



7. LES GORFOUS SAUTEURS (a), les albatros à bec jaune (b), les manchots royaux (c), les otaries à fourrure (d) et les éléphants de mer (e) dont on étudie le comportement alimentaire, sont également des auxiliaires océanographiques pour l'analyse des caractéristiques physiques et biologiques de l'océan Austral.

qui sont des prédateurs visuels, se nourrissent pendant la journée aux dépens de poissons regroupés en bancs serrés en profondeur, alors que les otaries femelles, plus aptes à voir la nuit et munies de vibrisses sensorielles, plongent exclusivement la nuit à de faibles profondeurs, où elles capturent les poissons qui migrent en surface pour se nourrir dès la nuit tombée.

Nous avons également reliés les techniques de pêche des prédateurs avec des paramètres d'océanographie physique, telles la bathymétrie et les températures de surface, et des paramètres biologiques, telles les données satellitaires de chlorophylle de surface et la répartition spatiale des myctophidés : nous avons ainsi déterminé les zones préférentielles d'alimentation des oiseaux et des otaries (voir la figure 5). Ces études nous renseignent sur la plasticité écologique des prédateurs selon les variations de leur environnement.

L'alliance de l'écologie et de l'électronique progressera encore dans les années à venir ; elle dépasse déjà l'étude des seuls oiseaux et mammifères marins. L'utilisation d'appareils miniaturisés et la détermination du régime alimentaire permet de collecter des informations sur la biologie des proies elles-mêmes : les prédateurs deviennent alors des bio-indicateurs des ressources marines (voir *Oiseaux de mer bio-indicateurs*, par Yves Cherel, Henri Weimerskirch, Christophe Guinet et Pierre Jouventin, *Pour la Science*, juillet 1995). Ils peuvent également recueillir

à moindre coût des informations précieuses en océanographie physique.

À partir des données acquises sur des grands albatros de Crozet équipés de balises Argos et d'enregistreurs de température à la patte, on a reconstitué une carte des températures de surface du sud de l'océan Indien, dans une zone où les mesures *in situ* nécessaires à la validation des données satellitaires sont rares et coûteuses à obtenir.

De même, par leur capacité de plongée et leurs longs voyages alimentaires, les éléphants de mer sont de bons auxiliaires pour échantillonner les paramètres physiques dans les 1 000 premiers mètres de la colonne d'eau, tels que la température, mais aussi, avec la mise au point de nouveaux capteurs, la salinité et la concentration en chlorophylle.

Les nouveaux moyens d'étude des prédateurs marins apportent des infor-

mations importantes pour leur conservation. Les populations d'albatros et de pétrels de l'hémisphère Sud déclinent, car les oiseaux se blessent avec les appâts des palangres, ces lignes de fond munies de cordelettes aux extrémités desquelles sont fixés des hameçons. Lors de la mise à l'eau des lignes, les palangriers tuent ainsi, chaque année, plusieurs dizaines de milliers d'oiseaux en haute mer et près des côtes. La localisation satellitaire indique les zones marines à protéger prioritairement. Elle met en évidence une fois de plus le besoin d'une législation internationale au-delà des eaux nationales et des zones d'intérêt économique qui ne couvrent souvent qu'une petite partie des zones d'alimentation des oiseaux. Ceux-ci sont protégés sur leurs zones terrestres de reproduction, mais pas en haute mer.

Yves CHEREL, Christophe GUINET et Henri WEIMERSKIRCH sont écologues au Centre d'études biologiques de Chizé, du CNRS (www.cebc.cnrs.fr).

R. GENTRY et G. KOOYMAN, *Fur Seals. Maternal Strategies on Land and at Sea*, Princeton University Press, 1986.

B. LE BŒUF et R. LAWS, *Elephants Seals. Population Ecology, Behavior and Physiology*, University of California Press, 1994.

R. WILSON, *Foraging Ecology*, in *The Penguins*, pp. 81-106, Oxford University Press, 1995.

G. ROBERTSON et R. GALES, *Albatross Biology and Conservation*, Surrey Beatty and Sons, 1998.

H. WEIMERSKIRCH, Y. CHEREL, F. CUENOT-CHAILLET et V. RIDOUX, *Alternative Foraging Strategies and Resource Allocation by Male and Female Wandering Albatrosses*, in *Ecology*, vol. 78, pp. 2051-2063, 1997.

T. WILLIAMS, R. DAVIS, L. FUIMAN, J. FRANCIS, B. LE BŒUF, M. HORNING, J. CALAMBOKIDIS et D. CROLL, *Sink or Swim : Strategies for Cost-efficient Diving by Marine Mammals*, in *Science*, vol. 288, pp. 133-136, 2000.

La découverte des naines brunes

GIBOR BASRI

Moins massives que les étoiles, mais plus massives que les planètes, les naines brunes semblaient être des objets astronomiques rares. De nouveaux recensements indiquent que ces objets sont peut-être aussi répandus que les étoiles.

Une naine brune est une étoile ratée. Dans une étoile, les réactions de fusion thermonucléaire entre les noyaux d'hydrogène libèrent d'énormes quantités d'énergie qui s'opposent à l'effondrement de la matière dû à la gravitation. Grâce à ces réactions, qui commencent dès que la température atteint trois millions de degrés, l'étoile brille. Or la température du cœur croît avec la pression gravitationnelle et, donc, avec la masse de l'objet. Ainsi, pour briller, un astre doit avoir au moins 75 fois la masse de la planète Jupiter, soit environ sept pour cent de la masse du Soleil. Les naines brunes sont des corps qui ont une masse inférieure ; elles sont plus massives que les planètes géantes, mais pas assez massives pour briller comme des étoiles.

Pendant des dizaines d'années, les naines brunes ont été le «chaînon manquant» de l'astronomie : on pensait qu'elles existaient, mais personne n'en avait observé. En 1963, à l'Université de Virginie, Shiv Kumar avait prédit que la contraction gravitationnelle, qui crée les étoiles à partir de grands nuages de gaz et de poussières,

créerait également de nombreux objets plus petits, des «naines brunes». Ce nom est trompeur, car les naines brunes apparaissent rouges, et non brunes, mais on avait déjà nommé «naines rouges» les étoiles dont la masse est inférieure à la moitié de celle du Soleil.

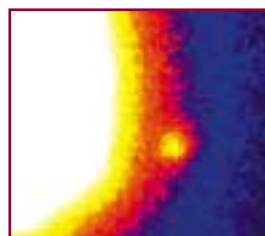
Au milieu des années 1980, les astronomes ont commencé la recherche systématique des naines brunes, mais ils n'ont découvert les premières qu'en 1995. Depuis, on en a trouvé des dizaines d'autres. Les observateurs et les théoriciens poursuivent aujourd'hui l'exploration. Combien y a-t-il de naines brunes ? Quelle est la gamme de leur masse ? Ont-elles toutes été créées de la même manière ?

