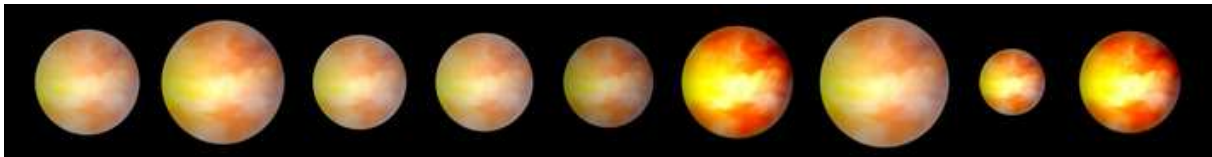


Prospective Exoplanètes

Document présenté
à la Commission Spécialisée Astronomie de l'Institut National des Science de l'Univers
par le groupe "exoplanètes" :

Tristan Guillot, François Bouchy, Alfred Vidal-Madjar,
Claire Moutou, Jean-Philippe Beaulieu, Fabien Malbet, Marc Ollivier, Anne Dutrey,
David Mouillet, Vincent Coudé du Foresto, Bruno Lopez, France Allard

Incluant une synthèse de la recherche française dans le domaine (2000-2005)
et les perspectives à court et moyen terme (2005-2015).



16 mai 2006

Table des matières

1 Motivations

- 1.1 Mandat
- 1.2 Composition du groupe

2 Les grandes questions

- 2.1 Introduction
- 2.2 Vers la détection directe d'objets plus faibles
- 2.3 Nos origines : l'étude de la formation planétaire
- 2.4 Caractériser les planètes et systèmes planétaires alentours

3 Vers des réponses observationnelles

- 3.1 Introduction
- 3.2 Les méthodes liées aux réponses dynamiques
 - 3.2.1 La vélocimétrie radiale
 - 3.2.2 L'astrométrie
 - 3.2.3 Le chronométrage
- 3.3 L'analyse du signal photométrique
 - 3.3.1 Les effets de microlentilles gravitationnelles
 - 3.3.2 Les transits planétaires
- 3.4 La spectroscopie directe
- 3.5 L'imagerie
 - 3.5.1 L'interférométrie
 - 3.5.2 La coronographie et l'optique adaptative

4 Les études théoriques

- 4.1 La dynamique des systèmes planétaires
- 4.2 La modélisation des atmosphères
 - 4.2.1 Profils et spectres
 - 4.2.2 Dynamique atmosphérique, nuages et variabilité
 - 4.2.3 Exosphères planétaires et évaporation
- 4.3 Intérieurs et évolutions
 - 4.3.1 Les équations d'état
 - 4.3.2 L'évolution et la composition des planètes gazeuses
 - 4.3.3 La modélisation de l'intérieur des planètes solides
- 4.4 Les liens étoiles/planètes
- 4.5 La formation planétaire

5	Le contexte	29
5.1	L'état des découvertes en 2005	29
5.2	Prévisions à 10 ans	30
5.3	Les thèmes de recherche en France	32
5.4	Les projets en France	33
5.5	Les projets de vélocimétrie radiale	33
5.5.1	HARPS	33
5.5.2	VLT-FLAMES	34
5.5.3	Sophie	34
5.6	Les projets photométriques	35
5.6.1	PLANET	35
5.6.2	COROT	36
5.6.3	A STEP	37
5.6.4	PASS	37
5.7	Les projets astrométriques	38
5.7.1	VLT-PRIMA	38
5.7.2	GAIA	38
5.8	Les projets d'imagerie directe et de spectroscopie	38
5.8.1	NACO (VLT)	38
5.8.2	WIRCAM (TCFH)	38
5.8.3	VLT-CRIRES	38
5.8.4	VLT-Planet Finder (SPHERE)	39
5.8.5	JWST/MIRI	39
5.9	Les projets d'interférométrie	39
5.9.1	VLT-MIDI	39
5.9.2	VLT-AMBER	40
5.9.3	VLT-I2G	40
5.9.4	GENIE	40
5.9.5	ALADDIN	40
5.9.6	PEGASE	40
5.9.7	ALMA	41
5.9.8	KEOPS	42
5.9.9	DARWIN	42
5.9.10	Hypertélescopes (CARLINA, VLTI-VIDA, OVLA, Perce-neige)	43
5.9.11	SKA	43
5.10	Programmatique	43
6	Recommandations	47
7	Annexe A : bibliographie des recherches exoplanètes en France 2000-2005	49
8	Annexe B : Liste des thématiques exoplanètes et chercheurs classés par instituts	62

Chapitre 1

Motivations

1.1 Mandat

Constatant à la fois l'importance du thème des exoplanètes dans le domaine de l'astronomie, le rôle joué par les équipes françaises tant du point de vue de la modélisation, des développements instrumentaux et des observations, l'INSU, sur recommandation de la CSA, demande la création d'un Groupe de travail dont le mandat est le suivant :

1. Dresser un bilan des activités (théoriques, instrumentales, observationnelles) liées aux exoplanètes en France.
2. Proposer un plan d'ensemble des actions souhaitables à court, moyen et long termes à venir dans ce domaine.
3. Identifier parmi les projets liés à ce plan d'action, ceux pour lesquels la France peut être amenée à jouer un rôle significatif .
4. Identifier les contraintes techniques associées aux projets instrumentaux.

1.2 Composition du groupe

- France Allard (CRAL),
- Jean-Philippe Beaulieu (IAP),
- François Bouchy (OHP/LAM),
- Vincent Coudé du Foresto (LESIA),
- Anne Dutrey (Obs. Bordeaux -représentante PNP),
- Tristan Guillot (OCA -président)
- Bruno Lopez (OCA),
- Fabien Malbet (Obs. Grenoble -représentant PNPS),
- David Mouillet (Obs. Toulouse),
- Claire Moutou (LAM),
- Marc Ollivier (IAS Orsay -représentant ASHRA),
- Alfred Vidal-Madjar (IAP)

Chapitre 2

Les grandes questions

2.1 Introduction

La France présente des compétences variées et en général de nombreux atouts pour la recherche des exoplanètes, l'analyse scientifique des observations et la théorie de leur formation et évolution. On peut citer une participation dans la détection de planètes par vitesses radiales, la découverte de l'évaporation de HD209458b, les premiers modèles théoriques d'évolution de ces planètes, des modèles de transfert radiatif détaillés de leurs atmosphères et la découverte de la moitié des planètes extrasolaires connues en transit à ce jour.

Les recherches liées aux exoplanètes sont fondamentales d'une part parce qu'elles nous renseignent sur la formation des planètes en général, l'origine de la vie, et notre place dans l'Univers avec la question de la présence d'autres Terres habitables. Elles sont aussi des laboratoires pour la physique en général, notamment : l'étude des interactions planètes/étoiles et disques/planètes, les effets de marées, la météorologie, les champs magnétiques, les effets liés à l'irradiation stellaire. Elles peuvent aussi, dans le cas des planètes géantes, apporter des informations de type chronologique sur des systèmes astronomiques.

Deux types d'approches observationnelles sont possibles : découvrir de nouveaux systèmes planétaires, ou les caractériser de façon précise. Des observations en vitesses radiales, en astrométrie et par microlentilles gravitationnelles permettent de découvrir indirectement les systèmes planétaires et de compléter le diagramme (masse, distance orbitale). L'approche de la détection des planètes par transits paraît très prometteur pour une caractérisation très complète des planètes les plus proches de leur étoile (avec en particulier la possibilité d'étudier leur composition interne et atmosphérique, leur évaporation et des effets liés à la dynamique atmosphérique). Enfin, la détection directe représente un challenge pour les années futures de part sa difficulté, mais elle devrait permettre de compléter l'espace des paramètres et d'ajouter des informations sur la luminosité et la spectroscopie des atmosphères planétaires.

2.2 Vers la détection directe d'objets plus faibles

L'une des grandes quêtes de l'humanité est la découverte de la Vie. L'un des maillons de cette quête est la détection d'objets de moins en moins brillants, plus semblables à notre propre Terre. La difficulté de la tâche va de pair avec l'enjeu : il s'agit de détecter une planète environ un milliard de fois moins brillante que son étoile, et un million de fois plus près de son étoile que de nous. Qui plus est, nous ne voulons pas nous contenter de savoir que cette planète existe, nous voulons pouvoir en faire son spectre et savoir de quoi elle est composée !

Les avancées technologiques des vingt dernières années, (les grands miroirs de qualité optique extrême, l'optique adaptative, l'amélioration des performances des détecteurs, l'exploration des longueurs d'onde infrarouges, de nouvelles méthodes de traitement d'image...etc.) ont permis des avancées spectaculaires dans ce domaine. Ainsi, la détection directe d'une naine brune en 1995 a ouvert la porte du domaine de

ces objets trop peu massifs pour être qualifiés d'étoiles et cependant encore beaucoup plus massifs que nos planètes géantes. Cette découverte a été suivie de plusieurs centaines d'autres, et à l'apparition de 2 nouveaux types spectraux, ce qui — hormis les quelques types spectraux particuliers liés à des différences de composition chimique — n'avait pas eu lieu depuis la publication de la classification de Harvard en 1924.

La poursuite de ces observations dans les amas jeunes a conduit à la détection d'objets encore relativement lumineux car jeunes, mais de moins en moins massif, jusqu'à avoisiner la limite entre naines brunes et planètes. Il importe finalement peu que cette limite soit encore floue, et que la détermination des masses de ces objets soit incertaine : l'avancée considérable de notre capacité de détecter des objets extrêmement peu lumineux nous laisse envisager la possibilité de pousser les limites des détections directe jusque bien à l'intérieur du domaine planétaire dans les années à venir.

2.3 Nos origines : l'étude de la formation planétaire

D'autre part, la découverte par des méthodes indirectes de systèmes planétaires autour d'autres étoiles que notre Soleil a entraîné un formidable essor des études liées à la compréhension des mécanismes de formation des planètes, un autre thème astrophysique majeur lié à la compréhension de nos origines. En effet, d'un exemple unique et forcément biaisé, nous sommes passés en dix ans à plus de 150 systèmes planétaires que nous pouvons comparer, et sur lesquels nous pouvons tester les différents modèles de formation.

L'un des résultats marquants est sans aucun doute la mise en évidence du fait que les planètes on pu migrer substantiellement suite à leur formation, soit par interaction avec le disque de gaz qui les a formé, soit par interactions gravitationnelles avec d'autres planètes du système. Même si nous sommes loins de saisir tous les mécanismes responsables de la distribution des orbites des systèmes planétaires, il apparaît que les interactions entre planètes, les collisions géantes, les effets de marées façonnent des systèmes planétaires extrêmement divers et surprenants.

La richesses des données potentiellement accessibles et la complexité des mécanismes en jeu font de ce thème de l'origine des planètes l'un des thèmes de l'astrophysique appelé au plus grand essor dans les années à venir.

2.4 Caractériser les planètes et systèmes planétaires alentours

La connaissance des caractéristiques des systèmes planétaires est motivée par la volonté de détecter des objets semblables à la Terre et par le désir de compréhension des mécanismes de la formation planétaire. Mais elle est aussi légitime en soi, pour mieux connaître l'Univers en général et les astres voisins en particulier.

Même si la caractérisation des planètes extrasolaires est une tâche difficile, de nombreuses pistes s'offrent à nous, et permettent d'envisager des réponses à des questions théoriques et d'en stimuler de nouvelles.

La connaissance des **paramètres orbitaux** des systèmes extrasolaires représente dans la plupart des cas l'unique information disponible actuellement, de part le fait que la méthode utilisée (la technique dite de vélocimétrie radiale -voir ci-dessous) ne donne pas accès aux caractéristiques directes des planètes. La poursuite de ces études permettra plusieurs avancées importantes :

1. La possibilité d'avoir une statistique fiable et sur divers paramètres, grâce à l'augmentation du nombre de détections
2. La diminution des barres d'erreurs sur les mesures, et en particulier sur l'excentricité des orbites ; celle-ci est très difficile à estimer précisément mais joue un rôle très important pour l'évolution des planètes très proches de leur étoile et en interaction avec celle-ci par effets de marées.
3. La découverte de nouveaux systèmes soit inattendus, soit par exemple en résonance, pour lesquels l'on peut déduire des contraintes fortes sur les étapes de formation de ces systèmes.

La possibilité de déterminer à la fois **la masse** et **le rayon** des planètes extrasolaires grâce à la méthode des transits permet pour la première fois d'avoir accès à une estimation de la composition de ces objets et de tester les modèles de formation et d'évolution. Ainsi, HD209458b paraît, d'après les modèles d'atmosphère les plus réalistes, trop grande par rapport aux prédictions théoriques, ce qui semble indiquer la présence d'une autre source d'énergie (par exemple celle liée aux effets de marée). D'autre part, une autre planète récemment découverte, HD149026b est beaucoup plus petite, et pourrait être une géante formée d'environ $70 M_{\oplus}$ d'éléments lourds, et de $50 M_{\oplus}$ d'hydrogène et d'hélium !

La **composition** des planètes peut être ainsi obtenue par la mesure de leur densité, mais aussi par l'étude spectroscopique des transits qui permet la détection d'espèces chimiques qui ont des raies d'absorption profondes. La détection directe permettra d'autre part de s'affranchir de la nécessité de choisir des planètes en transit pour en obtenir des spectres et permettra donc d'étendre ce type d'information à des planètes orbitant à de plus grandes distances de leurs étoiles.

La **température** de l'atmosphère, sa **dynamique**, **la présence de nuages**, peuvent être déterminés par le suivi de la phase planétaire et de ses transits primaires et secondaires, si possible à différentes longueurs d'onde.

L'**évaporation** d'une planète peut être déterminée par l'existence de raies d'absorption de certaines espèces et le changement de rayon effectif de la planète à ces longueurs d'onde lors d'un transit. Cette mesure a permis de montrer que HD209458b s'évapore lentement.

L'**environnement planétaire (lunes, anneaux)** peut être déterminé par un chronométrage précis des transits, et par l'étude de leur forme.

La présence de **champs magnétiques** et généralement les interactions étoile-planète peuvent être étudiés, soit par l'observation de traceurs classiques de l'activité stellaire, soit par une détection radio de l'émission aurorale potentielle des planètes extrasolaires.

Il est à noter qu'un grand nombre d'observables sont accessibles uniquement pour les planètes en transit devant leur étoile, c'est-à-dire par le truchement des probabilités, les planètes situées au plus près de leurs étoiles. Ces planètes sont appelées Pégasides en référence à la première planète découverte. Cette situation perdurera certainement pendant très longtemps : il faut envisager que nous aurons beaucoup plus de données exploitables concernant ces planètes que concernant celles situées à plus d'une fraction d'unité astronomique de leur étoile.

Cependant, l'avènement de grands télescopes spatiaux comme le JWST (ex : NGST) et DARWIN ou au sol comme OWL permettra l'étude spectroscopique de planètes plus loin de leur étoile, sans nécessiter la présence de transits. DARWIN en particulier vise la possibilité de détection de biomarqueurs dans les spectres de planètes extrasolaires de tailles terrestres.

Chapitre 3

Vers des réponses observationnelles

3.1 Introduction

Planet Detection Methods

Michael Perryman, Rep. Prog. Phys., 2000, 63, 1209 (updated November 2004)
[corrections or suggestions please to michael.perryman@esa.int]

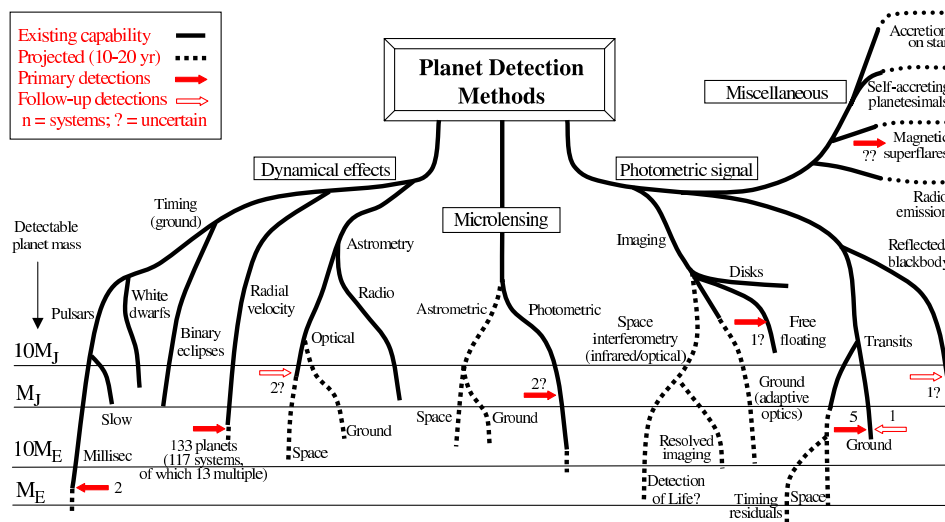


FIG. 3.1 – Figure dite “arbre de Perryman” montrant l’impact des différentes méthodes observationnelles sur la détection d’objets de moins en moins massifs. (d’après Perryman et al. 2005, astroph/0506163).

Les méthodes permettant de détecter et/ou d’apporter de l’information sur les exoplanètes sont nombreuses, ainsi que le montre la figure 3.1. Dans ce qui suit, nous distinguerons deux grandes familles : les méthodes liées aux réponses dynamiques induites par la ou les planètes sur leur étoile parente, celle basée sur la détection d’un phénomène de microlentille gravitationnelle, les méthodes liées à l’analyse du signal photométrique et celles de détection directe d’une exoplanète.

3.2 Les méthodes liées aux réponses dynamiques

3.2.1 La vélocimétrie radiale

La détection des variations de la vitesse radiale d'une étoile dues à son mouvement autour du centre de masse étoile-planète est actuellement la méthode la plus efficace pour la recherche de planètes extrasolaires et à conduit ces 10 dernières années à la découverte de la quasi-totalité des 150 exoplanètes connues à ce jour (voir Fig. 3.2).

Suivant les lois de Kepler, la semi-amplitude vélocimétrique mesurée K est directement reliée aux masses des composantes du système, de la période orbitale (ou du demi-grand axe), de l'excentricité et de l'angle i entre le plan de l'orbite et le ciel. Dans le cas d'une orbite circulaire d'un couple étoile-planète, la masse minimum du compagnon planétaire est donné par la relation suivante :

$$\left(\frac{m_p}{M_J}\right) \sin i = 3.5 \cdot 10^{-2} \left(\frac{K}{\text{m s}^{-1}}\right) \left(\frac{a}{\text{UA}}\right)^{1/2} \left(\frac{M}{M_\odot}\right)^{1/2} \quad (3.1)$$

La mesure des vitesses radiales est obtenue par la mesure du décalage Doppler du spectre de l'étoile. Pour des variations de quelques ms^{-1} , le décalage Doppler est très faibles (quelques 10^{-8}). Seule l'utilisation d'un spectrographe combinant une haute résolution spectrale, un grand domaine spectral et un contrôle en stabilité ainsi que l'observation à haut rapport signal-sur-bruit d'étoiles stables comprenant un grand nombre de raies fines et contrastées permet d'obtenir la précision nécessaire à la mise en évidence de compagnons planétaires.

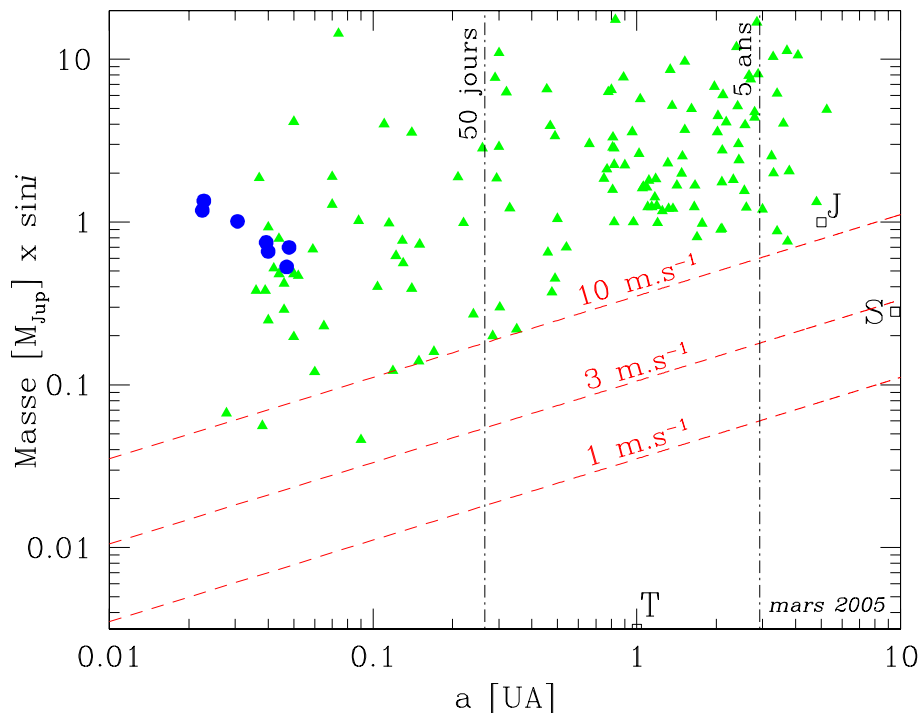


FIG. 3.2 – Diagramme masse - demi grand axe des exoplanètes connues. Les triangles verts correspondent aux exoplanètes détectées par vitesses radiales. Les 7 ronds bleus correspondent aux exoplanètes caractérisées par transits photométriques et vitesses radiales ($\sin i=1$). Les planètes Terre, Jupiter et Saturne sont ajoutées pour comparaison. Trois limites en précision Doppler 1, 3 et 10 ms^{-1} sont indiquées.

L'amélioration des techniques Doppler a permis ces dernières années d'atteindre des précisions vélocimétriques de seulement quelques ms^{-1} . Plus de 10 surveys en vitesses radiales sont actuellement menés pour la

détection d'exoplanètes. Certains d'entre eux sont conduits sur de grands télescopes (4-10 m) permettant le suivi d'un large échantillon d'étoiles de type solaire. Le nombre d'exoplanètes géantes "facile à déceler" ($0.5 - 10 M_{Jup}$) devrait donc doubler voir tripler à l'horizon 2010. On s'attend aussi, compte tenu de la durée de certains programmes et de la distribution observée des période, à déceler de plus en plus d'exoplanètes de longues périodes ($P \geq 10$ ans).

Le spectrographe HARPS, en fonctionnement depuis 2 ans sur le 3.6-m de l'ESO à La Silla (Chili), parvient à atteindre la précision de 1 ms^{-1} et s'avère en réalité être limité par l'activité sismique (modes d'oscillations acoustiques) et photosphérique des étoiles. La précision de HARPS permet la détection de planètes de masse comparable à Uranus et ainsi d'explorer le domaine des super-Terres chaudes. Un consortium franco-suisse bénéficie de 500 nuits garanties sur 5 ans (2003-2008) pour la recherche d'exoplanètes avec un programme qui s'articule autour des 6 points suivants :

- recherche à haute précision de planètes de faibles masses ($10\text{-}30 M_{\oplus}$) autour d'un échantillon d'étoiles stables,
- recherche de planètes Joviennes autour d'un large échantillon,
- recherche de planètes autour des naines M,
- recherche de planètes autour d'étoiles déficientes,
- recherche de planètes autour d'étoiles binaires.
- suivi des candidats transits détectés par photométrie.

Le spectrographe SOPHIE, en cours de réalisation à l'Observatoire de Haute-Provence, est voué à remplacer ELODIE mi-2006 et constituera la contre-partie Nord de HARPS. Un consortium franco-suisse sera constitué afin de réaliser un large et ambitieux programme de recherche et caractérisation des exoplanètes. En visant une précision de 1 à 2 ms^{-1} , SOPHIE complétera HARPS dans la recherche des super-Terres et dans la détection de Jupiters chauds pouvant conduire à des candidats transits potentiels.

L'amélioration des techniques Doppler s'est aussi révélée ces dernières années dans la possibilité de suivre les candidats transits détectés en photométrie depuis le sol. Alors qu'on ne connaissait qu'une seule exoplanète à transits en 2003 (la fameuse HD209458b), 6 nouvelles exoplanètes ont été détectées ces 2 dernières années par des surveys photométriques sols. Cinq d'entre elles ont notamment pu être caractérisées grâce au spectrographe multi-objets UVES+FLAMES du VLT. Le suivi Doppler s'avère indispensable pour confirmer et caractériser les exoplanètes décelées par transits photométriques. Les deux techniques sont par conséquent très complémentaires et permettent de caractériser la masse exacte (et non la masse minimum) ainsi que le rayon (et donc la densité) des Jupiter chauds (voir Fig. 3.3).

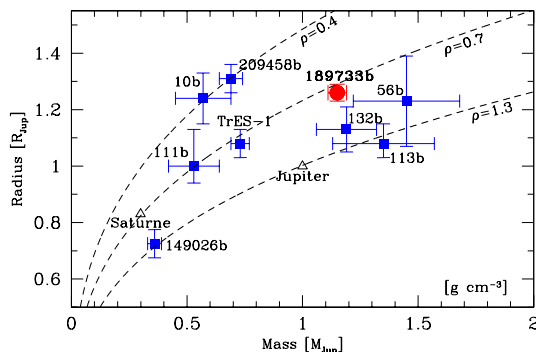


FIG. 3.3 – Diagramme masse - rayon des 7 exoplanètes détectées par transits photométriques et par vitesses radiales. Les planètes Saturne et Jupiter sont ajoutées pour comparaison ainsi que les courbes d'iso-densité (g cm^{-3}).

La mission spatiale COROT, dont le lancement est prévue mi-2006, nécessitera un important suivi spectroscopique et vélocimétrique des candidats transits. Les spectrographes HARPS, UVES+FLAMES et SOPHIE consacreront une large partie de leur programme au suivi des exoplanètes détectées par CO-

Objet	$\delta\theta$ à 5 pc (μas)	$\delta\theta$ à 10 pc (μas)	$\delta\theta$ à 15 pc (μas)
Jupiter	1000	500	333
Saturne	550	270	180
Neptune	310	150	100
Uranus	170	80	60
Terre	0.6	0.3	0.2

TAB. 3.1 – Amplitude du mouvement réflex d’une étoile à détecter par astrométrie en fonction du type d’objet

ROT. La sensibilité et la précision de HARPS permettra notamment de caractériser les masses des plus petites planètes détectées par le satellite ($\sim 2 R_{\oplus}$).

A l’horizon 2010, la vélocimétrie radiale va donc conduire à des avancées significatives dans 2 axes principaux :

- La détection des super-Terres chaudes,
- La caractérisation des exoplanètes détectées par transits photométriques.

Les limitations instrumentales proviennent essentiellement du contrôle du point zéro du spectrographe ($\sim 40 \text{ cms}^{-1}$) et de la précision de guidage sur la fibre optique du spectrographe ($\sim 30 \text{ cms}^{-1}$). Un des enjeux des techniques Doppler sera de réduire ces limitations. Les limitations astrophysiques (activité sismique et photosphérique) demandent d’une part d’intégrer suffisamment longtemps pour gommer et moyennner les modes p (plusieurs minutes ou plusieurs dizaines de minutes) et de contrôler avec une très grande précision les variations du bissecteur des raies spectrales. Il n’est donc pas totalement exclu d’imaginer parvenir à l’horizon 2010 à la précision de 30 cms^{-1} permettant ainsi la détection de super-Terres dans la zone habitable. Un autre enjeu à l’horizon 2010 consisterait à renforcer l’approche vélocimétrie multi-objets (de type GIRAFFE) afin à la fois d’augmenter significativement l’échantillon de cibles suivies et de rechercher des exoplanètes dans des amas.

