n°1
Septembre
2002

Les Cahiers de l'espace

Une production de la Délégation à la Communication et à l'Education
Département Education-Jeunesse

cnes
CENTRE NATIONAL D'ETUDES SPATIALES

Ailleurs...la vie !

Possible ou probable ?

L'ECOLE DE L'ESPACE

ATTENTION ECOLE DÉCOLLAGE

Les Cahiers de l'espace

Le CNES au service des jeunes

La passion de l'espace se déclenche généralement très tôt et se cultive tout au long d'une vie. C'est pourquoi le CNES (Centre national d'études spatiales), à travers le département Education-Jeunesse, est un interlocuteur privilégié des jeunes et des éducateurs depuis 40 ans. Le champ de connaissances offert par la pratique de l'espace est très large, de la fabrication d'une fusée à eau à l'expérimentation scientifique dans l'espace, en passant par l'océanographie à l'école ou la fabrication d'une nacelle de ballon stratosphérique. Du cycle 3 au lycée, le CNES propose des supports de pratique adaptés au cadre scolaire, favorisant l'approche expérimentale et l'apprentissage du travail en équipe. Tous les enseignants (de l'école au lycée), ont accès à diverses formations aux techniques spatiales et à l'utilisation des outils expérimentaux qui offrent de nombreuses possibilités d'expérimentation et de découverte de l'espace.

L'Ecole de l'espace

Les Mercredis de l'information

Depuis mai 1999, le département Education-Jeunesse du CNES propose un cycle de conférences sur les thèmes spatiaux. Ces conférences sont principalement destinées aux enseignants (primaire, secondaire ou supérieur) mais sont ouvertes à tous les acteurs de la communauté éducative.
Cette opération est aujourd'hui conduite en partenariat avec Météo-France et en collaboration avec l'Académie de Toulouse et la Cité de l'espace.
L'objectif de ces conférences est d'apporter aux participants une information fiable et accessible sur des sujets scientifiques et techniques d'actualité. Les intervenants sont des chercheurs ou des ingénieurs directement impliqués dans les thèmes traités.
Les présentations sont très visuelles (diapositives, vidéos, transparents,…) et laissent une place aux questions de l'auditoire. Aucune connaissance scientifique particulière n'est requise. Un dossier documentaire est remis sur place à chaque participant.
Ces conférences ont lieu le mercredi après-midi, trois fois par an.

Les Cahiers de l'espace

Réalisés à l'issue de chaque session (à compter de la 9e session), Les *Cahiers de l'espace* sont des documents de référence sur les sujets abordés par *l'Ecole de l'espace*. Ils sont écrits sur la base des conférences, largement illustrés et accompagnés de références bibliographiques et Internet. Chaque *Cahier de l'espace* complète donc idéalement le dossier documentaire distribué en fin de session. Les *Cahiers* sont diffusés à tous les participants quelques mois après la conférence dont ils font la synthèse. N'hésitez pas à nous contacter pour compléter votre collection de *Cahiers de l'espace* !

A paraître :

Spot 5 et Météosat : des yeux en orbite (Octobre 2002)
L'Homme extraterrestre (Décembre 2002)
Lanceurs et propulsion du futur (Février 2003)

Document écrit par Natacha Fradin,
sur la base des conférences
des *Mercredis de l'information*.
Maquette : Atmosphère, Marie Boulianne
Mise en page et édition :
Service édition du CNES

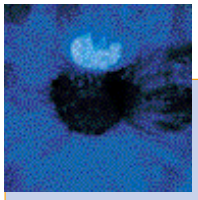
Une production de la Délégation à la Communication et à l'Education, Département Education-Jeunesse, CNES, 18, av. Edouard Belin, 31401 Toulouse Cedex 4.
www.cnes-edu.org

Cahier numéro 1

Ailleurs... la vie
Possible ou probable ?

Neuvième session des Mercredis de l'information, présentée par Sébastien Rouquette, département Education-Jeunesse du Cnes, responsable de l'organisation des conférences.
"Comme il serait déraisonnable qu'en dehors de la Terre et du ciel que nous apercevons, il n'existe pas d'autres ciels ni d'autres Terres" (Teng Mu, philosophe chinois du XIIIe siècle).

Depuis toujours l'Homme croit en l'existence d'autres terres et rêve la vie extraterrestre. Grâce à l'étude de l'Univers et à l'observation de la vie sur Terre, les scientifiques se sont forgés peu à peu une solide conviction : la vie s'est développée ailleurs dans l'Univers ! Mais la quête fut longue et pleine de déceptions… Pourtant en 1995, des hommes ont "vu" la première exoplanète et nous en avons été les témoins privilégiés…
Cette année-là, Michel Mayor, astronome suisse, révèle une découverte qui ébranle la communauté scientifique : à l'observatoire de Haute-Provence, une planète tournant autour d'une autre étoile que le Soleil vient enfin d'être détectée. Le système solaire ne serait donc pas une exception. Une fois encore, l'astronomie bouleverse notre vision du monde.
Aujourd'hui, elle s'intéresse plus que jamais à la question de l'existence de la vie dans l'Univers. Cette étude des conditions d'apparition de la vie sur une planète est une science complexe qui nécessite plusieurs approches. Position, taille, composition et chimie de la planète, nature de son étoile… tous ces paramètres conditionnent l'apparition et la conservation de la vie. Mais le système est très fragile. Un seul événement peut modifier l'évolution d'espèces vivantes ou anéantir toute forme de vie. Notre planète est, jusqu'à ce jour, le seul exemple connu du développement de la vie dans toute sa diversité… L'exobiologie pose la question de l'origine et de l'unicité de cette richesse, concentrée sur une seule planète. Et, s'il est très difficile d'émettre un pronostic, le nombre gigantesque d'étoiles dans l'Univers laisse espérer l'existence d'autres planètes vivantes…
Alors, la vie ailleurs : possible ou probable ? En quoi les systèmes spatiaux peuvent-ils contribuer à la recherche des exoplanètes ? Tout espoir de trouver une vie extraterrestre dans notre système solaire est-il écarté ? Qu'impliquent ces découvertes sur notre conception de l'Univers et de sa formation ?
Autant de questions auxquelles les trois conférenciers vont tenter de répondre en nous entraînant à la découverte de nos origines.
Souhaitons que cette quête de la vie dans l'Univers nous donne suffisamment d'humilité et de bon sens pour nous rendre plus raisonnables.



Sommaire

Ballets planétaires : une danse universelle ..... **p. 4 à 11**
D'après la conférence de Michel Mayor (Directeur de l'observatoire de Genève et codécouvreur de la première exoplanète)
Présentation de ses travaux, l'histoire de sa découverte et les moyens utilisés. L'avenir de l'observation : moyens techniques, comment savoir où regarder ? Va-t-on découvrir un système ressemblant au nôtre ? Quelles chances pour la vie dans l'Univers ?

Corot : l'œil sur la pépinière..... **p. 12 à 15**
D'après la conférence de Frédéric Bonneau (Ingénieur au CNES Toulouse, chef de projet Corot)
En quoi et comment cet instrument pourra-t-il aider à la détection des exoplanètes ? Corot sera-t-il à l'exobiologie ce que Hubble Space Telescope est à la cosmologie ? L'observation des planètes comme la Terre : rêve ou réalité des futurs instruments spatiaux ?

Sommes-nous seuls dans le système solaire ?..... **p. 16 à 20**
D'après la conférence de François Raulin (Directeur du laboratoire InterUniversitaire des Systèmes Atmosphériques, CNRS, Paris, et responsable du Groupement de Recherche en exobiologie du CNRS)
Tous les regards se tournent vers l'extérieur de notre système planétaire. Cherche-t-on encore la vie à proximité de la Terre ? Titan et Mars sont-ils de bons candidats ? Quels autres corps pourraient permettre ou avoir permis le développement de la vie ? Quelles sont les implications de ces découvertes sur notre conception de la vie, de notre condition dans l'Univers ? L'exobiologie rapprochera-t-elle les hommes ?

Des questions... des réponses ..... **p. 21 à 22**
Réponses aux questions de l'auditoire

Ballets planétaires
une danse universelle

51Pégase-b, première exoplanète détectée. (crédits : Lynette Cook)

Une conférence sous les feux de l'actualité

Le matin de la conférence (28 novembre 2001), les journalistes se pressaient autour de Michel Mayor, commentateur privilégié de l'annonce du jour : "l'analyse chimique de l'atmosphère d'une exoplanète par une équipe américaine". Il fait le point sur l'intérêt de cette découverte.

Quand une planète passe devant une étoile, son bord filtre la lumière émise par cette dernière. Cela permet à l'observateur d'en détecter l'atmosphère ou tout au moins certaines de ses caractéristiques chimiques.
C'est ce qu'a réussi le tandem américain Brown et Charbonneau en pointant le télescope spatial Hubble sur l'étoile HD 209458 et en mettant en évidence, grâce à la spectroscopie, la présence de sodium (certaines longueurs d'onde étant absorbées par les éléments chimiques).

Une prouesse

Cette mesure, réalisée par l'équipe américaine, est une mesure difficile car elle porte sur une toute petite zone d'observation. Si l'on considère que la surface d'une planète est à peine d'un centième de celle son étoile, le changement induit par la petite zone cachée par l'atmosphère dans le spectre de l'étoile, est de l'ordre de 1 pour 10 000. C'est là toute la difficulté de la mesure réalisée.

On s'y attendait

Néanmoins, la nouveauté ne réside pas dans la découverte même de l'atmosphère d'une exoplanète. On sait depuis longtemps que toutes les planètes gazeuses découvertes sont dotées d'une atmosphère. Ce qui fait la portée de l'événement annoncé hier par la Nasa, c'est qu'une équipe ait prouvé qu'il est maintenant possible d'acquérir des informations sur la composition chimique de cette atmosphère, et, bien que l'exoplanète étudiée par Charbonneau et Brown soit trop chaude pour abriter une quelconque activité biologique (température de surface de l'ordre de 1200°C), de se mettre en quête de biomarqueurs susceptibles d'indiquer la présence de vie.

Dernière minute
2 juillet 2002

Ce ne sont pas moins de 22 exoplanètes qui viennent d'être découvertes par les équipes américaines et suisses.
Au total donc :
- 87 systèmes stellaires
- 100 planètes
- 11 systèmes multiples

A l'heure où nous mettons sous presse, ces deux annonces de taille viennent conforter notre idée que la découverte d'exoplanètes fera prochainement notre quotidien. La pluralité des mondes n'est plus un rêve.

Ballets planétaires : une danse universelle

En octobre 1995, Michel Mayor découvre une planète tournant autour d'une autre étoile que le Soleil. Depuis, avec son équipe, il a à son actif la détection de plus de 30 des 74 exoplanètes répertoriées à ce jour. Fort de ces découvertes, il intervient pour nous parler des "nouveaux mondes du cosmos".

La première détection d'une exoplanète (cf. glossaire), réalisée en 1995 à l'observatoire de Haute-Provence, n'était pas une surprise. Elle était pressentie par les astrophysiciens. Tous considèrent en effet les exoplanètes comme des sortes de sous-produits obligés de la formation des étoiles.

