



ACADEMIE EUROPÉENNE INTERDISCIPLINAIRE DES SCIENCES
INTERDISCIPLINARY EUROPEAN ACADEMY OF SCIENCES

FORMATION DES SYSTÈMES STELLAIRES ET PLANÉTAIRES

CONDITIONS D'APPARITION DE LA VIE

Éditeurs
Gilbert Belaubre,
Ernesto Di Mauro,
Victor Mastrangelo,
Pierre Nabet,
Jean Schmets



Formation des systèmes stellaires et planétaires

Conditions d'apparition de la vie

Académie Européenne Interdisciplinaire des Sciences

ISBN : 978-2-7598-1965-2

Cet ouvrage est publié en Open Access sous licence creative commons CC-BY-NC-ND (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/fr/>) permettant l'utilisation non commerciale, la distribution, la reproduction du texte, sur n'importe quel support, à condition de citer la source.

© AEIS, 2015

La collection de l'AEIS

Les travaux de l'**Académie Européenne Interdisciplinaire des Sciences** portent depuis plus de dix ans sur les questions majeures auxquelles est confrontée la recherche à la croisée de plusieurs disciplines. Et la présente collection a pour but de faire le point sur ces questions. Nos ouvrages sont issus de séminaires mensuels et de congrès bisannuels pluridisciplinaires auxquels sont associés de nombreux chercheurs extérieurs. Notre ambition est de faciliter les échanges entre programmes de recherche spécialisés. Elle est aussi d'informer un public plus large sur les avancées récentes.

Pour chacun des ouvrages et en concertation avec les auteurs, un comité de lecture a pour tâche de coordonner l'ensemble des contributions conformément aux objectifs poursuivis, et d'en faire ressortir les lignes de force.

Quatre ouvrages sont en préparation : *L'irruption des géométries fractales*, *L'émergence, Théories et modèles en sciences sociales*, *Ondes, matières et univers*.

Les ouvrages de l'Académie recourent à deux formes de publication : le livre-papier avec diffusion dans les bibliothèques des universités et des centres de recherche et en librairie, et/ou la version électronique en ligne dans la section e-Books du site de l'éditeur *EDPSciences*.

Table des matières

Introduction	7
---------------------------	---

PREMIÈRE PARTIE Formation des systèmes stellaires et planétaires

Présentation	17
Chapitre 1 : Nucléosynthèse stellaire	25
Chapitre 2 : Formation des étoiles de faible masse et des naines brunes	71
Chapitre 3 : Scénarios de formation des planètes géantes, leur évolution et leur impact sur la formation des planètes telluriques habitables	107
Chapitre 4 : Du Système solaire aux systèmes planétaires	119
Chapitre 5 : L'eau et la Lune	127

DEUXIÈME PARTIE Les briques de la vie primitive et les environnements planétaires

Présentation	149
Chapitre 6 : Astrochimie galactique et l'apparition de la complexité moléculaire organique dans le milieu interstellaire	157
Chapitre 7 : Modèle de structure moléculaire de la matière organique insoluble isolée de la météorite de Murchison	173
Chapitre 8 : Modélisations chimiques du milieu interstellaire	197
Chapitre 9 : La chimie avant la vie Processus pré-biotiques et précurseurs chimiques élémentaires à l'origine de la vie	215

TROISIÈME PARTIE Transition vers la vie primitive et diversité

Présentation	229
Chapitre 10 : H ₂ O : première molécule de la vie	237
Chapitre 11 : Premières traces et diversification de la vie	249
Chapitre 12 : Les organismes vivants extrémophiles	259
Chapitre 13 : Morphogenèse et embryogenèse	265
Chapitre 14 : A propos de génération moléculaire spontanée	277

QUATRIÈME PARTIE
Recherche spatiale et signatures extraterrestres

Présentation	289
Chapitre 15 : La recherche de la vie dans l'Univers	295
Chapitre 16 : Planétologie galactique	303
Chapitre 17 : 1986-2014 L'exploration des comètes, renouveau du questionnement sur la diversité des Mondes	325
<hr/>	
Pour conclure	343
Glossaire et Acronymes	349
Annexe 1 : Origine du rayonnement stellaire	351
Annexe 2 : Le deutérium, traceur de l'histoire de l'Univers, du Soleil et de la Terre ...	353
Annexe 3 : Liaisons électroniques. Leur caractère universel. L'importance capitale des liaisons faibles en biologie	363
Annexe 4 : La variété des astéroïdes du Système solaire	369
Remerciements	373
Présentation de l'Académie européenne interdisciplinaire des sciences ..	375

Introduction

L'Académie Européenne Interdisciplinaire des Sciences (en abrégé AEIS), son Président et le Comité des publications sont heureux de vous présenter ici le premier volume de sa ligne de publication, conçu à partir du colloque organisé les 5 et 6 février 2014 et intitulé :

Formation des systèmes stellaires et planétaires Conditions d'apparition de la vie

Ce livre, dans la vision pluridisciplinaire de l'Académie, montre les progrès scientifiques qui ont été réalisés grâce principalement à l'exploration spatiale, dans la compréhension de la formation de notre Univers. Ces progrès sont vertigineux et, au fur et à mesure de la lecture de ce livre, on ne peut que s'étonner des capacités de l'homme à comprendre cet univers et à en restituer la connaissance à tout un chacun.

Dans un bref résumé de ces connaissances, rappelons maintenant la vision généralement acceptée de nos jours de la structure de cet univers.

Selon le modèle standard de l'univers, tout a commencé il y a 13,8 milliards d'années : plus précisément au temps $t = 10^{-43}$ seconde après le Big Bang, le cosmos entre en expansion, il subit la transition de phase qui brise la symétrie originelle. La gravité devient libre et autonome. Elle règne depuis sur les étoiles, galaxies, amas, ou grandes structures ...

Parallèlement naît l'interaction électronucléaire qui assujettit les particules.

Au temps $t = 10^{-35}$ seconde après le Big Bang, l'interaction forte se sépare à son tour. Les particules primordiales se scindent en quarks et en électrons : particules élémentaires. À un cent-milliardième de seconde : la force nucléaire faible se sépare à son tour de l'interaction électromagnétique. Les quatre forces fondamentales de la nature sont désormais en place.

Au premier cent-millième de seconde, protons et neutrons se forment ... Ces objets sont assemblés à partir de trois quarks chacun.

Trois minutes après le Big Bang, la formation des premiers noyaux d'atomes légers s'enclenche. Toute la matière visible du cosmos remonte à cette époque. Après 380 000 ans environ, les noyaux capturent les électrons pour former les atomes, époque à laquelle il y a découplage entre la matière et le rayonnement. L'univers devient transparent pour les photons présents qui, libérés, peuvent voyager jusqu'à nous.

L'univers est ensuite façonné par la gravitation.

Le soleil et ses planètes sont apparus en même temps alors que notre galaxie avait déjà 8 milliards d'années.

- Au temps $t \approx 4,56$ Ga, formation des planètes du Système solaire ;
- Au temps $t \approx 4,4$ Ga, l'eau d'abord en phase vapeur autour de la Terre, se condense et forme les océans ;
- Au temps $t \approx 3,9$ Ga, la Terre subit un dernier gigantesque cataclysme, un déluge de météorites ; on estime à près de 22 000 le nombre de cratères datant de cette époque ;
- Au temps t compris entre 3,8-3,5 Ga, premières traces d'activité biologique supposée ;
- En 1995 fut détectée, de manière indirecte à partir d'observations faites à l'Observatoire de Haute Provence, la première planète géante extrasolaire en orbite autour d'une étoile comparable au Soleil ;
- Depuis 2015, plusieurs milliers d'exoplanètes ont été identifiées, dont certaines expriment la présence d'eau.

Il est probable que nous aurons de bons résultats scientifiques de la mission spatiale Rosetta-Philae, sur la comète « Tchouri'l », ou encore avec les résultats apportés par les interféromètres à haute définition depuis la Terre.

Mais cette histoire, qui semble bien linéaire a priori, est loin d'être aussi simple et, par exemple, on a cru que l'expansion de l'univers correspondait à un ralentissement de la vitesse des galaxies. Des mesures récentes montrent qu'au contraire, elles accélèrent, et ceci suppose physiquement l'existence d'une autre matière (matière noire) et une autre énergie (énergie noire), que celles que nous connaissons actuellement. Nous ne désespérons pas de devoir vous présenter un autre livre sur ces mêmes thèmes, dans quelques années.

Quoiqu'il en soit, dans tout le livre présenté ici, l'idée de la recherche sur la vie est présente.

En effet, dans toutes les civilisations, l'homme a été intrigué par son origine et celle de la vie. L'existence d'autres « civilisations » est une interrogation qui se perd dans la nuit des temps et est fondamentale pour l'humanité. La question de la vie est formulée de manière très différente selon les époques.

Pour les philosophes grecs, la vie est éternelle et apparaît spontanément chaque fois que les conditions sont propices. Avec Aristote, la génération spontanée devient une doctrine officielle. Celle-ci va perdurer jusqu'au milieu du XIX^e siècle, époque à laquelle l'Académie des Sciences mettra fin à cette vision fausse dont la persistance est due probablement au poids culturel de la notion de vie. Cette recherche est aujourd'hui déclinée par les scientifiques de façon précise.

Comment les systèmes planétaires se forment-ils et évoluent-ils ? Quelles sont les caractéristiques des systèmes planétaires extrasolaires ? Quelles sont les conditions physico-chimiques et les processus à l'origine de la vie ? Existe-t-il des traces de vie passée extraterrestre sur des planètes du Système solaire ? Quelles signatures de vie pouvons-nous détecter dans les systèmes planétaires, les exoplanètes ?

Ce volume a pour but de livrer un point de vue actuel et pluridisciplinaire sur ces interrogations. Les questions liées au thème de ce volume sont si universelles que des scientifiques de renom très éloignés de cette thématique se sont intéressés à certains aspects de celle-ci au terme d'une carrière scientifique bien remplie.

Le plus célèbre d'entre eux, au plan historique, est Erwin Schrödinger et son petit livre paru en 1944 « Qu'est-ce que la vie ? » dans lequel il énonce les principes de la biologie moléculaire naissante. Au cours des années 1950, Albert Szent-Györgyi, Prix Nobel de Physiologie ou Médecine 1937, qui s'intéressait à la biologie du cancer, développa l'idée selon laquelle tous les phénomènes physiques de la nature étaient en œuvre dans le vivant.

Plus près de nous un physicien de grande stature également est moins cité : il s'agit du physicien français Alfred Kastler, Prix Nobel de Physique en 1966, qui a écrit lui aussi un petit livre intitulé « Cette Etrange Matière », paru aux éditions Stock en 1976. On aimerait citer ses pensées très inspiratrices et prémonitoires livrées dans ce document.

« ... je suis convaincu que la matière de la vie peut être comprise à partir des lois de la physique, mais à une condition, de penser ces lois dans leur totalité, et d'introduire en biologie également le concept de complémentarité. La nature ondulatoire de la matière jouerait-elle de même un rôle dans l'établissement de l'ordre biologique ? Je ne saurais répondre à cette question, mais je pense qu'elle mérite d'être posée.

L'analogie (peut-être purement formelle) entre l'évolution d'un être vivant et le comportement d'un système physique à structure dissipative nous incite à poser cette question. »

C'était déjà la démarche qui avait été suivie lors du colloque de l'AEIS en 2009 « Perspectives des approches expérimentales et théoriques de l'évolution ».

La question que l'on peut se poser est la suivante : comment est-on arrivé, par le seul jeu d'arrangements de trois particules élémentaires principalement générés par les quatre interactions fondamentales, en moins de 14 milliards d'années, à une telle richesse et diversité de la nature ?

Enfin, évoquer en quelques mots les interrogations liées au vivant dans une perspective historique, philosophique et épistémologique.

D'un point de vue historique, le problème des origines des systèmes planétaires et de la vie, a donné lieu depuis l'Antiquité à des spéculations d'ordre scientifique dont les liens avec des considérations autres que scientifiques ont toujours été étroits, bien que complexes et ambigus.

Ces problématiques liées aux origines soulèvent des difficultés philosophiques particulières ; travailler sur l'apparition de la vie suppose d'énoncer une définition de la vie. Une telle définition déborde le cadre purement biologique et conduit forcement à une réflexion d'ordre plus général.

Par exemple, le Professeur Christophe Malaterre, lors du colloque de l'AEIS en 2008 « *EMERGENCES : de la fascination à la compréhension* » pose la question suivante : la vie est-elle un phénomène émergent ?

Enfin, les sciences qui s'intéressent aux origines possèdent un statut spécifique, dans la mesure où elles associent une composante fondamentale, l'étude de lois universelles de la physique et de la chimie, et une approche historique qui cherche à déterminer ce qui s'est effectivement produit dans le passé. Une théorie sur l'origine de la vie n'est pas, par exemple, de même nature qu'une théorie physique.

Si l'on veut parler d'apparition de la vie, il semble important d'avoir, comme nous l'avons dit ci-dessus, une définition de ce qu'est la vie où que l'on se trouve dans l'univers. C'est, certes, un peu une gageure. Cependant, Jacques Monod dans son livre « Le hasard et la nécessité » paru en 1970, pour aborder ce vaste problème, suppose l'arrivée sur terre d'un explorateur venant d'une planète inconnue qui s'essaie à déterminer les caractéristiques nécessaires et suffisantes que présenterait une structure examinée pour pouvoir affirmer qu'elle appartient au règne vivant. Il définit alors les propriétés examinables sur-le-champ (ou à court terme)

qui, si elles existent ensemble et simultanément, permettraient, selon lui, d'assurer que la structure examinée appartient au règne vivant. Ces propriétés sont les suivantes : invariance reproductive, morphogenèse autonome et téléconomie. Ce dernier terme a provoqué bien des discussions qui ne sont pas éteintes et Jacques Monod lui-même s'en est expliqué.

Cependant, lorsqu'au cours d'une table ronde, on a posé la question aux scientifiques qui venaient de présenter les communications recueillies dans ce volume, une seule réponse a été donnée, celle que donne la NASA : « est vivant ce qui répond complètement au Darwinisme ».

Bien sûr, si l'on arrive à affirmer qu'une structure que l'on vient de découvrir répond complètement au Darwinisme, il ne fera aucun doute qu'il s'agit d'une structure vivante. Mais il est évident que cette étude risque bien de demander des années, et peut-être des siècles d'études préalables. On comprend alors cette réticence à donner une définition, car on ne peut écarter l'hypothèse d'une vie très différente apparue ailleurs.

Alors, que doit faire l'explorateur de Jacques Monod ?

Un article de ce livre aborde ces problèmes philosophico-scientifiques, c'est celui d'Ernesto Di Mauro. Pour cette raison, nous recommanderions volontiers au lecteur de débuter par sa lecture, afin d'attirer son attention sur la complexité du problème traité dans ce volume : les recherches actuelles sur les conditions et les lieux d'apparition de la vie. Problème éminemment pluridisciplinaire qui nécessite un dialogue entre physiciens et biologistes. Ces aspects sont repris dans la partie « Pour conclure » de l'ouvrage.

Ce livre propose la notion d'un continuum existant entre le Big Bang, la formation des étoiles et des planètes, et l'apparition de la vie dans une vision darwinienne de la nature.

La première partie présente la nucléosynthèse des éléments et la formation des galaxies, des étoiles, des planètes et autres présences de matière dans l'espace ;

On y trouve d'abord le chapitre écrit par Nicolas Prantzos, chapitre qui décrit la formation des éléments minéraux et organiques dans le cosmos au cours de la genèse de la matière et en particulier le Carbone, l'Hydrogène, l'Oxygène et l'Azote.

Mais aussi les éléments plus lourds avec les fréquences liées à leur stabilité atomique.

On parcourt ensuite dans le chapitre de Patrick Hennebelle la formation des étoiles, leur diversité selon leur masse qui conditionne leur durée d'existence, puis, dans celui d'Alessandro Morbidelli, on découvre la variété immense des systèmes planétaires qui donne un statut marginal à notre Système solaire, et on admire les travaux de simulation qui permettent de comprendre ces formations que toutes les observations confirment.

Ensuite vient l'étude du Système solaire, de son évolution de la première création de deux planètes géantes qui ont laissé la place à la formation de planètes dites « telluriques », chapitre écrit par Thérèse Encrenaz qui se conclut par une brève histoire de la Terre.

Pour terminer cette partie, deux chapitres montrent que notre compréhension de l'histoire de la Terre est loin d'être assurée. Francis Albarède décrit des hypothèses concernant la formation du couple Terre-Lune, et l'origine de l'eau terrestre.

Le dernier chapitre, dû à François Robert, met en cause certaines hypothèses en s'appuyant sur des recherches très subtiles sur les taux d'isotopes dans les phases successives de la formation du Système solaire.

La deuxième partie est consacrée aux recherches de molécules dans l'espace. Louis Le Sergeant d'Hendecourt présente les résultats d'observations de toutes sortes de molécules, et surtout de molécules prébiotiques, aussi bien dans l'espace interplanétaire que dans l'espace interstellaire. Ce constat, permis par la précision des mesures spectroscopiques, est attesté par les études de météorites présentées par Sylvie Derenne et François Robert. Valentine Wakelam s'est illustrée en donnant des classifications de ces résultats qui sont une aide précieuse pour les chercheurs.

Cette deuxième partie se termine par un article de Raffaele Saladino qui a obtenu, en laboratoire, la chaîne quasi déterministe des formations moléculaires organiques très complexes qu'Ernesto Di Mauro obtient de son côté dans un accélérateur de particules, et qui recoupe admirablement les observations spatiales et météoritiques. Ce dernier article clôture la deuxième partie de l'ouvrage.

Ainsi la boucle se referme et nous abordons les prémisses du vivant dans la troisième partie.

Cette troisième partie aborde des jalons qui mènent vers la vie. Elle se borne à illustrer deux aspects primordiaux du vivant : la complexification progressive qui en marque le développement, dans un chapitre d'Emmanuelle Javaux, et sa plasticité, en décrivant la diversité des niches écologiques, souvent extrêmement éloignées des conditions de la vie végétale et animale terrestres, où des organismes dites « extrémophiles » ont pu se développer. Cet article est signé par Pierre Nabet.

Il aborde les capacités de la vie à s'adapter à des conditions extrêmes de pression et de température, ce qui explique qu'une fois créée, elle puisse subsister et entreprendre sa progression darwinienne. Cet article montre aussi que la vie a pu exister dans le cosmos ailleurs que sur terre et qu'on peut y découvrir des traces résiduelles ou des structures primitives (coacervats).

La théorisation des phénomènes biologiques est un enjeu redoutable, à cause à la fois de leur complexité, et surtout de leur non-linéarité. Mais les mathématiciens construisent des outils de plus en plus performants. Martine Ben Amar présente les travaux mathématiques qui, aujourd'hui, permettent d'aborder avec succès la modélisation des morphogénèses.

Enfin, cette partie se termine avec une longue réflexion sur l'approche épistémologique et philosophique du vivant qu'Ernesto Di Mauro nous offre dans un article dont la première partie présente ses expériences de création spontanée de molécules géantes qui sont les prémisses de la vie.

La dernière partie de l'ouvrage est consacrée aux recherches extraterrestres. Ces recherches ont débuté dès le début de l'ère spatiale. Thérèse Encrenaz en décrit l'histoire et marque des jalons pour le futur prochain. Giovanna Tinetti, spécialiste des planètes extraterrestres, décrit les avancées récentes, dues essentiellement à la formidable capacité des mesures spectroscopiques, et elle précise les objectifs essentiels des explorations à venir.

Enfin, nous avons donné la parole à l'auteur du projet « Rosetta-Philae », Jean-Pierre Bibring, qui décrit les aventures de ce projet et, finalement, son heureux aboutissement.

C'est donc sur un message de persévérance et d'espoir que se clôture notre ouvrage.

Le Président et le comité de lecture de l'AEIS²

² Victor Mastrangelo (CNAM-Physique/Paris et Université Paris Sud/Orsay), Président de l'Académie Européenne Interdisciplinaire des Sciences (AEIS) ; Gilbert Belaubre, (Ingénieur du Corps des Manufactures de l'État), Ex-Président de l'AEIS, membre du comité de lecture ; Ernesto Di Mauro (Université de Rome/La Sapienza), membre du comité de lecture ; Pierre Nabot (Université de Lorraine/Nancy), Président de la section de Nancy de l'AEIS, membre du comité de lecture ; Jean Schmets (Université de Liège), membre du comité de lecture.

Première partie

Formation des systèmes
stellaires et planétaires

Première partie

Formation des systèmes stellaires et planétaires

Présentation

I. Introduction

Prenons pour un moment le point de vue selon lequel l'apparition de la vie est une des lois de l'Univers, à savoir qu'elle doit obéir à une nécessité imposée par les principes constituants le système. Si on essaye de retracer l'origine de la vie dans cette perspective, on est obligé de parcourir à nouveau les étapes de la constitution du système lui-même, de ses principes fondateurs. C'est précisément le contenu de cette première partie. Forcés par la nécessité de limiter les thèmes traités, on ne part pas *ab ovo* du Big Bang. C'est peut-être un avantage, un choix qui permet de ne pas se perdre dans des discussions trop théoriques.

Ainsi, les deux premiers chapitres traitent de ce qu'on peut observer, décrire, mesurer et formaliser en conclusion au sujet de la formation des atomes et des agrégats, des milliards d'étoiles et planètes regroupées en milliards de galaxies. Ayant à ce stade une vision claire de l'origine des éléments chimiques et des processus de leur organisation en grandes entités réactives et fertiles, on peut mettre dans une perspective correcte les « scénarios de formation des planètes géantes, leur évolution et leur impact sur la formation des planètes telluriques habitables ».

Les systèmes planétaires sont en fait d'une grande diversité (en termes de rayon et excentricité). Le plus important, c'est qu'on se rend compte de la quasi-unicité (par son histoire, et au moins jusqu'à maintenant) dans sa structure, de notre Système, et de la quasi-unicité de la Terre. Dans les réflexions sur la possibilité de trouver de la vie ailleurs, ces données comptent. La diversité est ce qui amène à la vie. Pour que les processus moléculaires à la base de l'évolution chimique puissent avoir lieu, il leur faut

des milieux favorables, des niches où la thermodynamique permet le développement de ces longs enchaînements chimiques. Pour cela, il faut des milieux condensés mais aussi une grande variété de matériaux en concentrations suffisantes pour que les associations se produisent aisément. Seules certaines planètes présentent l'ensemble de ces conditions. Les chapitres 3 à 5 nous montrent que nous comprenons, dans ses grandes lignes, le scénario de formation des planètes et de leurs satellites, ainsi que le rôle prépondérant joué par la molécule d'eau dans la séparation des planètes en deux classes distinctes, les telluriques et les géantes. L'eau, dans ses différents états (vapeur, liquide, glace) est aussi responsable des évolutions divergentes de Vénus, la Terre et Mars.

Le thème de l'eau dans l'évolution, traité à des échelles aussi différentes que celle de l'espace, des planètes, de la Terre, et même à l'échelle moléculaire, fait irruption à de nombreuses reprises dans cet ouvrage.

Toutes ces recherches permettent aujourd'hui de poser l'hypothèse que, dans d'autres lieux que la Terre, la vie, ou une forme de vie a pu, peut, ou pourra exister. Des essais de définitions de la vie sont présentés dans les sections « Introduction » et « Pour conclure ». La question qui se posera à chaque résultat d'investigation spatiale est : quels sont les indices pertinents d'une signature de vie ? Toutefois, à chaque pas dans ce déroulement, nous aurons soin de distinguer ce qui est acquis de ce qui n'est encore que conjecture.

2. Nucléosynthèse : l'origine des éléments chimiques dans l'Univers

Nicolas Prantzos, après avoir exposé les notions fondamentales de la nucléosynthèse stellaire, centre son propos sur la nucléosynthèse dans les étoiles massives et les explosions de supernovae. Dans ces sites sont produits la plupart des éléments lourds les plus abondants (C, O, Si, Ca, Fe, etc.) qui sont importants pour la formation des planètes de type terrestre et pour la vie.

2.1 Principaux résultats acquis au sujet de la nucléosynthèse

Nicolas Prantzos décrit d'abord la formation des noyaux atomiques par couches successives de nucléons (protons et neutrons). Ces couches possèdent des niveaux de saturation. Lorsque ces niveaux sont atteints, les noyaux sont capables de mieux résister à des chocs de neutrons ou protons très énergétiques. Ces atomes sont donc les plus stables, et les plus nombreux.

Ces transformations exigent des températures très élevées, allant de 10 millions de degrés absolus (degrés kelvin, 10 MK) pour la fusion de l'hydrogène en hélium, à plus de 200 MK pour la fusion qui conduit à la formation du fer et des éléments voisins. Mais ces fusions sont très exothermiques et c'est celle qui conduit de l'hydrogène à l'hélium qui est à la source de l'énergie stellaire. Nous donnons en annexe I, quelques précisions sur l'origine de l'énergie dispersée par les étoiles.

2.2 Les supernovae, laboratoires de la nucléosynthèse

Les étoiles massives, dans une phase de supernova, peuvent être le siège de fusions d'éléments lourds qui ne peuvent se produire qu'au-delà de 200 MK. Si ces étoiles arrivent, par confinement gravitationnel, très vite, à la phase explosive de supernova, les atomes qui s'y sont produits sont éjectés dans l'espace. Le temps de cette explosion est extrêmement court, avec des vitesses d'effondrement, puis d'explosion qui peuvent dépasser 10.000 km/sec. Pour l'effondrement, les astrophysiciens parlent en ordre de grandeur, de quelques secondes ! Et pour l'explosion, c'est en nombre de jours, avec une luminosité comparable à celle d'une galaxie entière.

3. La formation des étoiles dans l'Univers

Dans le chapitre 2, Patrick Hennebelle fait une synthèse détaillée du processus de formation des étoiles aussi bien d'un point de vue observationnel que théorique. Il se concentre ensuite sur le lien entre les étoiles et les planètes dont les processus de formation sont étroitement couplés.

L'accrétion et la turbulence expliquent les échelles de masse des étoiles et résolvent le problème de la fonction de masse initiale (IMF), c'est-à-dire la fonction empirique décrivant la répartition des masses initiales pour une population d'étoiles, le second problème crucial étant celui de la formation et de l'évolution du disque d'accrétion. Le défi des prochaines années consistera vraisemblablement en la simulation à grande échelle de données avec une résolution suffisante.

3.1 Un effondrement gravitationnel limité par des forces répulsives

Patrick Hennebelle décrit un schéma général de formation des étoiles. Il montre la puissance heuristique des simulations, conjuguées avec les données observationnelles. Il montre aussi, de manière décisive, que la durée de vie d'une étoile est inversement proportionnelle à sa masse.

Il décrit le schéma général de formation des étoiles par un mécanisme complexe d'effondrement gravitationnel limité par deux phénomènes :

- la répulsion exercée par le champ magnétique ;
- la dilatation exercée par la turbulence.

Ces deux forces s'opposent à l'effondrement et il en résulte un équilibre dynamique.

3.2 La force centrifuge de la rotation, à l'origine du disque d'accrétion

Le deuxième phénomène important est lié à la rotation initiale du nuage en effondrement. Lorsque le nuage n'a pas une forme parfaitement sphérique, et il semble bien que ce soit un cas assez général, la dissymétrie engendre une rotation, et la conservation du moment angulaire se traduit par une accélération progressive de la vitesse de rotation lors de l'effondrement gravitationnel.

La force centrifuge qui en résulte provoque la migration des éléments lourds vers l'extérieur de la masse, dans le plan équatorial de rotation. Il se forme ainsi un disque, dit « disque d'accrétion ». Le disque tourne dans le même sens que l'étoile mais ses éléments tournent de moins en moins vite au fur et à mesure qu'ils s'éloignent de l'astre (par l'effet de conservation du moment angulaire). Des agglomérats s'y forment alors, qui donneront des planètes, mais aussi des astéroïdes, des poussières, des nuages moléculaires.

Patrick Hennebelle a modélisé ces phénomènes dans des simulations numériques dont il présente les modalités et les résultats.

3.3 Classification des étoiles selon leur masse

Les masses des étoiles sont distribuées selon une fonction logarithmique. Les étoiles de petite masse, les plus nombreuses (près de 90 %), n'ont pas de grande activité énergétique, et leur durée de vie potentielle peut être estimée à des centaines de milliards d'années. Les étoiles de masse solaire ou proche sont le siège de la réaction dite « proton-proton », ou cycle de Bethe, et les astronomes leur attribuent une durée de vie de l'ordre de dix à trente milliards d'années. Enfin, les étoiles massives (jusqu'à cent masses solaires, et plus) sont le siège d'une activité énergétique très intense, en particulier par le deuxième cycle de Bethe (cf. en annexe I le cycle CNO) et leur durée de vie est de l'ordre de vingt à trente millions d'années. Ces étoiles peuvent s'effondrer et donner des explosions en supernovae. Dans le chapitre 2, Patrick Hennebelle présente un type d'étoiles qu'il a particulièrement étudié et dont il a simulé le fonctionnement : celui des naines brunes, petites étoiles appartenant au premier groupe ci-dessus.

Les étoiles de la Voie lactée sont souvent associées en paires, mais il semble que la plupart d'entre elles sont indépendantes, et qu'elles possèdent des planètes. Désormais, les moyens observationnels de toutes sortes permettent d'affirmer que les étoiles présentent une très grande variété de configurations planétaires.

4. L'étonnante diversité des systèmes planétaires

Dans le chapitre 3, Alessandro Morbidelli présente un modèle général de formation des systèmes planétaires à partir de deux mécanismes : la migration et l'instabilité des systèmes planétaires.

Le thème est fascinant. La modélisation a fait des progrès énormes et on arrive à bien comprendre comment et pourquoi notre Système solaire est caractérisé par une démarcation nette entre planètes telluriques et planètes géantes, séparées par un espace, entre Mars et Jupiter où règne encore un chaos qui n'a pas pu donner forme à une planète. La règle dans les systèmes planétaires est la grande diversité. Il en déduit que les planètes de « type terrestre », c'est-à-dire ayant des similitudes avec la Terre non seulement dans leurs caractéristiques mais aussi dans l'histoire de leur formation, sont rares, ce qui ne signifie cependant pas que « les autres mondes habitables sont rares » ; ils sont tout simplement « différents ».

4.1 Les modèles de Nice

C'est à l'observatoire de Nice qu'Alessandro Morbidelli a fondé ces modèles de formation des systèmes planétaires. Ces modèles proposent une très grande variété de solutions. Les premières découvertes semblent attester la validité du modèle, qu'on appelle désormais « modèle de Nice ».

Les simulations - des modèles hydrodynamiques - proposent que les premières planètes formées à partir du disque protoplanétaire, pour des étoiles du type solaire (0,5 à 10 masses solaires ou MS), sont des planètes géantes (de 0,005 à 0,05 MS) qui se constituent par accumulation gravitationnelle de gaz. Ces planètes ont en général des orbites quasi-circulaires, comme celles de Jupiter et de Saturne. Mais elles peuvent se trouver beaucoup plus près de leur étoile que les deux planètes géantes du Soleil.

Des simulations de second ordre montrent que nos deux planètes géantes sont restées assez loin du Soleil parce que leur interaction gravitationnelle a stabilisé une résonance orbitale à la distance qu'elles gardent désormais. Ce deuxième modèle niçois est appelé « Modèle du Grand Task ».

Les planètes Neptune et Uranus, n'ont pas pu retenir les gaz et sont donc très denses. Les simulations leur attribueraient des orbites excentriques, mais la prise en compte des masses des deux géantes explique qu'elles ont été retenues dans des orbites moyennement elliptiques. Le fait que l'on a pu détecter des planètes géantes pourvues d'orbites de forte excentricité est interprété comme le résultat vraisemblable de collisions entre deux planètes géantes.

4.2 Les conditions de formation de planètes habitables

L'existence de planètes de type terrestre (de l'ordre de 0,0001 MS) dépend, dans ce modèle, de la place laissée par les planètes géantes entre elles et leur étoile. Les simulations, sur ce point, semblent très fiables. Il y a alors deux cas :

- le cas « Jupiter-Saturne », qui laisse une marge d'accrétion et donc des plages d'habitabilité ;
- la migration vers le Soleil des planètes géantes : les chances de voir des planètes telluriques sont alors faibles, peut-être des reliquats d'accrétion sur des orbites voisines des géantes (ou des satellites des géantes).

Certaines planètes géantes ont des orbites très excentriques. On en détecte beaucoup dans la Voie lactée. Ces conditions sont peu favorables. Mais on ne peut pas écarter l'hypothèse de planètes géantes ayant perdu une grande partie de leur gaz, mais gardant des réserves d'eau et se trouvant, dans une phase de leur histoire, en conditions d'habitabilité. N'oublions pas quand même que nous sommes au début de cette recherche.

En définitive, Alessandro Morbidelli pense que l'on ne doit pas s'attendre à rencontrer une proportion importante de systèmes du type solaire, mais que bien d'autres configurations peuvent offrir, pendant des périodes suffisamment longues pour que s'y développent des structures complexes, des opportunités pour l'apparition de vie. Peut-être de formes de vie différentes de la nôtre.

5. Du Système solaire au système planétaire

La route qui mène « *Du Système solaire au système planétaire* » est ce dont nous parle Thérèse Encrenaz en nous expliquant par où cette route passe. Notre connaissance des objets du Système solaire a connu une progression considérable au cours des dernières décennies, grâce à leur exploration spatiale mais aussi grâce aux observations télescopiques au sol et au développement de la simulation numérique. Et elle nous fait comprendre dans ses grandes lignes le scénario de formation des planètes et de leurs satellites.

5.1 Le disque protoplanétaire

Thérèse Encrenaz présente le schéma de formation du Système solaire, en explicitant les modalités de formation des divers types de satellites du Soleil : planètes géantes gazeuses, planètes telluriques, planètes neptuniennes, objets transneptuniens, comètes, astéroïdes, ceinture de Kuiper.

Elle nous offre un modèle de développement et un descriptif explicatif du Système solaire.

Depuis le 18^{ème} siècle, on a compris que le système planétaire du Soleil provenait d'un « disque d'accrétion » qui s'était agrégé en amas qui sont à l'origine des divers objets en orbite autour du Soleil. Ce schéma se fonde sur l'idée que la force centrifuge créée par la rotation du Soleil dépasse la force gravitationnelle pour entraîner, sur des orbites situées dans le plan diamétral de rotation du Soleil, des éléments qui forment un disque.

5.2 Les planètes géantes

Thérèse Encrenaz décrit la formation successive des deux planètes géantes Jupiter et Saturne, de leurs satellites et de toutes sortes de petits astéroïdes et de comètes, ces dernières étant essentiellement des agrégats d'eau glacée. Au-delà de la zone des deux planètes géantes, se trouvent Uranus et Neptune, et la cohorte de débris qui forment la ceinture de Kuiper. Les quatre planètes telluriques Mars,

la Terre, Vénus et Mercure sont apparues postérieurement, grâce au phénomène gravitationnel décrit par le « Modèle de Nice ».

Les orbites des astéroïdes sont souvent très excentriques. Elles dépendent de l'attraction solaire mais aussi de celles des deux planètes géantes Jupiter et Saturne. De ce fait, ces orbites ont pu prendre des plans et des excentricités très variées. Certains astéroïdes passant près de la Terre peuvent l'atteindre et leur entrée dans l'atmosphère les met en incandescence et seuls ceux qui ont une masse de plusieurs dizaines de kilos peuvent atteindre le sol. On les appelle « météorites ». C'est donc sur ces résidus qu'ont porté, à ce jour, les observations. Parmi les météorites, on trouve les chondrites, particulièrement intéressantes pour les raisons données au chapitre 7 par Sylvie Derenne et François Robert. La variété des astéroïdes du Système solaire présente l'intérêt primordial de contribuer à l'établissement d'une chronologie de la formation du Système solaire. Pour clarifier ces questions complexes, nous donnons, en annexe 4, une classification de ces objets.

5.3 Les planètes telluriques

Thérèse Encrenaz nous donne les caractéristiques principales des planètes telluriques en mettant en relief les différences entre Mars, la Terre et Vénus. Les questions qui se posent, et que les explorations spatiales tenteront de résoudre, sont :

- Mars, aujourd'hui très froide, a-t-elle connu un état analogue à celui de l'actuelle Terre ?
- Vénus, très chaude, évoluera-t-elle vers des conditions qui la rendraient « habitable », bien que, dans son histoire, il soit probable que l'eau qu'elle possédait sans doute initialement se soit échappée du fait de sa proximité avec le Soleil.
- Enfin, la Terre, au début de son histoire, lorsque le Soleil était moins actif qu'aujourd'hui, a dû avoir pour surface une épaisse couche de glace, mais cette glace a dû fondre et se reformer périodiquement (périodes de glaciation), en gardant sans doute une masse d'eau liquide, du fait du réchauffement du Soleil, et d'une intense activité volcanique. Cette hypothèse, on le verra, est différente de celle que présente, au chapitre 5, Francis Albarède.

5.4 D'autres lieux habitables dans le Système solaire ?

Les quatre planètes géantes ont, toutes, un système de satellites. Parmi ces satellites, certains présentent des conditions très proches de celles des planètes telluriques. Titan, planète de Saturne, a-t-elle toutes les conditions nécessaires pour que la complexité s'y développe ? Nous reviendrons, au chapitre 15, sur ces questions que Thérèse Encrenaz développe à propos des recherches extraterrestres.

6. Origine du système Terre-Lune. Origine de l'eau actuellement présente sur Terre

L'article de Francis Albarède concerne le couple Terre-Lune. Il en décrit tout d'abord la formation la plus communément admise actuellement, à savoir l'impact d'une proto-pla-nète (de la taille de Mars) avec la proto-Terre. Il insiste sur l'apport des missions Apollo qui ont permis des investigations fines sur les quelque 382 kilos d'échantillon de roche ramenés. Jusqu'en 2000 environ, la Lune fut considérée comme étant un désert sec. Depuis, de nouvelles analyses ont conduit à une modification radicale de ce point de vue et on en arrive à une Lune capable de fournir de l'eau ! C'est à ce voyage que nous sommes invités. L'ensemble des résultats des recherches sur la formation du couple Terre – Lune et sur la composition de ces deux astres conduit à deux hypothèses qui s'affrontent. Un autre problème en suspens est celui de l'origine de l'eau à la surface de la Terre ; ici aussi plusieurs hypothèses s'affrontent. L'eau terrestre serait arrivée, d'après des recherches récentes, bien après l'épisode lunaire par la chute de nombreuses comètes qui, formées dans une phase très différente de celle de la formation des planètes telluriques, ont des orbites très excentriques qui les exposent à rencontrer les planètes telluriques. Francis Albarède note que, si l'eau terrestre superficielle a été apportée par des comètes, il semble avéré que d'importantes quantités d'eau existent dans les sous-sols de la Lune et de la Terre. Par ailleurs, les mesures isotopiques fournissent des informations qui accréditent l'idée que l'eau terrestre n'est pas d'origine cométaire. Ces travaux, dus largement à François Robert, sont exposés dans l'annexe 2.

En fait, rien n'est réglé sur ces questions, ce que montre l'auteur en donnant les résultats d'innombrables travaux effectués à la fois sur les échantillons de matériau que les missions Apollo ont ramenés de la surface lunaire, mais aussi avec d'innombrables mesures spectrographiques concernant, entre autres, les proportions d'isotopes de divers éléments à la surface du Soleil, de la Terre et de la Lune. La remontée aux origines est extrêmement ardue, parce que les chercheurs doivent trouver des indices qui les aident à tracer une chronologie.

L'eau a-t-elle été présente sur la Lune à un moment de son histoire ?

L'eau a-t-elle été présente à tout moment de l'histoire de la Terre et, sinon, d'où vient-elle ? Ces questions s'enchevêtrent, car leur chronologie n'est pas assurée. Les hypothèses qui prévalaient, il y a quelques dizaines d'années, sont exposées sommairement en annexe 3. L'annexe 2 donne quelques détails sur cette question controversée. Voilà les hypothèses qui prévalent aujourd'hui. Attendons des validations aussi bien au sujet de l'origine du couple Terre-Lune qu'au sujet de l'origine de l'eau à la surface de la Terre.

1

Nucléosynthèse stellaire

Nicolas Prantzos

Institut d'Astrophysique de Paris

I. Introduction

La théorie de la nucléosynthèse a émergé vers le milieu du vingtième siècle suite aux progrès rapides réalisés dans trois différents domaines qui touchent à notre compréhension de :

- (1) la composition du Soleil et des objets du Système solaire ;
- (2) les conditions physiques à l'intérieur des étoiles au cours de leurs phases évolutives successives, et
- (3) les propriétés des noyaux et des réactions nucléaires.

L'idée selon laquelle tous les noyaux sont synthétisés dans les intérieurs chauds des étoiles a été suggérée par l'astronome britannique Fred Hoyle dans les années quarante. A contrario, à peu près à la même époque, le physicien russe George Gamow pensait que tous les noyaux avaient été créés dans l'Univers primordial chaud¹, par captures de neutrons successives. Cependant, il a rapidement été démontré que, dans ces conditions, il était extrêmement difficile de synthétiser des noyaux plus lourds que ^4He . Des observations menées dans les années cinquante ont de plus montré que l'abondance des éléments lourds varie considérablement d'une étoile à l'autre, ce qui n'est pas le cas de celle des éléments légers (qui sont également les plus abondants) H et He. Il était alors clair que les éléments lourds devaient avoir été produits après le Big Bang, par les générations successives d'étoiles qui enrichirent progressivement les galaxies.

Dans ce qui suit, j'expose brièvement les notions fondamentales sous-jacentes à la nucléosynthèse. L'accent est mis (sections 4 et 5) sur la nucléosynthèse dans les étoiles massives, étoiles qui synthétisent la plupart des éléments lourds les plus abondants (C, O, Si, Ca, Fe, etc.) qui sont importants pour la formation des planètes de type terrestre et pour la vie.

¹ Le terme *Big Bang* avait été attribué de façon ironique à la théorie de l'Univers primordial chaud par Fred Hoyle, qui défendait à l'inverse la *Théorie stationnaire* (*Steady State*) pour l'Univers. Il s'est avéré que les visions cosmologiques de Hoyle étaient erronées mais que ses idées concernant l'origine des éléments étaient justes, et inversement pour Gamow.

2. Les noyaux dans le cosmos

2.1 Abondances solaires et cosmiques

Selon nos connaissances actuelles, en raison des conditions de température élevée (ayant engendré la fonte de la quasi-totalité des grains de poussière) et d'un mélange très efficace, la composition chimique de la matière de la nébuleuse protosolaire a été remarquablement homogène. Cette composition est celle que l'on retrouve aujourd'hui à la surface du Soleil, qui n'est pas affectée par les réactions nucléaires ayant lieu dans son cœur (à quelques exceptions près, notamment pour les fragiles éléments D et Li). L'abondance de la plupart des éléments de la photosphère solaire est de nos jours déterminée avec une très bonne précision.

Une fois pris en compte divers effets physico-chimiques², il apparaît que la composition élémentaire de la Terre et des météorites est en excellent accord avec la composition de la photosphère stellaire³. En outre, les matériaux terrestres et météoritiques nous offrent l'opportunité de mesurer en laboratoire leur composition isotopique avec une précision excellente alors que de telles mesures sont, en général, impossibles dans le cas du Soleil⁴.

Une combinaison des mesures solaires et météoritiques nous permet d'établir la composition du Soleil (figure 1), reflétant sans doute celle de la nébuleuse protosolaire il y a 4,5 milliards d'années. Une des premières études visant à déterminer cette courbe a été réalisée par Goldsmith en 1938. Suess et Urey fournirent en 1956 le premier ensemble de données relativement complet sur lequel furent basés les travaux fondateurs de la nucléosynthèse (Burbidge et al. 1957, Cameron 1957). Les compilations majeures récentes sont celles de Lodders (2003) et Asplund, Grevesse et Sauval (2004).

Au début des années cinquante, on réalisa que la composition des étoiles de la Voie lactée présente à la fois des similitudes frappantes et des différences considérables avec celle du Soleil. La prédominance universelle de H (90 % en nombre) et de He (9 % en nombre) ainsi que les abondances relatives des « métaux » (c'est-à-dire les éléments plus lourds que l'hélium He) est la plus importante similitude. En revanche, il apparaît que la fraction de métaux (« métallicité ») varie considérablement (figure 2), autant dans le voisinage solaire (où les étoiles les plus vieilles ont une métallicité 10

2 Par exemple la faible gravité de surface de la Terre, et des objets du Système solaire plus petits qu'elle, était insuffisante pour retenir les éléments légers H et He de la matière protosolaire ; en dépit de leur abondance initiale élevée, ces éléments sont absents de ces objets (l'hydrogène H, combiné avec le réactif chimiquement O sous la forme d'eau, s'est retrouvé sur Terre longtemps après la formation de cette dernière, lors d'une phase d'accrétion plus tardive).

3 Des incompatibilités de longue date entre les mesures solaires et météoritiques concernant les abondances de certains éléments clés ont été résolues dans les années quatre-vingt-dix (pour Fe) et au début des années deux mille (pour O et C).

4 La spectroscopie nucléaire, à travers la détection de raies γ caractéristiques issues des désexcitations des noyaux dans les éruptions solaires, offre la possibilité (limitée) de déterminer la composition isotopique du Soleil.

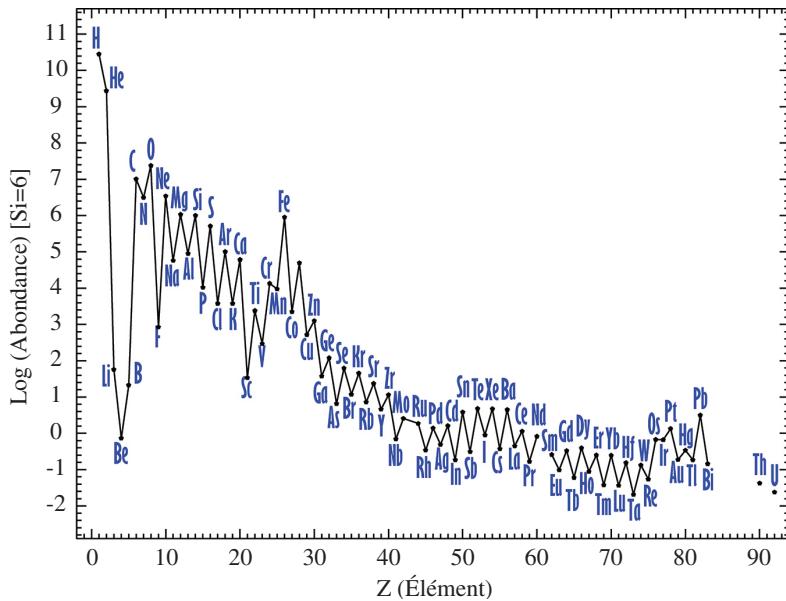


Figure 1. Abondances relatives en nombre (normalisées à 10^6 pour Si) du Soleil en fonction du nombre de protons Z de l'élément. H et He sont de loin les éléments les plus abondants (90 % et 9 % en nombre respectivement, soit 70 % et 28 % en masse). Il faut noter également : l'abondance extrêmement faible de Li, Be et B par rapport à celle des éléments voisins C, N et O, le pic dans la courbe d'abondance au voisinage de Fe, la forme globale en dents de scie et l'abondance élevée de Pb.

fois plus faible que celle du Soleil), dans le disque de la Voie lactée (où des étoiles situées dans la partie interne de la galaxie possèdent 3 fois plus de métaux que le Soleil), que dans le halo galactique (où les métallicités stellaires varient entre 0,1 et 0,00001 fois celle du Soleil).

Ces variations de composition sont extrêmement importantes pour notre compréhension de l'évolution chimique de la Voie lactée ; elles reflètent en effet l'enrichissement progressif des diverses parties de la Galaxie (halo, bulbe, disque) avec les métaux produits et éjectés par les générations successives d'étoiles, depuis les premières qui étaient probablement constituées du gaz de composition primordiale (c'est-à-dire H, He et une très faible quantité de Li, résultant de l'Univers chaud du Big Bang). Cependant, la très grande diversité de métallicité des étoiles (observée également dans le milieu interstellaire de la Voie lactée et dans les autres galaxies) ne doit pas masquer l'importance de l'uniformité du motif de base, c'est-à-dire la prédominance de H et He et la quasi-uniformité (à un facteur de quelques unités près) des rapports d'abondance entre les différents métaux. C'est précisément cette uniformité qui nécessite une explication, impliquant des réactions nucléaires dans des sites astrophysiques appropriés.

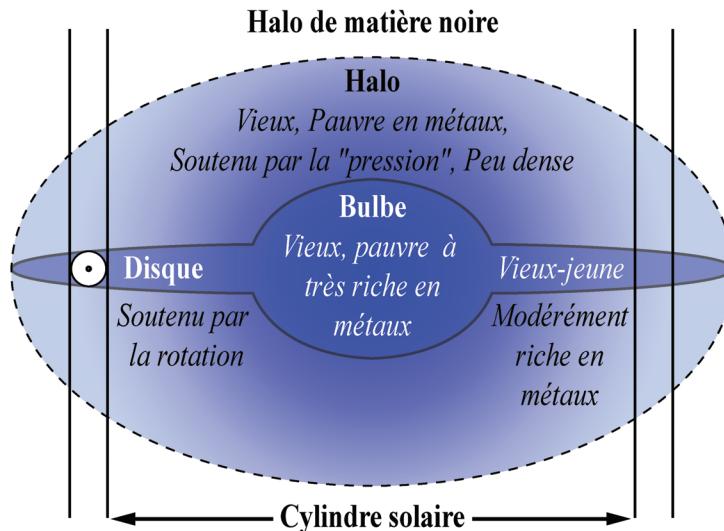


Figure 2. Vue en coupe schématique de la Voie lactée. Sont représentés le Soleil, à une distance de 26 000 années-lumière du centre, et les différentes parties de la Galaxie (halo, bulbe, disque) avec les caractéristiques principales des populations d'étoiles respectives

2.2 Abondances cosmiques et propriétés nucléaires

Les abondances solaires et cosmiques des différentes espèces nucléaires (figure 3, graphe du haut) constituent une propriété macroscopique importante de la matière (baryonique). On réalisa que cette propriété est étroitement liée à une propriété microscopique : l'énergie de liaison par nucléon (BEN pour « Binding Energy per Nucleon » en anglais, voir le graphe du bas de la figure 3). Cette quantité représente l'énergie par nucléon requise pour briser un noyau en ses composantes élémentaires et constitue une mesure de la stabilité du noyau. Dans le modèle de la goutte liquide, le noyau (composé de A nucléons) est décrit approximativement par la formule de Bethe et Weizsaecker (1935) :

$$BEN(A, Z) = f_v f_s A^{-1/3} - f_E Z(Z-1) A^{-4/3} - f_{SM}(A-2Z)^2 / A^2$$

Selon cette formule, la BEN résulte de la compétition (ou de la synergie) entre plusieurs facteurs :

- l'attraction nucléaire entre nucléons voisins, de courte portée, contribue sous la forme d'un terme constant f_v (V pour volume) ;
- un terme de symétrie (avec un coefficient f_{SM}), provenant en partie du prin-

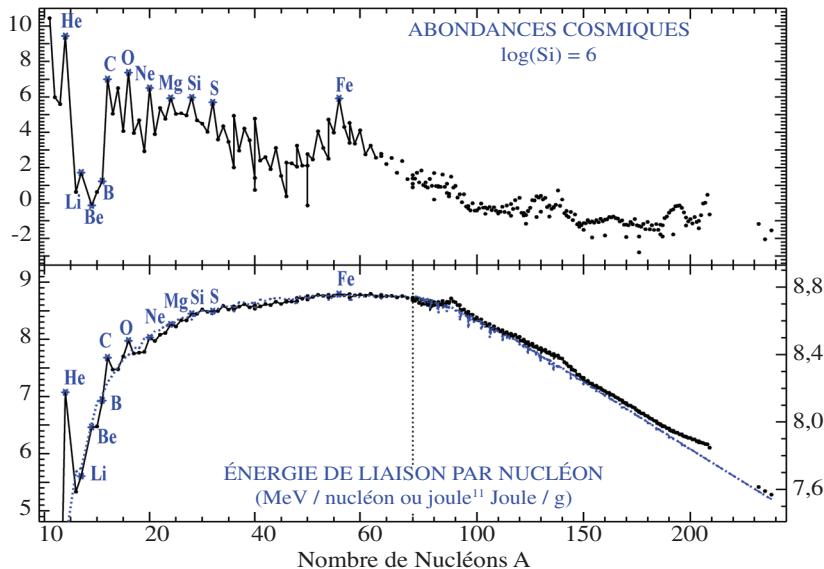


Figure 3. Abondances cosmiques (graphe du haut) et énergie nucléaire de liaison par nucléon (graphe du bas) en fonction du nombre de masse nucléaire A . Les noyaux qui sont fortement liés (les « noyaux α » comme ^4He , ^{12}C , ^{16}O , ^{20}Ne , ^{24}Mg et ^{28}Si , ou les noyaux du pic du fer) sont plus abondants que leurs voisins. Sur le graphe du bas, la courbe continue relie les points expérimentaux et la courbe en pointillés est une application directe du modèle de la goutte liquide (voir texte), sans les corrections dues au modèle en couches. Notez le changement d'échelle horizontale en $A=70$ ainsi que les différentes échelles verticales sur les côtés gauche et droit du graphe du bas.

cipe d'exclusion de Pauli et en partie des effets de symétrie dans l'interaction entre deux nucléons, qui favorise un nombre égal de protons et de neutrons ainsi que les noyaux de nombre de masse A pair plutôt qu'impair ;

- la répulsion électrostatique entre deux protons (avec un coefficient f_E), de longue portée, favorise une augmentation de la fraction de neutrons quand le nombre de masse A augmente ;
- un terme de surface (avec un coefficient f_s), représentant le fait que les nucléons situés à la « surface » du noyau contribuent moins à l'énergie de liaison que les autres ; l'importance de ce terme décroît à mesure que A croît (c'est-à-dire lorsque le rapport surface/volume décroît).

Un calcul simple de la BEN respectant ces règles reproduit de façon satisfaisante les caractéristiques grossières de la courbe mesurée (voir figure 3) : la BEN augmente rapidement jusqu'au pic du fer (en conséquence de l'importance décroissante de la contribution négative du terme de surface) puis décline lentement (en conséquence de l'importance croissante des contributions négatives des termes électrostatiques et de symétrie).

Cependant, un traitement complet doit tenir compte des effets de mécanique quantique et s'avère nécessaire pour reproduire quelques caractéristiques clés de la courbe BEN. Le « modèle en couche » du noyau suppose que chaque nucléon est soumis au potentiel créé par l'ensemble des autres nucléons. Ce traitement conduit à des niveaux d'énergie discrets (figure 4) et rend compte de la propension de deux nucléons identiques à former une paire de spins opposés, ce qui introduit une contribution (positive) supplémentaire à la courbe BEN ; ce modèle rend également compte de l'exceptionnelle stabilité des noyaux α (avec un nombre de nucléons multiple de 4, comme ^4He , ^{12}C , ^{16}O , ^{20}Ne , ^{24}Mg , etc.) et de la stabilité des noyaux possédant le nombre « magique » de nucléons 2, 8, 20, 28, 50, 82 ou 126 (correspondant à des couches nucléaires pleines sur la figure 4).

Les caractéristiques clés de la courbe BEN se retrouvent clairement dans la courbe d'abondance cosmique, quoiqu'au niveau local seulement : les éléments plus stables sont plus abondants que leur voisins (par exemple les noyaux α ou les noyaux du pic du fer), alors que les fragiles Li, Be et B sont extrêmement sous-abondants. Cependant, au niveau global, les éléments légers H et He sont de plusieurs ordres de grandeur plus abondants que les noyaux plus solidement liés C, N et O qui, à leur tour, sont plus abondants que les noyaux encore plus stables du pic du fer.

La corrélation (locale) entre les abondances cosmiques et la stabilité nucléaire suggère que les réactions nucléaires ont façonné les abondances des éléments dans l'Univers. Le fait que la corrélation soit seulement locale nous indique que les processus nucléaires ont affecté seulement une petite fraction de la matière baryonique de l'Univers (moins de quelques pourcents). C'est tant mieux pour nous, étant donné que les noyaux surabondants H et He constituent le principal combustible des étoiles (voir section 3). L'histoire de l'évolution stellaire et des transformations nucléaires associées est donc encore loin de toucher à sa fin.

