

la seconde méthode vise à créer de nouvelles variétés améliorées. Elle consiste à utiliser des variétés diploïdes sauvages ou améliorées et à les croiser pour créer des hybrides diploïdes. Traités à la colchicine, qui bloque la division cellulaire, ces hybrides deviendront des autotétraploïdes qui, croisés avec des diploïdes, donneront des triploïdes intra- ou interspécifiques stériles et parthénocarpiques. En 2003, deux hybrides ont passé le cap de la phase d'évaluation, mais une seule variété a été retenue. Cette dernière se caractérise par des fruits courts et nombreux au goût très différent de celui des Cavendish et par un retour de cycle très rapide, de l'ordre de quatre à cinq mois. Cependant, sa grande taille et son faux-tronc grêle sont peu compatibles avec une production intensive. En 20 ans, la création variétale a largement progressé et des hybrides ayant passé le stade de sélection de la résistance aux parasites (particulièrement des cercosporioses) sont en cours d'évaluation en milieu naturel.

Enfin, depuis quelques années, afin de mieux maîtriser les infections virales (et celles du charançon), on utilise des techniques d'amélioration différentes de l'hybridation classique, les gènes de résistance à ces parasites n'étant pas connus dans le genre *Musa*. En multipliant *in vitro* des bourgeons de la souche, les chercheurs obtiennent des suspensions de cellules, à partir desquelles ils sélectionnent des clones, parfois après avoir provoqué des mutations au hasard ou transféré des gènes conférant une résistance à une maladie. En Ouganda, à Cuba, en Colombie et dans quelques autres pays, des plants résistants à la cercosporiose noire et des variétés transgéniques résistants à la maladie de Panama, aux charançons et aux nématodes seraient en cours d'évaluation en plein champ. Comme toute recherche sur les OGM, ces travaux soulèvent de nombreuses questions écologiques ; souhaitons que l'évaluation de la biosécurité soit réalisée avec rigueur et indépendance.

En Guadeloupe et en Martinique, les agriculteurs, en étroite collaboration avec les chercheurs du CIRAD, de l'INRA (Institut national de la recherche agronomique), de l'IRD (Institut de recherche pour le développement), du CEMAGREF (Institut de recherche pour l'ingénierie de l'agriculture et de l'environnement) et de diverses équipes universitaires, dévelop-

La banane, rites et symboles		
De puis longtemps « au service des humains », le bananier est intégré à la culture et aux croyances de nombreuses sociétés. En Inde, il est mentionné dans divers textes sacrés dès le VI^e siècle avant notre ère. Selon les croyances chrétiennes de l'Inde et du Sri Lanka, la banane était le fruit défendu offert par Ève à Adam, et la grappe de raisin de l'histoire des Hébreux devenait un régime de bananes. La touffe de bananiers, avec son pied-mère, ses rejets fils et petits-fils, est souvent rapprochée de la famille humaine. Le juriste musulman Abu Hanifa (VIII^e siècle) fait ainsi dire à son disciple : « Pourquoi donc, mon fils, ne me ressembles-tu point ? » Son fils lui répond : « Je suis comme le bananier, qui n'est bon à quelque chose qu'après la mort de sa mère. »	Nombre d'ethnies associent le bananier à la féminité. Chez les Mélanésien, il symbolise la femme (produisant des fruits comme la femme donne naissance). Chez les Yanomami (Amazonie), la femme et l'homme occupent deux positions extrêmes, à l'image du bananier et du palmier dans le cycle agricole : le bananier est la première plante à fructifier et disparaître, alors que le palmier, dernière à fructifier, subsiste même lorsque le jardin est devenu improductif. Les Bamoun (Cameroun), quant à eux, enterrent le placenta du nouveau-né au pied d'un bananier si c'est une fille, d'un palmier si c'est un garçon. En Afrique des Grands Lacs (Ouganda, Rwanda, Burundi), le bananier est au cœur des traditions des peuples du Buganda,	du Buhaya et du Busoga. Le garçon adulte offre comme dot des bananiers de la variété « Mpolongoma » (lion). Et s'il délaisse sa femme, celle-ci recourt au cultivar Enzinga, dont les bananes disposées en spirale sont censées empêcher les maris de batifoler. Le bananier est aussi le pilier de l'économie familiale : la présence de bananiers porteurs de régimes permet d'obtenir un prêt. La bière de banane se partage dans les réunions masculines qui marquent la vie familiale et publique, ainsi que lors de diverses autres cérémonies. Dans certaines cultures, enfin, le bananier est associé à la méditation : parce qu'il disparaît après avoir porté ses fruits, Bouddha en a fait le symbole de la fragilité et de l'instabilité des choses de ce monde.

pent une démarche associant stratégie culturale, lutte biologique et utilisation de variétés résistantes : interruption des cycles de développement des pathogènes pour réduire leur dispersion (combinaisons de jachères et de rotations des cultures), création et développement de variétés résistantes compatibles avec les conditions d'exportation, développement des plantes qui assurent le couvert végétal entre deux périodes de culture bananière, amélioration des techniques de lutte contre le charançon et les maladies post-récolte.

Vers une production durable

La recherche prospective s'intéresse aussi à trois aspects très différents. D'abord, elle prend en compte les perspectives du marché. Des niches particulières de marché se développent : banane biologique, banane équitable..., mais aussi une diversification des goûts, qui appelle à développer de nouvelles variétés. Ensuite, elle étudie les risques d'évolution du parasitisme : depuis moins de dix ans, on a vu une extension inquiétante de maladies et parasites émergents, tels le flétrissement bactérien en Afrique ou la maladie

des raies noires en Martinique. Il s'agit donc de veiller à la durabilité des résistances parmi les variétés sélectionnées et d'éviter les contournements de ces résistances par les agents pathogènes.

La mise en place d'une production et d'une protection intégrées, enfin, impose l'étude des relations entre la durabilité du système de culture (notamment des résistances aux attaques de pathogènes) et l'agrodiversité qui y règne, fruit de la réintroduction d'une diversité organisée (rotation, variétés, etc.) et de la promotion d'une diversité naturelle au niveau des sols.