Origine et formation

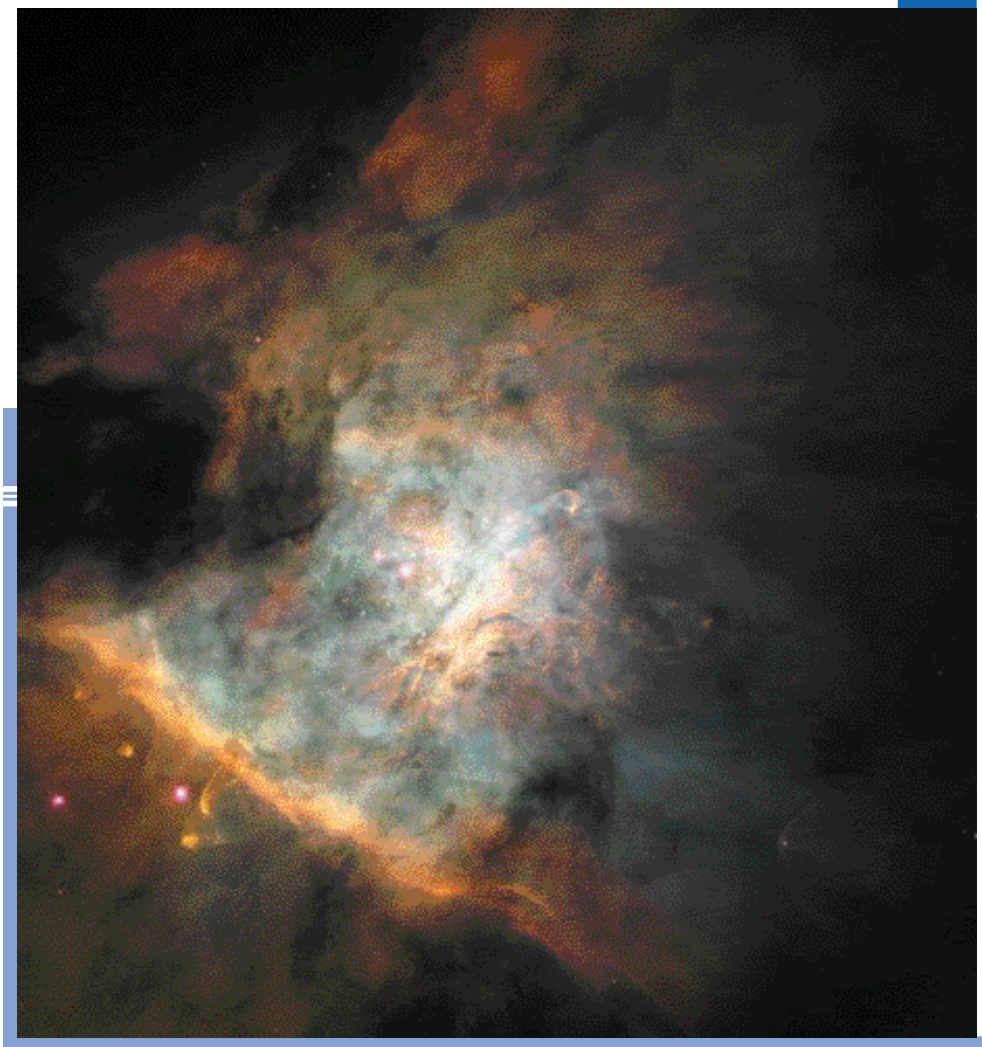
Lorsqu'on étudie la formation stellaire en cours dans la Galaxie, on voit l'effondrement de grandes masses de gaz donner naissance à des étoiles. Au terme de cet effondrement, se créé un disque de gaz et de poussières, résultat de l'excès de moment angulaire (cf. glossaire). Le dernier petit vortex tourne alors trop vite, empêchant la matière de se concentrer sur l'étoile. Ce phénomène, prédit, est aujourd'hui très bien observé. Comme en 1995, dans la nébuleuse d'Orion où un grand nombre d'étoiles jeunes observées avec le télescope spatial se sont révélées être entourées de ce même type de disque, petit halo noir de poussières et de gaz arrêtant la lumière émise par la nébuleuse à l'arrière-plan *(image 1.1)*.

Ces disques protoplanétaires s'avèrent très fréquents, car la physique étant la même partout, les grains de poussière s'agglomèrent ailleurs comme ici. On peut donc en conclure que des planètes se forment également partout, leur probabilité d'existence étant un multiple du nombre d'étoiles existantes (des centaines de milliards). Il n'y a donc rien d'étonnant à avoir découvert des exoplanètes, mais bien plutôt à ne pas les avoir détectées avant.

Cela s'explique par la difficulté du repérage, en raison de la faible luminosité des planètes par rapport à leur étoile. On sait par exemple que la luminosité de Jupiter, la plus grosse planète du système solaire, est seulement d'un milliardième de son étoile. Or, dès qu'on tente d'observer une étoile un peu lointaine, la distance angulaire entre l'étoile et la planète se réduit. Si le contraste entre les deux objets est d'un milliard, on est alors complètement ébloui par la lumière de l'étoile et on ne voit pas la planète.

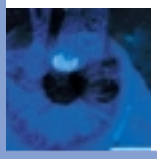
Et, à dire vrai, nous n'avons encore, à ce jour, jamais VU une exoplanète.

Image 11 - La nébuleuse d'Orion, berceau probable de nombreux systèmes stellaires en formation. Image réalisée par le télescope spatial Hubble. (Crédits NASA, Hubble Space Telescope).



Principe de détection

Les exoplanètes ne sont donc pas repérées par leur lumière mais, de manière indirecte, par l'attraction qu'elles produisent sur leur étoile. Avec un spectro-



L'effet Doppler

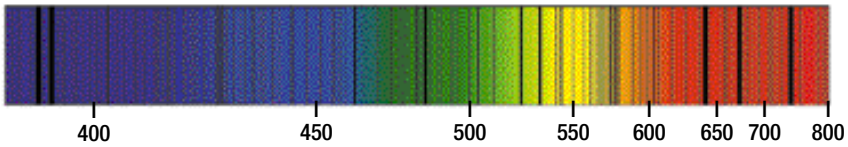
C'est la variation de la fréquence (ou de longueur d'onde) d'une onde mesurée lorsque la source ou le récepteur est en mouvement.
Dans le cas présent, il s'agit de la variation de la vitesse de la lumière dans la direction de l'observateur, encore appelée effet Doppler-Fizeau. Le décalage s'effectue vers les courtes longueurs d'onde (bleu) dans le cas d'un rapprochement et vers les grandes longueurs d'onde (rouge) en situation d'éloignement. L'expression mathématique donnant la longueur d'onde mesurée λ en fonction de la longueur "au repos" λ_0 et de la vitesse de déplacement de la source V est la suivante :

$$\lambda=\lambda_0 \left(1 - \frac{V}{c}\right),$$

où c est la vitesse de la lumière ; V est positive (négative) lorsque l'objet se rapproche (s'éloigne) de l'observateur.

Le code barre élémentaire

La spectroscopie nous renseigne sur la composition et la structure de la matière en analysant le spectre obtenu par la décomposition d'une onde électromagnétique émise par un objet (par exemple la lumière visible). Sa décomposition peut être réalisée au moyen d'un prisme ou d'un autre dispositif optique équivalent.



(longueur d'onde en nanomètres)

Le spectre d'absorption de la lumière solaire révèle la nature polychromatique de la lumière solaire, schématisée ici depuis le domaine ultraviolet jusqu'au rayonnement infrarouge. On remarque également de nombreuses bandes sombres, signatures des éléments constituant la surface et l'atmosphère solaire (photosphère). Ce sont par exemple, le sodium, le mercure ou l'oxygène.

mètre, et grâce à l'effet Doppler, (encadré *"Effet Doppler"*) les observateurs mesurent très précisément la vitesse de déplacement de l'étoile.
Ils détectent les minuscules variations causées par le corps perturbateur et l'effet produit sur l'intensité de la lumière de l'étoile. Une fois la vitesse chiffrée, et bien qu'on n'ait toujours pas vu la planète, on peut calculer sa période, la forme de son orbite et estimer sa masse.
La difficulté est surtout instrumentale car les équipes travaillent sur de très petites fractions de la vitesse de la lumière. Il faut un appareil très stable et très sensible.
Prenons l'exemple de Jupiter et de la Terre. La première, mille fois plus légère que le Soleil, va induire un mouvement de son étoile de 13 m/s sur une période de 11 ans. La seconde, 300 000 fois plus légère, un déplacement de seulement 8 cm/s sur une année. Lorsque l'on sait que la précision actuelle est de l'ordre de 3m/s, (seulement 1/100 000 000 de la vitesse de la lumière), on comprend que l'effet Doppler n'influe que très peu sur les longueurs d'onde mesurées dans le spectre des étoiles (encadré *"Le code barre élémentaire"*).

Théorie contre observation

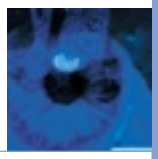
Depuis la découverte de 51 Pégase-b, il y a maintenant plus de 6 ans, les astronomes ont détecté 74 exoplanètes. La première détection, bien qu'attendue, a néanmoins surpris par le type d'informations qu'elle apportait. Calquée sur le fonctionnement de notre système solaire, la théorie commandait de rechercher des planètes géantes à l'orbite circulaire, situées loin de leur étoile (périodes>10 ans) et de masse similaire à celle de Jupiter. Or, la réalité s'est révélée bien différente de l'a priori théorique. Car les découvertes successives ont mis en évidence des planètes parfois 10 fois plus massives que Jupiter, à l'orbite très rapprochée et souvent excentrique.

Un nom pour une planète

Seules les planètes du système solaire portent un nom ! Par souci de simplicité (donc de clarté) les scientifiques ont choisi de donner aux exoplanètes le nom de leur étoile, auquel on ajoute une lettre. La planète découverte autour de HD 209458, porte donc le nom HD 209458b. Les deux étoiles du système GL 876 sont enregistrées sous les noms GL 876b et GL 876c !

Typologie : masses et orbites

Les récentes détections portent sur des planètes dont la masse est de 1/6 de celle de Jupiter, alors que la masse de la planète tournant autour de 51 Pégase vaut la moitié de celle de Jupiter. Si la progression vers le plus petit est évidente, nous restons encore dans le domaine des planètes géantes. En effet, les techniques actuelles ne permettent pas de détecter des planètes telluriques et encore moins de repérer une nouvelle Terre.
La dynamique des orbites répertoriées fait apparaître une période privilégiée, de l'ordre de 3-4 jours. Période sans équivalent dans notre système où aucune planète ne fait le tour du Soleil aussi rapidement. L'autre caractéristique de ces orbites est qu'elles sont très allongées, bien plus elliptiques que les orbites de nos planètes géantes.
Les données s'accumulent et vont permettre, à long terme, de construire la distribution des probabilités de détection. Les informations recueillies (masse et orbite des planètes, composition chimique de leurs étoiles) aideront à mieux comprendre la formation et l'évolution des planètes géantes. (encadré *"Loi d'attraction mutuelle des corps"*)

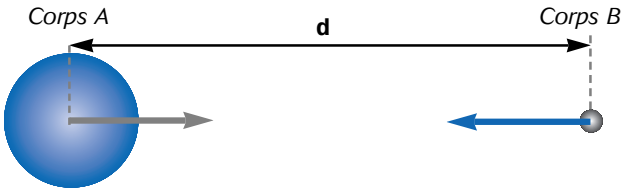


Loi d'attraction mutuelle des corps

La force **F** exercée par un corps de masse $\mathbf{m_A}$ sur un autre corps de masse $\mathbf{m_B}$, placé à la distance **d** de ce dernier, s'exprime de la façon suivante :

$$\vec{F} = G \frac{m_A\, m_B}{d^2} \frac{\vec{d}}{d},$$

où F est exprimée en newtons (N), m_A et m_B en kilogrammes (kg), d en mètres (m) et G est la constante gravitationnelle, dont la valeur approche $6{,}67.10^{-11}$ $N.m^2/kg^2$.
Il apparaît immédiatement que cette force est égale et opposée à celle exercée par le corps de masse m_B sur le corps de masse m_A.
Concrètement, nous pouvons affirmer que la Terre exerce sur chacun de nous une force identique (mais opposée) à celle que nous exerçons sur elle.
Cette force qui nous retient au sol, c'est la gravité. Le terme $G \frac{m_A}{d^2}$ est appelé accélération de la pesanteur communément notée g. Sur Terre, et au niveau de la mer (d = 6378 km), elle vaut 9,81 m/s^2.



$$\vec{F}_{B \to A} = - G \frac{m_B\, m_A}{d^2} \frac{\vec{d}}{d} \qquad \vec{F}_{A \to B} = G \frac{m_A\, m_B}{d^2} \frac{\vec{d}}{d}$$

"Jupiter chaudes"

Depuis 1995, la découverte de nombreuses planètes géantes à période courte a permis de constituer une famille. Leur orbite serrée impliquant qu'elles soient positionnées très près de leur étoile et donc que la température y soit très élevée, elles ont été baptisées "Jupiter chaudes".
Le prototype de cette famille détecté autour de 51 Pégase fut qualifié, lors de sa découverte, d'objet exceptionnel. On sait aujourd'hui qu'il n'en est rien mais il suffit de revenir au mécanisme de formation des planètes géantes pour comprendre pourquoi un tel qualificatif lui fut attribué.
Les planètes géantes sont formées par l'agglomération des grains de glace compris dans le disque de gaz et de poussières qui tourne autour des étoiles jeunes. En se collant, ces grains forment une grosse boule (10 à 15 fois la masse de la Terre) à la croissance très rapide. On arrive alors à une masse critique qui rend la gravitation suffisante pour attirer l'hydrogène et l'hélium présents dans le disque d'accrétion. Ce phénomène n'est possible que lorsque la phase décrite se réalise dans un temps très court, car les disques d'accrétion n'existent que pendant quelques millions d'années. Dans le cas contraire, on obtient une planète de type Uranus ou Neptune et non une planète à grande enveloppe comme Saturne ou Jupiter.
Dans ces conditions, comment une planète de type Jupiter, positionnée très près de son étoile, peut-elle se constituer une grande enveloppe à partir d'un disque d'accrétion formé de glace ?

