

## Programme interdisciplinaire du CNRS « Origines des planètes et de la vie »

Dossier conférence de presse - 7 décembre 2006



**Contacts presse :**

- **INSU-CNRS** : Philippe Chauvin  
T : 01 44 96 43 36, [philippe.chauvin@cns-dir.fr](mailto:philippe.chauvin@cns-dir.fr)
- **CNRS** : Claire Le Poulennec  
T : 01 44 96 49 88, [claire.le-poulennec@cns-dir.fr](mailto:claire.le-poulennec@cns-dir.fr)

<b>Programme de la conférence de presse</b> .....	<b>2</b>
<b>Etat des lieux</b> .....	<b>4</b>
Observations et modèles astrophysiques .....	4
L'origine de la vie .....	6
L'analyse de la matière extraterrestre en laboratoire .....	7
L'apport des expérimentations de laboratoire .....	7
Le point de vue des sciences humaines .....	8
<b>Objectifs scientifiques</b> .....	<b>9</b>
<b>Objectifs technologiques et retombées</b> .....	<b>11</b>
<b>Démarche nationale sur le sujet</b> .....	<b>11</b>
<b>Enjeux et Atouts du CNRS</b> .....	<b>13</b>
Les enjeux.....	13
Les atouts .....	13
<b>Intervenants</b> .....	<b>15</b>
<b>Images</b> .....	<b>17</b>

## Programme de la conférence de presse

- **Arnold Migus**, directeur général du CNRS,  
*Les programmes interdisciplinaires du CNRS*
- **Dominique Le Quéau**, directeur de l'INSU-CNRS,  
*Le programme OPV et le plan stratégique de l'INSU*
- **Anne-Marie Lagrange**, directrice du programme OPV,  
*Conclusions scientifiques du colloque OPV*
- **Magali Deleuil**, maître de conférence à l'Université de Provence Aix Marseille 1, chercheur au Laboratoire d'astrophysique de Marseille  
*La recherche d'exoplanètes avec le satellite COROT*
- **Odile Dutuit**, chercheur au Laboratoire de chimie physique d'Orsay,  
*La chimie et les origines des planètes et de la Vie*
- **Marie-Christine Maurel**, professeur à l'Institut Jacques Monod,  
*Définition de la vie*
- **Stéphane Schmitt**, chercheur au laboratoire Recherches épistémologiques et historiques sur les sciences exactes et les institutions scientifiques,  
*Origines des planètes et de la Vie : le point de vue des sciences humaines et sociales*

L'existence d'autres « Mondes » est une question ancienne et fondamentale pour l'humanité. Cette question, formulée de manières très différentes selon les époques et les contextes, est déclinée aujourd'hui par les scientifiques de façon précise. Comment les systèmes planétaires se forment-ils et évoluent-ils ? Quelles sont les caractéristiques des systèmes planétaires extra-solaires ? Quels sont les conditions physico-chimiques et les processus à l'origine de la vie ? Existe-t-il des traces de vie extraterrestre passée sur des planètes du système solaire ? Quelles signatures de vie pouvons-nous détecter dans les systèmes planétaires extra-solaires ?

Les outils d'investigation (observations astrophysiques, exploration de la Terre et du Système Solaire, expériences de physico-chimie et de biologie en laboratoire, modélisation) progressent aujourd'hui très vite et il est admis que ces questions trouveront des réponses ou au moins d'importants éléments de réponse, dans les années à venir. Nous sommes donc à l'orée d'une étape fondamentale de la connaissance dans ce domaine. Etant donné les enjeux, qu'ils soient scientifiques ou simplement liés à la curiosité humaine, les "origines des planètes et de la vie" représentent aujourd'hui un thème prioritaire dans la plupart des communautés scientifiques et constituent un domaine particulièrement concurrentiel au niveau mondial. La communauté française et le CNRS en particulier possèdent des atouts forts pour se situer à la pointe de ce domaine qui fait appel aux compétences des physiciens et chimistes de la matière, des biologistes, des physiciens des Sciences de la Terre et des astrophysiciens, mais qui suscite également des questions de sciences humaines. Si ces recherches sont très fondamentales, elles font fortement appel à des développements technologiques très innovants, qui peuvent servir d'autres communautés ou même le domaine industriel.

## Etat des lieux

### **Observations et modèles astrophysiques**

Jusqu'aux années quatre-vingt, le seul système planétaire connu était le système solaire. Les seules observables susceptibles d'étayer les théories de formation du système solaire venaient donc de :

- l'étude de la distribution de la matière (planètes comètes, poussière) dans notre système solaire, qui donne des contraintes sur sa formation et son évolution dynamique,
- l'étude physico-chimique des météorites et des comètes (objets très primitifs), qui apporte de précieux renseignements sur les conditions physiques et chimiques qui régnaient lors de sa formation,
- les études de la matière solide des planètes telluriques ou celles de leur atmosphère et l'étude de l'atmosphère des planètes géantes, qui permet de caractériser la composition de la nébuleuse solaire à l'origine du système solaire. Ces études apportent des contraintes sur son état primitif et son évolution, et dans certains cas sur les conditions physico-chimiques qui ont permis l'apparition de la Vie.
- L'étude de la Terre primitive (roches et minéraux reliques du premier milliard d'années), et de Mars comme analogue de celle-ci, pour caractériser le berceau de la vie.

