

## Prospective

Alfred Vidal–Madjar

*Institut d’Astrophysique de Paris*

**Abstract.** We present here an overview and prospect of extra-solar planet detection, a young and promising field. This is not an easy task, firstly because only giant planets were discovered so far, and secondly because discoveries were made using mainly one dominant method.

In this paper we discuss the efficiency of the different techniques used up to date to detect extrasolar planets, and we try to estimate the discovery rate expected for the future and when, plausibly, another Earth might be found.

After a brief review on the available methods, we focus on the very meaning of astrophysical discoveries and we try to give a preliminary evaluation of the number of discoveries that might be made in the next decades, following the approach adopted by Martin Harwit in 1984.

The rate of discoveries and relative time scales, will be highly dependent on future instrumentation : in this context, possible time frames for future extrasolar planets detections are proposed here.

La prospective d’un domaine aussi neuf que celui de la recherche de planètes extrasolaires n’est pas un exercice facile car pour l’instant seules des planètes géantes ont été découvertes et que cette discipline n’a donné accès à des résultats qu’essentiellement via une seule méthode. Les questions que nous avons envie de nous poser concernent l’efficacité présente et future des différentes approches utilisées, l’évaluation du taux de découvertes dans l’avenir et surtout l’idée de la date à laquelle une planète semblable à la Terre sera éventuellement découverte.

Après un bilan des découvertes effectuées avec les différentes méthodes, la question même d’une découverte en astrophysique est abordée et une estimation du nombre de découvertes possibles au cours des prochaines décennies est donnée en suivant la remarquable approche faite par Martin Harwit dès 1984. Enfin les perspectives de découvertes étant fortement dépendantes des ins-

trumentations futures, celles ci sont mentionnées afin de donner quelques échéances plus précises pour l’avenir.

## Table des matières

<b>1. Introduction</b>	<b>335</b>
<b>2. Méthodes et résultats</b>	<b>335</b>
2.1 Microlentille gravitationnelle . . . . .	335
2.2 Vitesse radiale . . . . .	336
2.3 Transit . . . . .	337
Observation du spectre stellaire pendant le transit. . . . .	338
Spectroscopie directe des émissions planétaires. . . . .	338
2.4 Chronométrage . . . . .	339
Pulsars. . . . .	339
Binaires à éclipses. . . . .	340
Systèmes avec une planète en transit. . . . .	341
2.5 Emission thermique . . . . .	341
2.6 Emission magnétosphérique . . . . .	342
<b>3. Prospective</b>	<b>343</b>
<b>4. Perspectives</b>	<b>347</b>

## 1. Introduction

Pour présenter la conclusion d'une école concernant un domaine aussi jeune et prometteur de l'astrophysique, il m'a semblé important de présenter tout d'abord dans la section 2 un rapide bilan de la situation des nombreuses découvertes faites à ce jour en termes de planètes et systèmes planétaires extrasolaires, en insistant plus particulièrement sur celles qui ont été moins ou pas abordées au cours de cette école. Certaines approches ont déjà abouti dans quelques cas, mais d'autres, alternatives, sont aussi très prometteuses. Ensuite l'analyse du processus de découverte et surtout des possibilités qui s'ouvrent devant nous sont présentées dans la section 3 en suivant l'approche suivie par Martin Harwit (*Progrès et découvertes en astronomie*, 1984). Dans ce fouilli de cheminements possibles, dans la section 4 les diverses potentialités de découvertes sont finalement présentées comme les directions où il est probable que des progrès spectaculaires se fassent.

## 2. Méthodes et résultats

### 2.1 *Microlentille gravitationnelle*

Cette méthode consiste à exploiter de très rares alignements qui peuvent se produire entre une étoile lointaine  $\mathbf{E}_s$  (étoile source), une autre plus proche  $\mathbf{E}_1$  (étoile lentille) et l'observateur  $\mathbf{O}$ . Dans le cas d'un tel alignement, la masse de  $\mathbf{E}_1$  va dévier la lumière en provenance de  $\mathbf{E}_s$  et produire un effet de lentille gravitationnelle que l'observateur  $\mathbf{O}$  percevra sous la forme d'une amplification de lumière en provenance de  $\mathbf{E}_s$ , qui peut prendre des valeurs considérables suivant la perfection de l'alignement. A titre d'exemple des amplifications de près d'un facteur cent ont déjà été observées. Etant donné que les trois points se déplacent dans l'espace, l'alignement évolue au cours du temps et passe par un optimum à un instant donné. L'observateur  $\mathbf{O}$  va donc finalement détecter une amplification qui augmente au cours du temps, passe par un maximum puis décroît symétriquement ensuite, pour produire une sorte de courbe en cloche dont la forme est parfaitement connue dans le cas où les astres  $\mathbf{E}_s$  et  $\mathbf{E}_1$  sont supposés parfaitement ponctuels (Einstein, 1936 ; Paczynski, 1986).

Dans ce phénomène, il est intéressant d'essayer de détecter les écarts entre la courbe observée et la courbe théorique parfaite correspondant à des objets ponctuels en simple translation uniforme les uns par rapport aux autres. Ces écarts vont pouvoir révéler la taille finie et même la distribution de la lumière à la surface de  $\mathbf{E}_s$ , l'éventuelle binarité de  $\mathbf{E}_s$  et/ou de  $\mathbf{E}_1$ , un mouvement relatif non uniforme et en particulier un effet de parallaxe dû au mouvement de l'observateur  $\mathbf{O}$ , c'est-à-dire de la

Terre sur son orbite, et enfin, l'éventuelle présence d'une planète en orbite autour de  $\mathbf{E}_1$ . Dans ce dernier cas, la forme de la lentille gravitationnelle est déformée par la présence de la planète ce qui peut produire dans certains cas soit des effets de caustiques soit une simple amplification supplémentaire, superposée à l'amplification principale produite par  $\mathbf{E}_1$ . Ce type d'étude représente, entre autres, le but du programme PLANET (Probing Lensing Anomalies Network, Beaulieu et al., 2005) constitué d'une batterie de petits télescopes répartis autour de la Terre. L'idée est de suivre l'évolution de l'amplification de façon aussi continue que possible. En effet si l'amplification principale due à  $\mathbf{E}_1$  dure en général entre quelques semaines voir quelques mois, l'amplification secondaire due à la présence d'une planète pourrait ne durer que quelques heures.

Cette approche, présente les caractéristiques de détection suivantes :

- pas besoin de photons provenant du système étoile/planète qui fait office de lentille ;
- bonne sensibilité aux planètes très éloignées, à  $\sim 4$  kpc ;
- bonne sensibilité aux faibles rapports de masse étoile/planète ;
- à quelques kpc, détection de planète dans une large région de distance étoile/planète, de 1 à 5 UA ;
- pour des Jupiters, la perturbation durant de 1 à 3 jours est facilement détectable ;
- en principe les Terres, dans des conditions exceptionnelles, sont détectables dès maintenant !

La première détection d'une planète extrasolaire par cette méthode à été faite par Bond et al. (2004). Le système étoile/planète ainsi découvert est à 5.2 kpc (2.3 - 5.4 kpc), leur séparation est de 3.0 UA (1.3 - 3.1 UA), la masse de l'étoile de  $0.36 M_\odot$  (0.08 -  $0.39 M_\odot$ ) et la masse de la planète de  $1.5 M_{Jup}$  (0.3 -  $1.6 M_{Jup}$ ). Au cours même de l'école de Goutelas une deuxième planète de  $2.7 M_{Jup}$  à environ 3 UA de son étoile a été découverte par cette même méthode (Udalski et al., 2005). Cette nouvelle approche commence donc à alimenter nos liste de nouvelles planètes extrasolaires.

