

À la recherche des exoplanètes

Depuis bientôt 15 ans, plus de 350 planètes extrasolaires ont été détectées. Leurs caractéristiques orbitales et leurs propriétés physiques, parfois inattendues, ont bouleversé notre compréhension de la formation planétaire.



ESA, A. Vidal-Madjar (AP, CNRS, France) et NASA.

Anne-Marie LAGRANGE travaille au Laboratoire d'astrophysique de l'Observatoire de Grenoble.

Gaël CHAUVIN travaille au Laboratoire d'astrophysique de l'Observatoire de Grenoble.

En octobre 1995, Michel Mayor et Didier Queloz, de l'Observatoire de Genève, annoncent la détection, depuis l'Observatoire de Haute-Provence, d'une planète géante autour de l'étoile 51 Pegasi. On l'a nommée 51 Pegasi b. Cette première exoplanète, ainsi que l'on désigne les planètes en orbite autour d'une étoile autre que le Soleil, récompense une quête de plusieurs années.

Avant 1995, des disques planétaires ou proto-planétaires avaient certes été observés ; plusieurs études décelaient même la signature indirecte d'exoplanètes ayant sculpté ces disques. Quelques planètes avaient aussi été détectées autour de pulsars (des étoiles à neutrons, vestiges de l'explosion d'étoiles massives), mais les planètes autour d'étoiles semblables au Soleil restaient cachées, à tel point que les astronomes commençaient à douter de leur existence.

Outre l'espoir d'autres détections, 51 Pegasi b apporta aux astronomes une surprise de taille : d'une masse au moins égale à celle de Jupiter, elle se trouve environ 100 fois plus près de son étoile que ne l'est Jupiter du Soleil. Cette particularité a conduit à revoir les scénarios de formation et d'évolution des systèmes planétaires.

La recherche d'exoplanètes s'est intensifiée après cette première découverte, conduisant à la détection de plus de 350 nouvelles planètes, des géantes gazeuses pour la plupart, et depuis

peu des planètes plus légères et telluriques, c'est-à-dire ayant une surface solide. En outre, alors qu'elle s'est focalisée pendant longtemps sur les alentours des étoiles de type solaire, cette recherche s'est ouverte récemment à d'autres classes d'étoiles, plus ou moins jeunes et plus ou moins massives, les étoiles les plus légères étant les plus nombreuses dans notre galaxie. On peut ainsi étudier l'influence de l'âge et de la masse de l'étoile centrale sur la formation des systèmes planétaires.

51 Pegasi b avait été détectée par vélocimétrie, méthode qui consiste à mesurer les variations de vitesse radiale de l'étoile dues à la planète, et qui ne fournit qu'une masse minimale pour celle-ci (voir la figure page 56).

En 1999, des astronomes déterminaient pour la première fois le rayon d'une exoplanète, HD209458 b, par la méthode dite des transits (on observe la diminution de lumière due au passage de la planète devant l'étoile). Le couplage avec les données vélocimétriques a aussi permis d'établir la masse exacte de la planète. Depuis, une soixantaine de transits d'exoplanètes ont été observés. Grâce à ces nouvelles mesures, nous commençons à percer les intérieurs planétaires ainsi que la composition chimique de leur atmosphère.

Et l'imagerie directe ? Sommes-nous capables de « voir » les exoplanètes ? Oui, depuis 2005. Le



Jupiters chauds collés à leur étoile (à gauche, la planète HD209458 b perd son atmosphère), planètes orbitant autour d'une naine brune (à droite, la planète 2M1207 b), super-Terres d'où l'on assiste, peut-être, au coucher d'une étoile naine rouge sur un océan d'eau liquide (ci-dessus)... L'ère des exoplanètes a révélé une diversité de mondes étonnante. Et ce n'est qu'un début!

premier corps « imagé » de masse planétaire, c'est-à-dire de masse inférieure à 13 fois celle de Jupiter, tourne autour d'une naine brune, un astre trop petit pour enclencher des réactions nucléaires de fusion de l'hydrogène, à une distance comparable à celle qui sépare Pluton du Soleil. Depuis, nous avons pu « imager » une dizaine d'autres exoplanètes, orbitant à des distances variables autour de véritables étoiles.

Nous verrons que ces découvertes, toujours plus nombreuses, ont révélé une diversité insoupçonnée jusqu'alors, et qu'il faut, bien sûr, expliquer.

Des exoplanètes en nombre !