Les études ont permis de proposer deux grands modèles de formation des planètes : celui de l'accrétion et celui de l'effondrement. Les observables issues de l'étude du Système Solaire représentaient toutefois une limitation importante (un seul cas observé, dans un état d'évolution donné), elles étaient donc peu susceptibles de révéler, le cas échéant, la diversité des systèmes planétaires.

Les années 1980 ont permis d'amorcer l'exploration de la diversité des systèmes planétaires, grâce à la découverte, puis à l'étude des disques (proto)-planétaires. Ces disques représentent les stades variés de la formation des systèmes planétaires, depuis leur formation au sein du milieu inter-stellaire jusqu'à leur maturité. La composition de ces disques protoplanétaires, (gaz et corps solides depuis les grains sub-microniques jusqu'aux planétésimaux de taille macroscopique) évolue continûment lors de la formation de l'étoile et éventuellement son cortège de planètes. La mise en commun des observations et des connaissances des propriétés des grains de poussière et du gaz a permis de commencer à explorer les propriétés physiques de la matière dans ces disques, puis d'en déduire des informations sur les planétésimaux, briques de base de la formation des planètes. Plus en amont, le milieu interstellaire, constitué de grains de taille sub-micronique et de gaz, dans lequel se forment les systèmes stellaires, était étudié avec une précision croissante, toujours grâce à l'apport conjoint de la Physique de laboratoire et de l'astrophysique.

Depuis trois décennies, des progrès analytiques exceptionnels, largement motivés par le retour des échantillons lunaires, ont permis l'analyse fine (éléments traces,

isotopes) de la matière extraterrestre ramenée par les missions spatiales ou arrivant sur Terre sous forme de météorites et de particules interplanétaires. Le cadre chronologique de la formation du système solaire a ainsi été mis en place grâce aux radioactivités à longue période qui ont permis de mesurer l'âge de ce système, et aux radioactivités à courtes périodes qui ont permis une précision relative entre différents processus de formation planétaire de l'ordre de quelques milliers d'années, pour des événements qui se sont produits il y a 4,56 milliards d'années. Les résultats sont spectaculaires : les phases majeures d'accrétion du soleil et des planètes, ainsi que la différenciation de celles-ci en planètes possédant un noyau, un manteau, une atmosphère, se sont effectuées rapidement, en quelques millions à quelques dizaines de millions d'années. Des apports de matière fraîchement synthétisée dans des étoiles proches, des phases d'irradiation intense du disque par le soleil jeune, et un brassage global de la matière entre le système solaire interne et les régions les plus reculées, ont été mises en évidence. En parallèle, les travaux de modélisation de la formation de systèmes planétaires, et du système solaire en particulier, ont pleinement confirmé (i) la chronologie rapide de la formation, et (ii) le brassage de grande ampleur initial. La modélisation permet de comprendre les lois de répartition de la matière dans le système solaire et d'établir quantitativement la balistique du système solaire naissant qui a modelé les corps planétaires (exemple : le choc lunaire) et les orbites planétaires. Ces évolutions, notamment le grand bombardement tardif qui aurait affecté les planètes terrestres 800 millions d'années après la naissance du système solaire, mais aussi la chute d'objets beaucoup plus petits potentiellement vecteur de matière organique, ont probablement modelé les conditions d'apparition de la vie sur Terre.

En 1995 fut détectée de manière indirecte la première planète géante extrasolaire en orbite autour d'une étoile comparable au Soleil, à partir d'observations faites à l'Observatoire de Haute-Provence. Depuis, plus de 150 planètes géantes dans 130 systèmes planétaires ont été détectées, toujours par voie indirecte, autour d'étoiles de type solaire. Les premières études statistiques sur les caractéristiques orbitales de ces systèmes planétaires révèlent une étonnante diversité et, jusqu'à présent, peu de points communs avec notre système solaire. Les modèles et les simulations numériques doivent maintenant expliquer cette diversité. Ainsi, récemment, des modèles de migration ont-ils permis d'expliquer la présence de planètes géantes très près ( $< 0,1$  unité astronomique de leur étoile). La détection directe des planètes, qui permet in fine de déterminer, moyennant l'utilisation de modèles d'évolution, la masse de ces planètes, leur température et la composition chimique de leur atmosphère, requiert des performances instrumentales non disponibles aujourd'hui. Seules les naines brunes et éventuellement les planètes géantes encore jeunes sont à portée d'observations, comme le montrent les succès récents d'équipes françaises et américaines.

Les modèles physiques d'évolution des atmosphères planétaires sont très récents. Ils font appel à des bases de données en thermochimie et en physique moléculaire qui doivent être aussi complètes et précises que possible et à des codes numériques très lourds. Ils permettent aujourd'hui de prédire les spectres et la photométrie des planètes géantes en fonction de leur masse et de leur âge, sous des hypothèses toutefois encore simplificatrices. En retour, les observations permettent de tester et

d'affiner ces modèles. Il y a donc des allers-retours permanents entre observations et modélisations de ces objets.