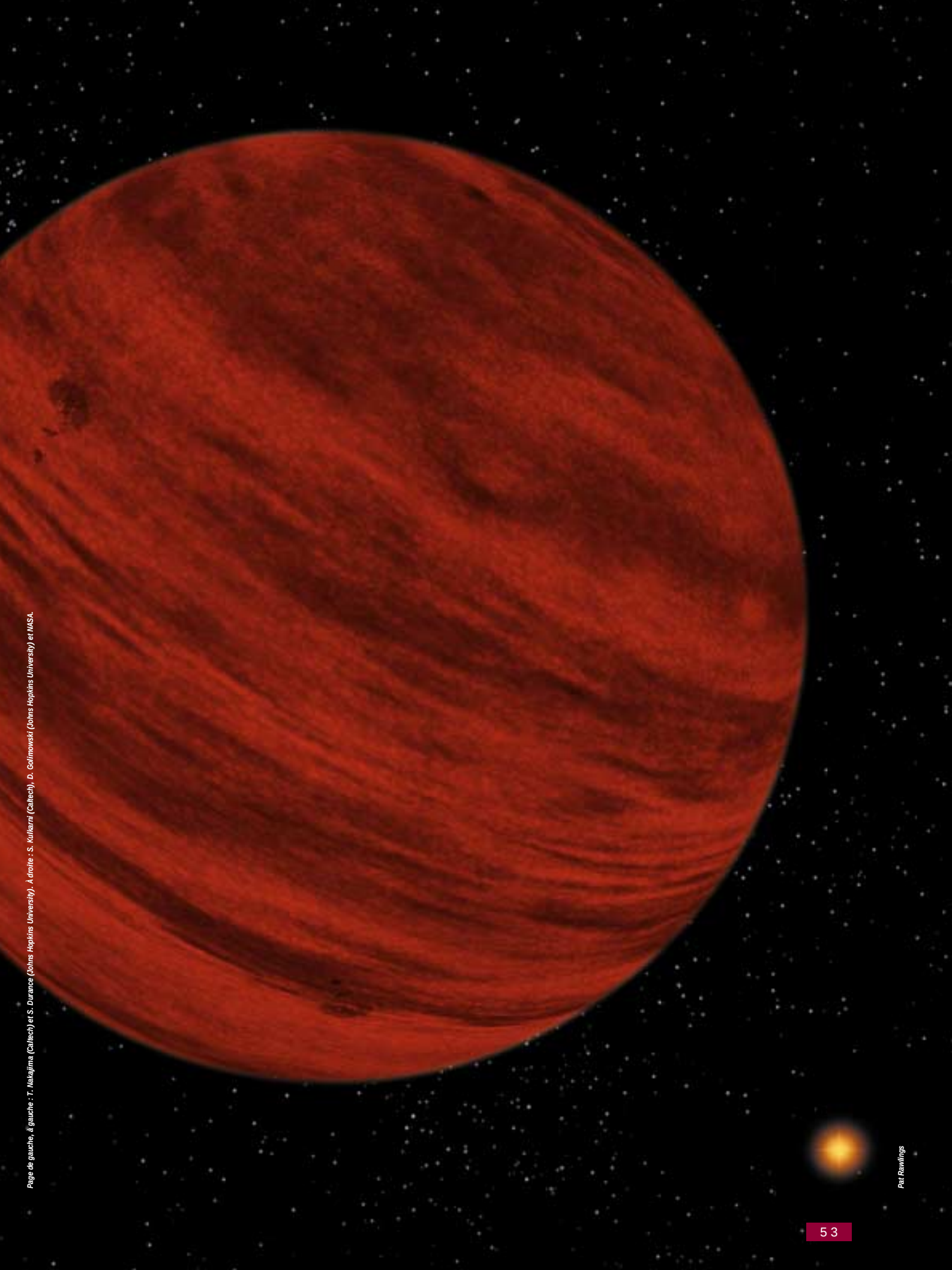
La découverte des naines brunes fut tardive, parce que ces objets sont peu lumineux. Pendant leur formation, tous les objets liés par la gravitation (étoiles, planètes et naines brunes) émettent de la lumière : celle-ci résulte de l'échauffement dû à la libération d'énergie au cours de la contraction gravitationnelle. Dans les étoiles, le rayonnement issu de la fusion de l'hydrogène prend le relais du rayonnement engendré par la contraction.

Lorsque cette fusion est amorcée, la taille et la luminosité de l'étoile restent constantes, le plus souvent pendant des milliards d'années. Dans les naines brunes, l'hydrogène ne fusionne pas et la luminosité décroît rapidement, tandis que la matière se contracte et se refroidit, émettant l'essentiel de son rayonnement dans le proche infrarouge (voir l'encadré de la page 57). Comme la luminosité des naines brunes est faible dès leur formation et qu'elle diminue ensuite, des astronomes pensaient que ces astres constituaient une part notable de la «matière noire», cette mystérieuse matière invisible dont la masse est bien supérieure à celle des objets lumineux de l'Univers.

Où chercher ces astres peu brillants ? On a d'abord pensé à les regarder près d'étoiles connues. Plus de la moitié des étoiles de notre Galaxie sont dans des systèmes binaires (où deux étoiles sont en orbite autour de leur centre de gravité commun), et les astronomes soupçonnaient que de nombreuses étoiles apparemment seules avaient pour compagnon une naine brune encore indétectée. Pour voir des naines brunes, on prévoyait ainsi

1. LA NAINE BRUNE GLIESE 229B émet une lueur rougeâtre sur le dessin de la page ci-contre. On pense que cet objet est légèrement plus petit que Jupiter, mais environ 10 fois plus chaud, et 30 à 40 fois plus massif. Le compagnon de l'étoile naine rouge Gliese 229A (vue d'artiste page ci-contre) a été découvert en 1995. Les astronomes ont détecté la naine brune sur des clichés du télescope de 1,5 mètre de diamètre de l'Observatoire du mont Palomar (en médaillon de gauche) et du Télescope spatial Hubble (médaillon de droite) : c'est la petite tache que l'on distingue près de la naine rouge. Gliese 229B se trouve en réalité à plus de six milliards de kilomètres de son étoile compagnon (une distance supérieure à la distance entre Pluton et le Soleil).





de les chercher au voisinage immédiat d'étoiles connues.

Très vite, la stratégie sembla prometteuse : en 1988, Eric Becklin et Benjamin Zuckerman, de l'Université de Los Angeles, repèrent un candidat. Cet objet, GD 165B, est le compagnon rouge et peu brillant d'une naine blanche (les naines blanches sont les restes d'étoiles modérément massives, plus petites, plus chaudes et bien plus massives que les naines brunes). Les mesures indiquaient pour GD 165B une masse 75 fois supérieure à celle de Jupiter, proche de la limite entre les naines brunes et les étoiles peu massives, de sorte que son appartenance à l'une ou à l'autre de ces classes restait discutée.

La recherche de naines brunes comme compagnons d'étoiles présente un autre avantage : la détection directe n'est pas nécessaire. Comme pour la détection des planètes extrasolaires, on cherche les naines brunes en observant les mouvements périodiques des étoiles autour desquelles elles gravitent. Et plutôt que de mesurer les déplacements infimes des compagnons, on observe les décalages Doppler des rayonnements émis par ces étoiles (lorsqu'une étoile s'approche de nous, sa lumière est décalée vers le bleu ; quand elle s'éloigne, la lumière est décalée vers le rouge). Cette méthode est en réalité plus efficace pour la détection des naines brunes que pour celle des planètes : la masse des naines brunes étant supérieure à celle des planètes, le déplacement de l'orbite de l'étoile compagnon est supérieur, et sa mesure facilitée.