3.2.2 L’astrométrie

L’astrométrie consiste à mesurer la position des astres sur le plan du ciel. Dans le cas de la recherche de planètes, l’objectif est de mesurer le mouvement réflexe des étoiles due à la présence d’une planète. Cette méthode de détection est basée sur le même effet physique que celui utilisé en vélocimétrie radiale, sauf que l’astrométrie mesure l’amplitude du mouvement projeté sur le plan du ciel au lieu de mesurer la vitesse de ce mouvement le long de la ligne de visée. En obtenant plusieurs points, il est possible de remonter à l’orbite de la planète et même de mesurer le $\sin i$.

L’amplitude du mouvement réflexe dû à la présence de Jupiter sur le Soleil correspond à un rayon solaire, soit environ $100 \mu\text{as}$. Le tableau ci-dessous donne l’ordre de grandeur du phénomène à détecter en fonction du type d’objet.

La méthode est très complémentaire de celle des vitesses radiales car d’autant plus sensible que l’objet est massif et loin de son étoile. Contrairement à la détection par mesure de la vitesse radiale, la méthode astrométrique permet d’accéder à l’inclinaison du système (on observe la trajectoire de l’objet projetée sur le plan du ciel) et permet donc la détermination de la masse exacte du compagnon. Cette méthode devrait donc permettre d’identifier des **compagnons situés à plusieurs U.A.** de leur étoile et compléter l’étude statistique de l’environnement des étoiles proches. La difficulté principale est la durée des observations. Il faut en effet couvrir une fraction de l’orbite du compagnon pour mettre en évidence le mouvement de l’étoile. Cela implique dans la pratique plusieurs années d’observation.

L’astrométrie est certainement à ce jour, la seule méthode indirecte qui permettra de mettre en évidence des planètes telluriques à grande distance de leur étoile (distance supérieure à quelques U.A.) autour des étoiles proches.

Au niveau instrumental, plusieurs techniques ont été envisagées :

- l’astrométrie au sol.
 - L’astrométrie au sol grand champ avec des caméras CCD. Cette technique est inspirée de l’astrométrie stellaire traditionnelle. Par contre, il faut une excellente calibration des éléments du CCD pour espérer obtenir un résultat.
 - l’astrométrie au sol petit champ avec un interféromètre multi-télescopes. Le *Palomar Testbed Interferometer* (PTI) a été construit avec cet objectifs en tête. Actuellement sur des binaires, PTI a obtenu une performance de $10 \mu\text{as}$ en 70 minutes (Lane & Muterspaugh, 2003).
- l’astrométrie spatiale :
 - L’interféromètre SIM est en principe capable de descendre jusqu’à $4 \mu\text{as}$. C’est un des objectifs principaux de cette mission spatiale
 - GAIA est le satellite qui permettra de recenser les positions d’un milliard d’étoiles. Sa précision lui permettra de découvrir des planètes et en particulier des planètes de type rocheuses.

Au niveau français, nous avons une participation importante dans GAIA. Le laboratoire de Grenoble collabore par ailleurs avec Genève qui est en charge avec Heidelberg et Leiden de fournir l’instrument PRIMA du VLTI. PRIMA commencera à être installé au début de l’année 2008. L’objectif est d’atteindre $10 \mu\text{as}$.

3.2.3 Le chronométrage

La méthode de recherche de planètes extrasolaires par chronométrage consiste à utiliser une horloge très précise dans le système étudié et de 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 éclipse ou bien 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, 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 masse terrestre). D’autres planète-pulsars ont été ensuite détectées autour des pulsars PSR B0329+54 (Konacki et al., 1999) et 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 permet soit de découvrir la présence d’autres planètes dans le système étudié 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, l’éventualité de présence de ceintures d’astéroïdes (Goździewski, Konacki & Wolszczan, 2005).

Notons qu’une limitation sévère de la méthode est liée à la rareté des pulsars, et en particulier des pulsars millisecondes dans la Galaxie. Ceci ne permet pas d’envisager une progression significative de ce domaine dans les années qui viennent.

Binaires à éclipse

Comme les pulsars, les étoiles binaires à éclipse 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 $\delta T = M_P a \sin i / M_B c$, où M_P représente la masse du troisième corps, 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 large (~ 4000 actuellement connues dans notre Galaxie), que dans nombre de cas (~ 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 à la masse et à la taille de l'orbite du troisième corps présent dans le système (seuls $M = f(\sin i)$ et $a \sin i$ 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). 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 HD209458b (Brown et al., 2001) pour lequel il a été démontré que cette planète ne pouvait avoir de satellites de masse supérieure à $3 M_{\oplus}$ sans que cela ne soit révélé par un décalage de l'instant des transits qui aurait alors été supérieur aux 80 secondes de 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 efficace pour une relativement petite masse. Avec une précision de 5 secondes sur l'instant des transits, la détection d'une planète perturbatrice de $1 M_{\oplus}$ à 10 UA dans le système deviendrait possible.

3.3 L'analyse du signal photométrique

Dans le cas que l'on considère, c'est-à-dire la non-résolution des systèmes étoile+planète, des observations en photométrie à haute précision peuvent être utilisées dans plusieurs buts :

- Détecter des effets de microlentilles gravitationnelles : ceci va permettre essentiellement d'établir la statistique d'existence de planètes à 1 à 3 AU autour d'étoiles de faibles masses (type M essentiellement), mais avec une limite en masse très faible permettant la détection de planètes de type "Terre" ;
- Détecter des planètes en transit, avec la possibilité d'en mesurer le rayon ; Les planètes en transits, surtout autour d'étoiles brillantes permettent par la suite d'envisager de nombreux types d'études observationnelles et d'interprétations théoriques ;
- Analyser la lumière stellaire réfléchie par la planète lors de son orbite autour de l'étoile, ce qui nous renseigne sur les propriétés de l'atmosphère planétaire.

Les sensibilités à atteindre sont relativement raisonnables pour ce qui est de la recherche de microlentilles (quelques 10^{-2}), plus ardues pour ce qui est de la recherche de transits (environ 10^{-2} pour une planète de type Jupiter autour d'une étoile de type solaire, 10^{-4} pour une Terre), et très difficiles dans le cas de la lumière réfléchie (10^{-4} ou moins pour un Jupiter dans le visible, 100 fois moins pour une Terre).

Les sections suivantes décrivent les principes et possibilités des trois types d'approches.

3.3.1 Les effets de microlentilles gravitationnelles

Lorsqu'un objet massif passe devant une étoile source d'arrière-plan, il provoque une déviation de la lumière dont l'amplitude est prévue par la relativité générale. Il en résulte une amplification de la source selon une forme caractéristique du phénomène. Si l'objet massif est accompagné d'une planète, celle-ci provoque une perturbation de la courbe de lumière. Après l'idée originale de sonder la nature du halo de matière noire par microlentille (Paczynski, 1986, ApJ 304.), il est apparu que c'était un outil performant pour la recherche de planètes, y compris de petite masse (Mao Paczynski 1991, Gould & Loeb 1992, Bennett & Rhie 1996, Griest & Safizadeh 1998).

Cette méthode présente des difficultés mais l'expérience montre qu'elles sont surmontables :

- Il faut disposer d'un réseau de télescopes et un système d'analyse en ligne pour suivre 24h/24 des microlentilles dont l'étoile source est en train de transiter la lensing zone (zone de sensibilité aux effets de lentilles planétaires, typiquement entre 0.6 et 1.6 Rayon d'Einstein, soit 1-5 AU).

- Les travaux de modélisations peuvent être très compliqués.

- Les observables directes sont le rapport de masse étoile-planète, et la séparation projetée étoile-planète. Il faut alors soit profiter de contraintes supplémentaires dues à une microlentille particulière, voire utiliser les contraintes d'un modèle de la Galaxie comme prior dans le cadre d'une analyse Bayésienne pour contraindre les masses et les orbites des étoiles lentilles et donc par la même des planètes les orbitant.

Différents groupes ont tenté l'expérience et aujourd'hui les deux programmes de suivi de microlentilles concurrents sont microFUN (PI Gould) et PLANET (PI Beaulieu). Les grands relevés OGLE et MOA font également du suivi de leurs microlentilles les plus intéressantes, mais depuis un seul site.

Après avoir montré qu'il était possible d'opérer un réseau de télescopes et d'analyser les données en ligne avec succès, le premier résultat fut de montrer que les binaires pouvaient être modélisées sans ambiguïtés, et que l'absence de détection permettait de donner des contraintes fortes : PLANET a déjà montré que moins d'un tiers des naines M du disque ont un Jupiter entre 1 et 4 AU (Gaudi et al., 2002). A l'aide des données collectées sur la période 2002-2005 ces limites seront poussées jusqu'à quelques pourcents (travail en cours). On peut aussi citer la récente analyse de l'événement de très grande amplification MOA 2003-BLG 32 (Abe et al., 2004) montrant qu'une planète de masse 1.5 Terre entre 2.3 et 3.6 AU est exclue à 50 %, ainsi qu'Uranus sur des orbites de 0.9 à 8.7 AU autour de la lentille.

La recherche de planètes extrasolaires par microlentille a finalement atteint sa maturité avec les premières détections sans ambiguïtés : Une planète de 1.5 Jupiter à 3 UA, détectée par microlentille, a été publiée en combinant les données collectées par les grands relevés OGLE et MOA (Bond et al., 2004). Une deuxième planète, de masse ~ 2.7 Jupiters à ~ 2.2 ou ~ 3.7 UA vient d'être publiée en combinant les efforts de toutes les équipes de la thématique (Udalski et al., 2005). Cette découverte est très encourageante :

- Il est possible dans un événement de grande amplification, de détecter avec un très haut rapport signal sur bruit une planète de masse Jupiter.

- La modélisation a pu montrer sans ambiguïté la nature de ce système.

- Il est techniquement possible, de détecter dès maintenant des planètes de type Neptune, voire terrestre. En effet, si au lieu d'un ~ 2.7 Jupiter, le système avait eu une planète Terre, toutes les autres caractéristiques (y compris le rayon de l'orbite), du système restant identiques, elle aurait été détectée !

Et en 2005 (fig. 3.4), PLANET vient de découvrir une planète de masse 5_{-2}^{+7} Terre sur une orbite de $2.8_{-0.6}^{+1.6}$ AU, la première planète rocheuse/glacée en orbite autour d'une naine M du Bulbe galactique Beaulieu et al., 2006). Une des conséquences de cette découverte, compte tenu de leur efficacité de détection, est que ce type de planète doit être commun ! Elles sont par contre inaccessibles aux vitesses radiales, transit, imagerie directe ou astrométrie pour de longues années encore.

Suite à cette récente détection de petite planète, un effort intensifié dans les années 2006-2008 devrait donner des contraintes fortes et des détections de planètes de masse 1-15 Terres, sur des orbites de 1-5 AU. On notera l'aspect compétition / coopération des différents groupes mettant leurs données en ligne et les partageant, pour maximiser les chances de détection. Le groupe ayant assuré un rôle moteur dans la détection, mène l'analyse, et invite les autres participants à l'observation de cette microlentille particulière à être co-auteurs.

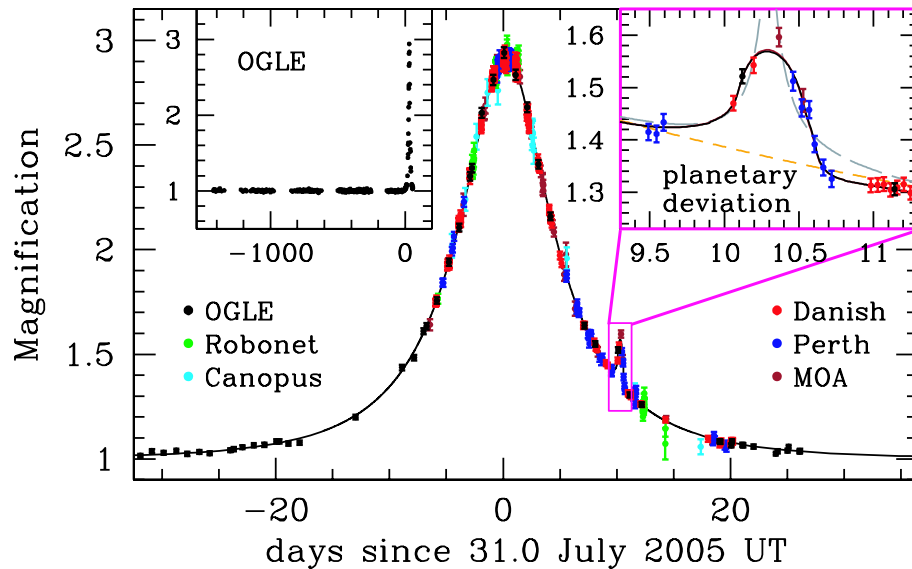


FIG. 3.4 – Courbe de lumière (variation de l'éclat en fonction du temps) de OGLE-2005-BLG-390. Chaque point représente une mesure, et sa couleur correspond au télescope où l'observation a été faite. La couverture continue de la courbe par les observations montre l'efficacité de notre stratégie à plusieurs télescopes répartis sur différents continents (OGLE et Danish au Chili, RoboNet aux Canaries et à Hawaii, Canopus et Perth en Australie, MOA en Nouvelle-Zélande). L'insert montre un agrandissement de la déviation due à la planète et correspond à la nuit du 10 août 2005. Les deux premiers points rouges correspondent à la détection de l'anomalie au télescope Danois et les points bleus mesurés à Perth montrent l'importance d'alerter les collègues lorsqu'une anomalie a été détectée. (D'après Beaulieu et al. 2006).

La figure 3.5 montre le potentiel intéressant de la méthode des microlentilles gravitationnelles et sa complémentarité avec les autres méthodes de détection d'exoplanètes.

3.3.2 Les transits planétaires

La méthode des transits consiste à détecter et mesurer la baisse de luminosité d'une étoile produite par le passage d'une planète devant son disque. Elle est sensible au rayon planétaire, et nécessite un alignement rigoureux de l'étoile hôte, la planète et l'observateur. La détection par transits depuis le sol permet la détection de planètes de taille comparable aux rayons de Jupiter à Saturne, et depuis l'espace on détectera des planètes de type terrestre (une à quelques fois le rayon de la Terre). La combinaison des méthodes de vitesse radiale et transit permet la caractérisation des paramètres physiques de l'exoplanète (estimation de la densité moyenne) et ouvre donc la porte à l'exoplanétologie en offrant des contraintes aux modèles de formation, évolution, structure interne et atmosphère des planètes.

La méthode des transits est biaisée vers les planètes de grand rayon et de courte période. Les étoiles de la séquence principale sont les cibles les plus favorables (faible activité photosphérique), en particulier si elles sont de type tardif (rayon stellaire petit).

On peut distinguer deux types d'approches observationnelles : (1) La photométrie d'un grand nombre d'étoiles dans le but de détecter de nouvelles planètes en transits ; (2) La photométrie d'un objet connu par vélocimétrie, permettant de déterminer si une planète occulte son étoile ;

Photométrie d'un champ d'étoiles

Les besoins principaux de cette méthode sont : l'échantillonnage temporel (continu avec une mesure toutes les quelques minutes, sur une durée d'au moins 3 périodes orbitales), la précision photométrique

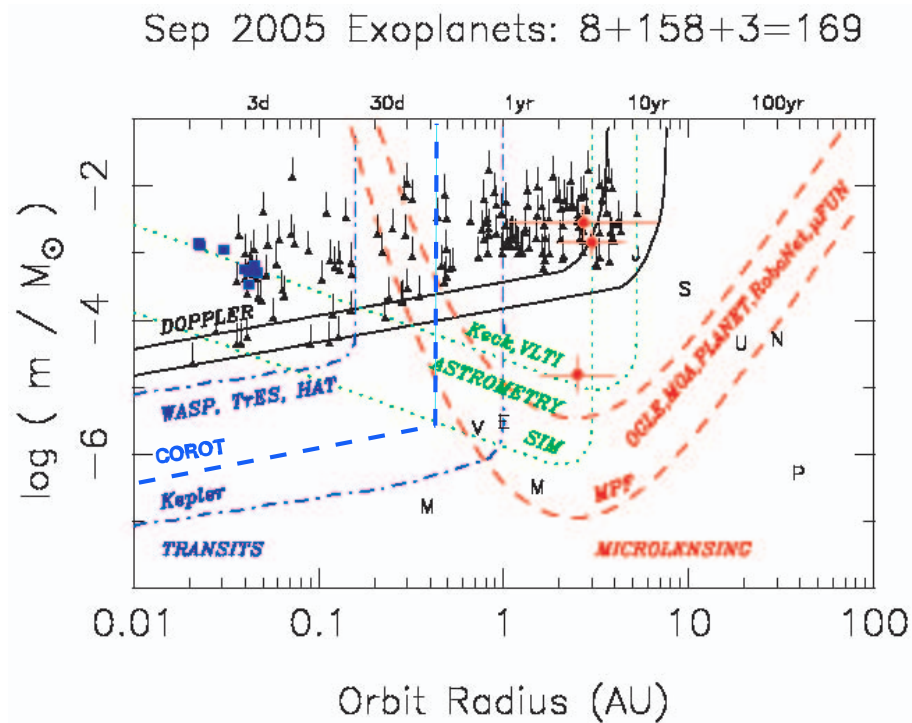


FIG. 3.5 – Exoplanètes détectées, dans un plan masse-rayon orbital et capacité de détection des différentes techniques (vitesses radiales, transits, astrométrie et microlentilles gravitationnelles). (D’après Beaulieu et al. 2006).

différentielle de l’ordre de la mmag depuis le sol et de l’ordre de 10^{-4} depuis l’espace, et l’observation d’un grand nombre d’étoiles à cause de la faible probabilité d’alignement. Les approches “champ petit et profond” et “champ large et étoiles brillantes” ont été proposées et mises en oeuvre par plusieurs équipes. La seconde permet un meilleur retour scientifique puisque les étoiles sont suffisamment brillantes pour être suivies en spectroscopie. La détection de transits produit un grand nombre de fausses alarmes, qu’elles soient d’origine instrumentale ou stellaire (binaires à éclipse ou systèmes triples). Le programme OGLE en particulier a permis la découverte de 5 exoplanètes, parmi les 140 candidats identifiés ; les réseaux de recherche de transit TrES et SuperWASP sont avec OGLE les plus prometteurs menés actuellement, en terme de capacité de découverte.

La communauté française est impliquée dans la recherche des planètes par transits par sa position prédominante dans le projet CoRoT dont c’est l’un des objectifs primordiaux (voir section 4.3.4). Le responsable exoplanète de CoRoT est P. Barge (LAM) ; il y a une vingtaine de CoIs exoplanètes dans CoRoT, dont 13 sont français. A moyen terme, CoRoT permettra les premières études statistiques sur des planètes de petite taille, en orbite proche (voir figure 3.3.2, illustrant la difficulté de la détection). En revanche, aucune équipe française n’est à ce jour moteur dans un programme de recherche de transits au sol, même si des collaborations sont en place pour le suivi vélocimétrique, avec SuperWASP en particulier.

D’autres initiatives utilisant cette méthode ont été lancées récemment par des groupes français : l’équipe de l’IAP a recherché extensivement les transits présents dans Hipparcos pour en faire le suivi spectroscopique ; le projet BEST (observation au sol de transits de Jupiters chauds) a été installée à l’OHP et fait l’objet d’une collaboration avec Berlin.

Pour le futur, un projet de photométrie des transits depuis l’Antarctique est en phase d’étude (A STEP, Guillot, Fressin, OCA). Il bénéficiera des qualités du site et de la possibilité d’observation en continu.

Notons que la mise en place d’un projet commun microlentilles-transits (objectif similaire de monitoring photométrique) nécessiterait la prise en compte de contraintes pas toujours conciliables. Par

exemple, les contraintes sur l'échantillonnage temporel et la précision photométrique sont plus souples pour les microlentilles. A comparer aussi les besoins en terme de champ, et de durée totale de suivi d'un même champ avec les 2 méthodes.

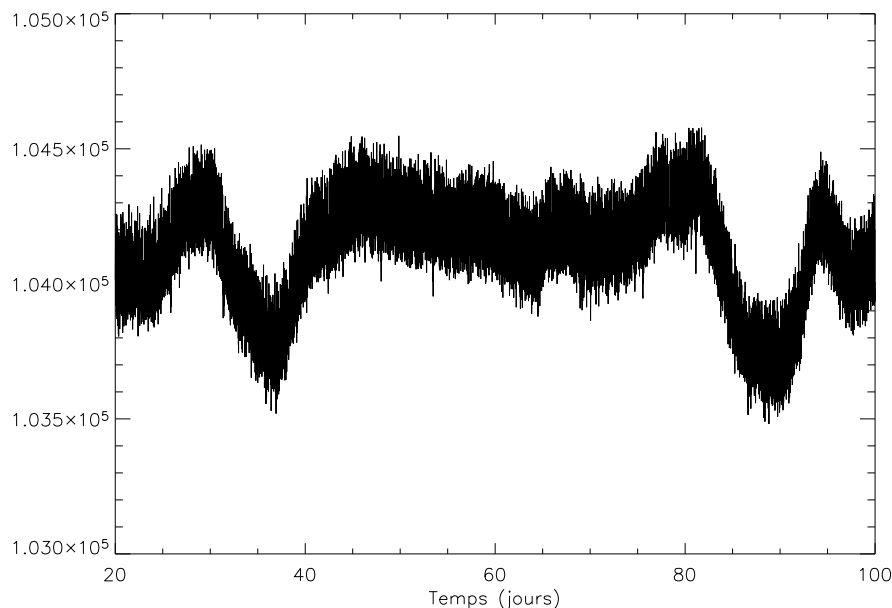


FIG. 3.6 – Extrait d'une courbe de lumière d'une planète de type "super Terre" (ici, de 2 fois le rayon terrestre et période 5.5 jours) simulée avec les caractéristiques de CoRoT. Aux bruits instrumentaux se rajoute la variation stellaire. Deux transits sont visibles, à environ 49 et 56 jours. Ce cas a été détecté relativement facilement par tous les algorithmes de traitement du signal développés ou adaptés dans le cadre de CoRoT.

Photométrie de planètes connues

Une autre application de la méthode des transits est la recherche de transit sur les systèmes planétaires découverts par vitesse radiale, effectuée de façon systématique quand la période orbitale est inférieure à env. 10 jours (probabilité d'env. 10% d'alignement favorable). C'est ce qui a permis la découverte du premier transit, pour le système HD209458, et depuis, de HD149026 et HD189733. La particularité de ces systèmes est que les étoiles centrales sont généralement brillantes (car cibles en vitesse radiale), et par conséquent la connaissance de leurs caractéristiques physiques limitent rarement la détermination des paramètres planétaires. D'autre part, il est possible d'effectuer un grand nombre d'observations de suivi de ces objets (lumière réfléchie, température effective pendant le transit secondaire, spectre de transmission).

La sensibilité obtenue sur la détection du transit est dans ce cas accrue, car on connaît par la mesure de vitesse radiale l'époque et la durée approximative du transit. C'est ce qui a permis de détecter le transit de HD149026b, de profondeur 0.3 mmag, par des mesures au sol. Un tel transit n'aurait pas été détecté dans une recherche de type survey photométrique dans un champ profond.

Notons enfin que la troisième planète vitesse radiale dont le transit a été détecté, HD189733, a été entièrement caractérisée à l'OHP : découverte par ELODIE en août 2005, le suivi photométrique sur le télescope de 120cm a rapidement permis la mesure du transit et la détermination des paramètres physiques de la planète. La présence sur le même site d'un spectrographe tel que ELODIE/SOPHIE et une caméra CCD, et leur relative disponibilité, font de l'OHP un des sites phares pour ce type de programme. Afin de renforcer le potentiel de l'OHP à découvrir et caractériser de nouvelles planètes, il serait néanmoins

important de maintenir l'utilisation du 120cm et son soutien observationnel (assitant de nuit).

Futur des recherches de planètes par transit ?

A l'horizon post-CoRoT, il y a peu de projets utilisant la méthode des transits, alors que le retour scientifique est énorme. Le développement d'un instrument et d'un programme de recherche de transits depuis le Dome C paraît donc un axe majeur et permettra peut-être la mise en place d'un sondage photométrique à long terme. Après les missions spatiales CoRoT et Kepler (pour laquelle la participation française est a priori nulle), de durée réduite, il sera très important d'avoir un outil de recherche de transits. L'Antartique paraît le meilleur site pour un tel instrument et concerne particulièrement la communauté française. L'objectif sera alors de rechercher des planètes à plus longue période, et/ou des planètes de plus petit rayon, à condition de pouvoir toujours coupler à des mesures vélocimétriques (sur HARPS notamment). Il faut garder en tête que les planètes semblables à la Terre sont détectables par les méthodes photométriques plus facilement qu'avec les autres méthodes.

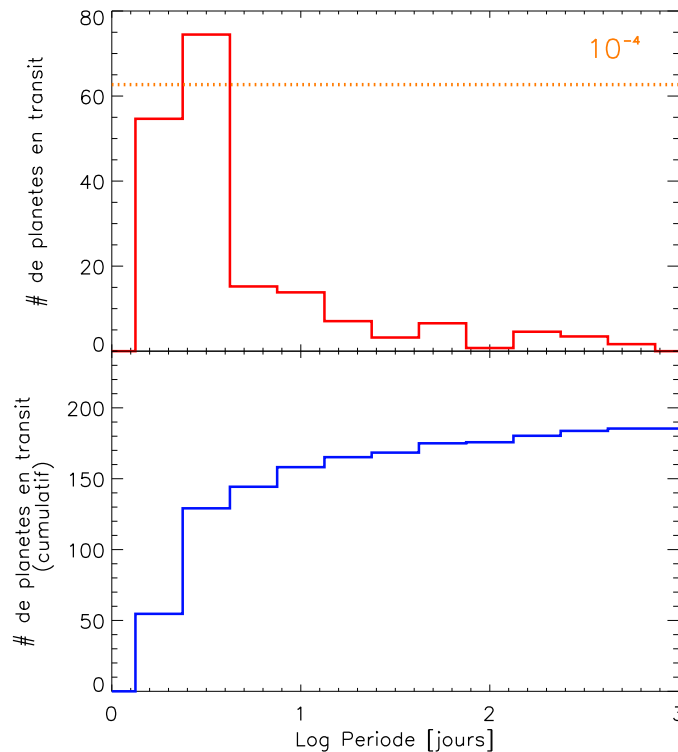


FIG. 3.7 – Estimation du nombre de planètes géantes en transit autour d'étoiles de magnitude visibles inférieures à 10.5 (627000), dans tout le ciel, en fonction de leur période orbitale. Cette estimation est basée sur les mesures de vitesses radiales pondérées de la probabilité de transit en fonction de la distance. Le panneau du haut indique le nombre de planètes par tranche de période orbitale, la ligne horizontale en pointillés indiquant le nombre qui correspond à une probabilité de 10^{-4} . Le panneau du bas représente les mêmes résultats sous forme cumulative.

La figure 3.7 montre qu'à priori un grand nombre de planètes géantes en transit sont à détecter autour d'étoiles brillantes : environ 200 dans tout le ciel, autour d'étoiles de type solaire de magnitude inférieure à 10.5 (en supposant que les étoiles de ce type représentent environ 1/3 des étoiles visibles –les autres étoiles présentant des fréquence d'occurrence de planètes inconnues, mais certainement moindres). Ces objets sont extrêmement intéressants car ils permettent un suivi par de nombreuses autres méthodes et

donc une caractérisation fine de ces objets. Il est à noter qu'un nombre faible mais non négligeable de planètes (quelques dizaines) ont des périodes supérieures à dix jours.

D'autre part, les modèles théoriques de formation planétaire prévoient généralement la formation d'un nombre relativement grand de planètes plus petites, de la taille d'Uranus ou de tailles terrestres. Ces planètes doivent s'ajouter à cette liste mais elles seront bien évidemment plus difficiles à détecter en raison de leur rayon plus petit.

Sur le papier, la stratégie idéale serait le suivi en continu, sur des périodes de quelques semaines, d'environ 10^5 étoiles relativement brillantes, avec une précision photométrique d'au moins 10^{-3} . C'est en pratique délicat, mais c'est un projet à envisager pour l'horizon 2012.