Enfin cette méthode, dont l'intérêt statistique est évident, et, en particulier dans des régions relativement lointaines de la Galaxie a permis de démontrer, grâce au nombre très important de non-détections de planètes lors d'évènements de microlentilles (environ 600 par an), qu'il ne peut pas y avoir plus de quelques pourcents d'étoiles M dans ces régions galactiques qui aient des Jupiters entre 1 et 10 UA de l'étoile.

## 2.2 Vitesse radiale

Il est inutile de décrire à nouveau cette méthode déjà traitée au fil du cours. L'idée est plutôt de faire le point justement dans l'esprit de

prospective de ce chapitre. Les modèles de formation de planètes (en particulier celui de Ida & Lin 2004), prédisent que, dans un diagramme masse de la planète – distance à son étoile, les planètes rocheuses d’une masse inférieure à quelques masses terrestres peuvent se former entre 0.1 et 3 UA, alors que les planètes de glace de toutes masses, allant des Terres aux Jupiters, peuvent se former au-delà de 3 UA, tandis que les géantes gazeuses de la masse de Jupiter peuvent se retrouver n’importe où entre 0.1 et 10 UA. Dans ce diagramme, il reste une zone où aucune planète ne devrait se trouver : c’est entre 0.1 et 3 UA, pour des planètes qui auraient entre 10 et 100 fois la masse de la Terre. Comme l’a souligné Mayor (2005), le nouvel instrument HARPS est particulièrement adapté à la détection de planètes dans cette région du diagramme, et, contre toute attente, les 6 dernières planètes récemment découvertes par HARPS ont justement été trouvées là ! En terme de prospective, nous voyons que nous ne sommes pas au bout de nos surprises.

### 2.3 Transit

Je ne peux pas résister au plaisir de souligner ici qu’une première dans le domaine de la détection par la méthode des transits a peut-être été faite dès 1994 (Lecavelier des Étangs et al., 1995a ; 1995b), une variation du flux de l’étoile  $\beta$  Pictoris ayant été observée le 10 novembre 1981. Cette variation de près de 4% en quelques heures pourrait être due au passage devant le disque stellaire, soit d’une planète d’environ deux fois la taille de Jupiter (Lecavelier des Étangs et al., 1997), soit d’une comète géante (Lamers et al., 1997). Cette remarquable observation ne s’étant jamais répétée, il a cependant été impossible de la confirmer malgré de nombreuses campagnes d’observations étalées sur plusieurs années (Nitschelm et al., 2000 ; Lecavelier des Étangs et al., 2005a). Cette première détection d’une planète par transit n’est donc à ce jour toujours pas confirmée.

Comme dans la section précédente, inutile de répéter les chapitres qui précèdent. Ici, nous allons seulement souligner les possibilités d’études très particulières que permettent les transits.

L’étude spectroscopique de l’atmosphère des planètes extrasolaires peut en effet se faire de deux façons différentes, soit au moment des transits en observant le spectre de l’étoile perturbé par la présence de la planète, soit directement, en effectuant la spectroscopie de la lumière réfléchie et/ou émise par la planète. Cette dernière observation, pour le moment uniquement accessible en IR, se réalise en soustrayant au spectre de l’ensemble “étoile+planète” un spectre pris à l’instant de l’“anti-transit”, c’est-à-dire quand la planète disparaît derrière l’étoile.

*Observation du spectre stellaire pendant le transit.* Par le spectre de l'étoile au moment du transit, on peut avoir accès à différentes signatures qui, d'une façon ou d'une autre, peuvent révéler la présence d'une atmosphère autour de la planète, sa composition, sa structure et même la présence éventuelle de vents. A titre d'exemple, l'atmosphère terrestre observée en dessous de 3000 Å se révélerait par l'absorption supplémentaire de l'ozone qui ferait apparaître la Terre plus grande d'environ 60 km. Ainsi de telles signatures spectroscopiques ne peuvent être que très faibles, dans une gamme de  $10^{-4}$  à  $10^{-8}$  d'absorption supplémentaire. La première signature détectée (Charbonneau et al. 2002) a révélé dans le doublet du sodium une absorption supplémentaire de  $0.0232 \pm 0.0057\%$  dans la basse atmosphère de la planète HD 209458b. Cette absorption, moins importante que prévue, peut être interprétée soit en terme de présence de nuages, de vents ou d'ionisation incorrectement modélisés. Dans la haute atmosphère de cette même planète, la présence de l'élément le plus abondant et le plus léger, l'hydrogène atomique, a aussi été détectée (Vidal-Madjar et al., 2003) dans l'UV lointain, à 1216 Å, révélant une exosphère extrêmement étendue, clairement au-delà du lobe de Roche. La planète HD 209458b est donc en train de s'évaporer. D'autres observations, toujours dans l'UV vers 1300 Å, ont ensuite montré que les atomes d'oxygène et de carbone s'échappent aussi de la planète (Vidal-Madjar et al., 2004), ce qui a permis de montrer que ce Jupiter chaud est en train de s'évaporer de façon très efficace grâce à un mécanisme d'échappement hydrodynamique, seul capable d'entraîner, dans le flot d'atomes d'hydrogène, des éléments aussi lourds que l'oxygène et le carbone. Ainsi un flux d'échappement de l'ordre de  $10^{10} \text{ g.s}^{-1}$  a été estimé ce qui semble montrer que HD 209458b ne devrait perdre au cours de sa vie que quelques pourcents de sa masse (Lecavelier des Étangs et al., 2004). Cette observation révèle cependant que des planètes un peu moins massives et/ou plus proches de leur étoile pourraient s'évaporer complètement, donnant une éventuelle explication du désert de planètes observé très près des étoiles. De futures observations devraient permettre la détection de nombreux constituants dans les atmosphères de planètes extrasolaires, y compris éventuellement un jour la présence de bio-marqueurs (Ehrenreich et al., 2005).

*Spectroscopie directe des émissions planétaires.* Les premières évaluations théoriques de la température effective  $T_{eff}$  des Jupiters chauds ont montré qu'elles pouvaient être de l'ordre de 1000 K (e.g. Guillot et al., 1996 ; Sudarsky, Burrows & Hubeny, 2003) et que, dans le cas de HD 209458b, elle devait même être de l'ordre de 1250 K. Ceci a été directement confirmé depuis grâce à l'observation de l'émission de deux de ces planètes lors de leur passage dans la position opposée

au transit, c'est-à-dire quand la planète passe derrière son étoile. Son émission propre est alors identifiée par la brusque réduction du flux total observé, somme des flux en provenance de l'étoile et de la planète cumulés. Les émissions IR ainsi évaluées dans trois bandes spectrales différentes, à 4.5, 8 et 24  $\mu\text{m}$ , ont en effet montré que les températures effectives des deux planètes HD 209458b et TrES-1 sont supérieures à 1000 K (Charbonneau et al., 2005; Deming et al., 2005). La poursuite de telles observations devrait pouvoir donner accès à la composition des atmosphères, grâce aux signatures spectrales très nombreuses attendues dans ce domaine de longueur d'onde. Il est clair que de telles émissions thermiques sont favorisées dans le domaine de l'IR, mais il faut souligner que d'autres émissions planétaires pourraient être aussi détectées, telles que la lumière stellaire réfléchie par la planète, ainsi que les émissions aurorales dans les domaines UV et radio. Ces dernières n'ont cependant donné aucune détection positive pour le moment.

#### 2.4 Chronométrage

La méthode de recherche de planètes extrasolaires par chronométrage consiste à utiliser une horloge très précise dans le système étudié, et à voir si des décalages anormaux apparaissent au cours du temps. Ainsi non seulement des planètes seraient détectables, mais même d'éventuels satellites. Les horloges très régulières disponibles sont bien sûr les pulsars, mais aussi les binaires à éclipses, ou même les systèmes présentant déjà une planète connue détectée par la présence de ses transits.