## L'origine de la vie

Les conditions et les processus à l'origine de la vie sont encore très mal connus. Comment les molécules organiques s'organisent-elles pour former des structures complexes, briques de la vie? La dernière décennie a révélé une diversité inattendue dans les systèmes planétaires extra-solaires ; la vie peut-elle également se révéler diverse dans l'Univers ?

De la même façon que pour les débuts des études de la formation planétaire, l'étude de l'émergence de la vie s'est focalisée sur la vie actuelle et fossile sur Terre, qui reste pour l'instant le seul site de vie dont nous soyons certains. L'étude de la vie terrestre fournit une référence indispensable non seulement pour définir la vie, aussi bien au niveau fonctionnel que structurel, que pour appréhender l'étendue de son domaine et éventuellement extrapoler la vie terrestre à d'autres environnements. Cette approche nécessite aussi d'avoir une vision claire de l'environnement primitif terrestre et des premières formes de vie qui sont apparues sur Terre.

La détermination des processus qui ont permis l'apparition de la vie sur Terre est bien sûr la question clé de ce domaine. En particulier, il s'agit de comprendre les mécanismes et les conditions physico-chimiques qui permettent aux structures moléculaires de former des systèmes vivants. Aujourd'hui l'apparition de la vie sur notre planète semble être le résultat, il y a environ 4 milliards d'années, d'une longue évolution chimique de matériaux organiques en présence d'eau liquide. Cette chimie pré-biotique aurait fait intervenir la matière organique apportée sur Terre par les météorites, micrométéorites et comètes, et le façonnage se serait produit au voisinage des sources hydrothermales sous-marines présentes dans le milieu terrestre primitif. Les premiers systèmes auto-reproductifs (composés qui forment des structures moléculaires organisées capables d'assembler d'autres molécules pour générer des structures à leur image) – auraient évolué vers un monde ARN avant l'apparition de « LUCA » (Last Universal Common Ancestor), la cellule ancestrale commune à tous les êtres vivants sur Terre aujourd'hui.

La question de la Vie peut aujourd'hui être abordée dans des sites encore plus variés grâce aux avancées techniques dans le domaine spatial. L'exploration in situ de Mars, qui a certainement connu dans son passé la présence d'eau sur son sol, et très récemment celle de Titan, où s'effectue une chimie organique complexe, donneront des éléments importants sur les conditions de développement de la vie. Plus loin de nous, la détection de molécules de plus en plus complexes dans le milieu interstellaire montre qu'une riche chimie peut se développer dans ces milieux diffus. Un rôle de ces molécules interstellaires dans l'apparition de la vie sur les planètes (apport de molécules complexes - ou plus ? - lors de la formation des planètes ou au cours de leur évolution) est envisagé aujourd'hui.

Les progrès conjoints en astrobiologie et en astronomie permettent d'envisager de chercher des signatures de vie sur des exo-Terres d'ici 15 ans. Un préalable est la

définition et la caractérisation de la zone "d'habitabilité" (terme un peu impropre) au sein d'un système planétaire, zone dans laquelle on pense que les conditions physiques sont favorables à l'émergence de la vie.

### **L'analyse de la matière extraterrestre en laboratoire**

Les météorites nous permettent d'avoir accès aux objets les plus primitifs du système solaire. Il est possible d'en extraire des grains témoins de la nucléosynthèse stellaire avant la formation de notre système solaire, des particules des premières phases condensées à haute température, et même des argiles formées à la température de l'eau liquide sur les corps parents des météorites. Il est désormais possible d'explorer la composition de la matière avec une résolution spatiale de quelques nanomètres, et sur des échantillons de matière infimes. Depuis l'ère Apollo, les progrès analytiques ont permis d'accroître la limite de détection analytique de plusieurs ordres de grandeur, réduisant ainsi la taille nécessaire d'échantillonnage du même facteur. S'il fallait en 1970 typiquement un gramme de matière pour une analyse de traces, les quantités nécessaires actuellement sont de l'ordre du microgramme, voire du nanogramme. De plus, l'analyse in situ, par sonde ionique, ou rayonnement X dur, permet d'investiguer l'hétérogénéité de la matière à l'échelle inframicrométrique. Ces avancées extraordinaires permettent désormais de limiter la taille des échantillons retournés par des missions spatiales à quelques microgrammes, alors que les missions Apollo avaient ramené 380 Kg de Lune. Ces progrès ont mis en évidence l'extrême complexité de la matière météoritique, y compris sa composante organique. Cette complexité est notamment présente dans les particules interplanétaires, vecteurs potentiels de molécules organiques sur Terre. Ces systèmes analytiques permettent désormais d'analyser directement la composition du Soleil via le retour d'échantillons irradiés (mission NASA Genesis) et des comètes via le retour de grains cométaires (mission NASA Stardust). Ces résultats spectaculaires bouleversent les modèles de formation des grains dans le milieu interstellaire et dans le système solaire naissant. La communauté française est extrêmement active dans le domaine et se situe au premier plan hors USA.