3.4 La spectroscopie directe

L'étude spectroscopique des planètes extrasolaires peut se faire de deux façons différentes, soit au moment des transits en observant le spectre de l'étoile à travers l'atmosphère ou l'exosphère de la planète, soit directement en effectuant la spectroscopie de la lumière réfléchi et/ou émise par la planète.

Spectroscopie des spectres stellaires pendant les transits

Par cette observation 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, de sa composition, de sa structure et même de la présence de vents éventuels. 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 60km. 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 HD209458. Cette absorption, moins importante que prévue, peut être interprétée soit en terme de présence de nuages, de vents ou d'ionisation incorrectement modélisés (voir par ex. Iro et al. 2005). 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 de cette même planète extrêmement étendue, clairement au-delà du lobe de Roche. La planète HD209458b 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). Ainsi, cette planète s'évapore 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. Le flux d'échappement, de l'ordre de 10^{10}g s^{-1} , semble montrer que HD209458b ne devrait perdre au cours de la vie de son étoile que quelques pourcents de sa masse (Lecavelier des Etangs et al., 2004), mais pourrait n'être qu'une limite inférieure à l'évaporation (voir Baraffe et al. 2004, 2005). Cette observation cependant révèle que des planètes un peu moins massives et/ou plus proches de leur étoile pourraient s'évaporer complètement, ce qui pourrait constituer une explication du manque de planètes de masses intermédiaires (\sim Saturne) très près des étoiles. Suivant cette voie, 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.

Spectroscopie directe des émissions planétaires

Les premières évaluations théoriques de la température effective T_{eff} des pégasides ont montré qu'elles pouvaient être de l'ordre de 1000 K (e.g. Guillot et al. 1996 ; Barman, Hauschildt & Allard 2001 ; Sudarsky, Burrows & Hubeny 2003) et que dans le cas de HD209458b elle devait même être de l'ordre de 1250 K. Cependant une des incertitudes est liée au fait que par effets de marées, la planète devrait être synchronisée avec son étoile (comme la Lune est synchronisée avec la Terre). Suivant la redistribution de la chaleur dans l'atmosphère, la température du côté "jour" pourrait être nettement supérieure à celle du côté nuit. Dans la limite purement théorique d'une absence de redistribution de chaleur par l'atmosphère, la

température de l'atmosphère du côté nuit ne serait que de $\sim 100 - 200$ K!! Des travaux théoriques ont estimé cependant que des vents zonaux importants ($\sim 1 - 2 \text{ km s}^{-1}$) devaient redistribuer la chaleur entre les cotés jour et nuit et entre les pôles et l'équateurs, avec cependant un maintien d'écart de température de l'ordre de 200-500 K (Showman & Guillot 2002).

Ceci a été directement testé depuis grâce à l'observation de l'émission IR 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 faible mais brusque diminution du flux total IR 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 $24 \mu\text{m}$ par le télescope spatial Spitzer ont montré que les températures effectives des deux planètes HD209458b et TrES-1 sont supérieures à 1000 K (Charbonneau et al. 2005; Deming et al. 2005) et indiquent une redistribution relativement efficace de la chaleur. Cependant les barres d'erreurs ne permettent pas actuellement de vérifier les prédictions de Showman & Guillot.

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 aussi être détectées, telles que la lumière stellaire réfléchie par la planète et les émissions aurorales dans les domaines UV et radio. Ces dernières n'ont cependant pour le moment donné accès à aucune détection positive (Zarka et al. 2001; Ryabov, Zarka & Ryabov 2004).

Les émissions magnétosphériques

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 fort émetteurs radio basses fréquences s'ils sont magnétisés, ou si l'étoile parente est fortement magnétisée. Un fort 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/élimination des parasites, prise en compte des fluctuations ionosphériques. C'est la brillance du fond de ciel radio basses fréquences, très élevée, qui onstitue 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 même planifiées, avec des instruments améliorés (récepteur numérique) et en période de minimum d'activité solaire, c'est-à-dire avec des fluctuations ionosphériques (parasites) 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 Tau Boo ou Rho CrB a portée d'observation (si la loi d'échelle ci-dessus 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.

3.5 L'imagerie

Les techniques d'imagerie (interférométrie ou coronographie) appliquées à l'observation des planètes visent à isoler les photons du compagnon planétaire afin d'en permettre l'étude physique. Il s'agit en particulier de déterminer, à distance, la nature de la planète en identifiant, par spectroscopie, différents gaz atmosphériques, comme CO₂, H₂O, O₂ ou O₃, CH₄, NH₃, SO₂ ... L'analyse fine du spectre permet également d'accéder à des paramètres physico-chimiques de l'objet, tels sa température, la densité de son atmosphère... La localisation spatiale du compagnon permet aussi d'accéder aux paramètres orbitaux.

Le défi principal posé à l'imagerie pour l'étude des exoplanètes est l'écart de luminosité considérable entre une étoile et son compagnon substellaire, écart qui spécifie la dynamique nécessaire pour une détection directe. Bien qu'une large gamme de contrastes soit possible suivant les cas, trois valeurs "canoniques" sont souvent avancées :

- 10^4 pour une Pégaside observée en IR moyen ($1.5\text{--}5\ \mu\text{m}$) ;
- 7.10^6 pour une Terre en orbite autour du soleil dans l'infrarouge thermique ($6\text{--}18\ \mu\text{m}$, cas de DARWIN)
- 5.10^9 pour une Terre en orbite autour du soleil dans le visible et une phase de 1 (l'ensemble du disque planétaire est visible par l'observateur).

Le second problème est celui de la résolution angulaire : par exemple 1AU à 50pc vaut 20 mas, soit la limite de diffraction d'un télescope de 10 m pour $\lambda = 1\ \mu\text{m}$. Aussi les techniques d'imagerie directe par pupille compacte (coronographie), qui présentent l'avantage d'isoler spatialement le flux du compagnon de celui de l'étoile centrale, ne sont envisageables que pour les étoiles les plus proches et pour des longueurs d'onde plutôt courtes, où le contraste est a priori plus élevé.

Pour des planètes très proches de leur étoile ou bien des observations dans l'infrarouge plus lointain, il faut avoir recours à l'interférométrie stellaire à longue base. Un interféromètre comme le VLTI, avec 200 m de base maximale, présente un potentiel suffisant en résolution angulaire pour observer en IR moyen la plupart des Pégasides détectées (jusqu'à 50pc) et les zones habitables jusqu'à 1kpc (suivant le type spectral). Cependant le flux de l'étoile centrale et celui du compagnon sont intégrés sur tout le champ de l'interféromètre (en général le disque d'Airy d'une sous-pupille élémentaire). Pour détecter la planète deux stratégies sont possibles :

- La recherche de sa signature sur une observable interférométrique qui devra être mesurée avec une grande précision (en général avec une dynamique comparable au contraste entre l'étoile et la planète) : ont été proposés par exemple le module de la visibilité, la clôture de phase ou bien la phase différentielle entre deux bandes spectrales – et bien sûr on peut aussi imaginer associer toutes ces observables. Le suivi de cette (ou ces) quantité(s) au cours de la rotation de la base (ou des bases) par le mouvement diurne permet l'identification sans ambiguïté, et éventuellement la localisation, de la planète. Ceci impose toutefois des contraintes drastiques sur la stabilité des mesures et de leur calibration ;
- La suppression du flux stellaire par coronographie interférométrique, en introduisant sur certains bras de l'interféromètre un déphasage tel que la transmission du système est minimale sur l'axe (interférence destructive) et maximale à l'emplacement supposé de la planète. Une modulation de la transmission permet de mieux isoler la signature du compagnon. Ce procédé de nulling a été retenu pour la mission spatiale DARWIN ; il est en cours de développement (à $10\ \mu\text{m}$) sur le Keck-I, et étudié pour les démonstrateurs sol (bande L) de DARWIN (GENIE sur le VLTI et ALADDIN en Antarctique). Là encore les contraintes principales sont sur la stabilité des mesures et la calibration du flux résiduel de l'étoile, ainsi que du fond thermique dans l'infrarouge.

L'état de l'art actuel permet une dynamique, au sol, de quelques 10^2 aussi bien en mesure directe qu'en nulling interférométrique. L'amélioration de cette valeur nécessitera une correction très efficace des fluctuations de phase (dispositif suiveur de franges) entre les diverses sous-pupilles (un résidu de 10 nm ou inférieur est nécessaire pour une dynamique de 10^4).

Tous les types d'exoplanètes sont en principe éligibles pour la détection par interférométrie, mais il est probable que les premières sources caractérisées ainsi seront des Pégasides, qui sont les moins exigeantes en terme de dynamique. Parce l'interférométrie stellaire nécessite, par source, beaucoup de

temps d'observation, cette technique est peu adaptée à des relevés extensifs en vue de la *découverte* d'exoplanètes. Par contre, pour les objets déjà identifiés, elle en permet la caractérisation physique.

Signalons enfin que le choix du domaine spectral d'observation n'est pas encore clairement établi. Le visible proche IR présente l'avantage, compte-tenu de la résolution angulaire requise, d'être accessible avec des télescopes monolithiques, tandis que l'infrarouge thermique présente l'avantage d'une très grande richesse des signatures spectrales, et d'un contraste observationnel 1000 fois plus faible que dans le visible. Il nécessite cependant l'utilisation de l'interférométrie pour résoudre la question de la résolution angulaire.

Quels que soient les techniques ou les domaines spectraux utilisés, l'observation directe d'exoplanètes dans le but d'en faire une analyse spectroscopique reste un objectif très ambitieux et risqué. L'absorption, et la turbulence de l'atmosphère nécessite en effet d'observer depuis l'espace. C'est donc un observatoire spatial dédié qui devrait permettre l'analyse systématique de la composition des exoplanètes proches. Afin d'optimiser la conception de cet observatoire, en terme de performances, de coûts et d'en partager les charges entre les différents acteurs internationaux (compte tenu des coûts actuellement estimés de ce genre de missions, seule une collaboration internationale semble en mesure de permettre la réalisation d'un tel projet), il conviendra de définir clairement :

- le domaine spectral (Visible-proche IR ou IR thermique),
- le concept instrumental qui découle du choix précédent,
- les différentes étapes scientifiques et techniques qui permettront de réaliser l'observatoire et son instrumentation. Il s'agira en particulier d'identifier les différents précurseurs au sol et/ou dans l'espace s'ils s'avèrent nécessaires.

Pour ce faire, il apparaît essentiel de mettre rapidement en place une "feuille de route internationale" qui associe tous les partenaires déclarés ou potentiels du projet.

3.5.1 L'interférométrie

L'interférométrie est une technique d'observation permettant le recueil d'information à haute résolution angulaire (quelques micro-secondes d'angle à quelques centièmes de secondes d'angle, selon la technique et le domaine spectral employés), plusieurs méthodes sont envisageables pour l'observation directe des planètes extrasolaires :

- l'interférométrie différentielle,
- l'astrométrie,
- la modulation de visibilité,
- l'observation directe par interférométrie annulante.

L'interférométrie différentielle

Dans le cas des exoplanètes, ce qui nous intéresse est l'effet de la cohérence spatiale. En effet si deux sources situées à des endroits différents sur le ciel émettent de la lumière les interférogrammes produits ne sont pas localisés au même endroit (la différence de chemin optique sera différente pour les ondes provenant des deux sources). Ce que l'on observe dans le cas d'un astre où le rayonnement des sources n'est pas cohérent est la superposition des interférogrammes. Par conséquent dans le cas de la présence d'une exoplanète, les interférogrammes provenant de la planète vont ainsi *polluer* ceux provenant de l'étoile hôte. Il en résulte une modification de l'amplitude et de la phase de ces interférogrammes (visibilité et phase). C'est cet effet que l'on cherche à mesurer.

L'effet sur la visibilité et la phase est faible et proportionnel au rapport de lumière entre la planète et l'étoile. Pour pouvoir détecter cet effet, il faut calibrer l'amplitude de la visibilité et sa phase. Ceci est relativement facile lorsque l'on possède plusieurs canaux spectraux. L'idée est de calibrer ces effets dans une partie du spectre où le rayonnement de l'étoile domine et où l'effet de la planète est négligeable tandis que la mesure de détection est faite dans une région spectrale où la planète est relativement brillante.

Comme le pouvoir de résolution angulaire d'un interféromètre comme le VLTI est d'environ 5 mas

pour 100m de séparation des télescopes, cette technique est bien adaptée à des planètes situées à entre 0.05AU et 1AU. Les instruments comme AMBER sur le VLTI ont pour objectif d'atteindre une précision sur la clôture de phase différentielle de l'ordre de 10^{-4} , ce qui signifie que les exoplanètes visées sont principalement les *Pégasides*.

Au niveau des instruments capables d'appliquer ces techniques, nous trouvons sur le VLTI d'abord AMBER dans le proche infrarouge et de façon plus marginale MIDI dans la fenêtre à $10\ \mu\text{m}$. Un instrument comparable à AMBER mais avec moins de résolution spectrale et une couverture spectrale s'étendant à la bande L fonctionne sur le *Keck Interferometer*. L'instrument MIRC sur CHARA a les mêmes fonctionnalités qu'AMBER mais un plus grand nombre de télescopes de plus petits diamètres.

Pour l'instant, les techniques d'imagerie en interférométrie optique ont principalement été employées pour l'étude des structures circumstellaires ou stellaires. De telles études ont, par exemple, été abordées avec les instruments de première génération du VLTI : 'The building blocks of planets within the terrestrial region of protoplanetary disks' (van Boekel et al. 2004). Ces techniques vont connaître un essor important durant les prochaines années. Elles permettront l'étude des conditions physiques de formation de planètes dans les disques d'objets jeunes (structures dans les disques, nature chimique et cristallinité de la poussière). Les futurs instruments du VLTI : VITRUV (proche IR - Garcia, Malbet et al. 2005) et MATISSE (IR moyen - Wolf, Lopez et al. 2005), offriront des performances fortement optimisées en terme de couverture spectrale et couverture en fréquences spatiales par rapport aux instruments de première génération du type AMBER et MIDI.

L'astrométrie

L'interférométrie peut utilement contribuer à la mesure astrométrique de la présence d'une planète, ce qui sera fait du sol (instrument PRIMA sur le VLTI, LINC sur le LBTI) et certainement de l'espace à partir de 2012 (mission SIM de la NASA).

La modulation de visibilité

La plupart des interféromètres au sol actuels, à 2 télescopes, ne sont en fait que des instruments qui mesurent le degré de cohérence spatio-temporelle du champ électromagnétique échantillonné par les 2 pupilles des télescopes. L'observation consiste à obtenir les franges d'interférence créées par la source astronomique, les enregistrer pour en déterminer après calibration le contraste (ou visibilité) qui permet de remonter, par modélisation et transformation de Fourier inverse à la structure spatiale de la source (théorème de Zernike Van-Cittert).

Dans le cas d'un système binaire (2 sources incohérentes entre elles), on peut montrer que la visibilité expérimentale est une somme pondérée des visibilités expérimentales des 2 constituants et peut s'exprimer par la relation (Bordé, 2003) :

$$V^2 = \frac{V_1^2 + r^2 V_2^2 + 2r V_1 V_2 \cos\psi}{(1+r)^2} \quad \text{avec } r = \frac{I_2}{I_1} \quad (3.2)$$

où V_1 est la visibilité de l'étoile centrale, V_2 est la visibilité du compagnon, et ψ est le déphasage des visibilités, qui dépend de la géométrie du système et de l'observation.

Dans la pratique, l'observation de compagnon de faible masse consiste à mettre en évidence la modulation de la visibilité de l'étoile centrale due au compagnon. Elle semble adaptée uniquement aux objets massifs proches de leur étoile. L'avantage de cette technique par rapport à celle des vitesses radiales est que la détection est directe, et permet, en fonction du rapport signal/bruit obtenu de faire la spectroscopie de l'objet. Cette méthode a été particulièrement étudiée dans le cadre de la proposition scientifique de la mission PEGASE (Ollivier et al., 2005).

L'interférométrie annulante

L'interférométrie annulante (autrement appelée interférométrie en frange noire ou encore coronographie interférométrique) a été proposée en 1978 par Bracewell. L'idée consiste à réaliser un instrument recombinaut deux ou plusieurs télescopes et dont la transmission globale (après recombinaison) est nulle sur la direction de pointage du réseau et maximale à la distance angulaire θ , dépendant des paramètres du réseau interférométrique (essentiellement la longueur d'onde d'observation et la distance inter-télescopes).

Cette technique conjuguant haute résolution angulaire et grande dynamique est particulièrement adaptée à la détection d'objets faibles à proximité immédiate d'objets brillants, en particulier, de planètes extrasolaires. C'est l'une des seules méthodes, qui, appliquée dans l'infrarouge thermique permet d'envisager l'obtention de **spectres d'exoplanètes telluriques, y compris dans la zone d'habitabilité**, autour des étoiles proches. Elle est actuellement à l'étude pour les futures missions d'analyse spectroscopique d'exoplanètes telluriques comme DARWIN/TPF.

La principale difficulté de la méthode réside dans les fortes spécifications requises pour recombinaut avec une extrême précision les fronts d'onde, en terme d'amplitude, de phase et de polarisation en tout point de la recombinautrice. Les contraintes de stabilité et d'achromaticité du montage sont également très fortes. Pour valider ce concept, plusieurs équipes, essentiellement en Europe et aux Etats-Unis ont mis ou mettent au point des bancs de démonstration en laboratoire. Les performances requises pour DARWIN/TPF devraient être atteintes en laboratoire d'ici deux à trois ans. Une étape importante sera ensuite la transposition du concept à un instrument spatial. Plusieurs étapes de validation, seront nécessaires.

Un précurseur spatial, PEGASE, est soumis au CNES dans le cadre de l'étude des vols en formation. PEGASE opérerait dans la bande $[2-6\mu\text{m}]$. Son objectif est de caractériser spectralement des *Pégasides*. Un instrument démonstrateur/nulleur pour le VLTI qui s'appelle GENIE est en train d'être développé en tant que précurseur de DARWIN au sol. Il est envisagé de peut-être l'installer à la station Concordia en Antarctique (projet ALLADIN).

3.5.2 La coronographie et l'optique adaptative

La détection directe de planètes peut aussi naturellement être considérée en imagerie directe avec la pupille pleine d'un télescope. Il est alors critique d'obtenir de hauts contrastes au plus près de la limite de diffraction du système : à titre de repère, la limite de diffraction d'un télescope de la classe de 8-10 m est de 50 mas dans le proche IR, soit une séparation de 1 UA à 20 pc. Nous parlons ici donc d'explorer un domaine de séparations de 1 à quelques 10 UA selon les contrastes visés et la distance des étoiles, de manière complémentaire aux techniques de VR, transit. Cette contrainte sera relaxée ensuite, avec des télescopes de plus grande taille, pour lesquels la pleine surface collectrice sera aussi cruciale en termes de sensibilité pour la détection de planètes moins massives.

Les systèmes d'imagerie à haut contraste doivent de manière générale :

- obtenir une très bonne qualité d'image sur l'objet stellaire brillant pour confiner son coeur brillant, concentrer aussi le coeur de l'énergie de la planète, et surtout réduire et stabiliser le halo résiduel incohérent et variable de l'étoile. Ceci motive une optique adaptative (OA) poussée, corrigeant les défauts de la turbulence atmosphérique, et participant à la calibration et à la compensation de défauts lents associés aux optiques instrumentales
- réduire la partie stabilisée et cohérente de l'énergie stellaire (la figure de diffraction) et ainsi le bruit de photon correspondant : il s'agit de la fonction de la coronographie
- calibrer et distinguer tout résidu de halo stellaire par rapport à une signature planétaire recherchée. Ceci met en jeu en particulier des méthodes d'observation différentielle (en comparant plusieurs canaux spectraux ou 2 polarisations par exemple) afin de distinguer une figure de speckle provenant de l'étoile d'une planète.

Nous pouvons discuter les types de résultats attendus par cette approche en fonction des instruments utilisés, sur 3 échelles de temps : i les instruments utilisables aujourd'hui et dans les années à venir, ii les instruments actuellement définis et en développement pour une exploitation en 2010-2015, et iii les instruments au-delà.

Capacités des instruments actuels Les imageurs équipés d'OA disponibles actuellement sur les télescopes de la classe de 4 ou 8 m (TCFH/PUEO, VLT/NACO ou les équivalents américains) sont des instruments " généralistes ", définis pour des objectifs scientifiques variés. Ils rendent possibles les premières détections d'objets planétaires dans les cas les plus favorables comme dans le cas de la planète de $5 \pm 2 M_J$ en orbite autour de 2MASS1207 : les planètes géantes massives, relativement séparées ($>$ quelques 10 AU) d'étoiles jeunes ($<$ 100 Myr) de faible masse. Des recherches systématiques sont menées pour les sources les plus favorables, en particulier pour les membres des associations stellaires jeunes et proches ($<$ 100 pc), récemment identifiées.

Cette première étape est essentielle ; elle aborde le domaine des larges séparations, pour lequel elle permet de faire un lien entre les populations de planètes et de naines brunes. De premières caractérisations sont possibles à basse résolution spectrale. Le nombre de détections attendues dans cette approche n'aura toutefois pas une dimension statistique.

Instruments dédiés à l'horizon 2010 Les instruments à l'étude actuellement (comme le VLTPF, ou l'équivalent américain sur Gemini : ExAOC), pour une exploitation à partir de 2010 sont au contraire des instruments dédiés au grand contraste, avec une marge de progression conséquente par rapport à la situation actuelle : résidus d'OA réduits d'un facteur 4, coronagraphie permettant de s'approcher au plus près de l'étoile ($<$ 0.1"), techniques différentielles stabilisées, ...

L'impact scientifique attendu à la suite de grands relevés systématiques de centaines de sources favorables est de permettre une couverture d'un échantillon étendu (en termes de nombre mais aussi de diversité) de sources, pour la présence de planètes géantes de masse $>$ 1 ou 5-8 M_J selon l'âge des systèmes et pour les séparations $>$ 1 - 10 UA selon leur distance. Cette vision élargie de la présence de planètes géantes doit en particulier compléter (à plus large séparation mais aussi pour une plus grande variété masses et d'âge stellaires) la vision statistique apportée aujourd'hui par les recherches VR ou transit. Seront particulièrement attendus les effets de dépendance en fonction de la masse et l'âge de l'étoile, en fonction de la présence d'autres planètes internes, et le lien avec la population de naines brunes.

Au-delà de 2015 A plus long terme, il est possible de considérer l'apport attendu d'instruments dédiés au grand contraste, soit sur des télescopes de grande taille au sol (ELT), soit sur des télescopes spatiaux (type TPF-C). L'enjeu est ici d'aborder un domaine de contraste encore plus élevé, dans le domaine de 10^8 à plus de 10^{11} .

En termes instrumentaux, il est clair que ces contrastes représentent un défi impressionnant, qui devra se nourrir de toute l'expérience gagnée sur les instruments précédents, avec des stabilités et des précisions d'asservissement et de calibration non atteints aujourd'hui (même si les développements en laboratoire sont encourageants : contraste coronagraphique de 10^9 obtenu au JPL). A ce niveau, les limitations habituellement dominantes au sol mais insensibles dans l'espace doivent aussi être prises en compte et corrigées pour les instruments spatiaux (optique adaptative à hauts ordres, chromatismes des erreurs de phase par propagation de Fresnel, ...). Aussi, le faible flux intrinsèque de planètes visées demande de grandes surfaces collectrices (ELT 50-100 m ; TPF-C 8 x 3,5 m) et de longs temps d'intégration. De tels projets ne seront certainement pas à maturité avant 2020. On pourrait imaginer des projets préliminaires, un peu plus rapides à partir de 2015 (comme par exemple la proposition de télescope spatial "Eclipse" de taille modeste dans le cadre des missions NASA 'discovery'). Il faut noter pour la composante spatiale qu'aucun projet de ce type n'est proposé aujourd'hui coté européen, et que le contexte actuel américain rend difficile toute prévision.

En termes de retour scientifique, les rappels instrumentaux précédents permettent de préciser les retours attendus. Le nombre de cibles stellaires observées ne sera essentiellement pas étendu (les résultats

les plus intéressants étant toujours obtenus autour d'étoiles (très) brillantes) mais au contraire plutôt restreint aux systèmes les plus favorables. Les grands relevés précédents de planètes géantes seront absolument cruciaux à ce stade. On peut envisager avec de meilleurs contrastes à la fois i/ la détection de planètes moins massives (sub-neptunes, planètes glacées ou rocheuses) et ii/ une caractérisation affinée de planètes géantes observées à meilleur signal-à-bruit et/ou plus haute résolution spectrale (avec par exemple la mesure de variations faibles au cours de l'orbite, des précisions sur la composition accessibles dans la forme du fond des absorptions moléculaires, ...).

A terme, on peut attendre des informations cruciales de planètes terrestres par l'imagerie directe, avec des traceurs importants de la composition atmosphérique en proche IR et/ou en lumière réfléchie dans le visible. La qualité des mesures requises pour une étude conclusive demandera certainement un temps conséquent (temps d'intégration et aussi temps nécessaire à l'amélioration des instruments), après la sélection des meilleures sources détectées.

Position française Dans ce type d'approche en imagerie à haut contraste, la France a une position très forte au niveau international. Cette position est issue de la combinaison d'expérience dans les domaines suivants : optique adaptative (prototypes en laboratoire ou système opérationnels sur télescopes comme Naos), observation et R&D en coronographie, étude système, observatoires à haut contraste avec les instruments actuels, lien étroits avec d'autres domaines de recherche planétaire en particulier pour les recherches par VR et les modèles théoriques. Ce type d'expérience a permis d'avoir un rôle leader dans un projet comme VLT-PF (équipe projet). À un niveau assez pointu, ce type d'expertise repose toutefois sur un nombre très limité d'individualités. Un projet comme VLT-PF représente à la fois une position très favorable pour l'avenir dans ce créneau (avec l'expérience instrumentale et les retours scientifiques attendus) mais aussi un certain risque si des ressources restent trop faibles pour s'impliquer suffisamment dans l'exploitation des observations ainsi que le positionnement dès à présent dans les projets futurs. Par exemple, la capacité d'implication sur la préparation d'instrumentation des ELTs est insuffisante.

Chapitre 4

Les études théoriques

Parallèlement aux progrès des observations, de nombreuses théoriques concernant les planètes extrasolaires sont à mener. Ce qui suit est une liste forcément limitée des travaux théoriques à réaliser. Globalement, l'on peut prévoir que les efforts théoriques les plus importants devront se concentrer sur :

- La poursuite de la modélisation des Pégasides, à la fois du point de vue de leur spectre et de leur évolution, en raison de la quantité d'information qui sera bientôt disponible pour ces objets.
- Le développement de ces travaux vers les “petites” planètes, géantes de glaces ou planètes telluriques.
- La poursuite du travail de développement d'un modèle de formation planétaire capable d'expliquer et de prédire l'existence de planètes de caractéristiques diverses. Il s'agira en particulier de développer l'aspect quantitatif et statistique de ces recherches.

4.1 La dynamique des systèmes planétaires

La découverte de nombreux systèmes planétaires, simples ou multiples, permet une étude fine de la dynamique des systèmes planétaires et ainsi des mécanismes qui ont façonné ces systèmes et éventuellement leur origine.

Un des mystères qui reste toujours à explorer est celui de l'excentricité en moyenne élevée des orbites planétaires. Il existe plusieurs explications possibles, allant d'interactions entre plusieurs planètes avec éjection éventuelle à des accélérations différentielles de l'étoile centrale en passant par des interactions disque/planètes, ou des perturbations gravitationnelles d'un compagnon stellaire voisin. Ces diverses solutions sont à comparer quantitativement avec les observations (essentiellement en vitesses radiales). L'un des points clé des prochaines années va être la possibilité, par des observations en vitesses radiales ou en imagerie directe de mettre des contraintes plus fines sur la présence ou non d'autres compagnons planétaires, plus loin et/ou moins massifs que la (ou les) première(s) planète(s) découvert(es) dans le système.

