *Theoretical Principles in Astrophysics and Relativity*, pp. 15-58, Ed. N. R. Lebovitz, W. A. Reid, P. O. Vandervoort, The University of Chicago Press, 1978.
 108. Les débuts de l'Univers, *Ciel et Terre*, **95**, 15-22, 1979.
 109. Types of Stellar Instabilities, in *Highlights of Astronomy*, Vol. 5, 433-436, 1980.
 110. Asymptotic Approximation for Non-radial Stellar Oscillations (en coll. avec J. Perdang), Vol. Hommage à J. Géhéniau, *Bull. Soc. Math. de Belgique*, 1980.
 111. Facteurs Caractéristiques des Instabilités en Astrophysique, quelques Résultats, quelques Problèmes, Colloque Ac. Sci. Paris et Cl. Sci. Acad. Roy. Belg., Mémoire Cl. Sci. in 8^e, 2^e série, Tome XLIV, pp. 91-100, 1981.
 112. *Oscillations et Séismologie Solaire*, Coll. Cl. Sci. Acad. Roy. Belg. et Acad. des Sciences, Inst. France, P. III, 1981.

113. *Esquisse du Développement de l'Astronomie en Belgique, II – Florilège des Sciences V*, Acad. Roy. Sci. de Belg., 60-82, 1980 (en coll. avec R. Coutrez).
114. Vibrational Instability of a 3000 M_{\odot} Star and the R136 a Problem (en coll. avec A. Noels et A. Boury), *Astronomy and Astrophysics*, **108**, 49-50, (1982).
115. Remarks, in *Pulsations in Classical and Cataclysmic Variable Stars*, ed. J. P. Cox and C. J. Hansen, JILA, 345-349, 1982.
116. « Summary and Conclusions », in E.P.S. Study Conference, *Oscillations as a probe of the Sun's Interior*, Catania, 20-24 June, 1983.
117. « Solar oscillations », in *Bulletin astronomique*, vol. X, pp. 94-98, 1985.
118. Rapport sur le mémoire de M. J.-L. Hanquin, *Bull. Acad. Roy. Belg., Cl. Sci.*, **72**, 469-470, 1986.