



INSTITUT DE FRANCE  
Académie des sciences

---

*Séance solennelle de l'Académie des sciences / 15 juin 2010*  
*Réception des nouveaux Associés étrangers sous la coupole de l'Institut de France*

**L'étonnante diversité des planètes extrasolaires**  
**Michel Mayor,**  
**Associé étranger de l'Académie des sciences**  
**Université de Genève (Suisse)**

*Introduction*

Pluralité des mondes ? Pluralité des mondes habités ? Ces deux questions étaient déjà présentes dans les interrogations des philosophes grecs voici plus de deux mille ans. Les progrès réalisés dans le domaine de l'instrumentation astronomique ont transformé ces rêves de l'humanité en un domaine de l'astrophysique actuelle.

Voici une quinzaine d'année les premières planètes extrasolaires ont été découvertes et aujourd'hui plus de 450 ont été identifiées et caractérisées.

Passée la satisfaction d'avoir prouvé l'existence des planètes extrasolaires, quel est le but de ces recherches ?

Le but premier est certainement de comprendre les mécanismes de la formation des systèmes planétaires et en particulier du système solaire. Au gré des découvertes surprenantes, nous réalisons la complexité de ces mécanismes et la compréhension encore fort limitée que nous en avons.

Le second but, plus ambitieux, est de chercher une réponse à la deuxième interrogations des philosophes de l'Antiquité : Y a-t-il une pluralité des mondes habités ? De la même manière que les éléments chimiques sont le résultat de l'évolution des étoiles, que les planètes sont des « sous-produits » de la formation stellaire, la vie est-elle une conséquence de l'évolution de l'univers ? Si les conditions physico-chimiques adéquates sont présentes, la chimie conduit-elle à la réalisation d'organismes vivants ?

Une telle question peut paraître trop ambitieuse pour la science de notre époque. Il n'en est rien et nous esquisserons ultérieurement les pistes d'une telle recherche.

La détection de disques de gaz et poussières en rotation rapide autour des étoiles jeunes, d'abord par spectroscopie infrarouge voici plus de 30 ans, puis par imagerie à l'aide du télescope spatial Hubble en 1995, suggéraient que les sites de formation planétaire étaient omniprésents. On pouvait donc estimer qu'il en était de même pour les systèmes planétaires. Le scénario proposé voici 40 ans par Viktor Safronov pour décrire la formation planétaire débute avec l'agglomération de poussières ou de grains de glace dans le disque d'accrétion associé à l'étoile, ceci dans les premiers millions d'années après sa formation. Cette agglomération conduit à la formation de corps de plus en plus massifs jusqu'à atteindre des masses planétaires. Un tel scénario n'implique pas de circonstances spécifiques et l'on pouvait

spéculer qu'a priori l'immense majorité des étoiles devaient être entourées d'un cortège planétaire.

Les découvertes récentes confirment cette vue.

Si l'immense majorité des étoiles ont des systèmes planétaires, comment les détecter ?

#### *Quelques mots relatifs aux techniques de détection*

Jusqu'à très récemment, l'imagerie directe n'était pas possible en raison du contraste très grand entre la luminosité stellaire et celle de la planète. À titre d'exemple, Jupiter ne réfléchit qu'un milliardième de la luminosité solaire.

Quelques premières images d'exoplanètes ont pu être obtenues récemment pour des planètes massives, à relativement grande distance de leurs étoiles hôtes. En raison de leur masse et leur de leur grande séparation, il est probable que le mécanisme de formation de certains parmi ces compagnons substellaires n'est pas celui de l'agglomération de grains.

Mais la voie est ouverte et à n'en pas douter l'imagerie planétaire connaîtra un développement notable dans un futur très proche. Des développements instrumentaux importants sont en cours pour détecter des planètes de plus faibles masses. Des chercheurs français ont inscrits à leur palmarès l'obtention de plusieurs des premières images d'exoplanètes.