Formation et migration

C'est le premier problème mis en évidence par la découverte de 51 Pégase-b. Un problème qui trouve sa solution dans les travaux sur la dynamique d'objets en orbite, réalisés dans les années 80. Ces travaux portent précisément sur l'évolution de l'orbite d'un satellite plongé dans un disque de gaz et de poussières mais peuvent être transposés au problème d'une planète prise dans le disque d'accrétion présent autour d'une étoile.
Cette jeune planète induit des perturbations, sortes de vagues où s'accumulent des quantités de gaz plus importantes, avec des résonances (encadré *"En cadence"*) dans le disque. En retour, cette masse va réagir sur le mouvement de la planète, faisant rapprocher son orbite de l'étoile. En un temps record d'à peine 100 000 ans, durée inférieure à l'existence du disque d'accrétion, la migration orbitale est réalisée. C'est l'interaction newtonienne. Réconciliant le vieux scénario de formation des planètes géantes – avec grains de glace et à des endroits invraisemblables du fait de la température mesurée – et le phénomène des migrations orbitales qui explique qu'on trouve les planètes à un endroit où elles ne sont pas nées.

En cadence

Le phénomène de résonance s'explique par l'existence d'une fréquence particulière pour laquelle un système, soumis à une excitation, donne une réponse maximale. Une corde de guitare vibre à une fréquence privilégiée, sa fréquence propre. Marcher en cadence sur un pont peut entraîner sa destruction si la fréquence des pas est accordée à la fréquence propre de l'oscillation du pont.

Rendez-vous

Si la découverte de 1995 a secoué le consensus établi, elle a aussi apporté de

précieuses informations. Pour obtenir un transit planétaire, l'équivalent d'une éclipse *(image 1.2)*, il faut que la lumière émise par l'étoile trouve la planète sur son trajet jusqu'à l'observateur. Or les observations sur les Jupiter chaudes permettent de conclure que les conditions géométriques sont idéales pour obtenir un tel plan orbital. Soit, pour une planète à 4-5 jours de période, 10 % de chances de la voir passer devant le disque de son étoile.
Ces mêmes observations nous donnent la durée du phénomène (environ 3 heures), le rayon de la planète (1/10 de celui de l'étoile), la surface projetée de la planète, (1/100 du disque de l'étoile). On s'attend donc à une baisse de luminosité de 1 % *(image 1.3)*. Un transit photométrique qui permet de calculer le rayon de la planète, sa masse, grâce au plan orbital, et, en combinant les 2, d'obtenir sa densité moyenne. Les calculs effectués suite aux observations, notamment sur la densité du 7e candidat en orbite autour de l'étoile HD 209458 *(image1.4)*, prouvent que les planètes observées sont bien des géantes gazeuses (densité moyenne de HD 209458 : 0,3). Et non des planètes telluriques, sortes de super Terre, comme certains ont pu l'évoquer au début.
En établissant une éphéméride et en communiquant ces informations à 2 groupes différents de chercheurs, les données ont pu être vérifiées à 2 mois d'intervalle, notamment par l'équipe Brown et Charbonneau. Les mêmes qui, la saison suivante, observent la même étoile, toujours ponctuelle au rendez-vous, affinent leurs calculs. Et… font la découverte du jour !

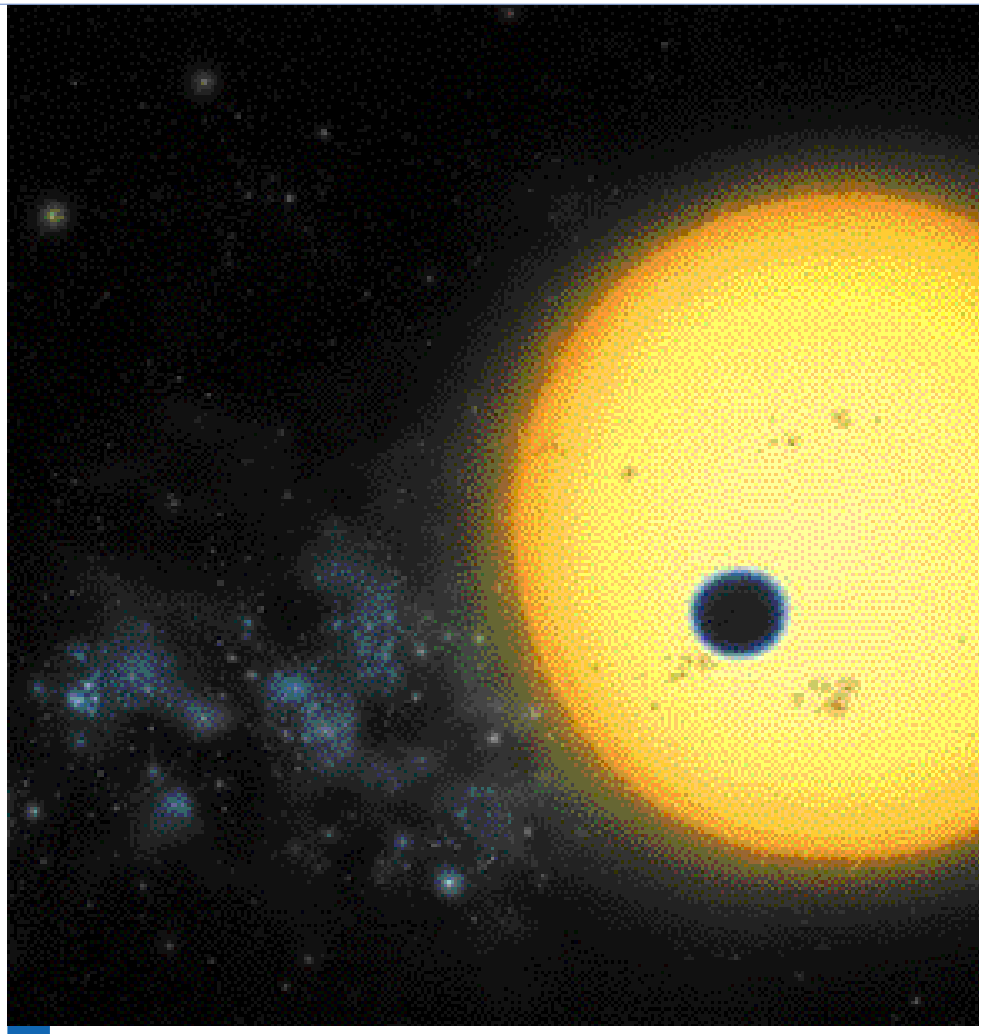
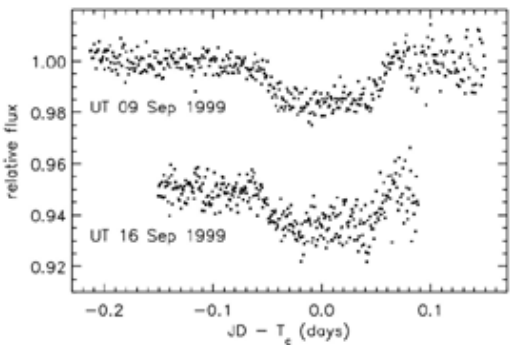


Image 12 - Vue d'artiste du système HD 209458. Ce dernier présente une particularité : la planète passe devant son étoile tous les 3,6 jours. (Crédits Lynette René Cook, extrasolar.spaceart.org).

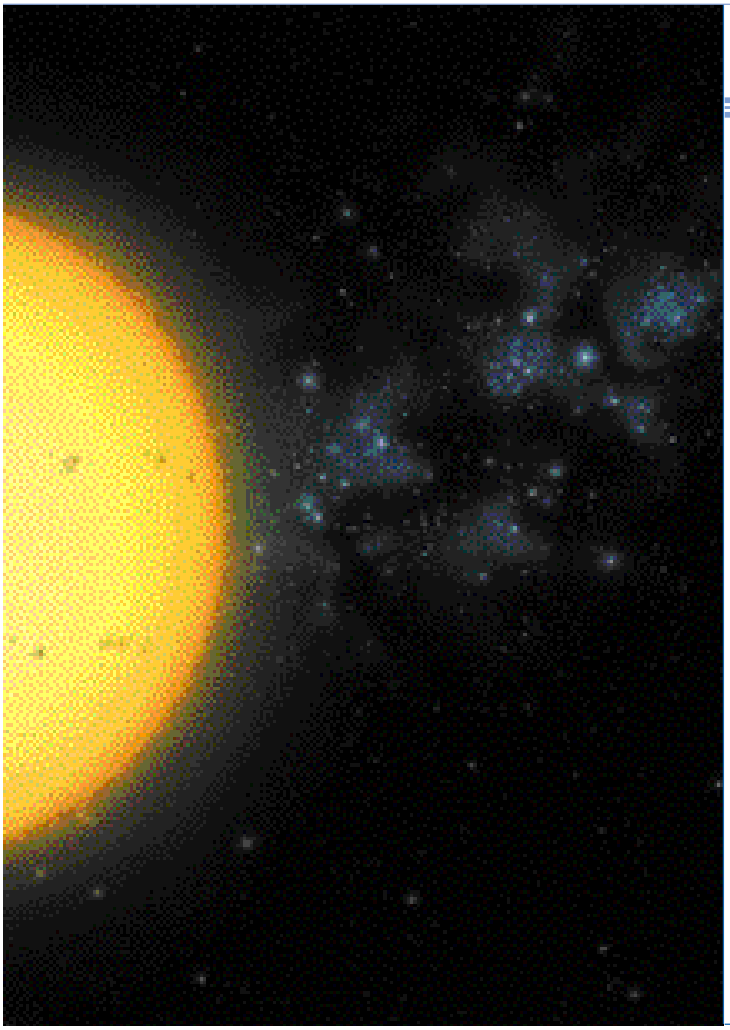
Image 13



Ce tracé représente la variation de ce flux en fonction du temps pour deux occultations observées à 7 jours d'intervalle (2 révolutions de la planète), dans le système planétaire de HD209458.
(Crédits Observatoire de Genève, Image issue de l'article de Charbonneau et al., Astrophysical Journal Letters, 2000).

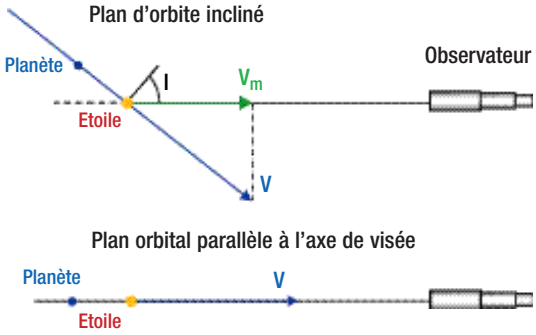
Naines brunes ?

La vitesse radiale utilisée pour repérer les exoplanètes ne permet de mesurer que la masse minimum de celles-ci. Car une petite planète gravitant dans un plan orbital peu incliné peut induire le même effet qu'une planète massive repérée dans un plan vu de face (encadré *"Qui peut le plus peut le moins"*). Comment, dans ce cas, s'assurer que les exoplanètes découvertes ne sont pas des naines brunes (cf. glossaire) ?
Lorsqu'un gros nuage de gaz s'effondre,



Qui peut le plus peut le moins !

La masse d'une exoplanète déterminée par la méthode des vitesses radiales est une limite inférieure. La vitesse mesurée est en fait la composante parallèle à l'axe de visée, i.e. comme si le plan de l'orbite était confondu avec la ligne de visée. En réalité, l'orbite peut être inclinée. Il faut donc "dé-projeter" les mesures pour en déduire les valeurs réelles. Mais l'inclinaison du plan orbital étant inconnue, la détermination de la masse réelle est impossible…



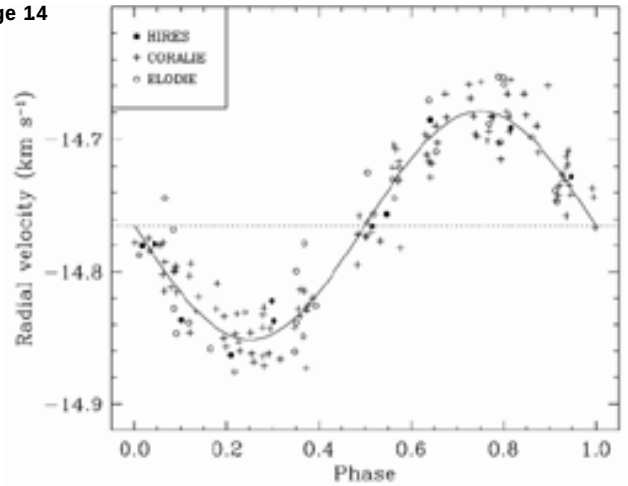
La vitesse radiale mesurée est : $V_m = V \sin(i)$, dont on déduit la masse de la planète M_m en fonction de V_m. La masse réelle s'exprime donc en fonction de l'inclinaison (i) du plan orbital par rapport à l'axe de visée:

$$M = \frac{M_m}{\sin(i)}$$

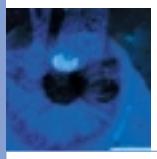
Si i = 90°, $M = M_m$.
Si i = 0°, aucune vitesse radiale n'est mesurée, la planète n'est pas détectée !

par exemple la nébuleuse d'Orion (100 000 fois la masse du Soleil), sa fragmentation donne lieu à la formation d'amas d'étoiles. La limite retenue pour départager les plus lourdes, les étoiles, des plus légères, les naines brunes, est un multiple de la masse de Jupiter. La masse des naines brunes est d'environ 70 à 80 fois la masse de cette dernière, au-delà se classent les étoiles, en deçà les naines brunes.
À ces objets formés par le haut, on peut ajouter les objets formés par le bas, soit par l'accrétion de poussières et de gaz : les planètes. Leur masse supérieure est également de plusieurs fois la masse de Jupiter. Les planètes et les naines brunes peuvent donc apparaître comme des objets similaires quant à leurs propriétés observables. Et cela ne manque pas d'alimenter la polémique. Néanmoins, l'histoire de leur formation reste très différente.