### **L'apport des expérimentations de laboratoire**

Les données physico-chimiques relatives au milieu interstellaire, aux disques, aux atmosphères des exo-planètes ou aux planètes de notre système solaire concernent les constituants de ces milieux, particules solides comme les grains et/ou les atomes et les molécules, éventuellement complexes; elles sont de nature essentiellement spectroscopique. Plus les grains ou les molécules sont complexes, moins leurs signatures spectrales sont connues. Pour interpréter correctement les observations, il est souvent nécessaire de réaliser des expériences de physico-chimie en laboratoire dans lesquelles on essaie de s'approcher des conditions – très particulières - existantes dans les milieux étudiés. Ainsi, il s'agit par exemple de réaliser en laboratoire le spectre de glaces dans des états non observés naturellement sur Terre. En laboratoire sont aussi étudiées des réactions gaz-grains dans des conditions proches de celles du milieu inter-stellaire ou encore des réactions gazeuses dans des conditions qui pourraient ressembler à celles

d'atmosphères primitives, voire de synthétiser des nano-particules semblables à celles du milieu inter-stellaire. Ces expériences servent en retour à orienter les observations, à fournir des guides pour la recherche de composés et structures dans les environnements extraterrestres, et même fabriquer en laboratoire des analogues de ces matériaux. Ainsi des allers-retours permanents entre données observationnelles et physico-chimie en laboratoire sont-ils indispensables pour permettre la détection et l'identification et comprendre les processus de formation et de croissance des grains ou de molécules complexes.

Dans le domaine de l'astrobiologie, l'apport des expériences de laboratoire (chimie et biologie) est également crucial. Là encore, il s'agit de créer des conditions physico-chimiques que l'on ne retrouve pas sur la Terre actuelle et de synthétiser des molécules ou des structures complexes, pour tester les réactions possibles et mesurer leur efficacité. Les expériences de laboratoire sont aussi indispensables pour la conception, le développement et la calibration d'instruments de recherche par télédétection, ou par mesures in situ, de structures organiques ou biologiques dans des environnements extraterrestres ou, de façon générale, de signatures d'intérêt biologique. A terme, les missions de retour d'échantillon planétaire posent le problème du confinement des matériaux extraterrestres pour leur stockage et leur analyse, presque de manière analogue à l'isolement des organismes hautement pathogènes.

### **Le point de vue des sciences humaines**

Le point de vue des sciences humaines revêt également un intérêt pour l'étude de ces questions, qui gagnent à être replacées dans une perspective historique, philosophique et épistémologique.

En premier lieu, d'un point de vue historique, le problème des origines, celles du système solaire (et éventuellement des autres systèmes planétaire) comme celles de la vie, a donné lieu depuis l'Antiquité à des spéculations à caractère scientifique, dont les liens avec des considérations extra-scientifiques (religieuses notamment) ont toujours été étroits, bien que complexes et ambigus. Le poids de cette histoire se fait parfois encore sentir dans certains domaines, et la conscience de son existence doit pouvoir enrichir le travail des scientifiques actuels.

Deuxièmement, ces problématiques liées aux origines soulèvent des difficultés philosophiques particulières. Par exemple, travailler sur l'apparition de la vie suppose d'adopter une définition de la vie : or une telle définition déborde le cadre purement biologique et appelle immanquablement une réflexion d'ordre plus général.

Troisièmement, les sciences qui s'intéressent aux origines possèdent un statut spécifique, dans la mesure où elles associent une composante « intemporelle », l'étude de lois universelles, et une approche historique, qui se propose de déterminer ce qui s'est effectivement produit dans le passé. Le dialogue entre ces deux composantes n'est pas toujours évident, et les « sciences historiques » posent donc des problèmes méthodologiques et épistémologiques particuliers : par exemple, une

théorie sur l'origine de la vie n'est pas de même nature qu'une théorie comme celle de la relativité ou des champs.

Ces trois points, qui sont liés les uns aux autres (par exemple l'histoire des idées sur la définition de la vie peut nourrir la réflexion philosophique sur cette question), peuvent donner lieu à des collaborations entre des spécialistes de sciences humaines d'une part, des biologistes, astronomes et physiciens d'autre part.

## **Objectifs scientifiques**

En astronomie, les connaissances actuelles sur les exo-planètes sont principalement limitées, pour des raisons techniques, aux masses et aux paramètres orbitaux de planètes géantes gravitant autour d'étoiles de type solaire. Ceci est bien insuffisant pour répondre aux questions citées plus haut. Ces questions se traduisant en besoins technologiques de plus en plus complexes, des "feuilles de route" en ce qui concerne l'astrophysique ont été établies sur 10-15 ans dont les étapes sont: 1) la détection indirecte et la caractérisation dynamique de planètes de type terrestre, 2) la détection directe (imagerie) de planètes géantes et l'étude (spectroscopie) de leur atmosphère, 3) la détection directe de planètes de type terrestre et l'étude de leur atmosphère, la recherche de signes de vie.

Les grands instruments actuels et en projet pour les deux prochaines décennies soit au sol (Very Large Telescope - VLT -, puis les Extremely Large Telescopes - ELTs -) ou dans l'espace (Corot, JWST, GAIA puis Darwin) permettront de relever ces défis. Du point de vue théorique, les modèles d'atmosphères planétaires devront être très nettement affinés pour pouvoir déterminer des caractéristiques précises sur les atmosphères des planètes géantes. En ce qui concerne les exo-Terres, aucun modèle d'évolution des atmosphères n'existe à ce jour (mais du fait des échanges avec la surface, de tels modèles peuvent-ils être génériques ?). La perspective de rechercher des signes de vie sur les exo-Terres à l'horizon 2020 nécessite quant à elle un investissement conjoint des astronomes et des exo-biologistes pour progresser dans la caractérisation des "zones d'habitabilité" d'une part et dans la détermination des meilleures observables (par exemple par mise en évidence de la présence simultanée de CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub> et/ou O<sub>3</sub> dans l'atmosphère dans certaines gammes d'abondance).