À défaut d'imagerie directe, les astronomes ont mis en place des méthodes de détections indirectes. L'essentiel de notre connaissance actuelle des exoplanètes a été acquise par ces techniques : spectroscopie Doppler, transits planétaires ou effets de microlentilles gravitationnelles.

Les faibles variations des longueurs d'onde stellaire, mesurées par effet Doppler, permettent la détection des planètes et la caractérisation de leur orbite. Plus de 350 planètes ont été découvertes par cette technique. Une longue tradition de collaboration lie les chercheurs suisses et français pour la réalisation de spectrographes conçus spécifiquement pour la mesure des vitesses stellaires.

Au cours de 40 dernières années, la sensibilité de ces diverses générations d'instruments s'est accrue d'un facteur 1000, ouvrant la porte à la découverte de planètes de plus en plus légères. À ce jour, cette collaboration a permis la découverte de la moitié de toutes les exoplanètes connues.

Dans des cas rares, le transit d'une planète devant le disque stellaire permet la détermination du diamètre planétaire et donc, la masse étant connue par la spectroscopie Doppler, nous accédons à sa densité moyenne, premier pas vers une étude de son intérieur. Cette technique est en fait beaucoup plus riche quant à ses possibilités et ouvre la porte à l'exoplanétologie comparée, un domaine nouveau qui rapprochera les astronomes et les géophysiciens.

Les rayons lumineux issus d'une source lointaine peuvent être défléchis par des masses se trouvant sur la ligne de visée. Ces masses (étoiles ou planètes) agissent comme des lentilles gravitationnelles. Cette technique nous permet la découverte de planètes à demi-grand axes importants, un domaine difficilement accessible aux autres techniques mentionnées. Cette technique a un intérêt statistique et nous permet d'estimer la fréquence des planètes dans les régions périphériques des systèmes planétaires.

#### *La diversité des systèmes exoplanétaires*

En 1995, la découverte, à l'observatoire de Haute-Provence, de la première planète autour d'une étoile de type solaire, l'étoile 51 Pégase, non seulement apportait la preuve de l'existence de planètes extrasolaires, elle mettait en outre en évidence un effet physique majeur devant être pris en compte lors de la formation des systèmes planétaires : la migration orbitale.

Les caractéristiques observées de la planète 51 Peg b surprisent : une masse typique des planètes géantes gazeuses, la moitié de la masse de Jupiter, mais une période orbitale aussi courte que 4,23 jours.

La formation de planètes géantes requière l'agglomération de grains de glace à des distances de 5 unités astronomiques ou plus (des périodes orbitales supérieures à 10 ans !). L'existence d'une planète géante gazeuse à l'intérieur de la ligne des glaces (d'un facteur 1000) impliquait donc l'existence d'une importante migration orbitale depuis le lieu de la formation planétaire. L'explication de l'origine de cette migration orbitale et de son arrêt à une distance si proche de l'étoile a été donnée dans les semaines qui suivirent l'annonce de la découverte de ce prototype des « Jupiters chauds ». L'interaction gravitationnelle entre le disque d'accrétion et la planète est à la base de cette migration, phénomène physique majeur de la formation des systèmes planétaires.

Les nombreuses planètes extrasolaires découvertes ont révélés une diversité insoupçonnée de leur structure : des périodes orbitales parfois inférieures à 24 heures, des orbites fortement excentriques à l'opposé des orbites quasi-circulaires propres aux planètes de notre système et finalement des masses excédant parfois de beaucoup celle de Jupiter. La découverte des systèmes multiplanétaires a encore accru cette diversité. Dans ce contexte le système solaire n'est certainement pas un exemple représentatif de la majorité des systèmes exoplanétaires.

Récemment l'analyse des transits planétaires a permis d'établir que certaines planètes ont des orbites rétrogrades par rapport à la rotation propre de l'étoile.