Pourtant, Geoffrey Marcy, de l'Université de San Francisco, n'a trouvé aucune naine brune au cours du recensement de 70 étoiles peu massives qu'il a effectué à la fin des années 1980. Puis, au milieu des années 1990, l'étude de 107 étoiles semblables au Soleil a révélé près d'une dizaine de planètes, mais aucune naine brune

avérée. Les naines brunes semblaient bien moins répandues que les planètes géantes ou que les étoiles. Pourquoi ce « désert de naines brunes » ?

Une seule des premières études révéla une candidate naine brune : après l'examen du décalage Doppler de 1 000 étoiles, au Centre d'astrophysique Harvard-Smithsonian, David Latham trouva, en 1988, un compagnon stellaire dont la masse était plus de onze fois celle de Jupiter. Toutefois, la mesure du décalage Doppler ne

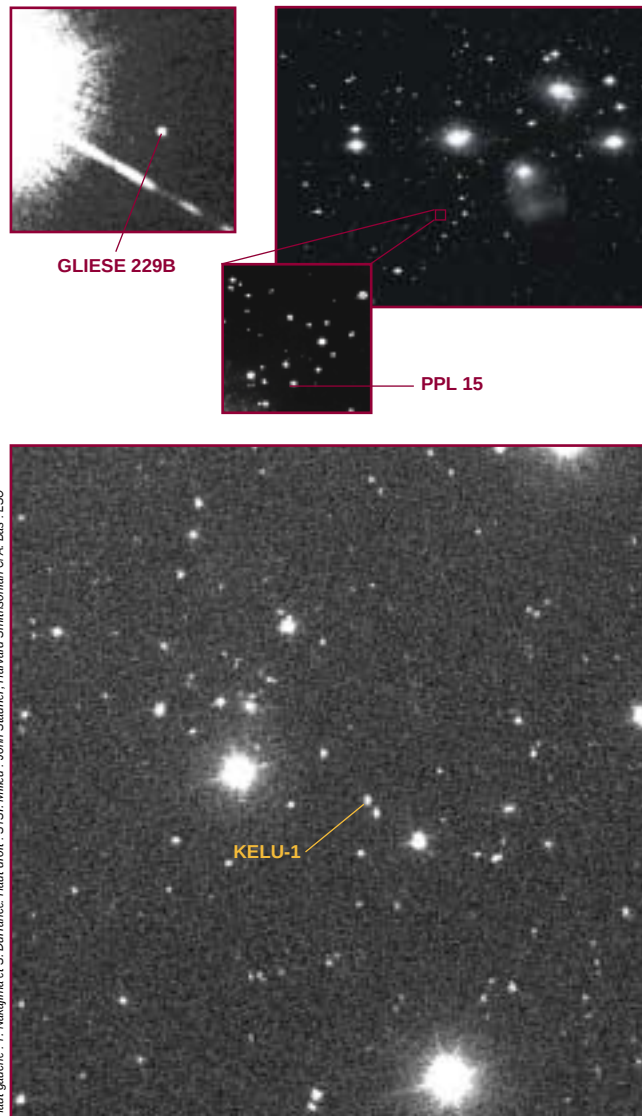
fournissait qu'une limite inférieure pour la masse du compagnon, de sorte que cet objet peut être une étoile de très faible masse plutôt qu'une naine brune. Pour connaître sa véritable nature, on devra déterminer les positions des étoiles avec une précision accrue.

Parallèlement, d'autres astronomes ont employé une méthode différente, fondée sur le fait que les naines brunes jeunes sont plus brillantes que les naines brunes âgées. Or, les meilleurs endroits pour chercher des objets jeunes sont

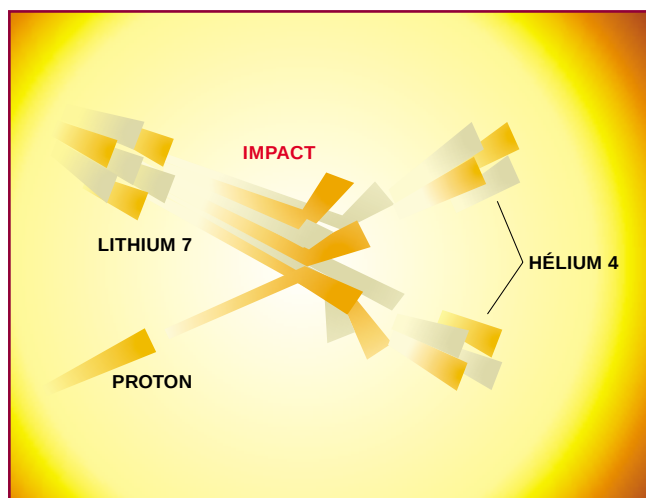
les amas d'étoiles. En effet, les étoiles d'un amas se forment toutes en même temps, mais elles n'ont pas toutes la même durée de vie. Les étoiles les plus massives subsistent pendant quelques millions d'années « seulement » avant de consommer tout leur hydrogène, alors que les étoiles de faible masse brillent pendant des milliards, voire des milliers de milliards d'années. C'est pourquoi on date les amas en cherchant leur étoile la plus massive encore située sur la séquence principale (la séquence principale correspond à la période au cours de laquelle les réactions nucléaires transforment l'hydrogène de l'étoile en hélium) : l'âge de l'amas est du même ordre que la durée de vie de cette étoile.

Après avoir localisé un amas jeune et déterminé son âge, les astronomes n'ont plus qu'à y rechercher les objets les moins lumineux et les plus rouges (donc les plus froids). Pour une étoile de masse et d'âge donnés, la théorie de l'évolution stellaire donne la température de surface et la luminosité. Ainsi, en mesurant ces caractéristiques, les astronomes estiment la masse de chaque candidate. Plusieurs équipes se sont attelées à la tâche, étudiant les régions du ciel qui contiennent des amas jeunes et y repérant les objets rouges faibles.

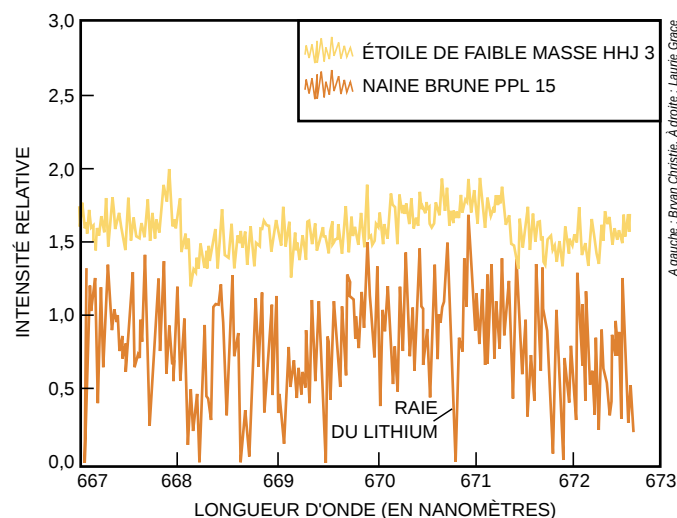
Ces équipes ont annoncé la découverte d'une série d'objets qui seraient des naines brunes dans les amas jeunes, notamment dans la



2. L'OBSERVATION D'OBJETS PEU BRILLANTS, comme les naines brunes, nécessite des stratégies spécifiques. Certains astronomes cherchent des naines brunes parmi les compagnons d'étoiles connues ; c'est la méthode qui a identifié Gliese 229B (en haut à gauche). D'autres équipes s'intéressent plutôt aux amas stellaires jeunes, parce que c'est dans leur prime jeunesse que les naines brunes sont les plus brillantes. Les astronomes ont scruté l'amas des Pléiades, vieux de 120 millions d'années seulement (en haut à droite), et y ont trouvé de nombreuses naines brunes, telle PPL 15 (en médaillon au centre). Enfin, on détecte aussi des naines brunes isolées en enregistrant la lumière de grandes zones célestes à l'aide d'instruments sensibles aux sources rouges peu brillantes. La découverte de la première naine brune isolée, Kelu-1 (image du bas) date de 1997.