Les conditions physico-chimiques des environnements (disques) dans lesquels les planètes se forment pourront être sondées avec une précision sans précédent grâce aux télescopes radio (IRAM, ALMA, puis SKA-Square Kilometer Array), et aux télescopes optiques/infrarouge VLT, VLTI (interféromètre du VLT) et ELTs. L'interprétation des données, en particulier spectrales, de plus en plus précises nécessitera un couplage accru entre observations et expériences de laboratoire. Le champ magnétique présent lors de la formation des étoiles et de leurs disques planétaires pourrait avoir un rôle central dans l'asymétrie entre molécules gauches et droites (chiralité). Des tests en laboratoire, utilisant le rayonnement synchrotron (SOLEIL) sont envisagés. Un aspect théorique connexe est celui de l'apport de la contribution extraterrestre à la chimie pré-biotique : apport en matière organique du

milieu interstellaire ou des comètes dans le système solaire primitif et, de manière plus générale, dans la formation des systèmes planétaires.

Parallèlement aux observations à distance, certaines études in situ sont possibles dans le Système Solaire. Ainsi la mission Rosetta apportera des informations de première importance sur la composition des comètes, vestiges de la formation de notre système. Les données issues de la mission Cassini-Huygens amélioreront la compréhension d'une chimie complexe pré-biotique. Enfin, celles issues des missions spatiales vers la planète Mars seront capitales pour la compréhension de l'évolution d'une planète tellurique, et du rôle de l'eau dans l'apparition de la vie.

Les missions de retour d'échantillons, actuelles comme les missions NASA Genesis et Stardust) et futures (astéroïdes, mission Hayabusa, Mars dans une ou deux décennies) permettront de comparer directement la composition de la matière extraterrestre avec celle ramenée lors de chutes météoritiques, d'échantillonner des réservoirs de matière du système solaire non connus, et de comparer ces résultats avec d'une part les observations à distance et d'autre part avec les prédictions des modèles.

Sur Terre, il est particulièrement important de bien caractériser les premiers environnements terrestres (composition atmosphérique et océanique de l'époque, température des océans, cycle de la matière terrestre, régime tectonique) par l'étude des roches et minéraux les plus anciens du globe, notamment les sédiments de plus de 3 milliards d'années, et les fossiles biogéniques ou caractérisés comme tels (matière organique ancienne et formations biogéniques (stromatolites)). Cette caractérisation verra le développement de nouveaux critères environnementaux et de biogénicité, largement basés sur les compositions isotopiques d'éléments clés (C, N, Fe, Mo, S, gaz rares etc.). Une question importante est de savoir quelles sont les limites actuelles de l'existence de la vie sur Terre. Si la vie se révèle suffisamment facile à engendrer, on peut aussi se demander si elle peut être apparue et avoir disparu plusieurs fois dans l'histoire de notre planète. Auto-reproduction et évolution sont les deux fonctions qui caractérisent, a minima, le passage de la matière à la vie. Systèmes ouverts par définition, ces structures contiennent nécessairement une information chimique et sont nécessairement alimentées par un flux d'énergie et de matière. L'impact des conditions extérieures (e.g. formation de la Lune, rayonnement et flux de particules solaires) sur la chimie de l'atmosphère et de la surface de notre planète et l'évolution vers la vie doit être également étudié.

En ce qui concerne les expériences de laboratoire, il est nécessaire de poursuivre l'étude des constituants solides (silicates, glaces, et matériaux carbonés) et d'aborder l'étude de systèmes moléculaires de plus en plus complexes, acides aminés et édifices polyaromatiques. Par ailleurs les mesures fines de dichroïsme circulaire en lien avec l'origine de la chiralité de la vie y connaissent un essor important, aussi bien en infrarouge qu'en ultraviolet. Sur cette base, on pourra d'une part développer des modèles numériques (qu'il s'agisse de modèles de formation de systèmes planétaires, de photochimie d'atmosphères ou de chimie pré-biotique) et d'autre part concevoir des instruments d'exploration (planétaire en particulier) et traiter leurs données.

Du point de vue théorique, la question des Origines soulève de nombreux problèmes de physique fondamentale, dont voici quelques exemples. L'évolution des systèmes de planétésimaux et des disques fait appel à des simulations numériques toujours plus fines, de dynamique gravitationnelle, de magnéto-hydro-dynamique ou d'hydrodynamique qui nécessitent la mise au point de codes sophistiqués, et de puissants moyens de calcul. La compréhension des réactions sur la surface des grains « interstellaires » est devenue un thème central de la physico-chimie théorique, mais aussi expérimentale, avec des dispositifs de plus en plus élaborés.