D'autres planètes ont des orbites fortement inclinées par rapport au plan équatorial de l'étoile. Des caractéristiques qui ne s'expliquent certainement pas à l'aide de la seule migration orbitale. Tant les fortes excentricités que ces surprenantes inclinaisons orbitales montrent l'importance des phénomènes dynamiques pour comprendre la diversité des systèmes planétaires.

#### *L'émergence d'une population de super-terres et de Neptune autour des étoiles de type solaire*

Au cours des 30 dernières années, la précision des mesures de vitesse stellaire s'est améliorée d'un facteur 1000. Aujourd'hui des variations des vitesses stellaires de 0,3 m/s sont mesurées et permettent la détection de planètes de l'ordre de la masse de la Terre. Un vaste programme effectué à l'observatoire austral de la Silla nous a permis d'identifier une population de planètes peu massives en orbites serrées autour des étoiles de type solaire.

Ces planètes ont des masses comprises entre 1,5 fois celle de notre Terre (valeur de la plus petite planète détectée à ce jour) et une trentaine de fois cette masse.

Les planètes de masses comprises entre une et dix masses terrestres sont appelées par commodité super-terres. Plus de 30% des étoiles sont entourées de telles planètes ayant des orbites de courtes périodes ( de quelques jours à quelques dizaines de jours), faisant partie très fréquemment de systèmes multiplanétaires.

Là encore ces structures sont absentes du système solaire. Quelle est la nature de ces planètes, quels sont les mécanismes de leur formation : planètes rocheuses pouvant avoir une surface de roches fondues, planètes océans, (planètes de glace s'étant approchées de l'étoile jusqu'à avoir un océan profond en surface), etc. À la diversité des structures des systèmes planétaires s'ajoute cette très grande diversité des compositions et structures internes.

#### *Les transits planétaires et leur apport exceptionnel à l'étude des exoplanètes*

L'existence de planètes à très courtes périodes a immédiatement suggéré la possibilité de transits planétaires, des transits qui peuvent être détectés par de faibles baisses périodiques de la luminosité stellaire. En septembre 1999, un premier transit était observé et permettait la détermination du rayon et de la densité moyenne de cette planète. La densité estimée de 0,3 apportait alors la preuve que ces « Jupiters chauds » étaient bien des planètes géantes gazeuses... et ainsi convainquait les derniers sceptiques de la communauté scientifique !

Le transit de Jupiter devant le Soleil provoquerait, si on pouvait l'observer, une baisse de 1% de sa luminosité, une détection possible depuis le sol. Le transit d'une Terre devant une étoile

solaire ne créerait qu'une baisse de 0.01%. Une telle mesure n'est possible que depuis l'espace au dessus de l'atmosphère terrestre. Le CNES a conçu puis lancé le satellite CoRoT, voici quelques années, un précurseur des recherches de transits planétaires depuis l'espace. Parmi les résultats obtenus je mentionnerai la découverte du transit de CoRoT 7b, d'un contraste de seulement 0.035%, résultant du passage d'une planète de 1,7 rayon terrestre et de masse proche de 5 masses terrestres : une première exoplanète de densité typique des planètes rocheuses.

Actuellement la mission spatiale Kepler lancée par la NASA va à coup sûr apporter d'autres découvertes de transits de planètes de faibles masses. Pour autant qu'il soit possible de déterminer la masse de ces planètes par spectroscopie Doppler nous devrions pouvoir étudier d'une manière systématique les densités moyennes des super-terres, traces fossiles des mécanismes de leur formation.

L'apport des transits planétaires est beaucoup plus riche que la seule possibilité de déterminer la dimension de la planète. Très brièvement mentionnons :

- La possibilité de faire de la spectroscopie par transmission à travers l'atmosphère planétaire lors d'un transit et par là même étudier sa composition chimique.
- La détermination de la température de l'atmosphère planétaire lors de l'anti-transit, à savoir le passage de la planète derrière l'étoile. De même, la cartographie détaillée de la température sur la surface planétaire a pu être obtenue pour quelques planètes.
- Les mesures dans l'infra-rouge des antitransits ont permis de faire des premières mesures des spectres planétaires et détecter des molécules dans leur atmosphère.
- La mesure de l'inclinaison du plan orbital planétaire relativement au plan équatorial stellaire.
- Etc.