D'autre part, l'existence de plusieurs systèmes multi-planétaires, et en particulier dans les cas relativement fréquents où au moins deux objets sont en résonance orbitale, il est possible de déduire des contraintes relativement fines sur leur histoire orbitale. Ces analyses requièrent des simulations à N corps sur des milliards d'années et sont ainsi relativement coûteuses en temps de calcul. Cependant, le jeu en vaut la chandelle car les contraintes peuvent inclure la vitesse de migration des planètes, la durée de cette migration, l'ordre dans lequel différentes planètes ont été capturées en résonance, la magnitude de la dissipation interne due aux diverses forces de marées en présence...etc.

On peut signaler qu'un certain nombre de travaux ont tenté de prédire la présence de planètes en fonction des zones de stabilité existentes, en particulier dans le cas de systèmes binaires. Ces travaux sont certainement à mener lors de l'analyse fine d'observations (transits, mesures en vitesses radiales). A contrario, la faible probabilité d'existence d'une planète dans une région de l'espace des paramètres donnée rend toute recherche *a priori* de ces zones de stabilité peu efficace.

Ces travaux de dynamique sont menés principalement autour des pôles de Nice, Paris et Grenoble.

4.2 La modélisation des atmosphères

Les atmosphères planétaires sont complexes. Elles sont cependant cruciales pour notre compréhension de ces objets car elles permettent l'analyse des observations spectroscopiques et d'autre part gouvernent le refroidissement de la planète et donc, au moins dans le cas d'une planète géante, sa contraction.

4.2.1 Profils et spectres

La modélisation des propriétés globales des atmosphères planétaires requiert de résoudre les équations du transfert radiatif. Ceci permet non seulement le calcul des profils de pression, température, densité, mais aussi celui du spectre global, à comparer directement avec les observations.

Des progrès significatifs ont été faits dans ce domaine ces dernières années, en particulier à partir des données stellaires étendues vers le domaine des naines brunes et les objets de plus en plus froids. Les codes ont ainsi été testés, avec une mention particulière pour le code PHOENIX développé sur le pôle Lyonnais (en collaboration avec des universités allemande et américaine) et qui est utilisé très intensément pour l'analyse de spectres d'étoiles et de naines brunes.

Les bases de données d'absorption des divers composants ainsi que des équilibres chimiques sont cruciales pour une bonne modélisation des atmosphères substellaires et planétaires. Dans ce cadre là, l'absorption du méthane et de l'ammoniac (en particulier) reste imprécise, notamment à haute température. De nombreuses espèces restent à considérer. Cependant, ces travaux sur les bases de données d'absorption sont largement menés aux Etats-Unis.

Du point de vue observationnel, les mesures qui contraignent ces structures atmosphériques sont actuellement celles effectuées dans la bande (visible) d'absorption de Na, lors du transit principal de HD209458b, et dans l'infrarouge par le satellite Spitzer, dans 2 cas : HD209458b et Trés-1b. Dans le futur de nombreuses mesures similaires, et par des méthodes différentes, notamment l'interférométrie différentielle, devraient permettre d'étoffer grandement cet ensemble de données.

Une grande partie du travail à réaliser pour les années futures est d'une part la prise en compte de l'inhomogénéité de l'irradiation stellaire, un travail entamé entre Paris et Nice dans le cadre d'une thèse, et d'autre part, le passage vers les atmosphères de planètes sous-géantes, ou telluriques, travail actuellement poursuivi sur le pôle Lyonnais.

4.2.2 Dynamique atmosphérique, nuages et variabilité

De part leur rotation et/ou le rayonnement souvent intense qu'elles reçoivent, les planètes extrasolaires possèdent toutes une météorologie complexe, où les processus d'advection jouent un rôle important soit dans le bilan énergétique global de l'atmosphère, ou tout au moins pour le transport d'éléments chimiques potentiellement observables.

Dans le cas des planètes très proches de leur étoile, l'étude de la dynamique atmosphérique est importante car les forces de marées impliquent une synchronisation à laquelle l'atmosphère réagit pour redistribuer la chaleur entre le côté jour et le côté nuit. Cette redistribution implique la présence de vents violents qui ont pour effet de modifier significativement la structure de l'atmosphère, ce qui a des implications sur les observables que sont les spectres et les courbes de lumière de ces objets.

D'autre part, dans le cas de planètes orbitant autour d'étoiles de type M, la synchronisation a lieu dans la "zone habitable", c'est-à-dire les distances orbitales où l'eau en surface peut se trouver sous forme liquide. En fonction des caractéristiques en particulier dynamique de l'atmosphère d'une telle planète, un océan peut être présent, ou non, si l'eau se retrouve entièrement gelée du côté nuit.

La modélisation de la formation de nuages est liée au problème dynamique, mais intervient aussi dans des cas où une étude dynamique de l'atmosphère est moins essentielle comme c'est le cas des naines brunes et des planètes faiblement irradiées. Le premier cas est très significatif, la présence de particules condensées et de nuages entraînant une modification relativement brusque de la couleur des naines brunes

en fonction de leur température effective. Mais les problèmes de condensation deviennent primordiaux pour la prédiction des spectres et des compositions des atmosphères planétaires.

Notre compréhension de la formation de nuages reste au mieux rudimentaire. Il y a beaucoup de progrès à faire dans ce domaine. Le domaine reste relativement restreint au niveau international, avec des études menées essentiellement aux Etats-Unis et en Allemagne. Il y a en France des potentialités à exploiter, essentiellement à travers nos connaissances de la modélisation dynamique des atmosphères des planètes telluriques (Mars, Titan), principalement au LMD à Paris, et d'autre part par l'extension des travaux menés à l'ENS Lyon.

4.2.3 Exosphères planétaires et évaporation

Le phénomène d'évaporation des Pégasides avait été envisagée théoriquement, mais c'est sa découverte observationnelle dans le cas d'HD209458b qui a réellement conduit à des avancées dans la modélisation de ce phénomène. A la base, le processus est lié à un chauffage des couches très supérieures de l'atmosphère par l'irradiation intense, à des températures de plusieurs milliers de kelvins, et à l'échappement hydrodynamique de ces couches (vitesse thermique supérieure à la vitesse d'échappement). Le processus est complexe, car il combine processus de transfert radiatif hors équilibre et hydrodynamique de l'échappement. Ainsi, les taux d'échappement sont pour l'instant incertains de 2 voire 3 ordres de grandeur!

Des travaux sont à poursuivre dans ce domaine. Côté français, il y a eu des contributions importantes au sujet à la fois du côté de Paris et Lyon, mais la poursuite de ce thème de recherche nécessitera le développement de nouvelles méthodes de calcul. Dans ce cas aussi, un apport fructueux pourrait être trouvé dans les travaux menés sur les hautes atmosphères de Venus, la Terre et Mars.

4.3 Intérieurs et évolutions

4.3.1 Les équations d'état

Les équations d'état de la matière à hautes pressions et températures modérées¹ sont à la base de notre connaissance de l'intérieur des planètes. Elles sont dérivées à la fois d'expériences de compression de la matière et de modélisations numériques et/ou théoriques.

Des améliorations dans notre connaissance des équations d'état pour les intérieurs planétaires sont à attendre grâce au développement de techniques de précompression d'échantillons et les nouveaux lasers qui seront mis en place (en 2008 pour le laser NIF aux USA, et en 2010 pour le laser MégaJoule en France). D'autre part, la progression de la modélisation numérique permet la réalisation d'expériences numériques (résolution des équations de la mécanique quantique pour un bain de noyaux atomiques et leurs électrons).

La partie ardue consiste cependant en le développement d'équations d'état astrophysiques utilisables dans des conditions de pressions et températures variées, ce qui nécessite un travail de plusieurs années et n'a été réalisé que peu de fois, au niveau international. Au vu des incertitudes sur les observables, et bien qu'il serait souhaitable d'améliorer notre connaissance en la matière, ce sujet n'est cependant pas critique pour la modélisation de la plupart des exoplanètes.

4.3.2 L'évolution et la composition des planètes gazeuses

Les planètes géantes présentent plusieurs aspects intéressants, au delà de leur taille et d'une détection plus facile. En effet, de part leur composition gazeuse, elles sont relativement compressibles et leur rayon évolue en fonction du temps, tandis que leur intérieur se refroidit progressivement. D'autre part, leur enveloppe d'hydrogène et d'hélium témoigne de la présence et possiblement de la chimie du disque proto-planétaire qui a permis leur formation.

¹Températures comprises entre celles des expériences de compressions statiques et celles relatives au domaine stellaire.

La France a une expérience forte de modélisation de ces objets, en particulier sur les pôles de Lyon et Nice. Cette modélisation est cruciale pour nombre de problèmes, et notamment la possibilité de contraindre la composition de ces objets, leur éventuelle évaporation et les possibilités de les détecter.

Les modèles se poursuivent, et nécessitent dans certains cas la prise en compte de phénomènes fins incluant la génération d'énergie cinétique dans l'atmosphère, la dissipation par effets de marées, l'influence d'une atmosphère inhomogène sur le refroidissement planétaire, l'influence des conditions initiales sur l'évolution subséquente, la prise en compte de l'évaporation...etc.

4.3.3 La modélisation de l'intérieur des planètes solides

Le thème de la modélisation de la structure interne des planètes solides est resté longtemps relativement vierge, et pour l'instant, aucune caractérisation de telles planètes ne permet d'apporter des données intéressantes à disséquer. Cependant, la réalisation de la possibilité d'existence de "planètes océans", des planètes de la masse d'Uranus mais qui ayant perdu leur hydrogène et hélium pourraient présenter une surface d'eau liquide a motivé des études plus poussées.

Ces études sont dans leur premisses, à la fois en France (collaborations entre Paris, Nantes, Nice et Lyon) et aux Etats-Unis, mais nul doute que des découvertes de planètes solides en transit entraîneront une brusque poussée de ces travaux.

Il est important que la France prépare le terrain dans la perspective de COROT, et donc le calcul de relations masse-rayon dépendant de la composition doit être regardée comme prioritaire.

4.4 Les liens étoiles/planètes

Bien souvent, l'analyse des propriétés des planètes ne suffit pas. Au contraire, la comparaison des propriétés des planètes avec celles de leurs étoiles parentes, en particulier au niveau compositionnel peut permettre d'améliorer grandement notre connaissance de ces objets et de leur formation.

Il est donc très important de fédérer les recherches sur la modélisation des planètes à celles sur une meilleure caractérisation de leurs étoiles parentes. Ceci est particulièrement vrai dans le cas des systèmes à transits.

Une caractérisation fine de la composition photosphérique stellaire peut être faite par l'analyse de spectres haute résolution. L'âge de l'étoile peut être estimé grâce à des indicateurs d'activité, la mesure de la vitesse de rotation de l'étoile et sa position sur le trajet évolutif. La structure interne pourrait éventuellement être accessible dans le cas d'étoiles brillantes dont on pourrait détecter les oscillations.

La combinaison de ces mesures à celles issues de transits planétaires pourrait permettre de préciser très significativement les caractéristiques planétaires. Elle pourrait d'autre part permettre d'établir un lien entre la composition planétaire et celle de l'étoile.

Enfin, la caractérisation fine des abondances photosphériques stellaires est cruciale pour la détermination de l'éventuelle "pollution" des étoiles et donc des mécanismes de formation des planètes.

D'autre part, on peut signaler la possibilité d'existence d'interactions magnétiques entre étoile et planète, la présence d'une Pégaside pouvant entraîner des signes d'activité sur l'étoile corrélés avec la rotation planétaire.

Ces exemples illustrent quelques une des potentialités liées à une étude détaillée des étoiles à planètes et donc l'importance de la synergie planétologie-physique stellaire pour l'exoplanétologie.

4.5 La formation planétaire

Le thème de la formation planétaire motive et sous-tend une grande partie des recherches en exoplanétologie. La période actuelle est extrêmement propice à des avancées fondamentales dans le domaine, de part la découverte des systèmes planétaires extrasolaires, et conjointement, la possibilité d'observer directement des étoiles en formation et des disques protoplanétaires.

Ce thème représente l'un des grands défis du début du XXIème siècle : comprendre comment se forment les planètes et parvenir à prédire leur existence et caractéristiques.

Dans ce domaine de la modélisation de la formation planétaire, la compétition est féroce et la France n'occupe pas, en terme de production scientifique globale, une position de leader au niveau international. En effet, une grande partie des travaux de modélisation (accrétion des planétésimaux, simulation lourde des disques protoplanétaires, évolution planétaires) sont faits aux Etats-Unis, au Royaume-Uni, en Allemagne, au Japon, en Suisse.

Cependant, les différentes briques d'une telle modélisation existent, notamment autour des pôles Parisien, Niçois et Grenoblois. Une fédération de ces efforts est à encourager, en relation avec les avancées observationnelles sur les disques protoplanétaires réalisés ces dernières années.

1992 : il s'agit de trois planètes de masses terrestres autour d'un pulsar. Deux nouvelles découvertes ont été ensuite possibles, mais cette voie de recherche est relativement restreinte de par le faible nombre de ces objets dans la galaxie, et le fait que la distance qui les sépare de nous est grande (600pc pour PSR B1257+12).

Incontestablement, la méthode la plus fructueuse en terme de nombre de planètes découvertes est celle des vitesses radiales ce qui se traduit par un grand nombre de fruits sur cette branche. Il est à noter cependant que les vitesses radiales conduisent à la détermination que de 3 paramètres : le $m \sin i$ (et non la masse réelle), la distance orbitale et l'excentricité de la planète.

La méthode des microlentilles a pour l'instant conduit à deux détections de planètes de masses joviennes, mais a aussi permis d'obtenir une probabilité d'exclusion de planètes entre 1 et 4 AU.

Bien qu'elle était au départ la méthode qui était sensée conduire à des résultats rapides, l'astrométrie s'est révélée beaucoup plus difficile que prévu, et n'a pas conduit à des découvertes d'exoplanètes. Cependant, il faut noter qu'elle a permis dans plusieurs cas de donner une limite supérieure à la masse du compagnon planétaire et ainsi confirmer sa nature non-stellaire.

A la fois à partir des détections par vitesses radiales et par des surveys sols, la photométrie a permis l'étude et la découverte de 9 pégasides en transit devant leur étoile et par conséquent la mesure de leur rayon. L'analyse spectroscopique de ces transits a elle-même conduit à la détection de Na, H, C et O dans l'atmosphère de l'un de ces objets, HD209458b. D'autre part, l'analyse du transit a permis par l'effet Rossiter de contraindre l'écart entre l'axe de rotation de l'étoile et de l'orbite de la planète, qui, à la dégénérescence du problème et aux erreurs près indique que les deux axes sont parallèles. Enfin, la mesure du transit secondaire par le télescope spatial infrarouge Spitzer a conduit à un premier spectre (mesures large bande) et des températures dans deux cas.

Parallèlement, l'imagerie directe a connu le même type de progression depuis la première découverte d'une naine brune, annoncée le même jour que 51 Peg b. Des centaines de naines brunes sont maintenant connues, et la limite en masse a été abaissée pour avoisiner le domaine des planètes géantes dans le cas d'objets jeunes.

Deux compagnons planétaires ont été aussi découverts par optique adaptative avec le VLT. L'un est un compagnon de naine brune, l'autre orbite autour d'une étoile de type solaire. Même si la nature planétaire de ces objets est modèle-dépendante et reste à confirmer, ces découvertes attestent clairement de notre capacité à obtenir des images de planètes géantes massives et jeunes autour d'étoiles.

La France s'est rapidement impliquée dans les études d'exoplanètes, comme le témoigne l'arbre de la figure 5.2. La communauté s'est impliquée dans les observations par vitesses radiales en collaboration avec l'équipe de Genève. Ceci a amené la découverte de 4 planètes en transit. Une première a été d'autre part grâce à une méthode originale la découverte de l'évaporation d'une pégaside et la détection de raies de H, C et O dans l'exosphère planétaire. Dans le domaine des microlentilles, l'une des deux planètes découverte par ce biais l'a été dans le cadre d'une collaboration internationale impliquant directement des chercheurs français.

Dans le domaine des naines brunes et des planètes flottantes, les contributions françaises ont été essentiellement portées sur l'interprétation théorique des spectres observés. Enfin, la première détection directe d'une planète comme compagnon d'une naine brune a été faite par une équipe française.

5.2 Prévisions à 10 ans

Il est difficile de se projeter dans l'avenir compte tenu des surprises que nous avons eues ces 10 dernières années. Cependant, ce n'est pas un exercice futile si l'on garde en tête le caractère parfois un peu aléatoire de l'exercice car il permet de faire le point sur nos connaissances actuelles tout en laissant la possibilité de changer de cap plus facilement en fonction de la progression de notre compréhension des divers problèmes.

La figure 5.3 montre ainsi ce que, compte tenu des informations actuelles, l'on peut prévoir à l'horizon 2015. Bien entendu, on s'attend à un nombre régulièrement croissant de détection de planètes par vitesses radiales et par microlentilles. L'astrométrie devrait connaître ses premiers succès, notamment avec

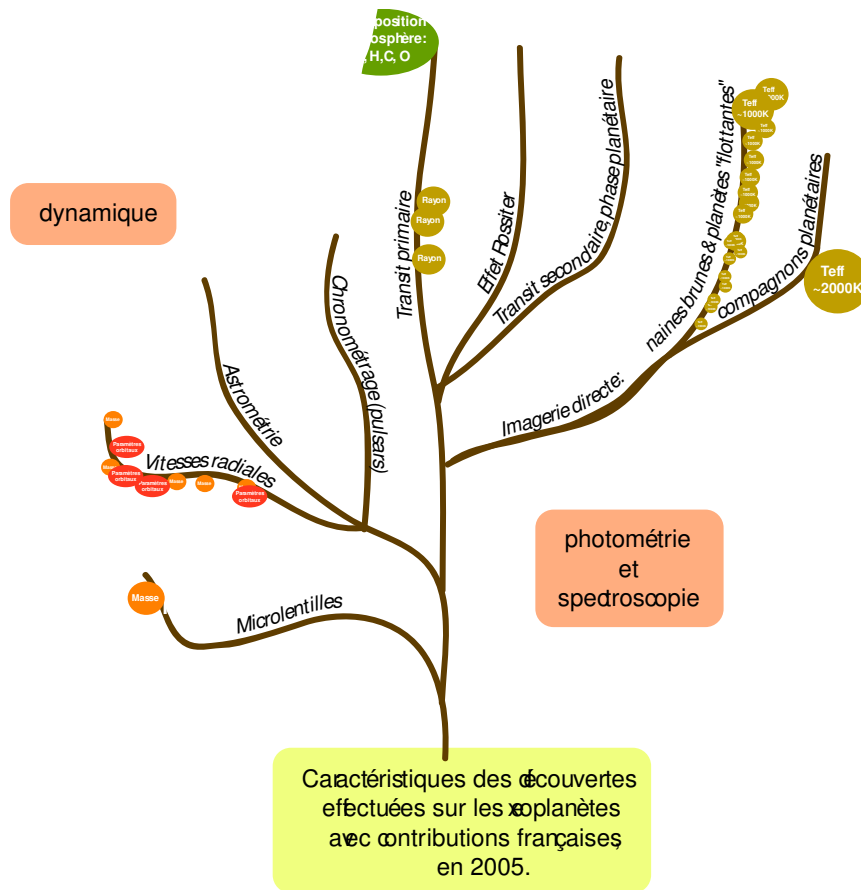


FIG. 5.2 – Contributions françaises aux découvertes concernant les planètes extrasolaires (et par extension les naines brunes) jusqu'en 2005.

PRIMA, puis bien sûr, avec la mission GAIA. La méthode de chronométrage de pulsars millisecondes ne devrait pas elle voir une progression significative du nombre de pulsars à planètes connus.

Les recherches de planètes en transit par photométrie devraient conduire à de nombreuses détections, grâce en particulier aux missions COROT (2006) et Kepler (2008). Ceci devrait permettre un grand nombre de retombées : la mesure des rayons bien sûr, mais aussi une idée des compositions et températures atmosphériques, de la présence de vents zonaux et de l'évaporation de ces objets. Avec de la chance, on pourrait découvrir anneaux et satellites. Il faut cependant noter que les planètes découvertes en transit seront certainement toutes très proches de leur étoile, la probabilité de détection diminuant fortement avec l'augmentation de la période orbitale.

Du côté de l'imagerie directe, de grandes avancées sont à attendre des instruments VLT-PF et du télescope spatial JWST.

Dans le futur proche, l'interférométrie devrait devenir une branche importante de la recherche en exoplanètes. La poursuite des travaux sur AMBER pourrait conduire à la détection d'exoplanètes par interférométrie différentielle dans un futur relativement proche, mais les observations restent difficiles. A plus long terme, des projets comme GENIE, PEGASE, KEOPS devraient conduire à des détections d'exoplanètes plus systématiques. Ultiment, la réalisation de Darwin ouvrira un nouveau champ à ce domaine avec la possibilité d'observer par spectroscopie des planètes semblables à la Terre.

D'autre part, le haut plateau antarctique (Dôme C) a récemment été identifié comme bénéficiant de conditions météorologiques potentiellement exceptionnelles : une quasi absence de nuages garantissant

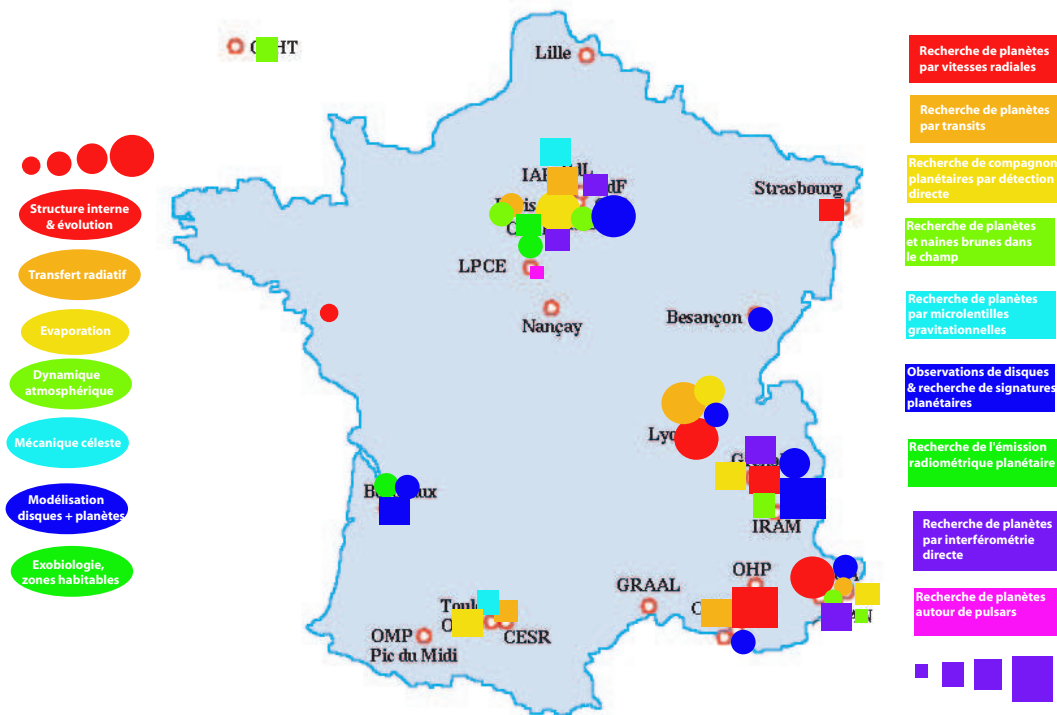


FIG. 5.4 – Thèmes de recherche concernant les planètes extrasolaires et localisation en France. Les cercles représentent des études essentiellement théoriques, les carrés des études essentiellement observationnelles. La taille des symboles indique très grossièrement le niveau d'implication des équipes sur la base des publications depuis 2000 sur le sujet.

5.4 Les projets en France

La France est positionnée dans de nombreux projets (voir figures 5.6 et 5.7). La liste présentée se veut aussi complète que possible, mais la rapide évolution du champ ainsi que la diversité des approches rend difficile l'établissement d'une liste exhaustive et à jour.

5.5 Les projets de vélocimétrie radiale

5.5.1 HARPS

Le spectrographe HARPS a été développé par un consortium de 5 instituts (ESO, Genève, Berne, OHP, Service d'Aéronomie) et mis en service sur le télescope de 3.6-m à La Silla (Chili) en 2003. Le consortium dispose de 100 nuits par an depuis 2003 et jusqu'en 2008 pour mener un large programme multi-facettes de recherche et caractérisation des exoplanètes (voir section 3.2.1). Sont associés à ce consortium les acteurs français suivants : J.-L. Bertaux (S.A.), F. Bouchy (LAM), C. Perrier (LAOG), J.-P. Sivan (LAM), X. Delfosse (LAOG), T. Forveille (CFHT), C. Moutou (LAM), P. Barge (LAM), M. Deleuil (LAM), T. Guillot (OCA), X. Bonfils (LAOG/Genève). F. Bouchy participe à la mise à jour et l'optimisation du logiciel de réduction des données (tâche de service CNAP) et est en charge de coordonner le sous-programme 6 (suivi Corot). X. Delfosse est coordinateur du sous-programme 3 (naines M).

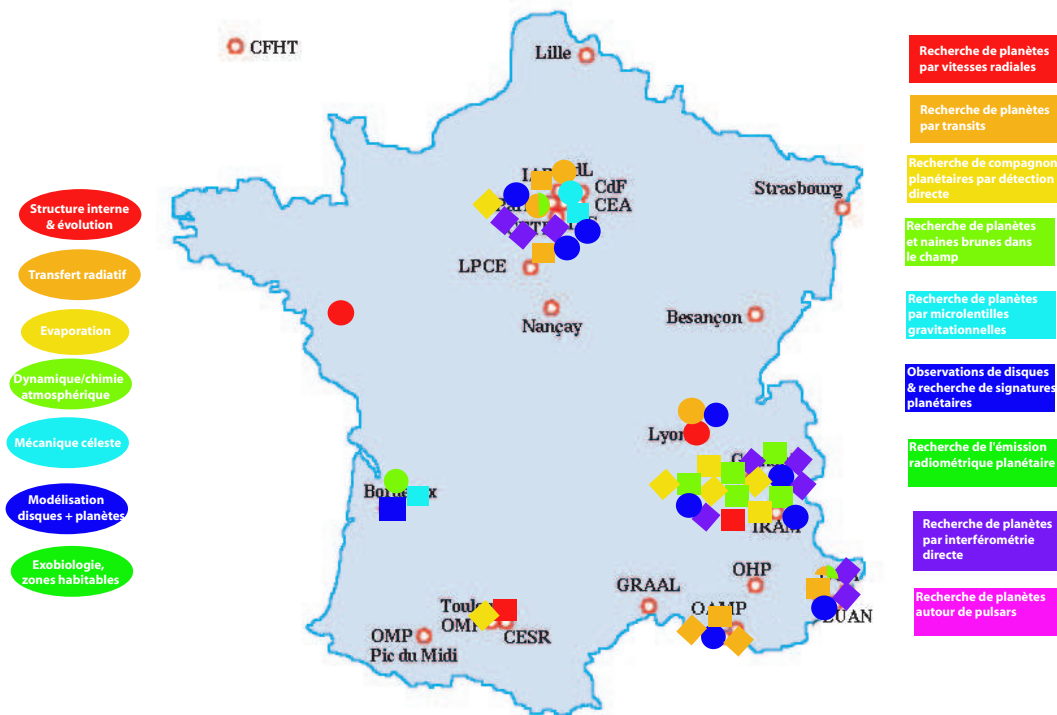


FIG. 5.5 – Estimation des thèses soutenues depuis 2000 ou en cours ayant pour thème (partiellement ou totalement) les exoplanètes.