2.3 Tour d'horizon de la nucléosynthèse

En se basant sur un ensemble rapidement croissant de données expérimentales, autant astronomiques (abondances dans les étoiles et les météorites) que nucléaires (énergies de liaison et taux de réactions nucléaires), ainsi que sur une compréhension élémentaire de la structure et de l'évolution des étoiles, Burbidge et al. (1957)⁵ et Cameron (1957) identifièrent les principaux processus nucléosynthétiques se produisant dans la nature. Ces processus ont été abondamment étudiés pendant la seconde moitié du vingtième siècle. Il est maintenant clairement établi que :

- les éléments légers H et He ainsi que 10 % du fragile ^7Li ont été produits lors des premiers instants de l'Univers primordial par des réactions thermonucléaires entre neutrons et protons⁶ ;

⁵ L'un des auteurs, le physicien nucléaire William A. Fowler, reçut en 1984 le prix Nobel de physique pour sa contribution à notre compréhension de l'origine des éléments.

⁶ Les noyaux avec les nombres de masse $A=5$ et $A=8$ sont instables et n'existent pas dans la nature. Ce fait a d'importantes implications pour la nucléosynthèse primordiale car les réactions nucléaires à deux corps ne pouvaient pas franchir le fossé entre ^4He et ^{12}C . En outre, en raison de la rapide diminution de la densité et de la température lors des premiers instants chauds de l'Univers, la réaction

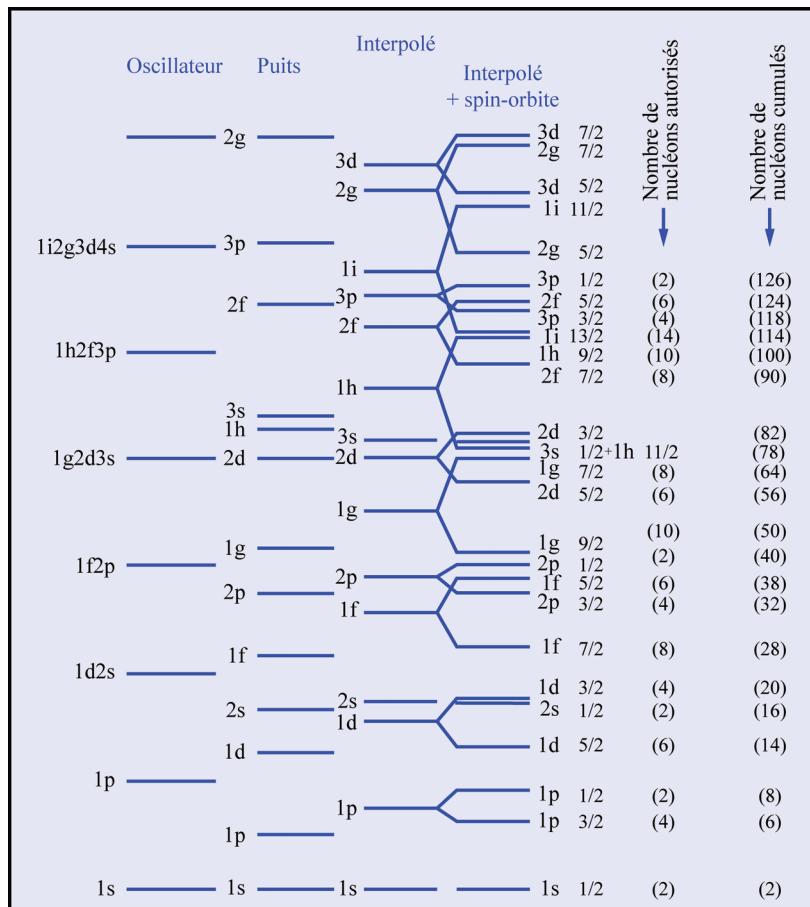


Figure 4. Schéma des niveaux d'énergie nucléaire pour différents potentiels nucléaires. L'interaction spin-orbite (4ème colonne) a eu une importance fondamentale pour la compréhension des propriétés des noyaux. Les noyaux avec des couches de nucléons pleines (avec 2, 8, 20, 28, 50, 82 et 126 nucléons, dernière colonne) sont considérablement plus stables que leurs voisins, une propriété qui se retrouve également dans la courbe des abondances cosmiques.

- tous les éléments entre C et le pic du fer ont été produits par des réactions thermonucléaires à l'intérieur des étoiles, soit pendant leurs stades évolutifs hydrostatiques, soit lors des violentes explosions (supernovae) qui marquent la mort de certaines étoiles ;
- les éléments plus lourds que ceux du pic du fer ont été produits par captures

$^{3\alpha} \rightarrow ^{12}\text{C}$ n'avait pas le temps d'agir non plus ; ceci devint possible seulement bien plus tard, à l'intérieur des étoiles Géantes rouges (voir section 3.3).

de neutrons dans les étoiles, soit sur des échelles de temps longues dans des milieux où la densité de neutrons était faible (éléments *s*), soit sur des échelles de temps courtes dans des milieux où la densité de neutrons était élevée (éléments *r*) ; une fraction minoritaire de ces éléments lourds a été produite par photodésintégration des isotopes lourds dans les explosions en supernova (isotopes *p*) ;

- finalement, les légers et fragiles isotopes de Li, Be et B ne sont pas produits dans les intérieurs stellaires (ils sont au contraire détruits à ces températures) mais par des réactions de spallation, où des rayons cosmiques très énergétiques arrachent des nucléons aux abondants noyaux C, N et O du milieu interstellaire.

Dans ce qui suit, nous nous focaliserons sur la production de noyaux lourds (métaux) par les étoiles, noyaux beaucoup plus importants que les noyaux légers pour l'origine des planètes de type terrestre et pour la vie. Ceci nécessite un rapide tour d'horizon des propriétés des étoiles et, en particulier, de leurs intérieurs.

3. Étoiles : de la Séquence principale à la phase Géante rouge

3.1 Propriétés fondamentales des étoiles

La théorie de la structure et de l'évolution stellaire est sans conteste la théorie astrophysique la plus réussie. Elle est fortement basée sur l'interprétation du célèbre diagramme de Hertzsprung-Russell (diagramme HR), établi par E. Hertzsprung et H.N. Russel dans les années dix. Ce diagramme (figure 5) met en jeu deux propriétés stellaires fondamentales : la luminosité absolue L (déduite de la luminosité apparente, une fois connue la distance) et la température de surface (mesurée grâce à la couleur de l'étoile et appelée température effective T_E quand on suppose que la surface de l'étoile rayonne comme un corps noir).

Dans le voisinage solaire, 90 % des étoiles se trouvent sur la Séquence principale, une bande quasi-diagonale qui s'étend depuis des valeurs élevées jusqu'à des valeurs faibles de L et T_E , où les étoiles les plus massives sont plus chaudes et plus lumineuses⁷. Les 10 % restant sont soit des objets froids (rouges) et lumineux (des Géantes rouges), soit des objets chauds et très peu lumineux (des Naines blanches).

L'interprétation du diagramme HR devint possible quand la nature de la source d'énergie des étoiles fut comprise. Les travaux de H. Bethe et K.-F. von Weizsaecker dans les années trente établirent les séries de réactions nucléaires qui produisent l'énergie rayonnée par le Soleil et par les autres étoiles de la Séquence principale (voir section 3.2)⁸.

⁷ La masse des étoiles peut être déterminée de façon précise uniquement dans le cas où elles se trouvent dans des systèmes binaires, par application de la loi de Kepler.

⁸ Le physicien d'origine alsacienne Hans Bethe reçut en 1967 le prix Nobel de physique pour son travail sur la production d'énergie dans le Soleil et les étoiles.

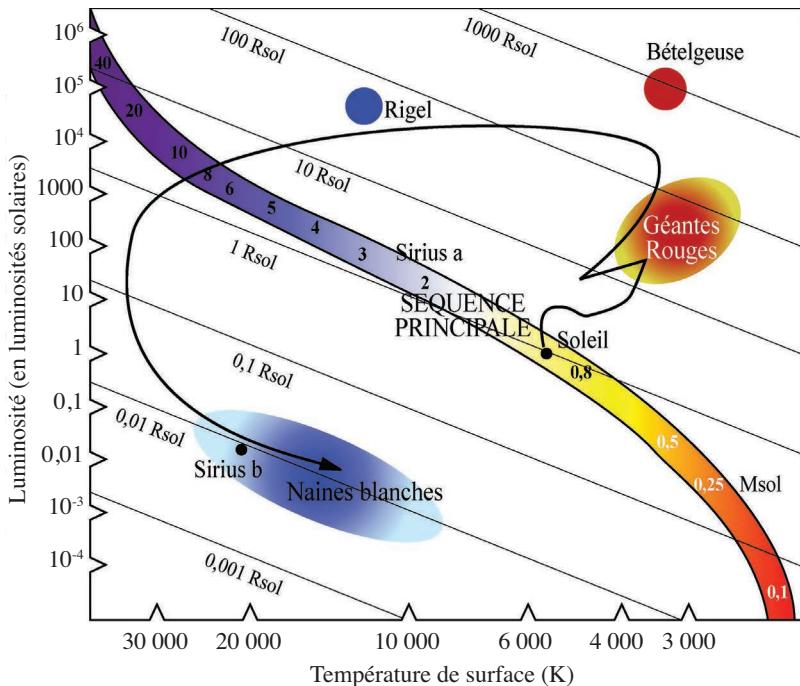


Figure 5. Luminosité vs. Température Effective. Sur la Séquence principale (la bande pleine quasi-diagonale qui inclut ~90 % des étoiles du voisinage solaire), les chiffres indiquent la masse de l'étoile correspondante (en unités solaires). Les lignes diagonales indiquent le rayon stellaire à chaque endroit du diagramme. La courbe montre schématiquement l'évolution du Soleil, de la Séquence principale à la phase Géante rouge et jusqu'à sa fin en Naine blanche.

La structure de ces étoiles était relativement bien comprise à cette époque, après les travaux de A. Eddington dans les années vingt.

En première (et, en pratique, assez bonne) approximation, une étoile est une sphère de gaz en équilibre hydrostatique entre :

- la force attractive de sa propre gravité (qui dépend de sa masse) et
- la pression interne, qui dépend de l'état physique du gaz stellaire ; pour un gaz parfait (état dominant dans les parties internes des étoiles de la Séquence principale) elle est proportionnelle au produit de la température par la densité.

Il se trouve que les masses gazeuses de composition chimique solaire et de masse comprise entre 0,08 et 100 masses solaires (M_{\odot}) ont à l'équilibre une température centrale comprise entre 2 et 30 millions de kelvins.

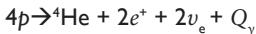
Ceci a deux conséquences importantes :

- en raison du gradient de température entre le centre et la surface, la chaleur interne de l'étoile est irradiée vers l'espace ;
- la température centrale est suffisamment élevée pour induire des réactions de fusion thermonucléaires entre les noyaux légers et abondants d'hydrogène, réactions qui libèrent des quantités immenses d'énergie et maintiennent l'intérieur stellaire chaud sur des intervalles de temps très longs (voir section suivante).

En raison de sa gravité, l'étoile « contrôle » le taux des réactions nucléaires dans son cœur et n'explose pas ; en effet, si le taux de réactions nucléaires augmente, produisant plus d'énergie, l'étoile chauffe, se dilate⁹ et se refroidit, réduisant la production d'énergie et revenant ainsi à son précédent taux de consommation de combustible. Ainsi, une étoile est un « réacteur à fusion thermonucléaire gravitationnellement lié » ; elle brille simplement parce qu'elle est massive¹⁰, et elle brille sur des intervalles de temps très longs parce qu'elle utilise une source d'énergie efficace et qu'elle a de grandes quantités de combustible à sa disposition.

3.2 Combustion de l'hydrogène sur la Séquence principale

Dépendant de la température interne, la combustion de l'hydrogène peut se dérouler selon différents modes à l'intérieur des étoiles. Le résultat est cependant toujours le même : quatre protons disparaissent et donnent naissance à un noyau d'⁴He, en parallèle de quoi deux positrons, deux neutrinos ainsi que des photons γ sont émis.



L'énergie libérée, correspondant à la différence de masse Δm entre les 4 protons et le noyau ⁴He est $E \sim \Delta mc^2 \sim 26 \text{ MeV}$, c'est-à-dire $\sim 6,6 \text{ MeV/nucléon}$ ou $5 \cdot 10^{18} \text{ erg/g}$. La plupart de l'énergie est déposée localement et chauffe le gaz stellaire, tandis qu'une fraction minime s'échappe de l'étoile, emportée par les neutrinos (qui interagissent seulement faiblement avec la matière). Les neutrinos émis par le Soleil ont été détectés par plusieurs expériences depuis les années soixante. Les flux neutriniques sont en excellent accord avec les prédictions des modèles solaires, une fois prises en compte les oscillations des neutrinos (comme suggéré par l'expérience Sudbury sur les neutrinos en 2000) ; cet accord est une preuve solide et claire que la production d'énergie dans le Soleil est effectivement bien comprise.

Dans les étoiles ayant une masse inférieure à $1,2 M_\odot$ et une température centrale inférieure à $20 \cdot 10^6 \text{ K}$, la plupart de l'énergie est produite par les chaînes $p-p$ (figure 6). Lors de

⁹ Pour un gaz parfait, la pression dépend à la fois de la densité *et* de la température, c'est-à-dire $P \propto \rho T$; ce n'est pas le cas pour un gaz dégénéré, et cela a des conséquences explosives pour les SNla (voir section 5.4).

¹⁰ Même sans réactions nucléaires, le Soleil pourrait briller avec sa luminosité actuelle L_\odot pendant ~ 30 millions d'années, en se contractant lentement et en relâchant de l'énergie gravitationnelle $d(G \cdot M^2/R)/dt \sim L_\odot$; le taux de contraction requis est de $dR/dt \sim 7 \text{ m/an}$, trop faible pour être détectable.

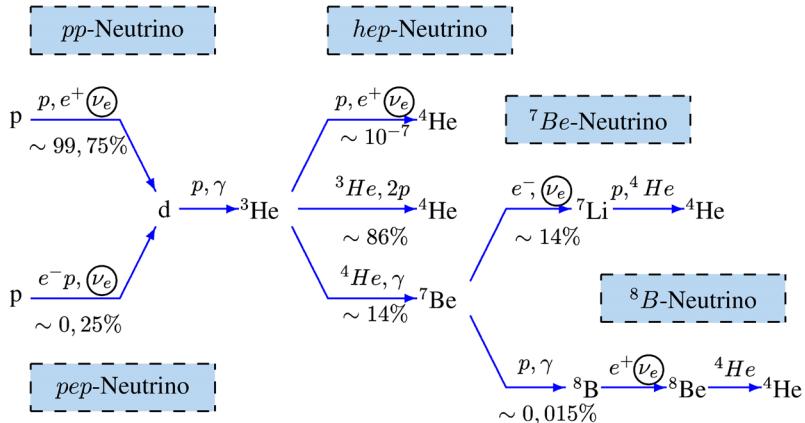


Figure 6. Réactions nucléaires des trois chaînes proton-proton, qui produisent un noyau à partir de 4 protons et fournissent la plupart de l'énergie dans les étoiles de faible masse de la Séquence principale. Le pourcentage représenté par chaque chaîne de réactions (86 % pour la première, etc.) correspond aux conditions actuelles à l'intérieur du Soleil.

la première de ces réactions, une interaction faible très lente convertit un proton en un neutron, ce qui explique la très longue durée de vie des étoiles alimentées en énergie par ce mode de combustion de l'hydrogène (~ 10 milliards d'années pour le Soleil).

Dans les étoiles de masse et de température plus élevées, la combustion de l'hydrogène se fait par le cycle CNO (figure 7), où les isotopes C, N et O (produits par les générations stellaires précédentes) agissent comme des catalyseurs. La somme des abondances des noyaux CNO reste constante pendant toute la combustion de l'hydrogène, mais un réarrangement interne a lieu : ^{12}C et ^{16}O sont convertis en ^{14}N et, dans une moindre mesure, en ^{13}C et ^{17}O ; ce sont les principaux noyaux produits par le cycle CNO.

Une différence importante entre les chaînes $p-p$ et le cycle CNO réside dans la dépendance en température de leurs taux de production d'énergie respectifs. Dans le cas des chaînes $p-p$, le taux de production d'énergie varie comme $\epsilon_{pp} \propto T^4$ alors qu'il varie comme dans $\epsilon_{CNO} \propto T^{18}$ le cas du cycle CNO. Cette différence est due à l'effet des barrières coulombiennes entre les réactifs, qui sont plus importantes dans le dernier cas. La forte dépendance en température de ϵ_{CNO} a une conséquence importante : l'énergie produite localement par le cycle CNO peut seulement être évacuée par convection, ce qui implique que l'intérieur de l'étoile devient chimiquement bien homogène (c'est-à-dire que les abondances des noyaux sont uniformes à l'intérieur de la région convective). Au contraire, dans le cas du Soleil et des étoiles de faible masse, l'énergie est évacuée par radiation ; à l'intérieur de telles étoiles, les abondances des noyaux réactifs et de leurs produits varient de façon continue avec le rayon.

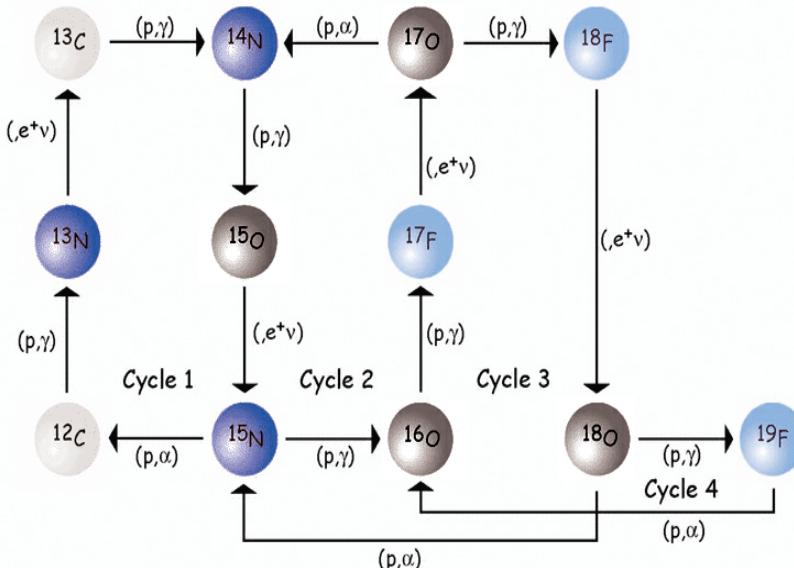


Figure 7. Le tri-cycle CNO complet. Pendant la combustion de l'hydrogène, il fournit l'énergie aux étoiles de la Séquence principale qui sont plus massives que $1,2 M_\odot$ et produit N à partir des noyaux C et O initialement présents.

Sur la Séquence principale, la luminosité d'une étoile (c'est-à-dire son taux de consommation de combustible) est proportionnelle à sa masse à une certaine puissance ($L \propto M^K$, avec $K \sim 3$), alors que l'énergie disponible E est seulement proportionnelle à sa masse (une fraction $f \sim 10\text{--}50\%$ de la masse est « brûlée », avec f d'autant plus grand que la masse de l'étoile est élevée). Il en résulte que la durée de vie sur la Séquence principale est $\tau \propto fE/L \propto M/M^K \propto M^2$. Les étoiles les plus massives (plusieurs dizaines de M_\odot) brillent seulement quelques millions d'années ; en comparaison, la durée de vie du Soleil est estimée à 10 milliards d'années tandis que notre plus proche voisine actuelle, Proxima du Centaure (une étoile de $0,12 M_\odot$), est censée vivre pendant plus de 1000 milliards d'années.

Une fois l'hydrogène épuisé, l'étoile a « usé » $\sim 6,6 \text{ MeV/nucléon}$ sur les $8,8 \text{ MeV/nucléon}$ disponibles (c'est-à-dire avant d'atteindre la stabilité nucléaire ultime du pic du fer, figure 3). En d'autres termes, elle a déjà dépensé la plus grosse partie de son combustible nucléaire. Ceci explique pourquoi la phase de combustion de l'hydrogène est la plus longue phase de la vie d'une étoile et pourquoi la plupart des étoiles se trouvent sur la Séquence principale¹¹.

11 Cette explication est surtout valable pour les étoiles massives ; pour les faibles masses, la réalité est un peu plus complexe : elles consomment une quantité de combustible plus importante pendant la

3.3 Combustion de l'hélium pendant la phase Géante rouge

Une fois l'hydrogène épuisé, le cœur de l'étoile se contracte et libère de l'énergie gravitationnelle, ce qui porte les couches riches en hydrogène entourant le cœur à des températures suffisantes pour permettre les réactions de combustion de l'hydrogène. Simultanément, l'enveloppe se dilate et se refroidit et l'étoile se transforme en Géante rouge (ou Supergéante pour les étoiles de masse $> 10 M_{\odot}$). L'enveloppe de ces étoiles est convective et ramène à la surface les produits de la phase précédente de combustion de l'hydrogène. Des enrichissements en ${}^4\text{He}$ et ${}^{14}\text{N}$, ainsi que des rapports isotopiques modifiés, par exemple ${}^{13}\text{C}/{}^{12}\text{C}$ ou ${}^{17}\text{O}/{}^{16}\text{O}$, sont les marques de cette phase de « premier dredge-up », qui nous permet de comparer la théorie de la nucléosynthèse avec les observations.

Quand le cœur dépourvu d'hydrogène atteint des températures de l'ordre de 100 à 200 millions de kelvins (les températures les plus élevées correspondant aux étoiles les plus massives), la combustion de He survient. Elle se déroule en deux étapes (voir figure 8), la deuxième impliquant une réaction résonnante¹². L'issue finale est la formation d'un noyau de ${}^{12}\text{C}$ à partir de trois particules alpha (réaction 3α).

D'un point de vue énergétique, la transformation de ${}^4\text{He}$ en ${}^{12}\text{C}$ est bien moins efficace que la transformation de H en He. L'énergie libérée est de $[3m(\alpha) - m({}^{12}\text{C})]c^2 \sim 7,3 \text{ MeV}$ ou $\sim 0,6 \text{ MeV/nucléon}$, c'est-à-dire environ dix fois moins d'énergie par unité de masse que pour la combustion de l'hydrogène. Ceci explique pourquoi le nombre d'étoiles Géantes rouges est à ce point inférieur au nombre d'étoiles sur la Séquence principale et constitue un test important pour la théorie de l'évolution stellaire.

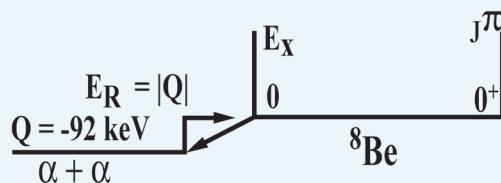
Pendant la combustion de l'hélium, les noyaux ${}^{12}\text{C}$ capturent des particules α pour former des noyaux ${}^{16}\text{O}$; la réaction ${}^{12}\text{C}(\alpha, \gamma){}^{16}\text{O}$ n'est cependant pas résonnante, il s'ensuit qu'à la fin de la combustion de l'hélium il reste une quantité considérable de ${}^{12}\text{C}$ dans le cœur stellaire. ${}^{16}\text{O}$ est habituellement l'élément le plus abondant, mais la valeur exacte du rapport ${}^{16}\text{O}/{}^{12}\text{C}$ dépend du taux de la réaction ${}^{12}\text{C}(\alpha, \gamma){}^{16}\text{O}$ qui reste mal connu.

Au tout début de la combustion de l'hélium, à des températures de l'ordre de $100 \cdot 10^6 \text{ K}$, ${}^{14}\text{N}$ est converti en ${}^{18}\text{O}$ et plus tard en ${}^{22}\text{Ne}$, suite à des captures successives de particules α . Ainsi, la combustion de l'hélium constitue le mode de production de ${}^{18}\text{O}$ dans l'Univers, puisqu'une certaine quantité de cet élément survit dans la couche en fusion d'hélium. Vers la fin de la combustion de l'hélium, à des températures $T \sim 250 \cdot 10^6 \text{ K}$, des neutrons sont produits par la réaction ${}^{22}\text{Ne}(\alpha, n){}^{25}\text{Mg}$. En raison de l'absence de barrières coulombiennes, ces neutrons sont facilement capturés par tous les noyaux de l'étoile (proportionnellement aux sections efficaces de capture de

combustion en couche de l'hydrogène (Géante rouge), mais à un taux beaucoup plus élevé que sur la Séquence principale, ce qui rend cette phase de leur vie moins longue que la précédente.

¹² L'existence du niveau d'énergie à 7654 keV dans le noyau ${}^{12}\text{C}$, qui rend résonnante la réaction 3α , a été prédite par F. Hoyle (et confirmée par des expérimentateurs) en 1953 ; selon Hoyle, le carbone dans l'Univers *devait être produit* par la réaction 3α dans les conditions rencontrées dans les Géantes rouges.

PREMIÈRE ÉTAPE :



DEUXIÈME ÉTAPE :

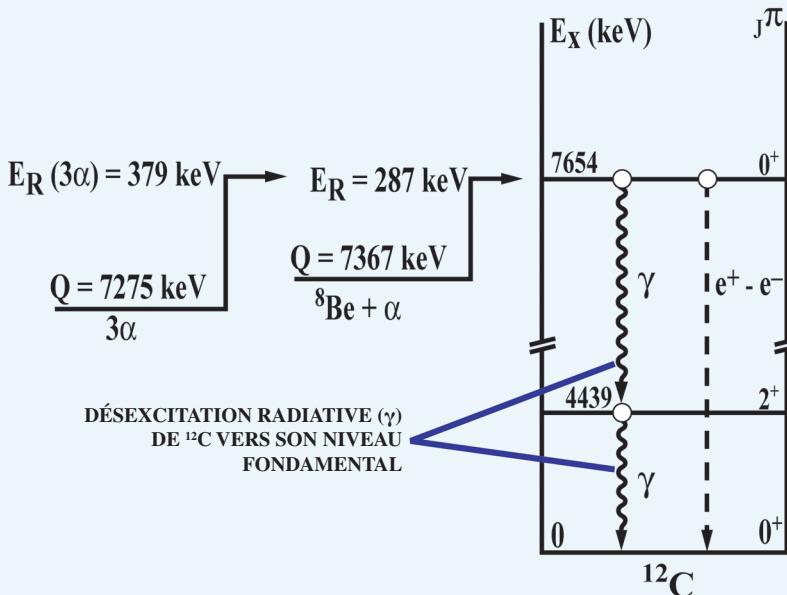
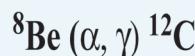


Figure 8. La réaction triple-alpha (3α) se déroule en deux étapes : la formation de ${}^8\text{Be}$ à partir de deux particules alpha (en haut) et la capture d'une troisième particule alpha par ${}^8\text{Be}$ pendant les 10^{-16} secondes que dure la vie de ce noyau instable (en bas) ; aux températures typiques rencontrées dans les Géantes rouges, la seconde étape devient assez rapide uniquement grâce à l'existence du niveau d'énergie à 7 654 keV du noyau ${}^{12}\text{C}$, qui rend la réaction résonnante (adapté de Rolfs et Rodney 1988)

neutrons correspondantes). Une partie de ces noyaux sont détruits lors des phases suivantes de l'évolution des étoiles massives, mais ceux qui survivent sont éjectés dans l'explosion finale en supernova. Ce « processus s faible » mène à la production des éléments s légers dans la nature, ceux ayant un nombre de masse A compris entre 60 et 90 (voir aussi la section 6.2).

Les étoiles les plus massives (avec une masse initiale de plus de $30 M_{\odot}$) développent des vents stellaires importants, à cause de la pression de radiation élevée qui s'exerce sur leur enveloppe. Perdant plus de $10^{-5} M_{\odot}$ par an, elles révèlent finalement les couches affectées par la nucléosynthèse. Les produits de la combustion centrale de l'hydrogène (^4He et ^{14}N) et ensuite ceux de la combustion centrale de l'hélium (^{12}C , ^{16}O et ^{22}Ne) apparaissent donc avec une abondance enrichie à la surface de l'étoile. Ces étoiles sont appelées des Wolf-Rayet et la spectroscopie de leur surface est un test de première importance pour nos théories nucléosynthétiques (Maeder et Meynet 2003 et références citées).

Après que l'hélium ait été épuisé dans le cœur, l'étoile poursuit de façon similaire à l'« après combustion de l'hydrogène » : le cœur de carbone et d'oxygène se contracte et ^4He s'allume dans les couches situées à sa périphérie, l'hydrogène brûlant éventuellement toujours dans des couches encore plus externes. Dans le cas des étoiles de moins de $8 M_{\odot}$, la matière de la couche d'hélium est d'abord mélangée avec la couche d'hydrogène et finalement avec l'enveloppe de l'étoile, qui s'enrichit ainsi des produits de la combustion de l'hélium lors de cette phase de « troisième dredge-up ». L'existence d'« étoiles carbonées », c'est-à-dire de Géantes rouges de faible masse avec des abondances de surface de carbone élevées est un autre test important de la théorie de l'évolution stellaire et de la nucléosynthèse.

Dans le domaine des étoiles de masse faible et intermédiaire ($M < 8 M_{\odot}$), la phase de combustion en double couche (H et He) est hautement instable ; l'énergie est libérée lors de « pulses thermiques » qui éjectent progressivement l'enveloppe de l'étoile dans l'espace. L'étoile devient une *nébuleuse planétaire* pour quelques dizaines de milliers d'années. Par la suite, le cœur nu de CO se refroidit progressivement. Sa température ne s'élève jamais jusqu'au point d'allumage du carbone car la pression de son gaz dégénéré d'électrons peut éternellement s'opposer à sa gravité. L'étoile devient de moins en moins lumineuse jusqu'à ce qu'elle finisse sa vie dans le « cimetière » des Naines blanches du diagramme H-R (voir figure 5). Le destin des étoiles plus massives que $10 M_{\odot}$ est assez différent (et beaucoup plus spectaculaire).

4. Phases avancées de l'évolution des étoiles massives

En dépit de leur faible nombre (moins d'un pourcent dans une génération d'étoiles), les étoiles massives sont les agents les plus importants pour l'évolution chimique des galaxies. En effet, la plupart des éléments lourds (métaux) de l'Univers sont synthétisés dans les intérieurs chauds des étoiles massives, et en particulier pendant l'explosion finale en supernova.

Contrairement à celles de plus faible masse, dont l'évolution s'arrête après la combustion de l'hélium dans une couche entourant un cœur inerte de carbone et d'oxygène, les étoiles de masse $M > 10 M_{\odot}$ brûlent successivement tous les combustibles nucléaires disponibles dans leur cœur, jusqu'à ce que la composition de ce dernier soit dominée par les noyaux du pic du fer. Cependant, la durée de l'ensemble des phases qui suivent la combustion centrale de l'hélium est tellement courte qu'aucun test observationnel direct du statut évolutif du cœur (qui est caché au sein d'une enveloppe de Supergéante rouge) n'est possible. Seules des observations « post-mortem » offrent la possibilité de valider (indirectement) les résultats de nos modèles.

4.1 Les pertes neutriniques accélèrent l'évolution stellaire

L'une des caractéristiques les plus importantes des phases avancées de l'évolution des étoiles massives est la production de neutrinos en grande quantité, à cause des hautes températures et densités qui sont atteintes dans le cœur stellaire après la fin de la combustion de l'hélium ($T > 0,8 \cdot 10^9$ K, $\rho > 10^5$ g.cm⁻³). Les paires neutrino-antineutrino sont produites par :

- 1) *annihilation d'une paire électron-positron*, les électrons et les positrons étant créés par le plasma thermique chaud (notez qu'une petite fraction seulement des annihilations conduit à la création de paires $\nu - \bar{\nu}$) ;
- 2) *processus photo-neutriniqne*, analogue à la diffusion Compton, où le photon sortant est remplacé par une paire $\nu - \bar{\nu}$;
- 3) *processus de plasma*, où un *plasmon* (une excitation du plasma d'énergie $\hbar\omega_p$ où ω_p est la fréquence du plasma) se désintègre en une paire $\nu - \bar{\nu}$.

Les neutrinos interagissent seulement faiblement avec la matière, avec une section efficace $\sigma_{\nu} \sim 10^{-44}$ cm². Leur libre parcours moyen dans le cœur de l'étoile, à des densités $\rho \sim 10^5$ g.cm⁻³ au moment de l'allumage du carbone (voir section 4.2) est $l_{\nu} \sim (\rho N_A \sigma_{\nu})^{-1} \sim 10^5 R_{\odot}$ (où $N_A = 6,023 \cdot 10^{23}$ est le nombre d'Avogadro). Les neutrinos s'échappent donc du cœur de l'étoile, emportant avec eux la plupart de l'énergie thermique disponible (produite par les réactions nucléaires et/ou par contraction gravitationnelle). Pour compenser cette « hémorragie » de neutrinos, le cœur doit accroître sa production d'énergie nucléaire en se contractant et en augmentant sa température. Il en résulte que l'évolution de l'étoile est grandement accélérée : le temps qui s'écoule entre l'allumage du carbone et l'explosion finale en supernova est inférieur à 0,1 % de la durée de vie sur la Séquence principale.

La sensibilité extrême en température de la production d'énergie nucléaire et des pertes neutriniques permet d'obtenir une (assez) bonne estimation de la température de combustion pour chaque phase : l'approximation dite de « puissance équilibrée » (« balanced power », Woosley, Arnett et Clayton 1973) stipule que le taux local de production d'énergie \dot{E}_{nuc} est précisément égal au taux de pertes neutriniques \dot{E}_{ν} (un point au-dessus d'un symbole indique une dérivée temporelle). En tenant compte du fait que

les taux dépendent tous les deux de la température et de la densité, on peut trouver la température de combustion en supposant une densité appropriée.

En appliquant l'approximation de « balanced power », les températures de combustion de C, Ne, O et Si sont calculées dans Woosley (1986) et présentées sous forme graphique sur la figure 9. On voit que C brûle à $T_9 \sim 0,85$, Ne brûle à $T_9 \sim 1,4$, O à $T_9 \sim 1,8$ et Si à $T_9 \sim 3,4$ (où T_9 est la température exprimée en 10^9 K). Les densités correspondantes sont $\sim 10^5$ g.cm $^{-3}$ pendant la combustion du carbone, $\sim 10^6$ g.cm $^{-3}$ pendant la combustion du néon, quelques 10^6 g.cm $^{-3}$ pendant la combustion de l'oxygène et quelques 10^7 g.cm $^{-3}$ pendant la combustion du silicium.

L'évolution de la température et de la densité centrale pour des étoiles de masse comprise entre 13 et 25 M $_{\odot}$ (sans perte de masse) est représentée sur la figure 10. En supposant qu'entre deux phases de combustion le cœur de l'étoile (de masse M et de rayon R) est en contraction quasi-hydrostatique, la pression interne est $P \propto M^2/R^4$; en combinant cela avec la densité ($\rho \propto M/R^3$), on obtient $d\ln P = 4/3 d\ln \rho$. En supposant que la matière du cœur est un gaz parfait ($d\ln P = d\ln \rho + d\ln T$), on obtient finalement $T \propto \rho^{1/3}$. Les résultats numériques montrés sur la figure 10 suivent cette relation jusqu'au moment où l'émission de neutrinos devient importante (légèrement avant l'allumage du carbone dans le cœur). En réalité, après la combustion du néon, une petite partie au centre de l'étoile est partiellement dégénérée, mais pour la vaste majorité du cœur en fusion les conditions sont encore celles du gaz parfait. Notez que pendant les phases de production d'énergie nucléaire, la relation $T \propto \rho^{1/3}$ n'est plus satisfaite (les courbes tournent légèrement vers la gauche).

4.2 Combustion du carbone, du néon et de l'oxygène

La combustion du carbone dans les étoiles massives se produit à $T_9 \sim 0,8$ et $\rho \sim 10^5$ g.cm $^{-3}$. La composition du cœur au moment de l'allumage du carbone est dominée par les produits de la combustion de l'hélium, ^{12}C et ^{16}O (plus de 90 % au total) dans un rapport qui est d'autant plus faible que la masse de l'étoile est importante. Les valeurs précises du rapport $^{12}\text{C}/^{16}\text{O}$ et de la fraction de masse initiale de ^{12}C (qui est cruciale pour l'énergétique de la combustion du carbone) dépendent de façon importante du taux – toujours mal connu – de la réaction $^{12}\text{C}(\alpha, \gamma)^{16}\text{O}$ et du critère adopté pour la convection pendant la combustion de l'hélium. La raison de cette dernière dépendance est la suivante : chaque particule α ramenée à l'intérieur de la zone convective alors que He est presque éprouvé dans le cœur (et que le taux de la réaction 3α est trop faible pour produire de nouveaux noyaux ^{12}C) convertit un noyau de ^{12}C en ^{16}O .

La fusion de deux noyaux ^{12}C produit un noyau composé (ici ^{24}Mg), qui se désexcite en émettant un proton ou une particule α (voir figure 11). Notez que le canal de sortie consistant en l'émission d'un neutron, c'est-à-dire $^{12}\text{C} + ^{12}\text{C} \rightarrow n + ^{23}\text{Mg}$, correspond à une réaction endothermique de probabilité faible (0,1 % à $T_9 = 1$) mais elle est néanmoins importante car la désintégration de ^{23}Mg en ^{23}Na change l'excès de neutrons

$$\eta = \sum_i (N_i - Z_i) Y_i$$

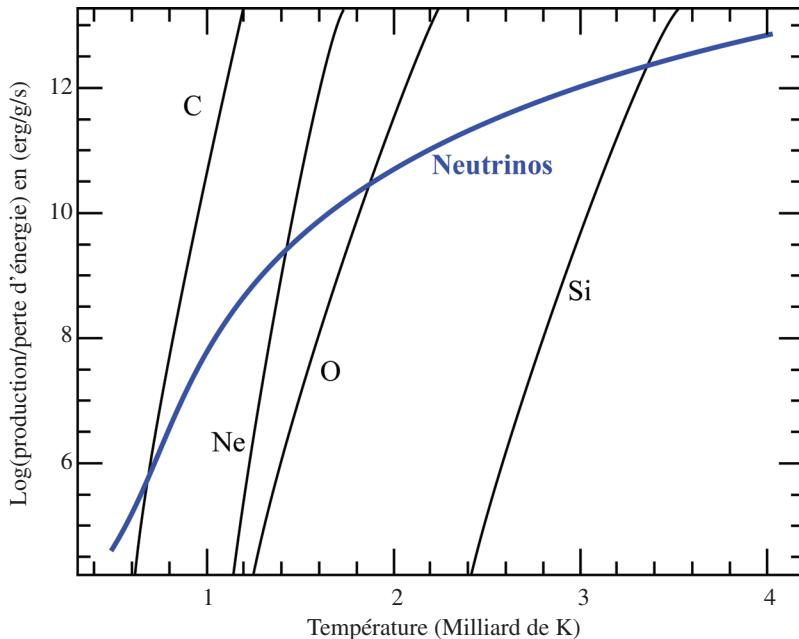


Figure 9. Taux de production d'énergie nucléaire (par unité de masse) pendant les stades avancés de l'évolution des étoiles massives (combustion de C, Ne, O et Si) et taux de pertes neutriniques en fonction de la température. Les températures auxquelles se font effectivement les différentes combustions sont celles données par l'intersection de la courbe de perte neutrinaire avec la courbe de production d'énergie nucléaire correspondante (selon S. Woosley, A. Heger et T. Weaver 2002)

où N_i , Z_i et $Y_i = X_i/A_i$ sont le nombre de neutrons, la charge et l'abondance molaire du noyau i , respectivement (voir section 4.3). De plus, les captures de neutrons par les noyaux lourds produisent des noyaux plus lourds que le fer, modifiant ainsi la composition en éléments résultant de la phase précédente de combustion de l'hélium. Les protons et les particules α libérés par la fusion $^{12}\text{C} + ^{12}\text{C}$ sont capturés par les noyaux du milieu environnant à travers des douzaines de réactions (négligeables d'un point de vue énergétique) ; en particulier, les captures de particules α par ^{20}Ne produisent ^{24}Mg . Ainsi, les principaux produits de la combustion du carbone sont ^{20}Ne , ^{23}Na et ^{24}Mg .

La combustion du carbone libère une énergie $q_{nuc} \sim 0,4 \text{ MeV/nucléon}$ ou $\sim 4 \cdot 10^{17} \text{ erg/g}$. Le taux de production d'énergie (exprimé en erg/g/s) est :

$$\dot{\epsilon}_{nuc} \propto Y_{12}^2 \rho \lambda_{12,12}$$

où $\lambda_{12,12}$ est le taux de la réaction $^{12}\text{C}+^{12}\text{C}$ et Y_{12} l'abondance molaire de ^{12}C . Pour des abondances molaires de ^{12}C inférieures à 2 % (ou des fractions de masse $X = AY < 0,2$, avec $A = 12$), le taux de production d'énergie est suffisamment petit pour que ^{12}C brûle radiativement.

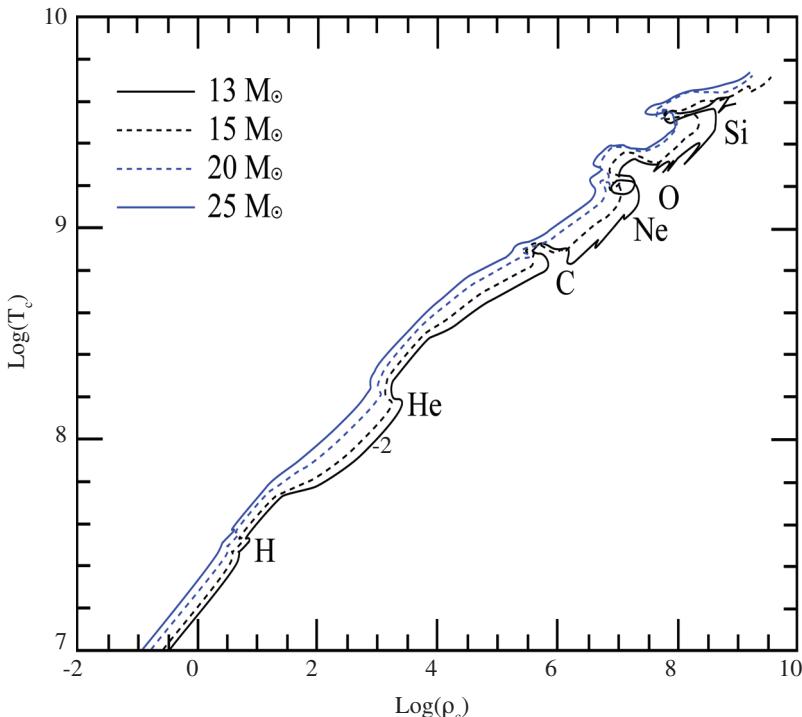


Figure 10. Évolution de la température centrale (en K) en fonction de la densité centrale (en g.cm⁻³) pour des étoiles de 13, 15, 20 et 25 M_⊕ (d'après M. Limongi, O. Straniero et A. Chieffi 2000)

Réactions principales :



Réactions minoritaires de flux >10⁻² de celui des réactions principales :

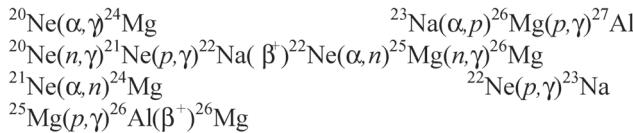


Figure 11. Principales réactions nucléaires ayant lieu pendant la combustion du carbone [La notation A(x,y)B est équivalente à A+x → B+y]. Les quatre premières produisent la quasi-totalité de l'énergie nucléaire. Les autres sont moins importantes sur le plan énergétique, puisque leurs « flux de réaction » (le produit des abondances des réactants par la vitesse de la réaction) sont sensiblement plus faibles (jusqu'à cent fois) que les flux de réactions principales. Néanmoins, elles contribuent à la nucléosynthèse durant la combustion du carbone (d'après K.-F. Thielemann et D. Arnett 1985)

Les modèles numériques détaillés montrent que c'est ce qui se produit dans les étoiles plus massives que $\sim 19 M_{\odot}$ (Woosley et al. 2002) ; dans les étoiles moins massives, un cœur convectif se forme. Le critère adopté pour la convection joue également un rôle dans la détermination de cette masse critique.

Une fois le carbone épuisé, la composition du cœur de l'étoile est dominée par ^{16}O et ^{20}Ne (plus de 90 % du total, en masse). ^{23}Na et ^{24}Mg existent également à un niveau de l'ordre de quelques pourcents (en fraction de masse). En dépit de sa barrière coulombienne moins élevée, ^{16}O n'est pas le combustible suivant à brûler, puisqu'il est exceptionnellement stable (il s'agit d'un noyau doublement magique avec $Z = N = 8$). La photodésintégration de ^{20}Ne , $^{20}\text{Ne}(\gamma, \alpha)^{16}\text{O}$ devient énergétiquement possible à $T_9 \sim 1,5$, c'est-à-dire avant que la température de fusion de ^{16}O ($T_9 \sim 2$) ne soit atteinte. Les particules α ainsi libérées sont capturées, et par ^{16}O (pour redonner un noyau ^{20}Ne), et par ^{20}Ne (pour former ^{24}Mg). Le résultat net de l'opération fait que cette « fusion » de ^{20}Ne peut être décrite par :



La photodésintégration de ^{20}Ne est endothermique, mais les captures α sur ^{16}O et ^{24}Mg , qui sont quant à elles exothermiques, font plus que compenser l'énergie perdue. La combustion de ^{20}Ne produit $\sim 0,1 \text{ MeV/nucléon}$ ou $1,1 \cdot 10^{17} \text{ erg/g}$, c'est-à-dire environ $1/4$ de l'énergie libérée par la combustion du carbone. Quelques autres réactions, négligeables du point de vue de l'énergétique et induites par les particules p , n et α , se produisent pendant la combustion du néon ; en particulier, ^{23}Na (un produit de la combustion du carbone) est détruit par les réactions $^{23}\text{Na}(p, \alpha)^{20}\text{Ne}$ et $^{23}\text{Na}(p, \alpha)^{26}\text{Mg}$ (voir aussi la figure 12).

Après la combustion du néon, le cœur de l'étoile est constitué principalement de ^{16}O , ^{24}Mg et ^{28}Si (ce dernier étant produit principalement par $^{24}\text{Mg}(n, \gamma)^{25}\text{Mg}(\alpha, n)^{28}\text{Si}$). ^{29}Si , ^{30}Si et ^{32}S sont également présents à un niveau de l'ordre de 10^{-2} (en fraction de masse).

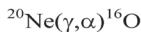
La fusion de deux noyaux ^{16}O produit un noyau composé (ici ^{32}S) qui se désintègre à travers les canaux p , α et n (voir figure 13) ; les rapports de branchement et l'énergie libérée correspondants sont 58 % (7,68 MeV), 36 % (9,58 MeV) et 6 % (1,45 MeV) respectivement. Notez que, à haute température, la désintégration endothermique à travers le canal ^2H se produit également.

L'énergie libérée par la combustion de l'oxygène est $5 \cdot 10^{17} \text{ erg/g}$ ou $0,5 \text{ MeV/nucléon}$. Comme au cours des phases précédentes, des douzaines de réactions induites par n , p et α se produisent. Cependant, la température et la densité encore plus élevées introduisent deux nouvelles caractéristiques :

a) Des captures électroniques se produisent, principalement sur ^{31}S , ^{30}P , ^{33}S , ^{33}Cl et ^{37}Ar . Ces interactions faibles modifient de façon substantielle l'excès de neutrons η , jusqu'à $\eta \sim 0,01$ (spécialement dans les étoiles moins massives et plus denses) ; la composition finale riche en neutrons est clairement non-solaire et n'est que rarement éjectée par l'étoile.

b) Des réactions de photodésintégration deviennent également importantes et détruisent la plupart des éléments plus lourds que le fer qui ont été créés par captures de

Réactions principales :



Réactions minoritaires de flux >10⁻² de celui des réactions principales :

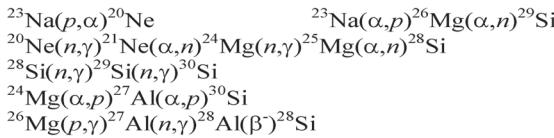


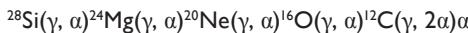
Figure 12. Principales réactions nucléaires ayant lieu pendant la combustion du néon (d'après K.-F. Thielemann et D. Arnett 1985)

neutrons lors des phases de combustion précédentes (principalement par processus *s* pendant la combustion de l'hélium). Cependant, ceci se produit seulement dans les régions les plus internes et les plus chaudes du cœur de l'étoile ; en dehors de celles-ci, les produits des précédentes phases de combustion survivent.

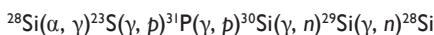
4.3 Fusion du silicium et Équilibre nucléaire statistique (NSE)

Une fois l'oxygène épuisé, la composition du cœur de l'étoile est dominée par ²⁸Si (30-40 % en fraction de masse) et, soit ³²S et ³⁸Ar (dans les coeurs les plus massifs, où les faibles densités ne favorisent pas les captures électroniques), soit ³⁰Si et ³⁴S (dans les étoiles moins massives, en dessous de ~15 M_⊕).

²⁸Si « brûle » à $T_g \sim 3,2$ (voir section 4.1) d'une façon qui rappelle la « combustion » de ²⁰Ne. La fusion de deux noyaux de ²⁸Si requiert des températures tellement élevées que tous les noyaux se photodésintégreraient. A la place, une partie des noyaux de ²⁸Si se photodésintègre, principalement à travers une séquence des réactions impliquant des particules α :

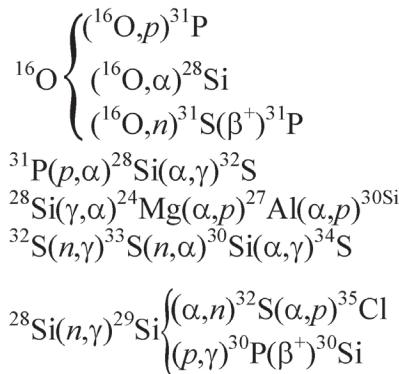


D'autres réactions de photodésintégration libérant des protons et des neutrons se produisent, plus spécialement là où l'excès de neutrons η est très différent de 0 (suite à des précédentes captures électroniques, c'est-à-dire dans les coeurs de densité élevée). Les nucléons et les particules α ainsi libérés sont par la suite capturés par ²⁸Si et par des noyaux plus lourds et un équilibre s'établit entre les réactions directes et inverses, par exemple :



Le nombre de masse moyen du mélange augmente progressivement puisque des nucléons libres et des particules α se retrouvent liés à des noyaux plus lourds et plus stables (voir

Réactions principales :



Captures électroniques :

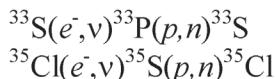


Figure 13. Principales réactions nucléaires ayant lieu pendant la combustion de l'oxygène (d'après K.-F. Thielemann et D. Arnett 1985)

figure 14), c'est la raison pour laquelle l'intégralité du processus est mieux décrite en disant « fusion » de Si. En réalité, un équilibre local entre quelques espèces nucléaires est déjà établit à la fin de la combustion de l'oxygène mais, à mesure que la température croît, les différents ensembles de noyaux en quasi-équilibre se rassemblent. Au début de la fusion du silicium, deux principaux ensembles en quasi-équilibre sont déjà établis : l'un comprenant les noyaux de nombre de masse A compris entre 24 et 46, l'autre comprenant les noyaux du pic du fer. Vers la fin de la fusion de Si, les deux ensembles se fondent en un seul et l'ensemble en quasi-équilibre comprend alors tous les noyaux au-delà de ${}^{16}\text{O}$. Ces séquences de réactions amènent également à l'équilibre les abondances des particules α et des nucléons libres de façon indirecte (et non par la photodésintégration de particules α en nucléons libres). En supposant que deux noyaux ${}^{28}\text{Si}$ sont transformés en un seul noyau du pic du fer, on trouve que l'énergie libérée par la fusion du silicium est $\sim 0,2 \text{ MeV/nucléon ou } \sim 2 \cdot 10^{17} \text{ erg/g}$.

Vers la fin de la fusion du silicium, toutes les interactions électromagnétiques et nucléaires fortes sont en équilibre avec leurs inverses. Étant donné que les neutrinos s'échappent encore librement du cœur de l'étoile, les interactions faibles (produisant ces neutrinos) ne se mettent jamais à l'équilibre avec leurs inverses et l'équilibre total n'est pas établi. Les dernières réactions qui se mettent à l'équilibre sont celles liant ${}^{24}\text{Mg}$

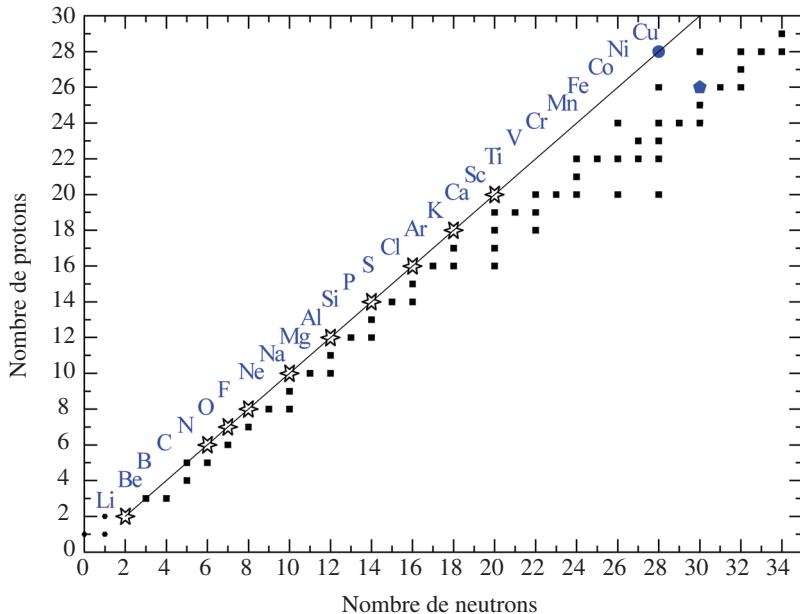


Figure 14. Position des noyaux stables dans le diagramme proton-neutron. La nucléosynthèse stellaire opère à $Z = N$ jusqu'à ^{40}Ca , favorisant les très stables noyaux α (astérisques, voir aussi figure 3). Les interactions faibles (captures électroniques) au cours des phases avancées de combustion de l'oxygène et de fusion du silicium modifient l'excès de neutrons et décalent progressivement la composition vers ^{56}Fe ($Z = 26$, $N = 30$, pentagone plein). Dans des conditions de combustion explosive, les interactions faibles n'ont pas le temps d'agir et le flux nucléaire monte à excès de neutrons constant et $Z = N$ (ligne continue) tout du long jusqu'à ^{56}Ni ($Z = N = 28$, rond plein)

à ^{20}Ne , ^{16}O à ^{12}C et, finalement, la réaction $3\alpha \leftrightarrow ^{12}\text{C}$. Quand ceci se produit, et en supposant que tous les noyaux obéissent à la statistique du gaz parfait de Maxwell-Boltzmann, leurs abondances peuvent être exprimées par application de l'équation de Saha :

$$Y_i(A_i, Z_i) = (\rho N_A) A_i^{i-1} \frac{G_i}{2^{A_i}} \frac{\pi \hbar^2}{m_H \kappa T}^{3(A_i-1)/2} e^{B(A_i, Z_i)/\kappa T} Y_p^Z Y_n^{(A-Z)}$$

où $G_i = \sum_j (2J_j^i + 1) \exp(-E_j^i/\kappa T)$ est la fonction de partition du noyau i (une somme sur tous les niveaux nucléaires de spin J_j et d'énergie E_j) et $B(A_i, Z_i)$ son énergie de liaison. Deux équations supplémentaires sont nécessaires pour éliminer les abondances de neutrons et de protons Y_n et Y_p , on utilise ainsi l'équation de conservation de la masse :

$$\sum_i Y_i A_i = 1$$

et de la charge

$$Y_e = \frac{n_e}{\rho N_A} = \sum_i Z_i Y_i = \frac{1 - \eta}{2}$$

où Y_e est l'abondance molaire d'électrons n_e et la densité d'électrons. Ainsi, à l'Équilibre nucléaire statistique (NSE, pour l'anglais « Nuclear Statistical Equilibrium ») la composition est décrite comme une fonction de 3 paramètres : la température T , la densité ρ et la fraction d'électrons Y_e ou l'excès de neutrons η . En réalité, Y_e et η sont lentement modifiés sous l'action des interactions faibles (des captures électroniques) et cette variation doit également être prise en compte, par exemple de la façon suivante :

$$\frac{dY_e}{dt} = \sum_i -\lambda_i Y_i$$

où λ_i est le taux d'interaction faible sur le noyau i .