Plusieurs milliers d'étoiles semblables au Soleil sont ou ont été suivies par vélocimétrie. La majorité des quelque 350 exoplanètes détectées sont des géantes. Celles-ci ne sont donc pas rares : au moins sept pour cent des étoiles de type solaire ou un peu plus froides (l'essentiel des étoiles connues) observées régulièrement « abritent » une planète géante dans un rayon de quatre ou cinq unités astronomiques, soit la distance de Jupiter au Soleil. La proportion réelle d'étoiles entourées de planètes est probablement supérieure, puisque l'on commence seulement à pouvoir détecter les planètes plus éloignées et plus légères (de l'ordre de quelques masses terrestres).

Or selon les théories de formation planétaire, les planètes de ce dernier type devraient être les plus nombreuses. Les premiers résultats statistiques semblent confirmer cette prédiction : une trentaine d'exoplanètes de masse inférieure à 30 fois celle de la Terre, dont une quinzaine de super-Terres, ont déjà été détectées, conduisant certains astronomes à proposer que de telles planètes sont présentes autour de 30 pour cent des étoiles de type solaire (voir *Super-Terres en vue!*, par François Bouchy, page 72).

Environ 12 pour cent des systèmes découverts abritent au moins deux planètes. De nouveau, la proportion de ces systèmes « multiples » est sous-estimée, car leur caractérisation est délicate et requiert plus de temps d'observation que la détection de systèmes simples. Les systèmes multiples, à l'instar du Système solaire, sont probablement plus communs que ceux à une seule planète. Dans la plupart d'entre eux, les planètes n'évoluent pas sur des orbites quelconques : leurs périodes orbitales sont reliées par des relations de proportionnalité ; on parle de résonances de moyen mouvement. Les planètes se sont installées sur ces orbites en raison de leurs interactions gravitationnelles mutuelles, comme le montrent les modèles d'évolution dynamique des systèmes planétaires (voir *Les systèmes planétaires sont-ils pleins à craquer?*, par Steven Soter, page 112).

L'ESSENTIEL

- ➔ La plupart des planètes extrasolaires connues sont massives et situées près de leur étoile. C'est un biais observationnel, ces planètes étant plus faciles à détecter.
- ➔ L'amélioration des techniques permet toutefois déjà de détecter des planètes plus petites, probablement telluriques.
- ➔ Dans certains cas, nous savons même déterminer la composition de l'atmosphère des exoplanètes.
- ➔ De nouvelles techniques ont aussi produit des images de planètes orbitant très loin de leur étoile.

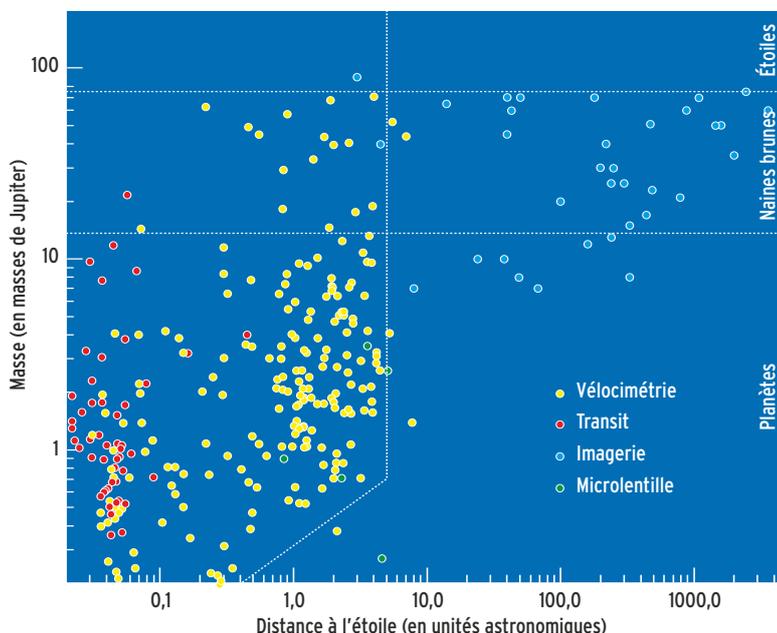
DES PLANÈTES FLOTTANTES

Dans les années 2000, plusieurs objets de quelques masses de Jupiter ont été détectés dans des amas d'étoiles jeunes (entre un et dix millions d'années) de la région d'Orion. Ces objets, de masse comparable à celle de planètes, n'évoluent pas en orbite autour d'une étoile, mais sont « isolés » : ce sont des planètes flottantes. Une première hypothèse stipulait que ces objets se sont formés autour d'une étoile pour être ensuite éjectés : ce scénario semble maintenant écarté, au profit d'une formation par effondrement gravitationnel, comme c'est le cas pour les étoiles. Selon la définition de l'Union astronomique internationale, une planète est un corps de moins de 13,6 fois la masse de Jupiter en orbite autour d'une étoile ou de ses restes. Le terme de « planète flottante » est donc impropre et on a proposé de les nommer « sous-naines brunes » ou planémos.