*Pulsars.* C'est autour du pulsar milliseconde PSR B1257+12 que la première détection d'objets ayant la masse de planètes a été réussie (Wolszczan & Frail, 1992; Wolszczan, 1994). Quoique la stricte définition d'une planète extrasolaire soit d'être en orbite autour d'une étoile "allumée" de la séquence principale<sup>1</sup>, les objets ainsi découverts représentent néanmoins les corps en orbites régulières les moins massifs connus à ce jour, hors de notre système solaire. Ils sont maintenant catalogués en termes de "planète-pulsars" (les trois planètes identifiées ont pour masse respectivement, 0.019, 4.250 et 3.873 masses terrestres). Une autre planète-pulsar a été détectée autour de PSR B1620-26 (Sigurdsson et al., 2003) ce qui montre les possibilités de cette approche. Avec le temps, la poursuite du chronométrage précis de l'arrivée des pulses permettra, soit de découvrir la présence d'autres planètes dans les systèmes étudiés,

---

<sup>1</sup>Cette définition est en fait plus stricte que celle proposée provisoirement par le groupe de travail de l'UAI chargé de la question, qui admet pour planètes les objets de masses ad hoc "en orbite autour d'une étoile ou d'un reste d'étoile", ce qui inclut les pulsars.

soit de montrer que l'évolution de l'arrivée des pulses est non seulement compatible avec la présence des planètes précédemment détectées, mais qu'elle est même compatible avec la présence de ces planètes en interaction gravitationnelle entre elles (Konacki & Wolszczan, 2003). Ces résultats, quoique dans un contexte légèrement différent de celui de la recherche de planètes extrasolaires au sens strict, démontrent au moins les capacités remarquables de la méthode de chronométrage qui a permis la détection d'un corps de la masse de la Lune, de l'effet d'interaction gravitationnelle mutuelle de planètes dans un même système et, via l'étude de la stabilité du système, de l'éventualité même de la présence de ceintures d'astéroïdes (Gozdziewski, Konacki & Wolszczan, 2005).

*Binaires à éclipses.* Comme les pulsars, les étoiles binaires à éclipses nous donnent accès à une horloge extrêmement précise qu'il "suffit" de suivre pour voir si l'écart entre les éclipses n'est pas petit à petit perturbé par la présence d'objets massifs non encore identifiés mais présents dans le système. Le décalage de l'instant des éclipses est  $\Delta t \sim M_P \cdot (a \cdot \sin i) / (M_B \cdot c)$ , où  $M_P$  représente la masse du troisième corps,  $a$  et  $i$  le demi-grand axe et l'inclinaison de son orbite,  $M_B$  la masse du système binaire, et  $c$  la vitesse de la lumière (Schneider & Doyle, 1995). Cette relation montre qu'avec une précision de quelques secondes sur les instants des éclipses, des planètes de la masse de quelques Jupiters pourraient être détectées. Les avantages de cette approche sont que la photométrie précise de telles binaires ne nécessite que de relativement petits télescopes, que le nombre de binaires qui peuvent être ainsi suivies est relativement grand ( $\sim 4000$  actuellement connues dans notre Galaxie), que dans nombre de cas ( $\sim 250$ ) l'instant de l'éclipse peut être connu à quelques secondes près, et que, la masse des étoiles étant connues relativement précisément par des méthodes classiques, la masse du corps supplémentaire dans le système peut être correctement évaluée. L'inconvénient de cette approche est, par contre, de ne donner accès qu'à une limite supérieure de la masse et de la taille de l'orbite du troisième corps présent dans le système (seuls  $M = f(\sin i)$  et  $a \cdot \sin i$  sont accessibles). Cependant, la combinaison de ce type de mesure avec des observations astrométriques précises peut permettre de lever les incertitudes du système (Ribas, Arenou & Guinan, 2002). L'étude la plus approfondie d'un système binaire à éclipse a été effectuée à ce jour sur CM Dra (Deeg et al., 2000), dans lesquels des décalages de 5.74 s sur l'instant des éclipses entre 1994 et 1999 ont permis de montrer que ces écarts pouvaient être compatibles avec une planète de 1.5 à 3 fois la masse de Jupiter orbitant entre 1.1 et 1.45 UA du barycentre du système. Cependant une surveillance plus longue du système n'a pas permis, à ce jour, de confirmer ce résultat. De la même façon, la combinaison de ces mesures de chronométrage avec celles de transits peut permettre la détection, même



depuis le sol, de planètes de tailles proches de celles de la Terre (Doyle et al., 2000).

*Systèmes avec une planète en transit.* De même que dans le cas des binaires à éclipses, le chronométrage précis des transits peut permettre la mise en évidence d'une autre planète dans le système, avec à peu près le même degré de précision. Il y a cependant une nouvelle possibilité dans cette approche, qui permettrait de détecter la présence de satellites en orbite autour de la planète en transit (Sartoretti & Schneider, 1999). Ceci a été appliqué au cas de HD 209458b (Brown et al., 2001), pour lequel il a été démontré que cette planète ne pouvait avoir de satellites de masse supérieure à  $3 M_{Terre}$  sans que cela soit révélé par un décalage des transits supérieur aux 80 secondes de la précision atteinte. La plus grande sensibilité de cette méthode dans le cas de satellites vient du fait que leur interaction gravitationnelle sur la planète est beaucoup plus importante, leur position sur l'orbite autour de la planète même permettant un décalage de l'instant du transit beaucoup plus important pour une aussi petite masse.

Enfin, pour donner un ordre de grandeur, avec une précision de 5 secondes sur l'instant des transits, il deviendrait possible de détecter dans un système la présence d'une autre planète perturbatrice de  $1 M_{Jup}$  à 10 UA.

### 2.5 Emission thermique

Une grande première a été réalisée dès l'année 2003 : la détection de l'émission thermique d'un objet d'environ  $5 M_{Jup}$  en orbite autour d'une naine brune de  $25 M_{Jup}$  par Chauvin et al. (2004). Il semble ainsi définitivement établi que la détection directe de planètes extrasolaires soit devenue accessible à nos grands instruments au sol équipés d'optique adaptative.

Ceci reste vrai, même s'il existe encore un débat pour savoir si cette objet de  $5 M_{Jup}$  est bien une planète ; en effet, la définition au sens stricte d'une planète est qu'elle doit avoir une masse inférieure à  $13 M_{Jup}$  et se trouver en orbite autour d'une étoile (de masse supérieure à environ  $70 M_{Jup}$ ) et non d'une naine brune (de masse comprise entre 13 et  $70 M_{Jup}$ ). La raison est qu'en effet il serait tout à fait possible qu'alors les deux objets de masses relativement semblables se soient formés de la même façon par effondrement gravitationnel au sein de la nébuleuse primitive, le plus petit des deux ne s'étant donc pas formé dans un disque protoplanétaire autour de la naine brune. Il est cependant important de souligner qu'il est tout à fait possible que des planètes reconnues officiellement comme telles, découvertes autour d'étoiles, se soient elles aussi formées par effondrement gravitationnel (Boss, 2000). Le débat pour sa-

voir comment chaque planète découverte s'est formée ne sera probablement pas clos de si tôt.

### 2.6 *Emission magnétosphérique*

L'étude des émissions magnétosphériques des planètes extrasolaires peut être envisagée car, dans le domaine radio, ces émissions dans le système solaire sont très intenses – elles sont essentiellement d'origine non-thermique – et peuvent même surpasser celles du Soleil lui-même (Zarka et al., 1997).