## **Objectifs technologiques et retombées**

Les instruments nécessaires à ces recherches, télescopes ou instruments de laboratoire sont toujours à la pointe de la technologie. Dans la plupart des cas, leur réalisation impose des percées technologiques importantes qui ont des retombées bien au-delà du monde de la recherche fondamentale. C'est le cas des développements optiques, opto-mécaniques, systèmes, pour les télescopes au sol. Par exemple, la première génération d'instruments d'Optique Adaptative (indispensables pour l'observation des planètes) pour l'astronomie a débouché sur des applications médicales (ophtalmologie) ; les développements R&D actuels (pour les télescopes de demain) seront utilisables dans le monde industriel (eg micro miroirs) ou militaire. Ces développements font l'objet de dépôts de brevets régulièrement. Il en est de même pour les fibres optiques ou l'optique intégrée. De même les développements technologiques pour la radioastronomie bénéficient à la géophysique et à la météorologie. Le traitement, l'analyse et l'archivage des grands jeux de données qui sont attendus dans le cadre des missions de type relevés (COROT puis GAIA) demandent le développement de méthodes nouvelles de gestion de ces flots de données en liaison avec la communauté des Sciences et technologies de l'information et de l'ingénierie. Dans le domaine spatial, les contraintes imposées par les instruments (métrologie par exemple pour les interféromètres) et les sondes d'exploration planétaire conduisent à des concepts et développements très innovants. Ces développements sont effectués dans les laboratoires de la communauté Mathématiques, physique, planète et univers. Il est important de noter que les études de Design des instruments futurs dans le cadre de l'Europe incluent de manière importante des (grands) partenaires industriels. Par exemple, l'industrie est partenaire à 1/3 des Design Studies pour les ELTs.

Les développements analytiques de laboratoire (spectrométrie de masse à thermoionisation des isotopes stables et des gaz rares, sonde ionique, diffraction X, spectroscopie Raman) trouvent leurs applications dans les domaines des nanotechnologies, de l'électronique, et de la santé. Par exemple, le principal marché des sondes ioniques développées dans le cadre des sciences de l'univers est constitué par la filière électronique.

## **Démarche nationale sur le sujet**

Les origines des planètes et de la vie sont une des deux grandes priorités en Astrophysique et en Planétologie en France (et dans la plupart des autres pays). Ceci se traduit par des actions :

- au sein des programmes nationaux de l'INSU, en collaboration avec les communautés : Programme Physico-Chimie du Milieu Interstellaire (Mathématiques, physique, planète et univers et Chimie), Programme National de Planétologie (Mathématiques, physique, planète et univers et Chimie), ancien programme GEOMEX (Sciences du vivant, Chimie, Planète et univers)
- au sein du GdR "exobiologie" (Mathématiques, physique, planète et univers, Sciences du vivant et Chimie). Le CNES et/ou le CEA participent à ces programmes La thématique a fait l'objet de plusieurs demandes à l'ANR en 2005 et 2006.

Pour l'ensemble des communautés des physiciens, chimistes, biologistes, environ 400 chercheurs et ingénieurs, techniciens et administratifs sont concernés par cette thématique. A titre d'exemple, "Origines" couvre deux des trois thèmes du Programme National de Planétologie et représente environ 30 - 40 % des adresses aux programmes PNP et PCMI.

## **Enjeux et Atouts du CNRS**

### **Les enjeux**

Les origines des planètes et de la Vie constituent un enjeu scientifique important dans les communautés internationales, et pour les agences spatiales (ESA, NASA, CNES, etc.). Le nombre de publications dédiées à ce thème est en forte augmentation ces cinq dernières années. L'enjeu pour la communauté française est de rester au meilleur niveau de la compétition. Si l'objectif scientifique ultime relève des connaissances "pures", les enjeux technologiques au sens large sont clairement en toile de fond. Il faut exploiter et continuer de développer les compétences techniques qui ont permis aux chercheurs français de se situer au front des développements instrumentaux des grands projets, qu'ils soient au sol ou dans l'espace. A l'horizon 2010, la France est très bien positionnée : leader du futur instrument européen SPHERE, leader dans le projet spatial Corot, plus importante communauté de planétologues en Europe, places de choix dans les projets d'interférométrie, pour Herschel, dans les domaines de la physique de laboratoire, dans les domaines de physico-chimie et d'exobiologie. Au delà (2010-2020), notre positionnement au niveau international n'est pas acquis; il se prépare - de manière théorique et instrumentale - aujourd'hui.

### **Les atouts**

La communauté française possède des atouts importants qui, s'ils sont développés, peuvent lui permettre d'assurer ce positionnement au niveau international. Il s'agit des atouts spécifiques des communautés concernées, et de la valeur ajoutée que doit apporter une collaboration déjà existante, mais certainement à intensifier, entre les diverses communautés.

En astronomie, un des plus grands atouts actuels de la communauté (qui est entièrement intégrée dans des Unités mixtes de recherche (UMR) du CNRS) est de jouer un rôle fort dans l'instrumentation liée à ces thèmes (recherche d'exo-planètes, exploration du système solaire, du milieu interstellaire), ce qui lui assure un retour scientifique majeur (les premières) et rapide et donc une grande visibilité au niveau international. Ainsi, les équipes françaises participent-elles de manière très active à la détection indirecte des exo-Jupiters et sont à l'origine de la possible première image d'exo-planète géante. La communauté de planétologie française est très bien reconnue, et participe à de très nombreuses missions européennes comme américaines (Cassini/Huyghens, Mars-Express, puis dans le futur Exomars). Au niveau instrumental, elle est également très bien positionnée (voir plus haut).