Dans les conditions de NSE, l'équation de Saha implique que, pour des températures pas trop importantes ($T < 10$), les noyaux les plus abondants sont ceux qui possèdent l'énergie de liaison la plus élevée pour une valeur donnée de η . Ainsi, pour $\eta \sim 0$, le noyau le plus solidement lié est ^{56}Ni (figure 15). En effet, lorsque la nucléosynthèse se fait de façon explosive, ^{56}Ni est le produit dominant de NSE ; sa désintégration radioactive a été (indirectement) observée dans le cas de la supernova SN1987A (voir section 5.2), confirmant brillamment la théorie. Cependant, dans les conditions de combustion hydrostatique rencontrées au cours des phases avancées de l'évolution de l'étoile, les interactions faibles ont suffisamment de temps pour modifier la valeur de η jusqu'à des valeurs de $\sim 0,06 - 0,08$, correspondant à $Y_e \sim 0,46 - 0,47$. Dans ces conditions, le noyau le plus solidement lié est l'élément stable ^{56}Fe , ^{52}Cr étant également produit en quantité importante (voir figure 15).

Quand la composition de son cœur est finalement dominée par les noyaux fortement liés du pic du fer, l'étoile a atteint la fin de sa vie calme. Toute contraction et augmentation de température supplémentaire du cœur est inapte à produire de l'énergie nucléaire pour maintenir sa pression interne : les réactions impliquant les éléments stables situés au pic de la courbe d'énergie de liaison par nucléon sont endothermiques et sont donc des puits d'énergie thermique. De plus, les captures électroniques se poursuivent à des taux encore plus élevés et continuent d'enlever des électrons au plasma stellaire, affaiblissant ainsi sa principale source de résistance contre la gravité, la pression électronique. Le cœur de fer s'effondre. Le taux et les détails de l'effondrement dépendent sensiblement de la fraction d'électrons Y_e car la masse de Chandrasekhar (c'est-à-dire la masse maximale dont le gaz dégénéré d'électrons peut supporter la gravité) est donnée par :

$$M_{ch} = 3(8\pi^2)^{\frac{1}{4}} \left(\frac{\hbar c}{2G}\right)^{\frac{3}{2}} (N_A Y_e)^2 \sim 1,45(2Y_e)^2 M_\odot$$

Manifestement, le taux de captures électroniques sur les éléments lourds joue un rôle important pour la détermination de la valeur finale de Y_e avant l'effondrement et pour le sort du cœur de l'étoile. Les calculs modernes donnent des valeurs de l'ordre de $Y_e \sim 0,0445$.

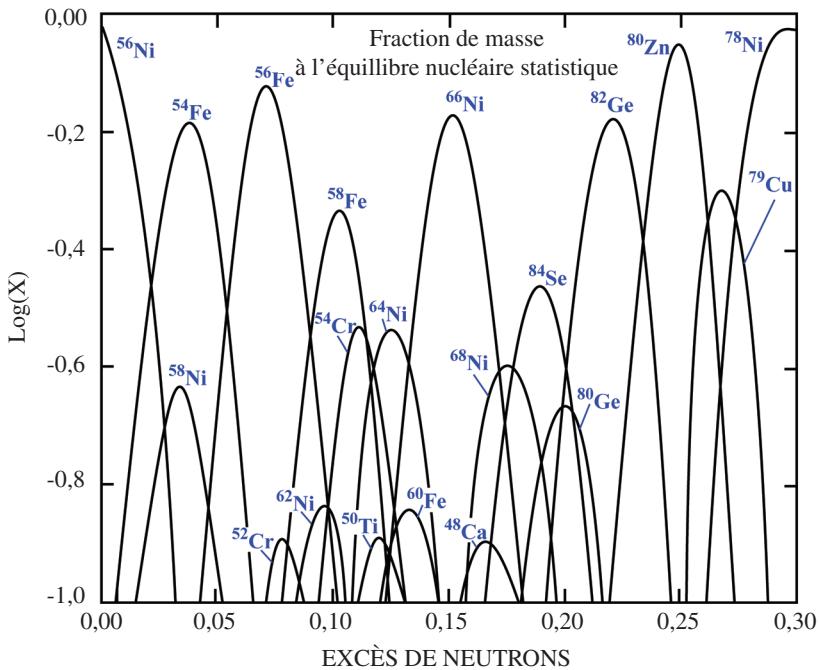


Figure 15. Composition à l'Équilibre nucléaire statistique en fonction de l'enrichissement en neutron η ; la composition correspondant à $\eta > 0,1$ ne se retrouve pas dans la courbe d'abondance cosmique (selon D. Hartmann, S. Woosley et M. El Eid, 1985).

4.4 Résumé des phases évolutives avancées

Une vue schématique de l'évolution de l'intérieur d'une étoile massive est présentée sur la figure 16. La vie d'une étoile massive est essentiellement une succession de phases relativement longues de combustion centrale hydrostatique séparées par des périodes bien plus courtes de contraction et de chauffage du cœur, qui mènent à l'allumage du combustible suivant. Le brûlage en couche d'un combustible donné se met aussi en place à la frontière du précédent cœur convectif, où ce combustible a été épuisé ; la couche en fusion migre progressivement vers l'extérieur. Cependant, le brûlage en couche se fait à des températures supérieures à celles rencontrées pendant la phase de combustion centrale correspondante et le combustible ne brûle jamais jusqu'à épuisement (combustion incomplète).

En pratique, la situation est bien plus compliquée que la vue schématique de la figure 16. La combustion centrale n'est pas toujours convective, car elle dépend de la quantité de combustible disponible, qui détermine la production d'énergie nucléaire (par exemple la combustion centrale du carbone et du néon peuvent se faire de façon radiative). De même, les diverses couches en fusion peuvent ne pas brûler continuellement, mais par intermittence. Seules des simulations numériques complètes incluant un réseau

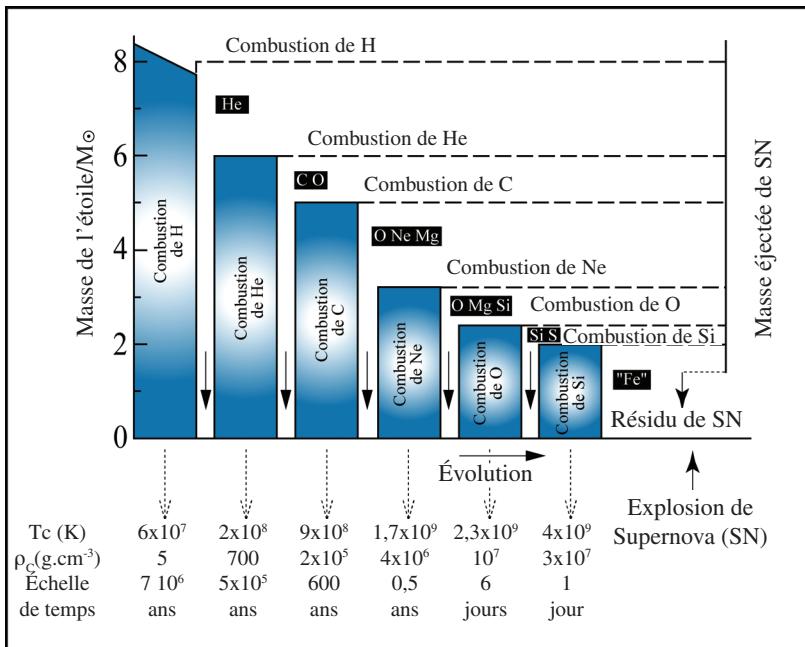


Figure 16. Vue schématique de l'évolution de l'intérieur d'une étoile de $25 M_\odot$. Les régions grisées indiquent une combustion centrale convective et les lignes hachurées un brûlage en couche, les principaux produits sont encadrés. Les flèches verticales indiquent la contraction du cœur entre deux phases de combustion. Les durées des phases de combustion ainsi que les températures et densités centrales correspondantes (valeurs approximatives) sont données en bas du schéma (d'après M. Arnould et K. Takahashi 1999)

détaillé de réactions nucléaires et les ingrédients physiques appropriés peuvent (l'espérons-nous) décrire de façon « réaliste » les phases avancées de l'évolution des étoiles massives (par exemple Arnett 1996, Woosley et Weaver 1995, Thielemann et al. 1996, Chieffi et al. 1998). Certains ingrédients importants du modèle, comme les divers processus de mélange ainsi que le rôle de la rotation, restent toujours incertains et peuvent détenir des indices importants concernant le sort des étoiles de toutes masses (Maeder et Meynet 2002, Heger et al. 2003). Notez également que le traitement numérique de la combustion de l'oxygène et du silicium, où les temps caractéristiques de la convection et de la combustion nucléaire sont du même ordre de grandeur, est toujours problématique (voir Bazan et Arnett 1994).

En dépit de ces incertitudes, on pense que, à la fin de sa vie calme, une étoile massive développe une structure en « pelure d'oignon », avec une composition dominée par des noyaux de plus en plus lourds à mesure qu'on se rapproche du centre. L'étoile reflète dans ses différentes couches la « mémoire » de ses précédentes phases de combustion (c'est-à-dire d'une façon analogue – en fait, opposée – aux diverses strates géologiques qui gardent

les « archives » des périodes plus récentes de l'histoire de la Terre). La raison de cette structure en couche est la sensibilité accrue des taux de réaction nucléaire à la température, à mesure que les barrières coulombiennes des combustibles nucléaires successifs s'accroissent : l'énergie nucléaire est produite dans une région de plus en plus confinée au centre de l'étoile, de telle sorte que le cœur convectif est de plus en plus petit à chaque nouvelle phase de combustion (le brûlage en couche ne modifie pas ce schéma car son seul effet est d'augmenter légèrement la taille de tous les cœurs convectifs précédents).

Plus aucun combustible nucléaire n'étant disponible, le cœur de fer s'effondre et l'étoile meurt dans une spectaculaire explosion en supernova.

5. Nucléosynthèse explosive dans les supernovae

5.1 Caractéristiques principales et classification des supernovae

Quelques supernovae ont été observées à l'oeil nu dans notre Galaxie au cours de l'histoire (par exemple en 1054 dans la constellation du Crabe par des astronomes chinois, en 1572 par Tycho, en 1604 par Kepler), mais aucune au cours des quatre derniers siècles, c'est-à-dire après l'invention du télescope. Des douzaines de supernovae sont en revanche observées de façon routinière chaque année en dehors de la Voie lactée, la plupart situées à des dizaines de millions d'années-lumière.

La luminosité absolue d'une supernova (SN) pique à 10^{42} - 10^{43} erg/s, c'est-à-dire comparable à celle d'une galaxie entière, et l'énergie totale (intégrée sur le temps) émise par rayonnement est de l'ordre de 10^{49} erg, comparable à celle rayonnée par le Soleil en 10^8 ans. La matière éjectée, expulsée à quelques 10^3 km/s (et jusqu'à quelques 10^4 km/s dans certains cas), emporte avec elle cent fois plus d'énergie, sous forme d'énergie cinétique.

Les supernovae sont classées sur la base de leur spectre (figure 17) comme étant de type I (absence de raies caractéristiques de l'hydrogène) ou de type II (présence d'hydrogène). En dépit de son intérêt (l'immense majorité des étoiles montre la présence d'hydrogène dans leur spectre), cette classification concerne seulement les propriétés « épidermiques » des SN et nous renseigne très peu sur le mécanisme de l'explosion.

Les SNIa sont un sous-type de SN que l'on reconnaît à la présence de Si dans les spectres pris au cours des premiers instants et à leurs luminosités maximales quasiment identiques, qui déclinent d'une façon exponentielle caractéristique : d'abord avec une période de ~ 6 jours puis plus lentement après quelques semaines, avec une période de 77 jours. Ce déclin exponentiel des courbes de lumière des SNIa est attribué à la chaîne de désintégration radioactive $^{56}\text{Ni} \rightarrow ^{56}\text{Co} \rightarrow ^{56}\text{Fe}$; les demi-vies de ^{56}Ni et de ^{56}Co sont de 6,1 jours et 77 jours respectivement.

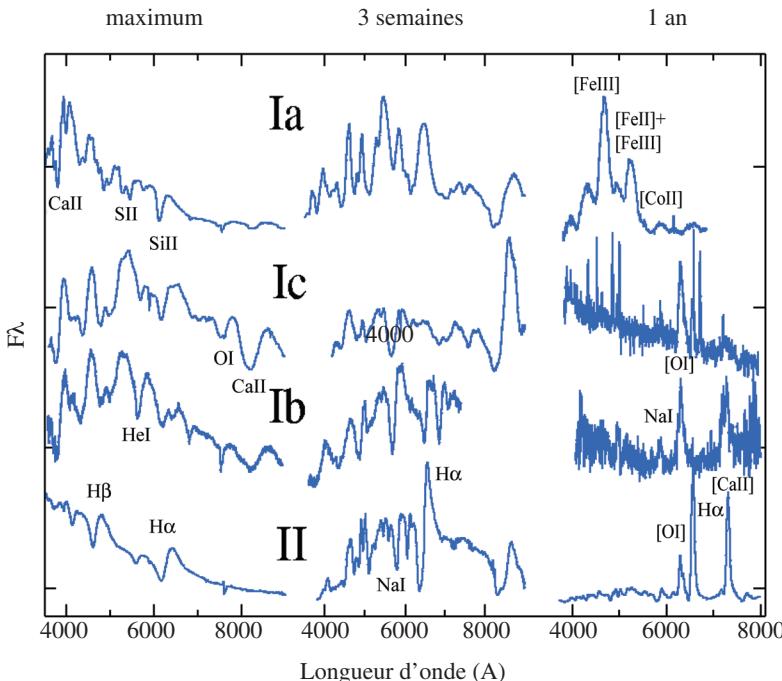


Figure 17. Spectres de SN de différents types (de haut en bas), pris à trois différents instants (de gauche à droite)

On trouve des SNIa dans tous les types de galaxies, même dans les galaxies elliptiques au sein desquelles la formation d'étoiles a cessé il y a des milliards d'années et qui contiennent seulement des populations d'étoiles vieilles de faible masse. Tous les autres types de supernovae se rencontrent dans des galaxies dans lesquelles la formation d'étoiles est actuellement active, c'est-à-dire les galaxies spirales et irrégulières. Combinée à l'absence d'hydrogène, cette propriété des SNIa suggère qu'elles viennent d'une population d'objets âgés qui ont perdu leur enveloppe d'hydrogène. Les Naines blanches sont des candidates évidentes. En effet, la combustion thermonucléaire d'une masse solaire de CO en ^{56}Ni libère environ 10^{51} ergs, ce qui est suffisant pour rendre compte des propriétés énergétiques observées des SNIa.

Un mécanisme différent est à l'origine de l'ensemble des autres types de SN : l'effondrement gravitationnel du cœur de fer d'une étoile massive, qui se transforme en explosion par un mécanisme encore mal compris jusqu'à présent. En supposant que l'effondrement mène à la formation d'un objet compact (une étoile à neutrons de rayon $R \sim 10$ km), l'énergie gravitationnelle dont dispose un cœur de $1 M_\odot$ de fer (erg) est plus que suffisante pour expliquer l'énergie de la SN. Les différences considérables entre les propriétés de ces SN (luminosités maximales, courbes de lumière, spectres) sont dues aux détails de l'effondrement/explosion et, en particulier, à la quantité d'enveloppe riche en hydrogène que possède encore l'étoile au moment de son effondrement.

Les statistiques sur les SN dans les autres galaxies permettent d'estimer que leur fréquence est de $\sim 0,25 - 0,35$ SNIa et 1,5 - 2 SN par effondrement du cœur par siècle dans une galaxie de taille et de type similaire à la Voie lactée. Le fait qu'aucune SN n'ait été observée au cours des 400 dernières années dans notre Galaxie est attribué au fait que les étoiles massives naissent et meurent principalement dans les parties internes du disque galactique (beaucoup plus riches en gaz que les parties externes), régions qui se soustraient à nos observations en optique à cause de la grande densité de colonne de gaz et de poussières (les ondes radio et les rayons gamma traversent sans problème le disque de la Galaxie, mais on observe depuis quelques décennies seulement dans ces longueurs d'onde).

5.2 Nucléosynthèse explosive dans les supernovae par effondrement du cœur

L'idée selon laquelle les explosions des supernovae sont liées à la mort des étoiles massives remonte à l'astronome suisse F. Zwicky dans les années trente. Les premiers modèles numériques de telles explosions ont été construits au début des années soixante (Colgate et al. 1961). Le mécanisme d'explosion en supernova suite à un effondrement du cœur reste cependant hautement incertain (voir par exemple Janka et al. 2002). Une vue schématique de notre compréhension actuelle est présentée à la figure 18.

L'effondrement du cœur de fer se fait en quelques millisecondes. La température toujours croissante fait que des photodésintégrations disloquent les noyaux de fer en nucléons et en particules α , tandis que la densité toujours plus grande favorise les captures électroniques et la transformation des protons en neutrons. Quand la densité de la matière nucléaire est atteinte ($\rho \sim 10^{14} \text{ g.cm}^{-3}$) la partie répulsive de la force nucléaire forte stoppe brusquement l'effondrement des parties internes du cœur. À la frontière des parties internes du cœur, une onde de choc se forme, avec une énergie approximativement égale à l'énergie cinétique du cœur au moment du rebond ($\sim 5 \cdot 10^{51} \text{ erg}$, selon les résultats des simulations numériques). À mesure que l'onde de choc se propage vers l'extérieur, à travers les parties externes du cœur toujours en effondrement, elle en photodésintègre les noyaux de fer (les transformant en nucléons) et perd en conséquence $\sim 8,8 \text{ MeV/nucléon}$ ou $1,5 \cdot 10^{51} \text{ erg à chaque fois qu'elle parcourt } 0,1 M_{\odot}$ de matière.

Si la masse des parties externes du cœur en effondrement est, $M_{EC} = M_{Fe} - M_{IC} < 0,4 M_{\odot}$, le choc peut atteindre la base de l'enveloppe avec assez d'énergie pour engendrer une explosion réussie. Il n'y a que dans les étoiles massives de plus faible masse (en dessous de $13 M_{\odot}$ avec un cœur de fer $M_{Fe} \sim 1,1 M_{\odot}$) que le mécanisme d'explosion prompte a des chances de réussir. Dans les étoiles plus massives, l'explosion prompte ne se produit pas. On reste avec une proto-étoile à neutrons dense et chaude, accrétant de la matière à un taux de $1-10 M_{\odot}/\text{s}$. Si aucune autre source d'énergie n'intervient, l'étoile s'effondre en trou noir (tout du moins dans la plupart des simulations numériques).

On pense de nos jours que la source d'énergie supplémentaire est fournie par les neutrinos, qui sont « emprisonnés » dans le cœur¹³ pendant quelques ms lors de

¹³ Le libre parcours moyen des neutrinos devient plus petit que les dimensions du cœur en ef-

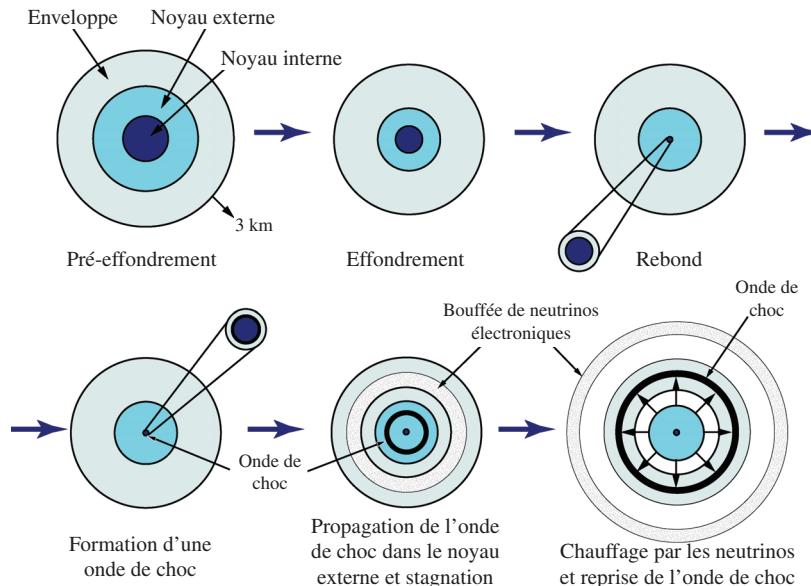


Figure 18. Illustration des diverses étapes successives de l'effondrement du cœur d'une étoile massive ; voir section 5.2 pour les détails (d'après M. Guidry 1998)

l'effondrement hydrodynamique et commencent à diffuser vers l'extérieur une fois que le choc démarre ; la proto-étoile à neutrons perd son énergie thermique sous forme de neutrinos sur une échelle de quelques secondes. Ces neutrinos emportent la plus grosse partie de l'énergie gravitationnelle de l'étoile à neutrons ($3 \cdot 10^{53}$ erg ou $\sim 10\%$ de son énergie de masse) ; si ils arrivent à transférer quelques pourcents de cette énergie à l'onde de choc qui stagne, ils peuvent induire une explosion retardée. La détection d'environ 20 neutrinos provenant de la supernova SN1987A située dans la galaxie proche du Grand Nuage de Magellan par les détecteurs Kamiokande et IBM le 23 février 1987 a montré que les neutrinos sont effectivement produits en grand nombre lors de la mort des étoiles massives.

Si l'onde de choc arrive à atteindre la base de l'enveloppe de l'étoile avec assez d'énergie (quelques 10^{51} erg, soit la somme de l'énergie gravitationnelle de l'enveloppe et de l'énergie cinétique typique observée pour la matière éjectée par les SNI), l'explosion réussit. À mesure que l'onde de choc se propage à travers l'enveloppe de l'étoile, elle chauffe les différentes couches à des températures plus élevées que celles des phases de combustion centrale correspondantes. La température maximale $T_M(r)$ à une distance r du centre peut être déterminée avec une bonne précision en supposant que l'énergie cinétique du choc E_c est égale à l'énergie thermique du champ de rayonnement situé à l'arrière du choc

fondrement ; cependant, après 0,1s, les neutrinos diffusent et s'échappent de la « neutrinosphère » (l'équivalent de la photosphère pour les photons).

$$E_{th} = \frac{4}{3} \pi r^3 a T_M^4(r)$$

(où $a = 7,56 \cdot 10^{-15} \text{ erg cm}^{-3} \text{ K}^4$ est la deuxième constante de Stefan) ; on obtient :

$$T_M(r) \sim 1,33 \cdot 10^{10} \left(\frac{E_c}{10^{51} \text{ erg}} \right)^{\frac{1}{4}} \left(\frac{r}{10^8 \text{ cm}} \right)^{-\frac{3}{4}} K$$

Sur la figure 19, on voit que cette formule est une très bonne approximation du profil « réel » (calculé numériquement, graphe de droite sur la figure 19) de température maximale. La matière stellaire des couches percutées par l'onde de choc est chauffée à ces températures pendant une durée de l'ordre du temps caractéristique hydrodynamique local¹⁴ :

$$\tau_{HD} \sim 0,446 \rho_6^{-\frac{1}{2}} s$$

où ρ_6 est la densité moyenne à l'intérieur d'un rayon r (en unités de 10^6 g.cm^{-3}).

Si le temps caractéristique de combustion nucléaire ($\tau_{nuc} = q_{nuc}/\dot{\epsilon}_{nuc}$, voir section 4.2) à la distance r du centre de l'étoile est plus petit que le temps caractéristique hydrodynamique $\tau_{HD}(r)$, une nucléosynthèse explosive a lieu, modifiant la composition laissée par les précédentes phases de combustion hydrostatique. En tenant compte du fait que les profils de densité des étoiles pré-supernova sont relativement raides, il s'avère que les températures maximales sont suffisantes pour que la combustion de l'oxygène et du silicium se fasse en conditions très explosives ; les couches de néon et de carbone sont moins affectées (voir figure 20) tandis que les couches d'hélium et d'hydrogène ne sont pas affectées du tout par l'explosion (les densités dans l'enveloppe sont trop faibles pour permettre une combustion explosive dans ces couches).

Les principales réactions activées lors du brûlage explosif d'un combustible donné sont les mêmes que celles activées lors des phases de combustion hydrostatique correspondantes (c'est-à-dire figures 11, 12, et 13). Cependant, les temps de vie des noyaux instables sont souvent plus grands que le temps caractéristique de nucléosynthèse explosive τ_{nuc} . Ceci implique que les sections efficaces de réactions nucléaires sur ces noyaux instables sont également requises, une situation que l'on ne rencontre pas en général lors de stades de combustion hydrostatique.

Les produits de la nucléosynthèse explosive dans les étoiles massives ont été étudiés en détail dans Woosley et Weaver (1995), Thielemann et al. (1996), Limongi et al. (2000) ; une revue récente est présentée dans Woosley et al. (2002). En général, on distingue trois classes d'éléments/isotopes à l'issue de l'explosion (voir Prantzos 2000) :

I) Le premier ensemble (N, C, O, Ne, Mg) résulte principalement de la combustion hydrostatique de l'hélium, du carbone et du néon (couches non affectées par la

¹⁴ est essentiellement le temps de chute libre, c'est-à-dire qu'on suppose que l'expansion due à l'explosion est « symétrique » en fonction du temps par rapport à la contraction due à l'effondrement gravitationnel.

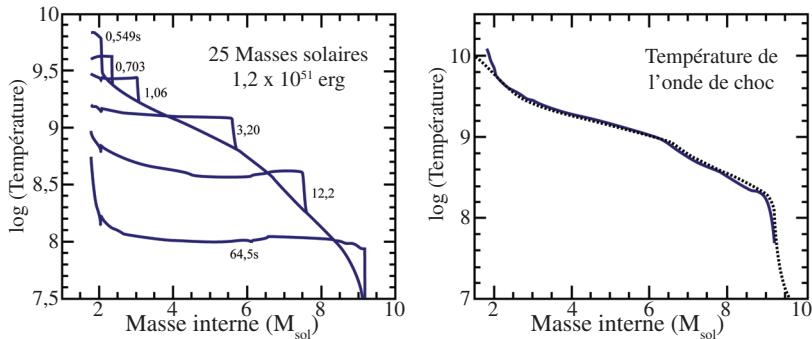


Figure 19. Gauche : profil de température initiale (courbe continue) ainsi que quelques instantanés du profil de température pris à différents instants après le passage de l'onde de choc dans le manteau d'une étoile de $25 M_{\odot}$. Droite : profil de température maximale après le passage de l'onde de choc dans le manteau d'une étoile de $25 M_{\odot}$, obtenu numériquement (courbe continue) et analytiquement (en pointillés), c'est-à-dire en supposant une expansion adiabatique du manteau (d'après S. Woosley et T. Weaver 1995)

nucléosynthèse explosive). Les yields (masse éjectée) de ces éléments augmentent avec la masse initiale de l'étoile, tout comme la taille des coeurs à la fin de la combustion de l'hélium et du carbone. La comparaison de ces yields avec les observations (voir plus loin) permet de tester essentiellement la physique des modèles de pré-supernova.

2) Le second groupe (Al, Si, S, Ar, Ca) comprend les éléments qui sont produits dans les deux types de combustion : hydrostatique et explosive. Leurs yields varient moins avec la masse du progéniteur que ceux du précédent groupe. La comparaison de ces yields avec les observations permet de tester les modèles de pré-supernova et l'énergie de l'explosion.

3) Le troisième ensemble contient les éléments du pic du fer, produits essentiellement par la combustion explosive du silicium. Leurs yields sont de nos jours encore hautement incertains car ils dépendent du mécanisme de l'explosion, c'est-à-dire de l'énergie de l'onde de choc, des divers processus de mélange et de la « coupure en masse » (« mass-cut » en anglais, la limite entre la masse qui est finalement éjectée et celle qui retombe sur l'objet compact central).

Comment peut-on vérifier la validité des yields stellaires théoriques ? Idéalement, les yields individuels devraient être comparés aux abondances mesurées dans les résidus de supernova issues d'étoiles de masse et de métallicité connue ! Cependant, de telles opportunités sont extrêmement rares. Dans le cas de SNI987A, les prédictions théoriques obtenues pour un progéniteur de $20 M_{\odot}$ sont en relativement bon accord avec les observations de C, O, Si, Cl et Ar (Thielemann et al. 1996). SNI987A permit également de « calibrer » le yield du fer ($\sim 0.07 M_{\odot}$) à partir de sa courbe de lumière dans le visible (qui est alimentée vers la fin par la désintégration de ^{56}Co , le fils de ^{56}Ni), extrapolée au

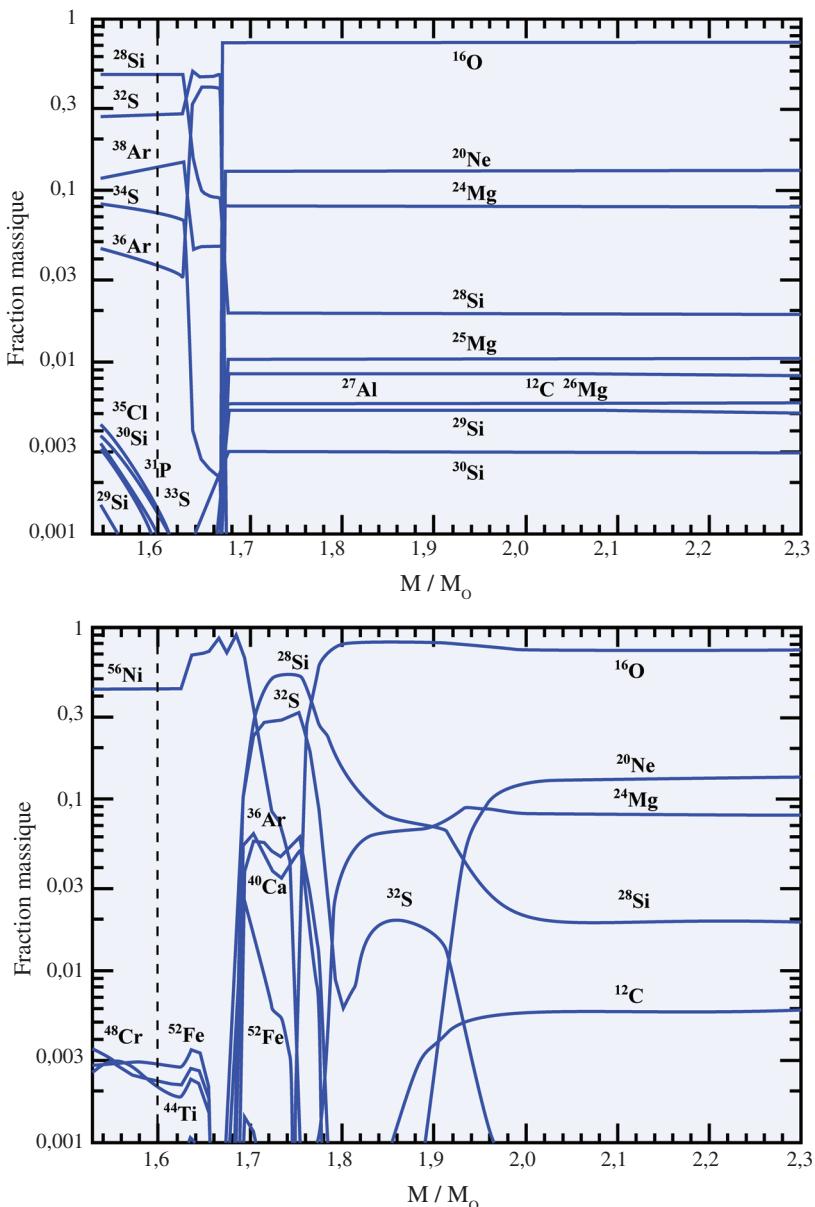


Figure 20. En haut : profils de composition chimique dans les 2,3 M_{\odot} centrales d'une étoile de 20 M_{\odot} avant l'effondrement de son cœur, avec les principaux produits de la nucléosynthèse hydrostatique ; une composition uniforme (des profils d'abondance plats) caractérisent les anciennes zones convectives. En bas : profils de composition chimique dans les 2,3 M_{\odot} centrales d'une étoile de 20 M_{\odot} après le passage de l'onde de choc ; les principaux produits de la nucléosynthèse explosive sont dominants dans les 2 M_{\odot} centrales (d'après F.-K. Thielemann, K. Nomoto et M. Hashimoto 1996)

moment de l'explosion (voir Arnett et al. 1989). Plus récemment, des observations de supernovae extragalactiques permirent d'établir une assez bonne corrélation entre la luminosité maximale (c'est-à-dire la masse de ^{56}Ni) et l'énergie cinétique de l'explosion (voir Hamuy 2003 pour une revue).

5.3 Nucléosynthèse explosive dans les SN thermonucléaires

Il est aujourd'hui couramment accepté que les SNIa sont des explosions thermonucléaires de Naines blanches. Étant donné qu'une Naine blanche est éternellement stable, une étoile compagnon est requise. Le modèle le plus en vogue actuellement est celui dans lequel une Naine blanche constituée de carbone et d'oxygène et de masse proche de la masse limite de Chandrasekhar accrète la matière d'une étoile compagnon, évoluée ou non (figure 21). Un autre scénario, moins populaire, est celui dans lequel deux Naines blanches formant initialement un système binaire fusionnent après diminution de la distance les séparant (à cause de la perte d'énergie induite par l'émission d'ondes gravitationnelles). Bien qu'il n'existe jusqu'à maintenant aucun modèle auto-consistant, le premier scénario semble être en bien meilleur accord avec les observations.

Le scénario impliquant de l'accrétion requiert un taux d'accrétion relativement bien ajusté $\sim 10^{-7} \text{ M}_\odot/\text{an}$ pendant plusieurs millions d'années. À mesure que la masse de la Naine blanche augmente, le chauffage par compression élève sa température interne jusqu'à quelques 10^8 K . La densité élevée de la Naine blanche ($\sim 10^9 \text{ g.cm}^{-3}$) induit un écrantage très efficace des réactions nucléaires¹⁵ ; la fusion $^{12}\text{C}+^{12}\text{C}$ se produit donc à des températures considérablement plus basses et à des taux bien plus élevés que dans les étoiles massives. L'allumage se produit quand la réaction $^{12}\text{C}+^{12}\text{C}$ libère l'énergie plus rapidement que ce que les pertes neutriniques (principalement des neutrinos de plasma, voir section 4.1) peuvent emporter hors de l'étoile.

Contrairement à ce qui se passe dans les étoiles normales (où le gaz parfait contribue de façon majoritaire à la pression interne), une Naine blanche est composée de gaz dégénéré. Sa pression dépend seulement de la densité¹⁶, pas de la température. Il s'ensuit qu'un chauffage du milieu (par l'énergie libérée par la réaction $^{12}\text{C}+^{12}\text{C}$) ne s'accompagne pas d'une augmentation de pression, qui amènerait le gaz à se dilater et à se refroidir ; à la place, la température augmente régulièrement, et il en va de même du taux de la réaction $^{12}\text{C}+^{12}\text{C}$. Dans ces conditions, une déflagration du carbone incinère la matière de l'étoile de façon explosive jusqu'à ce que le NSE soit atteint. La durée de l'explosion est trop courte pour qu'un nombre important de captures électroniques se produisent, le produit final est donc essentiellement ^{56}Ni (voir figure 14) : environ $0,7 \text{ M}_\odot$ de cet élément sont produites (environ la moitié de la masse de la Naine blanche), comme requis par les luminosités des SNIa observées. Seules les hautes densités atteintes dans les régions centrales favorisent la production de ^{54}Fe et ^{58}Ni par captures électroniques ;

¹⁵ À cause de la densité élevée d'électrons, les noyaux de carbone « ressentent » une répulsion coulombienne bien moins forte ; il en résulte que leur taux de fusion est considérablement accru.

¹⁶ Dans les gaz dégénérés non-relativistes, la pression dépend de la densité comme $P \propto \rho^{5/3}$, alors que dans les gaz dégénérés relativistes on a $P \propto \rho^{4/3}$.

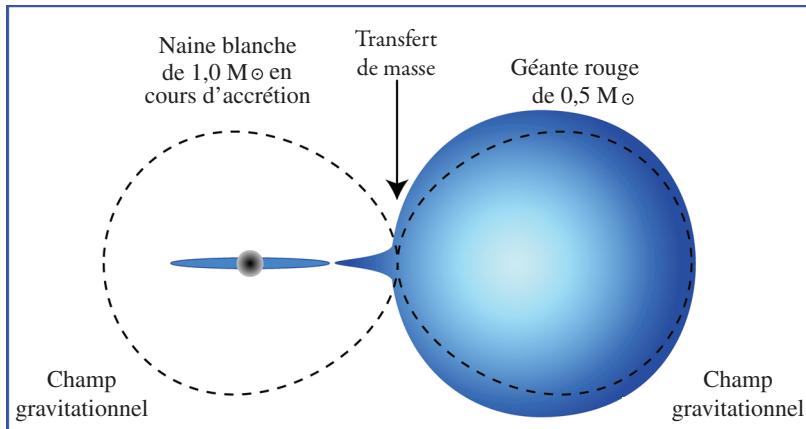


Figure 21. Transfert de masse dans un système binaire, progéniteur d'une SNIA (gracieusement fournie par F. Timmes)

la surproduction de ces éléments est l'un des défauts actuels de ce scénario. Le NSE n'est pas atteint dans les couches externes à cause de températures plus basses, qui conduisent à la production de noyaux de masse intermédiaire comme Si, Ca, etc. ; ici encore, le scénario le plus simple produit à présent trop peu de ces noyaux en comparaison avec ce qui est observé.

En dépit de ces travers, le scénario « accrétion + déflagration du carbone » semble être sur le droit chemin (e.g. Hillebrandt et Niemeyer 2002). Les points clés actuellement en cours d'étude sont les conditions qui prévalent au moment où commence l'explosion thermonucléaire (densité précise, nombre et position des points d'allumage) et la propagation de la flamme à travers la Naine blanche (effet des instabilités, de la turbulence, de la métallicité initiale, de la rotation, etc.).

Du point de vue de l'évolution chimique des galaxies, les SNIA jouent un rôle très important puisqu'elles produisent entre 50 % et 65 % des noyaux du pic du fer. Leur fréquence plus faible (elles sont ~ 5 fois moins fréquentes que les supernovae par effondrement du cœur) est compensée par les plus grandes quantités de ^{56}Ni et de noyaux du pic du fer produites par leur explosion ($0,7 \text{ M}_\odot$ de ^{56}Ni comparé à $0,1 \text{ M}_\odot$ en moyenne pour les supernovae par effondrement du cœur).

5.4 Production des noyaux de masse intermédiaire (de C au pic du fer)

En général, il est (et il sera toujours) très difficile de tester les modèles de nucléosynthèse stellaire sur des étoiles prises individuellement. Cependant, on sait déjà que, d'un point de vue statistique, les modèles courants ne sont pas loin de la réalité. En effet, en adoptant les yields stellaires actuels (des étoiles de masse intermédiaire, des étoiles mas-

sives et des SNIa), une fonction de masse initiale (IMF) stellaire appropriée et en faisant tourner les modèles d'évolution chimique des galaxies pour le voisinage solaire, on trouve que les abondances au moment de la formation du Système solaire des éléments situés entre C et Zn sont reproduites de façon satisfaisante (par exemple Goswami et Prantzos 2000, voir figure 22). C'est à présent le test global le plus convaincant de notre théorie de la nucléosynthèse stellaire. Cependant, certaines observations de rapports d'abondance dans des étoiles âgées du halo de la Voie lactée ou situées dans des systèmes gazeux distants (formés tôt dans l'histoire de l'Univers et enrichis principalement par les étoiles massives ayant eu une vie courte) sont de nouveaux défis pour notre compréhension de ces objets.

6. Les noyaux plus lourds que le fer

Les noyaux plus lourds que ceux du pic du fer (appelés pour cette raison « noyaux lourds ») ne peuvent être créés par des réactions impliquant des particules chargées : les températures nécessaires pour passer outre les importantes barrières coulombiennes sont telles que des photodésintégrations réduiraient tous les noyaux en leurs constituants élémentaires. La nature a donc trouvé un autre mécanisme : les captures de neutrons sur des noyaux « cible » préexistants.

6.1 Mécanismes de production et classification des isotopes

Dans les premiers travaux sur la nucléosynthèse (Burbidge et al. 1957), il était déjà mentionné que deux différents types de processus de capture de neutrons ont contribué à la formation des noyaux lourds : le dénommé processus *s* (pour *lent*, « slow » en anglais), responsable de la formation des noyaux de la vallée de stabilité nucléaire ; et le processus *r* (pour *rapide*), responsable de la synthèse des isotopes des éléments lourds les plus riches en neutrons.

Dans le processus *s*, de faibles densités de neutrons ($\sim 10^8 \text{ cm}^{-3}$) sont impliquées sur des durées relativement longues ($> 1 \text{ an}$), de telle sorte que les noyaux instables (A, Z) du chemin du processus *s* (figure 23) ont le temps de se désintégrer pour donner les noyaux stables ($A, Z+1$) situés sur la même isobare. En effet, les temps de vie de la plupart des noyaux instables proches de la vallée de stabilité vont de quelques secondes à moins d'un an et sont inférieurs à leur durée de vie vis-à-vis des captures de neutrons dans les conditions considérées ici ($\tau_n = (n_n \sigma_n v)^{-1}$, où n_n est la densité de neutrons, σ_n la section efficace de capture de neutrons et v la vitesse moyenne des neutrons). Les captures de neutrons étant *lentes* par rapport aux désintégrations β , il s'ensuit que le chemin du processus *s* suit étroitement le fond de la vallée de stabilité nucléaire. Il faut noter que le processus *s*, de par sa nature même, ne peut atteindre les noyaux les plus lourds (les isotopes de Th et U ayant une longue durée de vie) qui sont séparés du noyau stable le plus lourd (^{209}Bi) par plus de 20 unités de masse.

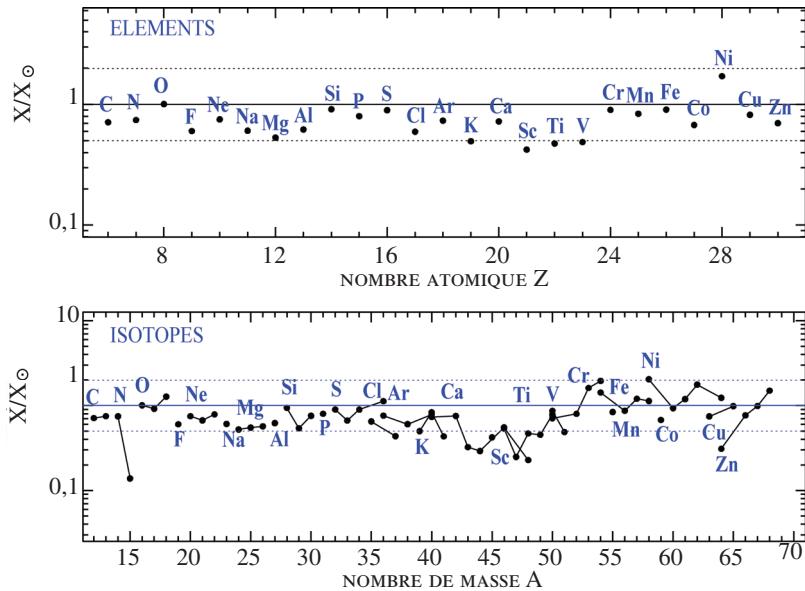


Figure 22. Abondances au moment de la formation du Système solaire (il y a 4,5 milliards d'années) prédites par un modèle d'évolution chimique galactique approprié pour le voisinage solaire, comparées avec les abondances solaires. Les yields des étoiles massives, des étoiles de masse intermédiaire ainsi que des SNIa ont été utilisés. On voit que les éléments et les isotopes sont tous bien reproduits jusqu'au pic du fer (à un facteur 2 près) ; une autre source (les novae ?) est requise pour ^{15}N (d'après A. Goswami et N. Prantzos 2000).

Au contraire, le processus r implique des densités de neutrons extrêmement élevées ($>10^{20} \text{ cm}^{-3}$) sur des durées de l'ordre de la seconde (correspondant de façon évidente à des sites explosifs) : les captures de neutrons sont tellement rapides par rapport aux désintégrations β que le chemin du processus r amène la matière stellaire loin de la vallée de stabilité, du côté riche en neutrons. Quand la rafale de neutrons cesse, les noyaux instables qui ont été formés se désintègrent pour redonner des noyaux situés dans la vallée de stabilité. Les noyaux les plus riches en neutrons parmi les éléments lourds (noyaux r purs) sont ainsi formés, ainsi que les éléments les plus lourds (Th, U, qui ne peuvent être atteints par le processus s). Simultanément, un grand nombre de noyaux qui peuvent également être formés par processus s sont synthétisés, de telle sorte que les abondances de la majorité des noyaux lourds possèdent une contribution provenant du processus s , et du processus r , c'est-à-dire :

$$N(A, Z) = N_s(A, Z) + N_r(A, Z)$$

Manifestement, pour des noyaux s purs on a $N_r(A, Z) = 0$. Les abondances des noyaux lourds, classés en tant que s , r ou p sont données sur la figure 24. Les trois

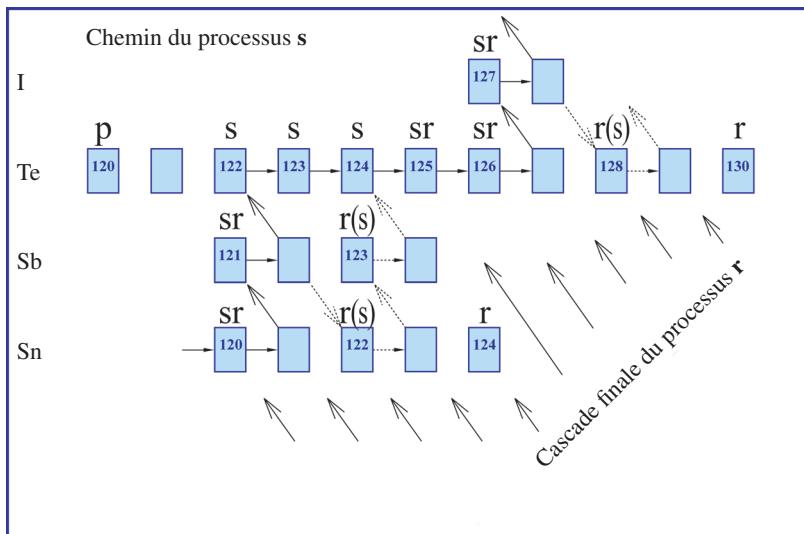


Figure 23. Chemins menant à la formation de noyaux plus lourds que ceux du pic du fer. Pour les noyaux *s* purs (ou majoritairement *s*), le chemin se trouve proche de la vallée de stabilité nucléaire. Les noyaux stables les plus enrichis en neutrons (noyaux *r*) sont produits par désintégration β de noyaux instables très riches en neutrons qui ont été formés à la suite d'une exposition rapide à un flux de neutrons élevé. Les noyaux *p* riches en protons ne peuvent pas être créés par captures de neutrons (voir texte)

pics dans la courbe d'abondance des éléments *s* correspondent au noyaux avec des nombres « magiques » de neutrons ($N = 50, 82, 126$, voir figure 4) ; ils sont accompagnés par des pics moins étroits dans la courbe d'abondance des éléments *r*, positionnés à des nombres de masse *A* plus faibles. L'abondance totale de chacune des deux classes (*s* et *r*) d'éléments lourds est d'environ 10^6 en masse ; étant donné les mécanismes de production très différents, il s'agit d'une coïncidence assez étrange.

Les noyaux *p* sont bien moins abondants, de deux ou trois ordres de grandeur, que les isotopes *s* ou *r* correspondant (exception faite de ^{92}Mo qui constitue 14 % de Mo). Ces isotopes ne sont pas atteints par captures de neutrons sur des noyaux stables (figure 23) et on pense qu'ils sont produits principalement par photodésintégration de noyaux *s*. Les sites les plus favorables semblent être les couches ONe des étoiles explosant en supernova suite à l'effondrement de leur cœur, ces couches atteignant dans ces conditions des températures maximales de $2\text{-}3 \times 10^9$ K (e.g. Arnould et Goriely 2003).

6.2 Le processus s

L'analyse des abondances solaires (figure 24) et des sections efficaces de capture de neutrons (figure 25) des noyaux situés sur le chemin du processus s nous permet d'en déterminer les conditions physiques : des densités de neutrons $n_n \sim 10^8 \text{ cm}^{-3}$, des températures $T \sim 1,5\text{-}3 \cdot 10^8 \text{ K}$, des densités $\rho \sim 2\text{-}12 \cdot 10^3 \text{ g.cm}^{-3}$ et des durées typiques $\tau_s \sim 10\text{-}10^3 \text{ ans}$. Ces conditions sont réunies lors des phases de combustion hydros-tatique de l'hélium.

Deux sites pertinents ont été identifiés :

1) La combustion centrale de l'hélium dans les étoiles massives, où la source de neutrons est $^{22}\text{Ne}(\alpha, n)$; cette réaction se produit vers la fin de la combustion de l'hélium, à $T \sim 2,5 \cdot 10^8 \text{ K}$ (Prantzos et al. 1990, The et al. 2000). Le nombre de neutrons libérés permet seulement de synthétiser les noyaux de nombre de masse $60 < A < 90$ (la composante dite « faible » du processus s). Une partie de ces noyaux survivent lors des phases avancées des étoiles massives et sont éjectés dans le milieu interstellaire lors de l'explosion finale en supernova. Du point de vue théorique, le fait que le processus s puisse avoir lieu dans le cœur d'hélium est assez bien établi (en dépit des incertitudes sur le taux de la réaction $^{22}\text{Ne}(\alpha, n)$), mais on manque de preuves observationnelles directes.

2) Le brûlage en double couche (H et He) dans les étoiles de faible masse évoluant sur la Branche asymptotique des Géantes (AGB pour « Asymptotic Giant Branch » en anglais, qui se trouve très proche et parallèle à la branche des Géantes rouges). Pendant la phase de pulses thermiques (figure 26), des protons de la couche d'hydrogène sont amenés dans des régions riches en particules α et en ^{12}C (produit par la réaction $3\alpha \rightarrow ^{12}\text{C}$ dans la couche d'hélium). La coexistence de protons, de particules α et de ^{12}C permet la production de neutrons en grand nombre à travers la série de réactions $p + ^{12}\text{C} \rightarrow ^{13}\text{N}, ^{13}\text{N}(\beta^+) ^{13}\text{C}, ^{13}\text{C}(\alpha, n) ^{16}\text{O}$. La récurrence des pulses permet la production d'un grand nombre de neutrons par noyau de fer et la synthèse de la « composante principale » du processus s, c'est-à-dire les noyaux de nombre de masse $90 < A < 210$. Entre les pulses thermiques, l'enveloppe convective pénètre profondément dans l'étoile et ramène à la surface la matière de la région dans laquelle s'est déroulé le processus s ; les noyaux s sont ensuite éjectés dans le milieu interstellaire par le vent intense de l'étoile AGB. Ce scénario relativement complexe est appuyé par le fait qu'on observe des enrichissements en éléments s à la surface des étoiles AGB de faible masse. Cependant, le mélange des protons avec la matière des zones riches en hélium ainsi que le processus par lequel l'enveloppe s'enfonce pour ramener les éléments s à la surface sont encore mal compris (Busso et al. 1999, Mowlavi et Goriely 2000).

6.3 Le processus r

Lorsque la densité de neutrons est suffisamment élevée, les captures de neutrons successives convertissent les noyaux cibles d'un élément donné en isotopes très riches en neutrons. Ce processus continue jusqu'à ce que soient créés des isotopes possédant une très faible énergie de séparation de neutron S_n (figure 27). Une fois à ce point, les

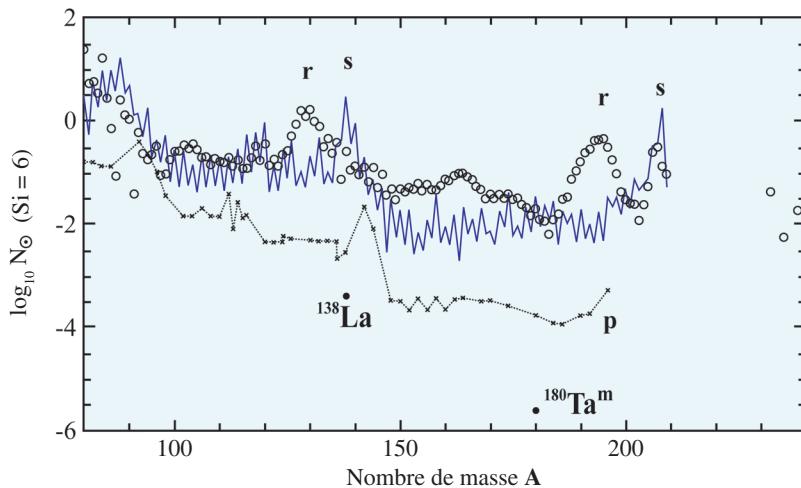


Figure 24. Abondances des noyaux lourds classés *s*, *r* ou *p* (voir figure 23) dans le Système solaire ; ^{180}Ta (probablement produit par processus *p*) est l'isotope le plus rare de la nature

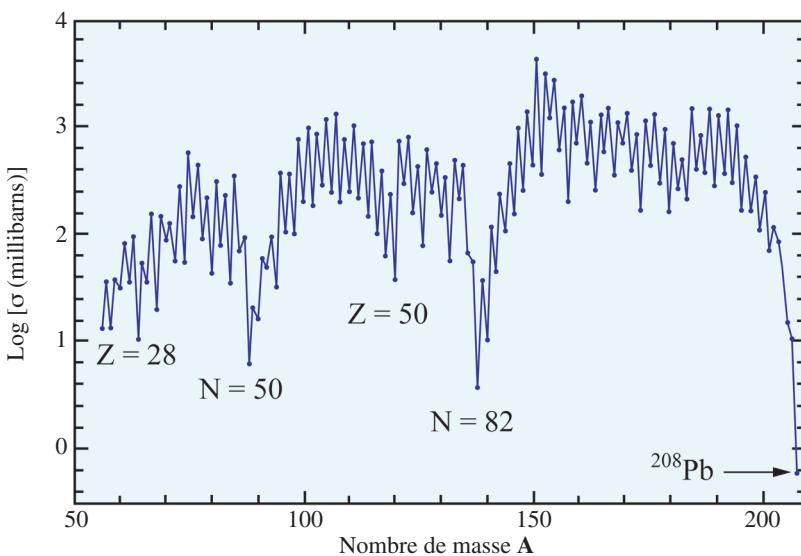


Figure 25. Sections efficaces de capture de neutrons sur les noyaux *s* en fonction du nombre de masse *A*. Les noyaux possédant un nombre « magique » de neutrons (50, 82, 126) ont des sections efficaces extrêmement faibles et une abondance élevée en comparaison avec leurs voisins (voir figure 24). ^{208}Pb est un cas très représentatif, avec $Z = 82$ et $N = 126$.

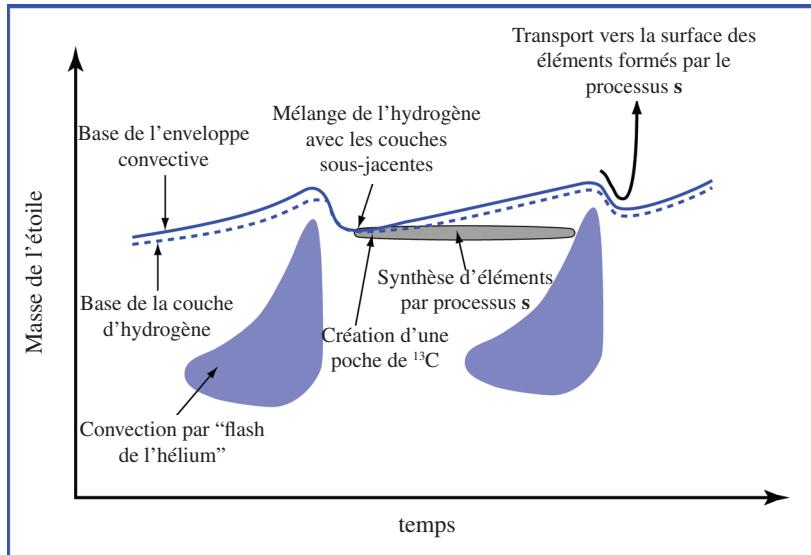


Figure 26. Structure d'une étoile AGB pendant sa phase de pulses thermiques. Après un pulse thermique, les protons de la couche d'hydrogène sont mélangés avec la matière de la couche d'hélium (riche en ${}^4\text{He}$ et ${}^{12}\text{C}$). Ceci permet la production de neutrons à travers la série de réactions ${}^{12}\text{C}(\text{p}, \gamma){}^{13}\text{N}(\beta^+){}^{13}\text{C}$, ${}^{13}\text{C}(\alpha, \text{n})$ et le processus s . Après le pulse thermique suivant, les noyaux s sont ramenés à la surface de l'étoile par l'enveloppe

réactions inverses (γ, n) contrebalancent les réactions (n, γ). La plus simple représentation du processus r est celle dans laquelle un équilibre $(n, \gamma) \leftrightarrow (\gamma, n)$ est atteint dans chaque chaîne isotopique. De façon analogue au NSE (voir section 4.3), les abundances isotopiques d'une chaîne de Z donné dépendent alors de S_n , de la température T et de la densité de neutrons n , ainsi que des fonctions de partition nucléaires. Dans ces conditions, une grande quantité de matière est convertie en nuclides instables riches en neutrons possédant un nombre « magique » de neutrons. La matière se décale lentement vers des valeurs de Z plus grandes grâce aux désintégrations β , qui gouvernent la vitesse du flot nucléaire le long du chemin du processus r . À la fin de l'irradiation neutronique, tous les noyaux instables se désintègrent vers la vallée de stabilité. Les pics dans la courbe d'abondance des éléments r (décalés de quelques unités de masse par rapport aux pics correspondants dans la courbe d'abondance des éléments s) sont créés par la désintégration de matière très riche en neutrons « stockée » sous forme de noyaux possédant un nombre « magique » de neutrons pendant le processus r (e.g. Rolfs et Rodney 1988).