Outre une grande variété dans les masses des exoplanètes et dans leurs distances à leur étoile (voir la figure ci-dessous), on constate aussi une grande diversité en termes d'excentricité des orbites. Dans un système elliptique, l'excentricité est le rapport de la distance entre les foyers de l'ellipse et le plus grand axe. Ce rapport varie entre 0 et 1 et est d'autant plus grand que l'ellipse est allongée. Contrairement aux planètes du Système solaire qui évoluent sur des orbites quasi circulaires (l'excentricité est proche de zéro), beaucoup d'exoplanètes dont la période est supérieure à six jours ont des orbites notablement elliptiques.

Plusieurs hypothèses ont été proposées pour expliquer ce phénomène, en particulier des interactions gravitationnelles avec d'autres planètes (dans les systèmes hébergeant plusieurs géantes), avec des planétésimaux (les briques de formation des planètes) résiduels, ou avec une étoile qui passerait près du système. Toutefois, aucun scénario ne reproduit l'ensemble des observations. Les orbites circulaires des planètes de période inférieure à six jours résulteraient

LES EXOPLANÈTES CONNUES se situent dans des domaines précis de masses et de distances orbitales, en fonction de la sensibilité de chaque technique de détection utilisée. À moyen terme, on espère sonder l'ensemble des domaines possibles.



quant à elles de phénomènes de marée entre la planète et son étoile.

On connaît aujourd'hui près de 100 planètes à très courte période (inférieure à dix jours), évoluant près de leur étoile hôte, comme 51 Pegasi b. Cette dernière n'était donc pas une exception ; on la considère désormais comme le prototype d'une classe de planètes proches de leur étoile, et nommées « Jupiters chauds » ou encore « Pégasides ». De telles planètes n'étaient pas prévues dans les scénarios de formation et d'évolution des systèmes planétaires. En conséquence, ceux-ci ont dû être enrichis, notamment avec divers phénomènes de migration planétaires (voir *La naissance des planètes : tohu-bohu dans les nuages*, par Douglas Lin, page 98).

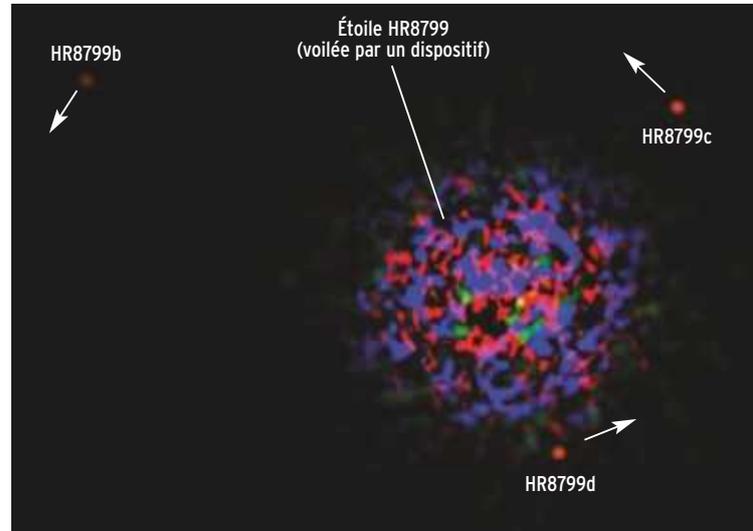
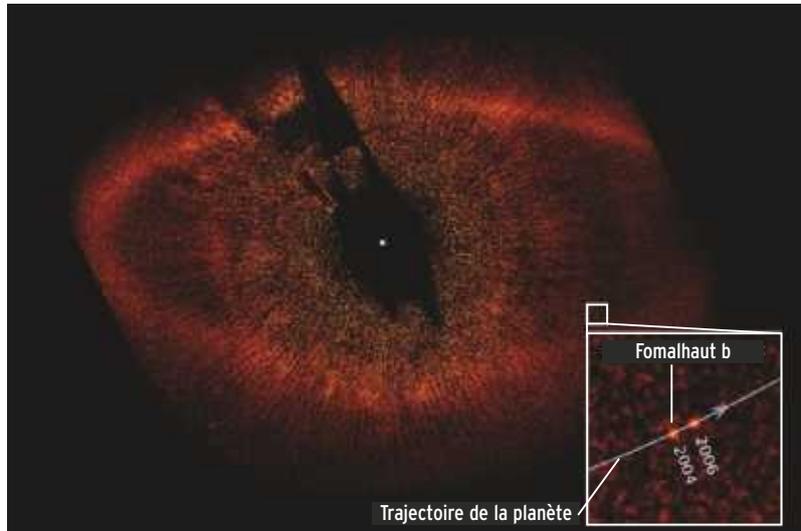
Les mystérieuses Pégasides