Du point de vue théorique, la communauté possède les compétences pour aborder la question de la formation des systèmes planétaires de manière complète, depuis la formation des étoiles et des planètes jusqu'à leur structuration dans un système "stable", susceptible ou non de posséder une zone d'habitabilité. La communauté

des physiciens est à même d'attaquer les nombreux problèmes de physique fondamentale dans le domaine de la magnéto-hydro-dynamique ou de l'hydrodynamique, la dynamique gravitationnelle et les systèmes dynamiques, mais aussi en physique atomique, moléculaire et en physique des agrégats, isolés et/ou en interaction avec le rayonnement. Ce dernier aspect est un atout particulièrement important pour la France.

En physique, et physico-chimie, de nombreuses UMR du CNRS (relevant des communautés Mathématiques, physique, planète et univers et Chimie) développent des programmes expérimentaux en laboratoire et des calculs permettant d'accéder à des données indispensables à ce programme. Les compétences sont présentes pour aborder les nouvelles études de systèmes moléculaires complexes. La collecte et la simulation numérique de données spectroscopiques a été de longue date une interface active avec la communauté de physico-chimie moléculaire. L'établissement de bases de données (spectroscopique, thermodynamique, etc.) à partir de ces programmes est aussi un atout très fort de cette communauté.

Dans le domaine des sciences de la Terre, la communauté est leader mondial, avec les USA, de l'analyse isotopique de la matière extraterrestre. A ce titre, les équipes françaises sont impliquées dans toutes les missions de retour d'échantillons existant à ce jour. Elle est également très bien placée dans l'étude des "proxies" (signatures) géo/bio-chimiques pour la vie ancienne sur la Terre et les autres planètes du Système Solaire, dans l'étude des échanges entre surface et atmosphère et des conditions atmosphériques sur les planètes primitives et dans l'étude des limites actuelles de la vie sur Terre (GEOMEX).

Il faut souligner le rôle incitatif joué par les programmes de l'INSU pour fédérer les communautés et faciliter les travaux interdisciplinaires. L'excellente représentation des scientifiques français dans les colloques (et les publications) en planétologie, ou en astrochimie, deux domaines où ces programmes existent depuis plus de 10 ans, témoigne de la vitalité de ces communautés.

L'exobiologie est un domaine très multidisciplinaire, bien représenté en France depuis plusieurs décennies, au sein d'une communauté scientifique rattachée à des disciplines classiques très différentes incluant principalement astrophysique, chimie, géologie et biologie. L'exobiologie fait aussi partie depuis les années 1980 des thématiques soutenues par le CNES (Groupe de Travail en Exo/Astrobiologie.) Depuis 1999, cette communauté est fédérée sous la forme d'un GDR, financé par le CNRS et par le CNES. Le GDR fait partie de l'EANA (European Astrobiology Network Association) et participe aux activités de ce réseau européen, soutenu par l'ESA et la Commission Européenne.

Le CNRS possède le grand avantage d'avoir les compétences dans chacune des questions clés listées plus haut. La mise en partage au sein de l'organisme de ces compétences dans un objectif commun donne une valeur ajoutée considérable.

## Intervenants

**Dominique Le Quéau** est directeur de l'Institut national des sciences de l'Univers du CNRS. Il est un spécialiste de la physique des plasmas chauds, des processus électromagnétiques collectifs qui les caractérisent et des interactions « ondes-particules » qui s'y déroulent. Il a dirigé le Centre d'étude spatiale des rayonnements puis l'Observatoire Midi-Pyrénées, et exercé de nombreuses responsabilités au Comité national de la recherche scientifique du CNRS ainsi qu'à la Société française de physique.

T : 01 44 96 43 87, dominique.lequeau@cnrs-dir.fr

**Anne-Marie Lagrange** est directrice de recherche au Laboratoire d'astrophysique de l'Observatoire de Grenoble. Ses activités scientifiques portent sur les exoplanètes et l'étude des disques planétaires. Elle est spécialiste de l'imagerie à haute résolution et haut contraste et s'est récemment investie dans les observations des vitesses radiales par spectroscopie. Elle s'est impliquée dans le développement des moyens d'observation (système d'optique adaptative NAOS du Very Large Telescope de l'ESO) et l'analyse de données (projet Planet Finder, toujours au VLT de l'ESO). Outre les exoplanètes et les systèmes planétaires, Anne-Marie Lagrange a travaillé sur les comètes, le milieu interstellaire et les étoiles variables.

T : 04 76 51 42 03, anne-marie.lagrange@obs.ujf-grenoble.fr

**Magali Deleuil** est maître de conférence à l'Université de Provence Aix Marseille 1, et chercheur au Laboratoire d'astrophysique de Marseille. Depuis 1996, outre des travaux de recherche sur les disques circumstellaires (au sein desquels se forment les planètes), elle est impliquée dans la préparation de la mission spatiale COROT et plus particulièrement dans le programme « exoplanètes » de ce satellite. Elle est l'un des co-investigateurs et membre du conseil scientifique de COROT, en charge de l'organisation des observations complémentaires qui ont été réalisées pour préparer la mission et qui seront faites pour déterminer la nature des planètes que COROT détectera.