Même dans les modèles de processus r les plus simples, un grand nombre de données nucléaires sont requises (masses et taux de désintégration β de noyaux instables très riches en neutrons). Les modèles plus sophistiqués abandonnent l'hypothèse de l'équilibre $(n, \gamma) \leftrightarrow (\gamma, n)$ et ont donc également besoin des taux de capture de neutrons et de photodésintégration, ainsi que d'un réseau de réactions nucléaires très large (comprenant plusieurs milliers de noyaux).

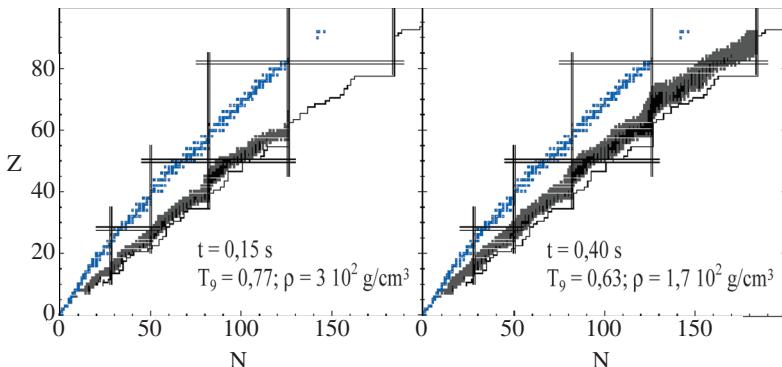


Figure 27. Flot nucléaire prévu par une simulation numérique du processus r « dynamique », à deux instants différents. Les captures de neutrons amènent la matière loin de la vallée de stabilité, en direction de la ligne de limite de stabilité en neutron (« neutron drip line », ou l'énergie de séparation de neutron, courbe à droite des diagrammes). Les droites indiquent les noyaux « magiques » (d'après Arnould et Takahashi 1999).

Le site astrophysique au sein duquel se déroule le processus r n'a pas encore été identifié, en dépit de plus de trente ans de recherches actives. Les densités de neutrons et les durées requises suggèrent un événement explosif ; par ailleurs, les observations de la composition des étoiles les plus vieilles de la Voie lactée suggèrent que les noyaux r ont été produits relativement tôt dans l'histoire de la Galaxie, et donc que leur source avait une vie courte. Les SN par effondrement du cœur satisfont à ces deux requêtes, mais ni la source de neutrons ni les couches stellaires pertinentes n'ont encore été identifiées (e.g. Goriely et al. 2004, Cowan et Thielemann 2004).

7. Résumé

Le schéma d'ensemble de la nucléosynthèse stellaire est de nos jours bien établi, qualitativement au moins.

Les étoiles massives ($M > 10 M_{\odot}$) synthétisent durant leur évolution et dans leurs différentes couches les éléments lourds, du C au Ca, qu'elles éjectent dans le milieu interstellaire lors de leur explosion finale en SN. Durant l'explosion, une grande quantité des isotopes du pic du Fer (du Ti au Zn) est également produite.

Les étoiles intermédiaires ($2 - 10 M_{\odot}$) produisent d'importantes quantités de He et certains isotopes du CNO (^{13}C , ^{14}N , ^{17}O), ainsi que des isotopes plus lourds que le fer qui se trouvent dans la vallée de stabilité nucléaire (noyaux s-, produits par captures de neutrons). Tous ces noyaux sont emmenés jusqu'à l'enveloppe de l'étoile par de mouvements convectifs et y sont mélangés ; les vents stellaires, notamment lors des phases AGB et nébuleuse planétaire, les expulsent dans le milieu interstellaire.

Les noyaux plus lourds que le fer, qui se trouvent loin de la vallée de stabilité nucléaire, sont manifestement produits lors des explosions des étoiles massives, dans des couches soumises à un important flux de neutrons (éléments r-), ou encore dans des couches où les noyaux s- préalablement produits sont photodésintégrés (noyaux p-, riches en protons). Le processus r- est à l'origine des noyaux naturels les plus lourds (ceux du Th et U).

Finalement, une importante fraction de noyaux du pic du fer (plus de la moitié) est synthétisée dans les supernova thermonucléaires (SNIA), des Naines blanches accrétables dans de systèmes binaires, qui explosent en atteignant la masse-limite de Chandrasekhar.

Ces résultats de la nucléosynthèse stellaire sont par la suite incorporés dans de modèles d'« Evolution chimique galactique » qui tiennent également compte de la durée de vie de chaque étoile (quelques 10^6 - 10^7 ans pour les étoiles massives, quelques 10^8 - 10^9 ans pour celles de masses intermédiaires et plus de 10^9 ans pour la majorité des SNIA), ainsi que de la distribution en nombre des étoiles (la Fonction de masse initiale, qui favorise les étoiles le plus petites). Avec une hypothèse supplémentaire sur le Taux de formation stellaire (l'inconnu majeur dans ce type d'études), le système évolue en s'enrichissant progressivement en métaux et les résultats peuvent être comparés à une multitude de données observationnelles.

La théorie de nucléosynthèse stellaire constitue, sans doute, une de réussites majeures de l'astrophysique moderne, puisqu'elle parvient à expliquer assez bien la distribution solaire (cosmique) des abondances isotopiques entre le C et les noyaux du pic du fer (figure 22) et des isotopes s-. Elle reproduit aussi de manière satisfaisante les rapports d'abondances observées dans les étoiles à divers endroits de la Voie lactée .

Cependant, plusieurs questions restent encore ouvertes (par exemple le mélange des protons à l'origine de la source de neutrons $^{13}\text{C}(\alpha,n)$ pour le processus s dans les étoiles AGB, le site du processus r, etc.). De plus, des incertitudes dans les données nucléaires clés (par exemple le taux de la réaction $^{12}\text{C}(\alpha,\gamma)$ pour la combustion de l'hélium, les masses nucléaires pour le processus r) ou dans des processus physiques stellaires importants (par exemple les processus de mélange dans le cœur et l'enveloppe de l'étoile, le mécanisme de l'explosion dans les SN par effondrement du cœur, etc.) nous empêchent encore maintenant de dresser une image quantitativement satisfaisante. Des progrès sont attendus grâce aux améliorations continues dans le domaine des simulations numériques, des données nucléaires et des observations spectroscopiques à toutes les longueurs d'onde.

La théorie de la nucléosynthèse stellaire est certainement importante pour l'Exobiologie, dans la mesure où les planètes telluriques et la vie (du moins, celle que nous connaissons) nécessitent la présence de divers éléments lourds (carbone, oxygène, etc.). Cependant, il est difficile d'évaluer aujourd'hui la quantité de métaux nécessaire à la formation des planètes telluriques. La seule observable actuelle (qui ne constitue pas forcément une contrainte) est la distribution de métallicité des étoiles avec de planètes gazeuses. Les données actuelles (e.g. Santos et al. 2003) indiquent que ces étoiles sont, en moyenne, plus métalliques que celles du même type spectrale sans planète. En particulier, presque toutes les étoiles avec des planètes ont une métallicité supérieure à 1/3 de celle du Soleil,

tandis que les autres étoiles au voisinage solaire peuvent atteindre des valeurs de l'ordre de 1/10 de la valeur solaire. Cette observation n'est pas quantitativement comprise actuellement, mais les théoriciens de la formation planétaire commencent à considérer son impact éventuel sur leurs modèles (e.g. Pinotti et al. 2005). Supposant que cette contrainte s'applique aussi dans le cas des étoiles avec planètes telluriques, on conclut que ces dernières devraient exister assez tôt dans l'histoire de la Galaxie, puisque sa métallicité moyenne a atteint 1/3 de la valeur solaire plusieurs milliards d'années avant la formation du Système solaire. La formation de ces planètes serait plus favorisée vers l'intérieur de la Voie lactée, où la métallicité est plus grande qu'au voisinage solaire ; la situation opposée est rencontrée aux régions externes de la Voie lactée ou dans le Grand Nuage magellanic, où la métallicité est à peine 1/3 solaire. Finalement, il n'y aurait aucune chance de trouver des planètes autour des étoiles très pauvres en métaux du halo galactique ou du Petit Nuage de Magellan, dont la métallicité n'excède pas 1/10 solaire.

Références

Générales

- Audouze J., Vauclair S., 1995, L'Astrophysique Nucléaire, Presses Universitaires de France
Cowan J., Thielemann K.-F., 2004, Physics Today, October issue, p. 47
Cowley C., 1995, An Introduction to Cosmochemistry, Cambridge University Press
Pagel B., 1997, Nucleosynthesis and Galactic chemical evolution, Cambridge University Press
Prantzos N., Montmerle T., 1998, Naissance, Vie et Mort des Etoiles, Presses Universitaires de France

Spécialisées

- Arnett D., 1996, Supernovae and nucleosynthesis, Princeton University Press
Arnett D., Bahcall J., Kirshner R., Woosley S., 1989, ARAA 27, 629
Arnould M., Takahashi K., 1999, Rep Prog Phys 62, 395
Arnould M., Goriely S., 2003, PhysRep 384, 1
Asplund M., Grevesse N., Sauval J., 2004, *in* Cosmic abundances as records of stellar evolution and nucleosynthesis, F.N. Bash and T.G Barnes(editors). ASP conf. series, *in press* (<http://arxiv.org/abs/astro-ph/0410214>)
Bazan G., Arnett D., 1994, ApJL 433, 41
Burbidge M., Burbidge G., Fowler W., Hoyle F., 1957, Rev Mod Phys 29, 547
Busso M., Gallino R., Wasserburg G., 1999, ARAA 37, 239
Cameron A. G. W., 1957, PASP 69, 201
Chieffi A., Limongi M., Straniero O., 1998, ApJ 502, 737
Colgate S., Grasberger W., White R., 1961, AJ 70, 280
Goriely S., Demetriou V., Janka, H.-Th., Pearson M., Samyn M., 2004, *in* Nuclei in the Cosmos

- VIII, Eds L. Buchmann *et al.*, *in press* (<http://arxiv.org/abs/astro-ph/0410429>)
- Goswami A., Prantzos N., 2000, AA 359, 191
- Guidry M., 1998, *in Nuclear and Particle Astrophysics*, Eds. J. Hirsch, D. Page (Cambridge, Cambridge University Press), p. 115
- Hamuy M., 2003, ApJ 582, 905
- Hartmann D., Woosley S., El Eid M., 1985, ApJ 297, 837
- Heger A., Fryer C., Woosley S., Langer N., Hartmann D., 2003, ApJ 591, 298
- Hillebrandt W., Niemeyer J., 2002, ARAA 38, 191
- Janka H.-T., 2001, AA 368, 527
- Janka H.-T., Buras R., Kifonidis K., Rampp M., Plewa T., 2002, *in Core Collapse of Massive Stars*, Ed. C.L. Fryer, Kluwer, Dordrecht, *in press* (<http://arxiv.org/abs/astro-ph/0212314>)
- Limongi M., Straniero O., Chieffi A., 2000, ApJS 129, 625
- Lodders K., 2003, ApJ 591, 1220
- Maeder A., Meynet G., 2003, AA 404, 975
- Maeder A., Meynet G., 2002, ARAA 38, 143
- Mowlavi N., Goriely S., 2000, AA
- Pinotti R., Arany-Prado L., Lyra W., Porto de Mello G., 2005, MNRAS, *in press* (<http://arxiv.org/abs/astro-ph/0501313>)
- Prantzos N., 2000, New Astr Rev 44, 303
- Prantzos N., 2004, *in Nuclei in the Cosmos VIII*, Eds L. Buchmann *et al.*, *in press* (<http://arxiv.org/abs/astro-ph/0411392>)
- Prantzos N., Hashimoto M., Nomoto K., 1990, AA 234, 211
- Rolfs C., Rodney R., 1988, Cauldrons in the Cosmos, Chicago University Press
- Santos N., Israelian G., Mayor M., Rebolo R., Udry S., 2003, A&A 398, 363
- The L. S., El Eid M., Meyer B., 2000, ApJ 533, 998
- Thielemann F.-K., Arnett D., 1985, ApJ 295, 604
- Thielemann F.-K., Nomoto K., Hashimoto M., 1996, ApJ 460, 408
- Thielemann F.-K., Rauscher T., Freiburghaus C., *et al.*, *in Nuclear and Particle Astrophysics*, Eds. J. Hirsch, D. Page (Cambridge, Cambridge University Press), p. 27
- Woosley S., 1986, *in Nucleosynthesis and Chemical Evolution*, 16th Advanced Course, Eds. B. Hauck, A. Maeder, G. Meynet (Geneva, Geneva Obs.), 74
- Woosley S., Weaver T., 1995, ApJS 101, 181
- Woosley S., Arnett D., Clayton D., 1973, ApJS, 26, 231
- Woosley S., Heger A., Weaver T., 2002, Rev Mod Phys 74, 1015

2

Formation des étoiles de faible masse et des naines brunes

Patrick Hennebelle

Laboratoire AIM, UMR 7158, CEA Saclay, 91191 Gif sur Yvette.
Laboratoire de radioastronomie, Ecole normale supérieure et
Observatoire de Paris, UMR CNRS 8112.
24 rue Lhomond, 75231 Paris cedex 05, France

I. Introduction

Cet article est la traduction d'un cours donné dans le cadre d'une école organisée par le programme national de Physique Stellaire (PNPS) en septembre 2011 : « Low-Mass Stars and the Transition Stars/Brown Dwarfs ». Afin d'en faciliter la lecture, la plupart des équations ont été supprimées et certaines notions ont été simplifiées. Le lecteur désireux d'approfondir est invité à s'y référer (Hennebelle 2012).

Les étoiles sont les briques constitutives de notre univers et comprendre leur formation et leur évolution est l'un des problèmes les plus importants de l'astrophysique. Il est bien établi que les étoiles se forment par effondrement gravitationnel de coeurs moléculaires denses. Ces coeurs sont eux-mêmes intégrés dans des nuages moléculaires et souvent, mais pas toujours, dans des filaments. Toutefois, les conditions par lesquelles les coeurs denses se forment et s'effondrent puis se fragmentent demeurent un sujet de débat. Trois questions ont une importance particulière : le taux de formation des étoiles (appelé SFR), le problème de la fonction de masse initiale (appelé IMF), et le problème de la formation et de l'évolution du disque, qui peuvent donner naissance aux naines brunes, aux étoiles de faible masse et aux planètes.

Comme l'ont souligné Zuckerman et Evans (1974), si tout le gaz moléculaire observé dans la galaxie s'effondrait en un temps de chute libre, alors le taux de formation d'étoiles serait de 10 à 100 fois plus élevé que celui de environ 3 masses solaires par an, observé dans la galaxie. De nombreux efforts ont été effectués pour expliquer cette faible efficacité de formation des étoiles. Deux idées principales ont été explorées

jusqu'à présent :

- La première est que le champ magnétique est un soutien efficace contre la gravité et retarde la formation d'étoiles (Shu et al. 1987).
- La seconde postule que la turbulence observée dans les nuages moléculaires empêche ces nuages de s'effondrer dans un temps de chute libre (Mac Low et Klessen 2004, McKee et Ostriker 2007).

Particulièrement important est le problème de la fonction de masse initiale des étoiles (Salpeter 1955, Scalo 1986, Kroupa 2002, Chabrier 2003), du fait même que les propriétés, l'évolution et l'influence de l'étoile sur le milieu interstellaire environnant dépendront fortement de sa masse. Il est généralement constaté que le nombre d'étoiles par intervalles logarithmiques de masse peut-être représenté par une distribution log-normale en dessous de 1 masse solaire, avec un pic à environ 0,3 masses solaires et une loi de puissance de pente de -1,3 pour des masses entre 1 et 10 masses solaires (Chabrier 2003). Il convient de souligner que l'IMF des étoiles plus massives est assez mal connue.

La conservation du moment angulaire pendant l'effondrement conduisant au problème dit de la barrière centrifuge est une autre difficulté de longue date en astrophysique. Le moment angulaire est responsable de la formation de disques circumstellaires (Haisch et al. 2001, Watson et al. 2007) et probablement, au moins pour une part, de la formation de binaires (Duquennoy et Mayor 1991). En effet la fragmentation de disques de classe 0 massifs précoces est, peut-être, un mode de formation d'étoiles de faible masse et de naines brunes, de même la formation des planètes survient au sein des disques, probablement, à différentes étapes de leur évolution.

Dans ce qui suit nous présentons d'abord la théorie de base d'un gaz isotherme auto-gravitant y compris la longueur de Jeans et la masse, l'équilibre de l'auto-gravitation et l'effondrement. Nous en déduisons également la masse de la plus petite étoile qui pourrait éventuellement se former dans l'univers de nos jours.

Nous discutons ensuite la question du taux de formation des étoiles, présentant les deux principales écoles de pensées qui ont été proposées jusqu'à présent, à savoir la régulation magnétique et celle de la turbulence dans la formation des étoiles. Notons que, dans la mesure où cet aspect n'est pas l'objectif principal de cet article, et n'est présenté que comme complément, seuls les aspects les plus importantes sont discutés.

La troisième section est consacrée à la question de la fonction de masse initiale et les diverses théories qui ont été proposées au cours des années. Quatre théories différentes seront présentées, à savoir le scénario d'accrétion compétitive, les théories fondées sur l'accrétion arrêtée, la théorie basée sur le choc MHD et la théorie de la dispersion turbulente.

Dans la quatrième section nous discutons d'abord la formation du disque

auto-gravitant, son évolution et sa stabilité. Ensuite nous présentons la formation des naines brunes selon la théorie de la fragmentation du disque en soulignant des incertitudes liées à la rétroaction des radiations et aux champs magnétiques.

Enfin dans la cinquième section nous décrivons les résultats des simulations numériques à grande échelle qui ont été effectuées jusqu'à présent pour étudier la formation des étoiles au sein de nuages massifs en effondrement. En particulier nous présentons deux autres scénarios pour la formation des naines brunes qui ont été étudiés dans ces simulations, c'est-à-dire la formation par éjection et la formation en filaments en effondrement. Nous discutons alors les différentes IMF obtenues dans ces simulations et les explications physiques qui ont été proposées.

2. Les processus physiques

2.1 La gravité et le support thermique

Avant de discuter le cas plus complexe de nuages magnétisés turbulents, nous commençons par établir les principes de base de la dynamique pour un gaz isotherme et auto-gravitant.

2.1.1 Rapport entre énergie thermique et énergie gravitationnelle

Il est instructif de commencer par calculer le rapport entre énergie thermique et énergie gravitationnelle. Le calcul met en œuvre M la masse du nuage, R son rayon, m_p la masse moyenne par particule, T la température, les constantes de Boltzmann et gravitationnelle et Γ l'index adiabatique qui dépend des degrés de liberté internes des constituants. Pour un gaz polytropique la pression thermique P dépend d'un exposant adiabatique effectif, lui-même dépendant des procédés de refroidissement.

Ainsi il est possible de montrer que $\Gamma = 4/3$ est un cas critique en dessous duquel la pression thermique est incapable de soutenir le nuage contre l'effondrement gravitationnel parce que le rapport entre l'énergie thermique et l'énergie gravitationnelle diminue avec le rayon. En particulier, lorsque le gaz est isotherme ($\Gamma = 1$), le support thermique ne pourra pas arrêter l'effondrement gravitationnel. D'une manière générale, l'effondrement gravitationnel sera arrêté par la pression thermique si le gaz est incapable de se refroidir de manière efficace à la fois pour un gaz monoatomique ($\Gamma = 5/3$) ou pour un gaz diatomique ($\Gamma = 7/5$).

2.1.2 Longueur de Jeans, masse de Jeans et temps de chute libre

La longueur de Jeans (Jeans 1905, Lequeux 2005) se déduit aisément en effectuant une analyse linéaire des équations des fluides autogravitants. Soit un nuage de densité ρ_0 , de rayon R et la vitesse du son C_s (notons que, à strictement parler, un nuage autogravitant isotherme ne peut pas avoir une densité uniforme car les forces de pression doivent compenser les forces gravitationnelles). Une analyse linéaire conduit à la relation de dispersion qui montre que lorsque le nombre d'onde k est plus petit qu'une valeur critique, les ondes ne peuvent pas se propager et les perturbations sont amplifiées. De cela nous obtenons la longueur de Jeans qui est proportionnelle à la racine carrée de l'inverse de la constante gravitationnelle G et de la densité.

La longueur de Jeans peut être comprise, d'un point de vue physique, de la façon suivante : l'auto gravité tend à induire la contraction en une échelle de temps de l'ordre de $1/\sqrt{G\rho_0}$. D'autre part la pression thermique tend à rétablir une densité uniforme en un temps de passage du son R/C_s , si $1/\sqrt{G\rho_0}$ est inférieur à R/C_s , alors les ondes sonores ne peuvent pas disperser les fluctuations de pression induites par la contraction gravitationnelle avant l'effondrement de la totalité du nuage.

La masse de Jeans est naturellement définie comme la masse contenue dans un volume de taille égale à la longueur de Jeans. Bien qu'il n'y ait aucune justification fondamentale pour le choix fait, à un facteur de l'ordre de l'unité près.

La formulation mathématique mentionnée ci-dessus montre que, pour un gaz isotherme, la masse de Jeans diminue en même temps que la densité. Il s'ensuit que lors de l'effondrement d'un nuage les valeurs de la masse de Jeans augmentent à mesure que se produit l'effondrement. Sur la base de cet argument, Hoyle (1953) a proposé le concept de la fragmentation récursive par lequel un nuage se fragmente de plus en plus car il devient plus dense. Cependant, comme cela peut être démontré mathématiquement le taux de croissance de l'instabilité gravitationnelle, diminue avec le nombre d'onde k ce qui signifie que les perturbations à grande échelle évoluent plus rapidement que les perturbations à petite échelle. Ainsi le scénario de la fragmentation récursive souffre d'un problème d'échelle de temps. Notons qu'il y a une certaine incohérence dans le calcul mathématique car un milieu uniforme n'est pas une solution exacte des équations d'un fluide auto-gravitant (une force devrait équilibrer la gravité) lorsque des solutions exactes des équations (voir section suivante) sont perturbées.

Pour ce qui concerne les couches (Nagai et al. 1998) ou pour ce qui concerne les filaments (Fiege et Pudritz 2000), on obtient généralement que le taux de croissance tend vers 0 lorsque k tend vers 0, tandis que, au mode de croissance le plus rapide, correspond la longueur de Jeans, à un facteur de l'ordre de l'unité près.

En général il n'est pas possible de calculer le temps que met un nuage à s'effondrer sauf dans le cas idéal d'un nuage sphérique froid ayant une densité uniforme, où on peut le calculer avec exactitude (Lequeux 2005). Le résultat, connu sous le nom de temps de chute libre est symbolisé par la lettre t_{ff} .

2.1.3 La plus petite masse de Jeans dans les nuages moléculaires contemporains

Pour estimer cette valeur nous suivons l'approche de Rees (1976) et de Whitworth et Stamatellos (2007). La première condition qui doit être satisfaite est que la taille de la particule fluide R doit être de l'ordre de la longueur de Jeans comme cela a été expliqué ci-dessus. La seconde condition est que l'énergie thermique due à la contraction gravitationnelle soit efficacement rayonnée. Si cette condition n'est pas remplie, l'indice adiabatique efficace sera plus grand que 4/3 et la pression thermique va arrêter l'effondrement. Le taux de chauffage est donné par le travail de la pression thermique. En supposant que l'effondrement est proche de la chute libre, nous obtiendrons la vitesse d'effondrement du fragment et sa variation de volume. En écrivant que le refroidissement est dû à la perte radiative qui dans une région optiquement épaisse est donnée par Mihalas et Mihalas (1984), on peut alors obtenir une expression de la masse caractéristique, M, de la plus petite étoile que l'on peut exprimer en fonction de la masse de Planck. Notons cependant que la valeur de ce paramètre dépend notamment des hypothèses faites. On trouve que M est de l'ordre de quelques masses Jupiter.

2.1.4 Configurations d'équilibre

Des configurations d'équilibre sont obtenues lorsque les forces de pression compensent les forces gravitationnelles. De telles solutions statiques des équations des fluides sont des guides utiles et commodes. Elles permettent de tester les codes numériques, d'effectuer des analyses plus rigoureuses de la stabilité que celles de Jeans et peuvent quelquefois être comparées directement aux observations. On considère donc l'équation hydrostatique et l'équation de Poisson. La combinaison de ces deux équations conduit à l'équation dite de Lane-Emden. En géométrie plan-parallèle, Spitzer (1942) a obtenu la solution d'une couche auto-gravitante, tandis qu'en géométrie cylindrique, Ostriker (1964) a obtenu la solution décrivant un filament auto-gravitant. Ces deux solutions sont entièrement analytiques. Elles sont caractérisées par un profil de densité plat près du centre. Le premier présente une décroissance exponentielle pour les grandes valeurs de z (l'altitude) alors que le dernier décroît comme r^{-4} (le rayon). En géométrie sphérique, les solutions de l'équation sont ce qu'on appelle les sphères de Bonnor-Ebert (Bonnor 1956). En général ces solutions ne sont pas analytiques et doivent être obtenues en résolvant numériquement l'équation de Lane-Emden. Il y a cependant une exception notable qui est la sphère singulière isotherme dont la densité est proportionnelle à l'inverse du rayon au carré. Le profil de densité de la sphère de Bonnor-Ebert est plat dans la partie interne et tend vers la densité de la sphère singulière isotherme pour les grands rayons. Comme il est physiquement nécessaire que le nuage ait un rayon fini, les solutions sont obtenues en tronquant ce profil au niveau de n'importe quel rayon arbitraire, en supposant un équilibre de pression avec le milieu extérieur au nuage qui est censé être diffus et chaud. Ainsi toute une famille de solutions à l'équilibre est obtenue, elles peuvent être caractérisées par le contraste de densité entre le centre et les bords. L'analyse de la stabilité montre que les solutions qui présentent un contraste de densité inférieure à environ 14 sont stables alors que les autres sont instables.

Comme mentionné dans la section précédente, l'analyse de stabilité de la couche auto-gravitante ainsi que celle du filament ont été effectuées dans diverses études (Larson 1985, Fiege et Pudritz 2000). Toutes deux sont instables à des perturbations de longueur d'onde comparable à la longueur de Jeans. En particulier, cela suggère que les coeurs ou les filaments distribués périodiquement, peuvent se former respectivement par instabilité gravitationnelle au sein de filaments ou de couches auto-gravitantes. Comme le milieu interstellaire est hors équilibre et sujet à des mouvements supersoniques, il est toujours difficile d'évaluer la pertinence de ce scénario quantitativement. Qualitativement néanmoins des coeurs et des filaments grossièrement périodiquement distribués sont souvent observés (Dutrey et al. 1991).

2.1.5 L'effondrement gravitationnel

L'effondrement gravitationnel d'un nuage sphérique a été étudié dans le détail de manière à la fois analytique et numérique. En géométrie sphérique, l'évolution du nuage est décrite par deux équations non linéaires aux dérivées partielles. Les modèles analytiques ont principalement porté sur les solutions auto-similaires (Larson 1969, Penston 1969, Shu 1977, Whitworth et Summers 1985), ce qui permet de réduire le problème à des équations ordinaires plus simples à résoudre. Ces solutions ont été utiles pour comprendre la physique de l'effondrement et parfois utilisées dans divers contextes pour obtenir facilement les champs de densité et de vitesse dépendants du temps. Deux principaux types de solutions en ont été déduits, Larson (1969) et Penston (1969) en donnent une solution qui présente une vitesse supersonique d'effondrement interne pour les grands rayons alors que Shu (1977) obtient une solution dans laquelle le gaz est initialement au repos et subit un effondrement de l'intérieur vers l'extérieur. Une onde de raréfaction qui se propage vers l'extérieur à la vitesse du son se forme au centre du nuage lorsque les proto-étoiles se forment. Toutes les solutions auto-similaires ont un taux d'accrétion constant égal à plusieurs fois Cs^3/G . On notera que dans toutes les solutions le champ de densité est proportionnel à r^{-2} dans la partie extérieure et à $r^{-3/2}$ dans la zone intérieure qui a été atteinte par l'onde de raréfaction. Notons enfin que la densité de la solution Larson-Penston est environ huit fois plus grande que la densité de la solution de Shu à l'infini.

L'effondrement a également été étudié numériquement. Larson (1969) envisage d'abord un nuage de densité uniforme et calcule la contraction du gaz jusqu'à la formation de la proto-étoile en utilisant un transfert radiatif simplifié (Masunaga et Inutsuka 2000). Il montre qu'un premier choc d'accrétion se développe au bord du cœur hydrostatique qui se forme lorsque la poussière devient opaque à son propre rayonnement, c'est-à-dire à une densité d'environ $10^{-13} \text{ g cm}^{-3}$. Ce cœur est appelé le premier cœur de Larson. Un deuxième choc d'accrétion se forme au bord de la proto-étoile à une densité beaucoup plus élevée $\approx 10^{-2} \text{ g cm}^{-3}$. Foster et Chevalier (1993) commencent leur simulation par une sphère Bonnor-Ebert légèrement instable. Ils constatent que l'effondrement se produit très lentement dans la partie extérieure où seules des vitesses de chute subsoniques se développent. Dans la partie intérieure, cependant, des mouvements supersoniques apparaissent. En effet ils montrent que la convergence vers la solution de Larson-Penston est atteinte profondément à l'intérieur du nuage. D'autre part, dans la partie extérieure

de l'enveloppe, le profil de densité s'avère rester proche de la densité de la sphère singulière isotherme, ρ_{sis} . Un effondrement déclenché a également été étudié par plusieurs auteurs (Hennebelle et al. 2003) ; des vitesses de chutes intérieures plus rapides sont alors obtenues ainsi que des densités quelquefois plus denses que ρ_{sis} . Une caractéristique commune partagée par les solutions numériques est que le taux d'accrétion varie significativement au cours du temps au contraire de ce qui est déduit à partir des solutions auto-similaires.

2.2 Influence du champ magnétique

Comme rappelé précédemment le champ magnétique a très tôt été proposé comme jouant un rôle important dans la dynamique du gaz (Shu et al. 1987) ce qui pourrait expliquer la faible efficacité de la formation des étoiles au sein de la Voie lactée. Dans cette partie de l'article, nous exposons les principes de base de la théorie du contrôle magnétique de la formation des étoiles.

2.2.1 Le support magnétique

L'effet du champ magnétique n'est pas facile à mettre en évidence car, contrairement à la pression thermique, il est hautement anisotrope. En particulier les forces magnétiques $J \times B$ où J est le courant électrique, s'annulent le long des lignes de champ. Un moyen simple d'estimer le support magnétique, consiste à calculer le rapport entre les énergies magnétique et gravitationnelle.

Pour simplifier, prenons à nouveau le modèle d'un nuage sphérique et uniforme de masse M , de volume V , de rayon R , traversé par un champ magnétique uniforme, B . Aussi longtemps que le champ magnétique reste bien couplé au gaz (voir section suivante), le flux magnétique traversant le nuage restera constant au cours du temps. Le rapport entre les énergies magnétique et gravitationnelle pour un nuage de densité uniforme traversée par un champ magnétique uniforme peut-être facilement calculé et montre que de façon intéressante le rapport des énergies magnétique et gravitationnelle est indépendant du rayon du nuage. Ceci implique que lorsque le nuage se contracte ou se dilate, le rapport relatif entre ces deux énergies reste le même. Ce comportement est différent de ce qui se passe pour l'énergie thermique d'un gaz isotherme qui devient de plus en plus petite, comparée à l'énergie gravitationnelle, lorsque que le nuage s'effondre. Il est clair qu'il existe une valeur critique de l'intensité magnétique à laquelle l'effondrement gravitationnel est entravé même si le nuage est fortement comprimé. Mouschovias et Spitzer (1976) ont calculé avec précision la valeur critique du rapport masse du nuage sur flux magnétique en calculant l'équilibre bidimensionnel d'un nuage magnétisé. Un nuage qui a ainsi un rapport masse sur flux plus petit que la valeur critique citée ci-dessus ne peut pas s'effondrer et est appelé de ce fait sous-critique.

Un autre effet important du champ magnétique est sa capacité de freiner un nuage en rotation. Ceci sera discuté plus tard dans ce même document.

2.2.2 La diffusion ambipolaire

Aux échelles microscopiques, les neutres ne subissent pas la force de Lorentz qui ne s'applique qu'aux particules chargées. Ceci veut dire que, tout compte fait, deux fluides doivent être considérés pour traiter le problème correctement, le fluide formé par les neutres et celui formé par les ions (dans certaines circonstances cependant on peut être amené à devoir considérer plus que un fluide de particules chargées). Comme les deux fluides sont couplés l'un à l'autre par des collisions, les neutres sont néanmoins influencés par le champ magnétique si le gaz est suffisamment ionisé. Puisque, dans les nuages moléculaires, l'ionisation est habituellement de l'ordre de 10^{-7} ou même moins, la densité des ions est plus petite que celle des neutres. Ceci permet de négliger l'inertie des ions et de poser comme hypothèse un équilibre mécanique entre les forces de Lorenz et les forces de friction. Cette hypothèse peut s'exprimer sous forme d'une formule mathématique dont les facteurs sont la densité des ions, la vitesse et le coefficient de friction entre les ions et les neutres (Mouschovias et Paleologou, 1981). La vitesse des ions peut facilement s'exprimer comme une fonction de la vitesse des neutres et de la force de Lorentz. Si l'on considère alors l'équation d'induction qui régit l'évolution du champ magnétique et implique la vitesse des ions, on obtient une nouvelle équation d'induction dans laquelle la vitesse des neutres apparaît à la place de la vitesse des ions et qui contient maintenant un terme impliquant la une dérivée seconde du champ magnétique. Ce terme est appelé terme de diffusion ambipolaire. Il est directement responsable du glissement entre les neutres et le champ magnétique. Bien que cette formule soit du second ordre il ne s'agit pas, rigoureusement parlant, d'un terme de diffusion. De cette équation on peut facilement inférer une échelle de temps typique pour la diffusion ambipolaire et impliquant l'échelle spatiale typique du problème étudié. Dans le contexte de la formation des étoiles, cette échelle peut-être de la taille du cœur dense.

Si un cœur dense est initialement sous-critique (de ce fait, magnétiquement supporté) la diffusion du champ doit progressivement réduire le flux magnétique à l'intérieur des nuages ainsi après un temps de diffusion ambipolaire, le nuage devient super-critique et le champ magnétique n'est plus capable d'empêcher l'effondrement. A ce stade de l'analyse la question importante et intéressante est de savoir de combien de temps est retardé l'effondrement lors d'un tel processus ? Dans le but d'estimer ce temps, on suppose habituellement que le nuage est en équilibre viriel et on calcule alors le rapport entre le temps de chute libre et le temps caractéristique de diffusion ambipolaire, ce qui nous amène à un rapport de l'ordre de 8 (Shu et al. 1987).

Il est assez remarquable que ce rapport soit indépendant de la taille et la masse du nuage (aussi longtemps que l'hypothèse de l'équilibre viriel est vérifiée). Le point important est bien sûr que le temps de diffusion ambipolaire est environ 10 fois le temps de chute libre. Ceci implique en conséquence, que la diffusion ambipolaire peut réduire la formation des étoiles de façon significative pour la rendre plus proche des valeurs observées.

2.2.3 Prédiction de la théorie de la diffusion ambipolaire

Dans le but de faire des prédictions quantitatives, des simulations numériques de l'effondrement magnétique contrôlé par la diffusion ambipolaire ont été réalisées (Basu et Mouschovias 1995). Ces simulations sont généralement monodimensionnelles et présentent la géométrie d'un disque fin. Elles explorent un large éventail d'intensités magnétiques, depuis pratiquement des cœurs critiques jusqu'aux cœurs très sous-critiques (donc possédant un champ magnétique intense). Elles explorent aussi l'effet du changement de l'ionisation résultant en un couplage plus faible entre le champ magnétique et le gaz neutre. Des profiles de densité et de vitesse potentiellement intéressants pour des comparaisons avec les observations sont ainsi disponibles dans la littérature.

Nous présenterons ici simplement les plus importantes caractéristiques.

Quand le cœur dense est très sous-critique, avec des valeurs de masse sur flux aussi basses que 0,1, Basu et Mouschovias (1995) trouvent que la vitesse de chute dans la partie externe de l'enveloppe est seulement une faible fraction de la vitesse du son, avec des valeurs aussi basses que $0,2 \times C_s$, alors que dans la partie interne, elle augmente graduellement pour atteindre des valeurs de environ $0,5$ à $0,8 \times C_s$. L'effondrement est nettement retardé et se produit en, à peu près, 15 temps de chute libre.

Pour presque tous les cœurs critiques, la vitesse de chute est grossièrement deux fois plus élevée que dans le cas précédent alors que l'effondrement se produit après environ 3 temps de chute libre.

Une autre prédition intéressante est l'évolution du rapport de la masse centrale au flux. La valeur de l'intensité magnétique au centre, plus grande que la valeur critique initialement, décroît au cours du temps lorsque le nuage perd son flux et même éventuellement devient plus petite que cette valeur. Au cours du temps, la valeur du champ magnétique atteint des valeurs typiques d'environ la moitié du champ magnétique critique. De façon intéressante, ceci ne dépend pas beaucoup de la valeur initiale du flux magnétique. Une prédition importante du modèle contrôlé par le magnétisme est typiquement que des valeurs de flux magnétique autour de la moitié de la valeur critique devraient pouvoir être mesurées. Des valeurs significativement inférieures à 2 indiquerait que l'effondrement n'est pas magnétiquement contrôlé.

Notons que récemment, Kuntz et Mouschovias (2009) ont proposé une théorie de la fonction de masse initiale basée sur le développement d'une instabilité gravitationnelle au sein de nuages moléculaires magnétiquement supportés.

2.3 Rôle de la turbulence

Durant les deux dernières décennies, une nouvelle théorie basée sur la turbulence supersonique a été proposée (MacLow et Klessen 2004, McKee et Ostriker 2007). L'idée générale de cette théorie est que la turbulence empêcherait la plus grande partie du gaz de s'effondrer en un temps de chute libre et régulerait ainsi la formation d'étoiles.

2.3. I Support de la turbulence et décroissance de la turbulence

Contrairement aux champs magnétiques, il n'est pas évident d'anticiper l'influence de la turbulence sur la formation d'une étoile. Ceci d'une part parce que les mouvements de la turbulence ont tendance à disperser le gaz, réduisant ainsi sa possibilité d'effondrement et d'un autre côté les mouvements turbulents peuvent accroître la densité du gaz localement lorsque les mouvements sont globalement convergents. De plus la difficulté avec les théories impliquant la turbulence est qu'il semble impossible de développer des descriptions analytiques exactes même dans les situations hautement idéalisées. Ainsi la plupart de nos connaissances théoriques de la turbulence interstellaire nous sont fournies par des simulations numériques (Kritsuk et al. 2007, Schmidt et al. 2009). Il semble cependant très souhaitable de donner des tendances simples. Pour ce faire, supposons que la turbulence est suffisamment isotrope et constitue un support additionnel qui peut être décrit par la vitesse du son. Posons V_{rms} comme étant la racine carré moyenne de la vitesse et $C_{s,eff}$ la vitesse du son effective du flot. Puisque la turbulence observée dans les nuages moléculaires est hautement supersonique, V_{rms} est plus grand que C_s^2 d'un facteur de 25 à 100. D'un autre côté, la turbulence crée des surdensités qui peuvent être estimées par les conditions de saut (conditions de Rankine-Hugoniot) pour un gaz isotherme. En combinant ces éléments, on obtient par calcul la masse de Jeans turbulente qui indique que cette turbulence est globalement stabilisante pour le nuage. C'est certainement le cas quand la turbulence est grande et domine la gravité. Cependant le rôle double de la turbulence qui comprime également le gaz par l'intermédiaire de mouvements convergents, nécessite un traitement plus complexe présenté dans la section 3.2.

Afin d'aller plus loin que cette estimation analytique assez simple, il est nécessaire de procéder à des calculs numériques. Avant de donner quelques résultats de ces simulations numériques, il est important de mettre l'accent sur la rapide décroissance de la turbulence qui constitue un grave problème de la théorie de la turbulence. Si l'on considère une partie d'un fluide turbulent de taille L , une conclusion robuste semble être qu'une fraction significative (c'est-à-dire plus que la moitié) de l'énergie initiale de turbulence est dissipée dans à peu près un temps de traversée (L/V_{rms}). Ce résultat, très bien établi dans le cas de fluides pratiquement incompressibles, a également été obtenu pour les simulations numériques de turbulences supersoniques avec et sans champ magnétique (Mac Low et Klessen 2004). Ainsi, non entretenue (c'est-à-dire lorsqu'aucune force extérieure n'est appliquée continuellement au flot) la turbulence décroît rapidement et ainsi ne peut pas retarder très significativement l'effondrement d'un nuage auto-gravitant. Dans le but d'expliquer le faible taux de formation des étoiles dans la galaxie, la théorie de la turbulence doit supposer l'existence d'une source qui en permanence rétablirait l'énergie de la turbulence. Plusieurs sources d'énergie capables de compenser la dissipation d'énergie ont été proposées. Une première catégorie de modèles est basée sur l'action des étoiles par l'intermédiaire de leurs vents, leurs jets ou leurs rayonnements ionisants (Matzner 2002, 2007), alors qu'une seconde catégorie invoque le rôle de l'accrétion du gaz atomique diffus au sein des nuages moléculaires (Klessen et Hennebelle 2010, Goldbaum et al. 2011).

Plusieurs simulations numériques ont été effectuées pour étudier directement l'influence de la turbulence sur la formation des étoiles. L'influence de la turbulence sur l'IMF est discutée dans les sections suivantes (3 et 5). Ci-dessous, nous nous cantonnerons à discuter la possibilité de son influence sur le taux de formation d'étoiles. Comme il ne s'agit pas du sujet principal de cet article, seule une description rapide et qualitative est donnée.

2.3.2 La turbulence hydrodynamique

Comme nous l'avons anticipé ci-dessus, la turbulence du fait de son déclin ne peut pas retarder significativement la formation d'une étoile. Les calculs effectués par Klessen et al. (2000) et Bate et al. (2003), montrent effectivement que dans un temps de chute libre la majorité du gaz a été accrétée.

La turbulence doit pouvoir réduire le taux de formation de l'étoile si l'injection d'énergie est suffisante. Avec une échelle de forçage (c'est-à-dire $k = 1-2$ où k représente le nombre de longueur d'ondes du forçage turbulent dans la boîte) donnant une masse de Jeans effective de 0,6 dans une boîte qui contient au total une masse égale à 1 (c'est-à-dire que la boîte contient plus que une masse de Jeans turbulente), Klessen et al. (2000) trouvent que un peu plus de la moitié de la masse est accrétée en un temps de chute libre. Le problème devient moins sévère si l'entrainement se produit à une échelle plus petite ($k = 3-4$ ou $k = 7-8$) puisque dans ce cas 3 à 6 temps de chute libre sont nécessaires pour produire l'accrétion de la moitié de la masse (ceci dépend de l'échelle à laquelle le forçage a lieu). Si l'entrainement est plus fort, produisant une masse de Jeans effective de 3,2 ces nombres sont typiquement multipliés par un facteur de trois à quatre. La formation des étoiles peut-être entièrement supprimée si un forçage suffisamment puissant est appliqué à des échelles plus petites que la longueur de Jeans thermique qui existe dans la boîte. Notons que des estimations analytiques du taux de formation des étoiles dérivent des travaux de Krumholz et McKee (2005), de Padoan et Nordlund (2011) ainsi que de Hennebelle et Chabrier (2011). Alors que le premier groupe d'auteurs conclut que la turbulence hydrodynamique seule peut expliquer le faible taux de formation des étoiles dans les galaxies, les deux autres groupes d'auteurs trouvent des valeurs plus élevées qui sont plus conformes à ce que l'on connaît du taux de formation des étoiles dans les nuages moléculaires (Heiderman et al. 2010) ou même peut être plus élevé de quelques unités.

2.3.3 La turbulence dans des nuages magnétisés

Des champs magnétiques supercritiques ont probablement pour effet de réduire le taux de formation des étoiles d'un facteur de quelques unités, c'est à dire que le taux de formation des étoiles est plus petit dans un nuage qui possède un champ magnétique supercritique que ce qui est observé dans des nuages semblables non magnétisés (Price et Bate 2009, Padoan et Nordlund, 2011) bien que le mécanisme physique responsable ne soit pas totalement compris.

La turbulence dans les nuages sous-critiques en présence de diffusion ambipolaire a été examinée par Basu et Ciolek (2004) et par Li et Nakamura (2005). Ces simulations combinent le support magnétique et la turbulence. Puisque les nuages sont initialement sous-critiques la diffusion bipolaire joue un rôle important puisqu'elle permet de réduire localement le flux magnétique. De façon intéressante on a montré que dans ces contextes la turbulence tend à accélérer la formation des étoiles. Ceci est dû au fait que la turbulence crée des gradients dus à la formation de chocs, dans lesquels la diffusion ambipolaire se produit rapidement. Mathématiquement on montre que le temps de diffusion ambipolaire décroît avec l'échelle spatiale. Il est très intéressant de constater que ces simulations sont capables de reproduire le faible taux de formation des étoiles observé dans la Voie lactée pourvu que la valeur initiale du champ magnétique soit suffisamment élevée (typiquement comparable à la valeur critique) et que la turbulence V_{rms} soit suffisamment forte (égal à environ $10 \times C_s$).

3. Origine de la fonction de masse initiale

Plusieurs théories ont été proposées pour expliquer l'origine de la fonction initiale de masse, faisant appel à différents types de processus physiques que nous avons tenté de classer en quatre catégories :

- les théories basées sur la fragmentation récursive ou sur la gravité pure (Larson 1973)
- les théories basées sur des arguments purement statistiques invoquant le théorème de la limite centrale (Zinnecker 1984, Elmegreen 1997, Adams et Fatuzzo 1996)
- les théories basées sur l'accrétion, et enfin
- les théories basées sur la masse initiale de Jeans dans un environnement fluctuant.

Nous présenterons principalement les deux dernières qui sont préférées pour l'explication de la formation des étoiles dans le contexte actuel.

3.1 Théorie basée sur l'accrétion

3.1.1 L'accrétion compétitive

Cette théorie de l'accrétion compétitive a été pour la première fois proposée par Zinnecker (1982) et Bonnell et al. (2001). Elle a été utilisée pour interpréter les simulations numériques similaires à celles étudiées par Bate et al. (2003).

L'idée sous-jacente principale est que l'accrétion au sein des étoiles est directement liée à la masse, de telle sorte que les étoiles massives tendent à accréter plus efficacement et ainsi deviennent de plus en plus massives. On peut calculer une formule donnant le taux d'accrétion en fonction de la densité du gaz, des vitesses réciproques de l'étoile et du gaz et du rayon d'accrétion. Bonnell et al. (2001) considèrent ainsi deux situations selon que le potentiel gravitationnel est dominé par le gaz ou par les étoiles.

- Cas du potentiel dominé par le gaz :

En posant R le rayon d'une sphère, ρ comme la densité du gaz et N comme le nombre de densité des étoiles, dans ce cas de potentiel dominé par le gaz, Bonnell et al. (2001) supposent, suivant en cela Shu (1977), que le profil de densité de gaz est proportionnel à R^{-2} . Ils écrivent alors une formule où le rayon d'accrétion (R_{acc}) est supposé égal au rayon de marée, lui même proportionnel à la masse d'accrétion et inversement proportionnel à la masse comprise à l'intérieur de ce rayon R . Ce choix est motivé par le fait que une particule du fluide localisée à une distance de l'étoile plus faible que le rayon de marée, est plus sensible à cette étoile qu'au potentiel du cluster et est ainsi accrétee facilement sur l'étoile.

La masse du gaz à l'intérieur d'un rayon R est proportionnelle bien sûr à ce rayon. Le nombre d'étoiles dN situées entre R et $R+dR$ peut être déterminé par une relation mathématique, laquelle combinée avec les expressions mathématiques du rayon d'accrétion conduit à un spectre de masse proportionnel à $M^{-3/2}$.

Bien que l'indice 3/2 du spectre de masse soit trop faible par rapport à celui de l'IMF observée (dont la valeur est de 2.3), il est intéressant de constater que cette loi de puissance peut être obtenue par un modèle simple comme celui-ci. Il faut noter cependant que le modèle implique que les étoiles d'une masse donnée sont toutes localisées au même rayon ce qui n'est pas très réaliste et constitue une difficulté de ce modèle.

- Potentiel dominé par l'étoile.

Lorsque le potentiel est dominé par les étoiles localisées au centre du nuage, la densité est celle qui correspond à la distribution attendue après que l'onde de raréfaction se soit propagée (Shu 1977). Le rayon d'accrétion est alors supposé correspondre au rayon dit de Bondi-Hoyle (et qui décrit l'accrétion d'une étoile en mouvement par rapport à son environnement) du fait que les vitesses relatives du gaz et de l'étoile ne sont plus corrélées. Ceci permet de montrer que le spectre de masse est alors proportionnel à M^{-2} (Zinnecker 1982, Bonnell 2001). Cette estimation est plus conforme à l'exposant de Salpeter bien que encore légèrement trop faible. Ces tendances semblent être confirmées par les simulations effectuées par Bonnell et al. (2001) qui consistent à distribuer 100 particules puits dans un nuage de masse totale environ 10 fois la masse totale initiale de toutes les particules puits (voir la figure 3 de Bonnell et al. 2001).

- Les difficultés du scénario de l'accrétion compétitive.

Ainsi, trouver une explication pour l'exposant de Salpeter en utilisant le scénario de l'accrétion compétitive, semble être difficile, même si des simulations numériques comme celles présentées par Bonnell et collaborateurs en 2001, semblent accomplir cette tâche avec succès. Cependant bien que l'exposant de l'IMF soit proche de l'exposant de Salpeter dans le cas des étoiles dominées par le potentiel, ce scénario implique par construction, l'accrétion de Bondi-Hoyle, laquelle est, au moins d'un facteur 3, plus bas que le taux de masse résultant du collapse gravitationnel aux stades de classe -0 et I. Cela conduirait à des taux d'accrétion trop longs par rapport aux observations (André et al. 2007, 2009). Il existe, avec ce scénario, une autre difficulté due au fait que le pic de l'IMF n'est pas expliqué (voir paragraphe 3.2). D'une manière générale il ne paraît pas clair que l'accrétion compétitive puisse fonctionner dans le cas de formation d'étoiles non groupées pour lequel la densité de gaz est beaucoup trop faible. Comme il n'a pas été rapporté, de façon évidente jusqu'à ce jour, de variations substantielles de l'IMF (Bastian et al. 2010), ceci représente une difficulté pour pouvoir accepter ce modèle comme modèle général de la formation des étoiles. Il est possible néanmoins que ce scénario puisse s'appliquer de façon correcte à la formation d'étoiles massives.

3.1.2 L'accrétion arrêtée

Le principe de ce type de modèle est que l'accrétion du gaz dans les étoiles ou dans les coeurs denses est un processus non stationnaire et susceptible de cesser soit du fait d'un réservoir de masse fini ou de fait de l'influence d'un autre processus qui dissiperait le gaz restant dans l'environnement de la proto-étoile en accrétion.

Les premières études ont été faites par Silk (1995) et par Adams et Fatuzzo (1996). Dans un premier temps ils mettent en relation la masse des étoiles avec les paramètres physiques du nuage tels que la vitesse du son et la rotation et supposent alors que les jets et les outflows, dont les propriétés sont reliées à la luminosité d'accrétion, peuvent stopper l'effondrement du nuage. Utilisant les formules de Larson (1980) ils peuvent ainsi lier tous ces paramètres aux masses des amas. Ainsi, du fait que le spectre de masses de ces derniers est connu, (Heithausen et al. 1998), ils en infèrent l'IMF.

Une approche statistique a été menée par Basu et Jones (2004). Ces auteurs supposent que la distribution des coeurs denses est, à l'origine, log-normale, justifiant cela par le grand nombre de processus qui contrôlent leur formation (et en invoquant le théorème de la limite centrale). Ils proposent alors que les coeurs croissent par accrétion et postulent que le taux d'accrétion est simplement proportionnel à leur masse. Finalement ils supposent que l'accrétion dure un temps fini. La distribution de masse des étoiles est alors obtenue en sommant sur la distribution des temps d'accrétion supposée exponentielle.

Dans une étude récente Myers (2009) développe les mêmes idées en étudiant plus en détail et, en particulier, en prenant en compte l'accrétion provenant du milieu environnant. En ajustant des paramètres, il reproduit presque complètement

l'IMF observé (figure 5 de Myers 2009). Un modèle voisin a également été développé par Bate et Bonnell (2005) se basant sur une idée proposée par Price et Podsiadlowski (1995). Ils considèrent que les objets formés par fragmentation dans un petit amas sont éjectés par interaction gravitationnelle avec les autres fragments, ce qui stoppe le processus d'accrétion. Supposant un taux d'accrétion log-normal et une probabilité exponentielle de subir une éjection, ces auteurs construisent une distribution de masse qui peut reproduire l' IMF lorsqu'on choisit certains paramètres.

En résumé le scénario d'accrétion arrêtée présente d'intéressantes idées et au prix d'au moins deux paramètres ajustables, permet de reproduire de façon raisonnable l'IMF. Cependant la présence même de tels paramètres, qui caractérise notre incapacité à déterminer avec précision les processus qui arrêtent l'accrétion, illustre bien les difficultés inhérentes à cette classe de modèles.

3.2 Les théories gravo-turbulentes

Bien que la turbulence ne soit pas déterminante dans le modèle d'accrétion, c'est cependant un des processus essentiels pour les deux théories présentées dans ce paragraphe bien que le rôle qu'elle joue diffère dans l'un ou l'autre de ces modèles comme nous le montrons ci-dessous. Les théories proposées tout au long de ce chapitre identifient cœurs et pré-cœurs et sont motivées par la grande similarité existant entre la fonction de masse des cœurs observés (CMF) et l'IMF (André et al. 2010).

La première des théories qui mentionnent l'effet combiné de la turbulence et de la gravité a été proposée par Padoan et al. (1997). Dans leur article, les auteurs considèrent une distribution de densité log-normale obtenue dans les simulations numériques (Vazquez-Semadeni 1994, Kritsuk et al. 2007, Schmidt et al. 2009, Federrath et al. 2010a). Ils sélectionnent les régions où le gaz est gravitationnellement instable. Ce faisant, ils obtiennent une IMF trop pentue aux grandes masses, mais en trouvant malgré tout un comportement log-normal aux petites masses, conséquences directes de la distribution log-normale de la densité.

3.2.1 La formation de cœurs par chocs MHD

L'idée développée par Padoan et Nordlund (2002) est légèrement différente. Ces auteurs considèrent une couche comprimée formée par pression dynamique dans un milieu légèrement magnétisé. Ils supposent que le champ magnétique est parallèle à la couche et en conséquence perpendiculaire au champ de vitesse. La densité post-choc, l'épaisseur de la couche et l'intensité magnétique post-chocs, peuvent être mis en relation avec le nombre de Mach Alfvénic et avec les quantités pré-chocs, en fonction des conditions du choc et de l'échelle de la fluctuation turbulente. Notons que pour un choc isotherme hydrodynamique classique, la condition de saut est typiquement proportionnelle au nombre de Mach au carré. Dans le cas magnétisé le rapport des densités

pré et post-choc est proportionnel au Mach Alfvénique. Cela découle de la pression magnétique qui est quadratique en B .

Du fait que le flot est turbulent, la distribution des vitesses dépend de l'échelle et du spectre de puissance du champ de vitesse. On détermine alors le spectre de masses dû aux fluctuations du champ de vitesse. Notons que jusqu'à présent, la gravité ne joue pas de rôle dans cette dérivation et le spectre de masse qui est déduit reste valable pour des masses arbitrairement petites.

Dans une seconde étape les auteurs envisagent une distribution de masse de Jeans à l'intérieur des cœurs induits par la turbulence. Ils montrent alors que la forme du spectre de masse est très similaire à l'IMF observée (voir figure 1 de Padoan et Nordlund 2002).