Les prédictions théoriques (loi d'échelle dérivée pour le système solaire et extrapolée aux planètes extrasolaires; Zarka et al., 2001) suggèrent que les Jupiters chauds pourraient être de forts émetteurs radio basses fréquences s'ils sont magnétisés, ou si l'étoile parente est fortement magnétisée. Un intense vent stellaire est aussi un facteur favorable. Les flux prédits sont à la limite de détection des plus grands instruments existants, si on parvient à éliminer les parasites et les perturbations ionosphériques.

L'instrument existant le mieux adapté est le réseau décimétrique (15–35 MHz) UTR-2 de Kharkov, le plus grand du monde à ces longueurs d'ondes. Plusieurs campagnes (Ryabov et al., 2004) y ont déjà été effectuées depuis 1996. D'autres campagnes d'observation ont eu lieu au VLA à 74 MHz (Farrell et al., 1999; 2004), et bientôt à 150–230 MHz au GMRT en Inde. Ces deux derniers instruments sont cependant probablement à trop hautes fréquences pour les champs magnétiques attendus (émissions cyclotron).

Les analyses sont complexes : reconnaissance et élimination des parasites, prise en compte des fluctuations ionosphériques. C'est la brillance du fond de ciel radio basses fréquences, très élevée, qui constitue la limite de sensibilité ultime des observations. Les résultats sont jusqu'ici négatifs, mais imposent toutefois de nouvelles contraintes théoriques : flux émis, amplitude du champ magnétique, etc.

De nouvelles observations sont donc nécessaires, et d'ailleurs planifiées, avec des instruments améliorés (récepteur numérique) et en période de minimum d'activité solaire, c'est-à-dire avec des fluctuations parasites ionosphériques moindres.

L'avenir à moyen terme de cette approche observationnelle est évidemment lié au projet LOFAR, qui apportera à partir de 2007 un gain de sensibilité de 1 à 2 ordres de grandeur. A cette sensibilité, la détection de Jupiters chauds pourrait être envisagée à plusieurs dizaines voire centaines de parsecs, mettant par exemple les planètes de  $\tau$  Boo ou de  $\rho$  CrB à portée d'observation, du moins si la loi d'échelle proposée reste extrapolable aux Jupiters chauds. Les détections radio apporteraient des informations très intéressantes sur les champs magnétiques,

l'activité magnétosphérique, voire la période de rotation de ces planètes extrasolaires.

### 3. Prospective

Dans sa remarquable étude faite à la fin des années 70, Harwit (1984) a essayé de répondre aux questions suivantes, essentielles en terme de prospective : comment sont faites les découvertes en astronomie et combien en reste-t-il à faire ?

Il montre que la très grande majorité des découvertes faites sont purement observationnelles, dues à l'emploi de moyens techniques nouveaux, contrairement au cheminement en physique où la théorie précède l'expérience. Il donne explicitement 43 exemples de découvertes astronomiques faites avant 1979 (voir la liste sur la Figure 1) et montre qu'à deux exceptions près elles sont en effet dues à un progrès technologique. Il remarque que pour sept d'entre elles (planète, galaxie, gaz interstellaire ionisé, gaz interstellaire froid, rayons cosmiques, nébuleuse planétaire et champs magnétiques interstellaires) nous avons affaire à une redécouverte, dite découverte "multimodale", un phénomène déjà connu étant retrouvé indépendamment grâce à une détection dans un domaine de l'espace des observables complètement différent, comme par exemple la redécouverte des planètes par leurs émissions radio.

Pour avancer dans son analyse, il définit l'espace des paramètres caractérisant une observation astronomique élémentaire comme étant :

- 1. Vecteur auquel l'instrument est sensible (photon, rayon cosmique, neutrino, etc)
- 2. Energie du vecteur détecté
- 3. Résolution angulaire de l'instrument
- 4. Résolution spectrale de l'instrument
- 5. Résolution temporelle de l'instrument
- 6. Eventuellement, sensibilité à la polarisation
- 7. Heure, date et direction observée.

Il définit donc ainsi l'espace des phases des observations, un espace multidimensionnel dans lequel chaque point correspond à une caractérisation observationnelle. Pour différencier les découvertes, il propose de dire que deux phénomènes cosmiques seront différents si leur aspect diffère d'un facteur de 1000 ou plus dans au moins un paramètre

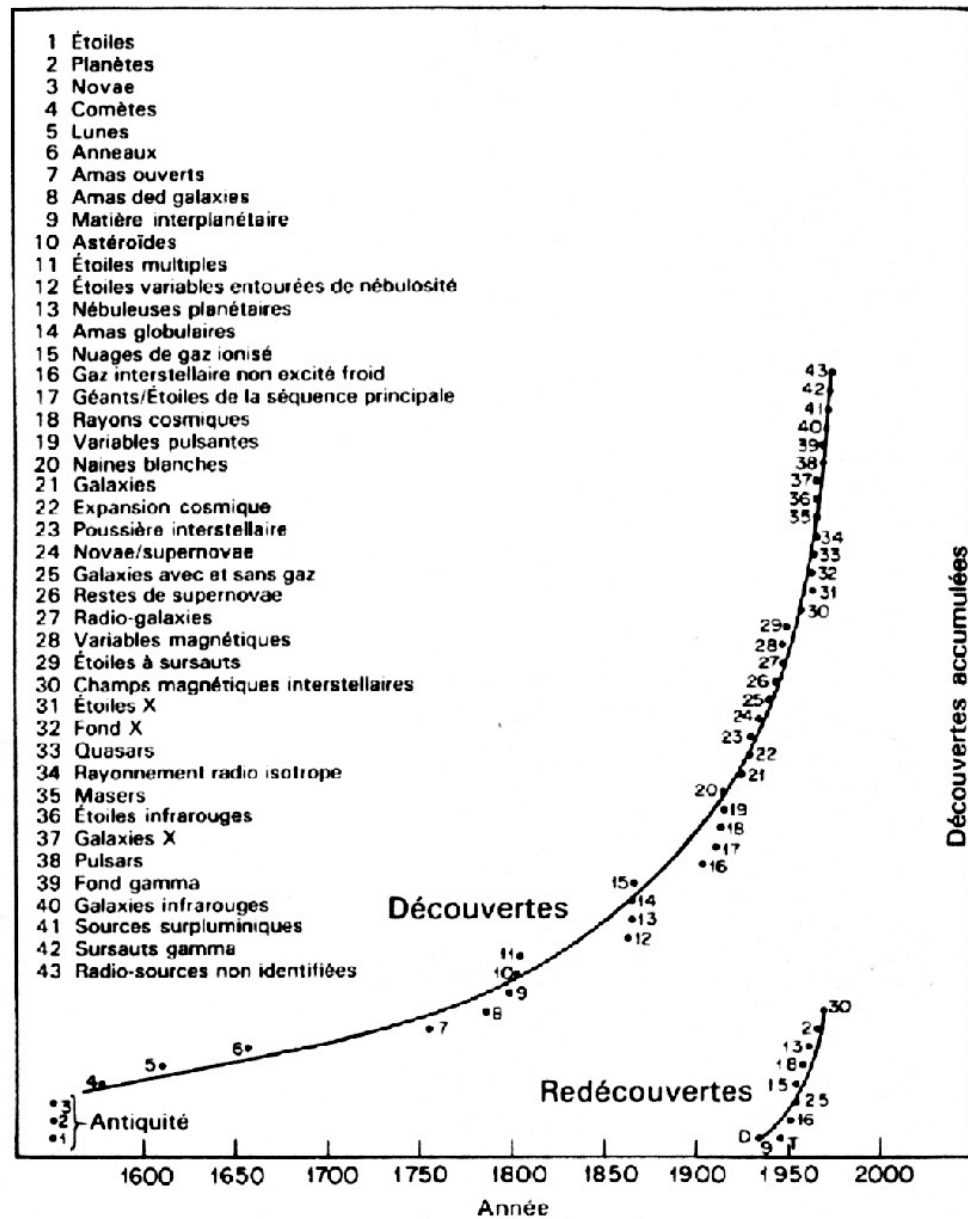


Figure 1.: Figure extraite de Harwit (1984) qui montre les découvertes passées faites avant 1979. Il en décompte 43, dont 7 sont en fait des “redécouvertes” et dont 1 est une découverte deux fois renouvelée. Il différencie ces 8 dernières en les qualifiant de multimodales, les autres étant soit unimodales soit multimodales selon leur éventuelle redécouverte dans le futur (voir texte). Figure reproduite avec l’aimable autorisation des éditions Masson.