Avec ces nouvelles conceptions et pratiques, on peut être optimiste quant à l'avenir de la culture de la banane pour l'exportation. En revanche, les productions de bananes légume – base de la sécurité et de l'indépendance alimentaire des pays pauvres – n'ont pas bénéficié de recherches soutenues avant les années 1970. Depuis, l'impact de la cercosporiose noire sur beaucoup de ces cultures a fait émerger, au plan international, la nécessité d'une recherche spécifique, axée sur la mise au point de variétés résistantes au parasitisme, l'utilisation de pesticides – trop onéreuse – étant exclue dans les pays concernés. ■



Improbables

L'ESSENTIEL

✓ Les astronomes ont, de façon inattendue, découvert des planètes autour d'étoiles à neutrons (résidus d'explosions en supernova), de naines blanches (cadavres d'étoiles de type solaire) ou de naines brunes (étoiles avortées).

✓ Ces planètes situées dans des systèmes extrêmes témoignent de l'universalité et de la robustesse du processus de formation planétaire.

L'un des spectacles les plus poignants des cieux est celui d'une naine blanche. Un tel astre a une masse comparable à celle de notre Soleil, mais il figure parmi les moins brillants, et son éclat ne cesse de faiblir.

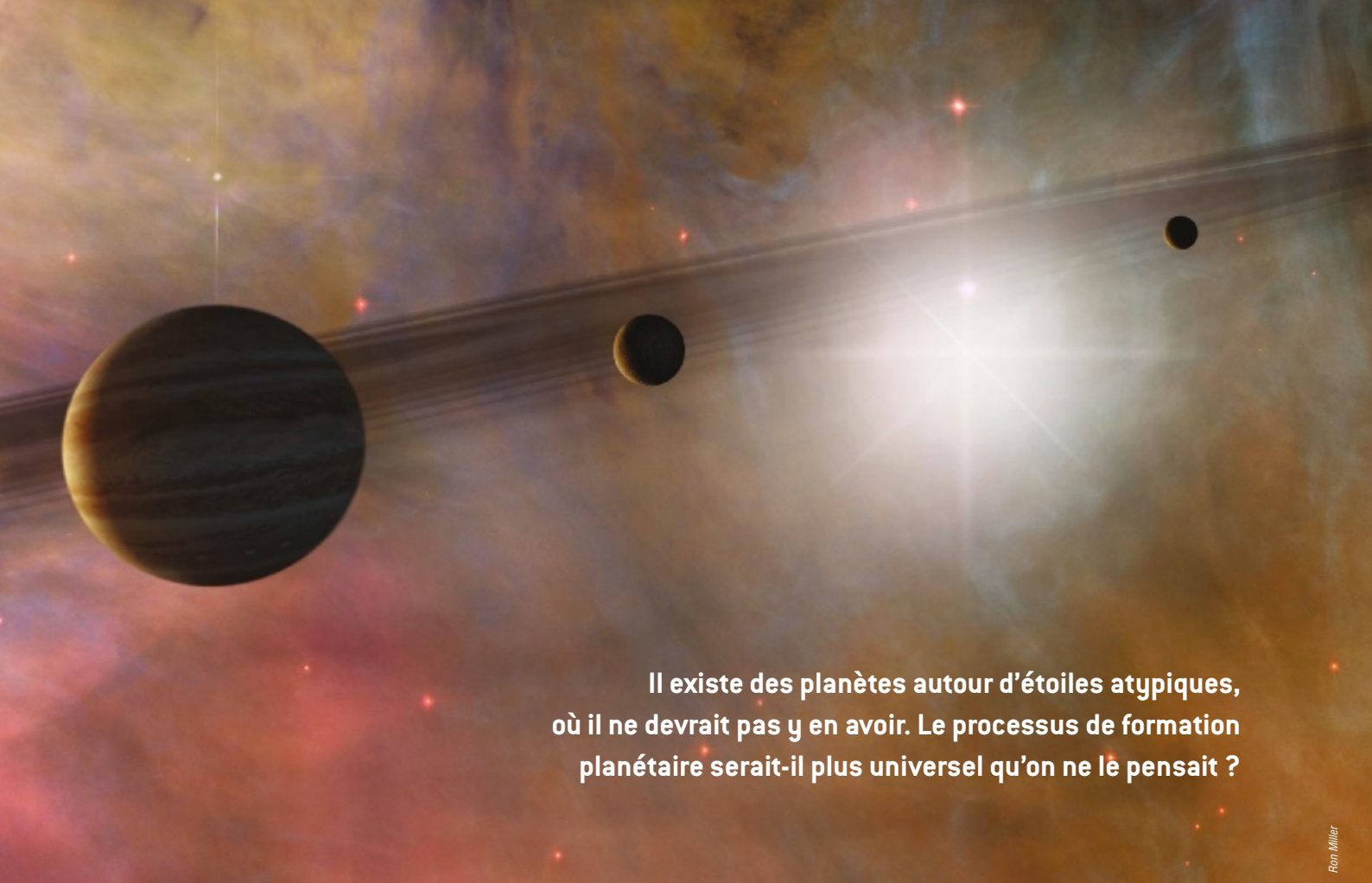
Il ne s'agit pas tant d'une étoile que du cadavre d'une étoile. Pendant une durée pouvant atteindre dix milliards d'années, cet astre a été très semblable au Soleil et a brillé avec le même éclat. Mais lorsqu'il a commencé à être à court de combustible, il a connu une violente agonie. Il s'est dilaté jusqu'à 100 fois sa taille actuelle et est devenu 10 000 fois plus brillant (phase dite de « géante rouge »), avant d'éjecter par bouffées ses couches externes et de se recroqueviller en une braise rougeoyante de la taille de la Terre. Pour le reste de l'éternité, la naine blanche

restera inerte, en rayonnant de moins en moins d'énergie, s'éteignant peu à peu.

Et il y a plus triste encore. Avec nos collègues, nous avons trouvé dans notre Galaxie plus d'une douzaine de naines blanches autour desquelles tournent des astéroïdes, des comètes et peut-être même des planètes ; en d'autres termes, des cimetières de systèmes stellaires entiers.

Tant que les étoiles étaient en vie, elles se levaient chaque jour sur l'horizon de ces corps célestes. Elles en réchauffaient doucement le sol et faisaient s'agiter le vent. Des organismes vivants en ont peut-être même profité. Mais quand ces étoiles sont mortes, elles ont vaporisé ou englouti leurs planètes proches (ou internes), n'épargnant que celles occupant les marges lointaines et glacées.

Au fil du temps, les naines blanches ont détruit à leur tour la plupart de ces



Ron Miller

Il existe des planètes autour d'étoiles atypiques, où il ne devrait pas y en avoir. Le processus de formation planétaire serait-il plus universel qu'on ne le pensait ?

planètes

Michael Werner
et Michael Jura

survivantes par effets de marée. Ces systèmes préfigurent le sort de notre propre système quand le Soleil mourra.