3. L'ANALYSE DU SPECTRE des objets peu lumineux discrimine les étoiles des naines brunes. Toutes les étoiles détruisent le lithium de leur cœur ; dans cette réaction, un proton heurte un atome de lithium 7 (un isotope du lithium dont le noyau est composé de trois protons et quatre neutrons), qui se scinde alors en deux atomes d'hélium 4 (à gauche). Seules les plus massives des naines brunes ont une



A gauche : Bryan Christie. À droite : Laurie Grace

température interne suffisante pour que cette destruction du lithium ait lieu. Dans la plupart des naines brunes, le lithium reste présent. Le spectre de HHJ 3 (à droite, ligne jaune), une étoile peu massive de l'amas des Pléiades, n'a aucune trace de lithium. En revanche, le spectre de la naine brune PPL 15 (ligne rouge) possède une raie d'absorption qui indique la présence de cet élément.

région de formation d'étoiles de la constellation du Taureau et dans l'amas des Pléiades. Malheureusement, une étude approfondie a montré qu'aucune de ces candidates n'était une naine brune. Certaines étaient des étoiles rouges géantes, situées à des milliers d'années-lumière derrière l'amas : c'est l'éloignement qui les fait paraître si peu brillantes, mais elles sont intrinsèquement très lumineuses. D'autres étaient des étoiles peu massives situées devant ou derrière l'amas. Ces annonces prématurées ont renforcé le scepticisme des astronomes et fait penser que les naines brunes étaient vraiment rares.

À la recherche du lithium

Toutefois, en 1992, Rafael Rebolo, Eduardo Martín et Antonio Magazzu, de l'Institut d'astrophysique des îles Canaries, ont proposé une autre méthode pour différencier les étoiles peu massives et les naines brunes : le «test du lithium». Ce test utilise le fait qu'une naine brune d'une masse inférieure à 60 fois la masse de Jupiter n'est ni assez comprimée ni assez chaude pour que le lithium y fusionne : cette réaction commence à une température légèrement inférieure à celle de la fusion de l'hydrogène, de sorte que les étoiles classiques, qui atteignent facilement des températures importantes, épuisent rapidement leurs réserves initiales de lithium. Même les étoiles les moins massives brûlent tout leur lithium en 100 millions d'années envi-

ron, alors que la plupart des naines brunes (excepté les plus massives d'entre elles) conservent leur lithium. Ainsi, la présence de lithium dans un astre montre que ce dernier a une masse inférieure à celle d'une étoile.

Les raies spectrales du lithium sont assez intenses dans les objets rouges froids. L'équipe des Canaries a recherché ces raies dans les objets les plus froids du ciel suffisamment brillants pour que l'on obtienne un spectre d'une qualité satisfaisante : aucun ne contenait de lithium. Puis, en 1993, avec G. Marcy et James Graham, j'ai repris le test du lithium pour étudier des objets moins brillants, à l'aide du télescope Keck de dix mètres de diamètre, à Hawaï. Nous n'avons pas non plus observé de lithium... jusqu'à ce que nous pointions le télescope vers l'amas des Pléiades.

Des astronomes britanniques venaient de réaliser un recensement détaillé de cet amas. Ils avaient détecté plusieurs objets qui, en principe, devaient être moins massifs que des étoiles. Ils ont montré que ces objets se déplaçaient dans le ciel avec l'amas, et qu'ils étaient donc des membres de l'amas, et non des étoiles situées devant ou derrière. Nous avons sélectionné le moins brillant, un objet nommé HHJ 3, nous attendant à y trouver du lithium : il n'y en avait pas. Toutefois, notre collègue John Stauffer nous proposa une autre cible, parce qu'il avait également sondé les Pléiades à la recherche d'objets peu massifs et y avait décelé

une candidate encore moins brillante : PPL 15 (la quinzième candidate du relevé effectué au mont Palomar, dans la constellation des Pléiades). Ce fut un succès : pour la première fois, nous détectons du lithium dans un objet dont la masse semblait inférieure à celle d'une étoile. Nos résultats indiquaient que l'amas avait environ 120 millions d'années, d'où l'on déduisait une masse de PPL 15 à la limite supérieure du domaine des naines brunes.

La même année, en 1995, le groupe des Canaries avait également cartographié l'amas des Pléiades et détecté deux objets encore moins brillants que PPL 15 : Teide 1 et Calar 3. Tous deux avaient une masse supposée légèrement inférieure à 60 masses de Jupiter. À la fin de l'année, je me suis joint au groupe des Canaries, et nous avons confirmé la présence du lithium dans ces deux objets. La communauté astronomique est restée sceptique pendant quelques mois (après tout, ces objets ressemblaient à des d'étoiles), jusqu'à ce que de nouvelles découvertes confirment nos résultats.

À la même époque, une recherche d'un tout autre type a porté ses fruits de façon spectaculaire. Des astronomes de l'Institut de technologie de Californie et de l'Université Johns Hopkins étudiaient des étoiles proches peu massives, espérant trouver des compagnons qui soient des naines brunes. Ils avaient équipé le télescope de 1,5 mètre de diamètre du mont Palomar d'un instrument qui occultait la quasi-totalité

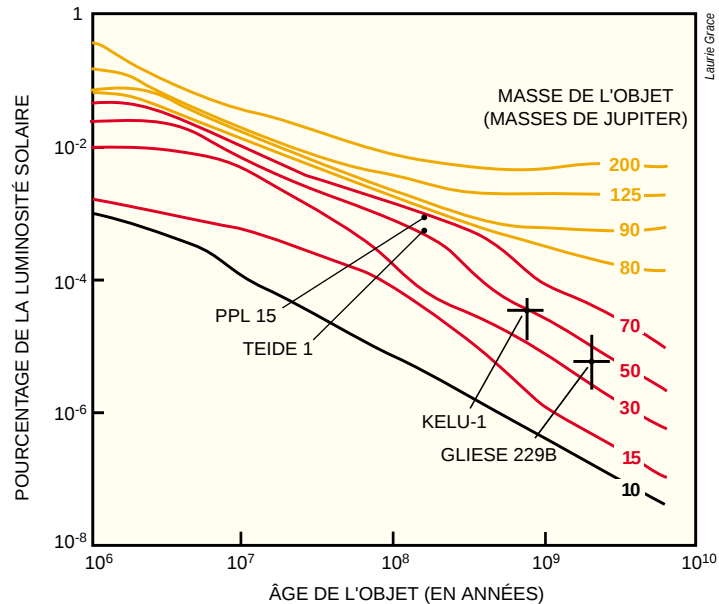
de la lumière de l'étoile principale, ce qui permettait de voir plus facilement un éventuel compagnon. En 1993, ils avaient repéré plusieurs candidates naines brunes. Afin de s'assurer que ces objets n'étaient pas des étoiles de l'arrière-plan, ils ont attendu un an, puis ils ont pris de nouveaux clichés. Comme ces objets sont relativement proches du Système solaire, leur mouvement dans la Galaxie se distingue de celui des étoiles de l'arrière-plan. L'un des compagnons ainsi étudié était 1 000 fois moins brillant que l'étoile principale, Gliese 229A. L'étoile principale étant déjà de faible luminosité, la luminosité du compagnon était

nécessairement bien inférieure à celle de l'étoile la moins brillante possible. Avant d'annoncer leur découverte, le groupe a attendu d'obtenir un spectre infrarouge de l'objet.