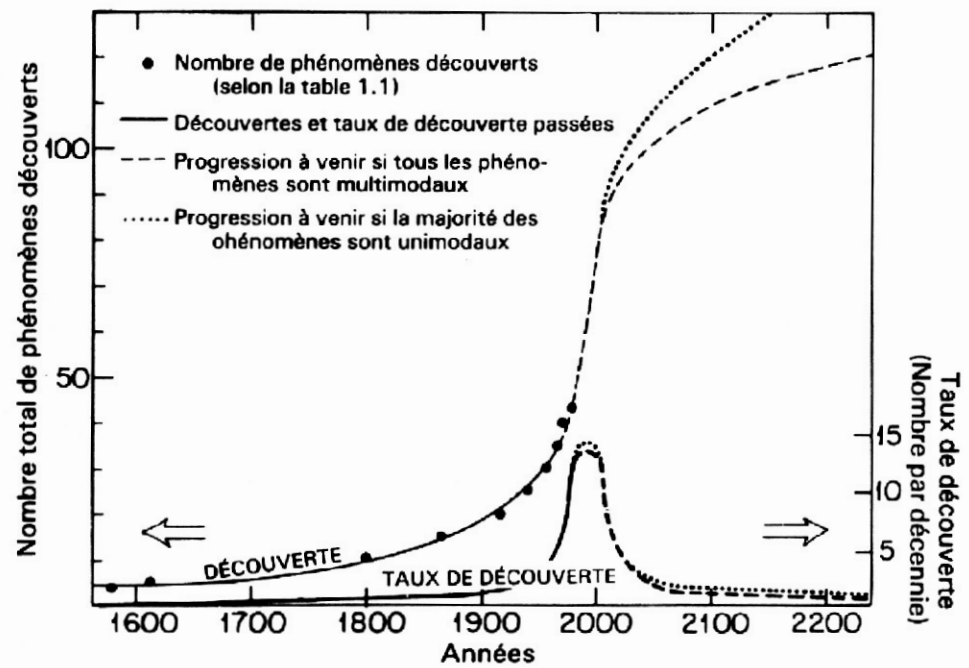


Figure 2.: Figure extraite de Harwit (1984) qui montre la somme des découvertes cumulées au cours du temps (voir Figure 1) et le taux de découvertes correspondant, moyenné sur les temps anciens et extrapolés dans le futur. Les courbes des découvertes cumulées sont évidemment toujours croissantes alors que celles des taux de découvertes sont en cloche. Les courbes en tirets correspondent aux 130 découvertes potentielles multimodales et celles en pointillés aux 500 découvertes potentielles unimodales et multimodales évaluées par Harwit (1984). Figure reproduite avec l'aimable autorisation des éditions Masson.

observationnel. Sachant que d'autre part il existe des limites observationnelles à la détection de chaque vecteur (interactions avec le milieu interstellaire ou avec les photons du rayonnement du corps noir par exemple), la partie de l'espace des phases effectivement accessible à l'observation est donc forcément limitée, et le nombre total de phénomènes nouveaux à découvrir dans l'Univers est donc lui aussi limité.

Pour estimer ce nombre, Harwit exploite le taux de redécouvertes et donne l'exemple d'un enfant qui collectionne des images. En recevant  $n$  images au hasard, l'enfant obtient  $A$  images uniques et  $B$  images en double ( $n = A + 2B$ ). Si  $N$  est le nombre total d'images différentes mises en circulation, et tant que  $n$  est très inférieur à  $N$ , une bonne estimation de  $N$  est :

$$N = nA/2B.$$

En appliquant cette relation aux 43 phénomènes cosmiques qu'il a répertoriés, dont 35 phénomènes uniques et 7 doubles (un phénomène étant compté triple), Harwit déduit que nous pouvons espérer découvrir de l'ordre de 123 phénomènes cosmiques différents. Sans entrer plus dans les détails, il présente différentes façons pour vérifier cet ordre de grandeur et confirme que  $N$  devrait être de l'ordre de 130.

Il souligne cependant que ceci suppose que tous les phénomènes dits multimodaux peuvent être détectés au moins de deux façons différentes, alors qu'il est clair qu'un phénomène unimodal, qui ne serait détectable que d'une seule façon, échappe complètement à ce décompte. Pour estimer le nombre de phénomènes unimodaux à ajouter, il évalue le nombre de phénomènes très probablement unimodaux déjà découverts (4 sur 43) puis, supposant qu'ils sont uniformément répartis sur l'espace des phases, et sachant la part de l'espace des phases déjà explorée (il l'estime à environ 1%) il en déduit qu'il doit y avoir un total d'environ 400 phénomènes unimodaux à découvrir dans l'Univers, portant le total des découvertes potentielles aux alentours de 500 phénomènes.

De ce nombre relativement limité de découvertes possibles, il estime la forme d'une courbe en cloche pour représenter le taux de découvertes faites par décennies (qui au cours du 20<sup>ème</sup> siècle est passé de 2 à plus de 10, voir Figure 1) et montre que compte tenu du nombre de 130 ou même de 500 découvertes potentielles, ce taux doit forcément rapidement retomber au cours du 21<sup>ème</sup> siècle vers des valeurs proche de l'unité. Il montre que nous sommes en plein au cœur de l'âge d'or de la découverte, le taux semblant passer par le maximum de la courbe en cloche vers l'an 2000.

Pour vérifier cette prédiction faite avant 1980, nous avons deux décennies nouvelles au cours desquelles nous pouvons chercher à évaluer le taux de découvertes qui a effectivement eu lieu :

**1980–1990**

- ondes gravitationnelles
- hydrocarbures polycycliques aromatiques (“PAH”) dans le milieu interstellaire
- supernova en neutrino
- écho de lumière
- disques de débris
- disques protoplanétaires en évaporation (“proplyds”)
- comètes extrasolaires
- fluctuations du 3 K
- naines brunes
- lentilles gravitationnelles

**1990–2000**

- planètes pulsar
- microlentille
- planète extrasolaire
- Jupiters chauds
- trou noir galactique
- taux d’expansion de l’Univers
- objets de la ceinture de Kuiper
- astéroïdes multiples
- énergie sombre

Cette liste n’est certainement pas exhaustive mais elle montre qu’en effet le taux de découverte par décennie reste très élevé et clairement au-dessus de la dizaine comme Harwit (1984) l’avait prédit. D’après son analyse, nous devrions cependant approcher de la fin de cet âge d’or étant donné le nombre limité de découvertes potentielles présentes dans l’Univers. Si cette vision pessimiste venait à se confirmer, le travail de recherche pourrait délicat dans un avenir peut-être pas si lointain.

**4. Perspectives**

Pour faire brièvement le tour des perspectives dans ce domaine de recherche, il est clair que de grandes généralités peuvent être dites telles que la complémentarité indispensable entre la théorie et les observations, l’une aidant à l’interprétation mais permettant aussi de mieux prévoir un nouveau créneau observationnel où aller chercher (voir e.g. Vidal-Madjar, 2006).