Image 14



Le graphe représente les mesures de vitesses radiales obtenues à l'aide des instruments HIRES, CORALIE et ELODIE, utilisés notamment par M. Mayor. (Crédits Observatoire de Genève. Image tirée de l'article de Mazeh et al., Astrophysical Journal Letters, 2000).



L'immense majorité des exoplanètes détectées affiche des masses inférieures à 10 fois celle de Jupiter. Quant aux planètes dont la période est inférieure à 1 mois, la plupart ont une masse très similaire à celle de Jupiter ou de Saturne. Des chiffres qui permettent d'affirmer que toutes ces exoplanètes ne sont pas des naines brunes, compagnes sombres d'étoiles doubles.
Cette profusion de planètes géantes s'explique, comme on l'a vu plus haut, par la difficulté de repérer des planètes de petite masse loin de leur étoile, celle-ci induisant très peu de perturbations. C'est ce que l'on qualifie de biais de mesure d'origine instrumentale. Mais, grâce aux progrès de la détection, cette distribution est amenée à être rapidement modifiée et son seuil logiquement abaissé à la suite des prochaines observations.

Orbites excentriques

Les prochaines observations seront à même d'éclairer les chercheurs sur un point resté jusqu'ici sans réponse : quel est le phénomène à l'origine de l'excentricité orbitale quasi générale des exoplanètes détectées ?
Celle-ci est en effet très importante, seules les planètes dont la période est inférieure à 10 jours possèdent une orbite quasi circulaire. Au-delà, presque toutes les orbites sont elliptiques et la courbe de vitesse de l'étoile montre une accélération violente de l'étoile au passage au périastre. À la différence de ce qui se passe dans notre système, où même les planètes géantes (Jupiter, Saturne, Uranus et Neptune) ont des orbites circulaires.
La récente mise en évidence de systèmes semblables au nôtre, où plusieurs planètes tournent autour d'une étoile, devrait nous permettre d'en savoir plus sur la répartition des orbites. Pour l'instant, les périodes sont des plus variées, telles celles des 3 planètes gravitant autour d'Upsilon Andromedae (4,6 jours, 240 jours et 1 300 jours), ou celles des 2 planètes du système planétaire HD 74156 (51 jours et 2 300 jours). Néanmoins, dans plusieurs des systèmes multiples récemment découverts, on commence à apercevoir des résonances. Nombreux sont ceux abritant 2 planètes qui affichent très souvent un facteur 10 ou 2 dans le rapport de leurs périodes (Gliese 876 : planètes ayant des périodes de 30 et 60 jours).
Les mouvements planétaires ne seraient donc pas aléatoires mais plutôt bloqués sur des orbites résonnantes, l'influence des planètes se perturbant mutuellement. L'observation de plusieurs de ces échantillons devrait nous en apprendre plus sur la formation des systèmes en général. Et sur le nôtre en particulier.

Interférométrie

Pour aller plus loin dans la précision des recherches, de nouvelles techniques de détection se mettent en place. À l'effet Doppler sera bientôt préférée l'interférométrie, capable de repérer les planètes par la variation de leur position sur le plan du ciel (encadré *"L'union fait la résolution"*).
C'est la mission de l'interféromètre du mont Paranal, encore à l'état de projet. Équipé de 4 télescopes de 8 mètres de diamètre, optiquement couplés, il pourra mesurer très précisément la distance entre 2 étoiles proches et, en détectant les éventuelles variations périodiques, signaler l'existence d'une planète. En comparant la distance entre les 2 étoiles, on pourra alors en déduire laquelle possède la planète. Des mesures interférométriques seront également réalisées depuis l'espace par la prochaine mission américaine SIM ou la mission astrométrique GAIA de l'ESA.
Ces futurs interféromètres ne se limiteront pas à l'étude des planètes existantes, mais s'intéresseront aussi à leur mécanisme de formation, grâce à l'observation de systèmes planétaires dans les premières phases de leur élaboration, quand le gaz est encore très froid, voire dans le plan de la nébuleuse. Les longueurs d'onde étudiées seront de type radio ou infrarouge. C'est le but du prochain grand projet européen, actuellement en phase de conception, l'interféromètre du plateau d'Atacama au Chili. Installées à 5 000 m d'altitude, ses antennes mesureront les rayonnements submillimétriques et permettront de voir les disques d'accrétion avec une extraordinaire résolution. Ce sera une aide considérable pour comprendre la formation des planètes.
Quant à la détection de planètes rocheuses, susceptibles d'abriter la vie, elle s'envisage aujourd'hui par le biais de 2 méthodes différentes. La très complexe technique des microlentilles, qui permet d'amplifier la luminosité des étoiles très lointaines et de leurs éventuelles planètes, et les missions de type Corot, qui opéreront depuis l'espace.
(encadré *"Centres de gravité"*)

L'union fait la résolution

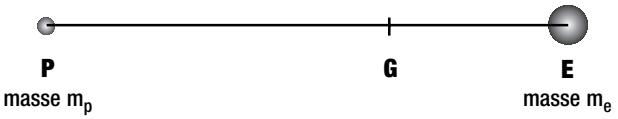
L'interférométrie stellaire permet de voir des détails au-delà des possibilités d'un seul télescope. L'interféromètre est une association de plusieurs télescopes réunis en réseau. Il combine leur lumière et augmente ainsi la résolution spatiale et accentue la qualité des images obtenues.
Le pouvoir de résolution n'est plus alors déterminé par le diamètre d'un seul télescope mais par la distance entre les télescopes. On atteint ainsi les performances d'un télescope virtuel, dont le miroir aurait un diamètre de plusieurs dizaines de mètres.

Centres de gravité

Le centre de gravité est un point d'équilibre d'un système présentant une certaine répartition de masse. Si l'on considère une règle de longueur L au bout de laquelle sont fixées des masselottes de masse m_p et m_e (supposées ponctuelles ou à symétrie sphérique), avec m_e supérieure à m_p, le centre de gravité G est d'autant plus proche de m_e que la différence de masse est importante. Mathématiquement, cela se traduit par la relation suivante :

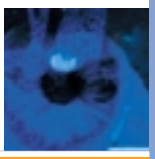
$m_e \times EG = m_p \times PG$ et $L = EG + PG$, de sorte que

$$EG = \frac{m_p}{m_p + m_e} L$$



En mécanique spatiale, cela signifie que les planètes ne tournent pas autour de leur étoile, mais que l'ensemble tourne autour d'un centre de gravité commun. La Terre tourne autour du Soleil en approximation seulement. On peut facilement vérifier cette hypothèse en calculant la position du centre de gravité au sein d'un système planétaire simple.
Application numérique : système formé par une étoile de type Soleil (rayon 700 000 km) et une exoplanète 1000 fois plus légère, située à une distance de 70 millions de kilomètres. Le calcul montre que le centre de gravité se situe à la distance de 70 000 km du centre de l'étoile, soit à l'intérieur de celle-ci. Donc, si celui-ci est très proche, il n'est pas confondu avec le centre de l'étoile. L'étoile effectue donc un mouvement orbital autour de ce point. La spectroscopie permet de mesurer la vitesse de l'astre au cours de ce mouvement particulier et, par suite, de déterminer la masse des objets qui "tournent autour".

Glossaire



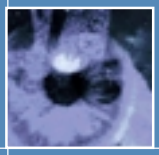
GLOSSAIRE

Exoplanète
Planète tournant autour d'une étoile autre que le Soleil.

Étoile double
Etoile accompagnée d'une autre étoile ou d'un compagnon non-lumineux, planète ou naine brune.

Moment angulaire
Dans le cas d'un objet en rotation sur lui-même, le moment angulaire (ou cinétique) s'exprime par le produit : masse x vitesse de rotation x rayon. Cette quantité physique est conservative (elle est conservée pour un système isolé). Pour une masse constante, si le rayon du système diminue, sa vitesse de rotation augmente. C'est le même phénomène que met en évidence le patineur qui replie ses bras sur lui-même pour accélérer sa rotation.

Naine brune
Etoile "ratée", trop peu lumineuse pour être détectée directement. Sa masse est trop faible pour déclencher les réactions nucléaires agissant au cœur d'une étoile.



Corot : l'oeil sur la pépinière

La découverte d'exoplanètes et d'exosystèmes a relancé la recherche de vie extraterrestre. La prochaine étape est l'éventuelle détection de planètes telluriques, analogues à la Terre. C'est la mission de Corot, qui sera pour les astronomes un œil de nouvelle génération.

Image 2.2
Structure interne d'une étoile telle que le Soleil. Les étoiles sont des sphères de gaz ionisé, en équilibre sous l'action de leur propre poids et du rayonnement qu'elles émettent. Elles sont capables d'osciller dans différents modes spécifiques de leur structure, tel un instrument de musique ou l'ensemble du globe terrestre.

Corot, mission spatiale actuellement en développement au CNES, porte l'acronyme de sa double mission scientifique. Jusqu'au début de l'année 1994, la mission était exclusivement dédiée à la sismologie stellaire et destinée à étudier les phénomènes de COnvection et de ROtation à l'intérieur des étoiles. Puis, avant 1995 et la première détection d'une exoplanète, Corot s'est vu allouer un second objectif (et de fait une dernière initiale) : la recherche d'exoplanètes par l'étude des Transits planétaires *(image 2.1)*.

Sismologie stellaire

Le Soleil, étoile pourtant bien connue des astronomes, produit d'importants phénomènes encore inexpliqués. Et comme elle n'est pas une étoile hors du commun (du point de vue astrophysique du moins), on peut supposer qu'il en est de même pour la plupart des étoiles de la Voie Lactée. C'est donc pour mieux comprendre ces phénomènes que les scientifiques ont créé la sismologie stellaire, discipline dont le but est l'étude de l'activité interne des étoiles. Elle permet de mesurer les gigantesques transferts d'énergie entre leur noyau (plusieurs millions de degrés) et leur surface (6 000 degrés), responsables des turbulences et tâches observées. C'est un outil efficace pour dépasser l'opacité des étoiles et étudier le fonctionnement de ces formidables laboratoires de physique. Pour comprendre le mécanisme des étoiles, Corot va étudier les variations de leur luminosité et les modifications de leur structure. En effet, certains phénomènes se produisent très près de la surface de l'étoile, d'autres plus profondément, se manifestant par la propagation d'ondes à la surface de l'étoile. Corot, en repérant tous les pics à la surface, effectuera une sorte de radiographie de l'étoile et analysera les modifications de luminosité grâce à la photométrie *(image 2.2)*.