La découverte de Gliese 229B, le compagnon naine brune de Gliese 229A, fut annoncée en octobre 1995, au cours d'une conférence à Cambridge. Très peu lumineux, Gliese 229B était nettement moins massif qu'une étoile et, surtout, l'analyse de son spectre a révélé qu'il contenait du méthane. On trouve couramment du méthane dans l'atmosphère des planètes géantes, mais les étoiles sont toutes trop chaudes pour qu'il s'y forme. Sa présence en quantité notable dans Gliese 229B prouvait que cet objet n'est pas une étoile.

Au cours de la même conférence, le groupe des Canaries a annoncé l'observation de plusieurs nouvelles candidates naines brunes dans l'amas des Pléiades : l'idée que ces objets soient rares s'évanouissait. En outre, Michel Mayor et ses collègues de l'Observatoire de Genève ont annoncé la découverte de la première planète extrasolaire, une géante gazeuse en orbite autour de l'étoile 51 de la constellation de Pégase. La même matinée, les astronomes apprenaient que la recherche, longtemps infructueuse, d'objets «substellaires» était enfin couronnée de multiples succès.

La plupart des astronomes considèrent Gliese 229B comme la première



4. L'ÉVOLUTION DE LA LUMINOSITÉ des étoiles peu massives (courbes jaunes), des naines brunes (courbes rouges) et des planètes (courbe noire) montre que seules les étoiles sont assez massives pour avoir une luminosité stable. La lumière émise par les naines brunes et par les planètes décroît quand elles vieillissent. Les données relatives aux naines brunes (points et croix noirs) indiquent leur âge et leur masse.

naine brune incontestable à avoir été découverte, car elle est un million de fois moins brillante que le Soleil, et sa température de surface est inférieure à 1 000 kelvins (c'est-à-dire très inférieure à la température minimale de 1 800 kelvins environ que produirait la moins brillante des étoiles possible). Elle a atteint cet état parce qu'elle est vieille de quelques milliards d'années. Nous ne connaissons pas son âge précis, et nous ne pouvons donc pas calculer précisément sa masse, qui est probablement comprise entre 30 et 40 fois la masse de Jupiter. PPL 15, Teide 1 et Calar 3 sont plus massives (de 50 à 70 masses de Jupiter) et bien plus chaudes (avec des températures de surface comprises entre 2 600 et 2 800 kelvins), principalement en raison de leur plus jeune âge.

Une fois les méthodes de détection des naines brunes mises au point, les découvertes se sont enchaînées. Plusieurs groupes se sont à nouveau intéressés aux Pléiades : l'équipe espagnole y a découvert une naine brune dont la masse est à peine 35 fois celle de Jupiter ; c'est la plus légère des naines brunes détectées dans cet amas. Plus intéressant encore, ce même groupe a estimé le nombre de naines brunes des Pléiades en comptant les candidates les plus vraisemblables sur une petite région et en extrapolant le résultat à l'ensemble de l'amas : le nombre de naines brunes semble être du même ordre de grandeur

que celui des étoiles dans les Pléiades ! Si ce résultat est généralisable, notre Galaxie contient à elle seule environ 100 milliards de naines brunes. Toutefois, les naines brunes ne sont pas le principal constituant de la masse de l'Univers : légères, elles auraient dû être au moins dix fois plus nombreuses que les étoiles (on estime que la matière noire est dix fois plus massive que la matière visible, étoiles, galaxies, etc.). Les naines brunes ne résolvent pas le mystère de la matière noire.

Quel est l'éventail des masses des naines brunes ? Quelle est la limite inférieure de masse pour une naine brune ? Est-elle égale à la limite supé-

rieure de masse des planètes (environ 13 fois la masse de Jupiter) ? Ou bien une différence de masse entre les naines brunes et les planètes résulte-t-elle de mécanismes de formation différents ? On cherche la réponse à ces questions en analysant les amas stellaires en formation, où les naines brunes très légères émettent assez pour être vues. Le recensement de la région du Taureau et celui de la région d'Orion a mis en évidence des objets dont la masse semble être à peine supérieure à 13 fois celle de Jupiter : les masses des naines brunes semblent très variées (voir l'encadré de la page 59).

En 1997, le groupe de M. Mayor a détecté une dizaine de naines brunes probables en cherchant des systèmes binaires associés à 600 étoiles semblables au Soleil. Néanmoins, l'idée d'un «désert de naines brunes» subsistait, car ces études du décalage Doppler révélaient bien moins de naines brunes que de planètes, alors que les naines brunes sont en principe plus faciles à trouver par cette méthode. Récemment, une analyse minutieuse des données du satellite d'astrométrie *Hipparcos* (qui a mesuré précisément la position des étoiles) a montré que la moitié au moins des candidates naines brunes de M. Mayor sont des étoiles légères : le désert des naines brunes s'est encore vidé. La suite de l'étude menée par G. Marcy sur un échantillon d'étoiles de type solaire

encore plus grand a confirmé l'absence de compagnons naines brunes pour de telles étoiles.

Néanmoins, les naines brunes pourraient n'être absentes qu'autour des étoiles massives. En 1998, R. Rebolo et ses collègues en ont découvert une en

orbite autour de la jeune étoile G196-3. Malgré son jeune âge, cette naine brune est déjà assez froide, ce qui signifie qu'elle doit être légère, de l'ordre de 20 fois la masse de Jupiter. Plusieurs naines brunes ont également été détectées autour d'étoiles en formation. Un

système binaire constitué de deux naines brunes a même été identifié. Avec E. Martín, j'ai déterminé que la naine brune PPl 15 des Pléiades est en réalité une paire de deux naines brunes rapprochées, dont la période orbitale est de six ans. Puis, avec l'astronome

