

ACTUELLEMENT EN KIOSQUE



Dossier Pour la Science

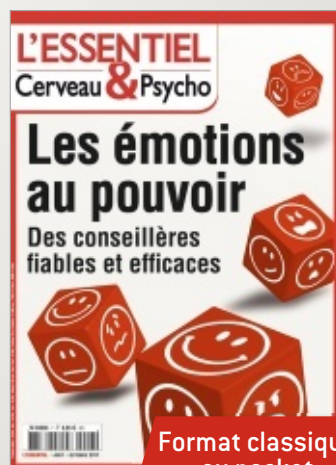
Découvrir la chimie qui régule les écosystèmes ou la vie autour des sources hydrothermales des abysses ; exploiter de façon raisonnée la richesse des fonds marins (microalgues, ressources minérales, méthane...) ; découvrir des médicaments nouveaux ; protéger les mers contre les marées noires ou les déchets plastiques... Aujourd'hui, la chimie est au centre d'une alliance durable entre les hommes et les océans.

Numéro 73, octobre-décembre 2011 – Prix : 6,95 €

L'Essentiel Cerveau & Psycho

Émotions sociales, émotions individuelles, neuropsychologie des émotions : les émotions ont une influence notable sur nos comportements et nos décisions. Dans ce nouveau numéro thématique, découvrez les émotions dans tous leurs états et apprenez pourquoi elles sont les alliées de la raison.

Numéro 7, août-octobre 2011 – Prix : 6,95 €



Cerveau & Psycho

Notre attention est-elle menacée ? Sollicitations de la publicité, des smartphones, des alertes e-mail au travail : il est de plus en plus difficile de rester concentré. Neurobiologistes et psychologues dévoilent les rouages de cette capacité.

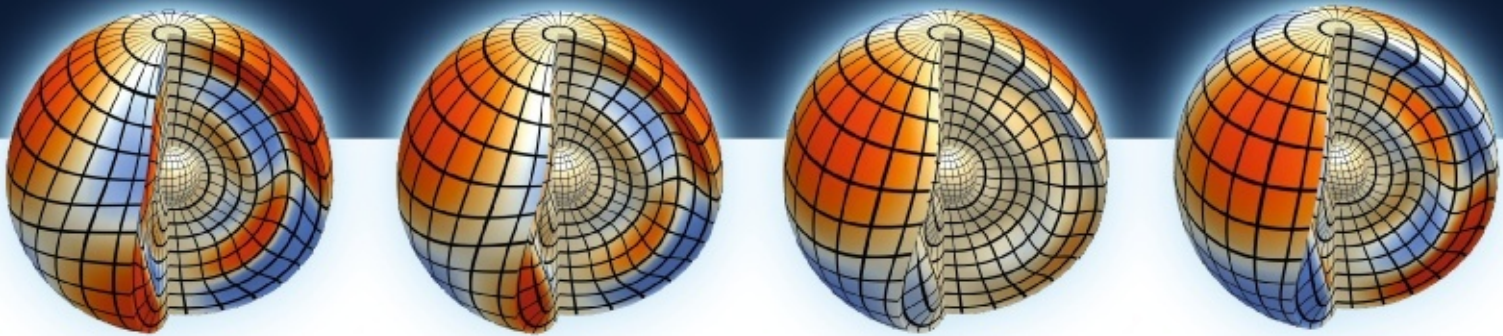
À lire aussi : les liens entre grands-parents et petits-enfants, des gaz dans le cerveau, et bien d'autres sujets.

Numéro 47, septembre-octobre 2011 – Prix : 6,95 €

Numéro 48 en vente dès le 15/11.

■ POUR LA
SCIENCE

L'astérosismologie :



L'observation, avec les satellites *CoRoT* et *Kepler*, des ondes sismiques qui agitent la surface des étoiles fait entrer la physique stellaire dans une nouvelle ère.

Éric Michel, Michel Auvergne et Annie Baglin

Cette cloison que vous projetez d'abattre est-elle pleine ou creuse ? D'expérience, vous savez qu'il suffit de taper à sa surface et d'écouter le son qui en résulte : s'il est sourd, étouffé, le mur est plein. Si en revanche le son est « clair », il y a tout à parier que la cloison n'est pas très dense.

Analyser le son que produit un objet pour déterminer sa structure interne est une technique couramment employée par de nombreux artisans, industriels et scientifiques. Les sismologues étudient par exemple la propagation des ondes acoustiques engendrées par les séismes pour sonder l'intérieur de la Terre : l'analyse des temps de parcours les renseigne sur les différentes couches traversées.

Il en est de même avec les étoiles. Loin d'être immobiles, elles vibrent en permanence en raison de divers processus qui agitent le gaz brûlant dans leurs entrailles. Les infimes oscillations visibles en surface offrent aux astronomes un aperçu de leur structure interne.

Si le principe de cette « sismologie stellaire », ou astérosismologie, est sim-

ple, sa mise en œuvre est un véritable défi, tant en termes d'observations que de modélisation théorique. Longtemps limité par les difficultés des observations au sol, le domaine connaît une révolution depuis le lancement du satellite franco-européen *CoRoT*, fin 2006, et du satellite américain *Kepler*, en 2009. Une avalanche de nouvelles observations d'une précision inédite apportent un éclairage nouveau sur des questions brûlantes de la physique stellaire.

De nouvelles observables

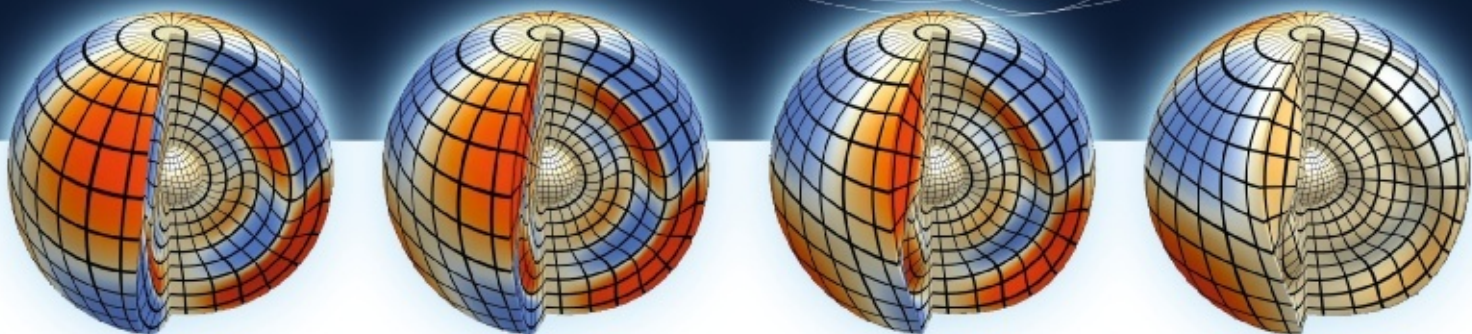
Car contrairement à ce que l'on pourrait penser, il reste beaucoup à apprendre de la physique des étoiles. En première approximation, une étoile est une boule de gaz très chaud, née de la contraction gravitationnelle d'un nuage de gaz et de poussière interstellaire. Lorsque le cœur est assez chaud et dense pour que s'y amorce la fusion nucléaire de l'hydrogène, la contraction s'arrête. Tant que cette source d'énergie perdure, l'étoile est en équilibre entre sa propre gravité et la pression interne.