Notons cependant que certaines difficultés de cette théorie ont été signalées par McKee et Ostriker (2007) et par Hennebelle et Chabrier (2008). En particulier ce modèle suppose que dans les régions les plus denses où se forment les cœurs denses, le champ magnétique est proportionnel à la densité, ce qui est en désaccord avec les distributions obtenues dans simulations (Padoan et Nordlund 1999, Hennebelle et al. 2008) et dans les observations (Troland et Heiles 1986). C'est en fait une conséquence directe de l'hypothèse que le champ magnétique et le champ de vitesse sont perpendiculaires, ce qui n'est pas non plus la tendance observée dans nombre de simulations. Dans les deux cas, il a été trouvé que aux densités plus basses que environ 10^3 cm^{-3} , le champ magnétique, B , ne dépend que faiblement de la densité, ρ , alors que aux plus hautes densités B est proportionnel à $\sqrt{\rho}$. Ceci représente un problème pour cette théorie, puisque l'indice du spectre de masse est une conséquence de la relation $B-\rho$. En supposant une relation différente entre B et ρ comme celle mentionnée ci dessus, on arriverait à une pente plus élevée que la valeur de Salpeter. Par ailleurs, l'IMF de Salpeter est retrouvée dans plusieurs simulations numériquement purement hydrodynamiques (Bate et al. 2003) alors que la théorie de Padoan et Nordlund prédit une pente plus élevée dans le cas hydrodynamique.

3.2.2 La dispersion turbulente

Récemment Hennebelle et Chabrier (2008, 2009) ont proposé une théorie différente qui consiste à compter la masse de régions fluides où domine la gravité, sur tous les autres supports (voir aussi Hopkins 2012). Dans cette approche, le rôle de la turbulence est double : d'un côté, elle augmente la formation des étoiles en comprimant localement le gaz mais d'un autre côté elle empêche la formation des étoiles à cause de la dispersion du gaz par la turbulence, ce qui est pris en compte dans la sélection des parties de fluides qui vont s'effondrer.

La théorie est formulée en dérivant une extension du formalisme statistique de Press et Schechter (1974) développé en cosmologie.

Le principe de la méthode est le suivant : tout d'abord le champ de densité est lissé à une échelle R , en utilisant une fonction fenêtre. Puis, la masse totale contenue dans la

surface qui, à l'échelle R , a un contraste de densité plus grand que le critère de densité spécifié, est obtenue par intégration de la PDF de densité. Cette masse d'un autre côté est aussi égale à la masse totale localisée dans des structures de masses plus grandes qu'une masse critique dépendant de l'échelle, qui finira par former des structures de masses plus faibles ou égales à la masse critique qui s'effondre. Les deux différences majeures avec l'approche classique de Press et Schechter sont :

- 1) Le champ de densité sous-jacent caractérisé par des fluctuations faibles et gaussiennes dans le cas cosmologique, alors qu'elles sont log-normales dans le cas de la formation des étoiles.
- 2) Le critère de sélection : un simple seuil de densité sans dépendance d'échelle en cosmologie alors qu'il est échelle-dépendant et basé sur le théorème du viriel dans le second cas. C'est-à-dire que les particules fluides qui satisfont aux critères de vitesse et de masse, sont supposées s'effondrer et former un cœur pré-stellaire lié.

La théorie est contrôlée par deux nombres de Mach. Tout à d'abord, le nombre de Mach, noté M_* défini comme le rapport de la vitesse du fluide et de la vitesse du son à l'échelle de la longueur de Jeans moyenne du nuage, et le nombre de Mach global (qui représente la même quantité à l'échelle de l'injection turbulente supposé être la taille caractéristique du système). La largeur de la distribution de densité augmente avec le nombre de Mach global, illustrant la tendance de la turbulence supersonique à promouvoir la formation d'étoiles en créant de nouvelles fluctuations de densité qui vont s'effondrer. Le paramètre M_* décrit le support additionnel non thermique induit par la dispersion turbulente. En particulier, dans le cas de grandes échelles, l'effet net de la turbulence est de stabiliser des parties de fluide qui seraient gravitationnellement instables si le seul support thermique avait été pris en compte.

La condition de stabilité pour une particule fluide de masse M et de taille R ayant une vitesse de dispersion interne σ découle simplement de la condition viriel mettant en relation l'énergie cinétique E et l'énergie gravitationnelle. En effectuant une analyse dimensionnelle on arrive à la relation $M \sim R \sigma^2 / G$. En considérant que la dispersion de vitesse est dominée par les mouvements thermiques et en supposant qu'on est proche de l'équilibre isotherme, σ ne dépend pas de R et on obtient $M_{th} \propto R$.

A contrario dans la limite où la dispersion de vitesse est dominée par la turbulence on arrive à la condition $M_{turb} \propto R^{(n-2)}$ où n est l'indice du spectre de puissance de l'énergie. Pour $n = 3$, on retrouve le cas. Pour $n > 3$, on note que la masse M dépend plus fortement de R comparé au cas thermique pur. Une relation complète est obtenue par Hennebelle et Chabrier (2008) et illustre qu'une région liée stable peut produire des étoiles de plus grandes masses pour une taille donnée de fluctuations grâce au support non thermique (en somme des coeurs prestellaires massifs) qui se seraient sans cela fragmentés en plusieurs objets de petites masses. Cette action du support non thermique sur la relation masse taille des coeurs a été confirmée par des simulations numériques récentes (Schmidt et al. 2010 figure 7).

Une équation détermine la probabilité d'avoir une structure liée de masse M qui définit la distribution de masse (CMF/IMF). Pour un support uniquement thermique, on obtient une loi de puissance pour l'IMF substantiellement plus importante que la valeur de Salpeter.

Dans les deux cas limites correspondant à la turbulence incompressible, (turbulence dite de Kolmogorov) et à la turbulence sans pression (turbulence dite de Burger), le support turbulent conduit à des valeurs très proches de l'indice de Salpeter (Chabrier et Hennebelle 2011)

Des comparaisons avec l'IMF de Chabrier (2003) ont été effectuées pour une série de paramètres du nuage (densité, taille, dispersion de vitesse...) et un bon accord a été trouvé (Hennebelle et Chabrier 2009) pour les nuages 3 à 5 fois plus denses que la densité moyenne donnée par Larson (1981). Des comparaisons avec plusieurs simulations numériques ont été effectuées. En particulier, Schmidt et al. (2010) effectuant des simulations supersoniques isothermes avec des différents forçages, ont calculé le spectre de masse des coeurs supportés soit par support thermique seul, soit par support turbulent plus thermique. Leurs simulations numériques montrent un très bon accord quantitatif avec cette théorie, confirmant qu'un support turbulent est sans doute nécessaire pour obtenir l'indice de Salpeter. Notons que Schmidt et al. (2010) utilisent comme PDF de densité, celle qu'ils mesurent dans leurs simulations, qui est pratiquement log-normale mais pas tout à fait. Des comparaisons avec des résultats de simulation SPH (Jappsen et al. 2005), incluant l'auto-gravité et une équation d'état non isotherme ont également montré un bon accord (Hennebelle et Chabrier 2009).

3.2.3 Les difficultés des théories gravo-turbulentes

Une question naturelle concernant toute théorie de l'IMF, est de savoir comment le spectre de masse change lorsque les conditions physiques varient. En effet, les observations montrent que le pic de l'IMF reste inchangé dans des environnements différents (Bastien et al 2010). Les théories basées sur la longueur de Jeans pourraient présenter une difficulté pour expliquer l'universalité de la position du pic, puisqu'elles sont liées à la masse de Jeans qui varie avec la densité du gaz. Plusieurs propositions ont été faites pour limiter ce problème. Elmegreen et al. (2008) et Bate (2009) proposent que la température du gaz pourrait augmenter avec la densité, ce qui conduit à une masse de Jeans qui dépend faiblement de la densité, alors que Hennebelle et Chabrier (2008) proposent, pour les amas qui suivent les relations de Larson, qu'il y a compensation entre la dépendance de la masse de Jeans en la densité et la dépendance en le nombre Mach de la PDF de densité, ce qui conduit à une position du pic insensible à la taille du nuage.

Un problème lié est le fait que les étoiles massives sont souvent observées dans les régions les plus denses où la masse de Jeans est la plus faible. Ceci constitue une difficulté pour les théories basées sur la masse de Jeans bien que, comme vu ci-dessus, le résultat est bien moins sévère quand on considère le support par turbulence car les étoiles massives peuvent être formées à des densités seulement légèrement plus faibles que les densités auxquelles les étoiles de faible masse se forment. Une autre possibilité est que

les interactions dynamiques entre les jeunes protoétoiles puissent conduire à la migration d'étoiles massives au centre du puits gravitationnel.

De plus, la dépendance du temps de chute libre en la densité doit aussi modifier le lien entre CMF et IMF comme l'ont souligné Clark et al. (2007). Ceci est particulièrement vrai pour les théories qui considèrent seulement le support thermique. Quand un support turbulent est inclus, le temps de chute libre dépend seulement faiblement de la masse (McKee et Tan 2003, Hennebelle et Chabrier 2009), résolvant ainsi ce problème du temps d'effondrement. Nous supposons que ce temps représente le temps nécessaire pour que la totalité de la masse de Jeans turbulente soit accrétée. Il est certainement vrai aussi que au sein de cette masse de Jeans turbulente, des petites structures puissent se former rapidement par compression turbulente.

En général, la fragmentation qui se produit durant l'effondrement pourrait constituer un problème pour les théories qui invoquent les masses de Jeans. Bien que ce problème soit loin d'être clairement établi, on doit insister sur le fait que, alors que la présence de petites condensations auto-gravitantes, induites par turbulence lors des stades précoce de la formation des étoiles et incluses dans des plus grosses, est bien pris en compte dans la théorie de la dispersion turbulente, la fragmentation induite par la gravité c'est-à-dire par les régions denses produites pendant l'effondrement (voir section 5.2.2.) n'est pas incluse dans cette théorie. Ceci constituerait, à coup sûr, un autre problème si ce mode apparaissait comme dominant.

4. Formation des naines brunes par fragmentation du disque

Dans la section précédente, le mécanisme par lequel étoiles et naines brunes se forment, c'est-à-dire une sélection par gravité de fluctuations denses induites par la turbulence, était identique. D'autres scénarios ont été proposés dans lesquels la formation des naines brunes est différente. C'est en particulier le cas pour la fragmentation de disques massifs comme cela a été récemment montré par Whitworth et Stamatellos (2006) et par Matzner et Levin (2005). Nous allons dans cette partie présenter ce modèle.

4.1 Les bases

Nous allons présenter ici les bases de la physique du disque et en particulier les processus qui ont été utilisés par des auteurs pour mettre au point leurs théories.

4.1.1 Le support rotationnel

Supposons un nuage de masse M tournant à une vitesse Ω . Si le moment cinétique est conservé on définit un moment angulaire spécifique $J = R^2\Omega$. Le rapport

des énergies de rotation et gravitationnelle est proportionnelle à J^2 / R^2 et inversement proportionnelle à GM / R , ainsi quand le nuage va s'effondrer, le rayon R tend vers 0 et le rapport d'énergie s'accroît. Ceci montre que le support centrifuge devient dominant même si la rotation est initialement faible, comparée à la gravité. Ce comportement, bien connu et très important, est appelé la barrière centrifuge. Elle est responsable en astrophysique de la formation des disques et fait que le transport du moment angulaire est crucial. Il est, en effet, évident que si le moment angulaire était conservé (c'est à dire qu'il ne serait pas transporté dans le milieu environnant), du fait de la barrière centrifuge, les étoiles ne se formeraient probablement jamais.

4.1.2 Le rayon centrifuge et la croissance du disque

Considérons une étoile de masse M et une particule fluide de moment angulaire spécifique J . On obtient de façon simple le rayon centrifuge (r_d) quand les forces centrifuges et gravitationnelles exercées sur la particule fluide sont égales et on trouve que r_d est proportionnel au carré de J et inversement proportionnel à GM .

Cette formulation montre que la formation du disque dans un nuage s'effondrant, dépend de façon importante de la distribution du moment angulaire spécifique.

4.1.3 Les équations pour un disque fin et accrétion stationnaire

Après avoir moyenné le long de l'axe du disque, on obtient les équations de conservation de la masse et du moment angulaire (Pringle 1981). Ces équations relient la densité de colonne à travers le disque, V_r la vitesse radiale et ν la viscosité. Elles permettent notamment de déterminer le flux du moment angulaire, et le couple exercé du fait de la viscosité par des anneaux voisins.

4.1.4 Le bilan thermique

En absence de toute autre source, le chauffage est dû à la dissipation visqueuse et a été donné par Balbus et Hawley (1998), Hartmann (2009). A l'équilibre thermique, chauffage et refroidissement s'équilibrivent. Ainsi les disques qui se refroidissent rapidement doivent avoir une grande viscosité pour produire suffisamment de chaleur afin de compenser les pertes radiatives.

4.1.5 Le critère de Toomre

La stabilité d'un disque centrifuge est fonction du critère de Toomre, lui-même fonction de la fréquence épi-cyclique et de la densité de colonne à travers le disque (Toomre 1964). La dérivation complète de cette relation a été donnée par Binney et Tremaine en

1987 et dépasse le cadre de ce manuscrit où nous suivons plutôt une approche plus simple et plus phénoménologique.

Considérons une particule fluide de taille dR et de masse dM , on peut facilement déterminer l'énergie thermique, gravitationnelle et rotationnelle (dE) de cette particule fluide. De ce calcul, il apparaît que, aux petites échelles, quand dR est inférieur ou égal à une valeur R_{th} , le disque est stabilisé par le support thermique, alors que aux grandes échelles, quand dR est supérieur ou égal à R_{rot} , il est stabilisé par l'effet de la rotation. De sorte que seules les échelles intermédiaires entre R_{th} et R_{rot} sont possiblement instables.

La condition pour que le disque soit stable est que R_{th} soit supérieur à R_{rot} . En effet, dans ce cas toutes les échelles sont stabilisées soit par le support thermique soit par le support rotationnel. Ceci conduit finalement à une valeur de Q , qui est presque, mais pas tout à fait, le fameux critère de Toomre lorsque la fréquence épicyclique remplace la rotation.

4.1.6 Les disques auto-gravitant et l'autorégulation

Jusqu'à présent, il avait été supposé qu'une viscosité effective était responsable du transport du moment angulaire sans qu'on ait essayé de mettre la viscosité en relation avec un processus physique. Lorsque le disque est auto-gravitant, l'équation de conservation du moment angulaire peut être écrite en utilisant une décomposition dite de Reynolds. En utilisant la loi de Poisson on obtient une équation qui décrit le couple gravitationnel comme un tenseur. Ces équations suggèrent alors que le tenseur gravitationnel produit une viscosité effective qui est due au champ gravitationnel lui-même mais aussi aux fluctuations non axisymétriques de la vitesse qu'il génère. Cependant, une différence importante avec une simple viscosité apparaît du fait de la nature non locale de la gravité qui pourrait, en principe, modifier fortement son comportement. Il semble cependant que le tenseur gravitationnel se comporte d'une façon qui ressemble très étroitement au tenseur visqueux local (Lodato et Rice 2004). Ceci a une implication importante car selon le critère de Toomre, lorsque le disque est froid, il est instable. Ainsi des modes spiraux non axisymétriques se développent, accroissant le tenseur gravitationnel et le chauffage s'accroît et ainsi le disque devient plus stable. Ceci suggère que des disques auto-gravitants sont capables de se réguler eux-mêmes (Paczynski 1978) c'est-à-dire qu'ils tendent à maintenir leurs paramètres de Toomre autour de 1. Ceci a été observé de nombreuses fois dans des simulations numériques comme par exemple par Lodato et Rice (2004). Ces auteurs, en faisant varier les paramètres initiaux de leurs disques, trouvent que sauf près du centre ou aux bords, le paramètre Toomre reste typiquement entre 1 et 1,5.

4.1.7 La stabilité non linéaire

Dans le précédent paragraphe, il a été montré que la stabilité du disque est, en fin de compte, lié à sa capacité à se refroidir. Ceci a été étudié en détail par Gammie (2001) qui

a effectué une série de simulations numériques de disques dans lesquelles il a fait varier le temps de refroidissement. Bien sûr, comme montré par les équations précédentes, un temps de refroidissement court implique une viscosité effective importante et de ce fait un tenseur gravitationnel important. Comme ce dernier est la conséquence de perturbations non axi-symétriques, on peut comprendre intuitivement que des grandes valeurs de la viscosité effective tendent à être associées avec des disques très perturbés et donc très instables. Gammie (2001) montre que la valeur critique pour le temps de refroidissement (t_{cool}) est d'environ $3\Omega^{-1}$. Avec cette valeur, le disque se fragmente alors qu'il reste stable au-dessus. On peut noter toutefois que la valeur exacte du coefficient t_{cool} reste controversée (Meru et Bate 2011).

4.2 La formation d'une naine brune par fragmentation du disque

4.2.1 Le scénario de base

La formation des naines brunes par fragmentation du disque a été récemment étudiée par Matzner et Levin (2005) ainsi que Whitworth et Stamatellos (2006), en utilisant des arguments similaires bien que non identiques. Ci-dessous, nous présentons les arguments de Matzner et Levin (2005) et notons les différences avec ceux utilisés par Whitworth et Stamatellos (2006).

Matzner et Levin considèrent un disque qui, du fait de l'autorégulation a un paramètre de Toomre égal environ à 1. Il subit une accrétion à un taux constant égal au taux d'accrétion à l'intérieur du cœur parent (Shu 1977). Faisant l'hypothèse d'un état stationnaire, ce taux d'accrétion sera égal au taux de transport visqueux. Supposant également que le disque est marginalement critique, c'est-à-dire que le critère de Gammie (2001) est satisfait, ils estiment alors le paramètre de viscosité. De sorte que le taux de chauffage dû à la dissipation visqueuse dans le disque est ainsi connu. Le taux de refroidissement par face est supposé être donné par la radiation classique du corps noir. L'équilibre thermique conduit à l'égalité entre le taux de chauffage et le taux de refroidissement.

Avec la condition de stabilité, $Q > 1$, l'expression du flux de masse et le bilan thermique conduisent à une estimation de la valeur critique de la fréquence de rotation au-dessus de laquelle le disque est stable.

Pour un disque Keplerien on obtient une équation qui combinée avec les équations précédentes, montre que la fragmentation se produit dans des disques mécaniquement chauffés, pour des rayons plus larges que environ 60 AU. Ceci constitue une explication pour le désert des naines brunes (McCarty et Zuckerman 2004), c'est-à-dire la rareté marquée de compagnons naines brunes proches autour des étoiles. Dans ces conditions, la température typique à l'intérieur du disque est d'environ 15 K alors que la masse typique du fragment est proche d'une masse de Jupiter.

Whitworth et Stamatellos (2006) arrivent à des conclusions similaires en utilisant des arguments voisins bien que légèrement différents. Tout d'abord ils supposent que le disque n'est pas chauffé mécaniquement mais plutôt chauffé par la radiation de l'étoile. Ensuite, au lieu d'utiliser le critère de Gammie, ils suivent de façon plus proche la dérivation présentée dans la section 2.1.3, ce qui leur permet d'écrire que le chauffage mécanique pendant la contraction doit être compensé par le refroidissement. Ils estiment un rayon pour que la fragmentation se produise, légèrement plus grand et ils proposent aussi que le désert des naines brunes puisse naturellement être expliqué, dans ce contexte, de la façon suivante (figure 6 Stamatellos et Whitworth 2009) : les fragments qui se forment dans le disque (aux alentours de 70 à 100 AU) migrent dans la région interne du disque et augmentent de taille rapidement pour devenir des étoiles de faible masse (ils commencent de 1 à 3 masse de Jupiter et grossissent jusqu'à 0,2-0,3 masse solaire) alors que les fragments qui se forment un peu plus à l'extérieur tendent à migrer également vers l'intérieur du disque mais subissent alors des interactions avec les fragments de masses importantes (et avec le centre de l'étoile) qui s'y trouvent déjà. Ils sont alors repoussés en arrière vers des régions externes du disque et de ce fait la région proche du centre de l'étoile devient dénuée de naines brunes.

4.2.2 Le rôle de l'irradiation

Le chauffage dû à l'étoile centrale est, de la même façon, important, bien que encore controversé. Une estimation de la température est donnée de façon assez simple lors de l'équilibre radiatif. Cette estimation montre que la température est typiquement plus grande que lorsque le disque est chauffé par dissipation mécanique seulement pour des rayons de l'ordre de 100 AU. Ainsi, le rayon du désert de naines brunes estimé par Whitworth et Stamatellos (2006) est légèrement plus grand et aux environs de 150 AU.

Cependant, la luminosité n'est pas seulement due à la luminosité de l'étoile mais également à la luminosité d'accrétion. Pour une étoile de masse solaire accrétant à un taux de environ 10^{-5} masses solaires par an, la luminosité d'accrétion est beaucoup plus grande que la luminosité de l'étoile. En conséquence, comme cela a été noté par Matzner et Levin (2005), et confirmé par de nombreuses simulations numériques réalisées par Bate (2009) et Offner et al. (2009), la radiation réduit substantiellement la fragmentation des disques auto-gravitants. Matzner et Levin (2005) concluent même qu'elle pourrait supprimer entièrement la formation de naines brunes par fragmentation du disque.

A ce stade, une autre complication doit être prise en compte. L'accrétion n'est pas continue mais pourrait se produire de manière intermittente comme cela a été évoqué par Vorobyov et Basu (2006). Pour eux, ceci est dû à la dynamique non linéaire des disques, qui conduit à la formation de petites masses denses à l'intérieur même des disques qui accroissent très fortement l'accrétion quand ils tombent vers le centre de l'objet. Si cela est bien le cas, ça implique que le chauffage dû à la luminosité d'accrétion doit également être intermittent laissant la possibilité que la fragmentation puisse se produire entre deux épisodes d'accrétion. Des simulations

récentes ont été faites par Stamatellos et al. (2011b). Ils concluent évidemment que, alors que la fragmentation du disque ne se produit pas lorsque l'accrétion est supposée être constante, elle se produit bien entre des épisodes d'accrétion quand elle est irrégulière.

Pour conclure il semble bien que la possibilité que des naines brunes soient formées par la fragmentation du disque soit liée à la façon dont se produit l'accrétion à l'intérieur du disque et reste ainsi largement débattue.

4.2.3 Le rôle du champ magnétique

Jusqu'à présent, l'impact du champ magnétique n'a pas été pris en considération alors que de nombreuses études montrent qu'il pourrait avoir un impact crucial sur la formation du disque et sur son évolution. Dans ce paragraphe nous allons simplement résumer les idées les plus importantes dans ce domaine sans aller dans le détail.

- Le freinage magnétique

Il est dû à la génération d'ondes tortionnelles d'Alfvén qui se propagent le long du champ magnétique et qui transfèrent le moment angulaire depuis le nuage jusqu'au milieu inter-nuage (Mouschovias et Paleologou 1979, Shu et al. 1987). Le champ magnétique est capable de freiner efficacement les nuages interstellaires. Pour estimer l'échelle de temps nécessaire pour que ce processus se produise, considérons un milieu inter-nuage de densité ρ et supposons que le champ magnétique est parallèle à l'axe de rotation. Les ondes se propagent à la vitesse d'Alfvén V_a , le long d'un cylindre parallèle au champ magnétique. Un freinage significatif se produit lorsque les ondes ont transmis au milieu inter-nuage une fraction substantielle du moment cinétique du nuage. C'est le cas, quand les ondes atteignent une distance suffisante L du nuage. C'est-à-dire que les ondes ont été capables de transférer un moment angulaire à une masse de milieu inter-nuage comparable à la masse du nuage. On obtient alors une estimation du temps de freinage magnétique dans le cas où le champ magnétique et l'axe de rotation sont alignés.

- La catastrophe du freinage magnétique

Grâce aux progrès des ordinateurs et des schémas numériques on a pu calculer, récemment, numériquement l'effondrement de coeurs magnétisés. L'une des conclusions partagée par plusieurs auteurs (Allen et al. 2003, Price et Bate, 2007, Mellon et Li, 2008, Hennebelle et Fromang, 2008) est que le champ magnétique a un impact très important sur la formation du disque. En effet, ces auteurs concluent que même pour des champs relativement faibles, la formation de disques massifs importants qui se forment dans le cas hydrodynamique, peut être supprimée au moins dans la phase précoce de l'effondrement bien que Hennebelle et Ciardi (2009) trouvent que le problème est moins important lorsque le champ magnétique est incliné par rapport à l'axe de rotation. Ceci est dû au

fait que le champ magnétique est fortement amplifié durant l'effondrement et transmet très efficacement le moment cinétique (Galli et al. 2006). Ce comportement persiste en MHD non idéale (Mellon et Li, 2009 pour la diffusion ambipolaire), bien que des disques de faible taille puissent se former à une échelle de quelques dizaines d'unités astronomiques du fait de la dissipation ohmique à haute densité (Dapp et Basu 2011, Machida et al. 2011). Ces modèles ont reçu quelques confirmations à partir de la comparaison entre des observations à haute résolution et des observations synthétiques réalisées en utilisant des modèles variés (Maury et al. 2010). Les données observées sont plus en accord avec les modèles magnétisés que avec des modèles purement hydrodynamiques. La différence primordiale provient de la présence d'un disque massif important dans le dernier cas. Une vision alternative a été proposée par Stamatellos et al. (2011a) qui avancent que les disques massifs ne vivent pas très longtemps car ils se fragmentent rapidement et ainsi la chance de les voir est faible.

- La stabilisation du disque par des lignes de champ magnétique en rotation

Quand le champ magnétique est suffisamment faible, le freinage magnétique n'est pas assez fort pour transporter efficacement le moment cinétique et inhiber la formation des disques. Cependant, il a été trouvé que la fragmentation est fortement diminuée sinon supprimée (Hennebelle et Tessier 2008, Machida et al. 2008, 2009). Ceci est dû à la torsion des lignes de champ magnétique par le profil képlérien de la vitesse qui rapidement induit la croissance d'une composante toroïdale. Cette dernière tend à stabiliser le disque puisqu'elle opère comme une pression effective qui s'ajoute à la pression thermique. Notons que, à ce stade, l'impact de MHD non-idéale n'a pas été étudié. Cette conclusion peut évidemment changer, si le champ n'est pas suffisamment couplé au gaz dans le disque.

La tendance générale est ainsi que le champ magnétique tend à empêcher la formation de naines brunes par fragmentation du disque car il tend à supprimer la formation de disques massifs durant la phase de classe 0 et si par hasard ils se forment, le champ magnétique tend à les stabiliser. La réponse finale dépendra de la distribution de l'intensité magnétique au sein des coeurs et également du couplage avec le champ magnétique.

5. Statistiques des simulations numériques à grande échelle

Les approches développées dans les sections précédentes tendent à identifier une situation particulière responsable de la formation d'étoiles de faible masse et de naines brunes. Plus spécifiquement, la théorie gravo-turbulente met en évidence le rôle des fluctuations turbulentes de densité alors que la théorie de fragmentation du disque met plutôt en évidence le rôle des instabilités du disque. En réalité les deux processus doivent être considérés simultanément et traités comme un conti-

num. Des simulations numériques à grande échelle ont été réalisées dans ce domaine en utilisant soit la technique Lagrangienne (dite SPH) soit des techniques de raffinement adaptatif de maillage. Cette approche, qui évite plusieurs des hypothèses faites dans la section précédente, a l'avantage de produire des statistiques directes qui peuvent être comparées avec les résultats des observations. Compte tenu de leurs complexités, il n'est cependant pas toujours aisés de contrôler la fiabilité de ces prédictions (convergence et sensibilité numérique au processus physique) et d'interpréter les mécanismes physiques à l'œuvre.

5.1 Modélisation numérique et physique

Une modélisation typique utilisée dans ce type de calcul consiste en un nuage d'une centaine de masses solaires (Bate et al. 2003). La forme en est le plus souvent sphérique et le profil de densité varie depuis une densité uniforme jusqu'à une dépendance en le carré du rayon (Girichidis et al. 2011). Le problème est largement déterminé par les valeurs des énergies thermiques et turbulentes qui sont typiquement de quelques pourcents (ou même moins) pour les premières à quelques dizaines de pourcents pour les secondes. Un champ de vitesse turbulent qui a un spectre de puissance proche de celui de Kolmogorov et des phases aléatoires est utilisé comme condition initiale. Finalement des particules puits qui décrivent la formation des étoiles sont habituellement utilisées. De telles entités Lagrangiennes (Federrath et al. 2010b) peuvent accréter le gaz environnant et interagir avec lui par gravité. Pour décrire l'opacité de la poussière, on utilise habituellement une équation barométrique d'état qui conduit, par exemple, à une température proportionnelle à une certaine puissance de la densité avec un exposant typique $2/3 = 5/3 - 1$, valable jusqu'à ce que le niveau de rotation interne de la molécule H_2 ne soit pas excitée après quoi il devient typiquement égal à $2/5 = 7/5 - 1$. Comme décrit ci-dessous, des calculs incluant le transfert radiatif et le chauffage par les étoiles ont aussi été réalisés bien qu'ils nécessitent une importante puissance de calcul. Les statistiques obtenues à ce jour sont seulement préliminaires. Il en est de même pour le champ magnétique : pour la simulation d'un amas massif magnétisé, Price et Bates 2009, Hennebelle et al. 2011, Seifreid et al. 2011, Commerçon et al. 2011, ont tenté de démontrer des tendances plutôt que d'obtenir des statistiques. La conclusion générale s'accorde avec les tendances qui proviennent du calcul de l'effondrement du cœur présenté ci-dessus, le champ magnétique a tendance à réduire la fragmentation de ces nuages massifs.

5.2 Deux nouveaux mécanismes de formation des naines brunes

A partir des résultats de simulations numériques à grande échelle, deux nouveaux mécanismes pour la formation des naines brunes ont été proposés. Le premier est la formation des naines brunes par éjection et le second est la formation à l'intérieur de filaments denses induits par la gravité au cours de l'effondrement. Les deux mécanismes sont une conséquence de la forte augmentation de la densité induite par la gravité.

5.2.1 Formation des naines brunes par éjection

Dans les amas massifs et turbulents en effondrement gravitationnel, les disques centrifuges se forment. Ces disques se fragmentent rapidement comme cela a été décrit ci-dessus (au moins lorsque le transfert radiatif et le champs magnétique sont ignorés). Comme habituellement un petit amas d'objets se forme, ils subissent des interactions à N-corps et les objets les moins massifs peuvent aisément être éjectés du nuage parent lorsque la vitesse qu'ils acquièrent lors d'une interaction gravitationnelle est suffisamment grande. Lorsqu'ils quittent le nuage, ils ne sont plus entourés de gaz qu'ils pourraient accréter, ainsi leur masse ne s'accroît pas au cours du temps comme c'est le cas pour un objet enfoui. Ce mécanisme initialement proposé par Watkins et al. (1998), et Reipurth et Clarke (2001), a été observé et quantifié dans des simulations à grande échelle (Bate et al. 2012, Bate 2012).

5.2.2 Formation des naines brunes dans les filaments denses

La physique de ce mécanisme est simplement celui de l'effondrement des amas, les filaments denses se forment grâce à une combinaison de chocs et d'effondrements gravitationnels locaux (la gravité en particulier amplifie les anisotropies tendant ainsi à former plus de filaments). Dans ces structures denses, la densité est plus grande et la masse de Jeans est plus faible, de telle sorte que des objets plus petits, dont les naines brunes, peuvent se former. La différence principale avec le mécanisme gravo-turbulent décrit précédemment est que la PDF de densité au lieu d'avoir été créée par une compression par turbulence, est due à une contraction gravitationnelle. Ce mécanisme a été étudié en détail par Bonnell et al. (2008). Ils montrent par exemple qu'il y a une corrélation entre la masse de Jeans initiale et la masse finale des étoiles, suggérant ainsi que ce mécanisme est réellement à l'œuvre.

Bate et al. (2002) estiment que dans leurs calculs barotropiques, le premier mécanisme est dominant par rapport au second d'un facteur de l'ordre d'environ 3. Cependant, comme la fragmentation du disque est bien plus affectée par le chauffage de l'étoile centrale et par le champ magnétique il n'est pas clairement établi que cette conclusion soit réellement solide.

5.3 L'impact du transfert radiatif

Avant de discuter des résultats quantitatifs obtenus dans les simulations numériques à grande échelle, il est bon de discuter à nouveau qualitativement de l'influence du feedback radiatif. En effet, on a trouvé qu'il jouait un rôle important dans la réduction de la fragmentation (Krumholz et al. 2007, Bate 2009 et Commerçon et al. 2011). En général, la raison est similaire à ce qui a été discuté dans la section 4.2.2, le gaz est chauffé du fait d'une intense luminosité liée à l'accrétion et de ce fait, la température est plus élevée que ce qui est obtenu habituellement en utilisant une équation d'état barotropique. Bien que aucune estimation analytique de l'efficacité de la réduction de la fragmentation n'ait été dérivé, cet effet est considéré comme étant substantiel dans

les études mentionnées ci-dessus. Par exemple, Bate (2009) conclut que le nombre de naines brunes pourrait être inférieur d'un facteur environ trois dans ses calculs radiatifs.

Une autre conséquence possible, bien que non encore établie, est que l'universalité du pic de l'IMF puisse être due au chauffage par les étoiles elles-mêmes. Ceci est basé sur un argument proposé par Bate (2009). Tout d'abord il suppose le régime optiquement épais et relie ainsi la température à la luminosité d'accrétion puis il suppose que le support thermique est comparable à l'énergie gravitationnelle pour une masse M . Il montre alors que, la masse de Jeans, M_J , ne dépend plus de la densité comme $M_J \propto \rho^{1/2}$ (ce qui est le cas dans un état isotherme), mais qu'on obtient plutôt $M_J \propto \rho^{-1/5}$, ce qui est une dépendance moins forte et qui pourrait donc conduire à une IMF moins dépendante des paramètres du nuage. Bien que cela constitue une idée intéressante, divers aspects de ce schéma demandent à être précisés. Par exemple la première génération d'étoiles qui se forment dans un nuage moléculaire n'est pas affectée par le chauffage et de ce fait doit présenter des caractéristiques différentes à moins que l'effet commence à opérer alors que les étoiles sont encore en formation (par exemple en modifiant la masse de Jeans qui serait autrement accrétée par l'étoile centrale). Une autre question est de connaître la fraction de gaz dans le nuage moléculaire qui est affectée par ce chauffage. Comme cet effet dépend fortement de la distance aux étoiles, les particules fluides qui sont trop loin des étoiles ne sont pas chauffées de façon significative.

5.4 L'IMF et sa sensibilité aux conditions initiales

Plusieurs simulations effectuées avec la technique SPH (Jappsen et al. 2005, Smith et al. 2008, Bate 2009, 2012) ou avec la technique AMR et des particules puits (Girichidis et al. 2011) tendent à produire des distributions qui présentent des similarités avec l'IMF observée, c'est-à-dire qu'elles présentent une loi de puissance aux grandes masses, qui a un indice compatible avec la valeur Salpeter et un pic à des masses plus faibles. Alors que l'indice de la partie des grandes masses semble robuste (bien que les distributions ne soient pas toujours clairement une loi de puissance), la position du pic varie, comme attendu, avec les conditions initiales (par exemple Bate et Bonnell 2005 montrent qu'il dépend de l'énergie thermique) et l'équation d'état (Jappsen et al. 2005). Par ailleurs, la dépendance aux profils initiaux de densité trouvée par Girichidis et al. (2011) est drastique. Par exemple, lorsqu'ils commencent la simulation avec un profil de densité uniforme ils obtiennent la formation de plusieurs objets qui ressemble à l'IMF (bien qu'ayant un pic à des masses trop faibles par rapport à l'IMF). Ils montrent dans le cas d'un profil en r^{-2} , qu'on ne trouve qu'un seul objet. En général dans ces simulations la position du pic de masse est décalée vers les petites masses par rapport au pic observé de l'IMF (qui est typiquement égale à 0,3 masses solaires). Par exemple Bate et al. (2003) concluent qu'il se forme trop de naines brunes (environ un facteur trois) dans ces simulations.

De façon intéressante, Bate (2012) inclut le transfert radiatif comme décrit dans le paragraphe 5.3 et trouve que la fragmentation est significativement réduite par rapport

à ses simulations antérieures (Bate et al. 2003) et obtient une distribution de masse très similaire à l'IMF. On note qu'à ce stade, ce résultat est obtenu pour un amas particulier ayant une densité initiale et une turbulence spécifique. L'une des questions restantes est ainsi de savoir ce qui détermine les paramètres du nuage initial (la densité moyenne, la masse et le nombre de Mach) qui vont tous influencer la distribution de masse des étoiles. Néanmoins Bate (2009), propose que lorsque la radiation est incluse (feedback radiatif), la distribution de masse dépendrait faiblement, au moins de la densité initiale, bien que ceci devrait être clairement démontré en faisant des simulations à haute résolution dans des conditions initiales différentes. Une autre incertitude est l'influence du champ magnétique qui n'est pas traité dans ce travail. En particulier, comme montré par Commerçon et al. (2010 et 2011), le freinage magnétique a une influence drastique sur la rétroaction radiative en transportant le moment angulaire, conduisant à des taux d'accrétion locaux très forts. Notons pour finir que ces simulations numériques nécessitent une résolution numérique élevée et restent difficiles à réaliser.

5.5 L'origine physique de l'IMF dans les simulations numériques

Le mécanisme à l'origine de l'IMF dans les simulations numériques mentionnées ci-dessus n'est pas facile à identifier et reste un sujet de débat.

Bate (2012) prétend que ceci est dû à l'accrétion compétitive. Son argument principal est que les étoiles les plus massives à la fin de la simulation sont celles qui ont subi l'accrétion le plus longtemps. De plus, souvent l'accrétion se termine après que les étoiles ont entrepris une interaction dynamique et sont ainsi éjectées des parties les plus denses du nuage parental. On peut souligner que la première partie de cet argument est également compatible avec les étoiles massives ayant un réservoir d'accrétion disponible plus grand comme cela a été suggéré par Hennebelle et Chabrier (2008). Il en est ainsi car des coeurs plus gros nécessitent plus de temps pour s'effondrer. Un test important pour distinguer entre les différents scénarios serait de quantifier la distribution spatiale du gaz accrétié au cours de l'effondrement.

De plus, les simulations SPH produites par Smith et al. (2008) montrent une corrélation claire entre les masses initiales (Bonnell et al. 2008) dans le puits gravitationnel et les masses finales accrétées jusqu'à un temps de chute libre locale (voir Chabrier et Hennebelle 2010 pour une analyse quantitative), suggérant que les coeurs pré-stellaires initiaux ne se fragmentent pas en de nombreux objets. Au fur et à mesure, la corrélation devient plus faible mais semble néanmoins persister jusqu'à la fin de la simulation. Les étoiles massives d'un autre côté sont faiblement corrélées avec la masse du puits de potentiel dans lequel elles se forment. Cependant, la question de savoir si la masse était contenue dans un puits plus large et plus massif avec lequel la masse finale serait bien corrélée reste une question ouverte qui nécessiterait des analyses plus poussées.

Finalement, nous réitérons que le champ magnétique (Machida et al. 2005, Hennebelle et Teyssier 2008, Price et Bate 2009, Peters et al. 2010, Hennebelle et al. 2010) et peut-être plus la combinaison entre le champ magnétique et le feedback radiatif (Commerçon

et al. 2011) semblent réduire la fragmentation suggérant que la corrélation entre la masse des trous de potentiel et la masse des pré-étoiles trouvée par Smith et al. (2008) serait augmentée si un tel processus était inclus. Clairement ces questions nécessitent plus d'analyse.

6. Conclusion

Nous avons passé en revue les théories les plus récentes qui ont été proposées pour expliquer l'origine de la formation des étoiles de faible masse et des naines brunes. Tout d'abord nous avons décrit les processus physiques en jeu dans la formation des étoiles ainsi que les résultats les plus fondamentaux. Puis nous avons présenté les théories qui tentent d'expliquer l'origine de l'IMF. Deux grandes catégories ont fait l'objet d'une attention particulière : les théories basées sur l'accrétion et celles basées explicitement sur la turbulence. Il doit être noté que ces théories ne sont pas nécessairement exclusives l'une de l'autre et pourraient s'appliquer à une échelle de masse différente. Par exemple la théorie de la dispersion turbulente calcule la distribution des réservoirs d'accrétion de masse initiale. Ceci n'est pas incompatible avec les théories de l'accrétion arrêtée ou celles de l'accrétion compétitive aussi longtemps que le rapport redistribution / compétition se produit au sein d'un même réservoir de masse. La question de savoir si l'un de ces mécanismes est dominant étant toujours ouverte. Des comparaisons détaillées entre des séries de simulations systématisques, comme cela a été fait par Schmidt et al. (2010) ou des observations, et les prédictions analytiques variées sont clairement nécessaires pour faire des progrès. Nous avons également décrit la théorie de la formation des naines brunes basée sur une fragmentation d'un disque massif. Bien que, en principe, ceci conduise à la formation de au moins une fraction de naines brunes, de grandes inconnues demeurent concernant le rôle du champ magnétique et de la radiation qui peuvent réduire de façon drastique l'importance de ce mécanisme. Finalement nous avons décrit les simulations numériques de grande taille qui ont été entreprises pour étudier l'effondrement et la fragmentation d'un cœur massif. L'introduction de du champ magnétique et du feedback radiatif a constitué une amélioration significative ces dernières années, ce qui, de façon non surprenante, a révélé que les deux phénomènes ont un impact majeur sur le processus de formation des étoiles. Un défi important pour les dix prochaines années est certainement de réaliser des simulations à grande échelle qui puissent inclure tous les paramètres, dont la MHD non idéale, avec une résolution suffisante.

Remerciements

C'est un plaisir de remercier Corinne Charbonnel, Cecil Reylé et Mathias Schultheis pour l'organisation d'une école très intéressante. Je remercie aussi pour les discussions éclairantes Dimitri Stamatello, Farzana Meru, Christopher Matzner et Sébastien Fromang. Je remercie Benoît Commerçon et Andrea Ciardi pour la relecture critique du manuscrit. Je remercie vivement Pierre Nabet pour la traduction vers le français de l'article original.

Références

- Adams, F., & Fatuzzo, M. 1996, *ApJ*, 464, 256
- Allen, A., Li, Z.-Y., Shu, F., 2003, *ApJ*, 599, 363
- André, Ph., Belloche, A., Motte, F. & Peretto, N., 2007, *A&A*, 472, 519
- André, Ph., Basu, S. & Inutsuka, S.-I., 2009, in *Structure Formation in Astrophysics*, G. Chabrier Ed., Cambridge University Press
- André, P., Menshchikov, A., Bontemps, S. et al. *A&A*, 2010, 518L, 102
- Balbus, S., Hawley, J., 1998, *Rev. Mod. Phys.*, 70, 1
- Bastian, N., Covey, K., Meyer, M., 2010, *ARA&A*, 48, 339
- Basu, S., Ciolek, G. 2004, *ApJ*, 607, L39
- Basu, S., Jones, C., 2004, *MNRAS*, 347, L47
- Basu, S., Mouschovias, T. 1995, *ApJ*, 452, 386
- Bate, M., Bonnell, I., Bromm, V., 2002, *MNRAS*, 332L, 65
- Bate, M., Bonnell, I., Bromm, V., 2003, *MNRAS*, 339, 577
- Bate, M., 2009, *MNRAS*, 392, 1363
- Bate, M., 2012, *MNRAS*, 419, 3115
- Bate, M., Bonnell, I., 2005, *MNRAS*, 356, 1201
- Binney, J., Tremaine, S., 1987, *Galactic Dynamics*, gady.book
- Bonnell I., Bate M., Clarke C., Pringle J., 2001, *MNRAS* 323, 785
- Bonnell I., Clark, P., Bate M., 2008, *MNRAS* 389, 1556
- Bonnor, W. 1956, *MNRAS*, 116, 351
- Chabrier, G., 2003, *PASP*, 115, 763
- Chabrier, G., Hennebelle, P., 2010, *ApJL*, 725L, 79
- Chabrier, G., Hennebelle, P., 2011, *A&A*, 534, 106
- Clark, P., Klessen, R., Bonnell, I., 2007, *MNRAS* 379, 57
- Commerçon, B., Hennebelle, P., Audit, E., Chabrier, G., Teyssier, R., 2010, *A&A*, 510L, 3
- Commerçon, B., Hennebelle, P., Henning, T., 2011, *ApJ*, 742L, 9
- Dapp, W., Basu, S., 2011, *A&A*, 521L, 56
- Duffin, D., Pudritz, R., 2009, *ApJ*, 706L, 46 Duquennoy, A., Mayor, M., 1991, *A&A*, 248, 485
- Dutrey, A., Duvert, G., Castets, A., Langer, W., Bally, J., Wilson, R., 1991, *A&A*, 247L, 9
- Elmegreen B.G., 1997, *ApJ* 486, 944
- Elmegreen, B., Klessen, R., Wilson, C., 2008, *ApJ*, 681, 365

- Federrath, C., Roman-Duval, J., Klessen, R., Schmidt, W., Mac Low, M.-M., 2010a, *A&A*, 512, 81
- Federrath, C., Banerjee, R., Clark, P., Klessen, R., 2010b, *ApJ*, 713, 269 Fiege, J., Pudritz, R. 2000, *MNRAS*, 311, 105
- Foster, J., Chevalier, R. 1993, *ApJ*, 416, 303
- Galli, D., Lizano, S., Shu, F., Allen, A., 2006, *ApJ*, 647, 374
- Gammie, C., 2001, *ApJ*, 553, 174
- Girichidis, P., Federrath, C., Banerjee, R., Klessen, R., 2011, *MNRAS*, 413, 2741
- Goldbaum, N., Krumholz, M., Matzner, C., McKee, C., 2011, *ApJ*, 738, 101
- Haisch, K., Lada, E., Lada, C., 2001, *ApJ*, 553L, 153
- Hartmann, L., 2009, apsf.book
- Heiderman, A., Evans, N., Allen, L., Huard, T., Heyer, M., 2010, *ApJ*, 723, 1019
- Heithausen, A., Bensch, F., Stutzki, J., Falgarone, F., Panis, J.-F., 1998, *A&A*, 331, L65
- Hennebelle, P., Whitworth, A., Gladwin, P., André, Ph. 2003, *MNRAS*, 340, 870
- Hennebelle, P., Fromang, S., 2008, *A&A*, 477, 9
- Hennebelle, P., Teyssier, R., 2008, *A&A*, 477, 25
- Hennebelle, P., Ciardi, A., 2009, *A&A*, 506L, 29
- Hennebelle, P., Banerjee, R., Vazquez-Semadeni, E., Klessen, R. & Audit, E., 2008, *A&A*, 446, 43
- Hennebelle, P., Chabrier, G., 2008, *ApJ*, 684, 395
- Hennebelle, P., Chabrier, G., 2009, *ApJ*, 702, 1428
- Hennebelle, P., Chabrier, G., 2011, *ApJ*, 743L, 29
- Hennebelle, P., Commerçon, B., Joos, M., et al. 2011, *A&A*, 528, 72 Hopkins, P., 2012, arXiv1201.4387
- Hennebelle, P., 2012, Low-Mass Stars and the Transition Stars/Brown Dwarfs - EES2011, Edited by C. Reylé, C. Charbonnel and M. Schultheis. EAS Publications Series, vol. 57, 2012, pp. 91-127
- Hoyle, F. 1953, *ApJ*, 118, 513
- Jappsen, A., Klessen, R., Larson, R., Li, Y., Mac Low, M.-M., 2005, *A&A*, 435, 611 Jeans, J. 1905, *ApJ*, 22, 93
- Klessen, R., Hennebelle, P., 2010, *A&A*, 520, 17
- Klessen, R., Heitsch, F., Mac Low, M.-M. 2000, *ApJ*, 535, 887
- Kritsuk, A. G., Norman, M. L., Padoan, P., & Wagner, R. 2007, *ApJ*, 665, 416
- Kroupa, P., 2002, *Sci.* 295, 82
- Krumholz, M., McKee, C., 2005, *ApJ*, 630, 250

- Krumholz, M., Klein, R., McKee, C., 2007, *ApJ*, 656, 959
- Kunz, M., Mouschovias T., 2009, *MNRAS* 399L, 94
- Larson, R. 1969, *MNRAS*, 145, 405
- Larson, R., 1973, *MNRAS*, 161, 133
- Larson, R., 1981, *MNRAS*, 194, 809
- Larson, R., 1985, *MNRAS*, 214, 379
- Lequeux, J. 2005, in *The interstellar medium*, J. Lequeux (ed), EDP Sciences (Berlin: Springer)
- Li, Z.-Y., Nakamura, F., 2005, *ApJ*, 631, 411
- Lodato, G., Rice, K., 2004, *MNRAS*, 351, 630
- McCarthy, C., Zuckerman, B., 2004, *AJ*, 127, 2871
- Machida, M., Matsumoto, T., Hanawa, T., Tomisaka, K., 2005, *MNRAS*, 362, 382
- Machida, M., Tomisaka, K., Matsumoto, T., Inutsuka, S.-i , 2008, *ApJ*, 677, 327
- Machida, M., Inutsuka, S.-i, Matsumoto, T., 2011, *PASJ*, 63, 555
- McKee; C.F., Ostriker; E., 2007, *ARA&A*, 45, 565
- McKee; C.F., Tan; J.C., 2003, *ApJ* 585, 850
- MacLow, M.-M., Klessen, R., 2004, *Rev. Mod. Phys.*, 76, 125
- Masunaga, H., Inutsuka, S.-i., 2000, *ApJ*, 531, 350
- Matzner, C., 2002, *ApJ*, 566, 302
- Matzner, C., Levin, Y., 2005, *ApJ*, 628, 817
- Matzner, C., 2007, *ApJ*, 659, 1394
- Maury, A., André, P., Hennebelle, P., et al., 2010, *A&A*, 512, 40
- Mellon, R., Li, Z.-Y., 2008, *ApJ*, 681, 1356
- Mellon, R., Li, Z.-Y., 2009, *ApJ*, 698, 922
- Meru, F., Bate, M., 2011, *MNRAS*, 411L, 1
- Mihalas, D., Mihalas, B., 1984, *Foundations of radiation hydrodynamics*, oup book
- Mouschovias, T., Spitzer, L. 1976, *ApJ*, 210, 326
- Mouschovias, T., Paleologou, E. 1979, *ApJ*, 230, 204
- Mouschovias, T., Paleologou, E. 1981, *ApJ*, 246, 48
- Myers, P.C., 2009, *ApJ*, 706, 1341
- Nagai, T., Inutsuka, S.-i., Miyama, S., 1998, *ApJ*, 506, 306
- Offner, S., Klein, R., McKee, C., Krumholz, M., 2009, *ApJ*, 703, 131

- Ostriker, J., 1964, *ApJ*, 140, 1056
- Paczynski, B., 1978, *Acta Astron.*, 28, 91
- Padoan, P., Nordlund, A., Jones, B., 1997, *MNRAS*, 288, 145
- Padoan, P., Nordlund, A., 1999, *ApJ*, 526, 279
- Padoan, P., Nordlund, A., 2002, *ApJ*, 576, 870
- Padoan, P., Nordlund, A., 2011, *ApJ*, 730, 40
- Penston, M., 1969, *MNRAS*, 144, 425
- Peters, T., Banerjee, R., Klessen, R., MacLow, M.-M., Galvan-Madrid, R., Keto, E., 2010, *ApJ*, 711, 1017
- Press, W., & Schechter, P., 1974, *ApJ*, 187, 425
- Price, D., Bate, M., 2007, *MNRAS*, 377, 77
- Price, D., Bate, M., 2009, *MNRAS*, 398, 33
- Price, N., Podsiadlowski, P., 1995, *MNRAS*, 275, 1041 Pringle, J., 1981, *ARA&A*, 19, 137
- Rees, M., 1976, *MNRAS*, 176, 483
- Reipurth, B., Clarke, C., 2001, *AJ*, 122, 432
- Salpeter, E., 1955, *ApJ*, 121, 161
- Scalo J., 1986, *FCPh*, 11, 1
- Schmidt, W., Federrath, C., Hupp, M., Kern, S., Niemeyer, J., 2009, *A&A*, 494, 127
- Schmidt, W., Kern, S., Federrath, C., Klessen, R., 2010, *A&A*, 516, 25
- Seifried, D., Banerjee, R., Klessen, R., Duffin, D., Pudritz, R., 2011, *ApJ*, 417, 1054
- Semenov, D., Henning, Th., Helling, Ch., Ilgner, M., Sedlmayr, E., 2003, *A&A*, 410, 611
- Silk, J., 1995, *ApJ*, 438, L41
- Shu, F., 1977, *ApJ*, 214, 488
- Shu, F. H., Adams, F. C., Lizano, S., 1987, *ARA&A* 25, 23
- Spitzer, L., 1942, *ApJ*, 95, 329
- Smith, R., Clark, P., Bonnell, I., 2008, *MNRAS*, 391, 1091
- Stamatellos, D., Whitworth, A., 2009, *MNRAS*, 392, 413
- Stamatellos, D., Maury, A., Whitworth, A., André, P., 2011a, *MNRAS*, 413, 1787
- Stamatellos, D., Hubber, D., Whitworth, A., 2011b, *ApJ*, 730, 32
- Terebey, S., Shu, F., Cassen, P., 1984, *ApJ*, 286, 529
- Toomre, A., 1964, *ApJ*, 139, 1217
- Troland T., Heiles C., 1986, *ApJ*, 301, 339

- Vázquez-Semadeni, E., 1994, *ApJ*, 423, 681
- Vorobyov, E., Basu, S., 2006, *ApJ*, 650, 956
- Watson, A. M., Stapelfeldt, K. R., Wood, K., Menard, F. 2007, Protostars and Planets V, 523
- Watkins, S., Boffin, H., Francis, N., Whitworth, A., 1998, *MNRAS*, 300, 1214
- Whitworth, A., Bate, M., Nordlund, A., Reipurth, B., Zinnecker, H., 2007, prpl.conf 459
- Whitworth, A., Stamatellos, D., 2006, *A&A*, 458, 817
- Whitworth, A., Summers, D., 1985, *MNRAS*, 214, 1
- Zinnecker, H., 1982, in Glassgold A. E. et al., eds, Symposium on the Orion Nebula to Honour Henry Draper. New York Academy of Sciences, New York, p. 226
- Zinnecker, H., 1984, *MNRAS*, 210, 43
- Zuckerman, B., Evans, N. 1974, *ApJ*, 192, L149

3

Scénarios de formation des planètes géantes, leur évolution et leur impact sur la formation des planètes telluriques habitables

Alessandro Morbidelli

Département Lagrange, CNRS, UNSA, OCA
B.P. 4229, 06304 Nice Cedex 4

I. Introduction

La découverte d'exoplanètes géantes a mis en lumière la grande diversité des systèmes planétaires. Alors que les planètes géantes du Système solaire sont fort éloignées du Soleil et suivent des orbites quasi circulaires, celles de bon nombre d'exoplanètes géantes possèdent des demi-grands axes orbitaux réduits, comparables à ceux des planètes telluriques de notre système, voire encore plus petits. De plus, de nombreuses exoplanètes géantes ont des orbites excentriques, probablement une relique d'évolutions passées très violentes, caractérisées par des rencontres planétaires mutuels [1, 2, 3]. En outre, il apparaît de plus en plus que 30 à 50 % des étoiles de type solaire sont entourées par de multiples objets de type super-Terre ou de type Neptune de périodes orbitales inférieures à 100 jours [4], suivant souvent des orbites quasi circulaires et coplanaires avec un espacement mutuel réduit. Les masses des planètes les plus grandes que chaque disque protoplanétaire est capable de former et les modes de migrations planétaires qui en découlent sont probablement à l'origine d'une aussi grande diversité de systèmes planétaires. Si l'on ne comprend pas encore bien l'accrétion des planètes géantes [5], les modes de migration en fonction des masses des planètes et de la configuration orbitale sont désormais étudiés efficacement grâce à des simulations hydrodynamiques. C'est pourquoi un certain nombre d'idées générales surgissent quant aux possibles chemins évolutifs des systèmes de planètes géantes. Les planètes telluriques proches de la zone habitable ne sont pas encore observables, notamment autour d'étoiles de type solaire. Il est donc intéressant d'aborder sous l'angle théorique l'incidence que les différents modes d'évolution des planètes géantes peuvent avoir sur la formation et la survie des planètes telluriques, en attendant de disposer à l'avenir de données observationnelles. Tel est l'objectif prin-

cipal de ce court manuscrit. Dans la deuxième partie, je commence par passer en revue nos connaissances relatives à l'évolution des planètes géantes du Système solaire et leurs impacts sur la formation des planètes telluriques. Enfin, dans la troisième partie, j'examine les voies d'évolutions alternatives qui peuvent expliquer la diversité des systèmes de planètes géantes, puis émets quelques conjectures éclairées sur le devenir des planètes telluriques. Une synthèse et des conclusions de cette étude sont proposées en section 4.