Le cycle de vie des naines brunes

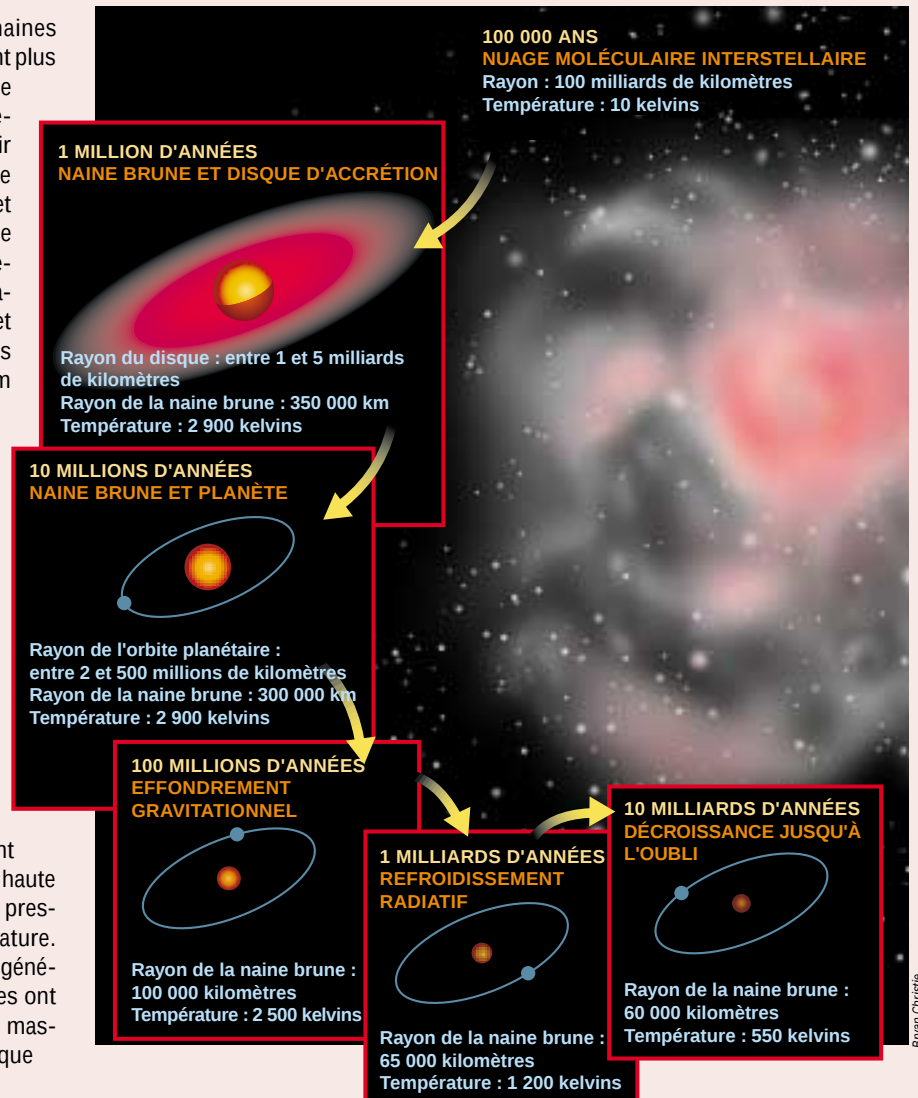
Les étoiles et les naines brunes ont une genèse similaire : elles résultent initialement de l'effondrement gravitationnel de nuages de gaz et de poussières interstellaires. Ces nuages, constitués principalement d'hydrogène et d'hélium, contiennent également de petites quantités de deutérium et de lithium, qui sont les sous-produits des réactions nucléaires ayant eu lieu quelques minutes après le Big Bang.

Quand les jeunes étoiles et les naines brunes se contractent, leur cœur devient plus chaud et plus dense, et les noyaux de deutérium fusionnent en noyaux d'hélium 3. La fusion du deutérium peut avoir lieu dans les naines brunes, car elle nécessite une température inférieure (et donc une masse plus faible) que celle de la fusion de l'hydrogène. L'énergie libérée par ces réactions arrête momentanément la contraction gravitationnelle et elle rend les objets brillants. Après quelques millions d'années, le deutérium est épuisé, et la contraction reprend. La fusion du lithium se produit alors dans les étoiles et dans les naines brunes plus de 60 fois plus massives que Jupiter.

Au cours de la contraction d'une naine brune, la pression thermique augmente dans le cœur et s'oppose à l'effondrement. Tous les électrons sont éjectés de leur noyau. Quand le cœur est très dense, tous les états quantiques d'énergie inférieure sont occupés ; comme deux électrons ne peuvent occuper le même état quantique (c'est le principe d'exclusion de Pauli), de nombreux électrons sont contraints d'occuper des états de très haute énergie. Ce phénomène engendre une pression qui ne dépend pas de la température. Les objets dans un tel état sont dits dégénérés. De ce fait, toutes les naines brunes ont à peu près la taille de Jupiter, les plus massives étant simplement plus denses que les autres.

Le cœur des étoiles n'est pas dégénéré, car la fusion de l'hydrogène fournit la pression qui soutient l'étoile contre sa propre gravité. Lorsque la fusion est bien amorcée, l'étoile cesse de se contracter et atteint un équilibre, avec une taille, une luminosité et une température stables. Dans les naines brunes massives, la fusion d'hydrogène commence, mais s'interrompt rapidement. Tandis que la pression de dégénérescence des naines brunes ralentit leur effondrement, leur luminosité, liée à la contraction gravi-

tationnelle, décroît. Bien que les étoiles de très faible masse puissent briller pendant des milliers de milliards d'années, les naines brunes s'éteignent progressivement, de sorte que plus elles sont âgées, plus il est difficile de les détecter. Dans un avenir très lointain, lorsque toutes les étoiles auront fini de brûler, les naines brunes seront le principal réservoir d'hydrogène de l'Univers.



UNE NAINE BRUNE NAÎT de la contraction d'un immense nuage de gaz et de poussières. Après un million d'années, c'est une boule de gaz rougeoyante, peut-être entourée d'un disque d'accrétion, qui pourrait engendrer une planète en orbite autour de la naine brune (on n'a pas encore détecté de telles planètes ; leur existence n'est qu'hypothétique). Progressivement, les naines brunes se contractent et se refroidissent. Les rayons et les températures de surface indiqués ici correspondent à un objet 40 fois plus massif que Jupiter.

allemand Wolfgang Brandner, nous avons récemment observé une paire serrée de naines brunes proches, qui devrait fournir, d'ici à dix ans, la première confirmation dynamique des masses des naines brunes (la détermination de la période de rotation permet une mesure précise des masses).

Ainsi, le désert de naines brunes n'est qu'autour d'étoiles massives.

Autour des objets légers (petites étoiles ou naines brunes), les chances de trouver un compagnon qui soit une naine brune sont supérieures. Cette différence résulte probablement des mécanismes – encore inconnus – qui créent les systèmes binaires. Ces mécanismes semblent moins favorables à la production d'un système où l'objet principal a plus de dix fois la masse du compagnon.

Les naines brunes de DENIS

A la fin de l'année 2000, après cinq années d'observations continues sur un télescope de un mètre de diamètre, la phase d'acquisition des données DENIS s'achèvera. Ce premier programme de cartographie numérique du ciel austral en infrarouge proche (entre 0,8 et 2,5 micromètres) a été réalisé à l'Observatoire européen austral (ESO), au Chili, par l'Observatoire de Paris, en association avec plusieurs partenaires français et européens.

L'un des résultats les plus spectaculaires de ce programme, comme de son homologue américain 2MASS, a été la découverte du premier échantillon de naines brunes et d'étoiles de très faible masse isolées, c'est-à-dire non associées à un amas d'étoiles jeunes comme les Pléiades, ni à une étoile sous forme d'un système binaire, comme Gliese 229A/B. Xavier Delfosse et Thierry Forveille, de l'Observatoire de Grenoble, ont particulièrement contribué à ce travail de pionnier en extrayant les candidates dans la base de données DENIS et en participant aux observations spectroscopiques nécessaires à la confirmation du statut de naines brunes des candidates.