Cette phase qui dure la majeure partie de sa vie est nommée séquence principale. Une fois l'hydrogène épuisé, l'étoile connaît ensuite successivement des phases de contraction puis de fusion d'autres éléments, avant de connaître une fin plus ou moins violente selon sa masse initiale.

Ce tableau fait déjà intervenir de nombreux processus physiques complexes : réactions nucléaires, interactions entre rayonnement et matière, propriétés thermodynamiques en conditions extrêmes, etc. Il est cependant loin d'être complet. De nombreux autres processus entrent en jeu : transport de l'énergie par le brassage convectif dans les couches proches de la surface, ségrégation des différents éléments chimiques au fil du temps sous l'effet de la gravité et du flux de rayonnement, mélange associé à la circulation à grande échelle induite par la rotation de l'étoile, influence d'un champ magnétique éventuel, etc. Ces phénomènes complexes à modéliser modifient la structure interne des étoiles, et par là, leur évolution.

Or notre compréhension actuelle des étoiles repose essentiellement sur des gran-

voir battre le cœur des étoiles



deux caractérisant leur surface. L'analyse spectroscopique de la lumière émise permet ainsi d'estimer la température, la composition chimique ou la gravité à la surface de l'étoile. Ces observations ont permis de comprendre les grandes lignes de la structure des étoiles et de leur évolution, mais elles apportent trop peu de renseignements sur ce qui se passe à l'intérieur. Pour mieux comprendre les étoiles, de nouvelles observables sont indispensables. C'est précisément ce qu'apporte l'astérosismologie.

Quand les étoiles résonnent

Un grand nombre d'étoiles, à commencer par le Soleil, vibrent. Ces oscillations, qui animent une étoile dans son ensemble, résultent de la propagation de deux types d'ondes à l'intérieur de l'astre. D'une part, des ondes de pression, similaires aux ondes sonores usuelles qui sont dues à la propagation d'une perturbation de la pression au sein du gaz. D'autre part, des ondes de gravité, équivalentes à celles créées par un caillou à la surface de l'eau; elles correspondent à la propagation d'une perturbation engendrée par un élément de volume qui oscille autour de sa position d'équilibre sous l'effet de la force d'Archimède.

Ces ondes traversent l'étoile à des vitesses qui dépendent des conditions locales de température, de densité ou de composition chimique. Elles sont réfléchies en

totalité ou en partie par la surface et par l'interface entre les différentes couches. À certaines fréquences bien définies, qui dépendent des vitesses de propagation, des dimensions et de la forme de l'étoile (qui peut notamment être aplatie par la rotation), ces ondes se superposent de façon que toute l'étoile vibre au même rythme. Une telle vibration constitue ce que l'on nomme un mode propre d'oscillation. Chaque mode propre correspond à une fréquence précise et à un type de déformation, où des régions de la surface et de l'intérieur de l'astre se contractent et se dilatent alternativement de façon périodique (voir l'encadré page 74). On parle de modes de pression (modes P) quand des ondes de pression sont en jeu, et de modes de gravité (modes G) lorsque des ondes de gravité sont impliquées. Certains modes résultant du couplage d'un mode P et d'un mode G sont dits mixtes. Comme un instrument de musique, les étoiles peuvent vibrer selon une superposition de ces fréquences fondamentales, ou modes propres.

Les modes propres sont une source d'information unique sur la structure interne d'une étoile. De même qu'un violon produit un son plus aigu qu'un violoncelle ou n'a pas le même timbre qu'une guitare, les modes propres dépendent de la structure de l'étoile: sa taille et sa forme, mais aussi la densité, la composition ou la vitesse de rotation de chaque couche influent sur les modes propres. Des modes distincts sont sensibles à différentes

1. SIMULATION D'UN MODE
de vibration propre d'une étoile
(sur quelques minutes
de gauche à droite).

L'ESSENTIEL

- ✓ Les étoiles vibrent en permanence sous l'effet des ondes sismiques qui les traversent.
- ✓ Les modes propres d'oscillation apportent des informations sur leur composition et leur structure interne.
- ✓ Leur observation depuis l'espace révolutionne l'étude sismique des étoiles.
- ✓ L'astérosismologie apporte ainsi une vue inédite sur le cœur, la convection ou encore le champ magnétique des étoiles.

Richard Townsend

régions et apportent ainsi des informations localisées sur l'intérieur stellaire. L'amplitude et la durée de ces modes propres découlent pour leur part des mécanismes d'excitation des oscillations et des énergies mises en jeu. Nous y reviendrons.

En théorie, il suffit ainsi de mesurer les oscillations d'une étoile, d'isoler par une analyse du signal les différents modes propres dans le spectre de fréquences obtenu, puis d'« inverser le problème » pour remonter à la structure interne de l'astre.

Plus facile à dire qu'à faire. Il faut déjà mesurer ces oscillations avec une précision suffisante. On comprend depuis le début du XX^e siècle comment les étoiles peuvent vibrer, et donc se contracter et se dilater localement. Ces fluctuations entraînent des variations de luminosité. En effet, les régions qui se contractent deviennent plus chaudes et plus brillantes, tandis que les régions qui se dilatent s'assombrissent en refroidissant.

En 1953, l'astronome russe Sergei Zhevakin proposa un mécanisme pour expli-

quer l'origine des vibrations stellaires : une petite oscillation fait varier localement la pression et la température du gaz, modifiant ainsi sa capacité à bloquer le flux lumineux (son opacité). Cette variation permet le transfert de l'énergie radiative à l'oscillation, qui ainsi va gagner en énergie et en amplitude au fil des cycles. Ce mécanisme dit d'opacité explique aujourd'hui un grand nombre d'étoiles pulsantes connues.