150 jours

Pour étudier ces phénomènes, il faut un grand nombre d'échantillons. L'idéal étant de scruter l'étoile choisie en continu. C'est une des spécificités de Corot qui, grâce à son orbite polaire, pourra observer sans interruption pendant plusieurs mois. Il mesurera la brillance de l'étoile toutes les secondes et pourra ainsi en déduire les variations de celle-ci. Ces variations étant de très faible amplitude, de l'ordre du millionième, Corot devra être capable d'éliminer toutes les sources de bruits parasites, nuisibles à la détection du signal scientifique utile.
Il existe déjà sur Terre un projet à but similaire, multisite. Il réunit plusieurs observatoires (Australie, Californie, Canaries, Afrique du Sud et Inde) qui coordonnent leurs observations afin d'étudier continuellement le Soleil. Ce réseau a déjà permis des analyses sismologiques de ce dernier et également d'autres étoiles. Depuis l'espace, Corot aura un avantage considérable car ses 150 jours d'observation continue seront suffisants pour étudier les périodes avec une précision de 0,1 microhertz. Précision nécessaire à l'analyse détaillée de tous les phénomènes physiques qui interrogent les astronomes.
À l'instar de la mission Soho lancée par l'ESA et qui étudie notre astre, Corot se

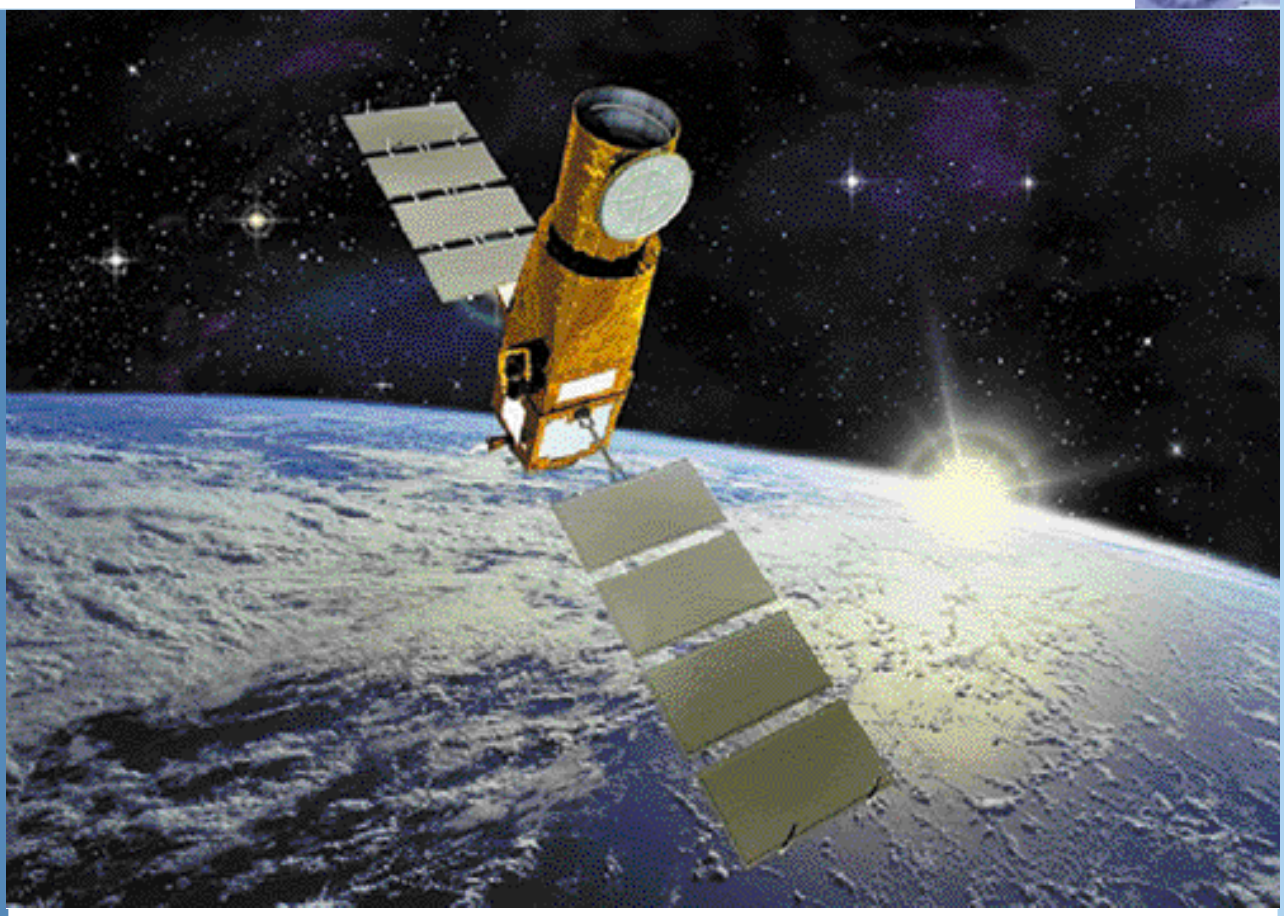


Image 2.1 - Vue d'artiste du satellite Corot (source CNES).

focalisera sur des étoiles de type solaire. En tout une cinquantaine, de magnitude visuelle plus brillante que 9 (cf. glossaire), dans le cadre de son programme principal. Une cinquantaine d'autres étoiles, de types différents, seront observées pendant des durées plus courtes, dans le cadre du programme dit " exploratoire ".

Exoplanétologie

Le photomètre de haute précision utilisé par Corot sera également mis à contribution pour découvrir de nouvelles exoplanètes, si possible telluriques.
Pour les détecter, Corot utilisera la méthode classique du transit planétaire. La visibilité étant fonction de la géométrie et donc de la distance de l'étoile étudiée, la probabilité est de l'ordre de 10 % pour des exoplanètes telles que celle évoluant autour de 51 Peg et 0,5 % pour les planètes de taille et d'orbite similaires à celles de la Terre *(image 2.3)*.
Actuellement, la précision des moyens au sol permet de mesurer les variations d'un signal lumineux avec une amplitude supérieure à 1%. Corot va plus loin et se donne pour but quelques 1/10 000 d'amplitude. Une précision déjà atteinte par Hubble Space Telescope mais que Corot surpassera par sa capacité à observer des étoiles beaucoup moins brillantes. Il permettra également, en phase d'étude sismologique, l'observation simultanée d'un très grand nombre d'étoiles (12 000 au total) dans l'autre moitié du champ. En détectant les éventuelles éclipses et en vérifiant leur périodicité, il attestera de la présence d'exoplanètes.

Fausses détections

Pour éviter les erreurs de détection, la mission Corot conjuguera deux critères de vérification. Le principal est la périodicité, avec un objectif de détection initial

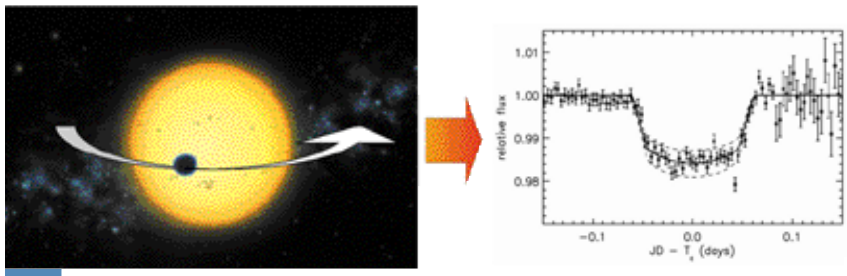
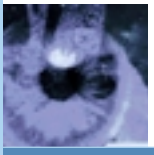


Image 2.3 - Courbe représentant la perte de luminosité enregistrée au passage de la planète HD209458 devant son étoile.



La Terre, Jupiter et Uranus en quelques chiffres

Nom	Diamètre équatorial (km)	Densité (eau = 1)	Demi grand axe	Excentricité	Période de révolution
Terre	12 756	5,52	149,6 10^6 km (1,0 ua)	0,0167	365 j 6 h 9 min
Jupiter	142 796	1,31	778,3 10^6 km (5,2 ua)	0,048	11 ans 314,84 j
Uranus	51 100	1,26	2875,0 10^6 km (19,2 ua)	0,047	84 ans 7,4 j

de trois transits minimum. Un chiffre qui a pour inconvénient, dans le cas présent d'une durée d'observation de 150 jours, de limiter logiquement l'étude à des planètes de périodes inférieures à 50 jours. Et de passer ainsi à côté d'éventuelles planètes analogues à la Terre.

D'où l'idée d'ajouter un critère chromatique en introduisant un prisme. Son but : vérifier si la baisse de luminosité mesurée résulte d'un transit planétaire ou de l'activité intrinsèque de l'étoile observée. En effet, l'oscillation de l'étoile n'a pas la même amplitude dans toutes les longueurs d'onde, alors qu'une planète passant devant son étoile capte toute sa lumière, ce qui produit alors un phénomène achromatique.

La combinaison de ces critères permet d'atteindre un niveau de confiance tel que l'on peut se passer des trois transits, l'apport des informations chromatiques permettant même de se limiter à un seul. Ainsi, les observateurs pourront détecter des planètes assez loin de leurs étoiles pour afficher une température raisonnable et peut-être abriter de l'eau liquide, principal biomarqueur des zones habitables.

La mission Corot a pour objectif de dépasser en précision la taille actuelle des planètes détectées (type Jupiter) et vise la catégorie Uranus ou Neptune, voire grosse Terre. Les prévisions annoncent l'observation de trois à huit grosses Terres chaudes de transit standard et d'un grand nombre de Jupiter chaudes. En passant sous la barre des trois transits, ce sont quelques Uranus tièdes et idéalement une grosse Terre "pas trop chaude" qui pourraient être repérées (Tableau *"La Terre, Jupiter et Uranus en quelques chiffres"*).

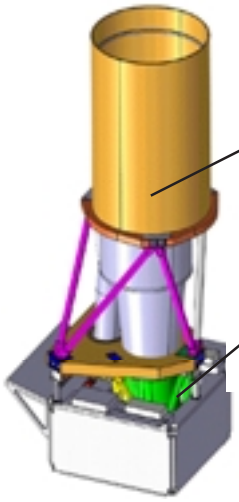
L'instrument

Comparé aux satellites géostationnaires moyens, affichant fréquemment une masse de quelques tonnes, Corot, à peine 600 kg, fait figure de benjamin. Pour se fournir en énergie et en puissance de calcul, il s'appuie sur une plate-forme baptisée Protéus qui assure également la communication du satellite avec la Terre. Cette même plate-forme a été utilisée pour la première fois par la mission d'océanographie Jason 1. Pour les opérations de télémesure, transmission des données au quotidien, Corot utilisera une antenne au sol. Située près de Madrid, à Villafranca, elle est mise à disposition par les Espagnols, collaborateurs du projet *(image 2.4)*.

Petit mais précis

La modeste taille de Corot ne doit pas "occulter" sa très grande précision. Optimisé pour piéger les bruits parasites lors de l'observation des étoiles, Corot est capable d'une précision de 0,5 seconde d'arc que l'on peut comparer au diamètre apparent de la Lune dans le ciel : environ 30 minutes d'arc. Précision qui revient à pointer un ballon de football à plusieurs dizaines de km pendant 150 jours *(encadré "Corot, précurseur des missions interférométriques")*.

La plate-forme Protéus portera un télescope de 3 mètres de hauteur (miroir primaire de 27 cm de diamètre). Il se compose d'une caméra, d'une case à équipements, d'une case à électronique et d'un logiciel de bord. À l'entrée du télescope, un baffle est installé dans le but de piéger tous les photons qui ne seraient pas émis par l'étoile étudiée. Spécificité de Corot :



La charge utile de Corot d'une masse de 300 Kg, est constituée :

- D'un télescope à miroirs qui permet de minimiser la lumière parasite.
- D'un objectif imageur dioptrique.
- De quatre détecteurs CCD de grandes dimensions.

- D'une électronique d'acquisition et de prétraitement de l'information photométrique à bord.
- D'une électronique de servitude pour les alimentations, la synchronisation et la thermométrie fine.
- D'une case à équipements, sur laquelle est montée le télescope et dans laquelle sont intégrés les électroniques ainsi que les moyens nécessaires à la régulation thermique de l'instrument.

Image 2.4

Corot, précurseur des missions interférométriques

Corot est un précurseur des futures grandes missions interférométriques. En tant que tel, il défrichera le champ d'observation et indiquera à ses " grands frères " dans quelle direction regarder. Darwin est l'une de ces futures missions d'envergure. C'est un coronographe interférométrique, qui fonctionnera comme un éteignoir d'étoiles. Ses satellites observeront l'étoile simultanément, en réglant précisément la distance les séparant. Les ondes émises par leurs télescopes s'annuleront et annuleront également la lumière de l'étoile, permettant ainsi de très bien discerner ce qui se trouve à côté. Toute la difficulté réside dans la précision des réglages et dans la qualité des optiques employée.

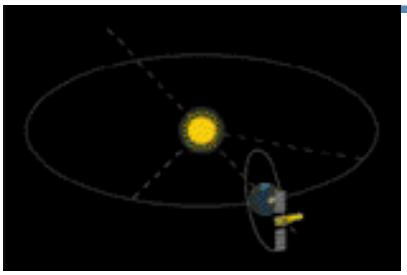


Image 2.5
COROT est placé par un lanceur dédié sur une orbite circulaire inertielle (inclinaison de 90°). Ce type d'orbite permet l'observation continue pendant plus de 150 jours de zones du ciel jamais cachées par la Terre, qui sont perpendiculaires à l'orbite. L'altitude de 826 km permet une répétition tous les sept jours du cycle des opérations.

sa précision d'atténuation, qui constitue également une première sur le plan technique. Puis se trouvent deux miroirs destinés à réfléchir successivement la lumière pour la diriger vers la caméra. Enfin, un prisme est monté devant les 2 CCD (cf. glossaire) du bloc focal dédié à la recherche d'exoplanètes. Les 2 autres CCD sont consacrés à la sismologie stellaire. Lié à ce même bloc focal, un dispositif électronique transmettra le signal à l'ordinateur central de Corot. Pour éviter toute fluctuation inopportune, les matériaux retenus satisfont à une grande stabilité thermique.