En comparant les propriétés observées et les prédictions, les astronomes améliorent les modèles et comprennent mieux la formation et l'évolution de ces objets singuliers. Reste à constituer des échantillons complets et fiables, c'est-à-dire exhaustifs, jusqu'à une certaine valeur de la luminosité apparente, ce que seuls des relevés homogènes à très grande échelle permettent. Ainsi améliorera-t-on la connaissance de certaines données essentielles et mal connues de l'astrophysique, telles la répartition de la masse des étoiles lorsqu'elles se forment (la fonction de masse initiale) ou la densité spatiale des étoiles de masse inférieure à une valeur donnée. Ces estimations nécessitent la collecte d'échantillons de grande taille, de plusieurs centaines, voire de plusieurs milliers d'objets.

À terme, après l'analyse de l'intégralité des données, DENIS et 2MASS fourniront ces estimations, mais c'est un travail de tri énorme : un objet sur plusieurs centaines de milliers est retenu pour passer les tests spectroscopiques indispensables sur des télescopes géants où le temps d'observation est particulièrement coûteux.

L'horizon de ces relevés reste cependant limité : en raison de leur sensibilité, DENIS et 2MASS n'explorent le cosmos que jusqu'à une vingtaine de parsecs (65 années-lumière) pour les naines brunes isolées et à moins de 200 parsecs (650 années-lumière) pour les naines brunes associées à des amas jeunes ou à des régions de formation stellaire récente.

De nouveaux relevés à grande échelle, encore en projet, étendront la recherche dans l'espace, afin d'augmenter le volume de la Galaxie exploré, et aux plus grandes longueurs d'onde (entre trois à dix micromètres), afin de détecter des objets encore plus froids – c'est-à-dire plus vieux et / ou encore moins massifs. Pour l'instant, on ne sait presque rien de ces objets isolés, ni s'ils possèdent des planètes. Ces relevés répondront peut-être à ces questions dans la prochaine décennie.

Nicolas EPCHTEIN, Programme DENIS,
Observatoire de la Côte d'Azur, Nice

Des naines brunes partout

Une autre technique a aussi révélé des naines brunes isolées, perdues au milieu des myriades d'étoiles de la Galaxie : on cartographie de grandes zones du ciel avec un instrument particulièrement sensible aux sources rouges de faible intensité. La première naine brune ainsi décelée l'a été par Maria Teresa Ruiz, de l'Université du Chili, en 1997. Elle l'a nommée Kelu-1, d'après un mot indien qui signifie rouge. Du lithium y a été détecté. À peu près au même moment, le relevé DENIS (*Deep Near-Infrared Survey*, ou «relevé profond dans le proche infrarouge»), un projet européen de recensement du ciel austral dans l'infrarouge, a révélé trois objets similaires. Les astronomes ont rapidement confirmé la présence de lithium dans l'un d'eux.

L'étude de ces objets a fourni des indices sur l'atmosphère des naines brunes : la composition de la lumière visible qu'ils émettent révèle une absence de molécules d'oxyde de titane et d'oxyde de vanadium, qui dominent le spectre des étoiles peu massives. Ces molécules n'apparaissent pas dans les atmosphères des naines brunes, parce que les éléments lourds qui les composent se condensent en grains de poussières réfractaires qui restent solides aux faibles températures des naines brunes. Pour les naines brunes, les principales raies du spectre dans le visible sont celles de métaux alcalins neutres comme le sodium, le potassium, le rubidium, le césium et, parfois, le lithium.

L'équipe 2MASS (acronyme de *Two Micron All-Sky Survey*, soit «recensement de la voûte céleste à deux micromètres») de l'Université du Massachusetts a également trouvé des naines brunes dans notre Galaxie (près de 100 candidates) et a confirmé la présence de lithium pour une vingtaine d'entre elles. La plupart de ces objets ont des températures de surface comprises entre 1 600 et 2 200 kelvins, et leur âge est sans doute inférieur à un milliard d'années. En raison de leur jeunesse, ces objets sont relativement brillants et, donc, plus faciles à observer que des objets plus vieux.

La chasse aux naines brunes isolées plus âgées est restée infructueuse jusqu'à l'été 1999, quand le recensement numérique *Sloan* a révélé deux naines



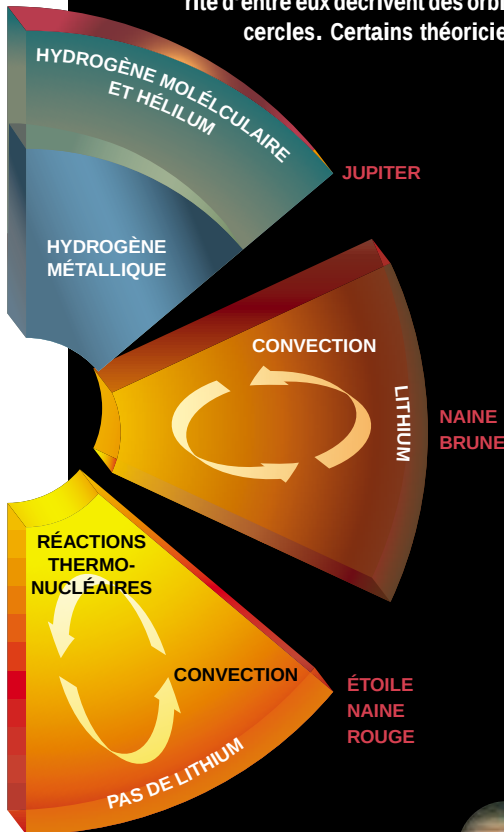
Planètes contre naines brunes

Existe-t-il une différence fondamentale entre les plus grosses des planètes et les plus petites des naines brunes? On supposait naguère que les planètes ne se forment pas de la même manière que les étoiles ou que les naines brunes. Les planètes géantes gazeuses se seraient formées par accréation de planétésimaux (de petits corps de roches ou de glaces) au milieu d'un disque de gaz et de poussières entourant une étoile. En quelques millions d'années, ces noyaux durs auraient attiré d'énormes enveloppes de gaz. Selon cette théorie, mise au point à partir de l'étude du Système solaire, toutes les planètes devraient se trouver en orbite quasi circulaire autour des étoiles, et les planètes géantes gazeuses devraient être sur des orbites relativement lointaines.

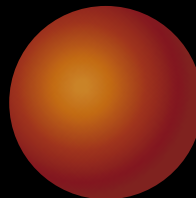
Ces prévisions ont été contredites par la découverte des premières planètes géantes extrasolaires : la plupart de ces corps ont été détectés sur des orbites proches de leur étoile, et la majorité d'entre eux décrivent des orbites allongées plutôt que des cercles. Certains théoriciens ont même prédit l'exis-

tence de planètes solitaires, éjectées de leur système stellaire par des interactions orbitales avec des planètes sœurs. Ainsi, les observateurs distinguent très difficilement les planètes des naines brunes à partir de leur lieu et de leur mode de formation, ou de leur situation et de leur mouvement actuels. On peut trouver des naines brunes isolées, d'autres sont des compagnons d'étoiles ou d'autres naines brunes. Il en est peut-être de même pour les planètes géantes.