Les astronomes ont toujours envisagé l'existence de planètes en orbite autour d'autres étoiles. Mais ils imaginaient découvrir des systèmes ressemblant au Système solaire, centrés sur une étoile semblable au Soleil. Or quand les découvertes ont commencé à déferler, il y a une quinzaine d'années, il est vite apparu que les systèmes planétaires peuvent être très différents du nôtre. Le premier exemple a été 51 Pegasi, une étoile de type solaire dotée d'une planète plus massive que Jupiter et dont l'orbite est plus petite que celle de Mercure.

À mesure que les instruments gagnaient en sensibilité, des cas encore plus étranges se sont révélés. L'étoile de type solaire HD 40307 abrite trois planètes de masses

comprises entre quatre et dix masses terrestres, dont les orbites sont au moins deux fois plus petites que celle de Mercure. L'étoile de type solaire 55 Cancri A possède pas moins de cinq planètes (de masses allant de 10 à 1 000 masses terrestres et des rayons orbitaux allant de un dixième de celui de Mercure à environ celui de Jupiter) et une, voire deux étoiles compagnons ! Les systèmes planétaires imaginés par la science-fiction font pâle figure à côté des vrais...

Les systèmes associés à des naines blanches montrent qu'il n'est même pas nécessaire que les étoiles soient de type solaire. En effet, un véritable bestiaire de planètes sont en orbite autour de corps qui ne sont eux-mêmes pas plus gros que des planètes. La diversité de ces systèmes est aussi grande que celle des systèmes associés à des étoiles ordinaires.

Les astronomes ne s'attendaient pas à une telle omniprésence des systèmes planétaires, ni à leur robustesse ou à l'universalité des processus qui président à leur formation. Les systèmes planétaires semblables au nôtre pourraient ne pas être les plus répandus.

Bien qu'on l'ait un peu oublié aujourd'hui, la première planète extrasolaire découverte et confirmée était en orbite autour d'une étoile très différente du Soleil : il s'agissait du pulsar PSR 1257+12,

1. UNE NAIN BRUNE est une étoile trop petite – parfois à peine plus massive que Jupiter – pour que les réactions de fusion s'allument en son cœur. Les astronomes ne pensaient pas trouver des planètes autour de ces étoiles avortées. Pourtant, il existe maintenant des indices de minisystèmes stellaires autour des naines brunes et d'autres objets improbables.

un cadavre stellaire ultradense, qui concentre une masse supérieure à celle du Soleil dans un diamètre d'une vingtaine de kilomètres seulement (on parle d'étoile à neutrons) et qui émet en outre un signal radio périodique. L'événement qui a engendré ce monstre, l'explosion en supernova d'une étoile de 20 masses solaires, a été bien plus violent que la fin d'une étoile de type solaire, et il est impensable que des planètes y aient survécu. Cette première planète extrasolaire a donc dû naître des cendres de l'explosion.

Un système qui renaît de ses cendres

Bien que les supernovae éjectent l'essentiel de leurs débris dans l'espace, une petite partie reste liée par la gravitation et retombe en formant un disque en orbite autour du résidu stellaire. Les disques sont les berceaux des planètes. On pense que les systèmes stellaires, dont le nôtre, naissent d'un nuage interstellaire amorphe de poussière et de gaz qui s'effondre sous sa propre gravité. La loi de conservation du moment cinétique empêche une partie du matériau de s'effondrer jusque sur l'étoile nouvellement née et le conduit à former un disque. Au sein de ce dernier, la poussière et le gaz s'accrètent pour former des planètes. Un processus comparable a pu se produire dans le disque résiduel de la supernova.

Les astronomes ont découvert la première planète, puis deux autres, autour du pulsar PSR 1257+12 en observant des écarts périodiques dans les impulsions radio qu'il émet. En effet, l'attraction gravitationnelle des planètes fait légèrement osciller l'étoile, et modifie ainsi la distance que doivent parcourir les impulsions. Malgré des recherches intensives, on ne connaît pas de système comparable autour d'un autre pulsar. Le pulsar PSR B1620-26 possède au moins une planète (détectée de la même façon). Mais elle est tellement loin de l'étoile qu'elle ne s'est sans doute pas formée à partir de débris : elle aurait été arrachée à une autre étoile.

En 2006 cependant, le télescope spatial *Spitzer* a découvert une émission infrarouge inattendue en provenance de l'étoile à neutrons 4U 0142+61. Elle pourrait provenir de la magnétosphère de l'étoile ou d'un disque circumstellaire. Cette étoile à neutrons s'est formée lors de l'explosion

Les astronomes détectent en général les planètes extrasolaires par leurs effets sur le spectre lumineux (méthode des vitesses radiales), la luminosité (méthode des transits) ou la position (astrométrie) de leur étoile hôte. Dans la plupart des cas évoqués dans cet article, les astronomes se focalisent sur un indice plus indirect : la présence d'un disque de poussière autour de l'étoile. Certaines étoiles nouvellement nées sont accompagnées d'un disque protoplanétaire, lieu supposé de formation des planètes. Les étoiles mûres arborent parfois un disque de débris, résultant de collisions ou d'évaporation de comètes et d'astéroïdes. Il signale la présence de planètes actuelles ou passées.