Orbite polaire…

L'orbite choisie pour la mission Corot est de type polaire. Elle a été préférée pour éviter les modifications du plan de l'orbite dues aux déformations de la Terre. Car c'est en conservant une orbite identique pendant toute la durée de la mission que la même zone de ciel pourra être précisément étudiée. Corot observera dans la direction de l'anticentre de la Galaxie pendant 150 jours, puis, après une rotation de 180°, une zone opposée du ciel vers le centre galactique, pendant 150 jours. Ceci afin d'éviter de subir l'inévitable contre-jour produit par l'entrée du Soleil dans le champ *(Image 2.5)*.
Corot sera opéré et calibré à partir d'un centre de contrôle et de mission situé au CNES à Toulouse. C'est là que seront également déterminées les zones du ciel à observer.
Le satellite est développé en coopération avec plusieurs laboratoires du CNRS. L'observatoire de Paris-Meudon sera chargé du traitement scientifique des données du programme de sismologie, et le Laboratoire d'astrophysique de Marseille sera chargé du traitement des données exoplanètes. L'Institut d'astrophysique spatiale d'Orsay, près de Paris, sera responsable de la distribution et du stockage de ces données à destination des astronomes. Le CNES agira en qualité de maître-d'œuvre. Alcatel Space Industries, à Cannes, fournira la plate-forme Protéus et intégrera l'instrument sur le satellite.
Pour le moment objet d'une collaboration européenne (Allemagne, Autriche, Belgique, ESA, Espagne, Estec, France et Italie), Corot pourrait bénéficier d'une antenne-sol supplémentaire proposée par le Brésil.

… cherche lanceur

La consultation pour le choix des lanceurs est encore en cours et sera arrêtée mi 2002. L'orbite polaire étant peu demandée, Corot doit trouver un lanceur spécifique. Ce sera soit un lanceur de type Soyouz, soit Rockot, ancien missile balistique SS20 recyclé en lanceur de satellite civil (*).
La phase industrielle de réalisation de l'instrument a démarré en mars 2001. Le lancement est prévu en 2005. Corot sera alors l'objet pendant un mois de manœuvres et de vérifications de bon fonctionnement avant d'être confié aux scientifiques. Ceux-ci disposeront alors de 2 ans et demi, durée nominale de la mission, pour accomplir les objectifs scientifiques fixés.

(*) NDLR : Corot sera mis en orbite par un lanceur Soyouz, en novembre 2005, en vol inaugural depuis Kourou.

Glossaire

CCD : l'œil électronique
Un capteur CCD (Charge Coupled Device ou Dispositif à Transfert de Charges) est une surface photosensible que l'on positionne par exemple au foyer d'un télescope, en lieu et place, par exemple, d'une pellicule photographique. Essentiellement constituée de silicium, la surface sensible produit un signal électrique proportionnel à l'intensité lumineuse incidente. La surface du capteur est constituée d'un réseau de minuscules cellules (de 7 µm à 30 µm) que l'on appelle photosite ou pixel. Ce dispositif équipe maintenant la plupart des caméras vidéo et se démocratise peu à peu dans le milieu de la photographie.

Magnitude
La magnitude d'un objet céleste est une mesure de sa brillance. L'échelle de mesure est logarithmique inverse. Une source lumineuse dix fois moins lumineuse qu'une autre possède une magnitude supérieure de 2,5. La magnitude maximale de visibilité à l'œil nu est environ de 6.

Sommes-nous seuls dans le système solaire ?

Science récente et pluridisciplinaire, l'exobiologie a pour champ d'étude la vie extraterrestre. Vaste quête à laquelle François Raulin apporte des éléments de réponse.

Bioastronomie, astrobiologie, exobiologie… Quelle que soit la terminologie employée, il s'agit toujours de couvrir un même domaine pluridisciplinaire, combinant astrophysique, physique, chimie et biologie. Son but : l'étude de la vie dans l'Univers. Et plus précisément : ses origines, sa distribution, son évolution et les structures et processus qui lui sont liés.

À partir du seul exemple connu, celui de l'origine de la vie sur Terre, les scientifiques recherchent dans le système solaire des traces d'activité organique, cette chimie de la matière carbonée susceptible de donner naissance à de nouveaux systèmes vivants.

Sur Terre

Formée il y 4,5 milliards d'années, la Terre primitive, malgré un environnement hostile, a pu produire de la matière organique complexe. Celle-ci s'est ensuite retrouvée dans les océans – une autre théorie avance qu'elle s'y serait formée directement – pour s'organiser en molécules capables de se répliquer, à la manière de l'ADN. Ces premières cellules ont donné naissance à des êtres pluricellulaires. Puis la vie s'est

Image 3.1
Stromatolithes. Formation rocheuse stratifiée produite par fossilisation répétée de tapis bactériens. Les stromatolithes pourraient être les vestiges des premières formes de vie sur Terre.

Image 3.2 - En quarantaine ! Apollo 11 au retour le 27 juillet 1969. Les astronautes entourés de leurs épouses à la base aérienne d'Ellington (crédits NASA).

ensuite développée hors du milieu liquide *(Image 3.1)*.
Un processus réalisé en seulement 4 milliards d'années. Et à peine 2 pour évoluer des premiers systèmes pluricellulaires à la vie macroscopique qui nous entoure aujourd'hui. Comment ? Grâce à l'évolution chimique de matériaux, molécules carbonées simples qui se sont complexifiées.
La théorie en vigueur au milieu de ce siècle voyait une origine atmosphérique à la vie sur Terre. Une hypothèse aujourd'hui abandonnée par les scientifiques qui s'accordent à penser que l'atmosphère de la Terre primitive était probablement constituée de gaz carbonique, incapable de produire d'importantes quantités d'acides aminés.
Les conditions favorables à la vie, dites de synthèses prébiotiques, seraient plutôt réunies dans les sources hydrothermales abyssales, probablement présentes en quantité sur la Terre primitive. Ces conditions, reconstituées en laboratoire, ont prouvé expérimentalement leur capacité à former des acides aminés.
C'est donc l'hypothèse la plus communément retenue aujourd'hui…

Origine extraterrestre

… Hypothèse qui n'en exclut par pour autant une autre : l'importation extraterrestre de matière organique ou panspermie. La Terre est actuellement bombardée de 20 à 30 000 tonnes de matériaux extraterrestres par an, sous forme de micrométéorites. Nombreuses sont celles qui contiennent de la matière organique. Une matière également apportée en quantité par les précédentes météorites et comètes, et susceptible d'avoir contribué à la chimie prébiotique sur Terre. Cette hypothèse est d'autant plus probante que le bombardement de la Terre primitive était cent, voire mille fois plus important qu'aujourd'hui ayant ainsi pu apporter, sur une durée de plusieurs millions d'années, une quantité de carbone supérieure à celle contenue dans la biosphère actuelle. Pour tester la véracité de cette théorie, les scientifiques doivent retrouver l'environnement primitif dont il ne reste aujourd'hui aucune trace directe sur notre planète. Par le biais de simulations en laboratoire, de modélisations sur ordinateur ou… en allant voir ailleurs.

Ailleurs…

L'exobiologie est née en tant que science lors de la préparation des missions Apollo. Parce que ramener des échantillons lunaires posait le problème de l'éventualité d'une contamination microbienne. Or la probabilité que des bactéries dangereuses résistent à l'environnement lunaire, dont l'hostilité et le taux d'irradiation sont bien connus aujourd'hui, était extrêmement faible. Astronautes et échantillons, mis en quarantaine, n'ont ramené de la Lune ni bactérie ni… composé organique complexe *(Image 3.2)*.
L'homme s'est alors tourné vers Mars. Une planète qui, dans l'imaginaire collectif, s'impose comme le modèle de la vie extraterrestre, symbolisé par les petits hommes verts. C'est donc tout naturellement sur son sol que les premières missions dédiées à la recherche de micro-organismes, les missions Viking, se sont déroulées. Elles n'ont mis en évidence aucune activité biologique. Mais elles ont prouvé qu'un liquide, vraisemblablement de l'eau, a coulé en abondance sur la planète rouge, il y a près de 4 milliards d'années. Et cela en se limitant à l'exploration des dix premiers centimètres de la surface martienne. *(Image 3.3)*
Or l'interaction entre l'atmosphère de Mars et sa proche surface semble telle qu'on suppose son sol gorgé de péroxydes, composés oxydants très actifs (tels l'eau oxygénée), destructeurs pour les composés organiques. Il faut donc chercher plus profondément, au moins un mètre sous la surface. En dépassant les premières couches, au-delà desquelles les oxydants doivent se raréfier, on peut espérer trouver de la matière organique, des reliques de systèmes vivants, voire des systèmes vivants actuels.

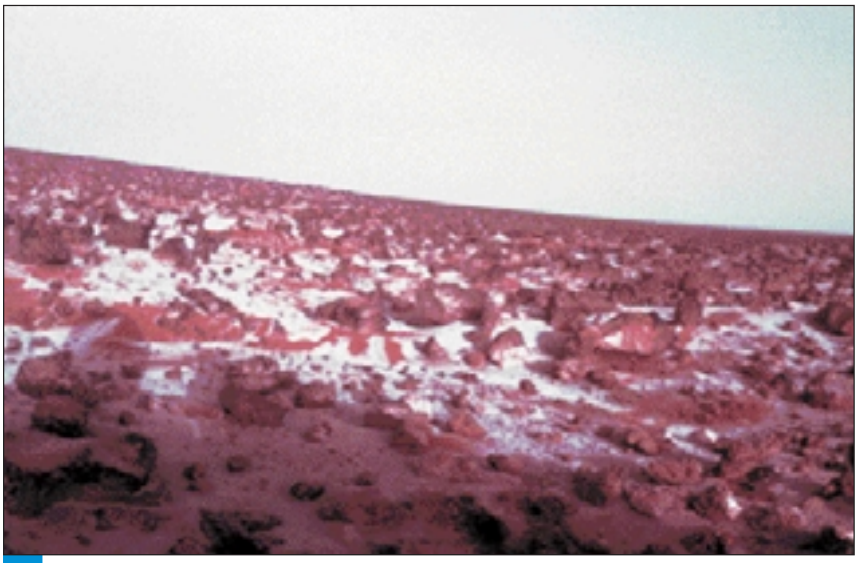


Image 3.3 - Sol martien couvert de givre au lever du Soleil. Image Viking Lander 2 (crédits NASA).

Livraison à domicile

Aller sur Mars n'est pas la seule méthode pour récolter de l'information sur sa constitution. Les météorites martiennes recensées sur Terre, une douzaine à ce jour, sont également une précieuse source de renseignements.
La plus célèbre d'entre elles, ALH 84001, a défrayé la chronique lorsque, en août

1996, les équipes américaines (menées par un chercheur maintenant célèbre, David Mc Kay) chargées de son étude, une dizaine travaillant conjointement, ont affirmé qu'elle renfermait des traces de vie. Annonce fort opportune à un moment où le programme martien s'essoufflait… et tellement révolutionnaire pour l'exobiologie, qu'il fallait raisonnablement la vérifier par d'autres expérimentations avant de s'enthousiasmer plus avant *(image 3.4)*.
Aujourd'hui, aucun autre élément n'est venu corroborer l'existence de trace de vie dans ALH 84001 et beaucoup attribuent la présence de certains minéraux, susceptibles d'être liés à une activité biologique, à une éventuelle contamination terrestre. C'est également le verdict pour NAKHLA, autre météorite étudiée par les mêmes équipes.
ALH 84001, NAKHLA… des objets qui, s'ils n'ont pas prouvé irréfutablement la présence de vie sur la planète rouge, ont relancé l'intérêt général pour le programme martien.

Image 3.5 - Traces d'écoulements à la surface de Mars. Cette image montre deux îles "profilées" qui se sont formées par la dérivation d'un réseau fluviatile autour de cratères de 8 à 10 km de diamètre. Ces cratères se situent près de l'embouchure de "Ares Vallis" dans "Chryse Planitia". L'eau s'écoulait du sud vers le nord (du bas vers le haut de l'image). La hauteur des dépôts de sédiments entourant les îles est d'environ 500 m. (Crédits Calvin J. Hamilton).

Image 3.4 - ALH 84001 Le cube à droite mesure 1cm de côté. (Crédits NASA).