Je reste émerveillé devant la richesse des données acquises ... sans voir les exoplanètes.

### *Des planètes dans la zone habitable ?*

Les planètes de quelques masses terrestres découvertes à ce jour ont des périodes courtes, en général de quelques jours, donc avec des températures de surface inappropriées pour le développement de la chimie complexe à l'origine de la vie.

Peut-on espérer détecter des planètes de type terrestre situées dans la zone habitable de leur étoile, cette zone où l'eau peut-être liquide sur la surface planétaire ? La distance de la zone habitable à l'étoile dépend essentiellement de la luminosité donc de la masse stellaire. Pour les étoiles de type solaire, une telle zone s'étend approximativement de l'orbite de Vénus à celle de Mars.

La détection d'une Terre ayant une période d'une année autour d'une étoile de la masse du Soleil par le biais de la spectroscopie Doppler est un défi sérieux.

La variation de vitesse du soleil, en raison de l'influence de la Terre, n'est que de 8 cm/s. Les variations intrinsèques de la vitesse apparente du Soleil, en raison de l'activité magnétique dans son atmosphère, crée un bruit stellaire supérieur à l'effet cherché. Il semble cependant qu'une telle démarche soit possible en jouant sur quelques facteurs favorables, par exemple en choisissant des étoiles légèrement moins massives ayant une zone habitable plus proche et donc une variation attendue plus forte de la vitesse stellaire. La spectroscopie Doppler offre la possibilité d'identifier des planètes de type terrestre dans la zone habitable d'étoiles proches.

D'autres pistes existent. La mesure précise des changements de position des étoiles sur la voûte céleste (l'astrométrie) est susceptible de permettre la détection de planètes terrestres. Seul un interféromètre spatial est à même de fournir la précision requise (microarcseconde) pour une détection astrométrique d'une planète comparable à la Terre. Le projet SIM de la NASA a été repoussé de plusieurs années ! Il est le seul projet spatial conçu pour un tel but.

La mesure des transits planétaires est à même de révéler des planètes terrestres dans la zone habitable (une variation de 0.01% !) Si la mission KEPLER détecte de telles étoiles, elles seront, on peut le craindre, d'une magnitude telle que la mesure des variations de vitesses sera difficile voire impossible. La mission spatiale PLATO en phase d'étude par l'ESA offre la meilleure possibilité pour une telle étude. La mission PLATO a pour but la recherche de transits planétaires autour des étoiles les plus brillantes du ciel donc susceptibles d'études complémentaires. L'identification de planètes susceptibles de permettre le développement de la vie est un prérequis indispensable avant toute expérience visant à la détecter. Une recherche qui cherchera des caractéristiques spectrales dans les atmosphères planétaires, signatures de la présence d'organismes vivants.

Les expériences, telles les expériences spatiales TPF ou DARWIN étudiées respectivement par la NASA et l'ESA, ont démontré la possibilité de détecter des signatures du vivant dans les spectres planétaires. Avant la réalisation de tels interféromètres spatiaux complexes, la préparation d'une liste d'étoiles proches ayant des planètes rocheuses dans la zone habitable est nécessaire.

Les spectrographes HARPS (à l'observatoire de ESO la Silla) ou le spectrographe ESPRESSO (projet pour le télescope ESO de 8,2 m situé sur le Mont Paranal au Chili) seront les mieux à même pour effectuer une telle tâche.

J'ignore à quelle échéance sera réalisée une expérience dont le but sera la recherche de la vie ailleurs dans l'univers. Mais je suis certain que cette question exceptionnelle restera à l'agenda des agences spatiales, des astronomes et du grand public.