Les Pégasides, parce qu'elles sont proches de leur étoile, constituent une « niche observationnelle » intéressante pour la recherche de transits photométriques. L'observation de ces phénomènes, combinée aux données vélocimétriques, nous donne accès à la densité moyenne des planètes. On en déduit des informations précieuses sur leur structure, notamment la taille et la composition de leur noyau. Des analyses spectroscopiques peuvent aussi parfois sonder l'atmosphère des planètes : on a ainsi détecté, grâce au télescope spatial *Hubble*, de l'eau et du dioxyde de carbone dans l'atmosphère de HD189733b.

La quasi-totalité des transits détectés sont le fait de planètes géantes, qui tournent en moins de dix jours autour de leur étoile ; leur rayon varie entre 0,4 et 1,6 fois celui de Jupiter, pour une masse comprise entre 0,07 et 10 fois sa masse. Un seul transit concernerait une planète tellurique, CoRoT-7b. Celle-ci fait le tour de son étoile en une vingtaine d'heures ; c'est la planète à plus courte période jamais observée. Sa masse se situe autour de sept masses terrestres, pour un rayon presque deux fois plus grand que celui de notre planète.

Les mesures révèlent des densités très diverses au sein de la classe des Pégasides : HD147506 b, une planète géante, est presque huit fois plus dense que Jupiter (dont la densité vaut 1,3 gramme par centimètre cube) et 35 fois plus que HD209458 b. Les Jupiters chauds, principalement constitués d'hydrogène et d'hélium, contiennent donc une quantité variable de « métaux », ce terme désignant en astronomie tout élément chimique plus lourd que l'hydrogène et l'hélium. D'après les travaux de Tristan Guillot, de l'Observatoire de Nice, cette quantité peut représenter jusqu'à 100 masses terrestres.

Les planètes les plus riches en éléments lourds tourneraient autour d'étoiles elles-mêmes riches en métaux, indiquant une corrélation entre la métallicité des étoiles et celle des planètes.



La métallicité des étoiles serait également déterminante lors de la formation d'une planète géante. On s'est en effet aperçu que les étoiles abritant de telles planètes sont souvent plus riches en métaux que le Soleil, constitué de 80 pour cent d'hydrogène, 18 pour cent d'hélium et deux pour cent d'éléments plus lourds : les trois quarts des planètes détectées orbitent autour d'étoiles à plus forte métallicité (jusqu'à quatre fois supérieure) que la nôtre. Ce fait observationnel concorde bien avec le scénario de formation planétaire par accréation sur un cœur rocheux, puisqu'une forte métallicité de l'étoile implique une abondance de métaux dans le disque, et donc une densité élevée de celui-ci, favorable à la croissance des noyaux planétaires.

La masse de l'étoile centrale aurait aussi une influence : son augmentation irait de pair avec celle de la fréquence et de la masse des planètes. Nous n'avons toutefois étudié pour l'instant qu'un faible nombre d'astres de masse différente de celle du Soleil, et ce résultat reste à confirmer. Il serait en tout cas en accord avec les modèles de formation planétaire au sein d'un disque, selon lesquels il se forme d'autant plus de planètes, et d'autant plus massives, que la masse du disque (qu'on suppose liée à celle de l'étoile centrale) est élevée.

Voir les exoplanètes lointaines

En 2005, notre équipe réalisait, grâce à un instrument d'imagerie « haute résolution et haut contraste » installé sur le VLT, la première image d'un objet de masse planétaire : celui-ci, entre trois et sept fois plus massif que Jupiter, évolue à environ 40 unités astronomiques de la naine brune 2M1207 (voir la figure page 53). La même année, on observait d'autres corps, un peu plus massifs que des planètes, cette fois-ci autour de véritables étoiles. Enfin, en 2008, plusieurs corps de masse

planétaire ont été imagés autour d'étoiles, notamment un système de trois géantes gravitant autour de HR8799, et une planète d'une masse inférieure à trois fois celle de Jupiter, située à environ 100 unités astronomiques de l'étoile Fomalhaut (voir la figure ci-dessus).