De l'eau

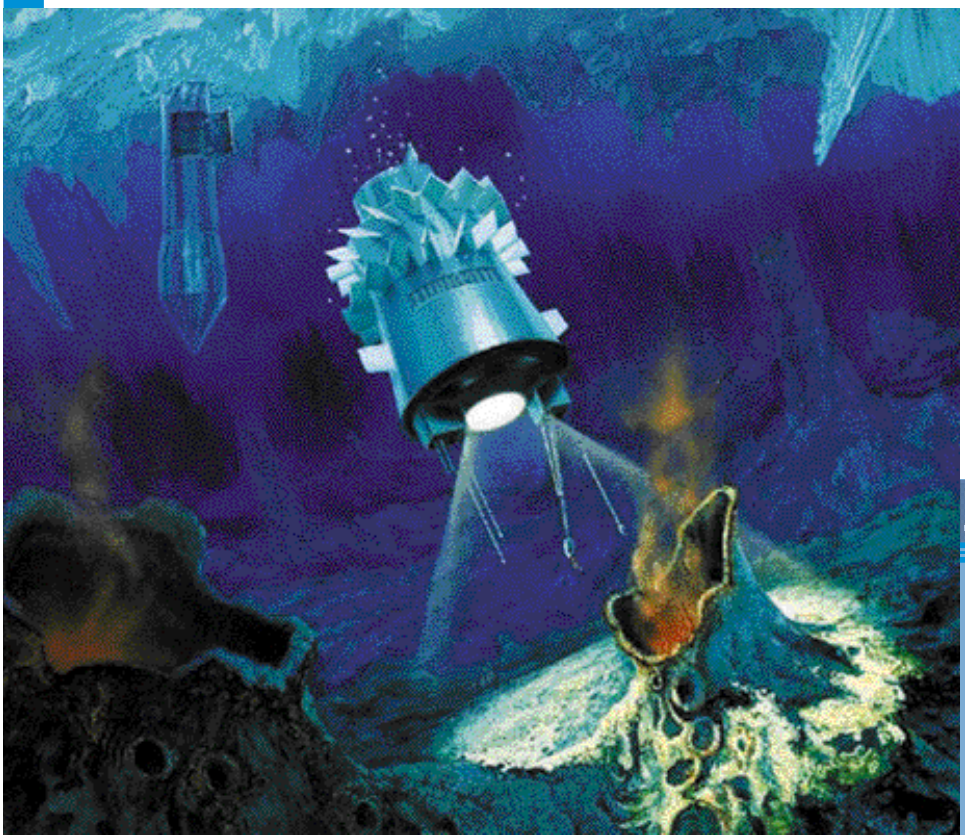
Les missions Mars Pathfinder et Mars Global Surveyor ont œuvré plus concrètement pour l'exobiologie, en ramenant des clichés de ce qui pourrait être d'anciens réseaux fluviatiles. Des réseaux relativement récents qui autorisent à penser que, à peine quelques millions d'années en arrière, l'eau a pu couler sur Mars et coule peut-être encore aujourd'hui dans ses profondeurs *(image 3.5)*.
La présence de cette eau liquide est un élément significatif dans la recherche de la vie extraterrestre, mais elle ne peut rien produire sans matière organique. De la matière que Mars a, à l'instar de la Terre, vraisemblablement reçue par les bombardements dont on a relevé les traces. Mais cette combinaison probable des ingrédients indispensables à l'apparition de la vie, eau plus matière carbonée, a-t-elle donné des résultats concrets ?

Au programme

Seule la poursuite d'ambitieux programmes d'exploration martienne pourra apporter une réponse. C'est le cas de Mars Odyssey 2001, arrivée sans encombre à la fin du mois d'octobre 2001, et qui commence à livrer des données. Ce simple orbiteur a comme objectif de l'une de ses trois missions la détection d'eau sous la surface et dans les premières couches du sol martien.
Au cours de la prochaine décennie, des modules d'atterrissage, dotés d'un système à même de renvoyer des échantillons, seront déposés sur Mars. La France devrait participer à l'envoi du collecteur de la balise renfermant les échantillons et à l'étude de ces derniers *(image 3.6)*. Une étude dont les risques potentiels remettent au goût du jour les craintes d'une éventuelle contamination. Avec une probabilité de risque bien plus importante que lors de la collecte lunaire.
D'ici là, Mars Express, mission envoyée par l'ESA en 2003, creusera le sol martien via son module d'atterrissage Beagle 2. L'analyse des échantillons prélevés sur un mètre de profondeur permettra l'étude organique du sol. Et des avancées probables en matière d'exobiologie.

Image 3.6 L'orbiteur de la mission Mars Sample Return en route vers la planète rouge (Crédits CNES).

Image 3.7 - Europa Ocean Explorer. Un projet du Jet Propulsion Laboratory pour l'exploration de l'océan (hypothétique) de Europe, satellite de Jupiter (Crédits NASA/JPL).



Titan : 3 minutes d'arrêt

Un autre satellite présente un intérêt remarquable pour l'exobiologie même s'il diffère des deux précédents.
Il s'agit de Titan, satellite de Saturne, deuxième satellite du système solaire par la taille mais surtout le seul qui possède une atmosphère dense. Tellement que Voyager, à seulement 2 millions de km de distance, n'a pu visualiser sa surface masquée par des myriades de particules d'aérosols en suspension.
Depuis Christiaan Huygens, Titan est bien connu des scientifiques. Dimensions, distance au Soleil, période, on a même pu mesurer la pression à sa surface par télédétection : 1,5 fois la pression à la surface terrestre, une densité encore accrue par la très basse température relevée (-180°C). On a relevé également la présence d'une troposphère, d'une tropopause et d'une stratosphère, ce qui équivaut à la structure de l'atmosphère terrestre.
Et si Titan ne possède ni eau liquide ni oxygène, son atmosphère est, comme celle de la Terre, composée majoritairement d'azote moléculaire. Voyager nous dit aussi que le méthane y est en quantité telle que les modèles prédisent la présence de nombreux composés organiques dus à sa photochimie. Vérifié par télédétection, 4 ou 5 d'entre eux semblent jouer un rôle dans le processus de chimie prébiotique terrestre.
Si on relève des différences notoires, de nombreuses analogies subsistent, permet-

Synthèse prébiotique

Pour amorcer le processus d'apparition de la vie, il faut réunir certaines conditions sine qua non :
- gradients de température importants (de +3°C à +300°C),
- minéraux capables de participer à une chimie active,
- présence de gaz.

Europe et Ganymède

Les satellites s'avèrent également des objets intéressants pour la recherche de vie extraterrestre dans le système solaire. C'est le cas d'Europe, satellite de Jupiter, qui a fait l'objet d'une exploration par la sonde Voyager, il y a une vingtaine d'années.
Les informations collectées ont permis un essai de modélisation de la structure interne du satellite. Sa croûte extérieure semble formée d'une couche de glace sur quelques km de profondeur, puis d'une couche d'eau liquide, probablement salée, sur plusieurs dizaines de km. Le tout au-dessus de silicates et d'un noyau en partie métallique.
Les observations de la sonde Galileo semblent confirmer ce modèle. La surface de glace d'Europe apparaît comme une banquise posée sur un sous-sol fluide. Il est probable qu'il s'agit d'un océan liquide, abritant peut-être de la matière organique collectée lors de la formation du satellite. Très diluée, elle a peu de chances de s'organiser mais si on envisage son éjection en provenance d'hypothétiques sources hydrothermales… on se rapproche alors du schéma terrestre. Même en l'absence d'atmosphère puisque celle-ci n'est pas indispensable au développement d'une chimie prébiotique, qui s'effectue dans l'eau.
Un autre satellite de Jupiter, Ganymède, le plus gros du système solaire, semble présenter une structure analogue. Et, bien que le domaine des satellites soit encore peu défriché, des missions sont à l'étude. Notamment le placement d'un orbiteur autour d'Europe, capable de repérer d'éventuels signes d'activité biologique à travers les failles de la surface, telles des émanations volcaniques avec gaz réducteurs *(image 3.7)*.

Silicates

Les silicates forment un groupe de minéraux très répandus dans les roches magmatiques et métamorphiques. L'écorce terrestre est constituée à 90% de silicates. L'élément de base est la molécule tétraédrique SiO_4.

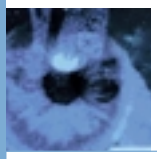


Image 3.8
Le module Huygens traverse l'atmosphère de Titan avant d'atteindre sa surface sous parachute (crédits ESA).

tant de considérer Titan comme une sorte de Terre primitive, " conservée dans un congélateur " pendant des millions d'années. C'est donc une source d'information idéale vers laquelle il est indispensable de se tourner.
Dans ce but, la NASA et l'ESA ont lancé conjointement la mission Cassini-Huygens en 1997. Le vaisseau Cassini se dirige vers Saturne et l'atteindra en juillet 2004. La mission est constituée d'un orbiteur et d'un vaisseau chargé d'instruments de mesures (mesures optiques, spectroscopie infrarouge, mesures d'ultraviolet). Le module Huygens, développé par l'ESA, comprend une sonde atmosphérique chargée de pénétrer dans l'atmosphère de Titan pour y réaliser des mesures in situ (analyse moléculaire, collecte d'aérosols) *(image 3.8)*.
Une fois larguée par Cassini, la sonde mettra environ 2 h 30 pour atteindre la surface de Titan. Elle ne survivra alors que 2 ou 3 minutes. 3 minutes qui devront être suffisantes pour récupérer des informations sur la composition chimique de la surface de Titan.

Dans l'intimité des comètes

L'exobiologie s'intéresse également aux comètes. Non pas pour détecter une éventuelle présence de vie dans leur noyau, mais parce qu'elles sont le siège d'une activité chimique carbonée complexe. Une activité génératrice de composés qui, si l'on considère la fréquence supposée des impacts cométaires sur la Terre primitive, ont peut-être directement participé à la chimie terrestre.
Lors du passage de la comète de Halley en 1986, les sondes Vega et Giotto ont détecté de la matière organique dans les poussières éjectées du noyau ou dans la queue. Les seules informations disponibles sont des clichés pris par Giotto, à seulement 500 km du noyau de Halley, et d'autres, rapportés par la mission américaine DS1, en provenance du noyau de la petite comète de Borrelly. Les indices relevés semblent affirmer la présence d'eau et de matière carbonée complexe. Mais nous en sommes encore au stade des hypothèses.
L'ESA prépare une mission très ambitieuse pour aller voir de plus près. Rosetta, c'est son nom, sera lancée en janvier 2003. Elle se dirigera vers une comète déjà sélectionnée, Wirtanen, qu'elle atteindra en 2011. Après l'avoir suivie pendant un an, elle larguera un petit module à la surface de son noyau. Il carottera le sol sur près d'un mètre et analysera les échantillons prélevés avec ses instruments de bord. Un défi technologique de taille, compte tenu de la quasi absence de gravité du noyau des comètes.
Toutes ces informations issues des nombreuses missions en cours et à venir, d'une importance capitale pour la recherche de la vie extraterrestre, restent avant tout le meilleur moyen de comprendre notre planète et les processus qui s'y développent.

DES QUESTIONS... DES REPONSES

A l'issue des conférences, une table ronde a permis aux trois intervenants de répondre aux questions de l'auditoire afin de préciser certains aspects des connaissances actuelles.

Est-on sûr que les planètes de type Jupiter chaudes sont entièrement gazeuses ?
N'y a-t-il pas de possibilité de compromis avec un intérieur en partie solide ?
Si, comme pour notre Jupiter, ces planètes se sont formées très près de leur étoile alors leur noyau peut s'avérer anormalement riche en éléments lourds, mais pas rocheux. De plus, leur très basse densité (environ 0,3) est celle que l'on retrouve naturellement chez les planètes géantes de type gazeux.

Pourquoi, dans les exosystèmes, les planètes géantes migrent-elles vers leurs étoiles et pourquoi n'assistons-nous pas à ce type de phénomène autour de notre Soleil ? La présence de planètes telluriques perturbe-t-elle le rapprochement et la migration des planètes géantes ?
Les planètes telluriques sont trop peu massives pour perturber l'orbite des géantes, dont elles ne font que subir la loi. Et dans l'hypothèse où il y ait eu des planètes telluriques à l'intérieur de systèmes tels 51 Pégase, elles auraient probablement été éjectées hors du système.
Néanmoins, en ce qui concerne le système solaire, nous possédons des observations qui semblent montrer que Jupiter a migré. Comme la détection de gaz rares dans sa composition, tels l'argon, le néon et l'azote, gaz qui ne peuvent avoir été contenus dans les glaces de sa formation. Reste à comprendre ce qui a arrêté sa migration. Sachant que la formation simultanée de plusieurs planètes génère des sortes de corridors, on peut imaginer que certains d'entre eux absorbent les résonances des autres planètes, empêchant leur migration. Mais cela reste une hypothèse.

Les planètes géantes évoquées tournent très vite. Elles sont donc logiquement très proches de leur étoile et subissent une très forte gravité et des effets de marée. De fait sont-elles déformées ?
Parmi les planètes découvertes, la plus proche est 25 fois plus près de son étoile que la Terre du Soleil.
Les effets de marée n'ont pas d'influence notable, si ce n'est sur les changements d'orbite... Mais à une échelle de temps de plusieurs milliards d'années.

Dans quel intervalle de distance (par rapport à leur étoile) ont été découvertes les exoplanètes ?
Les planètes à 3 jours de période sont à 4 centièmes d'unité astronomique. Et la plus longue période connue est de près de 7 ans, soit un demi-grand axe de 4,5 ua. Un maximum qui correspond à la durée des campagnes de mesure. Plus on cumulera les observations, plus on découvrira des planètes à périodes longues.