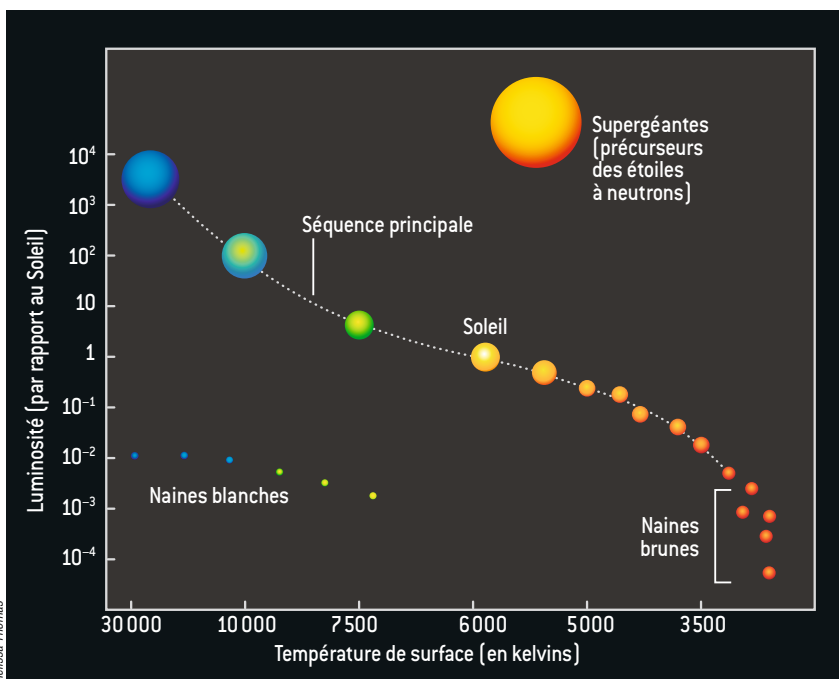
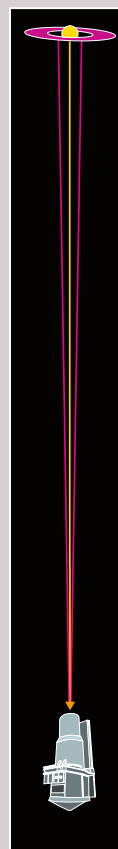
On distingue ces deux types de disques par la façon dont ils rayonnent dans l'infrarouge l'énergie de la lumière stellaire reçue. Le télescope spatial *Spitzer*, lancé en 2003, s'est révélé être une machine à découvrir des disques. Ses caméras infrarouges à grand champ cap-

turent en une seule image des centaines d'étoiles et repèrent celles ayant peut-être un disque et méritant une étude plus approfondie.

Spitzer s'inscrit dans le prolongement des télescopes spatiaux infrarouges tels que IRAS (*Infrared Astronomical Satellite*) dans les années 1980 et ISO (*Infrared Space Observatory*). Contrairement à IRAS, qui réalisait un relevé complet du ciel, *Spitzer* pointe des corps célestes particuliers pour les étudier avec précision.

Après plus de cinq ans d'observations, la réserve d'hélium liquide de *Spitzer* destinée à maintenir la température du télescope proche du zéro absolu est épuisée. *Spitzer* s'est réchauffé à une trentaine de kelvins, ce qui réduit considérablement son acuité infrarouge. Il pourra cependant continuer à scruter le ciel dans l'infrarouge proche jusqu'à mi-2011 au moins. L'Observatoire spatial *Herschel*, lancé en mai 2009, et le télescope spatial *James Webb*, dont le lancement est prévu en 2014, prendront le relais.

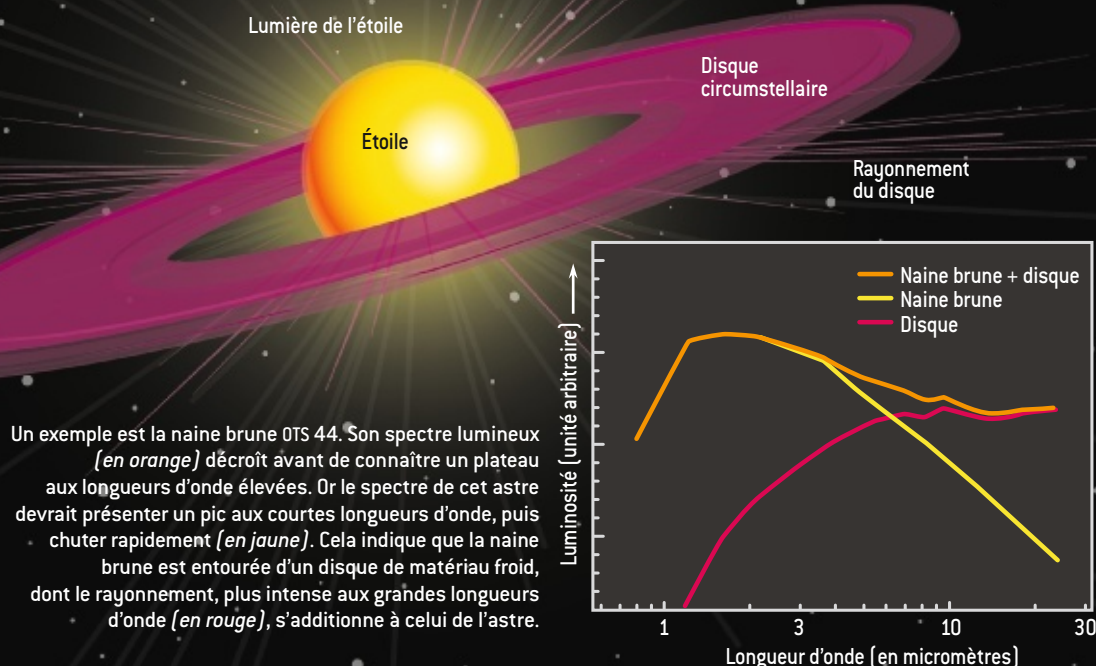
Même lorsque le système stellaire observé est trop lointain pour être spatialement résolu, le spectre lumineux révèle sa composition.



2. C'EST AUTOUR DES ÉTOILES ORDINAIRES, appartenant à la « séquence principale » (bande bien définie dans le diagramme liant la luminosité à la température de surface), que les astronomes ont d'abord recherché des systèmes planétaires semblables au nôtre. Mais il existe des systèmes autour d'objets hors de la séquence principale, telles les naines blanches et les naines brunes.

L'INFRAROUGE RÉVÈLE LES DISQUES ABRITANT LES PLANÈTES

Un disque circumstellaire de poussière et de gaz, comme celui qui a donné naissance aux planètes du Système solaire, absorbe la lumière de l'étoile et réémet une partie de l'énergie sous forme de rayonnement infrarouge. La lumière que nous observons est la somme de ces deux composantes.



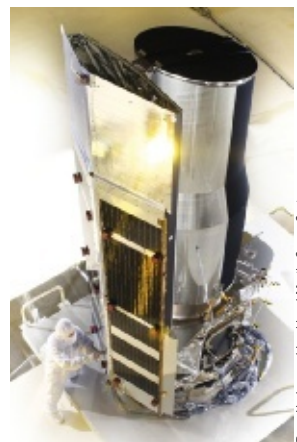
d'une supernova il y a quelque 100 000 ans, et il faut de l'ordre d'un million d'années pour que les planètes s'agglomèrent. Si ce rayonnement infrarouge signale la présence d'un disque de débris, alors ce système pourrait un jour ressembler à celui du pulsar PSR 1257+12.