2. Nos connaissances sur notre Système solaire

On sait que, dans notre Système solaire, les planètes géantes se sont formées bien avant la Terre. En fait, les planètes géantes ont capturé des quantités considérables d'hydrogène et d'hélium et donc, devraient avoir achevé leur formation avant la disparition des gaz dans le disque protoplanétaire. À partir d'observations de disques autour d'étoiles d'âge connu, on déduit que la disparition du gaz se produit en à peine quelques millions d'années après la formation stellaire. A contrario, les chronomètres radioactifs indiquent que la Terre a pris 30 à 100 millions d'années pour se former [7]. Cette notion suggère qu'un bon modèle de la formation des planètes telluriques doit commencer par aborder la formation et l'évolution des planètes géantes, car ces dernières ont défini l'environnement dans lequel les planètes telluriques se sont formées.

Une caractéristique marquante de notre Système solaire tient à une distinction nette entre le domaine des planètes telluriques et celui des planètes géantes. Les planètes telluriques sont proches du Soleil et les géantes en sont éloignées, avec la ceinture d'astéroïdes entre elles. La détection des exoplanètes montre, en effet, que dans nombre de systèmes, les planètes géantes se présentent à des distances, par rapport à l'étoile mère, comparables à celles de nos planètes telluriques, voire parfois sensiblement plus petites. On estime que cela s'expliquerait par une tendance qu'ont les planètes à migrer vers le centre du disque protoplanétaire, en raison des interactions gravitationnelles avec le gaz [8]. Aussi, un bon modèle de la formation du Système solaire se doit d'expliquer, avant toute chose, pourquoi nos planètes géantes n'ont pas migré plus près du Soleil.

Des travaux [9] avancent que l'accumulation de planètes géantes observée à 1 ou 2 Unités Astronomiques (UA) de l'étoile centrale résulte de la photoévaporation ouvrant une « brèche » à ~ 1 UA à l'intérieur du disque protoplanétaire. Bien que pouvant être vraisemblable, ce processus ne peut guère expliquer une planète « distante » comme Jupiter, aussi une autre explication est nécessaire pour le Système solaire.

On trouve un indice important dans les travaux précurseurs présentés en [10]. Les auteurs ont effectué la première simulation hydrodynamique de l'évolution contemporaine de Jupiter et de Saturne dans un disque gazeux. Ils se sont aperçus que, lorsque ces deux planètes sont sur des orbites présentant une séparation mutuelle importante, elles migrent toutes deux vers le Soleil, Saturne plus rapidement que Jupiter. Cependant, quand l'orbite de cette dernière approche de celle de la précédente, la migration de Jupiter

s'inverse. Les deux planètes s'approchent l'une de l'autre jusqu'à être figées dans leur résonance de mouvement mutuelle de 2:3 (3 révolutions de Jupiter autour du Soleil pendant que Saturne en fait 2). Puis elles suivent ensemble une migration externe, conservant le rapport de résonance entre leurs périodes orbitales. Les auteurs des références [11] et [12] ont étudié plus en détail ce phénomène, en se penchant sur la gamme (quelque peu restrictive) des paramètres de disque qui promeuvent une migration vers l'extérieur. De plus, il y est montré, comme les auteurs de [10] le conjecturent déjà, que ce processus de migration externe est possible uniquement si la masse de la planète externe est inférieure à celle de l'interne (des ratios de masse entre $\frac{1}{4}$ et $\frac{1}{2}$ étant « idéaux », englobant fort bien le ratio de masse réel Saturne/Jupiter de $\frac{1}{3}$). A ce jour, telle est la seule explication de l'éloignement orbital de Jupiter. Si elle est vraie, elle explique aussi pourquoi l'absence de planètes géantes dans la partie interne du Système solaire n'est pas une propriété générale des systèmes planétaires : des systèmes avec une seule planète géante, ou avec plusieurs planètes de ce type, mais avec des ratios de masse inversés (la planète externe étant la plus massive), ou présentant un écart temporel entre la formation des planètes (les empêchant de s'approcher suffisamment l'une de l'autre pour déclencher un mouvement vers l'extérieur) n'éviteraient pas la migration vers le centre du disque de planètes géantes, et pour finir, présenteraient des planètes situées à $\sim 1\text{-}2$ UA ou moins de l'étoile centrale.

De nombreuses équipes ont reproduit l'inversion de la migration de Jupiter et de Saturne à l'aide de codes hydrodynamiques indépendants [12, 13]. Vu sous l'angle de la formation des planètes telluriques, ce qu'il faut retenir de ce résultat, c'est que l'hypothèse que les planètes géantes soient restées tout le temps sur leurs orbites actuelles pendant que la Terre et ses précurseurs se formaient est tout simplement naïve.

C'est là une information importante à prendre en compte. En effet, les modèles numériques de formation des planètes telluriques, à partir d'un disque de planétismaux ou d'embryons planétaires s'étendant depuis le Soleil jusqu'à l'orbite actuelle de Jupiter et, en partant du principe que les planètes géantes ont toujours suivi des orbites fixes, ont constamment achoppé dans la reproduction d'une caractéristique du système planétaire tellurique réel : la faible masse de Mars [14, 15].

Il a été démontré de manière convaincante dans [16] que le paramètre essentiel pour former une petite Mars réside dans la distribution radiale de la matière solide contenue dans le disque. Si la limite extérieure du disque d'embryons et de planétismaux est à environ 1 UA, sans matière solide au-delà de cette distance, les simulations réalisent systématiquement une petite Mars (en même temps qu'une grosse Terre). Le problème est alors le suivant : comment justifier l'existence de cette limite extérieure, et comment expliquer sa compatibilité avec l'existence de la ceinture d'astéroïde, entre 2 et 4 UA ? Aujourd'hui, la masse totale de la ceinture d'astéroïdes est très faible (environ 6×10^{-4} la masse terrestre [17]), mais il est bien connu qu'elle devait contenir au moins une quantité de matière solide mille fois supérieure quand elle s'est formée [18].

Les résultats présentés dans [16] ont amené Walsh et ses collègues [19] à combiner accrétion des planètes telluriques et migration des planètes géantes. Le modèle présenté en [19] a été bâti sur le scénario de migration successivement vers l'intérieur puis vers

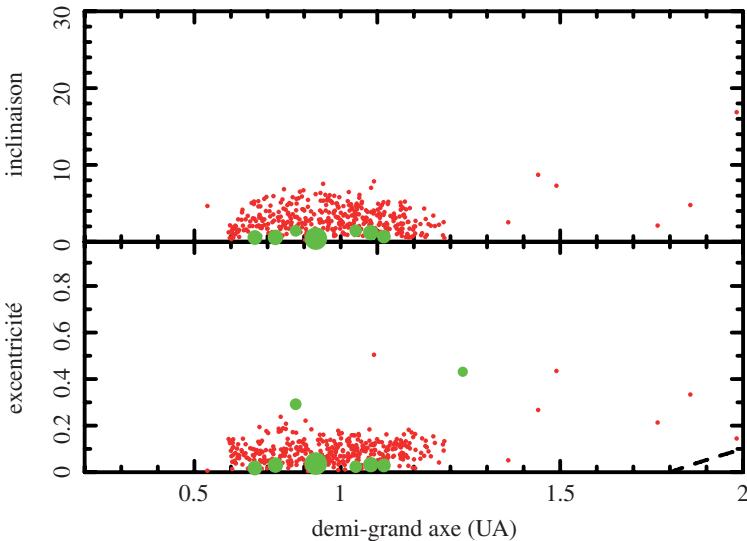


Figure 1. Les orbites des embryons (gross points verts) et les planétismaux (points rouges) au terme de la migration interne puis externe de Jupiter représentées dans le modèle **Grand Tack**, une fois la totalité du gaz disparue. La courbe discontinue dans l'angle inférieur droit marque la limite interne de la ceinture d'astéroïdes. À partir de cet état, le système évolue naturellement sur une échelle de temps de quelque 10^7 années vers deux planètes de masses terrestres à $\sim 0,7$ et 1 UA et une petite Mars à $1,5$ UA. (voir figure 2).

l'extérieur de Jupiter décrit plus haut. On ne peut calculer informatiquement l'étendue de ces deux types de migrations, parce qu'elles dépendent de propriétés du disque et de l'accrétion des planètes géantes qui sont inconnues, telles que le décalage temporel entre la formation de Jupiter et de Saturne, la vitesse de la migration vers l'intérieur (en fonction de la viscosité du disque), la vitesse de la migration vers l'extérieur (en fonction de la hauteur d'échelle du disque), le décalage temporel entre la capture en résonance de Jupiter et de Saturne et la dispersion du gaz. Toutefois, l'étendue des migrations vers l'intérieur et vers l'extérieur de Jupiter peuvent se déduire en examinant la structure résultante du Système solaire interne. En particulier, on a remarqué [19] qu'une inversion de la migration de Jupiter à $1,5$ UA fournirait une explication naturelle de l'existence du bord externe à 1 UA du disque interne d'embryons et de planétismaux, nécessaire pour produire une petite Mars (voir figure 1). En raison de cette remarquable migration vers l'intérieur, puis vers l'extérieur de Jupiter qu'il conçoit, le scénario proposé en [19] est surnommé « grande virée de bord », ou *Grand Tack*.

Toutefois, la survie de la ceinture d'astéroïdes constitue le diagnostic capital de ce scénario. Étant donné que Jupiter aurait traversé deux fois la région de la ceinture d'astéroïdes, tout d'abord vers l'intérieur puis vers l'extérieur, on pourrait s'attendre à ce que la ceinture d'astéroïdes soit totalement vide aujourd'hui. Pourtant, les simulations numériques de Walsh et coll. montrent que la ceinture d'astéroïdes subit tout d'abord une déplétion

totale à cause du passage des planètes géantes, mais ensuite, alors que Jupiter quitte cette région pour la dernière fois, celle-ci est repeuplée par une faible fraction des planétésimaux épargnés par les planètes géantes lors de leur premier passage. En particulier, la ceinture d'astéroïdes intérieure est repeuplée de manière prédominante par des planétésimaux qui se trouvaient à l'origine à l'intérieur de l'orbite où Jupiter s'est formée, alors que la partie extérieure de la ceinture est constituée de planétésimaux provenant de régions entre les orbites, ou au-delà, de ces planètes géantes. Si l'on suppose que Jupiter a effectué son accrétion dans la région de la ligne de glaces, il est donc tentant d'identifier les planétésimaux à l'origine plus proches du soleil avec les astéroïdes anhydres de types E et S et ceux au départ entre les orbites, et au-delà, des planètes géantes avec les astéroïdes de types C « primitifs ». Avec ce postulat, le scénario *Grand Tack* explique la structure physique de la ceinture d'astéroïdes (voir *supra*) probablement mieux que tout autre modèle précédent. En fait, il est difficile d'expliquer les différences entre les corps parents des chondrites ordinaires ou à enstatite et des chondrites carbonées si dans les deux cas ils s'étaient formés dans la région de la ceinture d'astéroïdes, étant donné qu'ils sont contemporains [20] et que l'étendue radiale de la ceinture d'astéroïdes est petite (seulement ~1 UA). À l'inverse, si les corps parents des chondrites ordinaires, à enstatite et carbonées ont été implantés dans la ceinture d'astéroïdes en partant de réservoirs à l'origine bien séparés, les différences de propriétés physiques sont plus faciles à comprendre dans le cadre de la séquence classique de condensation. L'origine des astéroïdes de type C provenant de la région des planètes géantes expliquerait aussi, de manière naturelle, les similitudes avec les comètes qui ressortent de résultats récents d'observations et d'analyses d'échantillons. La faible masse de la ceinture d'astéroïdes et son excentricité, ainsi que la distribution des inclinaisons sont également bien reproduits par le scénario *Grand Tack*.

Tous ces résultats sur la ceinture d'astéroïdes, conjointement au fait que la répartition des masses des planètes telluriques est également reproduite statistiquement (figure 2) font du scénario *Grand Tack* un modèle général séduisant de la formation des planètes telluriques.

3. Les systèmes extrasolaires à planètes géantes et la formation de planètes telluriques

Je vais maintenant tenter d'exprimer des considérations sur l'existence de planètes telluriques habitables (ou plus généralement sur les structures possibles de systèmes de planètes telluriques), en m'appuyant sur la compréhension que nous avons de la formation des planètes telluriques dans notre Système solaire.

Comme indiqué à plusieurs reprises dans ce qui précède, une des caractéristiques essentielles et originales de notre Système solaire provient du fait que les planètes géantes sont toutes très éloignées et n'ont jamais pénétré en deçà de 1,5 UA du Soleil. Deuxième caractéristique importante : les orbites des planètes géantes du Système solaire sont quasi circulaires, à la différence de la plupart des planètes géantes des autres systèmes connus à ce jour. Par conséquent, je vais étudier 4 cas généraux dans ce qui suit.

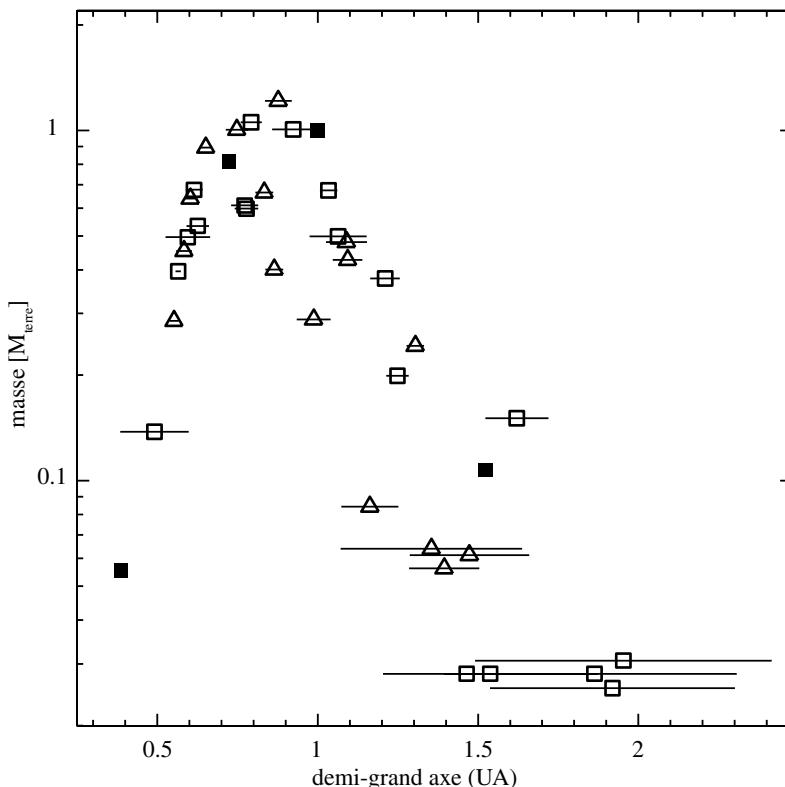


Figure 2. Distribution des masses des planètes telluriques obtenues dans les simulations de Walsh et coll. (2011). Les symboles clairs représentent les planètes produites lors de différentes simulations. Les lignes horizontales dénotent les excursions périhélie-aphélie des planètes sur leurs orbites excentriques terminales. Les carrés noirs montrent les planètes réelles du Système solaire. Le ratio de masse entre la Terre et Mars est reproduit statistiquement.

3.1 Cas des systèmes à planètes géantes similaires au nôtre

Si les planètes géantes restent dans la partie périphérique du système sur une orbite circulaire, l'accrétion de la partie interne du disque suit un cheminement bien étudié. Les planétésimaux donnent tout d'abord naissance à un système d'objets plus massifs, connus en tant qu'embryons planétaires, au travers de processus de croissance exponentielle [21] puis oligarchique [22]. Ces corps possèdent une masse de l'ordre de celle de la Lune ou de Mars, en fonction de la densité de surface initiale des

matériaux solides dans le disque. Puis, au moment de la disparition du gaz, le système des embryons développe une instabilité dynamique, ce qui conduit les embryons à adopter des orbites plus excentriques qui se croisent les unes les autres jusqu'à provoquer des collisions sur des échelles de temps de plusieurs millions d'années [14]. Ce processus de collisions mutuelles finit par produire quelques planètes dont les masses sont comparables à celle de la Terre [15]. L'accrétion par les planètes telluriques de matière riche en eau depuis le voisinage des planètes géantes semble être un processus très généralisé [23, 24, 25, 26]. Le comportement migratoire exact des planètes géantes dans le système externe ne devrait pas jouer un rôle crucial, tant que leurs excentricités restent réduites. Après tout, vu sous l'angle de l'accrétion terrestre (mais pas sous celui de Mars !) l'historique de croissance ne diffère pas qualitativement dans le scénario *Grand Tack* et dans les modèles antérieurs qui présupposaient des planètes géantes sur des orbites fixes. La région habitable est étroite, aussi il n'y aura pas toujours de planète habitable dans tous les systèmes à planètes telluriques. Toutefois, parmi tous les systèmes à planètes telluriques, les planètes habitables ne devraient pas être rares.

3.2 Cas des planètes géantes ayant migré dans ou au travers de la région habitable en raison d'interactions du disque planétaire

La migration d'une planète géante dans la région habitable présente des effets très spectaculaires. Elle perturbe le disque de planétésimaux que la planète géante traverse. Ce phénomène se produit sous l'effet de deux mécanismes. Le premier est une capture en résonance de moyen mouvement avec la planète en migration. Les planétésimaux capturés sont donc forcés de migrer ensemble avec les résonances. Ceci peut entraîner une proportion importante de la matière à l'extérieur de la zone habitable, en direction de l'étoile. Ces planétésimaux peuvent éventuellement fusionner entre eux pour former des planètes telluriques à ces résonances, mais elles seraient forcément trop rapprochées de l'étoile pour être habitables [27, 28]. Curieusement, les observations du satellite Kepler tendent à indiquer l'absence de planètes telluriques au voisinage de Jupiters chaudes [29], comme si le processus décrit ci-dessus n'était pas opérationnel en réalité.

Le second mécanisme perturbateur du disque de planétésimaux est la dispersion. Si les planètes géantes restent dans la région habitable ou à proximité, elles devraient empêcher - par effet de perturbation sur leur voisinage – l'accrétion des planètes telluriques dans la même zone. Ce phénomène est similaire à celui de Jupiter, imposant des perturbations à la ceinture d'astéroïdes et empêchant l'accrétion d'une autre planète à cet endroit. Toutefois, si la planète géante migre rapidement à travers la zone habitable et la quitte en se rapprochant de l'étoile, il est possible qu'une quantité suffisante de planétésimaux dispersés derrière l'orbite de la planète ait une orbite qui est recircularisée sous l'effet de la friction avec le gaz et engendre pour finir des planètes telluriques [28] en un processus similaire à celui exposé dans le cas 3-1.

3.3 Cas de planètes géantes ayant développé de grandes excentricités orbitales

La plupart des exoplanètes géantes possèdent des orbites à grande excentricité. On estime que celles-ci ont été acquises au cours d'une phase d'instabilité orbitale et des rencontres proches mutuelles dans le système de planètes géantes [2, 30]. À titre de comparaison, selon le modèle de Nice décrivant l'évolution du Système solaire consécutivement à la dissipation des gaz [31], les planètes géantes de notre système ont aussi été soumises à pareille instabilité, mais les orbites de Jupiter et de Saturne sont restées quasi circulaires parce que ces deux planètes majeures, du seul fait de la chance, ont évité des rencontres mutuelles. A contrario, Uranus et Neptune ont acquis des orbites de grande excentricité, mais finalement, leurs excentricités ont été amorties par la friction dynamique exercé par le disque des planétésimaux transneptuniens.

L'acquisition d'orbites très excentriques par les planètes les plus massives a des effets dévastateurs sur le reste du système. En effet, par l'intermédiaire d'un mécanisme de perturbations séculaires, les excentricités de tous les objets sont forcées de subir d'importantes oscillations. Cela est vrai quel que soit le demi-grand axe des orbites des planètes géantes, car ces perturbations séculaires ont des effets même sur de longues distances. Des simulations [32] montrent qu'un système de planètes telluriques se trouve immédiatement déstabilisé lorsque des planètes géantes se retrouvent sur des orbites excentriques. Soit toutes les planètes telluriques disparaissent (elles acquièrent des orbites de telles excentricités qu'elles entrent en collision avec l'étoile centrale ou leur trajectoire intersecte avec celles des planètes géantes qui les éjectent ensuite sur des orbites hyperboliques), soit une seule planète tellurique survit, sur une orbite tellement excentrique que cela l'empêche probablement d'être habitable.

Rappelons-nous que la plupart des exoplanètes géantes sont proches de leurs étoiles hôtes et ont des orbites excentriques. Ainsi, les cas (3-2) et (3-3) semblent être la norme (ce qui n'est pas bon pour les Terres jumelles), alors que le cas (3-1) – celui du Système solaire – semble être l'exception. Toutefois, en raison de biais observationnels, il se peut que nous n'ayons pas trouvé les systèmes à planètes géantes les plus semblables au nôtre.

3.4 Cas sans planète géante

Il n'y guère que 5 à 10 % d'étoiles de type solaire à accueillir des planètes de la masse de Jupiter à une distance de quelques UA [4]. Ainsi, on serait porté à penser que les ~90 % d'étoiles restantes offrent des conditions favorables pour former des planètes telluriques, éventuellement habitables. En effet, il a été montré qu'en l'absence de planète géante, la formation de planètes telluriques sur des orbites d'excentricités modérées est un processus courant [33]. Toutefois, les choses pourraient ne pas être aussi simples. Si la formation de planètes de masses jovianennes pourrait être relativement rare, celle d'objets massifs comme Uranus et Neptune pourrait être plus répandue. En fait, l'analyse complète de tous les candidats HARPS tend à indiquer une fréquence d'environ 30 % d'exoplanètes présentant une masse inférieure à 30 masses terrestres et orbitant autour d'étoiles de type solaire avec des périodes inférieures à 100 jours [4], appelées Neptunes chaudes dans ce qui suit.

Il existe deux scénarios de formation pour ces planètes. Le premier postule qu'elles ont effectué leur accrétion *in situ*, à partir d'un disque qui a accumulé une grande quantité de matières solides dans sa partie interne [34]. Dans ce cas, la formation de la planète de masse neptunienne sur des orbites à période courte ne devrait pas affecter la formation de planètes telluriques dans la zone habitable. L'éventualité d'une formation de planètes de type terrestre dans la zone habitable devrait dépendre uniquement de la quantité de solides existant encore dans cette partie du disque.

Le second scénario, qui fournit une meilleure explication des faibles masses volumiques apparentes de la plupart des Neptunes chaudes, postule qu'elles se sont formées dans la partie externe du disque, comme des noyaux de planètes géantes, puis se sont déplacées vers l'étoile sous l'effet d'interactions planète-disque. En effet, quand des planètes de masse neptunienne se trouvent logées dans le disque de gaz, on s'attend à ce qu'elles soient positionnées sur un « rayon de non-migration » produit par un équilibre entre les différents couples qu'elles subissent de la part du disque [35, 36]. Toutefois, à mesure que le disque évolue et que la quantité de gaz se réduit, ce rayon non migrant finit par se déplacer en direction de l'étoile jusqu'à disparition substantielle du gaz [36]. Il s'agit là d'un processus semble-t-il générique, et la seule raison apparente pour laquelle Uranus et Neptune n'ont pas migré en direction du Soleil jusqu'à une distance d'environ 1 UA dans notre Système solaire tient au fait qu'elles ont été maintenues en résonance par Jupiter et Saturne qui, comme on l'a vu plus haut, ont opéré une migration vers l'extérieur au cours de la phase finale d'existence du disque. Si cette représentation de l'histoire du Système solaire est vraie, on peut conjecturer que, dans la plupart des systèmes sans planète de masse jovienne, la zone habitable est « envahie » par des planètes semblables à notre Neptune.

L'effet de cette invasion sur un système avec des planètes telluriques en formation a été étudié [41]. La plupart des matériaux solides présents à l'origine dans la zone habitable sont capturés en résonance avec les Neptunes en migration et sont transportés en direction de l'étoile. Dans ce processus, des planètes rocheuses peuvent se former à partir des objets capturés en résonance avec les Neptunes migrantes, comme cela a déjà été montré en [27] pour les planètes géantes migrantes, mais elles finissent par être trop proches de l'étoile pour être habitables. Le système Kepler-36 pourrait être le premier indice de ce phénomène, constitué d'une super Terre située juste à l'intérieur de l'orbite d'une Neptune chaude, avec un ratio de densité élevé (cette super Terre est une planète rocheuse, alors que la Neptune chaude devrait être composée de roche et de glace avec une atmosphère conséquente composée de gaz légers comme Neptune) [37]. J'en déduis donc que l'invasion de la zone habitable par des planètes de type Neptune peut être problématique pour la formation d'une Terre comme la nôtre. Toutefois, les Neptunes peuvent elles-mêmes devenir habitables, si d'aventure elles peuvent se retrouver dans la zone adéquate, en particulier si elles ne sont pas de masse trop importante (inférieure à un faible nombre de fois la masse terrestre). On parle dans ce cas de « planètes océan » [40]. Je remarque que toutes les planètes dites « telluriques » formées dans les modèles de synthèse planétaire [38, 39] sont en fait ce que l'on appelle des mini-Neptunes (autrement dit, s'étant formés rapidement à l'intérieur d'un disque constitué de gaz et de planétésimaux) plutôt que des planètes semblables à la Terre (qui s'est formée sur une échelle temporelle de plusieurs dizaines de Ma, à partir d'impacts mutuels entre embryons planétaires dans un environnement exempt de gaz).

Combien de fois les cas (3-1), (3-2), (3-3) et (3-4) se produisent-ils dans les systèmes planétaires ? Aujourd’hui, personne ne peut répondre à cette question fondamentale. D’un point de vue observationnel, notre recensement des systèmes planétaires hors du Système solaire est trop limité et biaisé. Du côté des modèles, il nous faudrait disposer d’une bonne compréhension du processus de formation des planètes de type Neptune et de planètes joviennes encore inexistante actuellement.

4. Conclusion

Tout comme la configuration des planètes géantes de Système solaire qui n'est pas typique des exosystèmes observés, il en va probablement de même des planètes telluriques. Les propriétés des planètes géantes dans notre système tiennent au fait que leur migration n'est pas descendue jusqu'à 1 UA et qu'elles sont restées sur des orbites quasi circulaires. La formation et l'évolution des planètes telluriques auraient été radicalement différentes si les planètes géantes avaient traversé la zone habitable ou avaient acquis des orbites de forte excentricité, comme dans la plupart des systèmes planétaires observés à ce jour.

Ma conclusion est donc que nous devons nous attendre à ce que les planètes de type terrestre soient rares, désignant par « type terrestre » des planètes n'ayant pas seulement des similitudes avec la Terre dans leurs caractéristiques finales, mais aussi en ce qui concerne l'histoire de leur formation. Cela ne veut pas dire pour autant que les mondes habitables sont rares. Cela veut simplement dire que les autres mondes habitables sont différents. Peut-être sont-ils des planètes de masse terrestre ou de quelques fois la masse de la Terre qui sont des noyaux avortés de planètes géantes (au sens où elles n'ont pas grossi suffisamment et suffisamment vite pour une accrétion d'une quantité substantielle de gaz) et qui ont migré dans la zone habitable. La plupart de ces corps seraient riches en eau, de sorte que finalement ils pourraient être des planètes océans [40]. Des Lunes de planètes géantes ayant migré dans la zone habitable pourraient aussi être des mondes habitables relativement fréquents.

Références

- [1] Rasio, F.A., Ford, E.B., 1996. Dynamical instabilities and the formation of extrasolar planetary systems. *Science* 274, 954-956.
- [2] Juric, M., Tremaine, S., 2008. Dynamical Origin of Extrasolar Planet Eccentricity Distribution. *The Astrophysical Journal* 686, 603-620.
- [3] Raymond, S.N., Barnes, R., Veras, D., Armitage, P.J., Gorelick, N., Greenberg, R., 2009. Planet-Planet Scattering Leads to Tightly Packed Planetary Systems. *The Astrophysical Journal* 696, L98-L101.
- [4] Mayor, M., and 13 colleagues, 2011. The HARPS search for southern extra-solar planets XXXIV. Occurrence, mass distribution and orbital properties of super-Earths and Neptune-mass planets. <http://arxiv.org/pdf/1109.2497.pdf>
- [5] Levison, H.F., Thommes, E., Duncan, M.J., 2010. Modeling the Formation of Giant Planet Cores. I. Evaluating Key Processes. *The Astronomical Journal* 139, 1297-1314.

- [6] Haisch, K.E., Jr., Lada, E.A., Lada, C.J., 2001. Disk Frequencies and Lifetimes in Young Clusters. *The Astrophysical Journal* 553, L153-L156.
- [7] Kleine, T., Touboul, M., Bourdon, B., Nimmo, F., Mezger, K., Palme, H., Jacobsen, S.B., Yin, Q.Z., Halliday, A.N., 2009. Hf-W chronology of the accretion and early evolution of asteroids and terrestrial planets. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 73, 5150-5188.
- [8] Kley, W., Nelson, R. P., 2012. Planet-Disk Interaction and Orbital Evolution. *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, 50, 211-249.
- [9] Alexander, R.D., Pascucci, I., 2012. Deserts and pile-ups in the distribution of exoplanets due to photoevaporative disc clearing. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 422, L82.
- [10] Masset, F., Snellgrove, M., 2001. Reversing type II migration: resonance trapping of a lighter giant protoplanet. *MNRAS*, 320, L55-L59.
- [11] Morbidelli, A., Crida, A., 2007. The dynamics of Jupiter and Saturn in the gaseous protoplanetary disk. *Icarus*, 191, 158-171.
- [12] D'Angelo, G., Marzari, F., 2012. Outward Migration of Jupiter and Saturn in Evolved Gaseous Disks. *The Astrophysical Journal* 757, id.50.
- [13] Pierens, A., Nelson, R. P., 2008. On the formation and migration of giant planets in circumbinary discs. *Astronomy and Astrophysics*, 483, 633-642.
- [14] Chambers, J.E., 2001. Making More Terrestrial Planets. *Icarus* 152, 205-224.
- [15] Raymond, S.N., O'Brien, D.P., Morbidelli, A., Kaib, N.A., 2009b. Building the terrestrial planets: Constrained accretion in the inner Solar System. *Icarus* 203, 644-662.
- [16] Hansen, B.M.S., 2009. Formation of the Terrestrial Planets from a Narrow Annulus. *The Astrophysical Journal* 703, 1131-1140.
- [17] Krasinsky, G.A., Pitjeva, E.V., Vasilyev, M.V., Yagudina, E.I., 2002. Hidden Mass in the Asteroid Belt. *Icarus* 158, 98-105.
- [18] Wetherill, G.W., 1989. Origin of the asteroid belt. *Asteroids II* 661-680.
- [19] Walsh, K.J., Morbidelli, A., Raymond, S.N., O'Brien, D.P., Mandell, A.M., 2011. Sculpting of the inner Solar System by gas-driven orbital migration of Jupiter. *Nature*, 475, 206-209.
- [20] Villeneuve, J., Chaussidon, M., Libourel, G., 2009. Homogeneous Distribution of ^{26}Al in the Solar System from the Mg Isotopic Composition of Chondrules. *Science* 325, 985-988.
- [21] Greenberg, R., Hartmann, W.K., Chapman, C.R., Wacker, J.F., 1978. Planetesimals to planets - Numerical simulation of collisional evolution. *Icarus* 35, 1-26.
- [22] Kokubo, E., Ida, S., 1998. Oligarchic Growth of Protoplanets. *Icarus* 131, 171-178.
- [23] Morbidelli, A., Chambers, J., Lunine, J.I., Petit, J.M., Robert, F., Valsecchi, G.B., Cyr, K.E., 2000. Source regions and time scales for the delivery of water to Earth. *Meteoritics and Planetary Science* 35, 1309-1320.
- [24] Raymond, S.N., Quinn, T., Lunine, J.I., 2004. Making other earths: dynamical simulations of terrestrial planet formation and water delivery. *Icarus* 168, 1-17.

- [25] Raymond, S.N., 2006. The Search for Other Earths: Limits on the Giant Planet Orbits That Allow Habitable Terrestrial Planets to Form. *The Astrophysical Journal* 643, L131-L134.
- [26] O'Brien, D.P., Morbidelli, A., Levison, H.F., 2006. Terrestrial planet formation with strong dynamical friction. *Icarus* 184, 39-58.
- [27] Fogg, M.J., Nelson, R.P., 2005. Oligarchic and giant impact growth of terrestrial planets in the presence of gas giant planet migration. *Astronomy and Astrophysics* 441, 791-806.
- [28] Raymond, S.N., Mandell, A.M., Sigurdsson, S., 2006b. Exotic Earths: Forming Habitable Worlds with Giant Planet Migration. *Science* 313, 1413-1416.
- [29] Steffen, J.H., and 11 co-authors, 2012. Kepler constraints on planets near hot Jupiters. *AstroPH*, I205.2309
- [30] Moorhead, A.V., Adams, F.C., 2005. Giant planet migration through the action of disk torques and planet-planet scattering. *Icarus* 178, 517-539.
- [31] Morbidelli, A., Tsiganis, K., Crida, A., Levison, H.F., Gomes, R., 2007. Dynamics of the Giant Planets of the Solar System in the Gaseous Protoplanetary Disk and Their Relationship to the Current Orbital Architecture. *The Astronomical Journal* 134, 1790-1798.
- [32] Raymond, S.N., Armitage, P.J., Moro-Martin, A., Booth, M., Wyatt, M.C., Armstrong, J.C., Mandell, A.M., Selsis, F., West, A.A., 2011. Debris disks as signposts of terrestrial planet formation. *Astronomy and Astrophysics* 530, A62.
- [33] Levison, H.F., Agnor, C., 2003. The Role of Giant Planets in Terrestrial Planet Formation. *The Astronomical Journal* 125, 2692-2713.
- [34] Hansen, B.M.S., Murray, N. 2012. Migration Then Assembly: Formation of Neptune-mass Planets inside 1 AU. *The Astrophysical Journal* 751, 158.
- [35] Paardekooper, S.-J., Mellema, G. 2006. Halting type I planet migration in non-isothermal disks. *Astronomy and Astrophysics* 459, L17-L20.
- [36] Lyra W., Paardekooper, S.-J., Mac Low, M.-M., 2010. Orbital Migration of Low-mass Planets in Evolutionary Radiative Models: Avoiding Catastrophic Infall. *The Astrophysical Journal Letters*, 715, L68-L73.
- [37] Carter, J.A., and 45 colleagues, 2012. Kepler-36: A Pair of Planets with Neighboring Orbits and Dissimilar Densities. *Science* 337, 556-559.
- [38] Ida, S., Lin, D.N.C., 2004. Toward a Deterministic Model of Planetary Formation. II. The Formation and Retention of Gas Giant Planets around Stars with a Range of Metallicities. *The Astrophysical Journal* 616, 567-572.
- [39] Mordasini, C., Alibert, Y., Benz, W., Klahr, H., Henning, T., 2012. Extrasolar planet population synthesis. IV. Correlations with disk metallicity, mass, and lifetime. *Astronomy and Astrophysics* 541, A97.
- [40] Leger, A., and 11 colleagues, 2004. A new family of planets? "Ocean-Planets". *Icarus* 169, 499-504.
- [41] Izidoro, A., Morbidelli, A., Raymond, S.N. 2014. Terrestrial Planet Formation in the Presence of Migrating Super-Earths. *The Astrophysical Journal* 794, 11.

4

Du Système solaire aux systèmes planétaires

Thérèse Encrenaz

LESIA Observatoire de Paris, CNRS, UPMC, UPD

I. Introduction

Le Système solaire se caractérise par une extrême variété d'objets. L'exploration spatiale des cinquante dernières années a amplement démontré qu'au sein des différentes familles (planètes et satellites, astéroïdes, comètes, objets transneptuniens...), chaque objet possède ses propres caractéristiques, conséquences des différents processus de formation et d'évolution qui l'ont marqué.

Depuis une vingtaine d'années, la découverte de planètes autour d'autres étoiles (dites « planètes extrasolaires » ou « exoplanètes ») a bouleversé notre vision de notre propre environnement. La diversité des objets du Système solaire se retrouve, à une plus grande échelle encore, dans les propriétés de ces nouveaux objets. Ainsi certaines planètes sont découvertes avec des densités extrêmes, sur des orbites exotiques, parfois autour d'étoiles binaires : les astronomes vont de surprise en surprise... La révolution des exoplanètes a naturellement conduit les astronomes à revoir leur conception de la formation et de l'évolution du Système solaire au sein d'un contexte plus large.

L'exploration spatiale de notre environnement remonte aux années soixante, avec l'aventure spectaculaire de l'homme sur la Lune en 1969. Bien que les motivations de cette exploration aient été essentiellement politiques, la science a su en tirer le meilleur parti. Le retour d'échantillons lunaires (qui ne nécessitait pas l'envoi d'hommes sur la Lune, puisque il a aussi été réalisé par les missions robotiques soviétiques) a permis des avancées décisives sur la datation du Système solaire. Les années soixante-dix ont vu les premières tentatives souvent infructueuses vers Mars et Vénus, mais aussi les succès des missions *Mariner 9* et *Viking* vers Mars, et *Pioneer 10 & 11* puis *Voyager 1 & 2* vers les planètes géantes. Les années quatre-vingt ont vu le succès des missions soviétiques vers Vénus, ainsi que l'exploration de la comète de Halley par cinq sondes spatiales en 1986. Plus tard, les missions de survol laissent la place aux observatoires en orbite et aux sondes de descente, avec en particulier la mission *Galileo* vers Jupiter, en opération entre 1995

et 2003, et la mission *Cassini-Huygens* vers le système de Saturne, en opération depuis 2005. L'exploration de Mars reprend à la NASA à la fin des années quatre-vingt-dix avec de nombreux orbiteurs et des véhicules de surface. Côté américain, l'exploration des comètes se développe aussi avec plusieurs missions de survol.

En parallèle, les observations télescopiques au sol des objets du Système solaire apportent aussi des informations décisives. La découverte la plus spectaculaire est celle, à partir de 1992, des objets de la ceinture de Kuiper, aussi appelés objets transneptuniens. Une conséquence remarquable est la décision de l'UAI (Union Astronomique Internationale), en 2006, de retirer à Pluton le statut de « planète » que l'objet avait antérieurement : ce n'est que l'objet transneptunien le plus anciennement connu, et, pour de nombreuses années, le plus gros d'entre eux. La ceinture de Kuiper, dont l'existence était soupçonnée depuis près d'un demi-siècle sur des bases théoriques, trouve son équivalent dans les disques de débris découverts à partir des années deux mille autour d'étoiles voisines jeunes ou en formation. Par comparaison, nous commençons à concevoir le Système solaire comme un cas particulier de système protoplanétaire.

2. La formation du Système solaire

Les fondements du modèle de formation du Système solaire ont été posés dès le XVIII^e siècle par le philosophe Emmanuel Kant puis par le scientifique Pierre Simon de Laplace. Ce modèle est basé sur quelques propriétés fondamentales des planètes : elles sont toutes coplanaires, circulaires et concentriques ; elles tournent toutes dans le même sens, qui est aussi celui de la rotation du Soleil. Ces observations suggèrent fortement la création du système au sein d'un disque, résultat de l'effondrement d'un fragment de nuage protosolaire en rotation rapide. Au centre, la matière s'est concentrée pour former le proto-Soleil, tandis que les planètes se sont formées à partir de particules solides, suite à la présence d'inhomogénéités au sein du disque. L'observation, depuis une vingtaine d'années, de disques protoplanétaires autour d'étoiles jeunes ou en formation, est venue conforter ce scénario : la formation stellaire à partir de l'effondrement d'un nuage en un disque semble un processus courant dans l'Univers.

En ce qui concerne leurs propriétés physiques, les planètes du Système solaire possèdent une autre caractéristique remarquable : elles se regroupent en deux catégories bien distinctes. À proximité du Soleil, les planètes telluriques sont petites, relativement denses, avec peu ou pas de satellites ; à plus grande distance, les planètes géantes sont volumineuses, peu denses, accompagnées d'un cortège de satellites et d'un système d'anneaux (figure I). Il est relativement facile de rendre compte de ces propriétés à partir du modèle de formation mentionné ci-dessus. Il suffit de considérer la composition chimique en différents points du disque protoplanétaire en fonction de leur distance à l'étoile. La composition globale reflète celle des abundances cosmiques : l'hydrogène est largement prépondérant, suivi de l'hélium, des éléments C, N, O, puis des éléments plus lourds. Du fait de leur processus de formation par nucléosynthèse stellaire, les éléments « lourds » (c'est-à-dire plus lourds que l'hélium) sont d'autant moins abondants qu'ils sont plus lourds.

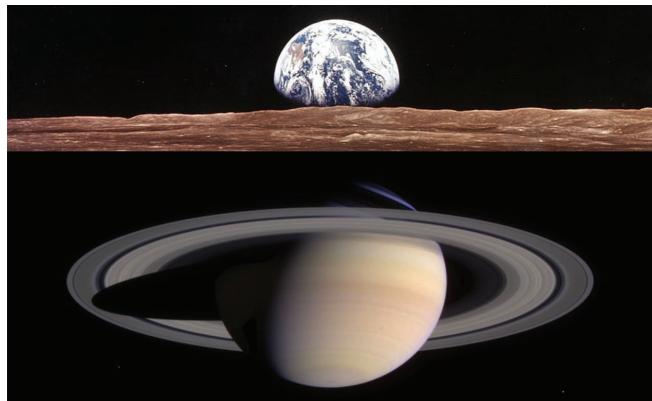


Figure 1. La Terre (en haut, photographiée depuis la Lune) et Saturne (en bas, photographiée par la sonde Cassini) appartiennent à deux catégories différentes de planètes : les planètes telluriques sont petites et denses tandis que les planètes géantes sont volumineuses, peu denses, et entourées de nombreux satellites. Ces différences s'expliquent simplement dans le cadre du modèle de nucléation (formation planétaire autour d'un noyau solide), largement accepté aujourd'hui (© NASA).

Dans le disque protoplanétaire, la température est maximale au centre et décroît à mesure que la distance héliocentrique augmente. À proximité du Soleil, à une température supérieure à quelque 200 K, les principaux composants sous forme solide sont les métaux, les silicates et les oxydes ; formés à partir d'éléments particulièrement lourds, ils sont peu abondants, ce qui explique les propriétés physiques des planètes telluriques à partir desquelles elles se sont formées. En revanche, à de plus grandes distances, les molécules formées à partir des éléments « lourds » les plus abondants C, N, O (H_2O , CH_4 , NH_3 ,...) se condensent sous forme de glace. Leur abondance est suffisante pour former des noyaux pouvant atteindre la dizaine de masses terrestres. Au-delà de cette limite, la gravité de ces noyaux est suffisante pour provoquer l'effondrement gravitationnel de la sub-nébuleuse environnante, principalement constituée de gaz d'hydrogène et d'hélium. C'est ainsi que se sont formées les planètes géantes, volumineuses, mais de faible densité ; leur système de satellites réguliers s'est constitué au sein de leur disque équatorial, produit de l'effondrement de la sub-nébuleuse environnante. La frontière entre les deux régimes correspond à la « ligne des glaces » où se condensent les petites molécules. En pratique, c'est la condensation de l'eau qui fixe cette limite, car l'eau est la molécule la plus abondante, et aussi, de loin, la première molécule à condenser lorsque la température décroît.

Une autre différence reste à expliquer. Les planètes géantes se divisent en deux sous-groupes : Jupiter et Saturne ont des masses relatives d'environ 300 et 100 masses terrestres, alors que celles d'Uranus et Neptune sont de l'ordre de 15 masses terrestres. En d'autres termes, Uranus et Neptune sont constituées essentiellement de leur noyau : c'est pourquoi on les appelle les géantes glacées. Jupiter et Saturne, principalement consti-

tuées de gaz protosolaire, sont les géantes gazeuses. Quelle peut être l'origine de cette différence ? Voici une explication possible : dans le disque protoplanétaire, la densité de matière décroît à mesure que la distance par rapport au Soleil augmente. Placées à de grandes distances du Soleil, Uranus et Neptune ont eu besoin de plus de temps que Jupiter et Saturne pour acquérir leur noyau de glace. Sans doute leur aura-t-il fallu quelque dix millions d'années, ce qui correspond à la durée de vie typique des disques protoplanétaires : à ce moment, la jeune étoile devient très active, émet un vent stellaire très fort qui a pour effet de dissiper vers l'extérieur le gaz du disque. Le gaz accrétré par Uranus et Neptune n'est sans doute que le résidu de ce processus.

De quel moyen observationnel disposons-nous pour tester le modèle de formation planétaire décrit ci-dessus ? Il existe un diagnostic, c'est la mesure de l'abondance des éléments « lourds » dans les planètes géantes, à partir de l'abondance des molécules telles que CH_4 , NH_3 , H_2O , H_2S , etc. Si les planètes géantes s'étaient formées par contraction gravitationnelle directe d'un fragment de la sub-nébuleuse protosolaire, les rapports d'abondance seraient inchangés et reproduiraient les abondances solaires. En revanche, dans le modèle de nucléation, les abondances des éléments lourds sont enrichies par rapport à ces valeurs, d'un rapport qui dépend de la masse relative du noyau initial par rapport à la masse totale de la planète. Un modèle simple, basé sur la masse actuelle des planètes géantes et faisant l'hypothèse d'un noyau initial de 12 masses solaires, prédit un enrichissement d'un facteur 4 pour Jupiter, 9 pour Saturne, et 30-50 pour Uranus et Neptune. Ces prédictions sont en accord remarquable avec les mesures dont nous disposons pour le rapport C/H (à partir de CH_4) sur les quatre planètes géantes. Elles sont aussi confirmées de manière spectaculaire par les mesures in situ réalisées par le spectromètre de masse de la sonde Galileo qui a plongé dans l'atmosphère de Jupiter en 1995. Les éléments C, N, S et les gaz rares Ne, Kr et Xe ont montré un enrichissement d'un facteur 4 +/- 2, en parfait accord avec les prédictions (Figure 2).

3. Planètes géantes et satellites extérieurs

Le modèle de nucléation des planètes géantes fournit aussi une explication naturelle à la présence du cortège de satellites et du système d'anneaux entourant chacune d'entre elles. Les anneaux et les satellites réguliers (ceux qui sont dans le plan équatorial de la planète) se sont formés dans le disque d'accrétion résultant de l'effondrement de la sub-nébuleuse environnante, de la même manière que les planètes au sein du disque protoplanétaire. Les satellites irréguliers (dont les orbites, parfois elliptiques, sont situées hors du plan équatorial) sont nombreux car ils ont été capturés par l'intense champ gravitationnel des planètes géantes.

Les satellites extérieurs présentent une incroyable diversité. Même les quatre satellites galiliens de Jupiter (découverts par Galilée en 1610) sont très différents les uns des autres. C'est en particulier le cas des deux objets les plus proches de Jupiter, Io et Europe. Situé à seulement 6 rayons joviens de la planète, Io est soumis à de très forts effets de marée qui sont responsables d'un intense volcanisme actif ; décou-

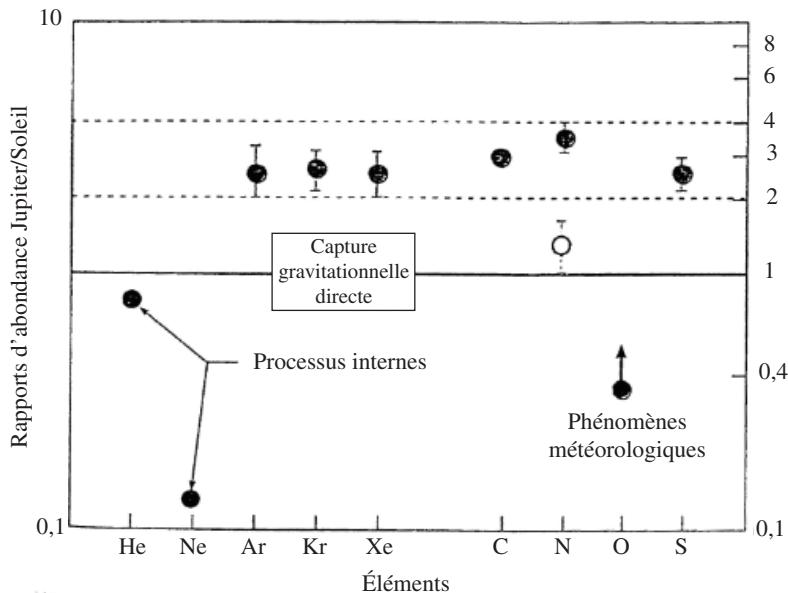


Figure 2. Mesure de l'enrichissement des éléments lourds par rapport à l'hydrogène, comparé à la valeur solaire (ligne horizontale égale à 1), dans l'atmosphère de Jupiter, par la sonde Galileo. Les points noirs représentent les mesures originales (Owen et al., *Nature* 402, 269, 1999). Suite à une réestimation des abondances solaires, l'enrichissement moyen des éléments lourds a été réévalué à 4 +/- 2 (Owen & Encrenaz, *Plan. Space. Sci.* 54, 1188, 2006).

vert par la mission Voyager en 1979, c'est le seul cas de volcanisme actif extraterrestre connu actuellement. Il est recouvert de dioxyde de soufre et possède une atmosphère stable très ténue de SO₂. Situé à 9 rayons joviens, Europe intrigue encore davantage les astronomes. Comme les deux autres satellites galiléens, Ganymède et Callisto, il est recouvert de glace d'eau. Mais les effets de marée induits par le champ gravitationnel de Jupiter sont suffisants pour maintenir l'eau à l'état liquide sous la surface. Selon les modèles, l'océan pourrait s'étendre jusqu'au noyau de silicates du satellite, ce qui présente d'intéressantes perspectives en termes d'exobiologie. Il reste à déterminer l'épaisseur de la couche de glace qui le recouvre et qui pourrait, selon les modèles, atteindre ou dépasser la dizaine de kilomètres. Cependant, l'analyse de certaines structures du sol à partir des images de la sonde Galileo semble indiquer la présence possible d'un lac souterrain peu profond, plus facile (ou moins difficile...) à explorer. En 2012, l'Agence spatiale européenne a sélectionné une mission ambitieuse d'exploration du système de Jupiter, JUICE (*Jupiter Icy Moon Explorer*). Prévue pour un lancement en 2022, la mission devrait atteindre Jupiter à l'horizon 2030.

Le système de Saturne est une autre destination privilégiée de l'exploration planétaire. C'est la mission Voyager qui a, en 1980, dévoilé la nature de Titan, son plus gros satellite, en mettant en évidence l'existence d'une chimie prébiotique complexe et les analogies

possibles de ce satellite avec la Terre primitive. Dans la foulée, la NASA et l'ESA ont mis au point une ambitieuse mission d'exploration du système de Saturne. Lancée en 1997, la mission *Cassini-Huygens* comporte un orbiteur (*Cassini*), actuellement en orbite autour de Saturne, et un module de descente (*Huygens*) qui s'est posé à la surface de Titan le 14 janvier 2005. La mission *Cassini-Huygens* a dévoilé une très intense chimie organique au sein de sa ionosphère, et a découvert des lacs d'hydrocarbures, variables en fonction du cycle saisonnier, à la surface de Titan. L'orbiteur *Cassini* a aussi découvert les propriétés inattendues d'*Encelade*, petit satellite de Saturne, siège d'un cryo-volcanisme actif : des plumes, surtout composées de vapeur d'eau, s'échappent de l'un de ses pôles. Ce cryo-volcanisme se trouve à l'origine de l'anneau E de Saturne, alimenté en permanence par les plumes d'*Encelade*.

4. Les planètes telluriques : des destins divergents

Les trois planètes telluriques dotées d'une atmosphère, Vénus, la Terre et Mars, ont connu au départ des conditions de formation relativement proches, avec une atmosphère primitive composée majoritairement de gaz carbonique et d'eau, avec une fraction moindre d'azote moléculaire. Pourtant, les trois planètes présentent aujourd'hui des conditions physiques radicalement différentes : la pression de surface est de 90 bars sur Vénus, alors qu'elle est de 1 bar sur la Terre et de moins du centième de bar sur Mars ; les températures de surface varient de 460°C (730 K) sur Vénus à environ 15°C (288 K) en moyenne sur la Terre et -50°C (223 K) en moyenne sur Mars.

Comment expliquer une évolution si divergente des trois planètes ? La cause principale en revient à la molécule d'eau qui, selon la température du milieu, peut se trouver sous forme gazeuse, liquide ou solide.

Sur Vénus, plus proche du Soleil, l'eau est sous forme de vapeur. Notons que cela n'a peut-être pas toujours été le cas, car le jeune Soleil était moins lumineux qu'aujourd'hui. Il n'est pas impossible que Vénus ait abrité un océan d'eau liquide au début de son histoire. Mais à mesure que le flux solaire augmentait (comme nous l'apprend l'histoire de l'évolution stellaire), l'eau présente dans l'atmosphère de Vénus a dû se vaporiser, puis se dissocier et s'échapper vers l'extérieur. Avant cette phase, le gaz carbonique et la vapeur d'eau ont alimenté sur Vénus un effet de serre soutenu qui a conduit à l'augmentation de la température de surface et de la basse atmosphère jusqu'aux températures très élevées que nous observons aujourd'hui.

Sur Terre, la température ambiante est telle que l'eau peut séjourner à l'état liquide. La situation a pu être différente dans le passé, quand le flux solaire était plus faible ; la Terre aurait pu passer par des phases de « boule de neige » au cours desquelles l'eau était totalement sous forme de glace. Si de tels épisodes sont intervenus, il est probable que des éruptions volcaniques massives ont propulsé dans l'atmosphère suffisamment de gaz carbonique pour amorcer un réchauffement. Quoi qu'il en soit, le flux solaire augmentant

progressivement jusqu'à sa valeur actuelle, l'eau est restée liquide tout au long de l'histoire de la planète. La présence d'océans a permis le piégeage du gaz carbonique sous forme de calcaire, et la planète s'est ainsi trouvée libérée de ses deux gaz à effet de serre les plus efficaces. C'est ainsi que la température de surface de la Terre est restée sensiblement constante pendant plusieurs milliards d'années. La vie est apparue, sans doute au fond des océans, il y a environ 4 milliards d'années, selon un processus qui n'est pas encore compris. L'oxygène libéré par les premières formes de vie s'est accumulé dans l'atmosphère et a permis la formation de la couche d'ozone. Cette couche protectrice a permis à la vie de se développer sur les continents, en bloquant le rayonnement ultraviolet solaire et ses effets destructeurs pour les molécules organiques.

Quant à la planète Mars, elle présente deux caractéristiques distinctes par rapport à ses voisines. D'une part, elle est plus froide, du fait de sa distance par rapport au Soleil plus élevée, d'autre part, elle est plus petite : sa masse n'est que le dixième de la masse terrestre. Son champ de gravité est donc plus faible, de même que sa source interne contenue dans les éléments radioactifs de son intérieur. L'atmosphère de Mars a donc été dès le départ plus ténue que celle de ses voisines. L'épuisement de sa source interne a conduit à un refroidissement de la planète et sans doute à l'échappement partiel de son atmosphère. Aujourd'hui, les conditions de température et de pression sont telles que l'eau ne peut être présente que sous forme de glace (et de gaz en de très faibles quantités). L'effet de serre, sans doute présent au début de l'histoire de la planète, s'est peu à peu éteint. Ainsi la molécule d'eau, par les changements d'état intervenant à des températures différentes, est en grande partie responsable de l'évolution divergente des planètes telluriques.

Références

- De Pater, I., Lissauer, J.J., *Planetary Science*, Cambridge University Press, Second Edition, 2010
Encrenaz, Th., *Les Planètes : Les nôtres et les autres*, EDP-Sciences, 2010. *Planets : Ours and Others*, World Scientific, 2013

5

L'eau et la Lune

Francis Albarède

Ecole Normale Supérieure de Lyon. Laboratoire de Géologie
de Lyon (Terre, Planètes, Environnement) UMR CNRS 5276

I. Introduction

Peu d'événements scientifiques ont eu un impact planétaire comparable à celui des missions *Apollo*. Quinze ans après le retour du dernier homme qui ait marché sur la Lune, les investigations sur les 382 kg d'échantillons de roche que les missions avaient ramenés ont été conduites avec une rigueur sans pareille et ont mobilisé les meilleurs spécialistes du monde entier travaillant à la pointe de toutes les techniques. Un des résultats, frappant mais décevant, pour une potentielle colonisation de notre satellite et pour son utilisation comme base avancée pour l'envoi d'humains dans d'autres points du Système solaire, est l'absence apparente de toute trace d'eau dans les roches. Les seules traces indubitablement d'hydrogène ou d'eau se situent dans le sol labouré par les impacts de météorites, le régolithe : elles semblent provenir du vent solaire et surtout du bombardement incessant depuis la formation de la Lune par des objets de nature météoritique et dont la taille varie depuis quelques dizaines de microns jusqu'à plusieurs dizaines de kilomètres. Une découverte remarquable fut celle des verres pyroclastiques volcaniques, notamment les abondantes sphérule connues sous le nom de verre orange dans l'échantillon 74220 et de verre vert dans l'échantillon 15426. Il s'agit de produits de fontaines vulcaniennes telles que celles que l'on peut observer dans de nombreux volcans. L'examen microscopique de ces échantillons a mis en évidence le dépôt de produits exhalatifs à la surface des sphérule et donc le rôle des fluides dans le fonctionnement des fontaines. Ce type de dépôt est fréquent lorsque des systèmes volcaniques sont affectés par des fluides d'origine superficielle et la présence de l'eau dans l'intérieur de la Lune ne s'impose donc pas. Même la découverte dans les années deux mille de faibles traces d'eau dans les roches des zones polaires ne pouvait compenser l'obstacle majeur à la survie de l'homme qu'est ce désert sec et glacial. Jusque à cette époque, peu de planétologues auraient parié sur la présence d'eau dans les profondeurs de la Lune.