5.5.2 VLT-FLAMES

FLAMES sur le VLT est un lien multi-fibres qui permet d'utiliser le spectrographe haute résolution UVES avec 7 fibres simultanément et/ou le spectrographe moyenne résolution GIRAFFE avec 132 fibres simultanément. Ces deux instruments multi-objets à liaison par fibres permettent des mesures de vitesses radiales efficaces (jusqu'à la magnitude 17) avec une précision suffisante (30-50 m/s) pour la caractérisation ou détection de Jupiters chauds. FLAMES+UVES est utilisé dans le cadre du suivi sol des candidats exoplanètes OGLE détectés en photométrie. Sont associés à ce programme les acteurs français suivants : F. Bouchy (LAM) et C. Moutou (LAM). FLAMES+GIRAFFE est utilisé dans le cadre de la recherche des compagnons de faibles masses (des Jupiters chauds au binaires) dans les champs COROT pour la préparation optimale de la mission spatiale. Sont associés à ce programme les acteurs français suivants : F. Bouchy (LAM), C. Moutou (LAM), F. Royer (Meudon), M. Deleuil (LAM), P. Barge (LAM), B. Loeillet (LAM), J.P. Sivan (LAM).

5.5.3 Sophie

Le spectrographe SOPHIE sera offert à la communauté en juin 2006. Un consortium franco-suisse vient de se mettre en place afin de réaliser un large programme multi-facettes de recherche et caractérisation des exoplanètes. Ce consortium, composé de 20 chasseurs de planètes, souhaite utiliser 200 nuits par an sur SOPHIE afin d'assurer un retour optimal et compétitif dans la thématique des exoplanètes. Les 2 niches principales de SOPHIE seront la détection de super-Terres chaudes et la caractérisation des Jupiters-chauds à transits. Sont associés à ce consortium les acteurs français suivants : F. Bouchy (LAM), C. Moutou (LAM), X. Delfosse (LAOG), F. Galland (LAOG), J.L. Beuzit (LAOG), X. Bonfils (LAOG/Geneve), T. Forveille (LAOG), G. Hébrard (IAP), A.M. Lagrange (LAOG), B. Loeillet (LAM), C. Perrier (LAOG), D. Segransan (Geneve/LAOG), J.P. Sivan (LAM), et A. Vidal-Madjar (IAP). F.

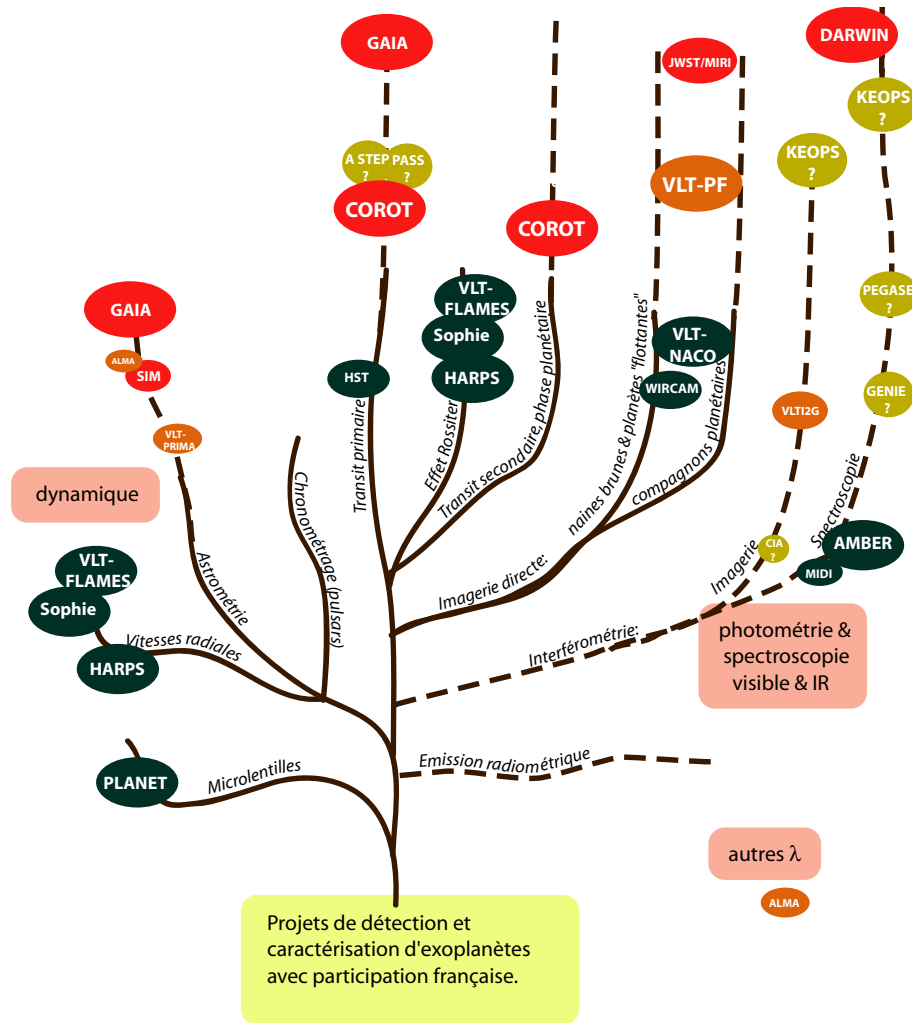


FIG. 5.6 – Arbre des différents projets de détection et de caractérisation d'exoplanètes incluant une participation française.

Bouchy assure la coordination du consortium. C. Moutou est responsable du sous-programme 2 (Jupiters chauds). X. Delfosse est responsable du sous-programme 3 (Naines M), F. Galland est responsable du sous-programme 4 (Etoiles A-F).

En 2007 le programme de suivi des candidats exoplanètes COROT demarrera. Seront associés à ce programme les acteurs français suivants : C. Moutou (LAM), F. Bouchy (LAM), P. Barge (LAM), M. Deleuil (LAM), J.P. Sivan (LAM), T. Guillot (OCA), J.C. Bouret (LAM), G. Hebrard (IAP), H. Le Coroller (OHP), B. Loeillet (LAM).

5.6 Les projets photométriques

5.6.1 PLANET

Le programme PLANET (Probing Lensing Anomalies NETwork), une opération internationale de recherche de planètes extrasolaires par effet de microlentille gravitationnelle est pilotée par la France depuis 2002. Cette opération, née en 1995, regroupe 30 chercheurs (France, Danemark, Allemagne, Angleterre,

objectifs : (1). Faire un suivi photométrique très précis de plusieurs dizaines d'étoiles brillantes dans le but de déterminer leurs oscillations. (2). Faire un suivi photométrique de plusieurs dizaines de milliers d'étoiles (~ 60000 sur des durées de 150 jours, et jusqu'à ~ 60000 autres pendant des observations courtes de ~ 20 jours, durant la mission nominale) dans le but de détecter des exoplanètes en transit. COROT devrait permettre la détection de plusieurs dizaines de Pégasides (i.e. les planètes géantes de la masse de Saturne et au dessus, dont la fréquence est contrainte par les mesures en vitesses radiales), et un nombre indéterminé de planètes plus petites, jusqu'au rayon terrestre environ, si ces planètes sont présentes à proximité de leur étoile.

COROT sera lancé en fin d'été 2006, et la durée nominale de la mission est de 2.5 ans, ce qui permettra l'observation continue pendant 5 mois de 5 champs d'étoiles dans les "yeux" COROT : le centre galactique en hiver, l'antcentre en été. Une maximisation du retour scientifique de COROT nécessitera des observations du sol en spectroscopie (étude des étoiles parentes), photométrie (détection des faux positifs), vitesses radiales (détection des faux positifs, confirmation de la nature planétaire des objets, mesure de la masse des planètes) et possiblement en imagerie haute résolution spatiale pour détecter d'éventuelles étoiles binaires de fond.

La moisson de COROT entraînera certainement un suivi observationnel pendant plusieurs années. (1) En vitesses radiales pour tenter de trouver des planètes moins massives ou autour d'étoiles plus actives, et pour mesurer e.g. l'effet Rossiter. (2) En spectroscopie des étoiles pour affiner notre connaissance des étoiles parentes (la plus grande partie de l'incertitude sur les rayons mesurés provient de l'incertitude sur le rayon de l'étoile). (3) En photométrie pour affiner le chronométrage des transits et contraindre la présence de compagnons planétaires ainsi que pour suivre les candidats bi- voire mono-transit longue période de COROT.

5.6.3 A STEP

A STEP (Antarctica Search for Transiting Extrasolar Planets) est un projet de détection de planètes en transit par photométrie visible depuis le Dôme C (voir Fressin et al. 2005). Le projet vise à développer une caméra à adapter à l'un des télescopes résidant au Dôme C, c'est-à-dire le télescope Italien de 80 cm IRAIT, qui sera mis en place en 2007, ou un télescope résidant de la station dans le cadre de CONCORIASTRO. Le projet vise une installation sur le site pour une campagne d'observation démarrant durant l'hiver austral 2008. Il s'agit là d'un projet précurseur de qualification du site spécifiquement pour la détection de transits planétaires en vue d'un projet de détections massives à l'horizon 2012.

La stratégie observationnelle de A STEP est inspirée de la campagne OGLE qui est celle qui a conduit à ce jour à la plus grande moisson de planètes en transit. Il s'agit ainsi d'observer avec un CCD du commerce mais de bonne qualité un champ relativement petit (moins d'un degré carré) pour tenter d'atteindre une grande précision photométrique sur plusieurs milliers d'étoiles de magnitudes 12 à 16.

A STEP est mené par un consortium regroupant l'OCA, le LUAN, l'OAMP, l'Observatoire de Genève (Suisse) et le DLR (Allemagne). Le projet est en attente de financement.

5.6.4 PASS

PASS (Permanent All Sky Survey) est projet de détection de planètes par transits mené essentiellement par l'IAC (Deeg et al. 2005) mais avec possibilité de participation française. PASS pourrait être installé au Dôme C. Le projet consiste en une couverture en photométrie visible de tout le ciel visible par 15 caméras CCD à grand champ. L'objectif est la détection des transits de planètes géantes autour de toutes les étoiles jusqu'à la magnitude 10.5. Un prototype est installé à l'observatoire de Teide à Tenerife.

5.7 Les projets astrométriques

5.7.1 VLT-PRIMA

L'objectif scientifique de PRIMA est triple : accroître la sensibilité du VLTI, permettre l'imagerie d'objets faibles (objectif PRIMA-objets faibles) et accéder à l'astrométrie de précision en vue de détecter la présence de planètes autour d'étoiles proches (objectif PRIMA-astrométrie).

La météorologie haute précision de PRIMA et les suiveurs de franges permettront d'atteindre une précision de $10 \mu\text{as}$. La détection de Jupiters situés jusqu'à 240 pc devient possible.

Le mode astrométrique de PRIMA permettra d'observer simultanément deux champs séparés de 2 à 60 secondes d'angle pour détecter et suivre les franges sur un objet brillant et détecter les franges sur l'objet suspecté d'avoir des planètes. La phase des franges sur cet objet sera mesurée relativement à l'objet de référence avec une précision de $1/1000$ à $2 \mu\text{m}$. La mesure très précise (5nm rms) de la différence de marche entre les deux franges est directement reliée à l'angle entre les deux étoiles. La base de 200m permettra d'atteindre une précision sur cet angle de $10 \mu\text{as}$ pour $10''$ d'angle de séparation en seulement 30 min de temps d'intégration (limite due à l'anisoplanétisme atmosphérique).

5.7.2 GAIA

GAIA est une mission spatiale ambitieuse ayant pour objectif de cartographier en trois dimensions la Voie Lactée, notre galaxie, pour mettre en lumière la composition, la formation et l'évolution de celle-ci. GAIA fournira des mesures de positions et de vitesses radiales jamais obtenues avec la précision nécessaire pour construire un recensement stéréoscopique et cinématique d'environ un milliard d'étoiles dans notre galaxie et aussi dans le groupe local.

Un des objectifs de GAIA est de détecter et classifier les orbites de dix mille systèmes planétaires extra-solaires.

5.8 Les projets d'imagerie directe et de spectroscopie

5.8.1 NACO (VLT)

NACO désigne l'ensemble caméra proche IR (imagerie, coronographie, spectroscopie et polarimétrie) et système d'optique adaptative NAOS. Une étoile laser est en cours de développement. Les performances obtenues en proche IR (J à bande L) permettent les premières détections d'objets de masse planétaire dans les cas les plus favorables (objets relativement jeunes, à grande séparation). Les générations futures d'imageurs à grand contraste permettront d'améliorer significativement les performances à petite séparation ($< 1''$) e autour des objets brillants ($V < 10-11$), mais pas significativement dans les autres cas, en particulier autour des étoiles lointaines et faibles.

5.8.2 WIRCAM (TCFH)

WIRCAM est une caméra proche infrarouge grand champ, pour le TCFH. La France a contribué à son développement ; la caméra est livrée au TCFH et subi les derniers tests avant le début des grands relevés. La motivation scientifique n'est pas en premier lieu les exoplanètes ; toutefois, les grands relevés dans les régions jeunes permettront d'identifier des sources faibles et froides ($< 2000 \text{K}$), correspondant à cet âge à des très faibles masses (naines brunes ou masses planétaires).

5.8.3 VLT-CRIRES

CRIRES est un instrument de première génération pour le VLT qui devrait être mis en service en 2006. C'est un spectrographe infrarouge, qui permettra d'étudier le domaine $1-5 \mu\text{m}$ du spectre avec un pouvoir de résolution de 20000 à 100000 et une sensibilité accrue par un système d'optique adaptative.

Pour l'étude des planètes extrasolaires, CRIRES sera utilisé de deux façons différentes : pour des mesures en vitesse radiale, complémentaires aux mesures dans le domaine visible ; pour des études spectroscopiques des atmosphères exoplanétaires. La détection directe de la planète et son spectre d'albédo pourrait ainsi être obtenus, pour les planètes fortement irradiées. Pour les systèmes en transit, la spectroscopie pendant le transit pourra permettre la détection des bandes d'absorption du méthane et du CO en particulier.

5.8.4 VLT-Planet Finder (SPHERE)

VLT-Planet Finder (VLT-PF) est un instrument de seconde génération pour le VLT, qui sera mis en service à partir de 2010. En utilisant un système d'optique adaptative extrême et des "astuces optiques" permettant de largement supprimer la lumière de l'étoile, VLT-PF sera capable d'obtenir le contraste nécessaire pour l'imagerie directe des planètes géantes autour d'étoiles brillantes. Les cibles les plus favorables pour la recherche de planètes avec VLT-PF sont (1) les étoiles proches (pour lesquelles la résolution angulaire sera suffisante pour la détection de la lumière stellaire réfléchiée par l'étoile) et (2) les étoiles jeunes (car les planètes jeunes sont plus lumineuses, à une masse donnée). La détection des planètes se fera dans le rouge ou l'infrarouge proche (0.8-2.5 μ m) et des informations spectrales et polarimétriques seront obtenues sur les planètes découvertes. L'espace de paramètre des systèmes détectés avec VLT-PF (masse, période) sera complémentaire à celui des méthodes indirectes, ainsi que les types de cibles (par exemple, les méthodes indirectes ne peuvent rien détecter autour des étoiles jeunes et actives, qui sont les cibles préférentielles de VLT-PF). Des planètes de longue période pourront aussi être recherchées dans les systèmes planétaires connus par vitesse radiale.

Le succès de Planet Finder est lié à la mise en place d'un survey de grande ampleur, d'un volume de 500 nuits environ, pour une recherche systématique sur plusieurs centaines d'étoiles. Une partie des nuits sera attribuée à l'ensemble de la communauté ESO intéressée. VLT-PF permettra d'étudier les étapes de la formation planétaire et stellaire, depuis les disques riches en gaz jusqu'aux systèmes évolués et la perte de masse des étoiles massives.

5.8.5 JWST/MIRI

L'imageur en IR thermique MIRI sur JWST est muni d'un mode coronographique permettant d'aborder la détection de l'émission thermique de planètes géantes autour d'étoiles proches. Si le contraste à cette longueur d'onde est relativement favorable, ce domaine souffre néanmoins d'une résolution angulaire limitée (en comparaison des plus petites longueurs d'onde) et de l'intensité du fond. Les meilleurs candidats seront donc cherchés dans la proximité angulaire des étoiles proches de nous (< 10 - 20 pc).

5.9 Les projets d'interférométrie

5.9.1 VLT-MIDI

MIDI est l'instrument de l'infrarouge moyen du VLTI. Il opère dans la bande N (10 microns). MIDI produit des résultats scientifiques depuis Juin 2003. Cet instrument est un succès, il offre une parfaite combinaison entre résolution spatiale (10 mas) et résolution spectrale ($R_{\max} = 230$) pour l'étude des poussières chaudes dans l'environnement de nombreuses sources astrophysiques. Les résultats vont de l'étude des objets jeunes aux noyaux actifs de galaxies. MIDI a permis d'obtenir des résultats importants sur la nature des poussières dans les différentes régions des disques d'étoiles jeunes (van Boeckle et al. 2004).

L'étude de la formation stellaire et de la formation de planètes sera un objectif phare du successeur de MIDI, MATISSE (instrument de deuxième génération qui permettra l'imagerie de sources complexes).

La détection directe de planètes type Pégasides avec MIDI en bande N et MATISSE en bande L et N est un projet dont la faisabilité est à la limite des possibilités instrumentales. Des observations sont prévues sur MIDI.

5.9.2 VLT-AMBER

AMBER est l'instrument focal proche infrarouge [1-2.5 μ m] du VLTI. Cet instrument peut combiner la lumière provenant de 3 télescopes simultanément. Sa résolution spectrale peut être adaptée à 35, 1500 ou 12000. Dans le cadre de la recherche d'exoplanètes, AMBER est plutôt adapté à la découverte et à la caractérisation de Pégasides. Son domaine de prédilection est la mesure de clôture de phase entre les 3 télescopes combinées à la mesure différentielle. Cette quantité qui porte l'information de phase n'est pas affectée par les défauts de phase provenant de chacun des bras de l'interféromètre et notamment des effets de l'atmosphère. C'est donc cette voie qui est envisagée.

Si l'on atteint la précision de 10^{-4} , alors il serait possible de retrouver le spectre d'une planète comme 51 PegB ou τ BooB. Les équipes françaises qui se consacrent à cet effort sont basées au LUAN et à l'OCA (Petrov, Vannier, Millour, Lopez et al.) et au LAOG (Perrier, Ségrasan, Chelli et al.).

5.9.3 VLTI2G

Quatre propositions d'instruments sont actuellement soumises auprès de l'ESO. Il s'agit de BOBCAT, Gravity, VITRUV et MATISSE. BOBCAT, GRAVITY et VITRUV opéreraient dans le proche infrarouge avec des objectifs astrophysiques sensiblement différents. MATISSE est prévu pour l'infrarouge moyen (Bandes L, M, N et Q). Un appel d'offre va prochainement être diffusé par l'ESO. Les propositions seront à soumettre pour Janvier 2006. Des études de phase A débuteront en Mai-Juin 2006 pour des durées d'environ 18 mois. Un des objectifs de ces futurs projets est le développement des capacités d'imagerie au VLTI. Ceci dans un domaine spectral totalement complémentaire à celui couvert par ALMA.

5.9.4 GENIE

L'instrument GENIE est proposé au VLTI (utilisation des UTs ou des ATs suivant le type de cible), dans le cadre d'une collaboration ESA/ESO. GENIE dépend de manière critique des performances futures du VLTI et notamment de la stabilisation de phase offerte par PRIMA. Après une étude industrielle de phase A en 2004/2005, il est apparu nécessaire de procéder à des mesures complémentaires de la stabilité de la polarisation au VLTI avant de se prononcer sur la faisabilité de GENIE. Si une décision positive est prise (fin 2006), l'instrument pourrait être installé à Paranal vers 2010/11. La sensibilité annoncée varie entre 25 et 120 fois le niveau de la lumière zodiacale solaire, suivant le type spectral de la source, sa distance et les possibilités de calibration.

5.9.5 ALADDIN

Sur la base d'un précurseur sol au projet DARWIN, une option fait intervenir un démonstrateur installé en Antarctique (ALADDIN). Le système est un interféromètre de taille modeste (deux collecteurs de 1 m sur une base maximale de 40 m) mais optimisé pour la coronographie interférométrique dans l'infrarouge. Cette optimisation, associée à l'emplacement privilégié, permettrait une sensibilité (en terme de niveau de lumière zodiacale détectable) entre 1.6 et 3.5 fois meilleure (suivant le type de source) que pour GENIE au VLTI, ce qui permettrait de descendre en-dessous du seuil de 20 lumières zodiacales solaires dans la plupart des cas. Une étude est en cours pour amener la réflexion sur ALADDIN à un niveau de maturité comparable à celle sur GENIE.

5.9.6 PEGASE

PEGASE est un projet proposé au CNES au printemps 2004 en réponse à un appel à idée sur le thème du "vol en formation". Il s'agit d'un interféromètre à 2 ouvertures, composé de 2 satellites portant les sidérostats (diamètre 30 à 40 cm) et d'un satellite portant le laboratoire de recombinaison. L'ensemble constitue une flotille auto-controlée dont la distance entre éléments peut varier de 10 m à 250 m environ. Le gros intérêt du vol en formation pour l'interférométrie est d'offrir la possibilité de modifier la longueur de la base (distance entre les sidérostats) à chaque observation et de l'adapter en fonction des objets

(taille angulaire, projection des caractéristiques orbitales...)

Côté instrument, PEGASE présente la particularité d'offrir un double mode de recombinaison :

- mesure de visibilité : La mesure de la visibilité de la source (du contraste des franges) en fonction de la base ou de la longueur d'onde permet par l'application et l'adaptation de modèles géométriques de remonter à des informations sur la structure spatiale de la source. C'est la méthode utilisée classiquement sur les interféromètres au sol à deux ouvertures pour déterminer les diamètres stellaires par exemple.
- interférométrie annulante : la recombinaison est effectuée de sorte que la transmission de l'instrument soit nulle sur la ligne de visée et maximale à côté (à $\lambda/2B$ où B est la distance entre les sidérostats). Ce mode de recombinaison qui allie la haute résolution angulaire de l'interféromètre permet des observations à grande dynamique. Il est particulièrement bien adapté pour l'observation des compagnons faible.

Avec une résolution angulaire de quelques mas seulement, dans la gamme spectrale 2.5-5 μm , et une extinction interférométrique maximale de 10^4 environ, l'objectif principal de PEGASE réside dans l'observation et la spectroscopie des compagnons stellaires, substellaires et planétaires. Contrairement à l'observation directe des objets isolés, l'observation d'objets liés gravitationnellement permet par une mesure complémentaire en vitesse radiale et par détermination des caractéristiques orbitales de déterminer avec précision la masse de l'objet considéré, et par conséquent, sa nature (étoile, naine brune ou planète). Le domaine spectral, inaccessible depuis le sol, permet de déterminer la composition des atmosphères des objets (mise en évidence de CO, H₂O, CH₄...) et d'étudier ses propriétés au cours du temps (variation de la phase orbitale). PEGASE semble être l'outil de prédilection pour l'étude des objets de faible masse, qu'ils soient pegasides (planètes de la taille de Jupiter, proches de leur étoiles) ou naine brune, jeune (donc intrinsèquement chauds) ou irradiées (par leur étoile).

Pégase permet également un certain nombre de programmes d'observation qui nécessitent une haute résolution angulaire et une dynamique élevée. Citons par exemple, l'observation des disques proto-planétaires ou des disques de débris.

Compte tenu du coût d'une mission comme PEGASE, son existence ne peut s'envisager que dans le cadre d'une collaboration large (Europe, Etats Unis?). Compte tenu également de son intérêt technologique évident dans l'optique des futures missions type DARWIN/TPF, dont la difficulté intrinsèque va certainement nécessiter un précurseur, PEGASE peut également apparaître comme un des éléments d'une feuille de route internationale vers DARWIN.

Le projet actuel, proposé par un large consortium francophone issu de la communauté HRA bénéficie directement des retombées de la R&T effectuées dans le domaine.

5.9.7 ALMA

L'interféromètre submillimétrique ALMA (Atacama Large Millimetre Array) qui entrera progressivement en service au Chili à partir de 2008 n'est pas adapté à l'observation des exo-planètes. Malgré le gain en sensibilité important qu'il permet par rapport aux instruments existants, la détection de l'émission thermique de l'atmosphère des Jupiter chauds restera extrêmement marginale. Pour donner un ordre de grandeur, à la fréquence de 280 GHz, où le fonctionnement de cet instrument sera optimal, le flux d'un Jupiter chaud (de température de brillance $T_B \simeq 1000$ K) situé à 5 pc de la Terre est d'environ $S \simeq 2\mu\text{Jy}$. Avec 50 antennes, la sensibilité attendue est telle qu'une détection à 3σ sera possible en 400 heures ou 17 jours environ. Pour détecter un Jupiter ($T_B = 280$ K) dans les mêmes circonstances, il faudrait 17000 heures.

ALMA sera par contre l'instrument idéal pour l'étude de la formation des planètes. En effet, les grandes lignes de bases (disponible après 2012) permettront d'atteindre la résolution nécessaire pour imager les parties internes des disques proto-planétaires situés dans les régions de formation d'étoile les plus proches de nous (150 pc). ALMA pourra ainsi observer (et dans certains cas résoudre) les sillons créés dans les disques par les proto-planètes.

5.9.8 KEOPS

Le projet KEOPS étudié par le LUAN est un réseau interférométrique de 6, 12 et 18 télescopes de 1.5 m (total de 36 éléments) déployés sur trois anneaux concentriques de 250 m, 600 m et 980 m respectivement. Ce réseau, co-phasé fonctionnera en mode d'imagerie instantanée entre le visible et l'IR thermique avec les rayons des anneaux extensibles jusqu'à 10 km accédant à des résolutions angulaires dans la gamme du $10 \mu\text{as}$ en optique. Le mode de recombinaison est du type images densifiées opérant dans la plan pupille où la coronographie achromatique ouvre la possibilité de détection de planètes extra-solaires. L'objectif primaire de KEOPS consiste à détecter directement et caractériser spectralement les planètes extra-solaires à la recherche d'exo-terres dans un cône de 90° d'ouverture ayant pour sommet la station Concordia (couverture de 120deg du ciel austral). Les autres programmes concernent l'imagerie à grand champ et à ultra-très haute résolution angulaire (2000×2000 pixels sur $1''$ de champ) : imagerie de surfaces stellaires, diamètres de supergéantes dans LMC et le SMC, lentilles gravitationnelles, NAGs.

5.9.9 DARWIN

La mission DARWIN est un projet d'observatoire interférométrique infrarouge (gamme 6 à $20 \mu\text{m}$) proposé à l'Agence Spatiale Européenne dès 1993, et envisagée dans le cadre du programme "Cosmic Vision" (2015-2025). L'objectif principal de DARWIN est la détection directe et l'analyse spectrale des exoplanètes, en particulier telluriques dans le but d'en déterminer la composition atmosphérique et éventuellement de mettre en évidence des bio-marqueurs (traceurs spectroscopiques d'activité biologique).

L'observatoire dans sa version actuelle est une formation de satellites, constituée, selon les configurations envisagées dans les avant-projets, par 3 à 6 télescopes, un satellite de recombinaison portant l'instrumentation, et éventuellement un satellite hors plan qui contribue à la métrologie 3D de la constellation et la communication avec le sol. Côté instrumentation, l'observatoire devrait être équipé d'un système de recombinaison en frange noire (interférométrie annulante), dont les produits scientifiques sont des cartographies des exo-systèmes mettant en évidence ses différentes composantes ainsi que les spectres des différentes composantes avec une résolution spectrale de 20 à 50 selon l'objet. Une résolution spectrale même limitée dans le domaine spectral (6 à $20 \mu\text{m}$) permet de mettre en évidence des gaz comme CO_2 , H_2O ou O_3 à des abondances terrestres, mais aussi CH_4 , NH_3 dans le cas d'atmosphères réductrices ou SO_2 si ce gaz est dominant dans l'atmosphère. DARWIN sera également muni d'un instrument interférométrique de recombinaison directe permettant faire de l'imagerie à haute résolution angulaire (quelques mas).