Au cœur du Soleil

Et le Soleil ? Ce n'est qu'en 1962 que ses oscillations ont été mises en évidence. Et pour cause : la variation de luminosité correspondante, de l'ordre d'un millionième, est 10 000 fois plus faible que celle des étoiles pulsantes observées à l'époque. La période caractéristique des oscillations solaires est de l'ordre de cinq minutes.

On s'est vite rendu compte que les oscillations solaires ne résultent pas d'un mécanisme d'opacité, mais de la convec-

tion. Les mouvements du gaz dans la couche convective engendrent un bruit de fond acoustique qui couvre une large gamme de fréquences. Ces oscillations aléatoires (ou stochastiques) interfèrent de façon tantôt constructive, tantôt destructive, et ont dans l'ensemble un effet nul, excepté celles dont la fréquence est proche de celle d'un mode propre, qui entrent alors en résonance. L'oscillation puise alors de l'énergie dans la convection pour gagner en amplitude.

Depuis lors, des milliers de modes propres du Soleil ont été mesurés (notamment par le satellite SOHO). Ils ont dévoilé des détails insoupçonnés de sa structure interne. On a par exemple pu établir la vitesse de rotation en fonction de la profondeur et de la latitude, ce qui a mis en évidence que la rotation différentielle visible en surface – la période de rotation est de 24 jours à l'équateur et de 31 jours à 75 degrés de latitude – se poursuit en profondeur jusqu'à la base de la zone convective, où elle laisse brutalement place à une

COMMENT LES ÉTOILES VIBRENT

Comme une corde de violon ou la surface d'un tambour, les étoiles peuvent vibrer selon toute une gamme d'oscillations élémentaires, ou modes propres.

Chaque mode est caractérisé par une fréquence et un type de déformation. Dans le cas d'une étoile, qui est un objet sphérique, la déformation la plus simple est le mode radial fondamental : toute l'étoile se dilate puis se contracte de façon périodique (seul le centre reste fixe). À une fréquence supérieure, il existe un second mode radial : le cœur se contracte pendant que l'enveloppe se dilate et inversement. Plus « l'ordre radial » d'un mode est élevé, plus le nombre de couches qui se dilatent et se contractent alternativement est élevé. L'étoile peut également vibrer suivant des modes non radiaux,

qui ne respectent pas la symétrie sphérique. Par exemple, les pôles peuvent se dilater tandis que l'équateur se contracte.

Plus le degré d'un mode est élevé, plus la surface se décompose en zones qui se dilatent et se contractent alternativement, séparées par des lignes qui restent immobiles, les « lignes nodales ».

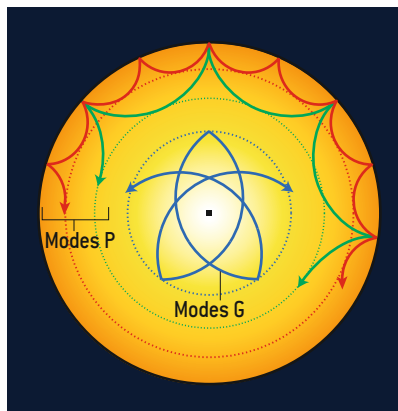
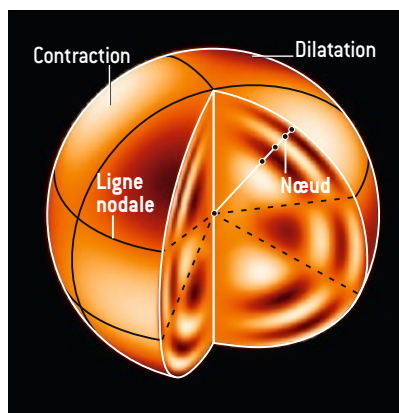
Un mode propre général est ainsi déterminé par un motif spécifique de déformation en trois dimensions, qui combine une déformation radiale et une déformation non radiale. Il est caractérisé par trois nombres : l'ordre radial n , l'ordre azimutal m et le degré l (voir ci-dessous).

Pour un mode de degré élevé, les déformations se compensent d'une région à l'autre de la surface (l'une se contracte pendant que

l'autre se dilate), de sorte que la variation de luminosité globale résultante est faible. De fait, dans des étoiles autres que le Soleil, seuls les modes de degré inférieur à quatre ont été mis en évidence.

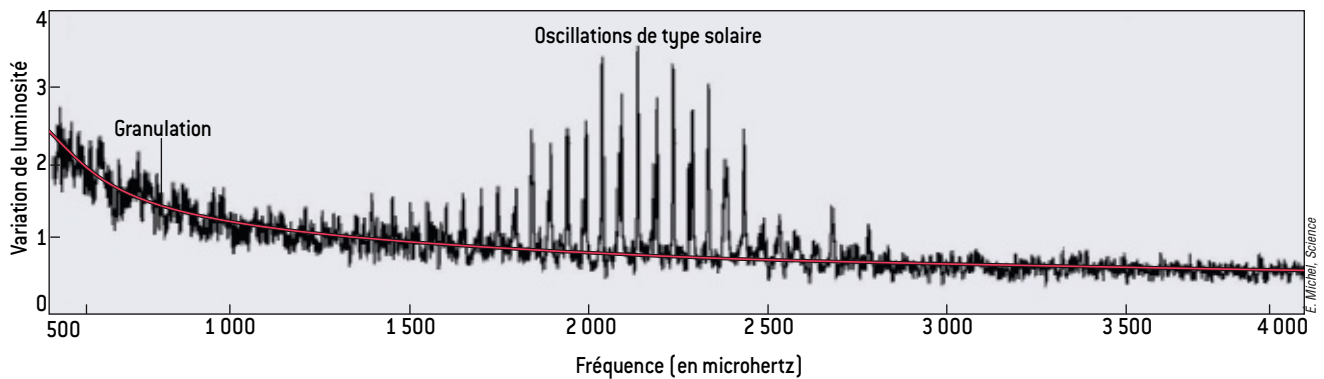
Les modes que peut exprimer une étoile ne dépendent que de sa structure interne et de sa géométrie, et non du mécanisme d'excitation initial de l'oscillation. Ce dernier n'influe que sur l'amplitude des modes effectivement exprimés.

Différents modes sont sensibles à différentes régions de l'étoile. Les modes de pression de haut degré sont par exemple confinés près de la surface de l'étoile, tandis que les modes de bas degré se propagent à travers presque toute l'étoile. Les modes de gravité, quant à eux, sont plus sensibles au cœur de l'étoile.