Comment dans ces conditions expliquer que la Terre et la Lune aient hérité de proportions d'eau aussi différentes, alors que la quasi totalité des scientifiques acceptent leur origine commune après une collision géante entre la proto-Terre et une proto-planète

errante dans le Système solaire interne ? Deux hypothèses ont dominé le débat sur l'origine de l'eau dans la Terre. L'hypothèse endogène (Brown, 1949), acceptée sans guère de discussion dans la littérature géologique, est justifiée par l'observation des panaches gazeux des volcans : l'atmosphère et l'océan se sont « visiblement » formés par le dégazage volcanique du manteau au cours des âges géologiques. L'abondance (1 pourcent) dans l'atmosphère d'argon 40 produit par la désintégration au cours des âges du potassium 40 présent dans la croûte et le manteau terrestre est la marque la plus visible de ce dégazage. L'autre hypothèse, une origine cométaire (Owen et Bar-Nun, 1995), a elle recueilli les suffrages de la communauté astronomique : la Terre est manifestement appauvrie en éléments volatils, au premier rang desquels l'eau, par rapport à la composition moyenne du Soleil, ou de façon équivalente du Système solaire ; l'eau a été livrée tardivement par un bombardement de comètes dont on savait déjà qu'elles étaient des masses de glace boueuses. Une variante de l'hypothèse cométaire est l'apport tardif de météorites carbonées similaires à la météorite d'Orgueil qui contient jusqu'à 20 pourcent d'eau.

L'apport d'eau postérieur à la formation des planètes a été conforté par le concept de *vernis tardif* élaboré par Chou (1978) et qui s'est imposé depuis les missions *Apollo* : la concentration des éléments du groupe platine, que l'on appelle PGE pour reprendre l'acronyme anglais, est particulièrement élevée dans les météorites du groupe des chondrites, mais ces éléments sont totalement entraînés par le fer (les éléments sidérophiles) lorsque les silicates sont mis en présence de métal fondu. Après la ségrégation de la fraction silicatée et du noyau terrestre métallique, le manteau des deux planètes ne devrait plus contenir la moindre trace de PGE. Or la Terre silicatée et la Lune en contiennent des quantités parfaitement mesurables. Ceci ne peut guère s'expliquer que par un apport de matériel chondritique à la Terre et à la Lune après la séparation du noyau de la Terre. De plus, les abondances relatives de ces éléments reflètent celles des chondrites : l'iridium, l'osmium, le rhénium, le platine sont en proportions chondritiques, ce qui exclut de façon encore plus nette que l'apport de vernis tardif ait précédé la formation du noyau. Deux questions importantes se posent alors. La première est une question de dates : quelle est la chronologie relative de la formation du noyau, de l'impact lunaire et de l'apport d'eau ? La deuxième est l'origine de la différence entre la Terre, pourvue d'eau et dont le manteau a reçu un apport important de PGE, et la Lune qui contient bien un peu de PGE, 40 fois moins que le manteau terrestre, mais qui est fort dépourvue en eau.

En 2008, de nouvelles observations allaient pourtant relancer l'idée d'un Lune bien plus riche en eau. Saal et al. (2008) analysent les verres pyroclastiques oranges et verts et y trouvent jusqu'à plusieurs dizaines de ppm (parties par million) d'eau et des quantités substantielles de fluor, chlore et soufre. Puis Hauri et al. (2011) analysent les inclusions de verre prises dans les cristaux d'olivine de ces sphérolites de verre et trouvent des teneurs d'eau encore plus fortes, plusieurs centaines de ppm, suffisantes pour proposer que le manteau lunaire soit quasiment aussi riche en eau que le manteau supérieur de la Terre. Dans le même temps, d'autres groupes analysent les teneurs en eau des phosphates de calcium présents dans les basaltes lunaires et découvrent des apatites qui contiennent jusqu'à plusieurs milliers de ppm d'eau, c'est à dire des teneurs similaires à celles des apatites terrestres (Boyce et al., 2010; Greenwood et al., 2011; McCubbin et al., 2010). La cause de l'eau dans le manteau lunaire fait donc des progrès (Hauri et al., 2015) et l'explication en est donnée que si les basaltes lunaires dans leur écrasante majorité sont

dépourvus d'eau, la cause en est leur rapide dégazage dans le vide lors des éruptions volcaniques à la surface de la Lune. Une Lune plus hospitalière parce que capable de fournir de l'eau redevient pour certains une vraie perspective qui attire l'attention d'un très large public de scientifique mais aussi de la société dans son ensemble.

Dans cet article, j'analyserai l'ensemble des éléments du problème de l'eau dans la Lune par référence à la Terre. Après avoir mis en place un scénario très général d'accrétion de la Lune, l'eau sera replacée dans le contexte général des éléments volatils (l'eau n'est pas à proprement parler un élément mais c'est une façon plus parlante d'évoquer l'hydrogène) et la séquence thermique d'accrétion de la Lune sera comparée à celle des planètes telluriques. On examinera ensuite les observations qui ont amené certains à proposer un manteau lunaire riche en eau, notamment les inclusions vitreuses et les phosphates. On essaiera enfin de replacer ces observations dans un cadre chronologique, en tenant compte notamment des interrogations sur l'âge de formation du noyau terrestre, de l'impact géant qui a formé la Lune et sur l'arrivée du vernis tardif.

2. La formation de la Lune

De toutes les hypothèses émises sur la formation de la Lune, celle de l'impact géant (Hartmann and Davis, 1975) s'est révélée la plus fertile. La conservation du moment angulaire et la cohérence isotopique du manteau terrestre et de la Lune sont probablement les contraintes qui ont favorisé le scénario de l'impact d'une protoplanète, comme il est souvent écrit « de la taille de Mars » avec la Terre. L'énergie libérée par l'impact a volatilisé une grande partie de l'impacteur et a largement fondu le manteau terrestre. Le noyau métallique de l'impacteur s'enfonce dans le manteau terrestre où il fusionne avec le noyau de notre planète. Le matériel volatilisé durant le choc se rassemble en un disque sur le plan équatorial de la rotation du système Terre-Lune car c'est le seul mode d'accrétion qui conserve le moment angulaire du système. Le refroidissement permet de séparer en quelques jours le gaz de la matière condensée, liquide et solide. La friction du gaz contre la matière condensée provoque un échange de moment angulaire qui fait glisser la fraction gazeuse vers des orbites extérieures et la fraction condensée vers la Terre. L'instabilité gravitationnelle du disque en rotation contribue à l'échappement de matière solide vers des orbites plus éloignées. La Lune se forme en quelques semaines à partir du matériel situé en dehors de la limite de Roche, c'est à dire en dehors de la zone où la gravitation terrestre excède la cohésion des roches et brise, à la manière des anneaux de Saturne, tout objet de taille importante en menus fragments (effet de marée).

Une des contraintes sur ce scénario est la conservation du moment angulaire qui demande que la Lune soit formée principalement à partir du manteau de l'impacteur (Benz et al., 1987). Des scénarios alternatifs ont été récemment proposés dans lequel le moment angulaire de la Lune est dissipé lors de sa migration au passage d'une résonance gravitaire entre le Soleil et Jupiter (Canup, 2012; Ćuk and Stewart, 2012), un mécanisme connu sous le terme d'évection. Ces scénarios permettent d'augmenter ou de diminuer la taille de l'impacteur et aussi de permettre à la Lune d'être formée du matériel de la proto-Terre et non de celui de l'impacteur. La physique de l'évection reste cependant mal comprise et ces scénarios alternatifs demandent encore à être validés.

Par cohérence isotopique, il faut comprendre non pas que la Lune et la Terre aient des isotopes en proportion similaires mais que l'on peut passer d'abondances terrestres à des abondances lunaires par des processus physiques et chimiques ordinaires sans intervention de la radioactivité ou de mécanismes nucléaires. Le cas de cohérence le plus remarquable entre la Terre et la Lune est celui de l'oxygène (Clayton and Mayeda, 1975; Wiechert et al., 2001). C'est le « fractionnement dépendant de la masse » : par exemple, si un mécanisme 'fractionne' le rapport $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ de deux millièmes, il doit fractionner le rapport $^{17}\text{O}/^{16}\text{O}$ de un millième puisque la différence de masse est divisée par deux. La Terre n'a pas de cohérence isotopique de l'oxygène avec le Soleil, les chondrites ordinaires ou Mars, ce qui implique la coexistence dans la Nébuleuse solaire de stocks de matière d'origine totalement distincte, mais elle est cohérente avec la Lune. Beaucoup d'éléments, par exemple l'oxygène, le zinc (Paniello et al., 2012), montrent des relations de cohérence dans l'ensemble du Système solaire. D'autres comme le chrome et le titane (Trinquier et al., 2007; Trinquier et al., 2009) montrent une incohérence isotopique identique à celles de l'oxygène entre les objets planétaires en général (la Terre, Mars, les chondrites, les achondrites), mais une cohérence entre la Terre et la Lune. Il ne faut pas transposer ce principe aux systèmes radioactifs, notamment la radioactivité éteinte $^{182}\text{Hf}-^{182}\text{W}$ dont la variabilité des produits peut résulter de processus physiques à l'intérieur d'un stock unique de matériel nébulaire, ce qui n'est pas le cas de O, Cr, ou Ti.

3. Les éléments volatils dans le disque lunaire

Lors du rapide refroidissement du disque lunaire, le matériel se condense sous forme de liquide magmatique et de minéraux. Ce processus paraît à première vue très similaire à celui qui a prévalu lors du refroidissement initial de la Nébuleuse solaire et conduit à la formation des premiers objets solides, astéroïdes et protoplanètes. La séquence de condensation de cette nébuleuse de quelques 2000 K à quelques K a été très étudiée depuis les années 60 grâce aux modélisations thermodynamiques. Pour une composition de la nébuleuse semblable à celle de la photosphère solaire, cette séquence peut être représentée par une échelle des températures de condensation des éléments et des minéraux dont la plus utilisée est celle de Lodders (2003). Ces températures sont en général celles qui correspondent à 50 pourcent de la condensation d'un élément. Cette représentation est justifiée par l'étroitesse de la plage thermique de condensation qui est pour la plupart des éléments de l'ordre de 50 K pour presque tous les éléments mais peut être un peu plus large pour les alcalins. La condensation n'est pas un phénomène continu mais se déroule par paliers (Albarède, 2009). Les éléments ultra-réfractaires, tels que les PGE ou Ti apparaissent vers 1600 K, puis les éléments réfractaires qui forment le manteau (*lithophiles* : Si, Mg, Fe, Ca) et le noyau (*sidérophiles* : Fe, Ni) des planètes précipitent brutalement. Cette phase se termine vers 1350 K. Puis pratiquement toute nouvelle condensation cesse jusqu'à vers 1200 K, température à laquelle commence la condensation des alcalins (K, Na, Rb, Cs) et les éléments *chalcophiles* de haute température (Cu, Ag). A 950 K, la condensation s'arrête à nouveau pour reprendre à 800 K avec les chalcophiles de basse température (Zn, Pb, Bi et surtout S). Entre 500 et 200 K, c'est une autre interruption et finalement apparaissent les éléments *atmophiles* qui forment atmosphères et océans, H, C, et N. Cette séquence de condensation s'observe facilement en reportant, par exemple pour la Terre, l'abondance des éléments normalisée à la composition de la nébuleuse parente représentée par les chondrites carbonées en fonction de T_{50} (figure 1).

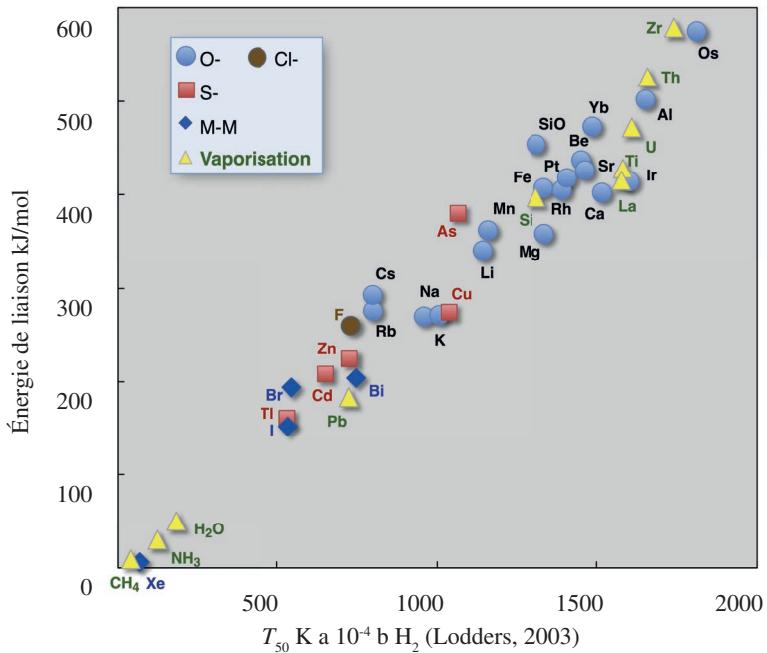


Figure 1. L'échelle des températures T_{50} de (50% de condensation) de la Nébuleuse solaire de Lodders (2003) est pertinente pour l'accréTION planétaire mais pas pour la condensation du disque proto-lunaire qui est dépourvu de gaz. Ce diagramme montre compare l'échelle de volatilité déduite des énergies de liaison (Albarède et al., 2014; Luo, 2007) et les T_{50} de Lodders (2003). Certaines de ces énergies sont incertaines (Si par exemple) et l'on a choisi parmi les valeurs de Luo (2007) celle qui donnait le meilleur accord.

Deux conclusions s'imposent : l'accréTION du matériel planétaire est discontinue et si elle s'interrompt par exemple à 1100 K, ce que l'on peut clairement identifier par un déficit en potassium ou zinc par rapport à la composition de la nébuleuse parente, on ne peut espérer trouver dans le condensat d'éléments bien plus volatils, tels que H (H₂O), N, ou même S. Lorsque l'on observe dans un matériel planétaire un déficit en éléments volatils par rapport à la référence de la photosphère ou des chondrites carbonées, on ne peut répondre à la question simple suivante (Albarède, 2009) : quelle proportion des éléments volatils a été perdue lors d'un événement planétaire tardif par rapport à celle qui n'a jamais été incorporée à la planète pour cause d'accréTION interrompue lors du refroidissement de la nébuleuse ?

La possibilité que des éléments échappent au champ de gravité des planètes est sévèrement limitée par la dynamique des gaz en orbite autour de celles-ci. Dans un gaz très tenu, l'équilibre entre l'énergie gravitationnelle et l'énergie thermique ne permet qu'aux éléments les plus légers de sortir du champ de gravité du système Terre-Lune, ce qui se produit à quelques distances Terre-Lune. La Lune a pu ainsi perdre des éléments légers

lors du grand impact mais seulement une faible fraction d'éléments de masse atomique moyenne ou lourde. Dans un disque de gaz plus dense, la distribution des gaz obéit peu ou prou à une distribution de Maxwell. L'exobase est l'altitude à partir de laquelle la probabilité pour un atome ou une molécule de s'échapper de l'atmosphère sans collision avec une autre particule est e^1 . Pour le disque lunaire, Ward (2012) évalue la hauteur de l'exobase à quelques milliers de km au dessus du plan équatorial. En dessous de l'exobase, les collisions entre atomes sont très nombreuses et il n'y a pratiquement pas de perte de matière. Quant à l'échappement dynamique (Hunten et al., 1987) qui implique un entraînement par l'hydrogène, il est négligeable pour le système Terre-Lune. Au-dessus de l'exobase, la perte d'élément est contrôlée par une dynamique semblable à celle d'une planète sans atmosphère, et comme nous l'avons remarqué plus haut, la plupart des éléments perdus par le disque lunaire restent néanmoins dans l'orbite terrestre. Pour que le disque lunaire perde des éléments volatils légers tels que le zinc ou l'eau, il faut donc que les flux au travers de l'exobase soient significatifs pendant la très courte période correspondant à la condensation du disque proto-lunaire, et ce problème attend encore une solution.

La composition de l'atmosphère terrestre montre que les gaz rares sont d'autant moins appauvris par rapport à la composition de la photosphère solaire que leur masse est élevée. Cette observation semble indiquer que les planétésimes précurseurs de la Terre aient perdu préférentiellement les éléments légers. Néanmoins, les nouveaux bilans planétaires de l'eau, du carbone, du néon, et du krypton (Marty, 2012) suggèrent que les abondances relatives de ces éléments soient chondritiques. De plus, les abondances des isotopes stables du xénon sont différentes dans l'atmosphère et le manteau (Caffee et al., 1999), ce qui demande une origine secondaire de l'atmosphère. La question posée plus haut de l'importance relative de la condensation incomplète et de la perte évaporative peut trouver une réponse dans la comparaison des abondances d'éléments de propriétés géochimiques similaires mais de masse différente (Albarède, 2009). Typiquement les alcalins Na(11), K(19), Rb(35), Cs(55), où le chiffre entre parenthèses indique le numéro atomique de l'élément, ont un degré relatif d'appauvrissement très similaire dans chacune des planètes. L'alcalin le plus léger, Li(3) est beaucoup moins appauvri que les autres alcalins. De la même façon, l'halogène F(9) est bien moins appauvri que Br(35) et I(53). Le groupe Zn(30), Cd(48), et Pb(82) partage des volatilités et des déficits similaires. La ségrégation de certains éléments dans le noyau doit certainement être prise en compte, mais ce rôle est encore mal établi et ne semble pas modifier la propriété générale selon laquelle, l'appauvrissement en éléments volatils n'est pas dépendant de la masse et n'est donc pas contrôlé par des effets gravitaires et par une évaporation tardive à partir des premiers objets planétaires.

En conclusion, même si des transferts d'éléments volatils, d'éléments légers, ont pu se produire entre le disque lunaire et la Terre, on doit rechercher d'autres causes que les impacts au déficit du système Terre-Lune en éléments volatils en général. Ce déficit doit être majoritairement lié à une interruption précoce de l'accrétion dans le Système solaire interne sous l'effet de l'expulsion des gaz nébulaires non encore condensés dans cette partie du Système solaire, car trop près du Soleil (Albarède, 2009). On admet en général que cette expulsion, connue sous le terme de photoévaporation est due à l'effet des photons UV émis par l'étoile jeune dans sa phase T-Tauri, c'est-à-dire dans la période qui précède l'allumage des réactions de fusion de l'hydrogène.

4. Une nouvelle échelle de volatilité

La séquence d'accrétion de la Lune à partir du disque produit par l'impact géant ne peut être comparée à la séquence bien connue pour les objets primitifs, astéroïdes et planétésimes, accrétés à partir de la Nébuleuse solaire, et ceci pour plusieurs raisons :

- Si l'on admet que la composition de la Nébuleuse solaire était semblable à celle de la photosphère solaire, elle devait être composée à 99,8 pourcent d'hydrogène et d'hélium. L'accrétion de matériel proto-planétaire solide, dominé par Si, Mg, Fe, O, et Ca, dans la nébuleuse n'affecte ni la pression totale du gaz, ni l'énergie de l'ensemble du système. L'évolution thermique de la nébuleuse est essentiellement liée à la dissipation de l'énergie par turbulence et radiation et à la vitesse de formation de l'étoile centrale (le disque alpha de Shakura and Sunyaev, (1973)).
- La température de condensation T_{50} des éléments dans la Nébuleuse solaire est très fortement dépendante de la pression d'hydrogène et d'hélium. Par exemple, les températures T_{50} diminuent d'à peu près 130 K quand la pression d'hydrogène passe de 10^{-4} à 10^{-6} bar (Wasson, 1985).
- Le disque lunaire produit par l'impact géant contient essentiellement des éléments réfractaires (Si, Mg, Fe, Ca) et peu ou pas d'éléments atmophiles, notamment l'hydrogène de l'eau. La condensation de métal et de silicate affecte donc considérablement la pression dans le gaz du disque et contrôle le bilan d'énergie.
- La très faible pression partielle des éléments réfractaires dans l'hydrogène et l'hélium de la Nébuleuse solaire (loi de Raoult) permet leur condensation à basse température directement sous forme solide, alors que la très faible pression d'hydrogène dans le disque lunaire induit la formation de liquides silicatés et métalliques.
- Paradoxalement, le disque lunaire étant bien moins riche en hydrogène que la Nébuleuse solaire, l'accrétion de la Lune doit se faire dans des conditions bien moins réductrices que celle des objets formés à partir de la nébuleuse.

On ne peut donc, contrairement à certaines publications même récentes (Hauri et al., 2015), utiliser l'échelle de volatilité dérivée des études sur la condensation de la Nébuleuse solaire, notamment l'échelle des T_{50} de Lodders (2003). Albarède et al. (2014) ont proposé de remplacer cette échelle par une autre qui reflète simplement l'énergie des liaisons entre les atomes et leur voisin le plus probable. Par exemple, on peut admettre que la libération d'un atome de Mg (et non d'un ion) dans le gaz passe par la rupture d'une liaison MgO. La logique sous-jacente est que pour passer d'un minéral ou plus généralement d'un solide à un gaz (atomisation), l'essentiel de l'énergie est consacré à la rupture de ces liaisons (Albarède, 2009). Typiquement, l'enthalpie d'atomisation est de l'ordre de plusieurs centaines de kilojoules par mole. L'enthalpie de fusion des minéraux représente typiquement moins 10 à 20 pourcent de cette énergie. Quant à la forme minérale que prend un assemblage condensé, l'effet sur l'énergie est quasiment négligeable, car l'enthalpie des réactions minérales se chiffre au maximum en une petite dizaine de kJ/mol. L'échelle des en-

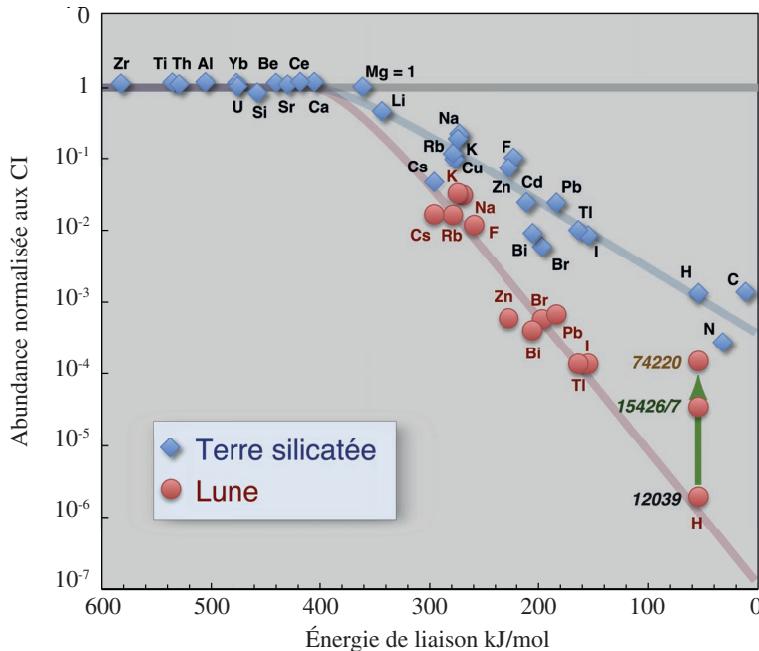


Figure 2. Appauvrissement comparé de la Terre et de la Lune en éléments volatils dont l'eau (H) sur l'échelle des énergies de liaison d'Albarède et al. (2014). Les concentrations sont normalisées à celle de chondrites carbonées (Lodders, 2003) puis à celles de Mg pour tenir compte de la perte de masse. La régularité de cet appauvrissement en fonction de l'énergie contraste avec la dispersion obtenue lorsque les teneurs sont reportées en fonction de T_{50} (Hauri et al., 2015). La Lune est bien plus appauvrie en éléments volatils que la Terre. On remarquera en comparant par exemple Li, Na, Rb, et Cs ou F, Cl, Br, et I, que cet appauvrissement n'est pas dépendant de la masse de l'élément, ce qui suggère que la perte par évaporation du champ de gravité est un effet mineur. La flèche verte montre l'enrichissement des verres pyroclastiques lunaires par intrusion des magmas dans des couches superficielles enrichies en eau par l'apport de météorites.

thalpies proposée par Albarède et al. (2014) est montrée dans la figure 2 et validée par l'excellente corrélation avec l'échelle de T_{50} de Lodders (2003). La pente de la corrélation dépend bien sûr de la pression de H + He mais on peut maintenant appliquer cette échelle de volatilité à des environnements nébulaires variés sans cette fois se soucier de cette pression. Cette même figure 2 montre les concentrations des éléments lithophiles et atmophiles dans la partie silicatée de la Terre reportées en fonction de l'énergie (enthalpie) de liaison déduite de l'ouvrage de Luo (2007). On ne considère pas les éléments chalcophiles et sidérophiles, dont l'abondance dans le noyau est mal connue, à l'exception de Fe et Ni. Pour représenter le fractionnement apparent des éléments volatils dans la Terre et la Lune, les concentrations sont normalisées à celles des chondrites carbonées CI et, pour tenir compte des pertes de masse, à la concentration d'un élément réfractaire bien connu, le magnésium. Il est clair que

cette échelle capture, à quelques difficultés près pour certains éléments dont les concentrations peuvent poser problème, la séquence de volatilité des éléments présents dans la fraction silicatée de la Terre. Si l'on se rappelle que la partie la plus importante du manteau terrestre échappe à l'échantillonnage et que nos collections se réduisent à des échantillons de lithosphère sous-continentale, le résultat peut être considéré comme excellent.

Pour la composition de la Lune, la difficulté principale réside dans le manque total d'échantillons du manteau dans les récoltes des missions Apollo (O'Neill, 1991). On ne peut que déduire les concentrations des éléments à partir de celles de basaltes au travers d'un modèle de fusion. Albarède et al. (2014) ont utilisé une méthode introduite par Schilling (1980) et Hofmann et White (1983). Certains couples d'éléments ne sont pas significativement fractionnés par les processus magmatiques (fusion et cristallisation). Les couples K/U, Rb/Ba, Zn/Fe (Le Roux et al., 2010), et surtout H₂O/Ce (Michael, 1995) sont particulièrement intéressants car ils opposent des éléments de volatilité très différente. Si l'on mesure ce rapport dans un basalte lunaire, on en déduit le rapport dans la source de ce basalte. En fonction de ce principe, on écrira

$$(H_2O/Ce)_{\text{source}} = (H_2O/Ce)_{\text{basalte}}$$

On considérera que les proportions relatives d'éléments réfractaires sont conservées pendant l'accrétion, par exemple

$$(Ce/Mg)_{\text{source}} = (Ce/Mg)_{\text{chondrites}}$$

Les concentrations des éléments réfractaires U, Ba, Fe, et Ce dans la Lune sont bien connus par les travaux des missions *Apollo*. Elles ne sont que très peu fractionnées entre elles. On peut ainsi en déduire les teneurs en éléments volatils K, Rb, Zn, et H₂O, par exemple

$$[H_2O]_{\text{source}} = (H_2O/Ce)_{\text{basalte}} \times (Ce/Mg)_{\text{chondrites}} \times [Mg]_{\text{source}}$$

où les crochets dénotent une concentration. La teneur en eau demeure en fait assez mal connue, sauf dans les verres pyroclastiques oranges et verts. Le résultat pour les éléments lithophiles et atmophiles ainsi que pour d'autres tabulés par O'Neill (1991) sont reportés dans la figure 3. Cette figure démontre une assez bonne régularité de la distribution des concentrations dans la Lune en fonction de l'enthalpie de liaison, ce qui contraste avec la forte dispersion que Hauri (2015) observe par rapport à T₅₀. Cette tendance démontre clairement que les éléments volatils dans leur ensemble se comportent de façon cohérente. Ils sont bien plus appauvris dans la Lune que dans la fraction silicatée de la Terre et cet appauvrissement augmente avec la volatilité de l'élément.

La teneur en eau des inclusions piégées dans les olivines des verres pyroclastiques verts et surtout oranges est néanmoins plus élevée que la valeur extrapolée de la tendance définie par les autres éléments volatils tels que Zn, Bi, K, Rb, etc. La figure 3 montre donc un excès apparent d'eau dans la source de ces verres. Une représentation simple des teneurs

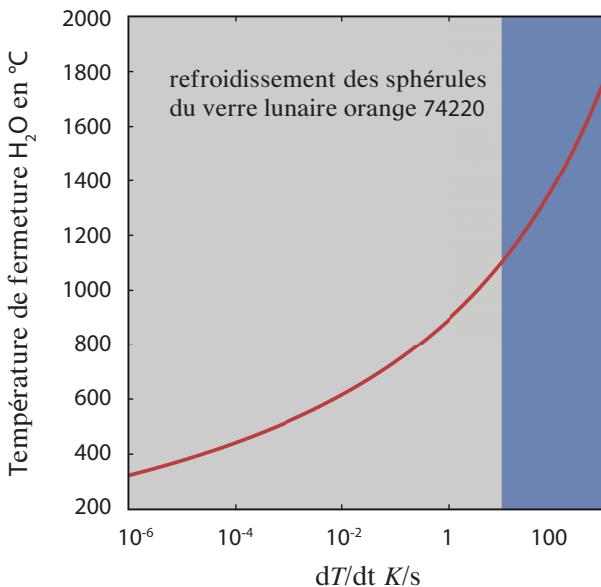


Figure 3. Température de fermeture des liquides magmatiques lunaires à la diffusion de l'eau en fonction de la vitesse de refroidissement. Les données de diffusion de Zhang et al. (2007) et de Persikov et al. (2010). La vitesse de refroidissement des sphérolites est de l'ordre de quelques dizaines à quelques milliers de degrés par seconde (Arndt et al., 1979; Uhlmann et al., 1974). La bande bleutée représente l'intervalle des vitesses de refroidissement possibles déterminées par les expériences de cinétique: il est improbable qu'à ces températures magmatiques, une grande quantité d'eau ait été perdue par les sphérolites éjectées dans le vide.

en eau des verres lunaires est donnée par l'échelle des rapports $\text{H}_2\text{O}/\text{Ce}$ dans les chondrites carbonées CI (300 000), le manteau terrestre (250), les inclusions vitreuses dans les verres oranges (50) et verts (10), et l'extrapolation de la tendance des éléments volatils (0.3).

Nous allons maintenant examiner plus en détail la nature de ces excès.

5. Les excès d'eau dans les phosphates et les verres lunaires

La description de cristaux d'apatite lunaire a attiré beaucoup d'intérêt car les apatites lunaires et terrestres montrent des gammes de teneur en eau très comparables (Boyce et al., 2010). Cette observation a néanmoins fait perdre de vue une autre observation qui elle

est de premier ordre. Le phosphate de calcium qui cristallise à partir des magmas pauvres en eau est la whitlockite alors que celui qui cristallise à partir de magmas plus riches en eau est l'apatite. Jusqu'à très récemment, le seul phosphate de calcium observé dans les magmas terrestres était l'apatite, alors que de façon très dominante, la whitlockite (ou un équivalent minéralogique proche la merrilite) est le principal phosphate de calcium lunaire (Papike et al., 1991). Cette simple observation minéralogique démontre le contraste entre des magmas lunaires anhydres et des magmas terrestres relativement hydratés. Cette opposition n'a été qu'à peine adoucie par la découverte de cristaux de whitlockite dans des inclusions ultrabasiques de Sibérie (Ionov et al., 2006) et surtout par l'étude des teneurs en H_2O , F, et Cl des quelques cristaux d'apatite lunaire identifiés. Il faut d'abord remarquer que pour aboutir à la saturation d'un magma lunaire en phosphate de calcium, il faut concentrer le phosphore initial par la cristallisation de 95 pourcent du magma original sans perdre l'eau du magma. On voit donc que les preuves de présence massive d'eau lunaire par l'apatite sont extrêmement difficiles à apporter et ont du mal à contrebalancer la dichotomie apatite terrestre-whitlockite lunaire.

L'autre indication majeure en faveur de magmas hydratés est l'existence de teneurs en eau élevées dans les inclusions vitreuses piégées dans les olivines des sphéroïles de verres pyroclastiques orange (74220) et verts (15426/7) (Hauri et al., 2011) et dans le verre noir du sol carotté à la localité du sol orange 74220 (Füri et al., 2014). Il est remarquable que le verre de la matrice des billes soit bien moins enrichi en eau que celui des inclusions vitreuses, ce qui semble attester du verrouillage de l'eau par les minéraux qui contiennent les inclusions. Cette observation a été présentée comme une 'preuve définitive' de présence d'eau dans la Lune (Hauri et al., 2011).

La réalité est moins simple. Les verres orange et vert on fait l'objet d'études nombreuses et intensives dès le retour des missions (Heiken et al., 1974; Meyer et al., 1975) et il a été démontré que la surface de ces sphéroïles a été fortement exposée à des vapeurs ou des fluides qui ont contaminé la surface en fluor, chlore, soufre, et autres éléments volatils. Du zinc et du plomb se sont déposés sous forme de micro-dépôts sulfurés exhalatifs (les « sulfide mounds »). Les isotopes du plomb (Tatsumoto et al., 1987; Tera and Wasserburg, 1976), du zinc (Herzog et al., 2009), du soufre (Thode and Rees, 1976), et de l'osmium (Walker et al., 2004) montrent que des métaux volatils ont contaminé la surface de ces verres. L'environnement des verres pyroclastiques était donc particulièrement riche en fluides. Tatsumoto et al. (1987) ont démontré que le plomb des verres verts est contaminé par du plomb de la surface lunaire. Walker et al. (2004) concluent également que l'osmium dans le verre orange est contaminé par un composant météoristique. Les compositions isotopiques du Zn des verres oranges (Herzog et al., 2009; Moynier et al., 2006) et verts (Kato et al., 2013) montrent qu'ils présentent tous un très fort déficit en isotopes légers par rapport aux basaltes lunaires difficile à expliquer par l'équilibration des sphéroïles de verre avec les vapeurs ambiantes.

Ces observations ont une très forte implication sur l'origine de l'eau dans les verres pyroclastiques. Des expériences sur des inclusions vitreuses riches en eau dans de cristaux d'olivine magmatique ont établi que le maintien des échantillons à une température magmatique de 1250°C pouvait déshydrater ces inclusions en

quelques heures (Gaetani et al., 2012; Hauri, 2002). Si la diffusion peut extraire l'eau des inclusions, elle peut également l'y faire entrer avant l'éruption ! Une pression d'eau relativement modeste provoquée par l'intrusion de la lave dans un sol riche en eau introduira rapidement quelques centaines de ppm d'eau dans le verre des inclusions. En utilisant les relations de Newcombe et al. (2012), on peut calculer que 500 ppm d'eau correspondent à une pression d'eau relativement modeste de 0.5 bar, manifestement facile à obtenir, même de façon dynamique, dans les vides interstitiels au voisinage de l'intrusion.

Une observation difficile à expliquer est celle du gradient de concentrations en eau observé dans un échantillon par Saal et al. (2008). Ce gradient témoigne d'un appauvrissement de la partie extérieure des billes de verre pyroclastique avec une couche appauvrie de quelques dizaines de microns. La forme sphérique ou oblongue des sphéroïdes et l'absence de cristaux dans la plupart d'entre elles démontrent que ces verres ont très rapidement refroidi en dessous de la transition vitreuse ($<725^{\circ}\text{C}$, (Ryan and Sammis, 1981)) avant leur chute sur le sol. Des expériences ont confirmé que la vitesse de refroidissement de ces sphéroïdes est de l'ordre de quelques dizaines à quelques milliers de degrés par seconde (Arndt et al., 1979; Uhlmann et al., 1974). Les températures de fermeture à la diffusion de l'eau (figure 3) calculées à partir des paramètres de Zhang et al. (2007) ou de Persikov et al. (2010) sont proches de celles des magmas. Si ces gradients de teneur en eau résultent du dégazage des magmas lors de l'éruption, la proportion d'eau perdue par diffusion ne peut être que très faible.

Tout ceci suggère donc que les magmas qui ont donné naissance aux verres pyroclastiques oranges et verts ont acquis l'eau près de la surface dans une croûte riche en eau, probablement parce que riche en débris de chondrites carbonées. D'une certaine façon, ces verres ressemblent aux produits pyroclastiques émis par les fontaines de lave des volcans terrestres de type vulcanien. L'abondance du deutérium dans l'eau des inclusions (Saal et al., 2013) suggère que cette eau provient de matériel semblable au chondrites carbonées. L'origine de l'eau des verres oranges et verts n'est donc pas à chercher dans le manteau lunaire lui-même mais dans les couches superficielles qui ont enregistré un intense bombardement météoritique pendant des milliards d'années.

Les modèles d'évolution pétrologiques de la Lune sont aussi en faveur d'une pauvreté de la Lune en eau (Elkins-Tanton and Grove, 2011). À la fin de l'accrétion du disque proto-lunaire, la partie externe de la Lune est fondu et forme un océan de magma. La gravité très faible de la planète favorise la cristallisation d'une croûte très épaisse de feldspath plagioclase qui forme aujourd'hui les montagnes lunaires, bien visibles depuis la Terre. Cet océan, protégé par une carapace solide conductrice d'anorthosites peut mettre près de 100 millions d'années à cristalliser. Après plus de 95 pourcent de cristallisation, les derniers liquides magmatiques résiduels, connus sous l'acronyme de basaltes KREEP, concentrent l'essentiel de l'eau de la planète. Les teneurs en eau du manteau lunaire postulées par Hauri et al. (2011) amènerait à des teneurs en eau du KREEP à plus de 0,1 pourcent, ce qui devrait provoquer la cristallisation de minéraux hydratés, tels que l'amphibole, ce que l'on n'observe pas.

Pourquoi la Lune renferme-t-elle moins d'eau et d'éléments volatils que la Terre ? Si l'apport est le fait d'une pluie de petits objets météoritiques ou cométaires, on peut imaginer que l'eau ait été distribuée de façon équitable entre la Terre et la Lune. Par équitable, on entend un flux constant et homogène : la concentration du matériel apporté devrait être proportionnelle à la surface apparente des planètes (après correction de la focalisation par la gravité) et diluée dans le volume du manteau de la planète. Au premier ordre, la contribution du vernis tardif devrait donc varier approximativement avec le rayon de la planète. Or le manteau lunaire contient 40 fois moins de PGE que le manteau terrestre (Day et al., 2007; Walker et al., 2004). L'explication la plus satisfaisante est que l'apport météoristique a été le fait d'un petit nombre d'objets qui ont favorisé la Terre comme cible (Bottke et al., 2010). L'ensemble de l'eau et des éléments volatils présents dans et sur la Terre pourraient avoir été apportés par un unique objet de la taille d'Europe ou de Ganymède et ce bombardement aurait largement épargné les autres planètes telluriques dont la Lune.

6. L'apport d'eau à la Lune et à la Terre

La chronologie de l'apport d'eau est un aspect du problème de la formation de la Lune, qui fait encore l'objet d'interprétations différentes. La séquence des événements fait appel à la radioactivité éteinte ^{182}Hf - ^{182}W dont la demi-vie est 8,9 millions d'années. L'hafnium (Hf) est un élément lithophile alors que le tungstène (W) est un élément sidérophile. Ce chronomètre mesure la séparation Hf/W donc la séparation du manteau et du noyau des planètes. Les premières analyses géochimiques ont démontré que la différentiation du noyau terrestre datait d'environ 30 millions d'années après la formation des chondrites (Kleine et al., 2002; Yin et al., 2002). Pour la Lune, la grande similitude de l'abondance isotopique du ^{182}W de la Lune et du terrestre a été interprétée comme indiquant que la Lune s'était formée après que l'isotope parent ^{182}W se soit éteint (Touboul et al., 2007), c'est-à-dire plus de 60 millions d'années après la formation du Système solaire. Des simulations dynamiques semblent conforter cet âge (Jacobson et al., 2014). La formation de la Lune a même été repoussée par certains pour qui la Lune pourrait s'être formée jusqu'à 180 millions d'années après la formation du Système solaire (Borg et al., 2011), un âge que l'on retrouve dans l'évolution des isotopes du plomb du manteau terrestre (Albarede et al., 2013).

Tout ceci est remis en question par l'observation, déjà envisagée par Albarède (2009), que le rapport père/fils du chronomètre ^{182}Hf - ^{182}W aussi est identique dans le manteau terrestre et dans la Lune (Münker, 2010) : l'abondance isotopique du ^{182}W peut être identique non pas parce que l'isotope radioactif père est éteint au moment de l'impact mais simplement parce que le rapport Hf/W est le même dans la fraction silicatée des deux corps planétaires. Il n'y a plus dès lors de datation possible de la formation de la Lune par ce chronomètre. Une 'datation' de l'impact lunaire est suggérée par Jacobson et al. (2014) qui invoquent le fait que plus la formation de la Lune est précoce plus la masse de planétésimes résiduels est grande et plus la quantité de vernis tardif accrétée est importante. En prenant la valeur canonique de 0,4 pourcent de vernis tardif sur la Terre, ils arrivent à

un âge du grand impact de 95 ± 32 millions d'années. On peut d'abord remarquer que ce modèle n'offre pas d'explication pour la différence de flux de vernis tardifs entre la Lune et la Terre. Plus important encore, Albarède et al. (2013) observent que la proportion de 0,4 pourcent de vernis tardif sur la Terre est sous-estimée car l'évaporation causée par la grande vitesse des impacts est négligée (cette vitesse est au moins égale à la vitesse d'échappement). En augmentant la proportion de vernis tardif à un ou deux pourcent, un âge de 30 millions d'années pour le grand impact lunaire devient cohérent avec le modèle de Jacobson et al. (2014). La datation de l'impact géant et de l'apport du vernis tardif reste donc deux questions mal résolues.

Si la Lune est très dépourvue d'eau et de volatiles, comment expliquer que la Terre en ait proportionnellement beaucoup plus ? L'eau et les éléments volatils proviennent vraisemblablement d'objets planétaires de toute taille, satellites de glace ou comètes, situés au delà d'une ligne fictive située près de la ceinture des astéroïdes, connue sous le vocable de ligne de neige, et au delà de laquelle l'eau-vapeur se condense en glace (Stevenson and Lunine, 1988). On peut imaginer que cet apport est précoce (Raymond et al., 2006) et antérieur à la formation de la Lune. Mais, encore une fois, rien dans la minéralogie ou la géochimie de la Lune, notamment comme discuté plus haut pour le KREEP et au sujet des verres pyroclastiques, ne permet de penser que l'eau et les éléments volatils y aient été un jour présents en quantité notable et encore moins au moment de l'impact géant. Le vernis tardif comme porteur d'eau a été fortement défendu par Albarède et al. (2009) : de nombreux chronomètres (U-Pb, Rb-Sr, I-Pu-Xe) suggèrent un fractionnement des éléments volatils par rapport aux éléments réfractaires apportés à la Terre à peu près 150 millions d'années après la formation du Système solaire. Si l'on considère que l'eau réside essentiellement en surface, on peut considérer qu'elle a été apportée au cours des âges par le bombardement météoritique. La Lune nous éclaire probablement sur la 'ligne de base' de l'apport continu de matériel météoristique depuis sa formation. Par contre, les océans et l'atmosphère terrestres témoignent probablement de la chance qu'a eu notre Terre d'être heurtée par un gros objet planétaire riche en glace et en éléments volatils.

Remerciements

Les discussions avec Marc Chaussidon, Frédéric Moynier, Sébastien Charnoz et Alessandro Morbidelli m'ont aidé à améliorer ce manuscrit.

Références

- Albarède F. (2009) Volatile accretion history of the terrestrial planets and dynamic implications. *Nature* **461**, 1227-1233.
- Albarède F., Albalat E., and Lee C.-T. A. (2015) An intrinsic volatility scale relevant to the Earth and Moon and the status of water in the Moon. *Meteoritics & Planetary Science* **50**(4), 568-577.

- Albarede F., Ballhaus C., Blichert-Toft J., Lee C.-T., Marty B., Moynier F., and Yin Q.-Z. (2013) Asteroidal impacts and the origin of terrestrial and lunar volatiles. *Icarus* **222**(1), 44-52.
- Arndt J., Flad K., and Feth M. (1979) Radiative cooling experiments on lunar glass analogues. In *Lunar and Planetary Science Conference Proceedings*, pp. 355-373.
- Benz W., Slattery W. L., and Cameron A. G. W. (1987) The origin of the Moon and the single-impact hypothesis, II. *Icarus* **71**(1), 30-45.
- Borg L. E., Connelly J. N., Boyet M., and Carlson R. W. (2011) Chronological evidence that the Moon is either young or did not have a global magma ocean. *Nature* **477**(7362), 70-U150.
- Bottke W. F., Walker R. J., Day J. M. D., Nesvorný D., and Elkins-Tanton L. (2010) Stochastic late accretion to Earth, the Moon, and Mars. *Science* **330**, 1527-1530.
- Boyce J. W., Liu Y., Rossman G. R., Guan Y. B., Eiler J. M., Stolper E. M., and Taylor L. A. (2010) Lunar apatite with terrestrial volatile abundances. *Nature* **466**(7305), 466-U2.
- Brown H. (1949) Rare gases and the formation of the Earth's atmosphere. In *The Atmospheres of the Earth and Planets* (ed. G. P. Kuiper), pp. 258-266. University of Chicago Press, Chicago.
- Caffee M. W., Hudson G. U., Velsko C., Huss G. R., Alexander E. C., and Chivas A. R. (1999) Primordial noble gases from Earth's mantle: Identification of a primitive volatile component. *Science* **285**(5436), 2115-2118.
- Canup R. M. (2012) Forming a Moon with an Earth-like Composition via a Giant Impact. *Science* **338**(6110), 1052-1055.
- Chou C. L. (1978) Fractionation of siderophile elements in the Earth's upper mantle. *Proc. Lunar Planet. Sci. Conf.* **9**, 219-230.
- Clayton R. and Mayeda T. (1975) Genetic relations between the moon and meteorites. In *Lunar and Planetary Science Conference Proceedings*, pp. 1761-1769.
- Ćuk M. and Stewart S. T. (2012) Making the Moon from a fast-spinning Earth: A giant impact followed by resonant despinning. *Science* **338**(6110), 1047-1052.
- Day J. M. D., Pearson D. G., and Taylor L. A. (2007) Highly Siderophile Element Constraints on Accretion and Differentiation of the Earth-Moon System. *Science* **315**(5809), 217-219.
- Elkins-Tanton L. T. and Grove T. L. (2011) Water (hydrogen) in the lunar mantle: Results from petrology and magma ocean modeling. *Earth and Planetary Science letters* **307**, 173-179.

Füri E., Deloule E., Gurenko A., and Marty B. (2014) New evidence for chondritic lunar water from combined D/H and noble gas analyses of single Apollo 17 volcanic glasses. *Icarus* **229**, 109–120.

Gaetani G. A., O'Leary J. A., Shimizu N., Bucholz C. E., and Newville M. (2012) Rapid reequilibration of H₂O and oxygen fugacity in olivine-hosted melt inclusions. *Geology* **40**(10), 915-918.

Greenwood J. P., Itoh S., Sakamoto N., Warren P., Taylor L., and Yurimoto H. (2011) Hydrogen isotope ratios in lunar rocks indicate delivery of cometary water to the Moon. *Nature Geoscience* **4**(2), 79-82.

Hartmann W. K. and Davis D. R. (1975) Satellite-sized planetesimals and lunar origin. *Icarus* **24**(4), 504-515.

Hauri E. (2002) SIMS analysis of volatiles in silicate glasses, 2: isotopes and abundances in Hawaiian melt inclusions. *Chemical Geology* **183**(1–4), 115-141.

Hauri E. H., Saal A. E., Rutherford M. J., and Van Orman J. A. (2015) Water in the Moon's interior: Truth and consequences. *Earth and Planetary Science Letters* **409**(0), 252-264.

Hauri E. H., Weinreich T., Saal A. E., Rutherford M. C., and Van Orman J. A. (2011) High pre-eruptive water contents reserved in lunar melt inclusions. *Science* **333**(6039), 213-215.

Heiken G. H., McKay D. S., and Brown R. W. (1974) Lunar deposit of possible pyroclastic origin. *Geochimica et Cosmochimica Acta* **38**(11), 1703-1718.

Herzog G. F., Moynier F., Albarede F., and Bereznay A. A. (2009) Isotopic and elemental abundances of copper and zinc in lunar samples, Zagami, Pele's hairs, and a terrestrial basalt. *Geochimica et Cosmochimica Acta* **73**(19), 5884-5904.

Hofmann A. W. and White W. M. (1983) Ba, Rb and Cs in the Earth's Mantle. *Z. Naturforsch.* **38a**, 256-266.

Hunten D. M., Pepin R. O., and Walker J. C. G. (1987) Mass fractionation in hydrodynamic escape. *Icarus* **69**, 532-549.

Ionov D. A., Hofmann A. W., Merlet C., Gurenko A. A., Hellebrand E., Montagnac G., Gillet P., and Prikhodko V. S. (2006) Discovery of whitlockite in mantle xenoliths: Inferences for water- and halogen-poor fluids and trace element residence in the terrestrial upper mantle. *Earth and Planetary Science letters* **244**(1–2), 201-217.

Jacobson S. A., Morbidelli A., Raymond S. N., O'Brien D. P., Walsh K. J., and Rubie D. C. (2014) Highly siderophile elements in Earth's mantle as a clock for the Moon-forming impact. *Nature* **508**(7494), 84-87.

Kato C., Valdes M.-C., Dhaliwal J., Day J. M., and Moynier F. (2013) Origin of isotopically light Zn in lunar samples through vaporization and the Zn isotope composition of the Moon. AGU Fall Meeting Abstracts, 2788.

Kleine T., Münker C., Mezger K., and Palme H. (2002) Rapid accretion and early core formation on asteroids and the terrestrial planets from Hf–W chronometry. *Nature* **418**, 952–955.

Le Roux V., Lee C. T. A., and Turner S. J. (2010) Zn/Fe systematics in mafic and ultramafic systems: Implications for detecting major element heterogeneities in the Earth's mantle. *Geochimica et Cosmochimica Acta* **74**(9), 2779–2796.

Lodders K. (2003) Solar system abundances and condensation temperatures of the elements. *Astroph. J.* **591**, 1220–1247.

Luo Y.-R. (2007) *Comprehensive Handbook of Chemical Bond Energies* CRC Press. pp. 1657.

Marty B. (2012) The origins and concentrations of water, carbon, nitrogen and noble gases on Earth. *Earth and Planetary Science letters* **313–314**(0), 56–66.

McCubbin F. M., Steele A., Hauri E. H., Nekvasil H., Yamashita S., and Hemley R. J. (2010) Nominally hydrous magmatism on the Moon. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* **107**(25), 11223–11228.

Meyer C., Jr McKay D. S., Anderson D. H., and Butler P. (1975) The source of sublimes on the Apollo 15 green and Apollo 17 orange glass samples. In *Proc. Lunar Sci. Conf. 6*, pp. 1673–1699. Pergamon, N.Y.

Michael P. (1995) Regionally distinctive sources of depleted MORB: Evidence from trace elements and H₂O. *Earth and Planetary Science letters* **131**(3–4), 301–320.

Moynier F., Albarede F., and Herzog G. F. (2006) Isotopic composition of zinc, copper, and iron in lunar samples. *Geochim. Cosmochim. Acta* **70**(24), 6103–6117.

Münker C. (2010) A high field strength element perspective on early lunar differentiation. *Geochimica et Cosmochimica Acta* **74**(24), 7340–7361.

Newcombe M., Brett A., Beckett J. R., Baker M. B., Newman S., and Stolper E. M. Solubility and diffusivity of h-bearing species in lunar basaltic melts. *Lunar Planet. Sci. Conf 43*, 2777.

Newcombe M., Brett A., Beckett J. R., Baker M. B., Newman S., and Stolper E. M. (2012) Solubility and diffusivity of h-bearing species in lunar basaltic melts. *Lunar Planet. Sci. Conf 43* **43**, 2777.

O'Neill H. S. C. (1991) The origin of the moon and the early history of the earth. A chemical model. Part I: The moon. *Geochimica et Cosmochimica Acta* **55**(4), 1135–1157.

Owen T. and Bar-Nun A. (1995) Comets, Impacts, and Atmospheres. *Icarus* **116**(2), 215-226.

Paniello R. C., Day J. M. D., and Moynier F. (2012) Zinc isotopic evidence for the origin of the Moon. *Nature* **490**, 376-379.

Papike J., Taylor L., and Simon S. (1991) Lunar minerals. In *The Lunar Sourcebook* (eds. G. H. Heiken, D. T. Vaniman, and B. M. French), pp. 121-181. Cambridge Univ. Press.

Persikov E. S., Newman S., Bukhtiyarov P. G., Nekrasov A. N., and Stolper E. M. (2010) Experimental study of water diffusion in haplobasaltic and haploandesitic melts. *Chemical Geology* **276**(3), 241-256.

Raymond S. N., Quinn T., and Lunine J. I. (2006) High-resolution simulations of the final assembly of Earth-like planets I. Terrestrial accretion and dynamics. *Icarus* **183**(2), 265-282.

Ryan M. P. and Sammis C. G. (1981) The glass transition in basalt. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* **86**(B10), 9519-9535.

Saal A. E., Hauri E. H., Lo Cascio M., Van Orman J. A., Rutherford M. C., and Cooper R. F. (2008) Volatile content of lunar volcanic glasses and the presence of water in the Moon's interior. *Nature* **454**, 192-196.

Saal A. E., Hauri E. H., Van Orman J. A., and Rutherford M. J. (2013) Hydrogen Isotopes in Lunar Volcanic Glasses and Melt Inclusions Reveal a Carbonaceous Chondrite Heritage. *Science* **340**(6138), 1317-1320.

Schilling J. G., Bergeron M. B., and Evans R. (1980) Halogens in the mantle beneath the North-Atlantic. *Phil. Trans. Roy. Soc. A* **297**(1431), 147-178.

Shakura N. I. and Sunyaev R. A. (1973) Black holes in binary-systems - observational appearance. *Astronomy & Astrophysics* **24**(3), 337-355.

Stevenson D. J. and Lunine J. I. (1988) Rapid formation of Jupiter by diffusive redistribution of water vapor in the solar nebula. *Icarus* **75**(1), 146-155.

Tatsumoto M., Premo W. R., and Unruh D. M. (1987) Origin of lead from green glass of Apollo-15426 - a search for primitive lunar lead. *Journal of Geophysical Research* **92**(B4), E361-E371.

Tera F. and Wasserburg G. J. (1976) Lunar ball games and other sports. *Lunar Science Conf.* **7**, 858-860.

Thode H. G. and Rees C. E. (1976) Sulphur isotopes in grain size fractions of lunar soils. *Lunar Science Conference* **7**, 459-468.

Touboul M., Kleine T., Bourdon B., Palme H., and Wieler R. (2007) Late formation and

prolonged differentiation of the Moon inferred from W isotopes in lunar metals. *Nature* **450**(7173), 1206-1209.

Trinquier A., Birck J.-L., and Allegre C. J. (2007) Widespread ^{54}Cr heterogeneity in the inner solar system. *Astrophys. J.* **655**, 1179-1185.

Trinquier A., Elliott T., Ulfbeck D., Coath C., Krot A. N., and Bizzarro M. (2009) Origin of nucleosynthetic isotope heterogeneity in the solar protoplanetary disk. *Science* **324**, 374-376.

Uhlmann D., Klein L., Kritchevsky G., and Hopper R. (1974) The formation of lunar glasses. In *Lunar and Planetary Science Conference Proceedings*, pp. 2317-2331.

Walker R. J., Horan M. F., Shearer C. K., and Papike J. J. (2004) Low abundances of highly siderophile elements in the lunar mantle: evidence for prolonged late accretion. *Earth Planet. Sci. Lett.* **224**(3-4), 399-413.

Ward W. R. (2012) On the vertical structure of the proto lunardisk. *Astrophys. J.* **744**, 11.

Wasson J. T. (1985) *Meteorites: Their Record of Early Solar System History*. Freeman. pp. 267.