Certains des corps découverts sont très éloignés de leur étoile, jusqu'à 260 unités astronomiques pour AB Pic b. Comment ces compagnons de masses planétaires ont-ils pu se former si loin ? Le scénario classique d'accréation *in situ* du gaz sur un cœur rocheux, dans un disque en rotation, est à écarter. En effet, à ces distances, les quantités de matière disponibles sont trop faibles, et les échelles de temps requises trop longues. Ces corps se sont probablement formés par effondrement gravitationnel, soit du nuage de gaz et de poussière primordial (à l'instar d'une étoile compagnon dans un système binaire), soit, plus tard, du disque sous l'effet de perturbations locales. Ils ont aussi pu naître près de l'étoile, puis migrer vers l'extérieur (voir *Planètes migratrices*, par Caroline Terquem, page 108). Rien n'exclut que plusieurs mécanismes puissent diriger la formation des corps de masse planétaire.

Sommes-nous aussi capables de « voir » des planètes nées selon le scénario classique de formation par accréation sur un cœur rocheux et restées proches de leur étoile ? Oui, notre équipe a ainsi récemment détecté un corps qui orbite à huit unités astronomiques autour de *bêta*-Pictoris ; ce serait, si le lien gravitationnel entre ce corps et l'étoile est confirmé, la planète la plus proche de son étoile jamais imagée. Notons que *bêta*-Pictoris est entourée d'un disque de poussière, dont l'observation avait permis de prédire la présence de planètes en son sein (voir *Des poussières dans les systèmes planétaires*, par David Ardila, page 60).

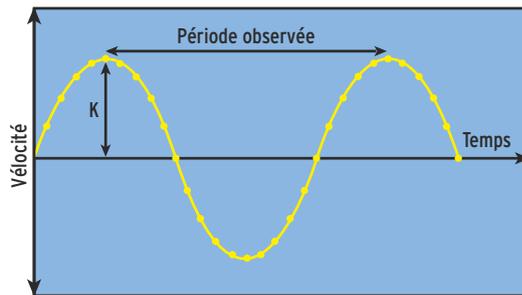
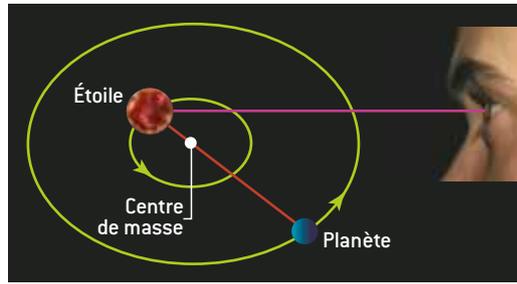
Toutes les planètes détectées en imagerie sont jeunes (entre 10 et 200 millions d'années)

LES PREMIÈRES IMAGES d'exoplanètes. Fomalhaut b, (à gauche) est une planète de moins de trois fois la masse de Jupiter, située à 119 unités astronomiques de l'étoile Fomalhaut, à 25 années-lumière de la Terre. À droite, un système de trois planètes est en orbite autour de HR8799, à plus de 130 années-lumière.

QUELQUES RECORDS

- L'étoile la plus lourde dotée d'une planète :** HD13189 (4,5 masses solaires)
- L'étoile la plus légère dotée d'une planète :** 2M1207 (0,025 masse solaire, c'est une naine brune)
- Planète la plus proche de son étoile :** CoRoT-7 b (0,017 unité astronomique)
- Planète la plus éloignée de son étoile :** USCoCTIO 108 b (670 unités astronomiques)
- Planète la plus lourde :** HD43848b (25 masses de Jupiter)
- Planète la plus légère :** GL 581 e (deux masses terrestres)

LA MÉTHODE DES VITESSES RADIALES. Selon les lois de Kepler, quand une planète orbite autour d'une étoile, les deux objets gravitent chacun autour du centre de masse du système (*en haut*). Ainsi, vue de la Terre, l'étoile avance et recule alternativement. En conséquence, la lumière émise par l'étoile est modifiée par effet Doppler : les longueurs d'onde de certaines raies d'absorption spectrales augmentent et diminuent de façon périodique (*en bas*). De l'amplitude K et de la période observées, on peut déduire la distance séparant l'étoile de la planète, et la masse de celle-ci.