À gauche, une représentation du mode de vibration $l = 4, m = 2, n = 5$. Les différentes régions de l'étoile se dilatent (*en foncé*) et se contractent (*en clair*) alternativement. Le degré l est le nombre de méridiens et parallèles laissés fixes par l'oscillation, ou lignes nodales (*en noir*). L'ordre azimutal m est le nombre de méridiens nodaux. Enfin, l'ordre radial n indique le nombre de nœuds le long d'un rayon (*points noirs*). À droite, les trajectoires des ondes associées aux modes de pression (*mode P en rouge et en vert*), qui mettent en jeu la surface et l'enveloppe de l'étoile jusqu'à des profondeurs variables, et des modes de gravité (*mode G en bleu*), plus sensibles aux régions centrales.

Éric Michel/PLS



2. LE SPECTRE DE FRÉQUENCE DE L'ÉTOILE PULSANTE de type solaire HD 52265 (1,2 masse solaire) observée avec CoRoT. On distingue la structure en peigne caractéristique des oscillations de type solaire. L'espace-
 cement caractéristique, nommé grande séparation, est proportionnel à la densité moyenne de l'étoile. On visualise également la composante associée à la granulation (la courbe rouge).

rotation d'ensemble au-delà d'une couche très mince, nommée depuis tachoclyne.

Le profil de température du Soleil en fonction de la profondeur a aussi été déterminé (la température varie de 5800 kelvins en surface à près de 15 millions de kelvins dans le cœur). Ce résultat a joué un rôle fondamental dans la physique des neutrinos, ces particules presque dénuées de masse émises lors des réactions nucléaires. Au début des années 1990, on mesurait moins de neutrinos d'origine solaire que prévu. Selon l'une des explications avancées, la température au centre du Soleil était surestimée par les modèles. La détermination de la température par sismologie a écarté cette hypothèse, et conduit à établir que les neutrinos peuvent « osciller », c'est-à-dire changer périodiquement de type (on en connaît trois).

100 000 étoiles en un coup d'œil

La sismologie a donc fait la preuve de son efficacité pour explorer l'intérieur du Soleil et tester des hypothèses de physique fondamentale. Qu'en est-il des autres étoiles ? Après la découverte des oscillations solaires, une chasse aux oscillations dans les étoiles de masse voisine, supposées avoir une couche convective assez épaisse pour engendrer des oscillations similaires, s'est enclenchée. Il a cependant fallu attendre 1999 pour qu'une équipe du Service d'aéronomie et de l'Observatoire de Paris détecte de façon indiscutable des oscillations de type solaire dans une autre étoile, Procyon.

Ce résultat a été obtenu par la mesure spectroscopique des « vitesses radiales ». Sous l'effet des oscillations, la surface de l'étoile s'avance et s'éloigne légèrement de

l'observateur, ce qui entraîne, par effet Doppler, un décalage des raies caractéristiques du spectre lumineux de l'étoile. Cette méthode, également bien connue des chasseurs d'exoplanètes, a permis de détecter des oscillations de type solaire dans une dizaine d'étoiles. Elle est néanmoins limitée aux étoiles très brillantes et souffre du manque de continuité et de la durée limitée des observations au sol.

La sismologie stellaire devait donc se tourner vers l'espace. C'est pourquoi le projet CoRoT, conduit par le CNES (Centre national d'études spatiales), a été imaginé. CoRoT s'appuie sur la mesure ultraprécise de la luminosité des étoiles, ou photométrie. Il s'agit de mesurer les variations de luminosité, qui découlent de l'oscillation de leur surface *via* des variations de température.

Lancé en 2006, CoRoT a déjà mesuré les variations de luminosité de 125 étoiles assez brillantes avec une précision de l'ordre d'une partie par million et une résolution temporelle de l'ordre de la seconde. Dans le même temps, plus de 130 000 étoiles plus faibles ont été observées avec une précision et une résolution temporelle moindres. Toutes ces étoiles ont été observées de façon continue pendant un à cinq mois.

En mars 2009, le télescope spatial américain *Kepler* est à son tour entré en service. Initialement dédié à la recherche d'exoplanètes par photométrie, *Kepler* s'est révélé être un formidable outil pour l'astérosismologie : il va observer plus de 100 000 étoiles durant au moins cinq ans.

Les résultats déjà obtenus par CoRoT et *Kepler* dépassent toutes les espérances. En réduisant le bruit de deux à trois ordres de grandeur par rapport aux observations existantes, CoRoT et *Kepler* permettent d'étudier pour la première fois des phé-

nomènes très faibles regroupés sous le terme de « microvariabilité », telles les oscillations de type solaire, les taches stellaires ou la granulation. Les observations sont encore en cours, mais les premiers résultats sont déjà exceptionnels.

Les géantes rouges mises à nu

L'un des premiers succès de l'astérosismologie spatiale concerne les géantes rouges, des étoiles de type solaire qui ont épuisé l'hydrogène disponible dans leur cœur, et qui voient leur enveloppe se dilater et se refroidir jusqu'à occuper un rayon pouvant atteindre une centaine de fois celui du Soleil.

On connaissait moins d'une dizaine de cas d'oscillations dans les géantes rouges. Dès la première séquence d'observation de cinq mois, CoRoT en a découvert plus de 700. Un bond quantitatif accompagné d'un saut qualitatif en termes de précision, de durée et de continuité des observations. CoRoT, puis *Kepler*, ont depuis mesuré les spectres d'oscillations de milliers de géantes rouges.

Comme l'ont montré Joris de Ridder, de l'Université catholique de Louvain en Belgique, et Benoît Mosser, de l'Observatoire de Paris, et leurs collègues, ces spectres se révèlent dominés par les modes de pression. Ceux-ci suivent une répartition selon leur fréquence très similaire à celle des modes solaires, mais à des fréquences plus basses (quelques microhertz à quelques centaines de microhertz). Comme pour le Soleil, la structure du spectre caractérise l'enveloppe de l'étoile, dominée par une profonde zone convective. En combinant cette information à la température de surface, Thomas Kallinger, de

l'Université de Vienne, et ses collègues ont réussi à estimer pour la première fois le rayon d'étoiles géantes rouges, mais aussi leur masse, avec une précision de quelques pour cent.