Compte tenu de la difficulté technique de cette mission ambitieuse, et de son coût probablement élevé, DARWIN est envisagé dans le contexte d'une large collaboration internationale (ESA + NASA + autres ?). Un programme de R&T conséquent est également nécessaire. Il a déjà été initié en Europe par l'ESA ainsi que par le CNES, et par la NASA outre Atlantique. Les principaux objectifs de ces R&T sont de valider les différentes techniques et technologies nécessaires à la mission : - interférométrie annulante à forte réjection,

- achromatisation sur une large gamme spectrale,
- spatialisaiton des techniques interférométriques (en optique massive ou intégrée), - métrologie nanométrique et sub-nanométrique - vol en formation,
- ...

Signalons à ce sujet que dans le cadre de la préparation du vol en formation, le concept PEGASE a été proposé au CNES suite à un appel à idée (cf. chapitre correspondant).

d'autre part, dans le cadre du programme DARWIN, l'ESA a identifié la nécessité d'un précurseur sol, dont l'objectif est double :

- Technologique : démonstration du principe de nulling interférométrique dans un contexte opérationnel ;

- Scientifique : caractérisation de l'intensité de la lumière zodiacale autour des sources cibles de DARWIN, pour identifier celles dont le niveau est supérieur à environ 20 fois la lumière zodiacale solaire (seuil au-delà duquel la détection d'une exoterre est compromise par le bruit de photons associé).

La première option étudiée est l'instrument GENIE proposé au VLTI (utilisation des UTs ou des ATs suivant le type de cible), dans le cadre d'une collaboration ESA/ESO. Une autre option fait intervenir un démonstrateur installé en Antarctique (ALADDIN). Le système est un interféromètre de taille modeste (deux collecteurs de 1 m sur une base maximale de 40 m) mais optimisé pour la coronographie interférométrique dans l'infrarouge.

L'avenir de la mission DARWIN est directement lié aux efforts qui seront consentis pour développer le concept et le financer.

5.9.10 Hypertélescopes (CARLINA, VLTI-VIDA, OVLA, Perce-neige)

Le concept des hypertélescopes a été proposé pour permettre d'imager directement les étoiles et à terme, les exoplanètes elles-mêmes. La résolution angulaire incroyablement précise à atteindre implique d'avoir recours à un nouveau concept de télescopes basé sur la recombinaison des faisceaux de miroirs très distants les uns des autres avec en particulier un miroir secondaire placé très haut au sommet de la structure considérée. Des travaux de faisabilité sont en cours, avec notamment l'instrument CARLINA à l'OHP qui a obtenu des premières franges en 2004, et dont le miroir secondaire est porté par un ballon. Des avancées technologiques sont à réaliser en particulier au niveau du positionnement des structures et de leur asservissement, mais pourraient conduire aux projets VIDA (Hypertélescope utilisant les télescopes du VLT), OVLA (Optical Very Large Array), Perce-neige (au Dôme C) voire à un système de télescopes dans l'espace.

5.9.11 SKA

SKA ("Square Kilometer Array") est le grand projet international de futur interféromètre decamétrique-centimétrique. Ce projet est actuellement en cours de définition et sa construction n'a pas été décidé par la communauté internationale. Dans le meilleur des cas, un tel instrument n'entrera pas en opération avant 2015-2020. La revue par Butler et al., 2004 (New Astronomy review) résume les potentialités de SKA concernant l'étude du système solaire et des exo-planètes.

- Concernant l'étude des exo-planètes, SKA pourrait apporter des connaissances dans deux domaines :
- la détermination des magnétosphères des exo-planètes géantes. Ce type d'observations n'a pas encore donné de résultats à cause de la faible sensibilité des interféromètres radio existants. Malgré un gain significatif en sensibilité, les prévisions pour SKA font apparaître des temps d'intégration extrêmement importants.
 - la détection indirecte d'exo-planètes par astrométrie.

5.10 Programmatique

Les différents projets sont regroupés dans le temps en suivant les différentes filières : vitesses radiales et haute résolution angulaire, photométrie, astrométrie, imagerie directe et interférométrie dans la figure 5.8. On remarquera que la seule filière qui ne propose pas de projet au delà de l'horizon 2010 est paradoxalement la plus fructueuse en terme de détections : les vitesses radiales. Ceci est dû à la mise en service récente de HARPS et SOPHIE. Etant donné l'importance de cette technique, il nous apparaît important d'engager dès maintenant une réflexion sur des futurs instruments possibles, avec deux voies à envisager : l'observation simultanée d'un grand nombre d'étoiles, afin de pouvoir augmenter significativement notre potentiel de détection de petites planètes en transit, et la continuation de la quête d'une meilleure précision et stabilité des mesures.

Du côté de la photométrie, une très grande partie des efforts est liée à la préparation de COROT qui s'achève et se transformera bientôt en un travail d'analyse des données du satellite. Etant donné les

potentialités de la photométrie (transits planétaires et microlentilles) (voir section 3.3), il est important de poursuivre ces études et d'envisager, conjointement aux observations en vitesses radiales, le suivi d'un très grand nombre d'étoiles pour la détection de planètes extrasolaires. Le Dôme C paraît être un site prometteur, mais ses qualités intrinsèques pour ce type de photométrie ainsi que la stratégie observationnelle optimale restent à étudier.

La voie astrométrique paraît relativement dégagée, avec la mission GAIA qui devrait apporter une contribution cruciale au sujet d'ici 10 ans, à la fois par la détermination des distances stellaires (donc des étoiles à planètes connues), mais aussi par la détection astrométrique de nombreuses planètes.

Au niveau de la filière imagerie, la France a une position très forte qui est solidifiée par la mise en place de VLT-PF. Cependant, il convient d'être prudent pour l'horizon plus lointain, le travail de préparation limitant les contributions vers des missions plus ambitieuses, les ELTs en particulier.

La filière interférométrique est sans contexte celle qui est la plus riche en projets divers, et ses potentialités sont effectivement énormes. Cependant, il conviendra d'ici quelques années au plus de fédérer les réflexions des différents groupes pour aboutir à un ou deux projets ambitieux sur le chemin de DARWIN.

Quelques références liées au texte

[Voir aussi la bibliographie qui suit pour les articles à participation française pour les années 2000-2005]

van Boeckel et al. 2004, *Nature* 432, 479

Bordé P., 2003, Détection et caractérisation de planètes extrasolaires par photométrie visible et interférométrie infrarouge à très haute précision, Université Pierre et Marie Curie - Paris VI

Bracewell R.N., 1978, Detecting nonsolar planets by spinning infrared interferometer, *Nature*, **274**, p. 780

Brown, T.M., Charbonneau, D., Gilliland, R.L., Noyes, R.W., & Burrows, A., Hubble Space Telescope time-series photometry of the transiting planet of HD209458, 2001, *ApJ*, 552, 699.

Charbonneau, D., Brown, T.M., Noyes, R.W., & Gilliland, R.L., 2002, *ApJ*, 568, 377.

Charbonneau, D., et al., 2006, *ApJ*

Deming, D., et al., 2005, *Nature*

Garcia P., Malbet F. et al. 2005, 'Science Cases of VITRUV', disponible auprès des auteurs

Gozdziewski, K., Konacki, M. & Wolszczan, A., Long-term stability and dynamical environment of the PSR B1257+12 planetary system, 2005, *ApJ*, 619, 1084.

Guillot, T., et al., 1996, *ApJ*, 459, L35.

Konacki, M., Lewandowski, W., Wolszczan, A., Doroshenko, O., & Kramer, M., Are There Planets around the Pulsar PSR B0329+54?, 1999, *ApJ*, 519, 81.

Konacki, M. & Wolszczan, A., Masses and Orbital Inclinations of Planets in the PSR B1257+12 System, 2003, *ApJ*, 591, L147.

Ollivier M. et al., 2005, PEGASE : Document de synthèse des objectifs scientifiques, disponible auprès de l'auteur

Ribas, I., Arenou, F., & Guinan, E.F., Astrometric and Light-Travel time orbits to detect low-mass Companions : A case study of the eclipsing system R Canis Majoris, 2002, *AJ*, 123, 2033.

Sigurdsson, S., Richer, H.B., Hansen, B.M., Stairs, I.H. & Thorsett, S.E., A Young White Dwarf Companion to Pulsar B1620-26 : Evidence for Early Planet Formation, 2003, *Science*, 301, 193.

Sudarsky, D., Burrows, A., & Hubeny, I., 2003, *ApJ*, 588, 1121.

Wolf S., Lopez B. et al. 2005, 'Science Cases of MATISSE', disponible auprès des auteurs

Wolszczan, A., & Frail, D. A., A Planetary System around the Millisecond Pulsar PSR 1257+12?, 1992, *Nature*, 355, 145.

Wolszczan, A., Confirmation of Earth-Mass Planets Orbiting the Millisecond Pulsar PSR B1257+12, 1994, *Science*, 264, 538.



FIG. 5.8 – Estimation de l’extension temporelle de la plupart des projets proposés en France. Seule la partie “service” des instruments est prise en compte.

Chapitre 6

Recommandations

La découverte des premières planètes en dehors de notre Système Solaire dans les années 1990 a entraîné un essor considérable de ce thème qui a pris une place significative dans le domaine de l'astronomie. Le groupe "exoplanètes" de l'INSU, comprenant 12 spécialistes des divers aspects de la recherche dans ce thème a été créé pour établir un état des lieux et proposer des recommandations.

La France s'est très bien positionnée dans ce nouveau thème, à la fois du point de vue observationnel et théorique, avec la première détection directe d'une exoplanète par optique adaptative avec VLT-NACO (2 connues à ce jour, dont 1 incertaine), la première détection d'une planète tellurique (de 5 masses terrestres) par la méthode des microlentilles gravitationnelles et le programme PLANET (3 connues, mais 2 de masse jovienne), la découverte de l'évaporation d'une "Pégaside" (évaporation de H I, C II, O I), la détection depuis 2003 de 16 planètes par la méthode des vitesses radiales avec ELODIE, HARPS, VLT-FLAMES (170 connues à ce jour), dont 4 en transit devant leur étoile (sur 9 connues actuellement), et de travaux théoriques sur l'atmosphère, l'évolution et l'évaporation des exoplanètes. On peut estimer à environ 110 le nombre de chercheurs permanents en France qui contribuent ou ont contribué à la thématique exoplanète. Un grand nombre de contributions marquantes sont le fait de jeunes chercheurs, recrutés après la découverte de 51 Peg b (1995).

Les pôles de recherche sur la thématique se regroupent essentiellement autour de Paris, Lyon-Grenoble, Nice, Marseille et Bordeaux. Le nombre de thèses effectuées sur la thématique et soutenues ou à soutenir après 2000 est évalué à environ 50. Plus de 200 articles de rang A ont été publiés sur le sujet entre 2000 et 2005 avec une contribution française, pour environ 3900 citations, soit 19.5 citations/article. Pour comparaison, une recherche sur ADS avec le mot clé "extrasolar planets" conduit à 14000 citations pour 3360 articles, soit 4.2 citations/article. Comme le montre la figure ci-contre, la France est impliquée dans un grand nombre de projets, ce qui témoigne de la bonne santé du domaine. Est-elle bien préparée pour les dix années qui viennent ? Y-a-t'il des voies qui sont à soutenir plus particulièrement ?

Les recherches futures s'orientent en particulier sur cinq filières importantes : i/ la spectroscopie à haute résolution et la vélocimétrie radiale, ii/ la photométrie, iii/ l'astrométrie, iv/ l'imagerie directe à haut contraste et v/ l'interférométrie. La communauté française est présente dans ces grandes voies observationnelles ainsi que théoriques, avec souvent un rôle majeur.

Aux niveaux français et européen, le paysage est marqué en particulier par les projets en cours suivants (chronologiquement) : la réalisation de SOPHIE (vitesses radiales sur le 193 de l'OHP), le lancement de COROT fin 2006 (mesure de transits par photométrie visible), la réalisation de VLT-PF à l'horizon 2010 (imagerie à haut contraste). Au-delà, ALMA à l'horizon 2012 (interférométrie millimétrique), JWST autour de 2012 (spectroscopie haute résolution, imagerie thermique à grand contraste) et GAIA à partir de 2015 (astrométrie spatiale) apporteront aussi des données précieuses à l'étude des exoplanètes. L'ensemble de ce paysage promet des avancées spectaculaires pour la découverte des exoplanètes, leur caractérisation et la compréhension des mécanismes de leur formation. **L'accompagnement de ces grands projets est indispensable. Il est important de veiller à la disponibilité d'équipe d'exploitation scientifique soutenue et bien coordonnée pour assurer un bon retour scientifique sur les projets**

lourds à fort investissement français comme COROT (qui nécessitera un suivi systématique des candidats transits par photométrie, et spectroscopie haute résolution) et VLT-PF. A une échelle d'investissement différente, nous recommandons de poursuivre l'exploration des différentes voies de recherches, y compris des méthodes dites alternatives dans le cadre de petits programmes ou de collaborations sur des projets plus ambitieux qui, au niveau national, requièrent pour l'instant des budgets modestes.

Pour l'avenir, en termes d'implication dans des projets non encore définis, il nous semble stratégiquement important de préciser et consolider notre positionnement en particulier sur les axes suivants :

- Dans le domaine de la spectroscopie haute résolution (incluant la vélocimétrie radiale) et de la photométrie, assurer la poursuite de potentiel d'observations de grands relevés (statistique) et de long terme, au-delà des projets actuels ;
- Positionnement pour la préparation ELT : l'imagerie à grand contraste est un des enjeux importants pour les ELTs ; la France peut potentiellement être un contributeur majeur pour ces développements et au centre de son exploitation. Il faut veiller à préparer solidement, dès maintenant un tel positionnement ;
- Interférométrie : la situation est compliquée par les incertitudes sur la mission ESA DARWIN, sans remettre en question la qualité de l'expertise française. Un plan de route clair devrait être établi en liaison avec l'ESA, incluant la conception d'un instrument pilote, sol ou espace. Ce plan de route devrait inclure la détermination de la fréquence d'existence de planètes telluriques et la magnitude de l'émission zodiacale des systèmes exoplanétaires recherchés ;
- De manière transversale, le Dome C est un site d'exception, pour lequel la France (avec l'Italie) jouit actuellement d'un accès privilégié. Plusieurs projets avec un retour fort pour les exoplanètes sont proposés sur ce site. Cette piste paraît importante à préciser, en prenant en compte les différentes échelles de temps de manière réaliste afin de phaser les différents projets plutôt que de les exclure, et en intégrant le potentiel de collaborations et participations internationales.

Ces 4 points représentent certainement des axes essentiels d'organisation nécessaire dans les 2 ans à venir.

Il est essentiel de souligner d'autre part que la recherche sur les exoplanètes est intimement liée à celle sur leur étoiles parentes (composition, structure, mode de formation, binarité, observation de disques protoplanétaires...etc.). **Physique stellaire et planétologie sont, à ce niveau, indissociables. Il est important que cette dualité soit reflétée au niveau des structures, en particulier des programme nationaux**, par une meilleure représentation des experts en exoplanétologie dans les divers comités ainsi que par une évaluation croisée des demandes dans le sujet. Globalement, un bon équilibre instrumentation/observations/théorie est indispensable. La France est bien positionnée de ce point de vue, avec en particulier des synergies fortes entre astronomie, planétologie et géochimie. Alors que le thème des origines des planètes et de la vie est proposé, à juste titre, pour devenir un des thèmes prioritaires du CNRS, il convient d'encourager fortement ces actions interdisciplinaires. Au niveau des disques protoplanétaires, des outils d'analyse manquent pour maximiser le retour scientifique des observations de très bon niveau faites par des équipes françaises. **Il devient d'autre part tout à fait urgent de développer, au niveau national, des outils de modélisation de la formation planétaire capables de prédire la fréquence de formation des planètes et leurs caractéristiques** et d'être ainsi confrontés aux observations présentes et à venir.

La France présente ainsi des atouts évidents dans le cadre de la recherche autour des exoplanètes qu'il convient de faire fructifier par la poursuite du soutien de cette thématique.

Chapitre 7

Annexe A : bibliographie des recherches exoplanètes en France 2000-2005

La liste qui suit regroupe une bibliographie non-exhaustive mais relativement complète sur la thématique de la recherche exoplanète en France depuis 2000. Seules les revues à rapporteurs sont incluses.

Bibliographie

- Abe, L., Domiciano de Souza, A., Vakili, F., Gay, J., 2003. Phase Knife Coronagraph. II - Laboratory results. *A&A* **400**, 385–392.
- Abe, L., Vakili, F., Boccaletti, A., 2001. The achromatic phase knife coronagraph. *A&A* **374**, 1161–1168.
- Aime, C., 2005. Principle of an achromatic prolate apodized lyot coronagraph. *PASP* **117**, 1012–+.
- Aime, C., Soummer, R., Ferrari, A., 2001. Interferometric apodization of rectangular apertures. application to stellar coronagraphy. *A&A* **379**, 697–707.
- Aime, C., Soummer, R., Ferrari, A., 2002. Total coronagraphic extinction of rectangular apertures using linear prolate apodizations. *A&A* **389**, 334–344.
- Aime, C., Soummer, R., Lopez, B., 2001a. Stellar coronagraphy with a redundant array of telescopes in space : the multiple mask coronagraph. *A&A* **370**, 680–688.
- Aime, C., Soummer, R., Lopez, B., 2001b. Stellar coronagraphy with a redundant array of telescopes in space : The multiple mask coronagraph. *A&A* **370**, 680–688.
- Albrow, M. D., An, J., Beaulieu, J.-P., Caldwell, J. A. R., DePoy, D. L., Dominik, M., Gaudi, B. S., Gould, A., Greenhill, J., Hill, K., Kane, S., Martin, R., Menzies, J., Naber, R. M., Pel, J.-W., Pogge, R. W., Pollard, K. R., Sackett, P. D., Sahu, K. C., Vermaak, P., Vreesswijk, P. M., Watson, R., Williams, A., 2001. Limits on the Abundance of Galactic Planets From 5 Years of PLANET Observations. *ApJ* **556**, L113–L116.
- Albrow, M. D., An, J., Beaulieu, J.-P., Caldwell, J. A. R., DePoy, D. L., Dominik, M., Gaudi, B. S., Gould, A., Greenhill, J., Hill, K., Kane, S., Martin, R., Menzies, J., Pogge, R. W., Pollard, K. R., Sackett, P. D., Sahu, K. C., Vermaak, P., Watson, R., Williams, A., 2002. A Short, Nonplanetary, Microlensing Anomaly : Observations and Light-Curve Analysis of MACHO 99-BLG-47. *ApJ* **572**, 1031–1040.
- Albrow, M. D., Beaulieu, J.-P., Caldwell, J. A. R., DePoy, D. L., Dominik, M., Gaudi, B. S., Gould, A., Greenhill, J., Hill, K., Kane, S., Martin, R., Menzies, J., Naber, R. M., Pogge, R. W., Pollard, K. R., Sackett, P. D., Sahu, K. C., Vermaak, P., Watson, R., Williams, A., The PLANET Collaboration, 2000. Limits on Stellar and Planetary Companions in Microlensing Event OGLE-1998-BUL-14. *ApJ* **535**, 176–189.
- Albrow, M. D., Beaulieu, J.-P., Caldwell, J. A. R., Dominik, M., Gaudi, B. S., Gould, A., Greenhill, J., Hill, K., Kane, S., Martin, R., Menzies, J., Naber, R. M., Pollard, K. R., Sackett, P. D., Sahu, K. C., Vermaak, P., Watson, R., Williams, A., Bond, H. E., van Bemmell, I. M., 2000. Detection of Rotation in a Binary Microlens : PLANET Photometry of MACHO 97-BLG-41. *ApJ* **534**, 894–906.
- Allard, F., Hauschildt, P. H., Alexander, D. R., Tamanai, A., Schweitzer, A., 2001. The Limiting Effects of Dust in Brown Dwarf Model Atmospheres. *ApJ* **556**, 357–372.

- Allard, F., Hauschildt, P. H., Schweitzer, A., 2000. Spherically Symmetric Model Atmospheres for Low-Mass Pre-Main-Sequence Stars with Effective Temperatures between 2000 and 6800 K. *ApJ* **539**, 366–371.
- Allard, F., Hauschildt, P. H., Schwenke, D., 2000. TIO and H₂O Absorption Lines in Cool Stellar Atmospheres. *ApJ* **540**, 1005–1015.
- Allard, N. F., Allard, F., Hauschildt, P. H., Kielkopf, J. F., Machin, L., 2003. A new model for brown dwarf spectra including accurate unified line shape theory for the Na I and K I resonance line profiles. *A&A* **411**, L473–L476.
- Arnold, L., Gillet, S., Lardi re, O., Riaud, P., Schneider, J., 2002. A test for the search for life on extrasolar planets. Looking for the terrestrial vegetation signature in the Earthshine spectrum. *A&A* **392**, 231–237.
- Arnold, L., Schneider, J., 2004. The detectability of extrasolar planet surroundings. I. Reflected-light photometry of unresolved rings. *A&A* **420**, 1153–1162.
- Augereau, J. C., Nelson, R. P., Lagrange, A. M., Papaloizou, J. C. B., Mouillet, D., 2001. Dynamical modeling of large scale asymmetries in the beta Pictoris dust disk. *A&A* **370**, 447–455.
- B jar, V. J. S., Mart n, E. L., Zapatero Osorio, M. R., Rebolo, R., Barrado y Navascu es, D., Bailer-Jones, C. A. L., Mundt, R., Baraffe, I., Chabrier, C., Allard, F., 2001. The Substellar Mass Function in σ Orionis. *ApJ* **556**, 830–836.
- Baglin, A., Vaclair, G., The COROT Team, 2000. The Space Stellar Photometry Mission COROT : Asteroseismology and Search for Extrasolar Planets. *Journal of Astrophysics and Astronomy* **21**, 319–+.
- Baraffe, I., Chabrier, G., Allard, F., Hauschildt, P. H., 2002. Evolutionary models for low-mass stars and brown dwarfs : Uncertainties and limits at very young ages. *A&A* **382**, 563–572.
- Baraffe, I., Chabrier, G., Barman, T. S., Allard, F., Hauschildt, P. H., 2003. Evolutionary models for cool brown dwarfs and extrasolar giant planets. The case of HD 209458. *A&A* **402**, 701–712.
- Baraffe, I., Chabrier, G., Barman, T. S., Selsis, F., Allard, F., Hauschildt, P. H., 2005. Hot-Jupiters and hot-Neptunes : A common origin? *A&A* **436**, L47–L51.
- Baraffe, I., Selsis, F., Chabrier, G., Barman, T. S., Allard, F., Hauschildt, P. H., Lammer, H., 2004. The effect of evaporation on the evolution of close-in giant planets. *A&A* **419**, L13–L16.
- Barbieri, M., Marzari, F., Scholl, H., 2002. Formation of terrestrial planets in close binary systems : The case of alpha Centauri A. *A&A* **396**, 219–224.
- Barge, P., Viton, M., 2003. KH 15D : A Star Eclipsed by a Large-Scale Dusty Vortex? *ApJ* **593**, L117–L120.
- Barman, T. S., Hauschildt, P. H., Allard, F., 2001. Irradiated Planets. *ApJ* **556**, 885–895.
- Barman, T. S., Hauschildt, P. H., Schweitzer, A., Stancil, P. C., Baron, E., Allard, F., 2002. Non-LTE Effects of Na I in the Atmosphere of HD 209458b. *ApJ* **569**, L51–L54.
- Barrado y Navascu es, D., Bouvier, J., Stauffer, J. R., Lodieu, N., McCaughrean, M. J., 2002. A substellar mass function for Alpha Persei. *A&A* **395**, 813–821.
- Barrado y Navascu es, D., Stauffer, J. R., Bouvier, J., Jayawardhana, R., Cuillandre, J., 2004. The Substellar Population of the Young Cluster λ Orionis. *ApJ* **610**, 1064–1078.

- Basri, G., Mohanty, S., Allard, F., Hauschildt, P. H., Delfosse, X., Martín, E. L., Forveille, T., Goldman, B., 2000. An Effective Temperature Scale for Late-M and L Dwarfs, from Resonance Absorption Lines of Cs I and Rb I. *ApJ* **538**, 363–385.
- Baudoz, P., Rabbia, Y., Gay, J., 2000. Achromatic interfero coronagraphy I. Theoretical capabilities for ground-based observations. *A&AS* **141**, 319–329.
- Baudoz, P., Rabbia, Y., Gay, J., Burg, R., Petro, L., Bely, P., Fleury, B., Madec, P.-Y., Charbonnier, F., 2000. Achromatic interfero coronagraphy. II. Effective performance on the sky. *A&AS* **145**, 341–350.
- Beaulieu, J., Lecavelier Des Etangs, A., Terquem, C. (Eds.), 2004. *Extrasolar Planets : Today and Tomorrow*.
- Benedict, G. F., McArthur, B. E., Forveille, T., Delfosse, X., Nelan, E., Butler, R. P., Spiesman, W., Marcy, G., Goldman, B., Perrier, C., Jefferys, W. H., Mayor, M., 2002. A Mass for the Extrasolar Planet Gliese 876b Determined from Hubble Space Telescope Fine Guidance Sensor 3 Astrometry and High-Precision Radial Velocities. *ApJ* **581**, L115–L118.
- Benest, D., 2003. Planetary orbits in the elliptic restricted problem. V.. The ADS 11060 system. *A&A* **400**, 1103–1111.
- Benest, D., Gonczi, R., 2000. Stochasticity of Planetary Orbits in Double Star Systems. *Earth Moon and Planets* **81**, 7–13.
- Benest, D., Gonczi, R., 2003. Stochasticity of planetary orbits in double star systems. II. *Earth Moon and Planets* **93**, 175–190.
- Beust, H., 2003. Symplectic integration of hierarchical stellar systems. *A&A* **400**, 1129–1144.
- Beust, H., Karmann, C., Lagrange, A.-M., 2001. Falling Evaporating Bodies around Herbig stars. A theoretical study. *A&A* **366**, 945–964.
- Beust, H., Morbidelli, A., 2000. Falling Evaporating Bodies as a Clue to Outline the Structure of the β Pictoris Young Planetary System. *Icarus* **143**, 170–188.
- Beuzit, J.-L., Ségransan, D., Forveille, T., Udry, S., Delfosse, X., Mayor, M., Perrier, C., Hainaut, M.-C., Roddier, C., Roddier, F., Martín, E. L., 2004. New neighbours. III. 21 new companions to nearby dwarfs, discovered with adaptive optics. *A&A* **425**, 997–1008.
- Boccaletti, A., Chauvin, G., Lagrange, A.-M., Marchis, F., 2003. Near-IR coronagraphic imaging of the companion to HR 7672. *A&A* **410**, 283–288.
- Boccaletti, A., Riaud, P., Baudoz, P., Baudrand, J., Rouan, D., Gratadour, D., Lacombe, F., Lagrange, A.-M., 2004. The Four-Quadrant Phase Mask Coronagraph. IV. First Light at the Very Large Telescope. *PASP* **116**, 1061–1071.
- Bois, E., Kiseleva-Eggleton, L., Rambaux, N., Pilat-Lohinger, E., 2003. Conditions of Dynamical Stability for the HD 160691 Planetary System. *ApJ* **598**, 1312–1320.
- Bordé, P., Rouan, D., Léger, A., 2001. Exo-planet detection with the COROT space mission. I. A multi-transit detection criterion. *Academie des Sciences Paris Comptes Rendus Serie Physique Astrophysique* **7**, 1049–1055.
- Bordé, P., Rouan, D., Léger, A., 2003. Exoplanet detection capability of the COROT space mission. *A&A* **405**, 1137–1144.
- Borkowski, V., Labeyrie, A., Martinache, F., Peterson, D., 2005. Sensitivity of a “dispersed-speckles” piston sensor for multi-aperture interferometers and hypertelescopes. *A&A* **429**, 747–753.