et relativement proches de nous (elles se trouvent à moins de 160 années-lumière). C'est ce qui explique que nous puissions les imager avec les instruments actuels : la proximité aide à voir « plus près » des étoiles, et la jeunesse des systèmes implique des planètes encore chaudes, donc plus brillantes que des planètes de même masse situées dans des systèmes plus âgés. Ces planètes autour d'étoiles jeunes et proches nous fournissent également de précieuses indications sur les échelles de temps associées aux processus de formation et d'évolution des systèmes planétaires.

articles

- A. EGGENBERGER *et al.*, *Detection and characterization of extrasolar planets through Doppler spectroscopy*, in *Proceedings of the Les Houches winter school « Physics and astrophysics of planetary systems »*, EDP Sciences, à paraître, 2009. <http://arxiv.org/abs/0904.0415>
- J.-Ph. BEAULIEU et G. TINETTI, *Quelles molécules dans les atmosphères des exoplanètes ?*, in *Dossier Pour la Science Où est née la vie ?*, janvier-mars 2009.
- I. BARAFFE, G. CHABRIER et T. BARMAN, *Structure and evolution of super-Earth to super-Jupiter exoplanets*, in *Astronomy and Astrophysics*, vol. 482, pp. 315-332, 2008.
- P. KALAS *et al.*, *Optical images of an exosolar planet 25 light-years from Earth*, in *Science*, vol. 322, pp. 1345-1348, 2008.
- C. MAROIS *et al.*, *Direct imaging of multiple planets orbiting the star HR 8799*, in *Science*, vol. 322, pp. 1348-1352, 2008.

internet

- L'Encyclopédie des planètes extrasolaires : www.exoplanet.eu

qui vient d'entrer en fonction sur le VLT, puis avec le satellite GAIA, lèveront l'incertitude sur les masses des planètes. La recherche systématique de transits autour de dizaines de milliers d'étoiles depuis l'espace, notamment par les satellites *CoRoT* et *Kepler*, lancés respectivement en 2006 et 2009, amènera aussi son lot de détections, parmi lesquelles des dizaines de planètes solides ; on pourra en outre mesurer leur rayon et analyser leur atmosphère par spectroscopie. De nombreuses surprises nous attendent sans doute, et nous devons vraisemblablement encore diversifier les modèles de formation et d'évolution des systèmes planétaires. Ceux-ci devront de plus intégrer les contraintes apportées par l'étude de planètes autour d'étoiles différentes du Soleil (plus ou moins massives et à des stades d'évolution variables), qui va se développer.

Si les instruments actuels d'imagerie à haut contraste sont limités aux planètes géantes à longue période orbitant autour d'étoiles jeunes, leurs successeurs, tel SPHERE, prévu pour équiper le VLT en 2011, pourront « voir » plus près des étoiles, et dans des systèmes un peu plus âgés. Le télescope spatial *James Webb*, qui prendra la relève de *Hubble* en 2013, offrira des possibilités analogues et des informations complémentaires en longueurs d'onde.

À l'horizon 2015-2020, les futurs télescopes géants, dont les miroirs mesureront entre 30 et 60 mètres de diamètre, permettront d'imager des planètes de moins en moins massives et de plus en plus près de leur étoile, que celle-ci soit jeune ou vieille. On aura enfin la possibilité de sonder, pour chaque étoile, l'espace des séparations et des masses planétaires possibles. La détection par imagerie d'« exo-Terres » nécessitera quant à elle soit des télescopes optiques encore plus grands, soit des télescopes de plus petite taille, assemblés en un réseau interférométrique installé dans l'espace.

La caractérisation des propriétés physico-chimiques des exoplanètes et en particulier l'étude de leur atmosphère constitue un des objectifs les plus importants, à la fois pour les planètes géantes et pour les planètes telluriques. C'est pourquoi les modes d'imagerie des instruments à venir seront accompagnés de modes spectroscopiques qui détermineront la composition chimique de l'atmosphère des planètes (ammoniac, méthane, eau, monoxyde de carbone, ozone...), mais qui étudieront aussi la formation des nuages et leur activité climatique.

Enfin, on espère bien sûr détecter un jour les premières signatures de vie sur des analogues de la Terre. Avant même d'atteindre cet objectif, on aura, d'ici une dizaine d'années, une vision renouvelée de la variété des mondes ainsi qu'une meilleure compréhension des origines des planètes. ■