Comme l'ont montré Andréa Miglio, de l'Université de Liège, en Belgique, et ses collègues, cette caractérisation sismique des géantes rouges permet de comparer la distribution en masse et rayon d'une population d'étoiles observée avec celle attendue théoriquement. Les premiers résultats montrent que la distribution de l'échantillon observé par CoRoT est davantage compatible avec une formation régulière d'étoiles dans la région ciblée qu'avec des épisodes récents de flambée de formation stellaire.

Au-delà des modes de pression, les spectres d'oscillation des géantes rouges ont aussi confirmé l'existence, non démontrée jusqu'alors, de modes mixtes dans ces objets. La régularité avec laquelle ces modes sont distribués selon leur période, mise en évidence dans les

données de *Kepler* par Paul Beck, de l'Université catholique de Louvain, en Belgique, et ses collègues, caractérise le cœur et l'état évolutif des géantes rouges.

Les cœurs mélangés

Il était jusqu'ici très difficile de distinguer une étoile géante rouge, brûlant de l'hydrogène « en couche » à la périphérie du cœur désormais composé d'hélium, d'une étoile plus évoluée, où la fusion de l'hélium s'est amorcée (phase appelée « branche horizontale des géantes »). Ces deux types d'étoiles peuvent en effet paraître identiques en termes de température de surface, de rayon ou de luminosité.

Tim Bedding, de l'Université de Sydney, en Australie, et ses collègues ont montré que dans les étoiles présentant un espacement régulier de 50 à 60 secondes entre les périodes des modes mixtes successifs, l'hydrogène en couche est en phase de fusion, tandis que dans celles montrant des périodes espacées

de 100 à 300 secondes, c'est l'hélium qui est en fusion.

En utilisant cette signature sismique, A. Miglio et ses collègues ont pu estimer la perte de masse qui accompagne l'allumage des réactions de fusion de l'hélium dans les géantes rouges. Leurs résultats penchent pour une perte modérée, et ils nous renseignent sur l'enrichissement du milieu interstellaire.

Autre question ouverte sur laquelle l'astérosismologie a jeté un éclairage nouveau, celle de l'« extension des cœurs mélangés ». Toutes les étoiles de la séquence principale plus massives que le Soleil ont un cœur convectif, où le mélange est rapide. La taille de ce cœur mélangé détermine la quantité d'hydrogène disponible pour les réactions nucléaires.

Or l'incertitude sur la localisation de cette limite dans les modèles fondés sur les observables de surface classiques entraîne une incertitude de plus de 20 pour cent sur la quantité d'hydrogène disponible et sur l'estimation de l'âge de ces étoiles.

COROT : SCRUTER LES VARIATIONS D'ÉCLAT DES ÉTOILES

Également connu comme chasseur d'exoplanètes, le satellite CoRoT (pour *Convection, Rotation, Transit*), conçu et mis en œuvre par le CNES (Centre national d'études spatiales), en collaboration avec l'Agence spatiale européenne (ESA), l'Autriche, la Belgique, le Brésil, l'Allemagne et l'Espagne, est destiné à l'étude des oscillations stellaires par photométrie (mesure des variations de luminosité). Il a été lancé le 26 décembre 2006.

CoRoT a été conçu autour de trois contraintes : stabilité, durée et conti-

nuité des observations. La surface collectrice du télescope, de 27 centimètres de diamètre, est protégée de la lumière réfléchie par la Terre grâce à un cache très performant (moins d'un photon sur 10^{12} le franchit). La température des instruments est contrôlée au centième de degré près, et le pointage est si précis que les images des étoiles sur les capteurs ne bougent pas de plus d'un dixième de pixel (soit 0,2 seconde d'arc).

La moitié des capteurs (soit un champ de quatre degrés carrés sur le ciel) a été conçue pour observer

en détail dix étoiles assez brillantes (magnitudes 5,4 à 9,5) avec une résolution temporelle de une seconde. Ce champ est optimisé pour l'observation d'oscillations stellaires de très faible amplitude. Le bruit de fond obtenu au terme de cinq jours d'observations cumulées atteint 0,6 partie par million.

L'autre moitié des capteurs est optimisée pour la recherche de transits planétaires. Ce champ a été conçu pour observer jusqu'à 12 000 étoiles faibles, avec un échantillonnage de 512 secondes, ou 32 secondes pour 1 000 d'entre elles. Les courbes de lumière obtenues, avec un bruit de fond de l'ordre de dix parties par million, permettent de détecter des oscillations stellaires de grande amplitude sur de vastes échantillons.

Au printemps 2009, l'impact d'une particule cosmique de haute énergie a endommagé partiellement l'ordinateur de bord et a divisé par deux le nombre d'étoiles observées dans chaque champ.

L'orbite polaire à 896 kilomètres d'altitude a été choisie pour permettre à CoRoT d'observer la même région du ciel « en tour-

nant le dos » au Soleil pendant presque six mois. Une manœuvre de retournement est ensuite effectuée pour observer la direction opposée.

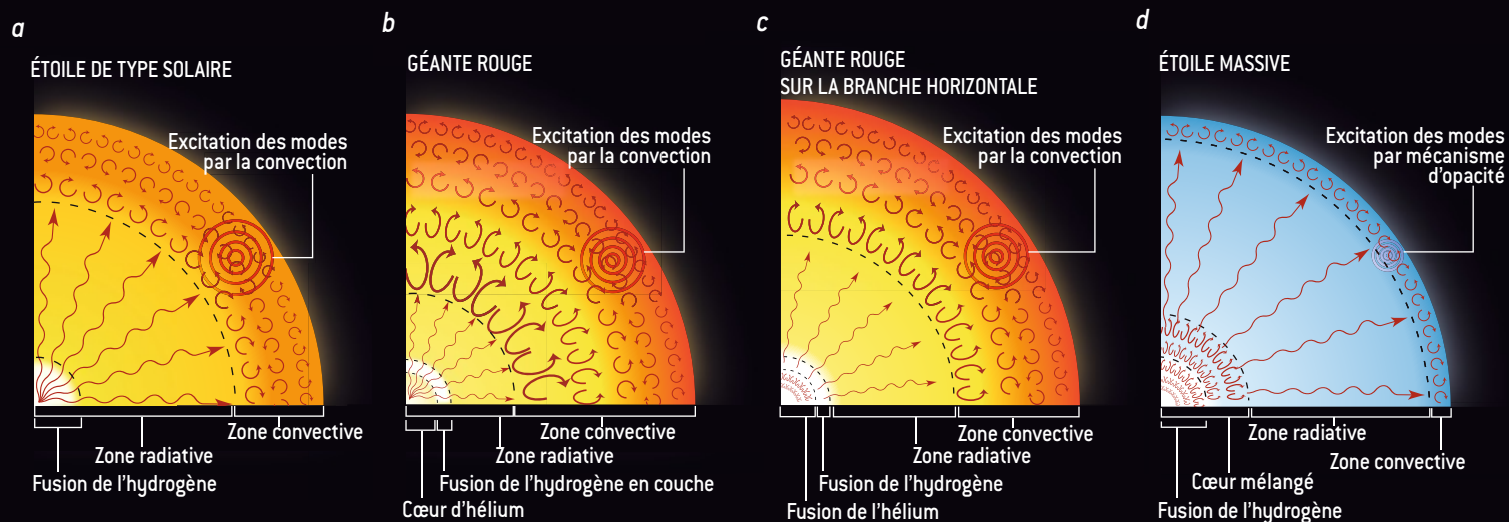
Cette continuité est cruciale, car les interruptions dans l'observation engendrent des artefacts dans les spectres de fréquences. CoRoT peut ainsi atteindre une précision en fréquence de l'ordre de 0,1 microhertz, hors de portée des observations au sol.