- Bouchy, F., Pont, F., Melo, C., Santos, N. C., Mayor, M., Queloz, D., Udry, S., 2005. Doppler follow-up of OGLE transiting companions in the Galactic bulge. *A&A* **431**, 1105–1121.
- Bouchy, F., Pont, F., Santos, N. C., Melo, C., Mayor, M., Queloz, D., Udry, S., 2004. Two new “very hot Jupiters” among the OGLE transiting candidates. *A&A* **421**, L13–L16.
- Bouret, J.-C., Deleuil, M., Lanz, T., Roberge, A., Lecavelier des Etangs, A., Vidal-Madjar, A., 2002. A chromospheric scenario for the activity of beta Pictoris, as revealed by FUSE. *A&A* **390**, 1049–1061.
- Bouret, J.-C., Martin, C., Deleuil, M., Simon, T., Catala, C., 2003. Far UV spectroscopy of the circumstellar environment of the Herbig Be stars HD 259431 and HD 250550. *A&A* **410**, 175–188.
- Bouvier, J., Duchêne, G., Mermilliod, J.-C., Simon, T., 2001. The formation and evolution of binary systems. III. Low-mass binaries in the Praesepe cluster. *A&A* **375**, 989–998.
- Bouy, H., Brandner, W., Martín, E. L., Delfosse, X., Allard, F., Baraffe, I., Forveille, T., Demarco, R., 2004. A young binary brown dwarf in the R-CrA star formation region. *A&A* **424**, 213–226.
- Bouy, H., Brandner, W., Martín, E. L., Delfosse, X., Allard, F., Basri, G., 2003. Multiplicity of Nearby Free-Floating Ultracool Dwarfs : A Hubble Space Telescope WFPC2 Search for Companions. *AJ* **126**, 1526–1554.
- Bouy, H., Duchêne, G., Köhler, R., Brandner, W., Bouvier, J., Martín, E. L., Ghez, A., Delfosse, X., Forveille, T., Allard, F., Baraffe, I., Basri, G., Close, L., McCabe, C. E., 2004. First determination of the dynamical mass of a binary L dwarf. *A&A* **423**, 341–352.
- Brandner, W., Martín, E. L., Bouy, H., Köhler, R., Delfosse, X., Basri, G., Andersen, M., 2004. Astrometric monitoring of the binary brown dwarf DENIS-P J1228.2-1547. *A&A* **428**, 205–208.
- Brandner, W., Zinnecker, H., Alcalá, J. M., Allard, F., Covino, E., Frink, S., Köhler, R., Kunkel, M., Moneti, A., Schweitzer, A., 2000. Timescales of Disk Evolution and Planet Formation : HST, Adaptive Optics, and ISO Observations of Weak-Line and Post-T Tauri Stars. *AJ* **120**, 950–962.
- Burrows, A., Guillot, T., Hubbard, W. B., Marley, M. S., Saumon, D., Lunine, J. I., Sudarsky, D., 2000. On the Radii of Close-in Giant Planets. *ApJ* **534**, L97–L100.
- Chabrier, G., 2002. The Galactic Disk Mass Budget. II. Brown Dwarf Mass Function and Density. *ApJ* **567**, 304–313.
- Chabrier, G., 2003. Galactic Stellar and Substellar Initial Mass Function. *PASP* **115**, 763–795.
- Chabrier, G., Baraffe, I., 2000. Theory of Low-Mass Stars and Substellar Objects. *ARA&A* **38**, 337–377.
- Chabrier, G., Baraffe, I., Allard, F., Hauschildt, P., 2000a. Deuterium Burning in Substellar Objects. *ApJ* **542**, L119–L122.
- Chabrier, G., Baraffe, I., Allard, F., Hauschildt, P., 2000b. Evolutionary Models for Very Low-Mass Stars and Brown Dwarfs with Dusty Atmospheres. *ApJ* **542**, 464–472.
- Chabrier, G., Barman, T., Baraffe, I., Allard, F., Hauschildt, P. H., 2004. The Evolution of Irradiated Planets : Application to Transits. *ApJ* **603**, L53–L56.
- Chauvin, G., Lagrange, A.-M., Dumas, C., Zuckerman, B., Mouillet, D., Song, I., Beuzit, J.-L., Lowrance, P., 2004. A giant planet candidate near a young brown dwarf. Direct VLT/NACO observations using IR wavefront sensing. *A&A* **425**, L29–L32.

- Chauvin, G., Lagrange, A.-M., Lacombe, F., Dumas, C., Mouillet, D., Zuckerman, B., Gendron, E., Song, I., Beuzit, J.-L., Lowrance, P., Fusco, T., 2005. Astrometric and spectroscopic confirmation of a brown dwarf companion to GSC 08047-00232. VLT/NACO deep imaging and spectroscopic observations. *A&A* **430**, 1027–1033.
- Chauvin, G., Thomson, M., Dumas, C., Beuzit, J.-L., Lowrance, P., Fusco, T., Lagrange, A.-M., Zuckerman, B., Mouillet, D., 2003. Adaptive optics imaging survey of the Tucana-Horologium association. *A&A* **404**, 157–162.
- Chelli, A., 2000. Optimizing Doppler estimates for extrasolar planet detection. I. A specific algorithm for shifted spectra. *A&A* **358**, L59–L62.
- Cho, J. Y.-K., Menou, K., Hansen, B. M. S., Seager, S., 2003. The Changing Face of the Extrasolar Giant Planet HD 209458b. *ApJ* **587**, L117–L120.
- Comerón, F., Fernández, M., Baraffe, I., Neuhäuser, R., Kaas, A. A., 2003. New low-mass members of the Lupus 3 dark cloud : Further indications of pre-main-sequence evolution strongly affected by accretion. *A&A* **406**, 1001–1017.
- de la Fuente Marcos, C., Barge, P., 2001. The effect of long-lived vortical circulation on the dynamics of dust particles in the mid-plane of a protoplanetary disc. *MNRAS* **323**, 601–614.
- de La Fuente Marcos, C., Barge, P., de La Fuente Marcos, R., 2002. Dust Dynamics in Protoplanetary Disks : Parallel Computing with PVM. *Journal of Computational Physics* **176**, 276–294.
- Deeg, H. J., Doyle, L. R., Kozhevnikov, V. P., Blue, J. E., Martín, E. L., Schneider, J., 2000. A search for Jovian-mass planets around CM Draconis using eclipse minima timing. *A&A* **358**, L5–L8.
- Defaÿ, C., Deleuil, M., Barge, P., 2001. A Bayesian method for the detection of planetary transits. *A&A* **365**, 330–340.
- Deleuil, M., Bouret, J.-C., Lecavelier des Etangs, A., Roberge, A., Vidal-Madjar, A., André, M., Blair, W. P., Feldman, P. D., Ferlet, R., Friedman, S. D., Moos, H. W., 2001. Is β Pictoris an Active Star? *ApJ* **557**, L67–L70.
- Deleuil, M., Lecavelier des Etangs, A., Bouret, J.-C., Roberge, A., Vidal-Madjar, A., Martin, C., Feldman, P. D., Ferlet, R., 2004. Evidence for wind and accretion in the Herbig Be star from FUSE observations. *A&A* **418**, 577–591.
- Dominik, M., Albrow, M. D., Beaulieu, J.-P., Caldwell, J. A. R., DePoy, D. L., Gaudi, B. S., Gould, A., Greenhill, J., Hill, K., Kane, S., Martin, R., Menzies, J., Naber, R. M., Pel, J.-W., Pogge, R. W., Pollard, K. R., Sackett, P. D., Sahu, K. C., Vermaak, P., Watson, R., Williams, A., 2002. The PLANET microlensing follow-up network : results and prospects for the detection of extra-solar planets. *Planet. Space Sci.* **50**, 299–307.
- Farrell, W. M., Lazio, T. J. W., Zarka, P., Bastian, T. J., Desch, M. D., Ryabov, B. P., 2004. The radio search for extrasolar planets with lofar. *Planet. Space Sci.* **52**, 1469–1478.
- Ferguson, J. W., Alexander, D. R., Allard, F., Barman, T., Bodnarik, J. G., Hauschildt, P. H., Heffner-Wong, A., Tamanai, A., 2005. Low-Temperature Opacities. *ApJ* **623**, 585–596.
- Forveille, T., Ségransan, D., Delorme, P., Martín, E. L., Delfosse, X., Acosta-Pulido, J. A., Beuzit, J.-L., Manchado, A., Mayor, M., Perrier, C., Udry, S., 2004. An L0 dwarf companion in the brown dwarf desert, at 30 AU. *A&A* **427**, L1–L4.
- Fromang, S., Terquem, C., Balbus, S. A., 2002. The ionization fraction in α models of protoplanetary discs. *MNRAS* **329**, 18–28.

- Fromang, S., Terquem, C., Nelson, R. P., 2005. Numerical simulations of type i planetary migration in non-turbulent magnetized discs. *MNRAS* **363**, 943–953.
- Gaudi, B. S., Albrow, M. D., An, J., Beaulieu, J.-P., Caldwell, J. A. R., DePoy, D. L., Dominik, M., Gould, A., Greenhill, J., Hill, K., Kane, S., Martin, R., Menzies, J., Naber, R. M., Pel, J.-W., Pogge, R. W., Pollard, K. R., Sackett, P. D., Sahu, K. C., Vermaak, P., Vreeswijk, P. M., Watson, R., Williams, A., 2002. Microlensing Constraints on the Frequency of Jupiter-Mass Companions : Analysis of 5 Years of PLANET Photometry. *ApJ* **566**, 463–499.
- Gillet, S., Riaud, P., Lardièrre, O., Dejonghe, J., Schmitt, J., Arnold, L., Boccaletti, A., Horville, D., Labeyrie, A., 2003. Imaging capabilities of hypertelescopes with a pair of micro-lens arrays. *A&A* **400**, 393–396.
- Goździewski, K., Bois, E., Maciejewski, A. J., 2002. Global dynamics of the Gliese 876 planetary system. *MNRAS* **332**, 839–855.
- Goździewski, K., Bois, E., Maciejewski, A. J., Kiseleva-Eggleton, L., 2001. Global dynamics of planetary systems with the MEGNO criterion. *A&A* **378**, 569–586.
- Gomes, R. S., Morbidelli, A., Levison, H. F., 2004. Planetary migration in a planetesimal disk : why did Neptune stop at 30 AU? *Icarus* **170**, 492–507.
- Goukenleuque, C., Bézard, B., Joguet, B., Lellouch, E., Freedman, R., 2000. A Radiative Equilibrium Model of 51 Peg b. *Icarus* **143**, 308–323.
- Griessmeier, J.-M., Stadelmann, A., Penz, T., Lammer, H., Selsis, F., Ribas, I., Guinan, E. F., Mutschmann, U., Biernat, H. K., Weiss, W. W., 2004. The effect of tidal locking on the magnetospheric and atmospheric evolution of “Hot Jupiters”. *A&A* **425**, 753–762.
- Guillot, T., 2004. Probing the Giant Planets. *Physics Today* **57**, 63–70.
- Guillot, T., 2005. The interiors of giant planets : Models and outstanding questions.
- Guillot, T., Showman, A. P., 2002. Evolution of “51 Pegasus b-like” planets. *A&A* **385**, 156–165.
- Guis, V., Barge, P., 2005. An Image-Processing Method to Detect Planetary Transits : The “Gauging” Filter. *PASP* **117**, 160–172.
- Gustin, J., Feldman, P. D., Gérard, J.-C., Grodent, D., Vidal-Madjar, A., Ben Jaffel, L., Desert, J.-M., Moos, H. W., Sahnou, D. J., Weaver, H. A., Wolven, B. C., Ajello, J. M., Waite, J. H., Roueff, E., Abgrall, H., 2004. Jovian auroral spectroscopy with FUSE : analysis of self-absorption and implications for electron precipitation. *Icarus* **171**, 336–355.
- Halbwachs, J. L., Arenou, F., Mayor, M., Udry, S., Queloz, D., 2000. Exploring the brown dwarf desert with Hipparcos. *A&A* **355**, 581–594.
- Halbwachs, J. L., Mayor, M., Udry, S., 2005. Statistical properties of exoplanets. IV. The period-eccentricity relations of exoplanets and of binary stars. *A&A* **431**, 1129–1137.
- Hueso, R., Guillot, T., 2003. Evolution of the Protosolar Nebula and Formation of the Giant Planets. *Space Science Reviews* **106**, 105–120.
- Inaba, S., Barge, P., Daniel, E., Guillard, H., 2005. A two-phase code for protoplanetary disks. *A&A* **431**, 365–379.
- Iro, N., Bézard, B., Guillot, T., 2004. A Time-dependant atmospheric model of HD209458b. *AAS/Division for Planetary Sciences Meeting Abstracts* **36**, +.

- Karmann, C., Beust, H., Klinger, J., 2001. The physico-chemical history of Falling Evaporating Bodies around beta Pictoris : investigating the presence of volatiles. *A&A* **372**, 616–626.
- Karmann, C., Beust, H., Klinger, J., 2003. The physico-chemical history of Falling Evaporating Bodies around beta Pictoris : The sublimation of refractory material. *A&A* **409**, 347–359.
- Kendall, T. R., Bouvier, J., Moraux, E., James, D. J., Ménard, F., 2005. A deep, wide-field search for substellar members in NGC 2264. *A&A* **434**, 939–948.
- Kendall, T. R., Delfosse, X., Martín, E. L., Forveille, T., 2004. Discovery of very nearby ultracool dwarfs from DENIS. *A&A* **416**, L17–L20.
- Kiseleva-Eggleton, L., Bois, E., 2001. Effects of Perturbing Forces on the Orbital Stability of Planetary Systems. *ApJ* **553**, L73–L76.
- Kiseleva-Eggleton, L., Bois, E., Rambaux, N., Dvorak, R., 2002. Global Dynamics and Stability Limits for Planetary Systems around HD 12661, HD 38529, HD 37124, and HD 160691. *ApJ* **578**, L145–L148.
- Klotz, A., Caux, E., Monin, J.-L., Lodieu, N., 2004. Substellar objects in star formation regions : A deep near infrared study in the Serpens cloud. *A&A* **425**, 927–936.
- Kroupa, P., Bouvier, J., 2003. On the origin of brown dwarfs and free-floating planetary-mass objects. *MNRAS* **346**, 369–380.
- Kroupa, P., Bouvier, J., Duchêne, G., Moraux, E., 2003. On the universal outcome of star formation : is there a link between stars and brown dwarfs ? *MNRAS* **346**, 354–368.
- Léger, A., Selsis, F., Sotin, C., Guillot, T., Despois, D., Mawet, D., Ollivier, M., Labèque, A., Valette, C., Brachet, F., Chazelas, B., Lammer, H., 2004. A new family of planets ? “Ocean-Planets”. *Icarus* **169**, 499–504.
- Lagrange, A.-M., Backman, D. E., Artymowicz, P., 2000. Planetary Material around Main-Sequence Stars. *Protostars and Planets IV*, 639–+.
- Lagrange, A.-M., Chauvin, G., Rouan, D., Gendron, E., Beuzit, J.-L., Lacombe, F., Rousset, G., Dougados, C., Fusco, T., Mouillet, D., Conan, J.-M., Stadler, E., Deleglise, J., Perrier, C., 2004. The environment of the very red object Orion n. A possible low mass companion ? *A&A* **417**, L11–L14.
- Lammer, H., Selsis, F., Ribas, I., Guinan, E. F., Bauer, S. J., Weiss, W. W., 2003. Atmospheric Loss of Exoplanets Resulting from Stellar X-Ray and Extreme-Ultraviolet Heating. *ApJ* **598**, L121–L124.
- Lanza, A. F., Rodonò, M., Pagano, I., Barge, P., Llebaria, A., 2003. Modelling the rotational modulation of the Sun as a star. *A&A* **403**, 1135–1149.
- Le Coroller, H., Dejonghe, J., Arpesella, C., Vernet, D., Labeyrie, A., 2004. Tests with a carlina-type hypertelescope prototype. i. demonstration of star tracking and fringe acquisition with a balloon-suspended focal camera. *A&A* **426**, 721–728.
- Lecavelier des Etangs, A., Deleuil, M., Vidal-Madjar, A., Roberge, A., Le Petit, F., Hébrard, G., Ferlet, R., Feldman, P. D., Désert, J.-M., Bouret, J.-C., 2003. FUSE observations of H₂ around the Herbig AeBe stars HD 100546 and HD 163296. *A&A* **407**, 935–939.
- Lecavelier Des Etangs, A., Nitschelm, C., Olsen, E. H., Vidal-Madjar, A., Ferlet, R., 2005. A photometric survey of stars with circumstellar material. *A&A* **439**, 571–574.
- Lecavelier des Etangs, A., Vidal-Madjar, A., McConnell, J. C., Hébrard, G., 2004. Atmospheric escape from hot Jupiters. *A&A* **418**, L1–L4.

- Lecavelier des Etangs, A., Vidal-Madjar, A., Roberge, A., Feldman, P. D., Deleuil, M., André, M., Blair, W. P., Bouret, J.-C., Désert, J.-M., Ferlet, R., Friedman, S., Hébrard, G., Lemoine, M., Moos, H. W., 2001. Deficiency of molecular hydrogen in the disk of β Pictoris. *Nature* **412**, 706–708.
- Leggett, S. K., Allard, F., Geballe, T. R., Hauschildt, P. H., Schweitzer, A., 2001. Infrared Spectra and Spectral Energy Distributions of Late M and L Dwarfs. *ApJ* **548**, 908–918.
- Leggett, S. K., Hauschildt, P. H., Allard, F., Geballe, T. R., Baron, E., 2002. Atmospheric analysis of the M/L and M/T dwarf binary systems LHS 102 and Gliese 229. *MNRAS* **332**, 78–90.
- Leigh, C., Cameron, A. C., Guillot, T., 2003. Prospects for spectroscopic reflected-light planet searches. *MNRAS* **346**, 890–896.
- Leinert, C., Allard, F., Richichi, A., Hauschildt, P. H., 2000. The multiple system LHS 1070 : a case study for the onset of dust formation in the atmospheres of very low mass stars. *A&A* **353**, 691–706.
- Levison, H. F., Morbidelli, A., 2003. The formation of the Kuiper belt by the outward transport of bodies during Neptune’s migration. *Nature* **426**, 419–421.
- Lodieu, N., Caux, E., Monin, J.-L., Klotz, A., 2002. Discovery of the first young brown dwarf in the Serpens cluster. *A&A* **383**, L15–L18.
- Lopez, B., Schneider, J., Danchi, W. C., 2005. Can Life Develop in the Expanded Habitable Zones around Red Giant Stars? *ApJ* **627**, 974–985.
- Lucas, P. W., Roche, P. F., Allard, F., Hauschildt, P. H., 2001. Infrared spectroscopy of substellar objects in Orion. *MNRAS* **326**, 695–721.
- Ludwig, H.-G., Allard, F., Hauschildt, P. H., 2002. Numerical simulations of surface convection in a late M-dwarf. *A&A* **395**, 99–115.
- Luhman, K. L., Stauffer, J. R., Muench, A. A., Rieke, G. H., Lada, E. A., Bouvier, J., Lada, C. J., 2003. A Census of the Young Cluster IC 348. *ApJ* **593**, 1093–1115.
- Ménard, F., Delfosse, X., Monin, J.-L., 2002. Optical linear polarimetry of ultra cool dwarfs. *A&A* **396**, L35–L38.
- Martin, C., Bouret, J.-C., Deleuil, M., Simon, T., Catala, C., 2004. Far Ultraviolet Spectroscopy of HD 76534. *A&A* **416**, L5–L8.
- Martín, E. L., Barrado y Navascués, D., Baraffe, I., Bouy, H., Dahm, S., 2003. A Hubble Space Telescope Wide Field Planetary Camera 2 Survey for Brown Dwarf Binaries in the α Persei and Pleiades Open Clusters. *ApJ* **594**, 525–532.
- Martín, E. L., Brandner, W., Bouvier, J., Luhman, K. L., Stauffer, J., Basri, G., Zapatero Osorio, M. R., Barrado y Navascués, D., 2000. Membership and Multiplicity among Very Low Mass Stars and Brown Dwarfs in the Pleiades Cluster. *ApJ* **543**, 299–312.
- Martín, E. L., Delfosse, X., Guieu, S., 2004. Spectroscopic Identification of DENIS-selected Brown Dwarf Candidates in the Upper Scorpius OB Association. *AJ* **127**, 449–454.
- Martín, E. L., Dougados, C., Magnier, E., Ménard, F., Magazzù, A., Cuillandre, J.-C., Delfosse, X., 2001. Four Brown Dwarfs in the Taurus Star-Forming Region. *ApJ* **561**, L195–L198.
- Marzari, F., Scholl, H., 2000. Planetesimal Accretion in Binary Star Systems. *ApJ* **543**, 328–339.
- Masciadri, E., Brandner, W., Bouy, H., Lenzen, R., Lagrange, A. M., Lacombe, F., 2003. First NACO observations of the Brown Dwarf LHS 2397aB. *A&A* **411**, 157–160.

- Mazeh, T., Naef, D., Torres, G., Latham, D. W., Mayor, M., Beuzit, J., Brown, T. M., Buchhave, L., Burnet, M., Carney, B. W., Charbonneau, D., Drukier, G. A., Laird, J. B., Pepe, F., Perrier, C., Queloz, D., Santos, N. C., Sivan, J., Udry, S., Zucker, S., 2000. The Spectroscopic Orbit of the Planetary Companion Transiting HD 209458. *ApJ* **532**, L55–L58.
- Menou, K., Cho, J. Y.-K., Seager, S., Hansen, B. M. S., 2003. “Weather” Variability of Close-in Extrasolar Giant Planets. *ApJ* **587**, L113–L116.
- Menou, K., Goodman, J., 2004. Low-Mass Protoplanet Migration in T Tauri α -Disks. *ApJ* **606**, 520–531.
- Mohanty, S., Basri, G., Jayawardhana, R., Allard, F., Hauschildt, P., Ardila, D., 2004. Measuring Fundamental Parameters of Substellar Objects. I. Surface Gravities. *ApJ* **609**, 854–884.
- Mohanty, S., Basri, G., Shu, F., Allard, F., Chabrier, G., 2002. Activity in Very Cool Stars : Magnetic Dissipation in Late M and L Dwarf Atmospheres. *ApJ* **571**, 469–486.
- Moraux, E., Bouvier, J., Stauffer, J. R., 2001. Proper motion of very low mass stars and brown dwarfs in the Pleiades cluster. *A&A* **367**, 211–217.
- Moraux, E., Bouvier, J., Stauffer, J. R., Cuillandre, J.-C., 2003. Brown dwarfs in the Pleiades cluster : Clues to the substellar mass function. *A&A* **400**, 891–902.
- Moraux, E., Kroupa, P., Bouvier, J., 2004. The Pleiades mass function : Models versus observations. *A&A* **426**, 75–80.
- Morbidelli, A., Levison, H. F., 2004. Scenarios for the Origin of the Orbits of the Trans-Neptunian Objects 2000 CR₁₀₅ and 2003 VB₁₂ (Sedna). *AJ* **128**, 2564–2576.
- Moutou, C., Coustenis, A., Schneider, J., Queloz, D., Mayor, M., 2003. Searching for helium in the exosphere of HD 209458b. *A&A* **405**, 341–348.
- Moutou, C., Coustenis, A., Schneider, J., St Gilles, R., Mayor, M., Queloz, D., Kaufer, A., 2001. Search for spectroscopical signatures of transiting HD 209458b’s exosphere. *A&A* **371**, 260–266.
- Moutou, C., Pont, F., Bouchy, F., Mayor, M., 2004. Accurate radius and mass of the transiting exoplanet OGLE-TR-132b. *A&A* **424**, L31–L34.
- Naef, D., Latham, D. W., Mayor, M., Mazeh, T., Beuzit, J. L., Drukier, G. A., Perrier-Bellet, C., Queloz, D., Sivan, J. P., Torres, G., Udry, S., Zucker, S., 2001. HD 80606 b, a planet on an extremely elongated orbit. *A&A* **375**, L27–L30.
- Naef, D., Mayor, M., Beuzit, J. L., Perrier, C., Queloz, D., Sivan, J. P., Udry, S., 2004. The ELODIE survey for northern extra-solar planets. III. Three planetary candidates detected with ELODIE. *A&A* **414**, 351–359.
- Naef, D., Mayor, M., Korzennik, S. G., Queloz, D., Udry, S., Nisenson, P., Noyes, R. W., Brown, T. M., Beuzit, J. L., Perrier, C., Sivan, J. P., 2003. The ELODIE survey for northern extra-solar planets. II. A Jovian planet on a long-period orbit around GJ 777 A. *A&A* **410**, 1051–1054.
- Nottale, L., Schumacher, G., Lefèvre, E. T., 2000. Scale-relativity and quantization of exoplanet orbital semi-major axes. *A&A* **361**, 379–387.
- Palla, F., Baraffe, I., 2005. Pulsating young brown dwarfs. *A&A* **432**, L57–L60.
- Papaloizou, J. C. B., Terquem, C., 2001. Dynamical relaxation and massive extrasolar planets. *MNRAS* **325**, 221–230.

- Pepe, F., Mayor, M., Galland, F., Naef, D., Queloz, D., Santos, N. C., Udry, S., Burnet, M., 2002. The CORALIE survey for southern extra-solar planets VII. Two short-period Saturnian companions to $\text{jASTROBJ}_i\text{HD 108147}_i/\text{ASTROBJ}_i$ and $\text{jASTROBJ}_i\text{HD 168746}_i/\text{ASTROBJ}_i$. *A&A* **388**, 632–638.
- Pepe, F., Mayor, M., Queloz, D., Benz, W., Bonfils, X., Bouchy, F., Curto, G. L., Lovis, C., Mégevand, D., Moutou, C., Naef, D., Rupprecht, G., Santos, N. C., Sivan, J.-P., Sosnowska, D., Udry, S., 2004. The HARPS search for southern extra-solar planets. I. HD 330075 b : A new “hot Jupiter”. *A&A* **423**, 385–389.
- Perrier, C., Sivan, J.-P., Naef, D., Beuzit, J. L., Mayor, M., Queloz, D., Udry, S., 2003. The ELODIE survey for northern extra-solar planets. I. Six new extra-solar planet candidates. *A&A* **410**, 1039–1049.
- Perryman, M. A. C., de Boer, K. S., Gilmore, G., Høg, E., Lattanzi, M. G., Lindgren, L., Luri, X., Mignard, F., Pace, O., de Zeeuw, P. T., 2001. GAIA : Composition, formation and evolution of the Galaxy. *A&A* **369**, 339–363.
- Pont, F., Bouchy, F., Queloz, D., Santos, N. C., Melo, C., Mayor, M., Udry, S., 2004. The “missing link” : A 4-day period transiting exoplanet around OGLE-TR-111. *A&A* **426**, L15–L18.
- Pont, F., Melo, C. H. F., Bouchy, F., Udry, S., Queloz, D., Mayor, M., Santos, N. C., 2005. A planet-sized transiting star around OGLE-TR-122. Accurate mass and radius near the hydrogen-burning limit. *A&A* **433**, L21–L24.
- Prato, L., Ghez, A. M., Piña, R. K., Telesco, C. M., Fisher, R. S., Wizinowich, P., Lai, O., Acton, D. S., Stomski, P., 2001. Keck Diffraction-limited Imaging of the Young Quadruple Star System HD 98800. *ApJ* **549**, 590–598.
- Queloz, D., Eggenberger, A., Mayor, M., Perrier, C., Beuzit, J. L., Naef, D., Sivan, J. P., Udry, S., 2000. Detection of a spectroscopic transit by the planet orbiting the star HD209458. *A&A* **359**, L13–L17.
- Queloz, D., Henry, G. W., Sivan, J. P., Baliunas, S. L., Beuzit, J. L., Donahue, R. A., Mayor, M., Naef, D., Perrier, C., Udry, S., 2001. No planet for HD 166435. *A&A* **379**, 279–287.
- Rauer, H., Bockelée-Morvan, D., Coustenis, A., Guillot, T., Schneider, J., 2000. Search for an exosphere around 51 Pegasi B with ISO. *A&A* **355**, 573–580.
- Riaud, P., Boccaletti, A., Gillet, S., Schneider, J., Labeyrie, A., Arnold, L., Baudrand, J., Lardiè, O., Dejonghe, J., Borkowski, V., 2002a. Coronagraphic search for exo-planets with a hypertelescope. i. in the thermal ir. *A&A* **396**, 345–352.
- Riaud, P., Boccaletti, A., Gillet, S., Schneider, J., Labeyrie, A., Arnold, L., Baudrand, J., Lardiè, O., Dejonghe, J., Borkowski, V., 2002b. Coronagraphic search for exo-planets with a hypertelescope. I. In the thermal IR. *A&A* **396**, 345–352.
- Riaud, P., Boccaletti, A., Rouan, D., Lemarquis, F., Labeyrie, A., 2001. The four-quadrant phase-mask coronagraph. ii. simulations. *PASP* **113**, 1145–1154.
- Roberge, A., Feldman, P. D., Lecavelier des Etangs, A., Vidal-Madjar, A., Deleuil, M., Bouret, J.-C., Ferlet, R., Moos, H. W., 2002. Far Ultraviolet Spectroscopic Explorer Observations of Possible Infalling Planetesimals in the 51 Ophiuchi Circumstellar Disk. *ApJ* **568**, 343–351.
- Roberge, A., Lecavelier des Etangs, A., Grady, C. A., Vidal-Madjar, A., Bouret, J.-C., Feldman, P. D., Deleuil, M., Andre, M., Boggess, A., Bruhweiler, F. C., Ferlet, R., Woodgate, B., 2001. FUSE and Hubble Space Telescope/STIS Observations of Hot and Cold Gas in the AB Aurigae System. *ApJ* **551**, L97–L100.
- Rouan, D., Baglin, A., Copet, E., Schneider, J., Barge, P., Deleuil, M., Vuillemin, A., Léger, A., 2000. The Exosolar Planets Program of the COROT satellite. *Earth Moon and Planets* **81**, 79–82.