Privilégie-t-on des zones particulières de ciel pour la recherche d'exoplanètes ? Les cherche-t-on proches d'étoiles du type de notre Soleil, dans l'espoir de détecter des systèmes similaires ?
Les étoiles recherchées sont sélectionnées dans un volume donné, à moins de 150 années-lumière et entre deux masses précises. Nous sommes limités dans les grandes masses à 1,3 fois la masse du Soleil car, au-delà, les étoiles tournent trop vite et mesurer leur vitesse devient difficile. Les étoiles légères posent aussi des problèmes techniques car leur luminosité intrinsèque est tellement faible qu'il est difficile de collecter assez de photons. Ce n'est donc pas par anthropocentrisme que les étoiles étudiées sont analogues au Soleil. C'est simplement un hasard si le Soleil se trouve dans la catégorie des vitesses mesurables.

Pourquoi le satellite Corot n'est-il pas lancé par Ariane ?
Pour une question de coût. Un seul lancement Ariane coûterait le double du budget du projet Corot. De plus, Ariane est adaptée au lancement de gros satellites et il faudrait trouver un satellite compagnon. C'est également le cas pour le lanceur Soyouz.

La mission Corot est-elle complètement acceptée ou son calendrier est-il encore aléatoire ?
La mission a été complètement acceptée en octobre 2000. L'ensemble des coopérations est formalisé. Les seuls aléas possibles sont d'ordre technique, inhérents au développement d'un satellite.

Corot sera-t-il à la recherche d'exoplanètes ce qu'est Hubble Space Telescope à la cosmologie ?
Corot est un précurseur, mais d'autres vont suivre. L'ESA prévoit le lancement d'Eddington, une mission de type Corot, avec un satellite de taille supérieure. Nos amis américains, et néanmoins concurrents dans ce domaine, enverront la mission Kepler peu après le lancement de Corot. Puis ce sera la mission européenne Darwin. Une mission de plus grande ampleur, avec un interféromètre d'une telle précision qu'il permettra de détecter de petites planètes.
Le satellite Corot est un défricheur. Il sera le premier capable de détecter les satellites des planètes, rapportant ainsi des données précieuses pour comprendre les variations de périodes dans les transits.

DES QUESTIONS... DES REPONSES

Comment expliquer des phénomènes physiques à l'intérieur des étoiles à partir de mesures de lumière ?
Ces phénomènes physiques aboutissent à des variations de luminosité, par des phénomènes dont les équations sont connues. Il est donc possible, en inversant ces équations, de détecter ces phénomènes en mesurant ces variations.

Notre connaissance de la vie sur Terre est encore très partielle. On découvre aujourd'hui des niches insoupçonnées il y a 20 ans, notamment dans les grandes profondeurs terrestres. On apprend ainsi que la vie peut se développer et résister dans des conditions extrêmes. Et l'on en conclut qu'il est trop tôt pour affirmer qu'il n'y a pas de vie sur les objets cités, malgré leur environnement hostile. Alors, quelles chances de trouver des traces de vie, présente ou passée, sur Mars ?
Les résultats envoyés par les missions Viking étaient ambigus, certains positifs et d'autres négatifs. Et ce sont ces derniers qui ont été privilégiés.
Avec les missions Viking, l'homme se posait pour la première fois la question de chercher la vie ailleurs. Depuis les techniques ont évolué et les nouvelles méthodes, moins ambiguës, donneront des résultats plus fiables. De plus, il ne faut pas oublier que Viking n'a exploré que les 10 premiers centimètres de la surface de la planète rouge. L'espoir réside donc dans les profondeurs de Mars.

Dans le système solaire, la zone de vie semble se limiter à une zone étroite autour de l'orbite terrestre. François Raulin, en 1994, vous écriviez : "La Terre est probablement la seule planète habitée du système solaire". Qu'en pensez-vous aujourd'hui ?
Il ne faut pas être catégorique mais, si l'espoir existe bel et bien, les probabilités restent faibles. Si la vie est présente et active quelque part, on devrait voir des traces de son environnement, elle devrait " transpirer" dans l'atmosphère. Or nous n'avons encore relevé aucune indication claire. Mais cela ne veut pas dire qu'il n'y a pas eu une vie passée, dont il semble plus probable de mettre les traces en évidence.

Pourra-t-on un jour observer littéralement des planètes autour d'étoiles ?
Corot et Eddington pratiqueront d'abord l'observation indirecte avec la méthode des transits. Puis la flottille de satellites de Darwin, placés à l'orbite de Jupiter, permettra l'observation directe grâce à l'interférométrie. Darwin est une mission ambitieuse dont le but n'est pas seulement de voir des planètes, ce qui serait un résultat trop cher payé. Son intérêt est l'analyse de la composition chimique de l'atmosphère des planètes via la lumière émise par celles-ci. On découvrira peut-être que certaines ont une atmosphère anormalement riche en oxygène, de l'ordre de 20 %... Ce qui pose la question de savoir si cet oxygène peut être fabriqué par autre chose que des organismes vivants, et en fait la problématique principale de Darwin. Or, actuellement, on ne connaît pas de mécanisme autre que la vie capable de produire une telle quantité d'oxygène.

Quelles seront demain les nouvelles méthodes de détection des exoplanètes ?
Les spectrographes vont être améliorés, mais ils ne pourront dépasser une précision de 1 m/s (actuellement de l'ordre de 3m/s). Au-delà, ils se heurtent à des problèmes de définition dus aux variations des phénomènes chaotiques à la surface des étoiles.
L'interférométrie opérera depuis le sol avec l'installation du mont Paranal, et depuis l'espace avec un interféromètre américain prévu pour 2009. D'une précision remarquable, il sera capable de détecter l'oscillation d'une étoile légère (du tiers de la masse du Soleil) perturbée par une Terre à une distance d'une unité astronomique et vue à 10 années-lumière. Il y a également de nombreuses autres missions d'interférométrie en prévision. Et dans 10 ou 15 ans, grâce à Corot, Eddington, Sim ou Gaïa, ce ne sont plus 74 exoplanètes qui seront connues mais bien plus de 10 000.

Que devient le projet SETI, à l'écoute d'une vie intelligente ?
SETI saute toutes les étapes intermédiaires concernant l'origine, la multiplication et la diversité de la vie et se pose directement la question de savoir s'il existe une vie intelligente, techniquement avancée et désireuse de communiquer.
C'est ce qui rend la communauté scientifique réticente face à cette démarche, dont on ne peut raisonnablement estimer les chances de succès. Or les responsables de ce projet sont de véritables professionnels ayant validé leurs méthodes, notamment en détectant des satellites militaires cachés. Malheureusement, ce projet connaît une certaine désaffection en Europe.

Nous voici prêts à être témoins des prochaines avancées dans le domaine des exoplanètes, mais sommes-nous préparés à découvrir la vie ?
Avec ALH 84001, l'homme a déjà été confronté à une (fausse ?) annonce de découverte de vie microscopique. Mais il ne s'agissait ni de vie intelligente, ni de vie macroscopique. Dans ce dernier cas, une étude sociologique révèle que certains considéreraient cette découverte comme une réponse philosophique à notre place dans l'Univers et d'autres auraient un sentiment de peur pensant que l'exocivilisation découverte, plus avancée que la nôtre, chercherait forcément à nous dominer.
La découverte de signes d'une vie clairement intelligente ne sera probablement pas ébruitée tout de suite, laissant aux scientifiques le temps de vérifier et revérifier les données. Et l'annonce en sera faite probablement très prudemment.

Sites internet

astro.estec.esa.nl/IRSI/
athene.as.arizona.edu:8000/caao/caao/planets.html
cfa-www.harvard.edu/afoe/espd.html
exoplanets.org
obswww.unige.ch/udry/planet/planet.html
origins.jpl.nasa.gov
http://www.astrobiology.com
http://www.astrsp-mrs.fr/projets/corot/pagecorot.html
http://www.cieletespace.com
http://www.cite-sciences.fr
http://www.cnes.fr
http://www.cnrs.fr
http://www.construire.ch/SOMMAIRE/0106/06entre.html
http://www.estec.esa.nl/spdwww/h2000/html/index.html
http://www.larecherche.com
http://www.lifeinuniverse.com/liu.html
www.lisa.univ-paris12.fr/
http://www.obspm.fr/encycl/encycl.html
http://www.pourlascience.com
www-projet.cst.cnes.fr:8060/COROT/Fr/index.html
http://www.setileague.org
http://www.seti-inst.edu
setiathome.ssl.berkeley.edu

Bibliographie

Brack A. et F. Raulin, L'évolution chimique et les origines de la vie**,** éditions Masson, collection "Les grands Problèmes de l'Evolution", 1991.
Clark S., Extrasolar planets : the search for new worlds, éditions Wiley-Praxis, 1998.
De Duve C. , Poussière de vie, une histoire du vivant, traduction française, éditions Fayard, 1996.
Drake F., D. Sobel, Is Anyone Out There? The Scientific Search for Extraterrestrial Intelligence, Delacorte Press, 1992.
Extraterrestrials – Where Are They?, sous la direction de **B. Zuckerman et M.H. Hart**, Cambridge University Press, 1995.
Extraterrestrials : Science and Alien Intelligence, sous la direction d'**Edward Regis, Jr.**, Cambridge University Press, 1985.
Fiebag J., Mars, planète de la vie, éditions Hachette, collection sciences, 1998.
Frankel C., La vie sur Mars, éditions Le Seuil, 1999.
Goldsmith D., T. Owen, The Search for Life in the Universe, Addison-Wesley, 1992.
Heidmann J., Intelligences extraterrestres, Odile Jacob, 1992.
Heidmann J., A. Vidal-Madjar, N. Prantzos, H. Reeves, Sommes-nous seuls dans l'Univers ?, éditions Fayard.
Les terres célestes, dossier hors-série Pour la science, avril 1999.
Mayor M., P.Y. Frei, Les nouveaux mondes du Cosmos. A la découverte des exoplanètes, éditions Le Seuil, 2001.
Raulin F., J. Schneider et F. Raulin, La Bioastronomie, PUF, collection "que-sais-je ?", 1997.
Raulin F., La vie dans le cosmos, Flammarion collection "Dominos", 1994.
Raulin F., L'apparition du vivant, CSI/Press Pocket , collection "Explora", 1991.
Shklovskii S., C. Sagan, Intelligent Life in the Universe, Holden-Day, 1966.
Shostak S., Sharing the Universe : Perspectives on Extraterrestrial Life, Berkeley Hills Books, 1998.
Vidal-Madjar A., Il pleut des planètes, éditions Hachette, 1999.

INFORMATIONS PRATIQUES

Le *Cahier de l'espace* est un document de référence sur un thème de l'actualité du domaine spatial, réalisé à l'issue de chaque session des Mercredis de l'information. Il est diffusé dans un délai de quelques mois après la session de conférence.
Dans la même collection :
- Spot 5 et Météosat : des yeux en orbite (Octobre 2002)
- L'Homme extraterrestre (Décembre 2002)
- Lanceur et propulsion du futur (Février 2003)

L'Ecole de l'espace, les Mercredis de l'information sont des conférences trimestrielles qui se déroulent au centre international de conférences de Météo-France (42, avenue G.Coriolis, 31057 Toulouse Cedex 1), sortie n° 27 (Cugnaux-La Cépière) de la rocade ouest.
Pour participer à l'Ecole de l'espace :
CNES, Département Education-Jeunesse
18, av. Edouard Belin, 31401 Toulouse Cedex 4
Martine Langlade 05 61 27 47 94

La Cité de l'espace (située au bord de la rocade Est de Toulouse – sortie n° 17) constitue le complément idéal à ces conférences. Les enseignants intéressés peuvent profiter de leur venue à Toulouse pour participer, le mercredi matin, à une visite gratuite de la Cité de l'espace.
Renseignements auprès du service éducatif de la Cité de l'espace (05 62 71 56 12).

Le département Education-Jeunesse du CNES donne à tous les enseignants (de l'école au lycée), la possibilité de se former aux techniques spatiales et à l'utilisation des outils expérimentaux.

Organisation des conférences :
Sébastien Rouquette
(département Education-Jeunesse, CNES),
Jean-Pierre Penot
(département Publications, CNES).

Comité de rédaction des Cahiers de l'espace :
Natacha Fradin, journaliste,
Jean-Pierre Penot,
Sébastien Rouquette.

Comité de relecture :
Frédéric Bonneau (CNES),
Pierre Bonnefond (CNES),
Michel Mayor (Observatoire de Genève),
François Raulin (CNRS),
Anne Serfass-Denis
(département Education-Jeunesse, CNES),
Jean-Pierre Penot,
Sébastien Rouquette,
Emmanuel Sautjeau (CNES).

Pour retrouver les *Mercredis de l'information*, Les *Cahiers de l'espace* et toutes les activités éducatives proposées ou soutenues par le CNES visitez le site Internet jeunesse du CNES : www.cnes-edu.org.

Une publication du département Education-Jeunesse (CNES) avec le soutien de :