En 2009, le satellite *Kepler* de la NASA s'est ajouté à CoRoT pour la traque d'exoplanètes en transit et l'observation des oscillations stellaires. Avec un miroir primaire de 95 centimètres, il observe un champ de 105 degrés carrés dans la constellation du Cygne et de la Lyre.

À la différence de CoRoT, *Kepler* est placé sur une orbite héliocentrique voisine de l'orbite terrestre, ce qui lui permet, en pointant dans une direction perpendiculaire au plan de son orbite, d'observer les mêmes étoiles pendant plusieurs années sans être gêné ni par le Soleil ni par la Terre. *Kepler* observe ainsi simultanément environ 100 000 étoiles dont les magnitudes sont comprises entre 9 et 15.



© CNES-Mai 2004/illus. D. Duron



3. SELON LEUR MASSE ET LEUR STADE ÉVOLUTIF, les étoiles ont des structures différentes. Sur la « séquence principale », les étoiles plus massives que le Soleil (*d*) sont pour l'essentiel radiatives, avec un cœur convectif. Les étoiles semblables au Soleil (*a*) sont convectives en surface

et radiatives au cœur. Une fois épuisé l'hydrogène de ce dernier, elles se dilatent et refroidissent, devenant des géantes rouges (*b*), largement convectives. Lorsque la fusion de l'hélium prend le relais (*c*), l'étoile connaît une nouvelle phase de stabilité, la « branche horizontale des géantes ».

Peter Degroote, de l'Université catholique de Leuven, aux Pays-Bas, et ses collègues ont mis en évidence des modes de gravité dans le spectre de l'étoile de sept masses solaires HD50230, observée par CoRoT. La distribution de leurs périodes révèle un très léger décalage autour d'un espacement régulier. Ce décalage est caractéristique d'une zone de variation rapide de la densité en fonction du rayon (cette variation modifie la vitesse de propagation des ondes). Il permet notamment de localiser avec précision la limite du cœur mélangé, où la composition varie de façon brusque. Ces données ont ainsi mis en évidence que le cœur mélangé de HD50230 est au moins 25 pour cent plus massif que la valeur prédite par les modèles usuels. Elles suggèrent aussi une variation relativement douce de la composition en bordure de celui-ci.

Cette valeur élevée, au moins égale au maximum envisagé jusqu'à présent, se traduit, pour une étoile de sept masses solaires telle HD50230, par une durée de vie dans la séquence principale au moins 20 pour cent plus longue qu'attendu (supérieure à 44 millions d'années au lieu de 37).

La modélisation d'autres étoiles pulsantes de 1,2 à 4 masses solaires par d'autres équipes suggère également une forte extension du cœur mélangé. En revanche, la modélisation par Sébastien Deheuvels, de l'Observatoire de Paris, d'une étoile de 1,3 masse solaire commençant à brûler de

l'hydrogène en couche suggère une extension modérée ou très faible du cœur mélangé. Ces résultats ne sont pas nécessairement contradictoires. L'extension du cœur mélangé nécessite sans doute une description plus élaborée, qui dépend de la masse de l'étoile, de son âge et peut-être de sa vitesse de rotation. Les résultats sismiques obtenus pour un nombre croissant d'étoiles permettront de préciser cette question.

La zone convective sous tous les angles

Le transport d'énergie par la convection est un autre sujet central de la physique stellaire. L'épaisseur de la zone convective est considérable dans les étoiles froides : elle représente près d'un tiers du rayon du Soleil, et la quasi-totalité de celui des géantes rouges. Plus petite dans les étoiles chaudes, elle reste néanmoins le lieu où les divers types d'oscillations puisent leur énergie et où est engendré le champ magnétique. Or le transport de la chaleur dans la zone convective est mal décrit, surtout dans les régions peu denses proches de la surface. Même dans le cas du Soleil, cette région reste en fait l'une des plus mal connues. Les observations de CoRoT et *Kepler* permettent d'aborder la question sous plusieurs angles.

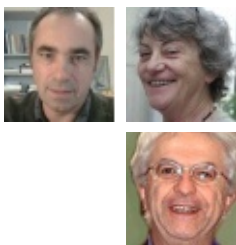
Comme évoqué précédemment, le décalage dans la distribution en fréquence

des modes permet de localiser directement des motifs structuraux. Anwesh Mazumdar, du Centre *Homi Bhabha* à Bombay, en Inde, et l'un d'entre nous (Éric Michel) ont appliqué cette technique à l'étoile HD49933, observée par CoRoT. Ils ont estimé la profondeur de la « zone de seconde ionisation de l'hélium » (la région où, sous l'effet de la température, l'hélium voit ses deux électrons arrachés) avec une incertitude d'à peine dix pour cent (cette profondeur correspond à 1,7 pour cent du rayon).

La même analyse a aussi livré la profondeur de la base de la zone convective, mais ce dernier résultat semble à la limite de la précision des observations. De façon similaire, la zone de seconde ionisation de l'hélium a été localisée à sept pour cent près dans l'étoile géante rouge HR7349 par A. Miglio et des collègues. C'est la première fois qu'une telle analyse est faite sur des étoiles autres que le Soleil. L'astérosismologie apporte ainsi des mesures directes de ces interfaces, qui jouent un rôle essentiel dans les modèles stellaires.