Pour illustrer de façon très visuelle et condensée les différents cheminements de la recherche dans ce domaine, Perryman, Hainaut et col. (2005) ont fait une sorte d’arbre des possibles qui souligne les progrès

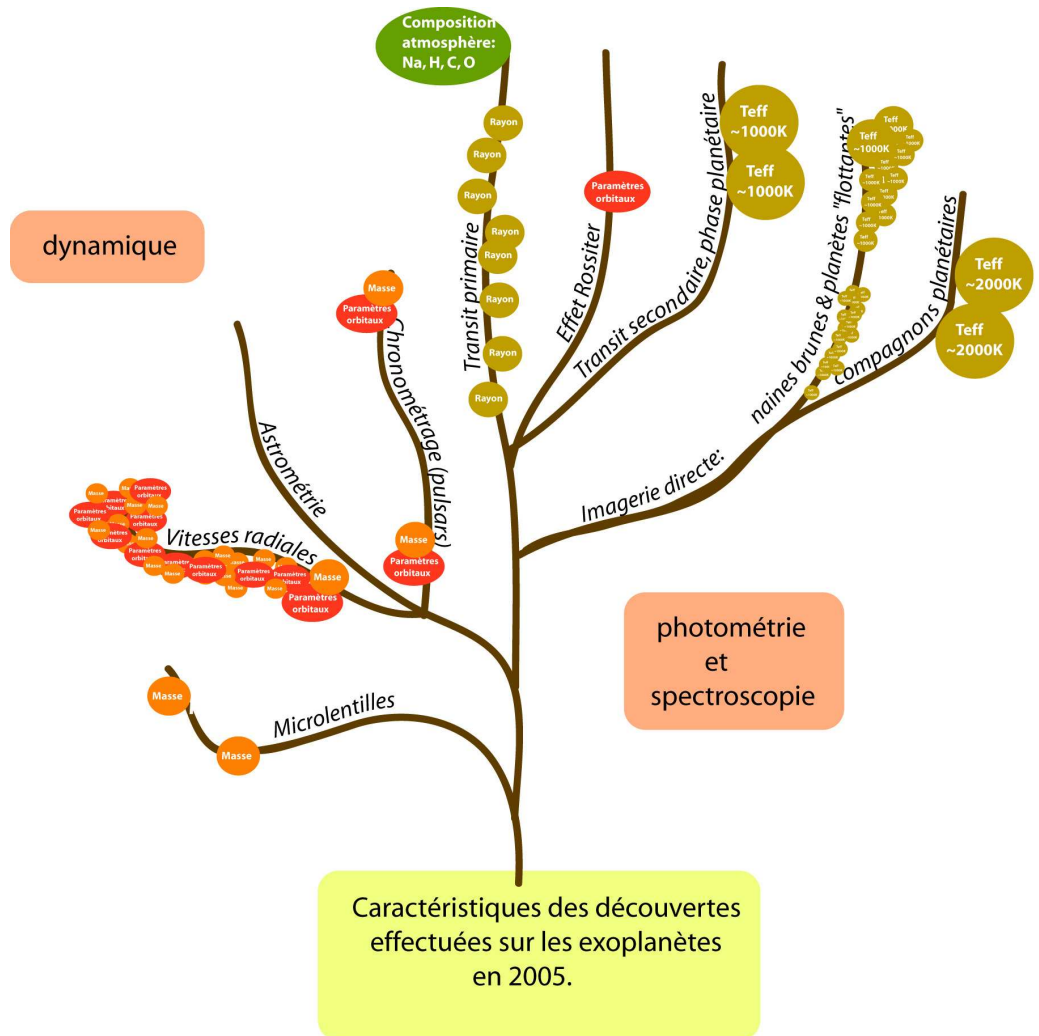


Figure 3.: L'état actuel des découvertes dans le domaine des exoplanètes tel qu'il est résumé par le groupe de travail "Exoplanètes" du CNRS (Guillot et al., 2005). Les progrès sont représentés sur un arbre dont chaque branche correspond à une approche différente; ils se traduisent en termes d'analyses de plus en plus fines des planètes étudiées (inscrites dans des "fruits" qui correspondent aux découvertes effectivement faites avant 2005). Figure reproduite avec l'aimable autorisation des auteurs.



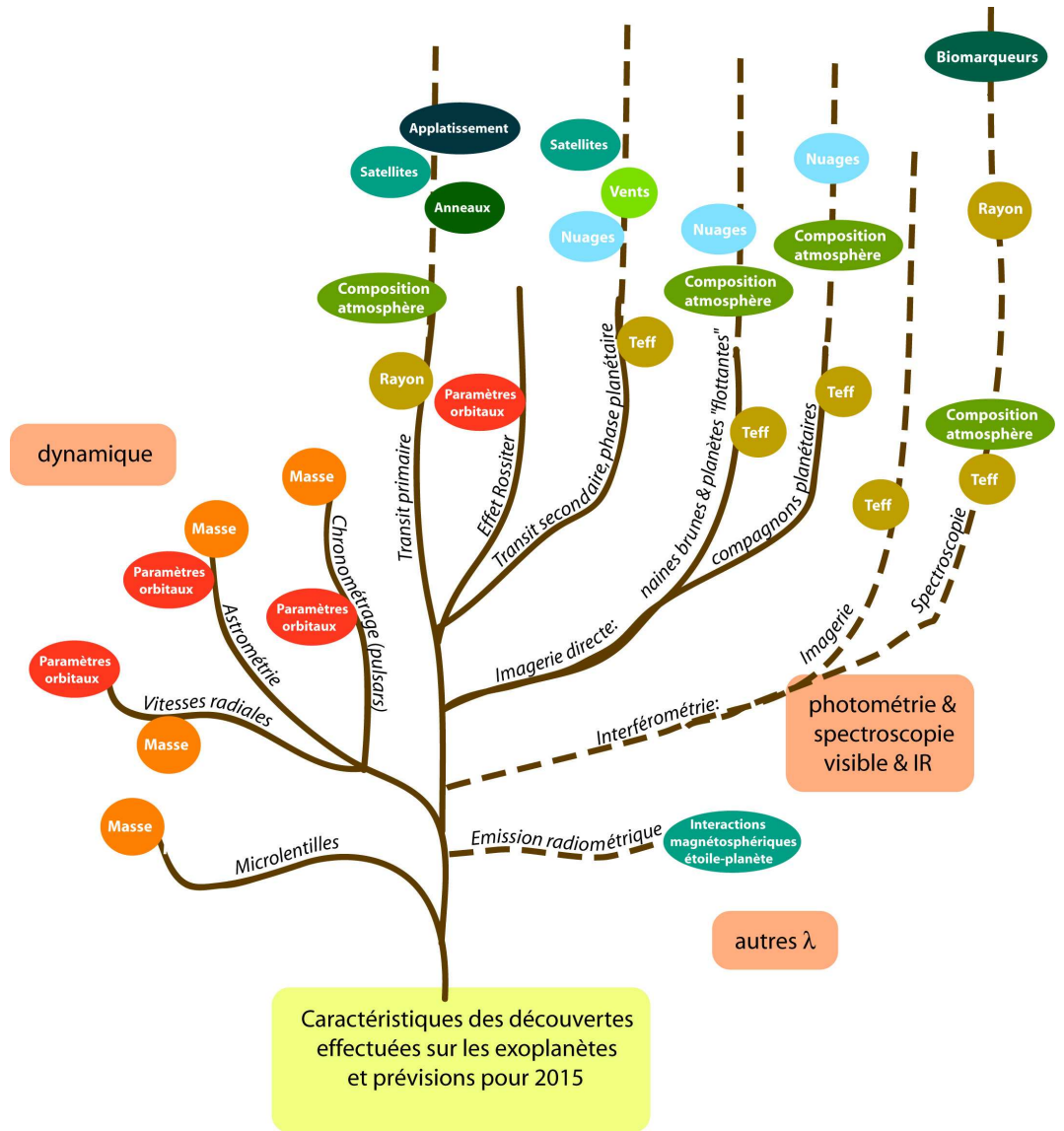


Figure 4.: Le même arbre que sur la Figure 3 extrapolé dans le futur jusqu'en 2015 (Guillot et al., 2005). Les parties en tirets représentent les spéculations les plus plausibles faites dans un futur plus ou moins perceptible. Figure reproduite avec l'aimable autorisation des auteurs.