T : 04 91 05 59 29 / 06 19 64 44 41, magali.deleuil@oamp.fr

**Odile Dutuit** est directrice de recherche au Laboratoire de chimie physique d'Orsay (CNRS/Université Paris XI). A partir de janvier 2007, elle dirigera le Laboratoire de planétologie de Grenoble (CNRS/Université Grenoble 1). Physico-chimiste de formation, elle réalise des expériences de laboratoire sur les réactions chimiques élémentaires en phase gazeuse, qui ont lieu dans les atmosphères planétaires et dans le milieu interstellaire. Elle travaille sur la synthèse de molécules induite par les ultra-violets du soleil, en particulier dans l'atmosphère de Titan.

T : 01 69 15 56 18, odile.dutuit@lcp.u-psud.fr

**Marie-Christine Maurel** est professeur à l'Université Paris VI, présidente de la 65<sup>e</sup> section du CNRS et dirige une équipe de recherche à l'Institut Jacques Monod « Biochimie de l'évolution et des adaptabilités moléculaires ». Spécialiste des origines de la vie et de l'évolution moléculaire, elle est l'auteur de plusieurs ouvrages et articles scientifiques et de livres de vulgarisation. Elle organise depuis plusieurs années un cycle de conférences : Hypothèses, Théories, Concepts en biologie ainsi qu'une Université européenne sur les origines de la vie à Banyuls-sur-mer.

T : 01 44 27 40 21, [maurel@ijm.jussieu.fr](mailto:maurel@ijm.jussieu.fr)

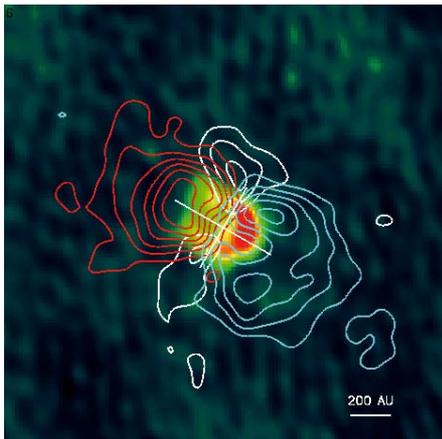
**Stéphane Schmitt** est chercheur au laboratoire Recherches épistémologiques et historiques sur les sciences exactes et les institutions scientifiques. De double formation en biologie et en histoire des sciences, il travaille dans le domaine de l'histoire des sciences de la vie et de la Terre depuis 1750. Il s'intéresse plus particulièrement à l'histoire de l'anatomie comparée, de l'embryologie et des sciences de l'évolution. Il s'occupe de la publication d'une édition critique des œuvres complètes de Buffon.

T : 01 44 27 86 46, [stephane\\_schmitt@yahoo.fr](mailto:stephane_schmitt@yahoo.fr)

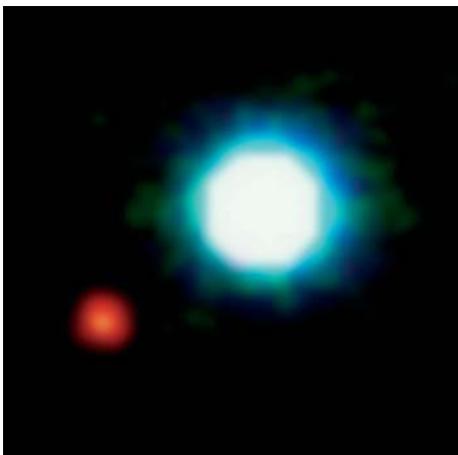
## Images



Image de la nébuleuse d'Orion, site de formation d'étoiles. © HST.



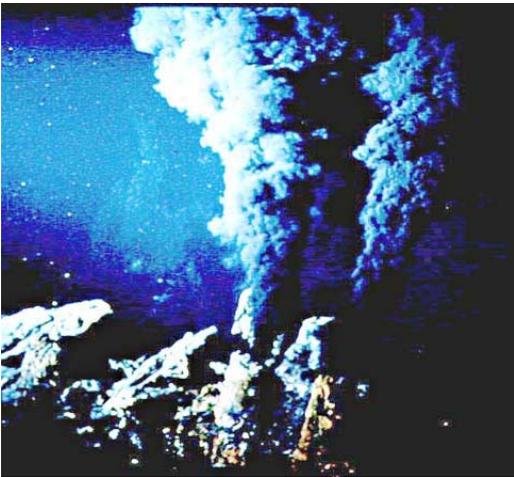
Disque protoplanétaire entourant l'étoile AR Aurigæ. © LA3B, OASU, IRAM, CNRS, INSU.



Première image d'une exoplanète. © NACO/VLT/ESO. LAOG. UCLA. OMP. CNRS. INSU.



Image du sol de Titan prise depuis la sonde Huygens. © ESA. NASA. JPL. University of Arizona.



Fumeurs noirs. © CNRS/ Photo J.-L. Cheminée