La zone convective a également été étudiée *via* le profil des modes propres de type solaire. Si la fréquence des modes découle de la structure de l'étoile, leur amplitude et leur durée de vie dépendent des phénomènes énergétiques. La durée de vie d'un mode de type solaire est ainsi dictée par le couplage entre la convection et l'oscillation, tandis que son

LES AUTEURS



Éric MICHEL est astronome au Laboratoire d'études spatiales et d'instrumentation en astrophysique (LESIA) de l'Observatoire de Paris, et responsable du programme de sismologie stellaire du projet CoRoT.

Annie BAGLIN est directrice de recherche du CNRS au LESIA et responsable scientifique principal du projet CoRoT.

Michel AUVERGNE est directeur de recherche du CNRS au LESIA et responsable scientifique de l'instrumentation du projet CoRoT.

✓ BIBLIOGRAPHIE

S. Deheuvels *et al.*, Constraints on the structure of the core of subgiants via mixed modes : the case of HD49385, *Astronomy & Astrophysics*, à paraître.

T. Bedding *et al.*, Gravity modes as a way to distinguish between hydrogen- and helium-burning red giant stars, *Nature*, vol. 471, pp. 608-611, 2011.

B. Mosser *et al.*, The universal red-giant oscillation pattern, *Astronomy & Astrophysics*, vol. 525, L9, 2011.

P. Degroote *et al.*, Deviations from a uniform period spacing of gravity modes in a massive star, *Nature*, vol. 464, pp. 259-261, 2010.

R. Samadi *et al.*, The CoRoT target HD 49933. II. Comparison of theoretical mode amplitudes with observations, *Astronomy & Astrophysics*, vol. 509, L16, 2010.

R. A. Garcia *et al.*, CoRoT reveals a magnetic activity cycle in a Sun-like star, *Science*, vol. 329, p. 1032, 2010.

A. Miglio *et al.*, Probing populations of red giants in the galactic disk with CoRoT, *Astronomy & Astrophysics*, vol. 503, L21, 2009.

amplitude résulte du bilan énergétique entre l'amortissement et l'excitation par la pression de convection.

Les premières mesures effectuées sur les étoiles HD49933, HD181420 et HD181906, plus chaudes que le Soleil (6300 à 6800 kelvins en surface), ont confirmé que l'amplitude des modes augmente avec la température. Elle est environ 1,5 fois supérieure à celle observée pour le Soleil, soit 25 pour cent de moins que ne le préoyaient les modèles.

Cette différence peut être en partie expliquée par la teneur en éléments plus lourds que l'hélium (la « métallicité ») de ces étoiles. Par ailleurs, la largeur des modes – inversement proportionnelle à leur durée de vie – est trois fois plus grande que celle estimée, écart qui reste à expliquer. Ces résultats nous renseignent sur la distribution des vitesses caractéristiques de la convection et apportent des tests pour les modélisations numériques en trois dimensions.

L'activité magnétique dévoilée par sismologie

Ce travail est actuellement étendu aux étoiles géantes rouges. Les modélisations les plus avancées sous-estiment l'amplitude des modes observés d'un facteur trois, comme le montrent les travaux de Reza Samadi, de l'Observatoire de Paris, et ses collègues. C'est le signe que les échanges d'énergie entre les oscillations et les couches superficielles de l'étoile doivent encore être précisés.

Les petites cellules brillantes séparées par des parois plus sombres qui tapissent la surface du Soleil, ou granules, sont une autre manifestation de la convection. Les dimensions et la durée de vie des granules sont liées à des grandeurs caractéristiques du processus convectif. Les données de CoRoT nous ont permis, avec nos collègues, de mesurer pour la première fois le spectre de la granulation dans différentes étoiles. Pour les étoiles de classe F, plus chaudes que le Soleil, les granules se révèlent être trois fois plus grands que ceux du Soleil, et leur durée de vie 30 pour cent plus élevée. Les simulations, qui reproduisent bien ces phénomènes dans le cas du Soleil, échouent pour l'instant à reproduire la granulation de ces étoiles.

L'astérosismologie apporte également un regard neuf sur l'activité magnétique des étoiles. Le champ magnétique est un ingrédient encore très mal connu de la physique stellaire. Depuis quelques années, une nouvelle génération de spectromètres (ou spectropolarimètres) permet d'établir des cartographies de plus en plus précises du champ magnétique à la surface des étoiles. Les données de CoRoT ont pour leur part mis en évidence pour la première fois en 2010 les variations de fréquence et d'amplitude des oscillations induites par un cycle d'activité magnétique dans une autre étoile de type solaire, HD49933. Raphael Garcia, du Service d'astrophysique du CEA, à Saclay, et ses collègues ont constaté en particulier que l'amplitude des modes décroît lorsque leur fréquence augmente, de la même façon que pour le Soleil au cours de son cycle magnétique. Ces variations résulteraient de l'évolution de l'activité magnétique de l'étoile, qui modifie sa structure. Le cycle magnétique de cette étoile 20 pour cent plus massive que le Soleil serait ainsi de 120 jours, contre 11 ans pour le Soleil. La rotation, huit fois plus rapide que celle du Soleil, pourrait être à l'origine de cette différence.

Alors que la mission CoRoT a été prolongée jusqu'en 2013, l'échantillon d'étoiles observé couvre une large gamme de masses et de stades évolutifs, des étoiles comparables au Soleil jusqu'à d'autres 40 fois plus massives, et des étoiles de moins de un million d'années à plus de dix milliards d'années, comme certaines géantes rouges. Les données livrées par *Kepler* depuis 2009 sont en train d'élargir cet échantillon de façon spectaculaire et donneront accès à des durées d'observation de plusieurs années, hors de portée de CoRoT.

D'autres projets sont en préparation, tel BRITTE, une flottille de nanosatellites dédiée à la photométrie des étoiles les plus brillantes (le lancement des deux premiers est prévu en 2012), ou PLATO, en cours d'évaluation par l'Agence spatiale européenne, qui propose d'étudier les systèmes stellaires dans leur ensemble, en réalisant l'étude sismique des étoiles autour desquelles il aura détecté des planètes.

La moisson de résultats récents confirme d'ores et déjà que l'astérosismologie apporte bien le regard nouveau sur la physique stellaire que les astrophysiciens attendaient. Gageons que les années à venir seront tout aussi riches en découvertes, sinon plus!