Des astéroïdes au menu

De nombreuses naines blanches ont aussi des disques, mais d'un type un peu différent : ils trahissent la présence effective de corps en orbite et pas seulement la possibilité d'en former. Comme avec l'étoile 4U 0142+61, l'indice est un excès d'émission infrarouge. En 1987, l'IRTF (*Infrared Telescope Facility*), au sommet du Mauna Kea, à Hawaï, a détecté un excès de lumière infrarouge provenant de la naine blanche G29-38. Le spectre de ce surplus de rayonnement était celui d'un corps ayant une température de 1 200 kelvins, beaucoup plus froid que la surface de l'étoile, à 12 000 kelvins. Les astronomes

ont d'abord pensé qu'une autre étoile plus froide était en orbite autour de la naine blanche. Mais en 1990, ils ont montré que l'émission infrarouge variait à l'unisson avec la luminosité de l'étoile, indiquant un rayonnement réfléchi ou réémis. L'explication la plus vraisemblable est la présence d'un disque circumstellaire chauffé par la naine blanche.

L'étoile G29-38 présente une autre propriété étrange : d'après son spectre lumineux, ses couches externes contiennent des éléments lourds tels que du calcium et du fer. C'est surprenant, car le champ gravitationnel à la surface d'une naine blanche est si intense que ces éléments devraient sombrer dans les profondeurs. En 2003, l'un d'entre nous (M. Jura) a proposé une explication simple à la fois pour l'excès d'infrarouge et pour les éléments lourds : la naine blanche a récemment déchiété un astéroïde qui s'était aventuré dans son intense champ gravitationnel. Une cascade de collisions a réduit les débris en un disque de poussière, qui est en partie tombé à la surface de l'étoile.



3. LE TÉLESCOPE SPATIAL Spitzer, ici en construction, est le pendant pour l'infrarouge du télescope spatial Hubble.

Des observations ont depuis confirmé ce scénario. Des télescopes au sol et le télescope spatial *Spitzer* ont permis d'identifier une quinzaine de naines blanches présentant des excès d'infrarouge et des

tils tels que le carbone et le sodium, par rapport aux éléments plus stables sous forme solide, tels le silicium, le fer et le magnésium. Cette répartition correspond à celle des astéroïdes et des planètes

notée UA) et ne sont pas plus massifs qu'un astéroïde de 30 kilomètres de diamètre, ce qui est en accord avec l'hypothèse qu'ils proviennent de la désintégration d'un tel objet. Ce ne sont pas des lieux de formation de planètes, mais plutôt des indicateurs que du matériau planétaire a survécu à la mort de l'étoile. Des calculs théoriques suggèrent que des astéroïdes et des planètes de type terrestre peuvent survivre à la transformation de leur étoile en géante rouge s'ils gravitent à plus d'une unité astronomique. Quand notre Soleil mourra, par exemple, Mars devrait s'en sortir, alors que le destin de la Terre est incertain.

La naine blanche WD 2226-210 nous donne une idée des régions d'un système planétaire qui pourraient survivre à la fin de l'étoile. Cette naine blanche est toute récente, si bien que les couches externes éjectées par l'étoile de type solaire initiale sont encore visibles sous la forme d'une des nébuleuses planétaires les plus

LES DISQUES OBSERVÉS AUTOUR DES NAINES BLANCHES sont sans doute des astéroïdes réduits en poussière à la suite d'un passage trop près de l'étoile.

anomalies en éléments lourds comparables. Pour G29-38 et sept autres étoiles, *Spitzer* a même identifié l'émission infrarouge de silicates présents dans les disques. Ces silicates ressemblent à la poussière dans le Système solaire et sont très différents de la poussière de l'espace interstellaire. De plus, les éléments lourds ne se trouvent pas en quantités égales dans les couches externes de ces naines blanches. Elles sont déficientes en éléments vola-

rocheuses du Système solaire. Tous ces indices étayent l'hypothèse selon laquelle les disques observés sont des astéroïdes réduits en poussière.

Les disques des naines blanches sont beaucoup plus petits que ceux qui donnent naissance aux planètes autour des jeunes étoiles de type solaire. À en juger par l'émission infrarouge, ils ne s'étendent que sur 0,01 unité astronomique (la distance moyenne du Soleil à la Terre,

LES SYSTÈMES AUTOUR D'ÉTOILES À NEUTRONS

Les étoiles à neutrons, vestiges d'étoiles massives ayant explosé en supernova, sont sans doute les hôtes les plus inattendus pour des systèmes planétaires. L'étoile à neutrons 4U 0142+61, âgée de 100 000 ans, est ceinturée d'un disque de débris stellaires. Ces débris pourraient être en train de s'agréger en briques planétaires (*vue d'artiste à droite*). La présence de planètes a été confirmée autour d'une autre étoile à neutrons, PSR 1215+12. Ses impulsions radio, normalement périodiques, sont légèrement décalées dans le temps (*ci-dessous à droite*), indiquant que l'étoile est perturbée par trois corps en orbite (*à gauche*).

ÉTOILE À NEUTRONS ET DISQUE PROTOPLANÉTAIRE

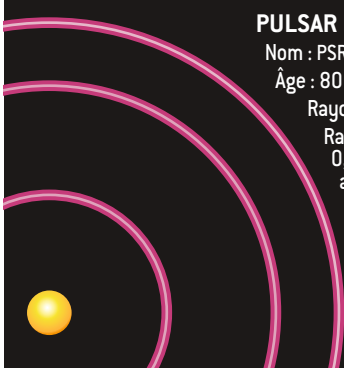
Nom : 4U 0142+61
Âge : 100 000 ans
Rayon de l'étoile : 10 kilomètres
Rayon du disque : 1 unité astronomique



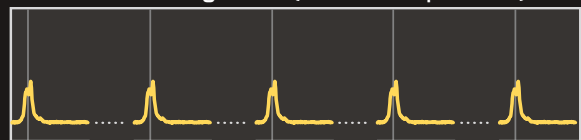
NASA/JPL-CALTECH/R. HURT Spitzer Science Center

PULSAR ET PLANÈTES

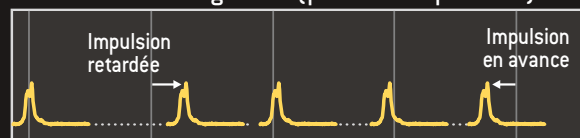
Nom : PSR 1257+12
Âge : 800 millions d'années
Rayon de l'étoile : 10 kilomètres
Rayon des orbites planétaires : 0,19, 0,366 et 0,46 unités astronomiques
Masses des planètes : 0,02, 4,3 et 3,9 masses terrestres



Émissions radio régulières (absence de planètes)



Émissions radio irrégulières (présence de planètes)



Melissa Thomas

célèbres, *Helix Nebula*. WD 2226-210 est le chaînon manquant entre les étoiles de type solaire et les naines blanches plus âgées comme G 29-38. Elle est accompagnée d'un disque poussiéreux qui s'étend jusqu'à 100 UA, une échelle comparable à celle du Système solaire. Ce disque est beaucoup plus étendu que ceux d'autres naines blanches, trop pour qu'il soit constitué d'astéroïdes déshiquetés par la gravité de l'étoile. Il doit plutôt être formé de débris créés par les collisions mutuelles d'astéroïdes ou de comètes.