déjà effectués par chaque approche. Ils extrapolent ensuite les potentialités de chaque méthode dans un avenir plus ou moins lointain. Le paramètre qu'ils ont utilisé pour évaluer les progrès faits le long de chaque branche de leur arbre est la masse de la planète détectée, montrant ainsi que pour atteindre des "Terres", seules les méthodes photométriques seront un jour suffisamment performantes, les méthodes dynamiques, prédominantes aujourd'hui, étant sans doute intrinsèquement limitées à quelques masses terrestres.

Pour souligner les potentialités des différentes méthodes, Guillot et al. (2005) ont élaboré un nouvel arbre, Figure 3, qui donne une sorte d'agrandissement de ces approches en définissant les critères de progrès non plus en terme uniquement de la masse de la planète étudiée, mais aussi de la connaissance d'autres caractéristiques de ces dernières telles que leur rayon, température effective, détection d'une atmosphère, puis composition de l'atmosphère et enfin découverte d'éventuels biomarqueurs. Ce dernier critère étant le but ultime de ces recherches : trouver une signature de vie sur une planète extrasolaire.

Comme l'a souligné Harwit (1984) les découvertes observationnelles se feront à partir de progrès technologiques, c'est-à-dire de la mise en œuvre de nouveaux instruments.

A partir d'observatoires au sol, les perspectives vers les années 2005–2015 (voir aussi la Figure 4, extraite du rapport de Guillot et al., 2005) passeront par de nouvelles installations ou des télescopes sur lesquels des techniques d'observation plus performantes verront le jour. Les observatoires où il est probable que des progrès soient effectués sont :

- VLT et tous les 8 à 10 m
- Dôme C
- LOFAR
- ALMA
- ELT/Hypertélescopes

Les observatoires spatiaux vont sans doute rapidement changer la situation une fois mis en orbite, car ils permettent d'observer dans des conditions exceptionnelles de stabilité et/ou dans des domaines spectraux où les signatures sont les plus fortes. Ils sont dans l'ordre chronologique de leur mise en orbite :

- COROT, lancement en 2006, recherche de planètes par transit (quelques centaines) ;
- KEPLER, lancement en 2008, recherche de planètes par transit (quelques centaines) ;

- GAIA, lancement en 2011–2012, recherche de planètes par astrométrie et photométrie (quelques milliers) ;
- JWST, lancement en 2011, suivis détaillés des planètes découvertes par tout autre méthode.

Ensuite, pour aller vers le but ultime de ces recherches, qui est de détecter des bio-marqueurs dans les atmosphères des planètes découvertes, il faudra repérer celles-ci en transit (Catala et al., 2005) et utiliser de très grands télescopes spatiaux (10 à 30 m) pour ensuite être capable de détecter les signatures spectrales de leurs atmosphères (Lecavelier des Étangs & Ehrenreich, 2005b; Ehrenreich et al., 2005; il est intéressant de noter que le nombre de cibles sur lesquelles un télescope pourra travailler pour étudier des planètes au cours de transits augmente comme le cube de leur diamètre). Au-delà de 2015, on pourra aussi compter sur des projets tels que :

- TPF-C, l’observatoire spatial qui va chercher à détecter les émissions directes des planètes par coronographie ;
- TPF-I/DARWIN, l’observatoire qui va chercher à isoler les émissions planétaires par interférométrie spatiale.

Ces projets devront tous affronter la même difficulté : un flux de photons très faible, qu’il s’agisse du rayonnement en provenance de la planète, ou de l’ampleur de la perturbation due à l’atmosphère de la planète durant un transit.

A encore plus longue échéance, il faudra des surfaces collectrices toujours plus grandes : l’aire des HYPER-TELESCOPES spatiaux tels que ceux proposés par Labeyrie (2003) sera alors arrivée !

Finalement il est difficile de résister au plaisir de donner l’opinion “moyenne” des spécialistes du domaine qui ont participé au récent Colloque de l’Observatoire de Haute Provence qui, depuis l’école de Goutelas, s’est déroulé pour fêter le dixième anniversaire de la découverte de la première planète extrasolaire, 51 Peg-b. A la fin de ce colloque, Charbonneau (2005) a posé aux participants quelques questions prospectives résumées dans la Table 1.

Il ne nous reste plus qu’à attendre pour savoir si les experts en la matière sont de bons futurologues. Parions que comme à l’habitude, leurs estimations sont entachées de pessimisme car encore beaucoup de magnifiques surprises nous, vous, attendent.

Table 1.: Réponses aux questions de prospective posées par David Charbonneau (2005) au Colloque de l’Observatoire de Haute Provence.

Question	Réponse % des opinions des présents
Par quelle méthode la première “Terre” sera-t-elle découverte ?	49% par transit 35% par vitesse radiale 11% par microlentille 4% par astrométrie 2% par d’autres méthodes
Quel sera le taux de “Terres” trouvées par la mission Kepler dans la zone habitable autour d’étoiles G et K ?	19% pensent autour de 3% d’étoiles 35% pensent autour de 3 à 10% d’étoiles 23% pensent autour de 10 à 25% d’étoiles 5% pensent autour de 25 à 50% d’étoiles 2% pensent autour de 50 à 100% d’étoiles 14% pensent que Kepler ne l’évaluera pas
Quand le cap des 1000 exoplanètes sera-t-il dépassé ?	37% pensent entre 2008 et 2010 61% pensent entre 2010 et 2015 5% pensent entre 2015 et 2025
Quand la découverte d’une vie extra-terrestre sera-t-elle annoncée ?	2% pensent entre 2010 et 2015 32% pensent entre 2015 et 2025 44% pensent entre 2025 et 2050 26% pensent après 2050 ou jamais

## Références

- [1] Beaulieu, J.-P., et al., 2005, dans *PLANET III : searching for Earth-mass planets via microlensing from Dome C ?*, EAS Publications Series, pp 297–302, PLANET (Probing Lensing Anomalies Network) <http://planet.iap.fr>
- [2] Bond, I.A., et al., 2004, *Ap.J.* 606, L155
- [3] Boss, A.P., 1997, *Science* 276, 1836
- [4] Brown, T.M., Charbonneau, D., Gilliland, R.L., Noyes, R.W., & Burrows, A., 2001, *Ap.J.* 552, 699
- [5] Catala, C., et al., 2005, ESLAB, ESA “Cosmic Vision” meeting, ESA Publication, sous presse