ÉDITIONS JACQUES GABAY

151 bis, rue Saint-Jacques - 75005 Paris (France)
Tél. : +33 (0)1 43 54 64 64 - Fax : +33 (0)1 43 54 87 00
E-mail : infos@gabay.com

www.gabay.com

TARIF 2012

ACADÉMIE FRANÇAISE
GRAND PRIX DU RAYONNEMENT
DE LA LANGUE FRANÇAISE
JACQUES GABAY
MÉDAILLE DE VERMEIL



Louis BACHELIER
1870-1946



Émile BOREL
1871-1956



Élie CARTAN
1869-1951

Préfixe ISBN
978-2-87647

- 073-6 ABEL : Œuvres complètes
+ BJERKNES : Abel. Sa vie et son action scientifique
(2 titres en 2 vol.) 167 €
- 064-4 d'ALEMBERT : Traité de Dynamique 39 €
- 336-2 N d'ALEMBERT : Traité de l'équilibre et du mouvement des fluides. 82 €
- 068-2 AMPÈRE : Théorie mathématique des phénomènes
électro-dynamiques. 35 €
- 326-3 AMPÈRE : Considérations sur la théorie mathématique du jeu. 25 €
- 310-2 N ANDRADE : Leçons de Mécanique physique. 72 €
- 010-1 o APPELL : Traité de Mécanique rationnelle (6 vol. en 3) 197 €
- 089-7 ARTIN : Algèbre géométrique 35 €
- 129-0 BACHELIER : Théorie de la spéculation
+ Théorie mathématique du jeu (2 titres en 1 vol.) 27 €
- 090-3 BACHELIER : Calcul des probabilités 74 €
- 147-4 BACHELIER : Le jeu, la chance et le hasard 34 €
- 124-5 BAIRE : Leçons sur les fonctions discontinues 17 €
- 099-6 BAIRE : Théorie des nombres irrationnels,
des limites et de la continuité 13 €
- 228-0 BALL : Histoire des mathématiques (2 vol.) 116 €
- 140-5 o BALL : Récréations mathématiques (3 vol. en 1) 93 €
- 148-1 o BANACH : Théorie des opérations linéaires 30 €
- 067-5 BARBARIN : La géométrie non euclidienne 28 €
- 040-8 BAUER : Théorie des groupes et ses applications
à la physique quantique 28 €
- 279-2 BECKER : Théorie des électrons 69 €
- 331-7 N BERNOULLI Jacques : L'Art de conjecturer, Partie I
contient
HUYGENS : Traité de la manière de raisonner
dans les jeux de hasard 40 €
- 128-3 BERTRAND : Calcul des probabilités 60 €
- 290-7 BERTRAND : Traité de calcul différentiel et de calcul intégral
(2 vol.) 195 €
- 153-5 BOHR : La théorie atomique et la description
des phénomènes 21 €
- 044-6 o BOLL : La chance et les jeux de hasard 37 €
- 004-0 BOLTZMANN : Leçons sur la théorie des gaz (2 vol. en 1) ... 49 €
- 086-6 BOREL : Leçons sur la théorie des fonctions 54 €
- 009-5 BOREL : Leçons sur les séries divergentes 32 €
- 340-9 BOREL : Valeur pratique et philosophie des probabilités 39 €
- 337-9 BOREL - CHÉRON : Théorie mathématique du bridge 69 €
- 339-3 BOREL - VILLE : Applications de la théorie des probabilités
aux jeux de hasard. 33 €
- 149-8 o BOREVITCH - CHAFAREVITCH : Théorie des nombres 50 €
- 230-3 BORN : La Théorie de la Relativité d'Einstein
et ses bases physiques 60 €

N = Nouveauté

- 084-2 o BOUTROUX : L'idéal scientifique des mathématiciens 34 €
- 317-1 N BOUTROUX : Les principes de l'analyse mathématique
(2 vol.) 164 €
- 150-4 o BRAHY : Exercices méthodiques de calcul différentiel
et intégral (2 vol. en 1) 58 €
- 003-3 BRILLOUIN : Les tenseurs en mécanique et en élasticité 37 €
- 036-1 BRILLOUIN : La science et la théorie de l'information 38 €
- 229-7 de BROGLIE : Éléments de théorie des quanta
et de mécanique ondulatoire 54 €
- 041-5 de BROGLIE : Ondes et mouvements 24 €
- 062-0 CANTOR : Sur les fondements de la théorie des ensembles
transfinis 24 €
- 284-6 CARNOT Lazare : Réflexions sur la métaphysique
du calcul infinitésimal 45 €
- 069-9 CARNOT Sadi : Réflexions sur la puissance motrice du feu .. 25 €
- 008-8 CARTAN : Leçons sur la géométrie des espaces de Riemann .. 60 €
- 015-6 o CARTAN : Leçons sur la géométrie projective complexe
+ La théorie des groupes finis et continus
et la géométrie différentielle
+ Leçons sur la théorie des espaces à connexion projective
(3 titres en 1 vol.) 69 €
- 289-1 CATALAN : Traité élémentaire des séries 36 €
- 319-5 N CATALAN : Mélanges mathématiques (3 vol.) 180 €
- 053-8 CAUCHY : Analyse algébrique 68 €
- 057-6 CHASLES : Aperçu historique des méthodes en géométrie ... 68 €
- 058-3 CHASLES : La dualité et l'homographie 42 €
- 257-0 CHASLES : Traité de Géométrie supérieure 96 €
- 282-2 CHASLES : Traité des sections coniques 78 €
- 258-7 CHASLES : Les trois livres de Porismes d'Euclide 63 €
- 259-4 CHASLES : Rapport sur les Progrès de la Géométrie 69 €
- 260-0 CHAZY : La Théorie de la Relativité et la Mécanique céleste
(2 vol.) 99 €
- 273-0 CLAIRAUT : Éléments de géométrie 54 €
- 283-9 CLAPEYRON : Mémoire sur la puissance motrice
de la chaleur 18 €
- 079-8 o CLAUDIUS : Théorie mécanique de la chaleur (2 vol. en 1) .. 53 €
- COMMISSAIRE - CAGNAC : Cours de Mathématiques
Spéciales
- 201-3 t. I, Éléments d'algèbre et de géométrie analytique 72 €
- 202-0 t. II, Éléments d'analyse. Applications géométriques 58 €
- 203-7 t. III, Calcul intégral. Courbes et surfaces du second ordre ... 71 €
- 081-1 CORIOLIS : Théorie mathématique des effets du jeu de billard
+ Sur le principe des forces vives dans les mouvements relatifs
des machines
+ Sur les équations du mouvement relatif des systèmes
de corps (3 titres en 1 vol.) 60 €

o = oblong