Par conséquent, quand l'étoile qui a donné naissance à la naine blanche WD 2226-210 est morte, au moins une partie des astéroïdes et comètes devaient se trouver suffisamment loin pour survivre. Et d'éventuelles planètes distantes, *a priori* plus résistantes, devraient avoir également survécu. En se refroidissant, la naine blanche éclairera plus faiblement le disque, dont les régions externes finiront par deve-

nir invisibles. Mais le disque continuera à être la source d'astéroïdes qui s'approcheront assez près de la naine blanche pour être réduits en poussière.

Fausse étoiles, vrais disques

Les naines brunes sont le troisième exemple d'étoiles de type non solaire susceptibles d'héberger des planètes. Elles sont très différentes des naines blanches, malgré leur nom. Elles ne résultent pas de la mort d'une étoile de type solaire : ce sont des objets substellaires. Elles commencent par se former de la même façon que les étoiles mais, pesant moins de huit pour cent du Soleil, elles ne sont jamais devenues assez chaudes et denses pour que la fusion nucléaire se maintienne dans leur cœur. Tout au plus rayonnent-elles en infrarouge la chaleur qu'elles ont accumulée lors de leur formation. Ces

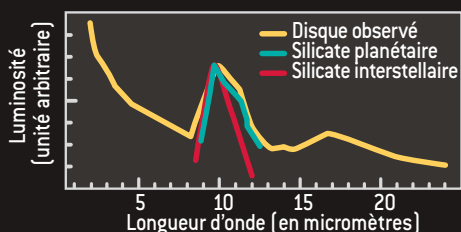
LES AUTEURS



Michael WERNER est responsable scientifique du télescope spatial *Spitzer* de la NASA.
Michael JURA est professeur d'astronomie à l'Université de Californie à Los Angeles.

LES SYSTÈMES AUTOUR DE NAINES BLANCHES

De nombreuses naines blanches s'accompagnent d'un minuscule disque de matériau, sans doute les restes d'un astéroïde pulvérisé par un passage près de l'étoile. Certains disques ont révélé dans leur spectre la signature de silicates (*courbe jaune ci-dessous*). Ce spectre correspond à celui des silicates des corps rocheux du Système solaire (*courbe verte*), plutôt qu'aux silicates interstellaires (*courbe rouge*). Cela suggère que des planètes ont un jour résidé autour de la naine blanche, voire se trouveraient toujours, invisibles, en périphérie du système.



NAINES BLANCHES ET DISQUE D'ACCRÉTION

Nom : G 29-38
Âge : 600 millions d'années
Rayon de l'étoile : 10 000 kilomètres
Étendue du disque : 0,001 à 0,01 unité astronomique

Un second type de disque de débris autour d'une naine blanche est visible (*en rouge*) au centre de cette image infrarouge de la nébuleuse de l'Hélice. Il constitue probablement l'équivalent de la ceinture de Kuiper, une population de petits corps glacés au confins du Système solaire. De tels disques pourraient exister autour d'autres naines blanches, mais ils sont indétectables, car ils ne sont pas assez éclairés par leur étoile.

NAINES BLANCHES ET DISQUE DE DÉBRIS

Nom : WD 2226-210 (nébuleuse de l'Hélice)
Âge : 10 000 ans
Rayon de l'étoile : 10 000 kilomètres
Rayon du disque : 100 unités astronomiques

15 dernières années, les relevés astronomiques ont découvert des centaines de naines brunes, parfois à peine plus massives que Jupiter.

Ces astres, même les plus petits d'entre eux, peuvent posséder des disques et donc peut-être des planètes. Cette possibilité est étayée par des observations montrant que les disques des naines brunes subissent une série de modifications systématiques (dont une baisse de l'émission infrarouge des silicates) attribuables à la coalescence des particules de poussière. Les mêmes changements se produisent

dans les disques d'étoiles plus grosses et signalent la croissance des planétésimaux (les « briques » planétaires). Les disques des naines brunes sont trop peu fournis pour que des planètes aussi massives que Jupiter se forment, mais ils sont largement suffisants pour des planètes comme Uranus ou Neptune. Certaines équipes ont annoncé la découverte de planètes autour de naines brunes, mais aucune de ces affirmations n'est démontrée de façon certaine.

En résumé, les astronomes ont découvert des planètes autour d'au moins une

La course aux nouvelles Terres

En mars 2009, le télescope spatial *Kepler* de la NASA a entamé sa mission de quatre ans ayant pour objectif de découvrir des planètes de type terrestre, ou telluriques. Comme son prédécesseur, le satellite CoRoT du Centre national d'études spatiales français (CNES), lancé en 2006, *Kepler* guette la baisse de luminosité éventuelle chez une des quelque 150 000 étoiles surveillées. Une diminution de l'éclat d'une étoile peut avoir toutes sortes d'explications, mais si elle se produit périodiquement, cela n'est plus du hasard : une planète se trouve certainement sur une orbite qui l'amène à couper la ligne de visée entre le télescope et l'étoile. À chaque passage (ou transit) devant son étoile, la planète bloque une partie de la lumière stellaire. Une planète semblable à la Terre ferait décroître la luminosité de son étoile de l'ordre de 1 pour 10 000 environ.