- Ryabov, V. B., Zarka, P., Ryabov, B. P., 2004. Search of exoplanetary radio signals in the presence of strong interference : enhancing sensitivity by data accumulation. *Planet. Space Sci.* **52**, 1479–1491.
- Ségransan, D., Kervella, P., Forveille, T., Queloz, D., 2003. First radius measurements of very low mass stars with the VLTI. *A&A* **397**, L5–L8.
- Santos, N. C., Bouchy, F., Mayor, M., Pepe, F., Queloz, D., Udry, S., Lovis, C., Bazot, M., Benz, W., Bertaux, J.-L., Lo Curto, G., Delfosse, X., Mordasini, C., Naef, D., Sivan, J.-P., Vauclair, S., 2004. The HARPS survey for southern extra-solar planets. II. A 14 Earth-masses exoplanet around μ Arae. *A&A* **426**, L19–L23.
- Schneider, J., 2002. New worlds outside the Solar System. *European Review* **10**, 185–204.
- Schneider, J., Cabrera, J., 2006. Can stellar wobble in triple systems mimic a planet? *A&A* **445**, 1159–1163.
- Schweitzer, A., Gizis, J. E., Hauschildt, P. H., Allard, F., Howard, E. M., Kirkpatrick, J. D., 2002. Effective Temperatures of Late L Dwarfs and the Onset of Methane Signatures. *ApJ* **566**, 435–441.
- Schweitzer, A., Gizis, J. E., Hauschildt, P. H., Allard, F., Reid, I. N., 2001. Analysis of Keck HIRES Spectra of Early L-Type Dwarfs. *ApJ* **555**, 368–379.
- Selsis, F., Despois, D., Parisot, J.-P., 2002. Signature of life on exoplanets : Can Darwin produce false positive detections? *A&A* **388**, 985–1003.
- Showman, A. P., Guillot, T., 2002. Atmospheric circulation and tides of “51 Pegasus b-like” planets. *A&A* **385**, 166–180.
- Soummer, R., Aime, C., Falloon, P. E., 2003. Stellar coronagraphy with prolate apodized circular apertures. *A&A* **397**, 1161–1172.
- Soummer, R., Dohlen, K., Aime, C., 2003. Achromatic dual-zone phase mask stellar coronagraph. *A&A* **403**, 369–381.
- Tanga, P., Michel, P., Richardson, D. C., 2002. Planetesimal clusters in a Keplerian disk. I. gravitational evolution. *A&A* **395**, 613–623.
- Tanga, P., Weidenschilling, S. J., Michel, P., Richardson, D. C., 2004. Gravitational instability and clustering in a disk of planetesimals. *A&A* **427**, 1105–1115.
- Terquem, C., Papaloizou, J. C. B., 2002. Dynamical relaxation and the orbits of low-mass extrasolar planets. *MNRAS* **332**, L39–L43.
- Terquem, C. E. J. M. L. J., 2003. Stopping inward planetary migration by a toroidal magnetic field. *MNRAS* **341**, 1157–1173.
- Thébaud, P., Augereau, J. C., Beust, H., 2003. Dust production from collisions in extrasolar planetary systems. The inner beta Pictoris disc. *A&A* **408**, 775–788.
- Thébaud, P., Beust, H., 2001. Falling evaporating bodies in the β Pictoris system. Resonance refilling and long term duration of the phenomenon. *A&A* **376**, 621–640.
- Thébaud, P., Marzari, F., Scholl, H., 2002. Terrestrial planet formation in exoplanetary systems with a giant planet on an external orbit. *A&A* **384**, 594–602.
- Thébaud, P., Marzari, F., Scholl, H., Turrini, D., Barbieri, M., 2004. Planetary formation in the γ Cephei system. *A&A* **427**, 1097–1104.

- Vakili, F., Aristidi, E., Abe, L., Lopez, B., 2004. Interferometric Remapped Array Nulling. *A&A* **421**, 147–156.
- van Boekel, R., Min, M., Leinert, C., Waters, L. B. F. M., Richichi, A., Chesneau, O., Dominik, C., Jaffe, W., Dutrey, A., Graser, U., Henning, T., de Jong, J., Köhler, R., de Koter, A., Lopez, B., Malbet, F., Morel, S., Paresce, F., Perrin, G., Preibisch, T., Przygodda, F., Schöller, M., Wittkowski, M., 2004. The building blocks of planets within the ‘terrestrial’ region of protoplanetary disks. *Nature* **432**, 479–482.
- Vidal-Madjar, A., Désert, J.-M., Lecavelier des Etangs, A., Hébrard, G., Ballester, G. E., Ehrenreich, D., Ferlet, R., McConnell, J. C., Mayor, M., Parkinson, C. D., 2004. Detection of Oxygen and Carbon in the Hydrodynamically Escaping Atmosphere of the Extrasolar Planet HD 209458b. *ApJ* **604**, L69–L72.
- Vidal-Madjar, A., Lecavelier des Etangs, A., Désert, J.-M., Ballester, G. E., Ferlet, R., Hébrard, G., Mayor, M., 2003. An extended upper atmosphere around the extrasolar planet HD209458b. *Nature* **422**, 143–146.
- Wizinowich, P., Acton, D. S., Shelton, C., Stomski, P., Gathright, J., Ho, K., Lupton, W., Tsubota, K., Lai, O., Max, C., Brase, J., An, J., Avicola, K., Olivier, S., Gavel, D., Macintosh, B., Ghez, A., Larkin, J., 2000. First Light Adaptive Optics Images from the Keck II Telescope : A New Era of High Angular Resolution Imagery. *PASP* **112**, 315–319.
- Wolf, S., Gueth, F., Henning, T., Kley, W., 2002. Detecting Planets in Protoplanetary Disks : A Prospective Study. *ApJ* **566**, L97–L99.
- Wuchterl, G., Guillot, T., Lissauer, J. J., 2000. Giant Planet Formation. *Protostars and Planets IV*, 1081–+.
- Zarka, P., Treumann, R. A., Ryabov, B. P., Ryabov, j. . *Ap&SS*. y. . . v. . . p. . . , V. B. title = Magnetically-Driven Planetary Radio Emissions and Application to Extrasolar Planets.
- Zucker, S., Naef, D., Latham, D. W., Mayor, M., Mazeh, T., Beuzit, J. L., Drukier, G., Perrier-Bellet, C., Queloz, D., Sivan, J. P., Torres, G., Udry, S., 2002. A Planet Candidate in the Stellar Triple System HD 178911. *ApJ* **568**, 363–368.

Chapitre 8

Annexe B : Liste des thématiques exoplanètes et chercheurs classés par instituts

ANNEXE B :

Thématiques exoplanètes et chercheurs classés par instituts

Légende:

[Etudes théoriques & observationnelles]

[Etudes instrumentales]

[Grands projets]

[Autres projets]

(Les projets pour lesquels une contribution majeure est apportée par l'institut sont indiqués en gras)

[Les thèses soutenues ou à soutenir en 2000 ou après]

(Les noms indiqués entre parenthèses sont, sauf exception, ceux de chercheurs en poste, travaillant directement sur le sujet mentionné)

La liste ci-dessous est indicative de la recherche sur les exoplanètes en France. Ses limites sont arbitraires et subjectives, et elle n'est certainement pas exhaustive dans un domaine en pleine évolution.

CEA Saclay

Turbulence & formation des systèmes planétaires (Dubrulle)

Formation planétaire : modèles hydrodynamiques numériques (Masset)

Participation à Gaïa (à confirmer)

MIRI : PI : Lagage

CFHT

Objets de faible masse et exoplanètes (Forveille)

WIRCAM (Forveille)

LISE (Laboratoire d'interférométrie Stellaire et Exo-planétaire) (Collège de France)

Interférométrie pour détection d'exoplanètes -hypertélescopes (Labeyrie, Le Coroller)

CARLINA (Le Coroller, Labeyrie), OVLA (Labeyrie), VIDA-VLTI Imaging with a Densified Array- (Labeyrie)

Thèses :

O. Lardière : « Contrôle des télescopes automatiques _et des grands interféromètres stellaires terrestres et spatiaux : _cas du télescope prototype OVLA _à monture sphérique et optique active » (1997-2000)

V. Borkowski : « Analyse d'ondes pour ouvertures diluées par des tavelures dispersées » (2000-2003)

F. Martinache : « Reconfiguration de pupille pour la haute résolution angulaire » (2002-2005)

E. Pedretti « Techniques de mise en phase pour les interféromètres à ouvertures multiples » (2000-2003)

CRAL Lyon

Modélisation des atmosphères, spectres, et couleurs des étoiles, naines brunes, planètes géantes et planètes telluriques extrasolaires. (F. Allard)

Étude de l'évolution de l'atmosphère terrestre, de la photochimie en haute atmosphère, des biomarqueurs dans les planètes telluriques extrasolaires, et de la zone habitable autour d'autres étoiles. (F. Selsis)

Modélisation des intérieurs et de son évolution pour les étoiles de faible masse, naines brunes et planètes géantes extrasolaires. (I. Baraffe, G. Chabrier)

Effets de la perte de masse sur l'évolution des Jupiters Chauds. (I. Baraffe, F. Selsis, etc.)

Accrétion lors des stades primitifs de l'évolution des naines brunes (I. Baraffe, G. Chabrier)

Distribution de la poussière et formation planétaire par SPH dans les disques proto-planétaires (J.-F. Gonzales)

PEGASE/VLT-PF (Allard), DARWIN (Selsis)

Thèses :

- J. Paillet (F. Allard/F. Selsis) « Modèles d'atmosphères et propriétés spectrales des planètes telluriques extrasolaires. » (octobre 2003-)
- J. Gallardo (G. Chabrier/I. Baraffe) « Effets de l'accrétion sur l'évolution des naines brunes et planètes géantes extrasolaires. » (octobre 2003-)
- L. Barrière (J.-F. Gonzales) « Distribution des grains de poussière dans les disques proto-planétaires » (oct 2001-juin 2005)

IAP

Recherche planètes extrasolaires par microlentilles (Beaulieu, Coutures, Marquette)

Recherche planètes extrasolaires par transit (Beaulieu, Lecavelier, Hébrard, Marquette)

Evaporation des atmosphères de planètes géantes (Vidal-Madjar, Lecavelier, Ferlet, Hébrard)

Disque de débris (Vidal-Madjar, Lecavelier, Ferlet)

Etude de la magnétosphère des planètes géantes et application aux exoplanètes (Ben-Jaffel)

Formation planétaire (Terquem, Balbus)

Dynamique planétaire, migration (Terquem, Balbus)

INSPIRE (PI en France : Ben-Jaffel)

FUSE (PI en France : Vidal-Madjar)

PLANET (PI : Beaulieu)

EXOMAG (PI : Ben-Jaffel)

GAIA, Antartic Earth Finder (Dome C)

SOPHIE et HARPS (suivi de transit), HST (évaporation, disques de débris)

Thèses :

A. Cassan (Beaulieu) : « PLANET : recherche de planètes extrasolaires par microlentille » (oct. 2002, Sept 2005)

D. Ehrenreich (Lecavelier) : « Atmosphères des planètes extra solaires » (oct. 2004-)

S. Fromang (Terquem) : « Instabilités MHD dans les disques » (oct. 2001- Juin 2004)

IAS

- Structure & physico-chimie des planètes extrasolaires telluriques - « planètes océans » Atmosphères des planètes telluriques et signatures spectroscopiques de leur composition, critères d'habitabilité (A.Léger, M.Ollivier)
- Recherche et caractérisation des transits dans les courbes de lumière de COROT, caractérisation et correction des contaminations astrophysiques et instrumentales, contribution à la définition de la stratégie observationnelle (M.Ollivier, A.Léger)
- Exobiologie (A.Léger, M.Ollivier, A.Labèque)
- Paradoxe de Fermi (A.Léger, A.Labèque)
- Dynamique planétaire (F.Poulet)

- Etude et validation en laboratoire du concept d'interférométrie en frange noire pour la mission DARWIN, développement de composants optiques spécifiques (déphaseurs, recombineurs, filtres modaux...achromatiques : A.Léger, M.Ollivier, A.Labèque, C.Valette)

- Contribution à la définition, la conception, la fabrication et l'étalonnage de la caméra de **COROT** (M.Ollivier, M.Décaudin, A.Léger)
- **DARWIN** : Validation en laboratoire, études théoriques : (A.Léger, M.Ollivier, A.Labèque)
- vers DARWIN : études de précurseurs sol et espace : GENIE, **PEGASE** (M.Ollivier, A.Léger)

Thèses à soutenir :

Frank Brachet (Léger) : Etudes de déphaseurs achromatiques pour l'interférométrie en frange noire ; soutenance prévue à l'automne 2005

Bruno Chazelas (Léger) : Mission DARWIN : étude et réalisation d'un interféromètre cryogénique en frange noire dans l'infrarouge thermique pour le test de déphaseurs achromatiques ; soutenance prévue à l'automne 2006

Institut Pierre Simon Laplace (SA + LMB)

Habitabilité des planètes extrasolaires (Forget)

Instrumentation vitesses radiales (Connes, Bertaux)

IMCCE (ex BdL)

Dynamique des systèmes extrasolaires (Laskar)

Thèses :

Jocelyn Couedic (Laskar) : « dynamique orbitale des systèmes extrasolaires »

IRAM

Interférométrie millimétrique (Gueth, Lazareff, Lucas, Pety, Schuster)

ALMA (Gueth, Lazareff, Lucas, Pety, Schuster)

L3AB

Formation planétaire (Dutrey, Guilloteau, Piétu, Despois)
Structure Interne et Evolution des (Exo)-Planètes (Despois)

Astrométrie (Daigne)

PRIMA (Daigne)

MIDI (Dutrey)

Corot/Darwin (Despois)

Thèses :

2002 : F.Selsis (Parisot / Despois) : « Modele d'évolution physico-chimique des atmosphères de planètes telluriques. Application à l'atmosphère primitive terrestre et aux planètes extrasolaires » (1999 - 2002)

2004 : V.Piétu (Dutrey LAOG/L3AB) : « Physico-Chimie des disques proto-planétaires : apport de l'interférométrie millimétrique » (oct.2001- dec.2004)

Encadrement de stages élèves ingénieurs (Daigne /L3AB) :

– imagerie à très haute dynamique /coronographie

– transfert de pupille dans les bras d'un interféromètre optique, en vue de l'astrométrie différentielle.

LAOG

Formation planétaire dans les disques (Augereau, Berger, Beust, Duchêne, Lagrange, Malbet, Ménard, Monin)

Objets jeunes de faible masse, naines brunes jeunes (Bouvier, Dougados, Lagrange, Monin)

Objets de faible masse et exoplanètes (Beuzit, Delfosse, Lagrange, Perrier)

Interférométrie optique multitélescopes (Berger, Chelli, Duvert, Kern, Malbet, Swain)

Optique adaptative et haut contraste (Beuzit, Chelli, Kern, Perrier)

Vitesses radiales (Chelli, Perrier)

NAOS (PS: Lagrange, Kern, Perrier, Ménard), AMBER (PS: Malbet, Chelli, Duvert, Perraut), WIRCAM (Stadler/Charton, Bouvier), VLT-PF (PI: Beuzit, Lagrange, Ménard, Augereau).

PEGASE (Malbet), DARWIN (Malbet, Kern), API (Swain)

Thèses :

• D. Segransan (C. Perrier/T. Forveille) « Etude de la fonction de masse des étoiles de faible et très faible masse. » (octobre 1998 - 05 juin 2001)

• P. HAGUENAUER (C. Perrier/P. Kern) « Optique Intégrée et Interférométrie » (octobre 1998 - 19 octobre 2001)

• KARMANN (H. Beust) « Le phénomène FEB et l'évolution des systèmes planétaires. » (septembre 1999 - 21 octobre 2002)

P. MEGE (A. Chelli/ F. Malbet) « Interférométrie avec des guides d'onde optiques: théorie et applications » (octobre 1998 - 15 novembre 2002)

W. SCHWARTZ (J.-L. Monin/ J.-L. Beuzit) « Micromiroirs déformables pour systèmes d'optique adaptative astronomiques » (octobre 1999 - 17 janvier 2003)

E. LAURENT (P. Kern/I. Schanen) « Conception et réalisation de guides monomodes pour l'IR thermique. Application à l'interférométrie stellaire. » (novembre 1999 - 5 mai 2003)

E. MORAUX (J. Bouvier) « Naines brunes et fonction de masse initiale » (septembre 2000 - 23 octobre 2003)

G. CHAUVIN (A.-M. Lagrange/D. Mouillet) « Etude des environnements circumstellaires en haute résolution angulaire » (octobre 2000 - 4 novembre 2003)

H. BOUY (J. Bouvier/W. Brandner) « Astrophysical Properties of Binary Brown Dwarfs » (septembre 2001-automne 2004)

L.MARCHAL (C. Perrier/X. Delfosse) « Statistique de binarité des naines M et naines brunes » (octobre 2001-automne 2004)

V. PIETU (C. Kahane/A. Dutrey) « Physico-chimie des disques protoplanétaires: apport de l'interférométrie millimétrique » (octobre 2001-automne 2004)

E. TATULLI (F. Malbet/A. Chelli) « Réduction de données interférométriques avec AMBER sur le VLTI. Observations interférométriques de disques d'étoiles jeunes. » (octobre 2001-1er octobre 2004)

X. BONFILS (C. Perrier/X. Delfosse/M. Mayor/S. Udry) « Recherche et étude d'exoplanètes orbitant autour de naines M » (octobre 2002-)

L. LABADIE (P. Kern/I. Schanen) « Développements de composants d'optique planaire dans l'infrarouge thermique pour DARWIN » (octobre 2002-)

F. GALLAND (A.-M. Lagrange/A. Chelli) « Compagnons de faible masse autour d'étoiles chaudes » (septembre 2003-)

S. GUIEU (J.-L. Monin) « Naines brunes dans les amas de formation stellaire » (octobre 2003-)

C. PINTE (F. Ménard) « Modélisation des disques protoplanétaires » (octobre 2003-)

G. MONTAGNIER (J.-L. Beuzit) « Etude et développement d'un système d'imagerie à haute dynamique pour la détection directe de planètes extra-solaires. » (octobre 2004-)

LESIA

Atmosphères (B. Bézard)

Formation du système solaire : contraintes chimiques & isotopiques (Gautier)

Emissions radio des planètes extrasolaires ; interactions magnétiques planète/étoile (Zarka)

Interférométrie différentielle et détection directe (Foresto, Perrin)

Transits planétaires (Rouan, Baglin)

Coronographie interférentielle (Rouan, Boccaletti, Baudoz)

Spectropolarimétrie visible (Catala, Rouan)

NACO (Boccaletti, Rouan), MIDI (Perrin), COROT (Baglin et al.), WST-MIRI (Boccalletti, Rouan, Baudoz), VLT-PlanetFinder (Boccaletti, Rouan)

PEGASE (Foresto, Perrin, Boccaletti, Rouan), DARWIN (Foresto, Rouan), GENIE (Foresto)

R&D Coronographie (Rouan, Boccaletti, Baudoz, ELT design Study (Rouan, Boccaletti)

Thèses :

N. Iro (Bézar LESIA / Guillot) : « Modélisation de l'atmosphère des planètes géantes extrasolaires » (nov. 2001-jan. 2005)
F. Hersant (Gautier) : « Turbulence dans la nébuleuse solaire primitive » (oct. 2002)
P. Riaud, « Coronographie à masque de phase: applications aux télescopes et interféromètres au sol et dans l'espace. » (jan 2003)
P. Bordé (Léna), « Détection et caractérisation de planètes extrasolaires par photométrie visible et interférométrie infrarouge à très haute précision. » (27 octobre 2003)
C. Cavarroc « Caractérisation d'un coronographe pour l'imagerie directe de planète extrasolaires avec MIRI JWST » oct 2004-

LUAN

Interférométrie différentielle (Vakili, Petrov)
Coronographie interférentielle (Aime, Vakili, Carbillat, Aristidi)
Observations Infrarouges (Epchtein)
Contribution à l'imagerie en mode nulling (Belu, Vakili)
Etudes de site au Dôme C (Vernin, et al.)

AMBER (Petrov), KEOPS/MYKERINOS (Vakili), IRAIT (Epchtein), A STEP (Schmider, Agabi, Daban, Fossat), VLT-PF (Vakili, Aime, Cabrillet, Aristidi), DARWIN (Vakili)

Thèses :

M. Vannier (Petrov/Lopez OCA) : « Détection d'exoplanètes avec AMBER » (nov. 2000-dec. 2003)
L. Abe (Vakili) : « Imagerie à Haute Dynamique : coronographie à contraste de phase et détecteurs spécifiques » (jan. 1999, juin 2002)
R. Soummer (Aime) : « Apodization et coronographie pour l'imagerie à haut contraste » (1999-2002)
F. Millour (R. Petrov/A. Chelli) « Caractéristiques physiques de planètes extrasolaires géantes chaudes avec l'instrument AMBER du VLTI. » (septembre 2003-)

LUTH

Dynamique gravitationnelle (Cabrera, Huré, Pierens, Schneider)
Athmosphères (Chevalier)
Méthodologies de détection (Cabrera, Schneider)
Exobiologie (Schneider)

COROT (Cabrera, Schneider)

GAIA (Cabrera, Schneider), Antarctic Plateau Interferometer (Schneider), ExoPlanet Imaging Coronagraph [NASA] (Schneider), VLT Planet Finder (Schneider), VIDA (Schneider)

Permanent All Sky Survey (Cabrera, Schneider) , Projet ESA « The life of stars and their planets » [nom provisoire] (Schneider)

Thèses :

J. Cabrera (J. Schneider)
A. Pierens (J.-M. Huré)

OAMP

Formation planétaire (Barge)

Recherche d'exoplanètes par transits photométriques (Barge, Deleuil, Moutou, Bouchy)

Recherche et caractérisation d'exoplanètes par vitesses radiales (Bouchy, Moutou, Sivan)

Étude des disques circumstellaires et proto-planétaires (Deleuil, Bouret)

Recherche de signatures planétaire lors de transits (Moutou)

Spectroscopie Doppler (Bouchy)

Photométrie Haute Précision (Barge, Llebaria)

HRA (Moutou, Dohlen)

Coronographie (Dohlen, Moutou)

COROT (Barge, Deleuil, Moutou, Jorda, Llebaria, Bouchy)

HARPS (Bouchy, Moutou, Sivan)

SOPHIE (Bouchy, Gillet)

VLT-PF (Moutou)

FUSE (Deleuil, Bouret)

ASTEP (Bouchy, Moutou)

VLT-FLAMES (Bouchy)

Thèses :

C. De la Fuente (Barge) : « Dinámica y crecimiento de los granos de polvo en la nebulosa protoplanetaria » (Juillet 2001 -)

C. Defay (Barge) : « Traitement du signal pour la détection des transits planétaires » (oct. 1999 – dec. 2002)

P. Guterman (Barge) : « Détermination des ouvertures photométriques pour les CCDs exoplanètes de Corot – conséquences sur la détection des transits » (oct. 2002 -)

A. Mollard (Barge) : « Corot: algorithmes optimaux pour la détection des transits planétaires » (oct. 2004 -)

Observatoire Midi-Pyrénées

Contribution à la détection de planètes par microlentilles (Fouqué)

Étude de l'environnement circumstellaire des étoiles proches, spectropolarimétrie (Mouillet)

Imagerie à haute dynamique (Koechlin, Mouillet)

PLANET (Fouqué), VLT-PF (Mouillet)

Thèses :

D. Serre (Koechlin) : « Imagerie à Haute Résolution Angulaire » (2004-)

G. Chauvin (A.-M. Lagrange LAOG/D. Mouillet) « Étude des environnements circumstellaires en haute résolution angulaire » (octobre 2000 - 4 novembre 2003)

Observatoire Astronomique de Strasbourg

Traitement de données vitesses radiales (Halbwachs)

OCA

Formation planétaire (Morbidelli, Namouni, Guillot, Michel, Tanga)

Dynamique planétaire (Scholl, Bois, Benest, Gonczi)

Structure interne & évolution (Guillot)

Interférométrie différentielle et détection directe (Lopez, Mourard)

Transits planétaires (Guillot, Fressin, Gay, Rivet, Rabbia)

Coronographie interférentielle (Gay, Rabbia, Rivet)

Spectropolarimétrie visible (Gay, Rivet, Rabbia)

Astrométrie (Mignard, Tanga)

AMBER (Lopez, Mourard), MIDI (PI : Lopez et al.), GAIA (Mignard, Tanga)

COROT (Guillot), PEGASE (Mourard, Gay, Rabbia), DARWIN (Rabbia, Gay), KEOPS (Lopez), SIM (Mignard)

A STEP (PI : Guillot, Fressin), CIA/CIA-VLT/CIAxe (PI: Gay, Rabbia, Rivet)

Thèses :

Laurent Escarrat (Gay, Rabbia) « Contribution au mode coronographique de Darwin » oct 2000-nov 2003

Christophe Buisset (Rabbia) « Caractérisation et optimisation de la rejection d'un interféromètre à frange noire et en bande large. Application à la mission ESA-Darwin » (oct 2004 -)

N. Iro (Bézar LESIA / Guillot) : « Modélisation de l'atmosphère des planètes géantes extrasolaires » (nov. 2001-jan. 2005)

A. Crida (Morbidelli) : « Croissance et migration planétaire dans le Système Solaire. » (oct. 2003-)

F. Fressin (Gay, Léger IAS) : « Recherche exo-planétaire » (oct. 2003-)

Université de Nantes

Structure interne des planètes solides (Sotin)

Planètes de glace (Grasset, Sotin)

Expérimentation à hautes pressions pour les intérieurs planétaires (Grasset)