Une nouvelle approche intéresse aujourd'hui les astrophysiciens : elle propose comme critère de distinction entre planètes et naines brunes l'allumage ou non des réactions de fusion nucléaire. Selon ce critère, la limite se situe à environ 13 masses de Jupiter. Au-delà de cette masse, la fusion du deutérium commence au sein de l'objet. Le fait que les naines brunes semblent être moins nombreuses que les planètes (du moins en tant que compagnons d'étoiles massives) est le signe de mécanismes de formation différents. Il est cependant beaucoup plus facile d'observer une distinction fondée sur la masse.



UN CONTINUUM D'OBJETS, des planètes aux étoiles (*ci-dessous*), montre que les naines brunes plus âgées, telle Gliese 229B, ont des tailles et des températures de surface très semblables à celles des planètes géantes gazeuses. Les naines brunes plus jeunes, telle Teide 1, ressemblent davantage à des étoiles peu massives du type de Gliese 229A. Les naines brunes et les étoiles peu massives sont totalement convectives, c'est-à-dire que leurs constituants sont brassés (à gauche). Les réactions nucléaires, au sein de l'étoile, détruisent complètement leur lithium, et la présence de celui-ci dans un objet est le signe qu'il peut s'agir d'une naine brune.



NOM	JUPITER	GLIESE 229B	TEIDE 1	GLIESE 229A	SOLEIL
TYPE D'OBJET	Planète géante gazeuse	Naine brune	Naine brune	Étoile naine rouge	Étoile naine jaune
MASSSES (en masses de Jupiter)	1	30-40	55	300	1 000
RAYON (en kilomètres)	71 500	65 000	150 000	250 000	696 000
TEMPÉRATURE (en kelvins)	100	1 000	2 600	3 400	5 800
ÂGE (en années)	4,5 milliards	2-4 milliards	120 millions	2-4 milliards	4,5 milliards
FUSION DE L'HYDROGÈNE	Non	Non	Non	Oui	Oui
FUSION DU DEUTÉRIUM	Non	Oui	Oui	Oui	Oui

brunes dont l'atmosphère contient du méthane. La présence de méthane montre une température de surface inférieure à 1 300 kelvins, soit un âge supérieur à un ou deux milliards d'années. Au même moment, l'équipe 2MASS a signalé l'observation de quatre objets comparables. La majorité des naines brunes de notre Galaxie devraient renfermer du méthane, parce qu'elles se sont, pour la plupart, formées il y a longtemps, et qu'elles devraient avoir ainsi atteint ce stade de refroidissement. Toutefois, les découvertes ne représentent que la partie émergée de l'iceberg : les équipes 2MASS et DENIS ont établi que le nombre de naines brunes isolées dans les zones recensées équivalait au nombre d'étoiles peu massives dans ces mêmes zones. Ce résultat corrobore les conclusions précédentes, établies pour l'amas des Pléiades : les naines brunes semblent presque aussi nombreuses que les étoiles.

La phase initiale de découverte des naines brunes touche à sa fin. Les astronomes ont des méthodes de détection efficaces et de nombreuses candidates pour une étude détaillée. D'ici à quelques années, les astronomes préciseront les données fondamentales sur ces objets : leur nombre, leur masse, et leur répartition dans la Galaxie. Les astrophysiciens examineront également les mécanismes de formation, qu'il s'agisse de ceux de compagnons stellaires ou d'objets isolés, ainsi que les mécanismes qui refroidissent leur atmosphère. Il aura donc fallu attendre la fin du siècle pour que ces objets, pourtant aussi répandus que les étoiles, commencent à nous livrer leurs secrets !

Gibor BASRI est professeur au département d'astronomie de l'Université de Berkeley.

S.R. KULKARNI, *Brown Dwarfs : A Possible Missing Link between Stars and Planets*, in *Science*, vol. 276, pp. 1350-1354, 30 mai 1997.

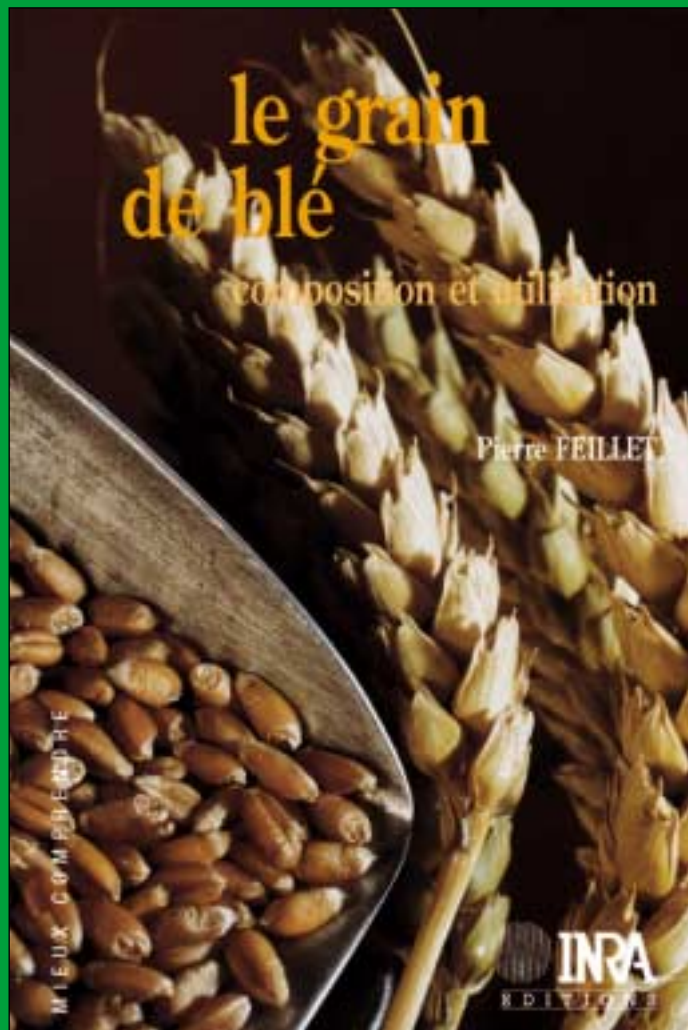
Ken CROSWELL, *Planet Quest : The Epic Discovery of Alien Solar Systems*, Free Press, 1997.

Brown Dwarfs and Extrasolar Planets, sous la direction de R. Rebolo, E.L. Martín et M.R. Zapatero Osorio, Astronomical Society of the Pacific Conference Series, vol. 134, 1998.

La recherche agronomique concerne notre quotidien

Pierre Feillet vous propose la synthèse complète des connaissances sur le blé : ses propriétés structurales et sa composition chimique, les bases technologiques et physico-chimiques de la fabrication des farines, semoules, pains, biscuits et pâtes alimentaires, les additifs et agents technologiques, les méthodes de contrôle de la qualité et aspects nutritionnels et l'économie de la filière blé.

Une référence pour les étudiants, les industriels et spécialistes du blé.



2000, 312 p., 330 FF (50,31€)



Catalogue et commande en ligne :
<http://www.inra.fr/Editions/>

Nos titres sont disponibles chez votre libraire et auprès de nos services :

INRA Éditions – RD 10 – 78026 Versailles cedex – France
tél: 33.(0)1.30.83.34.06 – fax: 33.(0)1.30.83.34.49 – minitel: 3614 INRA

Institut National de la Recherche Agronomique