En 2009, CoRoT a détecté une planète ayant un diamètre près de deux fois plus grand que celui de la Terre. CoRoT 7b – c'est son nom – est en orbite tellement serrée autour de son étoile que l'année n'y dure que 20 heures terrestres ! *Kepler*, avec un miroir trois fois et demie plus grand que celui de CoRoT, devrait trouver des dizaines ou des centaines de simili-Terres en orbite à des distances plus confortables de leur étoile (la méthode de détection la plus féconde, celle des vitesses radiales, fondée sur la petite attraction exercée par la planète sur son étoile, n'est pas sensible à des

planètes aussi petites). Mais pour observer des transits, les orbites des planètes doivent couper notre ligne de visée, ce qui, statistiquement, se produit une fois sur 100 seulement. *Kepler* devrait néanmoins pouvoir recenser un échantillon statistiquement significatif des planètes jumelles de la Terre dans notre Galaxie (à ce jour, il a à son actif 700 candidats planètes, dont 8 seulement sont confirmées).

Mais si les astronomes atteignent cet objectif, il restera encore

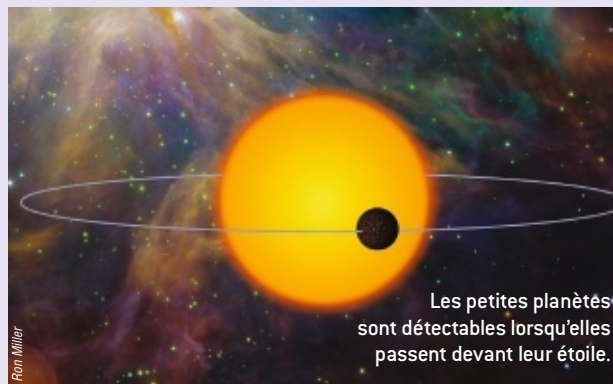
ils ne pourront discerner aucun des indices de la vie. Même la mission SIM (*Space Interferometry Mission*), dont le lancement est prévu vers 2015, ne nous apprendra pas grand-chose sur les planètes telluriques qu'elle découvrira.

Les instruments capables d'évaluer le caractère habitable d'une planète seront disponibles plus tard, principalement en raison de leur coût prohibitif. Les projets TPF (*Terrestrial Planet Finder*) de la NASA et la mission *Darwin* de l'Agence spatiale eu-

Large Telescope européen. Bien qu'ils ne soient pas conçus spécifiquement pour étudier les planètes extrasolaires, ces télescopes seront équipés de coronographes, qui permettent de bloquer la lumière d'une étoile pour observer d'éventuels corps peu lumineux se cachant dans sa couronne stellaire. Ces instruments pourraient produire des images de planètes géantes gazeuses autour des plus proches étoiles (s'il y en a). Ils pourraient aussi recueillir le spectre des objets en orbite serrée.

Ainsi, durant les quelques années à venir, les missions CoRoT et *Kepler* livreront des résultats passionnants, mais ensuite arrivera sans doute une période de frustration où l'on devra se contenter de rêver à ce qui pourrait encore être découvert. Une telle progression par à-coups n'est pas rare en science. Des résultats positifs appuieront certainement le financement de nouveaux observatoires spatiaux. La recherche de planètes dans des environnements extrêmes, tels que le voisinage d'étoiles à neutrons, de naines blanches et de naines brunes, nous montrera dans quelle mesure la formation planétaire est robuste. Mais il faudra encore un investissement de longue haleine pour découvrir quelle place occupe la Terre dans toute la gamme des planètes.

Donald Goldsmith,
ancien éditeur scientifique
et auteur de l'ouvrage
400 Years of the Telescope

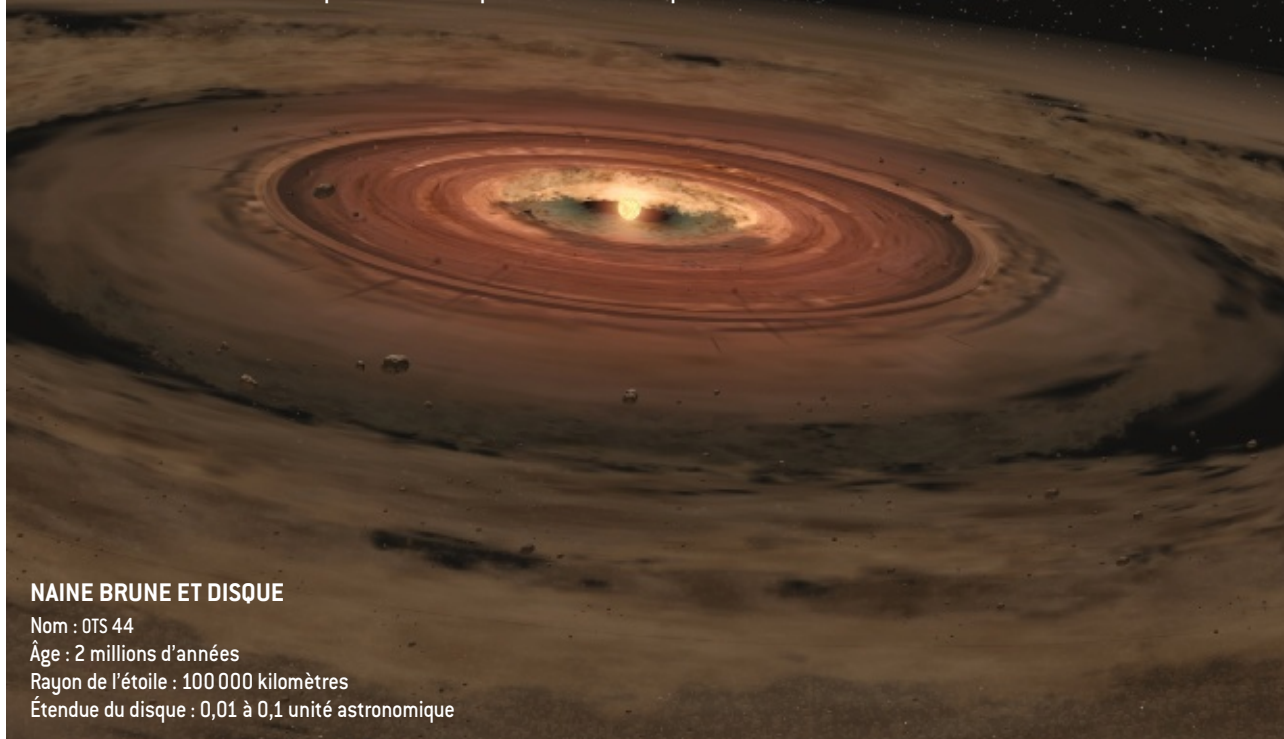


une question cruciale : quelles sont les conditions sur ces planètes ? Sont-elles favorables à la vie ? Lorsqu'une planète géante gazeuse transite devant son étoile, les astronomes peuvent analyser la composition de son atmosphère en mesurant l'absorption de la lumière stellaire à différentes longueurs d'onde. Mais les planètes terrestres sont trop petites pour que cette technique fonctionne. Aussi CoRoT et *Kepler* peuvent-ils trouver d'autres Terres, mais

européenne (ESA) pourraient réaliser des mesures spectroscopiques de la surface et de l'atmosphère des planètes telluriques, mais aucun n'a encore dépassé le stade de l'étude. Un projet commun coûterait près de deux milliards d'euros et prendrait une décennie. Pour l'instant, nos meilleurs espoirs sont le télescope spatial *James Webb* (JWST), dont le lancement est prévu en 2014, et la prochaine génération de grands télescopes au sol, tel l'*Extremely*