- [6] Charbonneau, D., Brown, T.M., Noyes, R.W. & Gilliland, R.L., 2002, *Ap.J.* 568, 377
- [7] Charbonneau, D., et al., 2005, *Ap.J.* sous presse, astro-ph/0503457
- [8] Charbonneau, D., 2005, dans *Tenth anniversary of 51 Peg-b : Status of and prospects for Jupiter studies*, Actes du Colloque de L'Observatoire de Haute Provence (22–25 août 2005), Edt. L. Arnold, F. Bouchy & C. Moutou, sous presse, astro-ph/0511583
- [9] Chauvin, G., Lagrange, A.-M., Dumas, C., Zuckerman, B., Mouillet, D., Song, I., Beuzit, J.-L. & Lowrance, P., 2004, *A&A Letters* 425, L29
- [10] Deeg, H.J., Doyle, L.R., Kozhevnikov, V.P., Blue, J.E., Martyn, E.L., & Schneider, J., 2000, *A&A* 358, L5
- [11] Deming, D., Seager, S., Richardson, L.J., & Harrington, J., 2005, *Nature* 434, 740
- [12] Doyle, L.R., Deeg, H.J., Kozhevnikov, V.P., Oetiker, B., Martn, E.L., Blue, J., Rottler, L., Stone, R.P.S., Ninkov, Z., Jenkins, J.M., Schneider, J., Dunham, E.W., Doyle, M.F., & Paleologou, E., 2000, *Ap.J.* 535, 338
- [13] Ehrenreich, D., Tinetti, G., Lecavelier des Étangs, A., Vidal-Madjar, A., & Selsis, F., 2005, *A&A*, sous presse, *A&A preprint* doi <http://dx.doi.org/10.1051/20053861>
- [14] Einstein, A., 1936, *Science* 84, 506
- [15] Farrell, W.M., Desch, M.D., & Zarka, P., 1999, *J. Geophys. Res.* 104, 14025
- [16] Farrell, W.M., Lazio, T.J., Zarka, P., Bastian, T., Desch, M.D., & Ryabov, B.P., 2004, *Planet. Space Sci.* 52, 1469
- [17] Guillot, T., Burrows, A., Hubbard, W.B., Lunine, J.I. & Saumon, D., 1996, *Ap.J. Letters* 459, L35
- [18] Guillot, T., Allard, F., Beaulieu, J.-P., Bouchy, F., Coudé du Foresto, V., Dutrey, A., Lopez, B., Malbet, F., Mouillet, D., & Vidal-Madjar, A., 2005, Rapport du Groupe de Travail “Exoplanètes” du CNRS
- [19] Gozdziewski, K., Konacki, M. & Wolszczan, A., 2005, *Ap.J.* 619, 1084
- [20] Harwit, M., Progrès et découvertes en astronomie, 1984, Masson Edt.
- [21] Ida, S., & Lin, D.N.C., 2004, *Ap.J.* 604, 388
- [22] Konacki, M., Lewandowski, W., Wolszczan, A., Doroshenko, O., & Kramer, M., 1999, *Ap.J.* 519, 81
- [23] Konacki, M. & Wolszczan, A., 2003, *Ap.J. Letters* 591, L147
- [24] Labeyrie, A., 2003, *EAS Publications Series*, 8, dans *Detecting exo-Earths with hypertelescopes in space : the Exo-Earth Discoverer concept, Astronomy with High Contrast Imaging*, Actes de la

- conférence tenue du 13 au 16 Mai, 2002 à Nice, France, Edt. C., Aime & R., Soummer, pp.327–342, 2003
- [25] Lamers, H.J.G.L.M., Lecavelier des Étangs, A. & Vidal–Madjar, A., 1997, *A&A* 328, 321
- [26] Lecavelier des Étangs, A., Deleuil, M., Vidal–Madjar, A., Ferlet, R., Nitschelm, C., Nicolet, B. & Lagrange–Henri, A–M., dans *Circumstellar dust disks and planet formation*, Actes du Colloque de l’IAP (4–8 juillet 1994), Edt. R. Ferlet & A. Vidal–Madjar, pp 93–98, 1995a
- [27] Lecavelier des Étangs, A., Deleuil, M., Vidal–Madjar, A., Ferlet, R., Nitschelm, C., Nicolet, B. & Lagrange–Henri, A–M., 1995b, *A&A* 299, 557
- [28] Lecavelier des Étangs, A., Vidal–Madjar, A., Burki, G., Lamers, H.J.G.L.M., Ferlet, R., Nitschelm, C. & Sèvre, F., 1997, *A&A* 328, 311
- [29] Lecavelier des Étangs, A., Vidal–Madjar, A., McConnell, J.C. & Hébrard, G., 2004, *A&A Letters* 418, L1
- [30] Lecavelier des Étangs, A., Nitschelm, C., Olsen, E.H., Vidal–Madjar, A. & Ferlet, R., 2005a, *A&A Letters* 439, L571
- [31] Lecavelier des Étangs, A., & Ehrenreich, D., 2005b, ESLAB, ESA “Cosmic Vision” meeting, ESA Publication, sous presse
- [32] Mayor, M., 2005, présentation au STScI “May Symposium”
- [33] Nitschelm, C., Lecavelier des Étangs, A., Vidal–Madjar, A., Ferlet, R., Olsen, E.H. & Dennefeld, M., 2000, *A&A Letters* 439, L571
- [34] Paczynski, B., 1986, *Ap.J.* 304, 1
- [35] Perryman, M., Hainaut, O. et col., 2005, dans *Extra-solar planets*, Rapport des groupes de travail ESA-ESO, Publié par ESA & ESO, astro-ph/0506163 et [http://www.eso.org/gen-fac/pubs/esaesowg/espwg\\_report.pdf](http://www.eso.org/gen-fac/pubs/esaesowg/espwg_report.pdf)
- [36] Ribas, I., Arenou, F., & Guinan, E.F., 2002, *AJ* 123, 2033
- [37] Ryabov, V.B., Zarka, P., & Ryabov, B.P., 2004, *Planet. Space Sci.* 52, 1479
- [38] Sartoretti, P., & Schneider, J., 1999, *A&AS* 134, 553
- [39] Schneider J., & Doyle L.R., 1995, *EM&P* 71, 153
- [40] Sigurdsson, S., Richer, H.B., Hansen, B.M., Stairs, I.H. & Thorsett, S.E., 2003, *Science* 301, 193
- [41] Sudarsky, D., Burrows, A., & Hubeny, I., 2003, *Ap.J.* 588, 1121
- [42] Udalski et al., 2005, *Ap.J.* 628, L109
- [43] Vidal–Madjar, A., Lecavelier des Étangs, A., Désert, J.–M., Ballester, G.E., Hébrard, G., Ferlet, R., Hébrard, G. & Mayor, M., 2003, *Nature* 422, 143

- [44] Vidal-Madjar, A., Désert, J.-M., Lecavelier des Étangs, A., Hébrard, G., Ballester, G.E., Ehrenreich, D., Ferlet, R., McConnell, J.C., Mayor, M. & Parkinson, C.D., 2004, *Ap.J. Letters* 604, L69
- [45] Vidal-Madjar, A., 2006, Chapitre de cette école de Goutelas sur la découverte de l'évaporation d'une exoplanète
- [46] Wolszczan, A., & Frail, D.A., 1992, *Nature* 355, 145
- [47] Wolszczan, A., 1994, *Science* 264, 538
- [48] Zarka, P., Queinnec, J., Ryabov, B.P., Ryabov, V.B., Shevchenko, V.A., Arkhipov, A.V., Rucker, H.O., Denis, L., Gerbault, A., Dierich, P., & Rosolen, C., 1997, Ground-Based High Sensitivity Radio Astronomy at Decameter Wavelengths, dans *Planetary Radio Emissions IV*, Edt. H.O., Rucker, S.J., Bauer, & A., Lecacheux, Austrian Acad. Sci. Press, Vienna, pp. 101–127
- [49] Zarka, P., Treumann, R.A., Ryabov, B.P., & Ryabov, V.B., 2001 *Astrophys. Space Sci.* 277, 293
- [50] Zarka, P., dans *Extrasolar planets, today and tomorrow*, Edt. J-P., Beaulieu, A., Lecavelier des Étangs & C., Terquem, ASP Conference series 321, p. 160