De nombreuses naines brunes possèdent un disque au sein duquel des planètes pourraient se former. C'est le cas de la naine brune OTS 44, âgée d'environ deux millions d'années – l'âge auquel on pense que les planètes du Système solaire ont commencé à se former. Son disque contient assez de matériau pour former l'équivalent d'Ura-

nus ou de Neptune. Le fait que des planètes puissent se former dans un environnement aussi peu propice que les abords d'une naine brune, d'une naine blanche ou d'une étoile à neutrons indique que la formation planétaire est un processus beaucoup plus robuste que ne le pensaient les astronomes.



NAINES BRUNES ET DISQUE

Nom : OTS 44

Âge : 2 millions d'années

Rayon de l'étoile : 100 000 kilomètres

Étendue du disque : 0,01 à 0,1 unité astronomique

NASA/JPL-Caltech/T. Pyle/Spitzer Science Center

étoile à neutrons, des astéroïdes et des comètes autour de plus d'une douzaine de naines blanches, et des indices des premières étapes de formation planétaire autour de naines brunes.

À terme, l'étude de ces systèmes extrasolaires a deux objectifs. Tout d'abord, en apprendre davantage sur notre Système solaire, en particulier sur son évolution et sa structure à grande échelle, des caractéristiques difficiles à étudier étant donné les limites de notre perspective temporelle et spatiale. On espère aussi replacer le Système solaire dans son contexte. Est-il représentatif ou fait-il figure d'exception ? La diversité des systèmes planétaires cache-t-elle des processus de formation communs ? La similarité entre la composition des astéroïdes du Système solaire et celle du matériau qui tombe sur les naines blanches suggère que oui.

Le second objectif est de déterminer dans quelle mesure la vie pourrait être répandue dans l'Univers. Dans notre voisinage galactique, les naines brunes sont

à peu près aussi nombreuses que les étoiles. « L'étoile » la plus proche du Soleil est-elle une naine brune qui reste à découvrir ? Les planètes extrasolaires les plus proches sont-elles en orbite autour d'une naine brune ? Le satellite WISE (*Wide-field Infrared Survey Explorer*), lancé par la NASA en décembre 2009, découvrira sans doute dans les années à venir des naines brunes très proches. Les éventuelles planètes telluriques autour des naines brunes n'élargissent pas simplement la gamme des habitats possibles, elles laissent aussi imaginer une vie extraterrestre qui se développe à la faible lueur rougeoyante d'une naine brune.

De même, la présence d'astéroïdes et de comètes autour de naines blanches suggère que les planètes peuvent survivre à la mort d'une étoile de type solaire. Si la vie pouvait s'adapter à de tels changements de conditions, peut-être se maintiendrait-elle dans l'environnement de ces étoiles mortes. Le spectacle des naines blanches ne serait alors pas aussi désespérant. ■

✓ BIBLIOGRAPHIE

I. Cognard et G. Theureau, **Les pulsars, des astres à planètes**, *Dossier Pour la Science* n° 64, juillet-septembre 2009, http://bit.ly/dossier64_pulsars

B. Zuckerman et al., **The chemical composition of an extrasolar minor planet**, *Astrophysical Journal*, vol. 671, n° 1, pp. 872-877, 10 décembre 2007. En ligne sur : <http://arxiv.org/abs/0708.0198>

M. Jura et al., **Externally-polluted white dwarfs with dust disks**, *Astrophysical Journal*, vol. 663, n° 2, pp. 1285-1290, 2007. En ligne sur : <http://arxiv.org/abs/0704.1170>

M. Werner, **L'héritage de Spitzer**, *Pour la Science* n° 388, février 2010, http://bit.ly/pls388_spitzer

D. Ardila, **Les débris des systèmes planétaires**, *Pour la Science* n° 399, mai 2004, http://bit.ly/pls319_ardila

HISTOIRE DES SCIENCES

Un théorème géométrique parmi les *Pensées* de Pascal



Des notes de géométrie de Pascal ont été retrouvées au verso d'un feuillet des Pensées, révélant les coulisses d'un de ses ouvrages mathématiques, les Lettres de A. Dettonville.

Dominique DESCOTES

L'œuvre mathématique de Blaise Pascal (1623-1662) ne nous est connue que de manière partielle. Rien ne subsiste des manuscrits originaux de son grand traité sur les coniques – intersections d'un plan et d'un cône – ni de sa correspondance avec Pierre Fermat sur la « géométrie du hasard », réflexions sur les jeux de hasard qui annoncent le calcul des probabilités. Surtout, les manuscrits de ses ouvrages imprimés au XVII^e siècle, le *Traité du triangle arithmétique* et les *Lettres de A. Dettonville*, ont été détruits. Dans le premier, Pascal étudie les propriétés du triangle arithmétique, organisation des nombres entiers en triangle rectangle qui facilite le calcul de sommes de suites d'entiers ; le second est en partie consacré à la cycloïde, une courbe décrite par un point fixé au bord d'une roue lorsque celle-ci roule sans glisser le long d'une droite (voir la figure 2). Comme la plupart des traités mathématiques de l'époque, ces deux ouvrages ne nous offrent qu'un produit pour ainsi dire achevé : ils sont entièrement rédigés sous forme rhétorique, voire littéraire. Jusqu'à présent, faute de tout manuscrit original autographe, nous ne disposons d'aucune trace de la manière dont Pascal préparait son texte, et on admettait couramment qu'il n'avait jamais employé d'écriture symbolique, de quelque type qu'elle soit.

Paradoxalement, c'est le *Recueil* des manuscrits originaux des *Pensées* de Pascal, déposé à la Bibliothèque nationale de France, et surtout connu parce qu'il contient les grands textes religieux et moraux de Pas-