Wiechert U., Halliday A. N., Lee D. C., Snyder G. A., Taylor L. A., and Rumble D. (2001) Oxygen Isotopes and the Moon-Forming Giant Impact. *Science* **294**(5541), 345-348.

Yin Q., Jacobsen S. B., Yamashita K., J. B.-T., Télouk P., and Albarède F. (2002) A short timescale for terrestrial planet formation from Hf-W chronometry of meteorites. *Nature* **418**, 949-952.

Zhang Y., Xu Z., Zhu M., and Wang H. (2007) Silicate melt properties and volcanic eruptions. *Reviews of Geophysics* **45**(4), <https://dx.doi.org/10.1029/2006RG000216>.

Deuxième partie

Les briques de la
vie primitive et les
environnements
planétaires

Deuxième partie

Les briques de la vie primitive et les environnements planétaires

Présentation

I. Introduction générale

Le cadre intellectuel dans lequel on doit étudier la transition entre Astrochimie et Astrobiologie est en principe le même que celui dans lequel on doit étudier cette transition sur notre planète. Sauf que ces dimensions changent. Cette transition est nuancée et floue, tellement floue qu'on est porté à douter de la possibilité même de pouvoir la définir. L'approche méthodologique offerte par Louis Le Sergeant d'Hendecourt est donc d'autant plus précieuse. Tout en définissant un modèle, il étudie le devenir des éléments chimiques de l'univers.

Les systèmes modèle sont ici développés à plusieurs niveaux :

- le modèle établi sur la profonde connaissance de la structure moléculaire de la météorite de Murchison par Sylvie Derenne et François Robert ;
- l'extension de nos connaissances de la composition chimique du milieu interstellaire, à l'origine d'une modélisation générale par Valentine Wakelam ;
- enfin, le déclenchement d'un cadre chimique particulier, celui des composés à un seul atome de carbone (acide cyanhydrique → formamide → formate d'ammonium) est capable en puissance - et dans la réalité du laboratoire - de donner lieu à un éventail très riche de précurseurs de la vie.

Dans l'ensemble, on se rend compte de la complexité des approches différentes appliquées à la recherche des briques primitives du vivant.

En envisageant les points de contact possibles et les rapports entre Astrochimie et Astrobiologie, on est a priori obligé de se confronter à des conditions extrêmes et extrêmement variables du milieu interstellaire. C'est à ce propos que sont ici importantes les modélisations chimiques du milieu interstellaire, par Valentine Wakelam.

Dans le milieu interstellaire, il existe des conditions de température et de pression qui sont très différentes de celles qui existent dans l'environnement terrestre et qui conduisent, entre autres, à une forte diminution de la fréquence des collisions moléculaires. Apparaissent ainsi des processus spécifiques à ces milieux extrêmes. Du fait des très faibles températures (quelques dizaines de degrés kelvin), les interactions entre la phase gazeuse et les grains de poussière interstellaire produisent également une chimie de surface très particulière qui participe à la production de molécules organiques plus ou moins complexes, voire même prébiotiques.

Et si on revient sur Terre avec Raffaele Saladino (cf. chapitre 9 : la chimie avant la vie), grâce à ses résultats sur le rôle joué par les minéraux terrestres et non-terrestres sur la chimie pré-biotique de la formamide, la plus simple des amides naturelles, on s'aperçoit de la complexité atteinte par la construction plausible des premiers pas vers la vie.

2. Les jalons de la vie : les conditions de la complexification

2.1 Des molécules, minérales et organiques, se forment spontanément : les observations et les expérimentations

Cette deuxième partie est consacrée à la formation de matériaux prébiotiques dont l'expérience et l'observation montrent qu'ils apparaissent dès lors que des conditions de concentration de matériaux (éléments chimiques) et d'énergie (rayonnement électromagnétique, bombardement de particules énergétiques) sont réunies.

Dans des conditions énergétiques plus puissantes, Ernesto Di Mauro montre (cf. 14) que des processus de formations moléculaires très complexes se développent pour produire de grandes molécules qui sont les prémisses de la vie terrestre. Ces développements instaurent les processus biologiques comme processus ordinaires de formation des molécules de la chimie.

Ces découvertes, entérinées désormais par les observations de tous ordres effectuées dans tout l'univers, mettent fin à la conception d'une chimie biologique distincte par principe de la chimie minérale et ouvrent, à l'appui de bien d'autres découvertes, la voie à une biologie fondée sur les bases de la physico-chimie.

Cette première partie comporte les articles qui exposent ces résultats expérimentaux et leurs confirmations par l'observation. Toutefois, l'article d'Ernesto Di Mauro, qui relate ses expériences, se poursuit par des réflexions épistémologiques qui nous ont conduits à le placer en fin de troisième partie de l'ouvrage.

2.2 A la recherche de molécules organiques partout dans l'Univers

Ces résultats justifient les recherches de molécules complexes dans les planètes solaires, dans les comètes, dans l'espace interplanétaire et jusque dans l'espace intersidéral.

Trois chapitres leur sont consacrés. Ces recherches évoluent très rapidement. Les outils d'analyse et les moyens d'investigation sont portés par des programmes terrestres et spatiaux très lourds et de très longue durée. Ces programmes exigent de longues préparations et leur exécution, surtout pour les programmes spatiaux, demandent, en général, de longues années d'approche des objectifs. Celui qui les présente n'en verra peut-être pas l'aboutissement. Ce n'est donc pas une équipe stable qui suit un programme, mais en général plusieurs équipes internationales qui, elles-mêmes, évoluent dans le temps.

Les sondes spatiales apporteront, dans l'avenir, des matériaux recueillis sur les divers objets du Système solaire. Mais, dès maintenant, les observations spatiales, à partir de sondes ou de télescopes spatiaux, mais aussi à partir des télescopes terrestres, ont fourni une importante moisson de résultats relatifs aux matières organiques découvertes dans les poussières interplanétaires et intersidérales, qui peuvent être désormais analysées grâce à l'extrême précision atteinte par les spectromètres.

Les prélèvements, par sondes spatiales de poussières interplanétaires, d'échantillons de matière sur des comètes et des astéroïdes ont déjà commencé. La première mission vers un astéroïde a été lancée en 2003, avec la sonde japonaise Hayabusa¹ ; elle a rapporté des échantillons prélevés sur une comète. Mais ce beau résultat technique n'a pas apporté d'informations importantes. La sonde européenne Rosetta a beaucoup d'ambitions. Le responsable scientifique, Jean-Pierre Bibring, expose ce projet au chapitre 17.

3. Des molécules prébiotiques dans les poussières cosmiques

Louis Le Sergeant d'Hendecourt, dans le chapitre 6, rappelle la première expérience de chimie prébiotique effectuée par S. L. Miller qui, en 1953 et à partir de molécules simples (CH_4 , NH_3 , H_2O) soumises à des décharges électriques, obtint des acides aminés. Est-ce une clef pour expliquer la présence de matières organiques dans l'espace ? Sur la Terre ? Telle est la question à laquelle l'astrochimie essaie de répondre. Depuis lors, cette discipline connaît un développement rapide (il suffit de consulter la bibliographie de

¹ https://fr.wikipedia.org/wiki/Hayabusa_%28sonde_spatiale%29

l'article pour s'en assurer). Depuis lors, les recherches ont mis en évidence la formation de glaces dites « sales » observées largement dans les régions de formation d'étoiles et les comètes dans notre Système solaire. Elles constituent les véhicules privilégiés de la complexité moléculaire vers les planètes internes tel que cela a pu être le cas pour la Terre primitive.

Une autre voie est la recherche des conditions physiques auxquelles la Terre a été et est soumise. Y a-t-il là une explication de la vie sur Terre ? Pour le moment, la question est posée mais est sans réponse.

Il décrit l'histoire des découvertes dans l'astrochimie galactique, c'est-à-dire dans l'espace intersidéral. C'est une science très récente, dont les progrès ont été marqués par les développements de la spectrométrie : spectroscopie millimétrique d'abord, puis infrarouge.

Les molécules détectées sont d'une grande variété, plus de 100, et d'une assez grande complexité, jusqu'à 10 atomes dans le tableau qu'il en donne. Il faut noter que lorsque le nombre d'atomes est élevé, la détection perd de la précision. Ces molécules forment des nuages très vastes (souvent plusieurs milliers de parsecs). La formation de ces molécules, dans un gaz de faible densité et à très basse température (environ 10 K), ne peut sans doute se produire que grâce à la présence d'agglomérats solides de très petite taille. Ces poussières microscopiques, résidus de la formation initiale de la Voie lactée, ou d'explosions d'étoiles, sont susceptibles d'adsorber des molécules minérales peu complexes (à base d'hydrogène, de carbone, d'azote et d'oxygène essentiellement). Ces molécules peuvent alors s'agrérer pour former des molécules plus complexes. Il faut constater à ce niveau que la formation de composés prébiotiques est une observation quasiment banale.

Louis Le Sergeant d'Hendecourt évoque pour finir les conditions qui ont pu favoriser l'apparition de la vie sur Terre. Le scénario selon lequel des quantités considérables de matériaux prébiotiques et d'eau ont été apportées sur Terre par des météorites jouit aujourd'hui d'une grande faveur. Mais, pour Louis Le Sergeant d'Hendecourt, ce n'est qu'une hypothèse et l'hypothèse de l'origine essentiellement terrestre de l'apparition de la vie ne doit pas être écartée.

4. La complexité organique dans les météorites

La météorite de Murchison est un des objets les plus étudiés dans ce domaine, en raison de l'intérêt de la matière organique insoluble (MOI). Cette matière organique peut aussi contenir des signatures extraterrestres et fournir des informations sur l'histoire du Système solaire. Sylvie Derenne nous décrit ses travaux sur l'analyse fine de la matière organique insoluble afin de déterminer sa structure chimique au niveau moléculaire.

- Les météorites carbonées sont les objets les plus primitifs du Système solaire et contiennent des quantités substantielles de MOI. L'intérêt de l'étude de cette MOI (souligné par une solide liste de références) réside dans le fait qu'elle peut fournir des informations sur l'histoire du Système solaire et contenir des signatures extraterrestres.

- Les auteurs décrivent les méthodes fines d'analyse utilisées, analyse qui débouche sur une connaissance approfondie de la structure moléculaire de la MOI. Ils en présentent de nombreuses conséquences.

4.1 Des investigations d'une grande subtilité

Les études de météorites donnent des informations précieuses, en attendant la recherche *in situ* par sondes spatiales. Il s'agit d'investigations effectuées sur des fragments d'une chondrite tombée en Australie en 1969.

En annexe 4, on trouvera une classification des astéroïdes du Système solaire qui explique l'intérêt porté aux chondrites.

On note bien les grandes performances des instruments et le raffinement des analyses qui permettent de donner l'ensemble des structures moléculaires rencontrées sur l'objet étudié, sans aucun risque de dégradation lors des mesures.

Après que de premières investigations ont révélé la présence d'une grande variété d'acides aminés, les analyses de Sylvie Derenne et François Robert apportent une grande quantité d'informations qualitatives et quantitatives sur la structure chimique des matières organiques insolubles au niveau moléculaire, ce qui a conduit à un modèle statistique pour ces structures moléculaires.

4.2 Le problème du taux de deutérium dans l'hydrogène

Ces chercheurs ont constaté en outre que le taux de deutérium dans l'hydrogène était lié à l'intensité de la liaison C-H, ce qui a été confirmé par expérimentation, et apporte un élément important dans le débat sur la présence de deutérium dans les composés hydrogénés, question aussi au centre du débat sur l'origine de l'eau terrestre. Les travaux de Epstein et Robert sont présentés en annexe 2. Le titre de l'annexe annonce leur importance.

5. La précision méthodologique

Une étude méthodologique de la chimie sidérale est présentée par Valentine Wakelam (cf. chapitre 8). La matière interstellaire est constituée d'un mélange de gaz et de poussières qui, par accrétion, forme les étoiles et les planètes. Il est donc primordial

d'en connaître non seulement la composition mais encore d'en déterminer l'évolution, d'expliquer la complexité moléculaire qui en résulte ; c'est l'objet de l'astrochimie. Valentine Wakelam détaille un modèle chimique prenant en compte les processus de réaction en phase gazeuse, en montre la complexité, et procède à la comparaison entre les modèles et l'observation. La phase suivante, le couplage entre la chimie en phase gazeuse et à la surface des grains, constitue un domaine de recherche d'avenir.

Valentine Wakelam a orienté ses recherches sur la précision des mesures concernant les fréquences et la stabilité des réactions chimiques qui se produisent dans les nuages de particules, selon leur densité, leur température et, par suite, de l'exposition des molécules aux rayonnements puissants : UV, X, et cosmiques. Les protocoles qu'elle a mis au point pour la collaboration efficace des astrophysiciens et des physico-chimistes ont été primés au niveau européen.

Elle a étendu son domaine de recherche aux processus d'agglomération de molécules des nuages interplanétaires (ou interstellaires) au contact des grains de matières solides, le plus souvent microscopiques, qui sont omniprésents dans l'espace. Ces interactions, de type généralement électrostatique (forces de Van der Waals) ont des effets réciproques et contribuent à complexifier les réactions. Ces recherches conduisent inéluctablement à l'étude des processus chimiques à l'œuvre dans les disques protoplanétaires. L'importance, pour le développement des structures moléculaires de grande dimension, des forces faibles (liaisons H, liaisons ion et forces de Van der Waals –adsorption, désorption– est exposée dans l'annexe 3.

6. Toute la chimie prébiotique à partir de la formamide

Dans le chapitre 9, Raffaele Saladino donne le détail de la formation de molécules complexes à partir de la formamide qui apparaît être le précurseur privilégié de ces structurations. Cette présentation éclaire les résultats obtenus par Ernesto Di Mauro (cf. chapitre 14).

Comment la vie est-elle apparue sur la Terre (voire sur des planètes semblables) ? Raffaele Saladino relate que les expériences faites en laboratoire établissent qu'on peut supposer que les premiers processus prébiotiques ont eu lieu à partir de composés chimiques élémentaires en présence de sources d'énergie appropriées. Dans ce schéma, la formamide (NH_2CHO) (substance présente partout dans l'univers et qu'on peut former aisément à partir de mélanges d'oxydes de carbone, de l'azote ou d'ammoniac, autant dans des conditions spatiales que terrestres) joue le rôle de précurseur chimique pouvant contribuer à de nombreuses synthèses en présence de minéraux.

Raffaele Saladino montre que toutes sortes de molécules minérales (oxydes métalliques en particulier) sont des catalyseurs pour de grandes structures organiques qui peuvent se développer, dès lors, dans des conditions très larges de température et de

pression. Ces catalyseurs peuvent favoriser de manières très variées les structurations moléculaires qui se forment à partir de la formamide, si bien qu'on peut imaginer des scénarios très variés dans la production de matériel prébiotique. Il décrit le phénomène peut-être le plus intéressant dans ce foisonnement complexe : la stabilité des grandes molécules est loin d'être assurée ; elles sont soumises à des chocs, à des impulsions énergétiques, à des chocs thermiques. Mais elles rentrent aussi dans un cycle de destruction-ré-génération dont la formamide elle-même est le pivot. La formamide, en effet, est soumise à dégradation, et ses résidus la reconstituent pour relancer un cycle de structurations complexes. Ces phénomènes sont largement favorisés par des propriétés catalytiques gouvernées par les forces de Van der Waals (cf. annexe 3). Raffaele Saladino appelle cela le cycle de la vie moléculaire.

Le comité de lecture de l'AEIS

6

Astrochimie galactique et l'apparition de la complexité moléculaire organique dans le milieu interstellaire

Louis Le Sergeant d'Hendecourt

IAS-CNRS-UPS, Astrochimie et Origines,
Campus d'Orsay, Bât. 121, 91405 Orsay, France

I. Evolution vers la complexité moléculaire dans notre Galaxie

Dans la communauté astrophysique, l'idée que la complexité moléculaire organique est liée à l'origine de la vie, telle que nous la connaissons sur notre Terre, est fortement ancrée dans la démarche scientifique moderne. On peut situer cette modernité au moment de la première expérience de Miller [1] en 1953 qui connaît un extraordinaire retentissement en tant que première expérience de chimie prébiotique. En effet, des ingrédients moléculaires relativement simples et plausibles dans l'atmosphère supposée réductrice de la Terre primitive (CH_4 , NH_3 , H_2O), placés dans cette expérience dans un réacteur chimique, en y apportant de l'énergie sous forme de décharges électriques (éclairs) se sont révélés capables de « fabriquer » de la complexité moléculaire avec en particulier des briques élémentaires de la matière vivante telles que les acides aminés. Ce concept prometteur, basé sur une approche plutôt empirique ne déboucha malheureusement pas sur la compréhension des mécanismes intimes du passage de l'inerte au vivant, très probablement en raison de l'extrême complexité des réseaux chimiques supposés mais aussi parce que les conditions initiales sur la planète Terre restent toujours assez mal connues. Ainsi une atmosphère réductrice reste une hypothèse non totalement validée alors qu'une atmosphère neutre (CO_2), voire légèrement oxydante, ne permet pas de reproduire aussi facilement cette expérience. Cependant, le développement de l'astrochimie avec les découvertes des premières molécules, CH et CH^+ à la fin des années 30, puis surtout CO et NH_3 dans le milieu des années 60, ont marqué les esprits : dans un environnement réputé « vide », froid et très inhospitalier, contenant au mieux quelques atomes ou ions. Il devenait donc possible, grâce aux progrès de la technique en radioastronomie millimétrique de détecter puis de cartographier des molécules, molécules de plus en plus complexes et ce, sur des

échelles spatiales considérables, les nuages moléculaires, dont la dimension (plusieurs dizaines de parsecs) et la longévité (plusieurs millions d'années d'existence) autorisaient de fait, une évolution chimique et une importance certaine à la chimie dans ces milieux à priori hostiles.

2. Les grains interstellaires et leur importance dans l'évolution chimique

Avant même la découverte des premières molécules interstellaires, l'analyse de la lumière d'étoiles distantes avait montré que celles-ci paraissaient plus « rouges » que les étoiles de même type spectral mais proches. Des études soigneuses sur la taille et la magnitude apparente des amas globulaires [2] à différentes distances furent interprétées comme étant dues à la présence de poussières qui étaient capable d'absorber et de diffuser sélectivement la lumière des étoiles qui traversait ces nuages de poussière. Cette diffusion sélective de type diffusion de Rayleigh favorise en effet une diffusion dans la partie bleue du spectre et donc le rougissement apparent de la lumière provenant d'étoiles lointaines. Dans les années cinquante, les travaux d'Oort et Van de Hulst [3] montrèrent l'importance présumée du rôle de la poussière pour la formation de molécules et précisaien, sur un plan physique, la notion de taille de celle-ci, une taille comparable à la longueur d'onde de la lumière visible et déterminée grâce à l'analyse de l'extinction sélective et de la polarisation de la lumière des étoiles en fonction de leur distance, polarisation due en outre à la présence de grains non sphériques et alignés dans le champ magnétique galactique. La composition chimique de la poussière ne peut guère se refléter dans ces études optiques et il faudra attendre les années quatre-vingt-dix pour que l'astronomie infrarouge permette de commencer à cerner la composition chimique de ces poussières composées de grains minéraux [4] (des minéraux parfaitement connus sur Terre), de grains carbonés [5], et de mélanges (graphite, silicates, carbone amorphe) ayant donné lieu à des modèles expliquant cette extinction [6]. D'autres grains plus exotiques tels que le graphite et les oxydes, grains formés à très haute température dans les enveloppes d'étoiles, principalement dans leur phase de géante ou supergéante AGB [7] ont également été proposés avec certains succès d'un point de vue de l'observation. Il faut noter aussi, qu'avec la découverte de molécules en phase gazeuse (e.g.CO), les années soixante-dix/quatre-vingt ont vu le développement de codes chimiques sophistiqués contenant de nombreuses réactions chimiques entre différentes espèces (atomes, ions atomiques et moléculaires, radicaux, molécules), à l'équilibre puis dépendant du temps pour tenter d'obtenir des molécules (observées ou non) et leurs abondances, très difficilement mesurables compte tenu des méthodes utilisables en radioastronomie. Le rôle des grains n'y était pas considéré et seul les réactions à basse température (10 K) et dites sans barrière énergétique (donc exothermiques), appelées réactions ions-molécules, puis neutres-neutres, dont les taux étaient parfois mesurés en laboratoire (mais finalement assez peu, eu égard au nombre d'espèces considérées) permettaient de construire des réseaux chimiques plausibles qui reproduisaient qualitativement la chimie des milieux appelés transparents, une chimie largement dominée par le rayonnement ultraviolet ambiant, présent dans les milieux de densité moyenne [8] ou dans les nuages moléculaires plus denses [9]. Cette chimie s'exprime assez bien dans le Tableau I qui représente l'ensemble des molécules observées à ce jour (à quelques unités près de découverte plus récente).

Quelques réflexions sont utiles concernant ce tableau: contrairement à ce qu'affirment les radioastronomes, la complexité moléculaire est plutôt limitée (bien entendu, on doit garder à l'esprit que les spectres de rotation moléculaire deviennent eux de plus en plus complexes et que la limite de confusion des raies est atteinte assez vite, introduisant un biais sensible dans la détection de molécules plus grandes). Toutefois, l'abondance relative de ces molécules décroît rapidement avec le nombre d'atomes, pratiquement d'un ordre de grandeur pour un atome supplémentaire. En effet, les réactions en phase gaz sont des réactions à deux corps dans des milieux où la densité et la température du gaz sont très basses ($n_H = 10^{36} \text{ cm}^{-3}$, $T \sim 10/30 \text{ K}$) ce qui ne favorise pas les collisions et la croissance des molécules. D'autre part celles-ci ne sont pas protégées des voies de destruction que constituent les particules énergétiques et le rayonnement ultraviolet, à la différence de la chimie en phase solide où la densité locale de réactifs est celle d'un solide et où l'énergie de l'irradiation peut être plus facilement dissipée par le grain lui-même sous forme de chaleur. Finalement, la fragilité intrinsèque de ces molécules est bien révélée par l'échec, jusqu'à ce jour de la détection de la glycine, le plus simple des acides aminés, vraisemblablement en raison de sa rapide dissociation en phase gaz [10].

Par ailleurs, cette approche considérant exclusivement la phase gaz souffre d'un écueil important. En effet, la chimie dans cette phase, dans les nuages moléculaires, démarre quasi-exclusivement par la présence de la molécule de dihydrogène (H_2). Cette molécule est ionisée par le rayonnement cosmique (1-10 MeV) qui pénètre les nuages pour donner H_2^+ qui se protonise avec des atomes d'hydrogène pour former H_3^+ , un ion moléculaire qui se trouve être un nœud dans la formation moléculaire ultérieure. H_3^+ réagit avec les atomes plus lourds pour donner OH puis ultérieurement H_2O et il en va de même pour les autres atomes (N, C...). Or la molécule de H_2 ne possédant pas de moment dipolaire permanent et ayant une énergie de liaison très élevée (4,5 eV), est strictement impossible à former en phase gazeuse, un troisième corps étant nécessaire pour absorber l'énergie de la réaction. Ce troisième corps, comme expliqué en 1966 dans un article prémonitoire par des physiciens néerlandais [11], c'est justement la surface des grains sur laquelle H peut être adsorbé un certain temps, un autre atome d'hydrogène parcourant cette surface par effet tunnel essentiellement et la réaction $H+H - H_2$ a lieu, H_2 étant alors systématiquement désorbé du grain vu sa température (10/20 K). Sans formation de H_2 , pas de molécules dans ces nuages, mais avec la surface très froide des grains, la formation de manteaux moléculaires d'hydrures simples (H_2O , CH_4 , NH_3) constituant une sorte de manteau moléculaire autour de coeurs de silicates ou de carbone très froids (15 K) avait été postulée par Oort et Van de Hulst dans un article théorique en 1946 [3].

Ces manteaux de glaces « sales » (parce que non exclusivement constitués d'eau) vont être progressivement mis en évidence, grâce aux premières expériences de laboratoire dont la technologie (la spectroscopie infrarouge), permet une comparaison directe avec les observations terrestres tout d'abord, puis à partir de satellites en orbite pour s'affranchir de l'atmosphère (IRAS, ISO, Spitzer). La glace d'eau amorphe était mise en évidence dans l'objet moléculaire phare, la nébuleuse d'Orion-KL par A. Léger en 1979 [12] grâce au spectre de la glace amorphe en laboratoire puis la mise en évidence de la glace de CO en 1983 [13] déboucha rapidement sur la mise en évidence de molécules à l'état solide, des solides appelés de Van der Waals, les molécules restant identifiables individuellement, reliées aux autres par des forces de

Tableau 1. Liste des molécules observées en radioastronomie millimétrique. Bien que les molécules identifiées en phase gaz dominent la liste, celles indiquées en gras correspondent à des molécules aussi identifiées en phase solide (glaces), bien plus abondantes dans cette phase solide que dans la phase gaz (voir la discussion ci-dessus) <http://www.pcmi.univ-montp2.fr/>

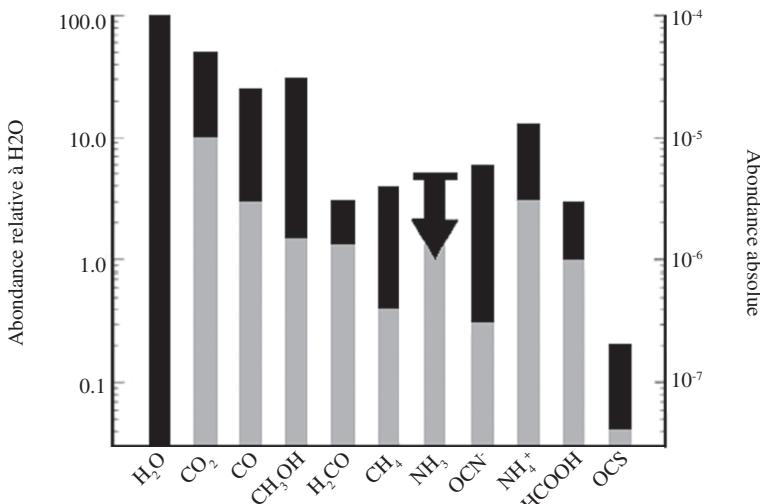


Figure 1. Abondances des glaces interstellaires observées, relativement à H_2O . L'extension en noir indique les variations observées d'une source à l'autre. Le méthanol est très abondant (30% de l'eau dans les étoiles massives). L'ammoniac, sur cette figure est donné comme une limite supérieure mais un travail plus récent [16] indique que l'azote des glaces interstellaires est principalement sous forme d'ammoniac et représente environ 7% de l'eau, une valeur compatible avec l'abondance cosmique de l'ammoniac relative à celle de l'eau. Figure tirée de Dartois [15].

type électrostatiques (liaison hydrogène, polarisabilité en milieu solide). Si le nombre de ces molécules peut paraître quantitativement petit (tout au plus une dizaine), il ne faut cependant pas se tromper sur l'importance de ces glaces. Tout d'abord, leur abondance totale (sur une ligne de visée donnée) est extrêmement élevée comparée aux molécules en phase gaz (deux ou trois ordres de grandeur au minimum), l'état solide favorise un certain équilibre thermodynamique, ce qui n'est pas le cas de la phase gaz fortement hors d'équilibre du fait de la rareté des collisions et finalement, la spectroscopie infrarouge seule est assez limitée en sensibilité et capacité de détection de molécules dès qu'une certaine complexité est atteinte. Ainsi la molécule de méthanol se révèle très abondante autour des étoiles massives, mais son spectre infrarouge reste très difficile à interpréter sans passer par des expériences sophistiquées de simulation en laboratoire [14]. Un recensement des glaces observées est donné par la figure 1 tirée d'un article de revue sur l'héritage du satellite ISO [15]. Une telle difficulté se retrouve pour la molécule d'ammoniac qui a longtemps échappé aux observateurs, dans son état solide, jusqu'aux travaux du satellite Spitzer [16]. Notons d'ailleurs que, selon ces auteurs, l'azote fixé dans les glaces se trouve majoritairement sous forme d'ammoniac, une molécule plus intéressante sur un plan prébiotique car permettant l'apparition d'amides et d'amines (NH_3 , NH_2) nécessaires dans la construction des acides aminés par exemple.

3. Evolution des glaces inter/circumstellaires sous l'effet d'apport énergétique : formation de résidus organiques

Les glaces interstellaires se retrouvent dans les environnements prestellaires et sont donc soumises à du rayonnement énergétique (ultraviolet, rayons cosmiques) qui vont de fait progressivement modifier leur composition chimique. Il s'agit en fait d'une chimie radicalaire qui peut être assez facilement simulée dans ses grandes lignes en laboratoire en utilisant la méthode classique et plutôt ancienne, d'isolement d'espèces réactives en matrice de gaz rare, une technique largement développée et appliquée à l'astrophysique de laboratoire [17]. Un mélange de gaz est déposé de manière contrôlée sur une surface froide (10/77 K au choix), une glace se forme et son irradiation UV (ou par des protons de l'ordre du MeV) entraîne la coupure des liaisons chimiques, la diffusion des réactifs, la recombinaison aléatoire de celles-ci et la formation de molécules plus complexes, peu observables en infrarouge compte tenu de la confusion spectrale que l'on rencontre dans ces mélanges. Toutefois, la molécule de CO₂ à l'état solide était largement prédictive dans les expériences de simulation dédiées où chimie du gaz et des grains étaient considérés comme interagissant constamment [18, 19, 20], molécule qui a été effectivement mise en évidence dans les spectres LRS de IRAS en 1989[21], puis détectée à grande échelle par ISO à partir de 1995 [22]. Or cette molécule est difficile à former dans les milieux gazeux froids car la réaction CO+O → CO₂ possède une barrière d'activation importante. Dans un milieu solide, les réactions de type radicalaire associées à la diffusion/migration des espèces réactives permettent la formation de nouvelles molécules telles CO₂, H₂CO, CH₃OH... En 2004, Raunier et al [23] proposèrent la détection dans une source protostellaire NGC 7538 IRS9 de formamide et d'urée, deux molécules aisément détectables dans les spectres « propres » et de bonne qualité obtenus en laboratoire. Si cette détection peut être contestée, le mode opératoire (irradiation des glaces et réchauffement partiel dans les coeurs moléculaires chauds) fait peu de doute et permet d'établir un scénario vers une complexité moléculaire très grande que l'on va retrouver dans les résidus organiques produits en quantité lors de la phase de réchauffement de ces glaces irradiées. La détection de ce résidu organique dans le milieu interstellaire est malheureusement impossible compte tenu de la présence dominante du spectre des glaces simples présentes sur la même ligne de visée, à l'exception toutefois d'une seule source (Monoceros IRS3) qui montre très bien le réchauffement local de ces glaces et l'apparition d'espèces moléculaires très spécifiques de ce qui est observé dans ce type d'expériences [24]. En quelque sorte, on peut supposer que le résidu organique obtenu en laboratoire pourrait constituer un modèle de ce qui est présent sur les grains dans les glaces des nuages moléculaires irradiées juste avant que ces résidus organiques ne soient intégrés dans les planétismaux et corps parents des météorites dont la complexité organique n'est plus à démontrer [25,26].

A la fin du cycle de réchauffement des glaces irradiées en laboratoire, à 300 K, la présence d'un résidu organique complexe est toujours constatée, correspondant à une matière organique pour l'essentiel soluble dans l'eau et représentant généralement un dix-millième de la masse des gaz déposés, cette valeur n'étant pas nécessairement une constante, y compris dans un environnement extraterrestre. Elle peut en effet dépendre

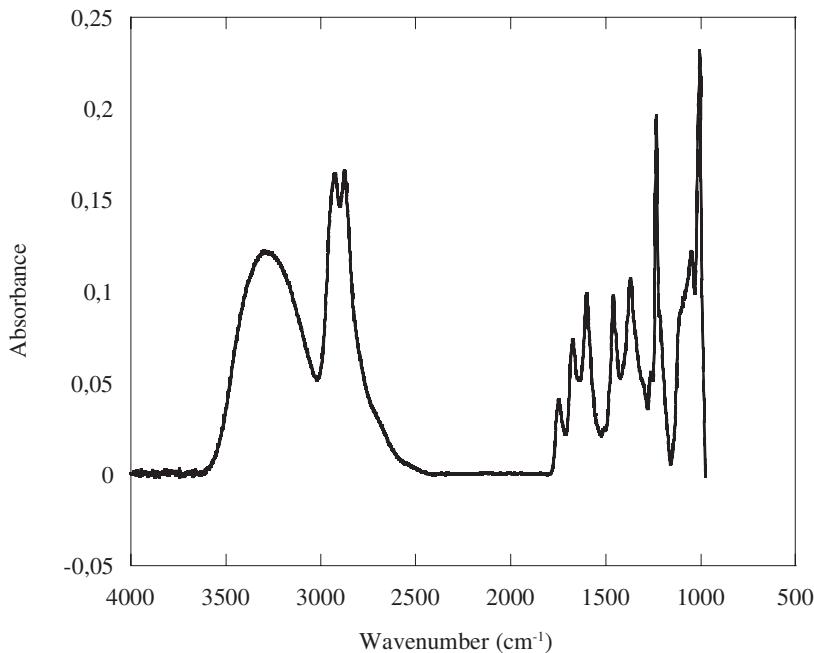


Figure 2. Spectre infrarouge d'un résidu organique typique obtenu à partir de l'irradiation en laboratoire d'analogues de glaces interstellaires après évaporation de ces glaces à la température ambiante [28].

des conditions expérimentales qui cherchent à reproduire qualitativement l'irradiation subie par les grains interstellaires dans ces nuages moléculaires mais il faut souligner que cette approche est empirique et que le scénario précis n'est pas encore finalisé. Dans ce type d'expériences, développées aussi bien à Leiden aux Pays-Bas d'où elle est originaire qu'à la NASA-AMES aux Etats-Unis, mais aussi largement en France dans au moins trois laboratoires différents, la principale information provient du spectre infrarouge in-situ toujours installé sur le cryostat. Un exemple de spectre est donné en figure 2 et l'explication des bandes d'absorption (voir tableau 2), en termes de transition dues à des groupements moléculaires, montre la présence de nombreuses fonctions (acides, esters, cétones, amines, amides...) qui ne sont pas sans rappeler ce qui est mis en évidence dans la matière organique soluble des météorites carbonées primitives [25] qui cependant présente des structures plus complexes en raison de la présence de minéraux et de métamorphisme aqueux ou thermique subis par la matière organique sur les corps parents. Dans les échantillons de laboratoire, une seule molécule a été identifiée par spectroscopie infrarouge, telle quelle (libre), le HMT, Hexa-Methyl-Tetramine identifiée en 1995 [27] mais l'abondante présence de HMT est confirmée dans toutes les expériences où le méthanol est présent, le méthanol étant par ailleurs une molécule très abondante dans certaines glaces interstellaires. A ce jour il n'a pas été possible d'isoler le HMT dans une météorite, vraisemblablement en raison de sa réactivité trop grande, ce qui permettrait

Tableau 2. Identifications proposées des bandes infrarouges (*chromophores chimiques*) observées pour le résidu organique complexe, un résidu intégralement solide dans l'eau.

Position (cm⁻¹)	Position (μm)	Carrier (mode)
3600 - 3000	2.78 – 3.33	alcohols, carboxylic acids (O-H stretching) and amines (N-H stretching)
2957 - 2945	3.38 - 3.40	carbon chains (CH ₃ stretching)
2926 - 2923	3.42	HMT (2n ₁₉ , n ₂ + n ₁₉) and aliphatic chains (asym. CH ₂ stretching)
2875 - 2872	3.48	HMT (CH ₂ stretching n ₁₈), NH ₄ ⁺ (2 ν ₄) and aliphatic chains (sym. CH ₂ stretching)
2150*	4.65	nitriles (C≡N stretching) ?
1750 - 1745	5.71 - 5.73	esters (C=O stretching)
1675 - 1665	5.97 - 6.00	amides (C=O stretching)
1603 - 1599	6.24 - 6.25	amides, NH ₂ including POM
1461 - 1458	6.84 - 6.86	NH ₄ ⁺ (ν ₄) and methyl and methylene groups (C-H bending)
1370	7.3	HMT (C-H scissoring)
1235 - 1233	8.1	HMT (C-N stretching n ₂₁)
1006	9.94	HMT (C-N stretching n ₂₂)

d'établir un lien plus ferme entre cette chimie décrite ci-dessus et l'origine de la matière organique dans les objets (ou certains objets) de notre Système Solaire.

La principale méthode d'analyse de cette matière organique, fait appel à des méthodes séparatives de chimie analytique telles que la GC-MS (chromatographie phase gazeuse couplée à la spectrométrie de masse) et l'HPLC-MS (chromatographie en phase liquide à haute performance couplée à la spectrométrie de masse) ainsi que différentes méthodes utilisant la spectrométrie de masse à haute résolution. La première méthode a beaucoup été employée pour analyser la matière organique des météorites. Elle fait appel à des tech-

niques très sensibles mais éprouvées : l'échantillon subit tout d'abord une hydrolyse acide, destinée à casser les liaisons des macromolécules et dégager des molécules libres (qui sont aussi présentes par ailleurs dans l'échantillon) qui sont ensuite analysées dans les colonnes de rétention et dont l'analyse se complète par la spectrométrie de masse. La comparaison des résultats obtenus se fait par l'utilisation de standards qui permettent l'identification des molécules présentes : on ne peut identifier bien évidemment que les molécules dont on possède les standards. Le principal résultat est la découverte de très nombreux acides aminés abiotiques ainsi que démontré indépendamment par deux groupes sur des expériences similaires en 2002 [29,30]. Nuevo et al [31], ont montré, en utilisant la méthode d'hydrolyse sur une partie d'un échantillon, que les mêmes acides aminés étaient présents dans la partie hydrolysée et à l'état libre dans la partie non hydrolysée, démontrant ainsi la validité, parfois contestée, de cette approche. Plus récemment Meinert et al [32] ont enregistré 16 acides aminés et di-aminoacides ainsi qu'un certain nombre de molécules non identifiées car non présentes dans les standards. Dans des échantillons similaires, a été révélée la présence d'une molécule particulière, l'hydantoïne [33], une molécule catalyseur de la formation d'oligopeptides ainsi que postulé dix ans plus tôt par Commeyras et son groupe [34]. De très nombreuses molécules considérées comme prébiotiques sont actuellement recherchées dans de tels échantillons, en particulier les oses (polyols aliphatiques ou cycliques) qui jouent un rôle essentiel dans la formation du ribose de l'ARN. De plus, on peut aussi souligner l'obtention de molécules chirales (à partir de glaces par définition achirales) présentant un excès énantiomérique léger (de l'ordre du %) en irradiant ces mélanges de glaces par de la lumière circulairement polarisée [35] que l'on observe dans des régions de formation d'étoiles massives [36]. Finalement, en utilisant une technique de spectrométrie de masse à haute résolution [37], on a récemment montré la présence de matériau macromoléculaire de masse très élevée (m/z de l'ordre de 4000), l'échantillon restant tout de même soluble dans l'eau. La nature de ce « polymère » (improprement appelé polymère puisqu'il ne s'agit pas de la répétition de longues chaînes d'une même entité) est encore très mal connue et fait l'objet de nombreuses études, en particulier pour déterminer son possible rôle ou non, dans la chimie prébiotique.

Ainsi donc, l'évolution chimique de la Galaxie conduit à la synthèse des éléments primordiaux, parmi lesquels les plus abondants (H, O, C, N, S, P) et les plus disponibles. Ces éléments ne rentrent pas facilement dans la constitution des minéraux, simplement parce que leurs abundances cosmiques sont nettement supérieures à celles du groupe Si, Mg, Fe, Al, Ca, formant les silicates (comprenant environ 1/3 de l'oxygène total disponible) permettant ainsi à l'oxygène libre de former de l'eau en abondance, retrouvée sous forme de glace dans les nuages moléculaires. La même chose se passe pour le carbone : les carbures de silice (SiC) et de titane (TiC) sont à une abondance faible comparée au carbone lui-même. Ce carbone se retrouve sous forme de CO, une molécule thermodynamiquement très stable et selon la nature de l'enveloppe ($C/O > 1$ ou $C/O < 1$), des grains de carbone purs seront formés, avec de plus des hydrocarbures polycycliques aromatiques solubles (HAPs) largement observés dans le milieu interstellaire (MIS). Si ça n'est pas le cas, le CO restant sera dissocié dans le MIS et rejoindra les éléments propres à fabriquer d'abondantes quantités de glaces sales (CH_4 , CH_3OH , CO, HCO, H_2CO) avec l'aide des grains ou sans leur aide (réactions ions-molécules en phase gazeuse) mais qui se condenseront nécessairement sur ces grains froids.

4. Le cycle de la matière solide dans la Galaxie

Le milieu interstellaire (MIS) est un milieu très mélangé et constamment rempli par les débris d'étoiles en fin de vie (gaz enrichi en éléments résultant de la nucléosynthèse, grains formés dans les enveloppes stellaires pour les étoiles en phase AGB, explosions de supernovae). Les abondances élémentaires de la photosphère solaire montrent l'abondance relative des éléments du tableau de Mendeleïev il y a 4,556 Gyrs (4,556 milliards d'années). Il est d'ailleurs remarquable de noter que dans la composition des météorites très primitives telles qu'Orgueil, une analyse montre très peu de divergence avec les abondances photosphériques (sauf pour l'hydrogène, l'hélium et un peu pour les éléments légers comme le carbone ou l'oxygène) ce qui accrédite particulièrement bien l'idée d'un scénario de formation simultanée ou quasi simultanée du Soleil, de son disque protoplanétaire et des débris (astéroïdes, comètes) qui ont très peu évolué depuis ce temps et que l'on retrouve sur Terre sous forme de météorites. De l'étape de leur formation dans les enveloppes interstellaires, de leur injection dans le MIS, de leur séjour et leur destruction partielle dans ce MIS, ces poussières rentrent dans les nuages moléculaires où elles se reconcentrent pour influencer très fortement la chimie du gaz avec, en premier chef, la formation de la molécule de H₂ (d'ailleurs essentielle à l'effondrement adiabatique de l'étoile sous forme de Soleil dans notre propre système). L'ensemble de ces processus est très déterministe et la formation de glaces interstellaires a été attestée dans tous les objets protostellaires détectés, même si leur étude spectrale ne se fait que sur un relativement petit nombre de sources brillantes. On peut espérer d'ailleurs de meilleures observations grâce au futur télescope JWST (James Webb Space Telescope) à partir des années 2018 qui devrait permettre d'observer un échantillonnage beaucoup plus grand de ces sources et de renforcer les scénarios d'apparition de matière organique dans les systèmes protoplanétaires, en ne se limitant pas qu'à notre propre Système, le seul pour lequel nous ayons accès, en laboratoire, à cette précieuse matière primitive non évoluée. A la fin de la formation planétaire, de nombreux débris restent présents, les comètes en particulier qui vont jouer un rôle essentiel à l'apport à la surface de planètes telluriques de matière organique complexe et évoluée et bien sûr d'eau (absolument nécessaire aux réactions liées à l'émergence de la vie). Ce cycle en est bien un : à la fin de sa vie, le Soleil se terminera en naine blanche mais des étoiles légèrement plus grandes passeront par une phase AGB comprenant le relargage de poussières quasi identiques, même si, sur des milliards d'années, la fraction de la photosphère des étoiles s'enrichit constamment (mais lentement) en éléments lourds. Ce cycle est décrit dans la figure 3.

5. Conclusion

Dans notre Galaxie, la chimie interstellaire est la résultante de l'astration (nucléosynthèse stellaire) qui a produit, avec des abondances relatives bien déterminées, tous les éléments du tableau de Mendeleïev. Cette chimie est le produit d'une interaction gaz-grains où les grains jouent un rôle déterminant par la formation essentielle du dihydrogène (H₂), la « mère » de toutes les molécules observées dans le MIS, puis en étant le siège de la fabrication de gigantesques quantités de glaces simples et sales contenant de l'eau mais aussi du méthanol, de l'ammoniac et du monoxyde de carbone. Ces grains avec leurs

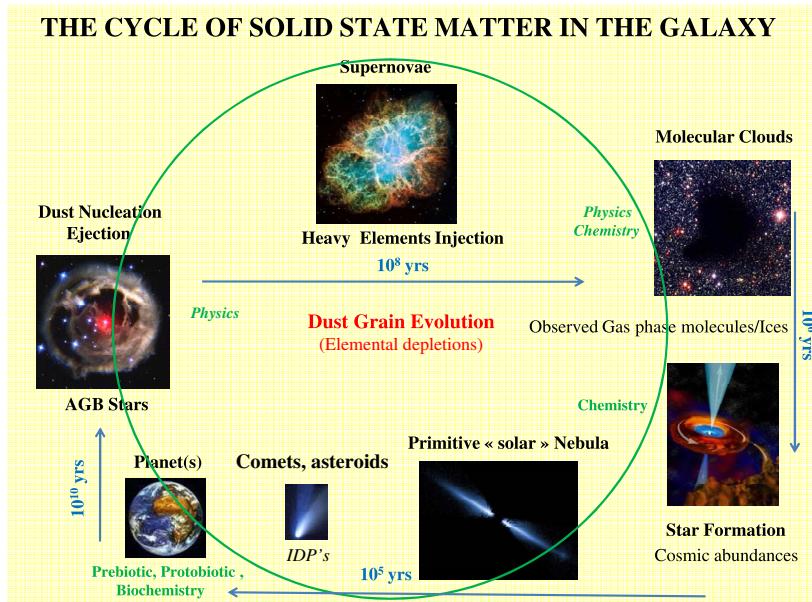


Figure 3. Evolution de la matière solide dans notre Galaxie. Ce dessin s'explique par lui-même et les échelles de temps approximatives y sont données. On peut noter le très long temps évolutif de la Terre elle-même, imposé en quelque sorte par l'évolution très lente de notre Soleil lui-même [38].

manteaux de glace, protègent la complexification moléculaire qui est le résultat d'une chimie radicalaire due à l'irradiation des glaces par du rayonnement UV et des rayons cosmiques omniprésents dans le MIS. Cette étape de complexification est partiellement reproductible en laboratoire et les points de comparaison entre la matière organique soluble (SOM) produite par ces méthodes et la SOM des météorites suggère qu'une partie au moins de cette SOM a pour origine la transformation des glaces inter/circumstellaires, tout en n'excluant évidemment pas une chimie différente dans les disques et surtout dans les corps parents des météorites qui ont été bien souvent sujets à une action de type métamorphique (aqueux et/ou thermique). Les expériences d'irradiation menant à des molécules évoluées, considérées comme potentiellement prébiotiques, peuvent être vues comme une sorte de généralisation cosmique de l'expérience de Miller car elles ne nécessitent pas la présence d'une planète pour obtenir ces molécules complexes et surtout ces formes macromoléculaires encore non élucidées. Par ailleurs, cette généralisation « cosmique » se justifie parce que ce type de réactions, dans les glaces interstellaires, est à l'œuvre dans pratiquement tous les objets protostellaires observés à ce jour dans la Galaxie, même si leur nombre n'est pas, pour des raisons observationnelles, très élevé (probablement moins d'une centaine d'objets proposent des spectres exploitables, les autres étant inaccessibles à l'observation.)

Il faut bien se garder toutefois d'un certain « triomphalisme » qui suggère que là se trouve la source unique de la chimie prébiotique une fois la planète tellurique ensemencée par les météorites contenant ces molécules « briques » de la vie sur Terre. En effet, si Oro en 1961 [39] a été le premier à postuler l'idée selon laquelle les ingrédients chimiques et surtout moléculaires de la vie provenaient sans doute des comètes et astéroïdes, ce que nous avons cherché ici à démontrer, cette hypothèse reste une hypothèse parmi d'autres et n'a pas encore reçu de confirmation réellement directe. En effet, la matière organique exogène est certes privilégiée mais une matière organique endogène, suivie d'une chimie atmosphérique complexe dans l'atmosphère de la Terre reste toujours une possibilité. Par ailleurs, la chimie invoquée dans la génération de matière organique abiotique et décrite ici, ne présente pas de sélectivité particulière et se traduit par une chimie à l'équilibre thermodynamique, ce qui n'est pas favorable, en l'état, à la transition inerte/vivant qui suppose un état de la matière fortement hors d'équilibre³⁹. Autrement dit, l'organisation (ou plutôt l'auto-organisation) des briques du vivant obéit à des lois précises qui ne sont nullement abordées par les expériences non dirigées de simulation décrites ci-dessus. Si comme suggéré [40, 41, 42], le besoin de réactions autocatalytiques s'avère nécessaire, voire indispensable, en autorisant l'autoréplication et l'auto-organisation de systèmes moléculaires, alors la question qui se pose à nous est celle de l'importance et de la complexité initiale *minimale* de la matière organique présente sur la Terre primitive à un moment donné, celui du passage de l'inerte au (quasi)-vivant. Ce passage est très probablement susceptible d'approches expérimentales qui permettraient de proposer alors les processus objectifs qui ont déterminé l'apparition du vivant sur la Terre et pourquoi pas sur d'autres planètes.

Références

- [1] Miller, S.L., (1953), A Production of Amino Acids under Possible Primitive Earth Conditions, *Science*, **117**, 528-530
- [2] Tumpler, R. J., (1930), Preliminary results on the distances, dimensions and space distribution of open star clusters, *Lick Observatory Bulletin*, **14**, 245-288
- [3] Oort, J. H., van de Hulst, H. C., (1946), Gas and smoke in interstellar space, *BAN*, **11**, 91
- [4] Crovisier, J., Leech, K., Bockelee-Morvan, D., Brooke, T. Y., Hanner, M. S., Altieri, B., Keller, H. U., Lellouch, E., (1997), The spectrum of Comet Hale-Bopp (C/1995 O1) observed with the Infrared Space Observatory at 2.9 AU from the Sun, *Science*, **275**, 1904-1907
- [5] Dartois, E., Muñoz-Caro, G. M., (2007), Carbonaceous dust grains in luminous infrared galaxies. Spitzer/IRS reveals a-C:H as an abundant and ubiquitous ISM component, *Astron. Astrophys.*, **476**, 1235
- [6] Désert, F.-X., Boulanger, F., Puget, J.-L., (1990), Interstellar dust models for extinction and emission, *Astron. Astrophys.*, **237**, 215
- [7] Henning, Th., (2003), ed. In *Astromineralogy*, Springer
- [8] Snow, T. P., Black, J. H., van Dishoeck, E. F., Burks, G., Crutcher, R. M., Lutz, B. L., Hanson, M. M., Shuping, R. Y., (1996), The Translucent Molecular Clouds toward HD 154368. I. Extinction, Abundances, and Depletions, *Astrophys.J.*, **465**, 245

- [9] Herbst, E., van Dishoeck, E. F., *Ann.Rev.Astron.Astrophys.*, **47**, 427-480 (2009)
- [10] Ehrenfreund, P., Bernstein, M. P., Dworkin, J. P., Sandford, S. A., Allamandola, L. J., (2004), The Photostability of Amino Acids in Space, *Astrophys.J.Letters*, **550L**, 95
- [11] Knaap, H. F. P., van den Meijdenberg, C. J. N., Beenakker, J. J .M., van de Hulst, H. C., (1966), Formation of molecular hydrogen on interstellar grain surfaces, *BAAN*, **18**, 256-258
- [12] Léger, A., Klein, J., de Cheveigne, S., Guinet, C., Defourneau, D., Belin, M., (1979), The 3.1 micron absorption in molecular clouds is probably due to amorphous H₂O ice, *Astron. Astrophys.*, **79**, 256-259
- [13] Lacy, J. H., Baas, F., Allamandola, L. J. *et al*, *Astrophys.J.* **276**, L533-L538 (1984)
- [14] Dartois, E., Schutte, W., Geballe, T. R., Demyk, K., Ehrenfreund, P., D'Hendecourt, L., (1999), Methanol: The second most abundant ice species towards the high-mass protostars RAFLG7009S and W 33A, *Astron.Astrophys.*, **342**, L32-L35
- [15] Dartois, E., (2005), *Space Science Reviews*, **119**, 293
- [16] Bottinelli, S., Boogert, A. C. A., Bouwman, J., Beckwith, M., van Dishoeck, E. F., Öberg, K. I., Pontoppidan, K. M., Linnartz, H., Blake, G. A., Evans, N. J., Lahuis, F., (2010), The c2d Spitzer Spectroscopic Survey of Ices Around Low-mass Young Stellar Objects. IV. NH₃ and CH₃OH *Astrophys.J.*, **718**, 1100
- [17] d'Hendecourt, L., Dartois, E., (2001), Interstellar matrices: the chemical composition and evolution of interstellar ices as observed by ISO, *Ac.Spc*, **57**, 669
- [18] Tielens, A. G. G. M., Hagen, W., (1982), Model calculations of the molecular composition of interstellar grain mantles, *Astron.Astrophys.*, **114**, 245
- [19] d'Hendecourt, L. B., Allamandola, L. J., Greenberg, J. M., (1985), Time dependent chemistry in dense molecular clouds. I - Grain surface reactions, gas/grain interactions and infrared spectroscopy, *Astron.Astrophys.* **152**, 130-150
- [20] d'Hendecourt, L. B., Allamandola, L. J., Grim, R. J. A. *et al*. (1986), Time-dependent chemistry in dense molecular clouds. II - Ultraviolet photoprocessing and infrared spectroscopy of grain mantles, *Astron.Astrophys.* **158**, 119-134
- [21] d'Hendecourt, L., Jourdain de Muizon, M., (1989), The discovery of the interstellar CO₂ molecule, *Astron.Astrophys.* **223**, L5-L9
- [22] de Graauw, T., Whittet, D. C. B., Gerakines, P. A., Bauer, O. H., Beintema, D. A., Boogert, A. C. A., Boxhoorn, D. R., Chiar, J. E., Ehrenfreund, P., Feuchtgruber, H.*et al*., (1996), SWS observations of solid CO₂ in molecular clouds., *Astron.Astrophys.*, **315**, L345-L349
- [23] Raunier, S., Chiavassa, T., Duvernay, F., Borget, F., Aycard, J. P., Dartois, E., d'Hendecourt, L., (2004), Tentative identification of urea and formamide in ISO-SWS infrared spectra of interstellar ices, *Astron.Astrophys.* **416**, 165-169
- [24] Schutte, W., Khanna, R. K., (2003), Origin of the 6.85 μm band near young stellar objects: The ammonium ion (NH₄⁺) revisited, *Astron.Astrophys.*, **398**, 1049-1062
- [25] Sephton, M. A., (2002), Composition of soluble organic matter in carbonaceous meteorites, *Nat.Prod.Rep.* **19**, 292

- [26] Schmidt-Kopplin, P., Zelimir, G., Gougeon, R. D., *et al.* (2009), High molecular diversity of extraterrestrial organic matter in Murchison meteorite revealed 40 years after its fall. *PNAS*, **107** (7), 2763-2768
- [27] Bernstein, M. P., Sandford, S. A., Allamandola, L. J., Chang, S., Scharberg, M., (1995), Organic Compounds Produced by Photolysis of Realistic Interstellar and Cometary Ice Analogs Containing Methanol, *Astrophys.J.*, **454**, 327
- [28] Nuevo, M., Bredehöft, J. H., Meierhenrich U. J., d'Hendecourt, L., Thiemann, W. H.-P., (2010), Urea, Glycolic Acid, and Glycerol in an Organic Residue Produced by Ultraviolet Irradiation of Interstellar/Pre-Cometary Ice Analogs, *Astrobiology*, **10**, 745-751
- [29] Muñoz Caro, G. M., Meierhenrich, U. J., Schutte, W. A., Barbier, B., Arcones Segovia, A., Rosenbauer, H., Thiemann, W. H.-P., Brack, A., Greenberg, J. M., (2002), Amino acids from ultraviolet irradiation of interstellar ice analogues, *Nature*, **416**, 403-407
- [30] Bernstein, M. P., Dworkin, J. P., Sandford, S. A., Cooper, G. W., Allamandola, L. J., (2002), Racemic amino acids from the ultraviolet photolysis of interstellar ice analogues, *Nature*, **416**, 401-402
- [31] Nuevo, M., Auger, G., Blanot, D., d'Hendecourt, L., (2008), A Detailed Study of the Amino Acids Produced from the Vacuum UV Irradiation of Interstellar Ice Analogs, *OLEB*, **38**, 37
- [32] Meinert C, Filippi J.-J., de Marcellus P., Le Sergeant d'Hendecourt, L. Meierhenrich, U. J., (2012) *N*-(2-Aminoethylglycine) and amino acids in interstellar ice analogues. *ChemPlus-Chem* **77**:186-191
- [33] de Marcellus, P., Bertrand, M., Nuevo, M., Westall, F., Le Sergeant D'Hendecourt, L., (2011), Prebiotic Significance of Extraterrestrial Ice Photochemistry: Detection of Hydantoin in Organic Residues, *Astrobiology* **11**, 847
- [34] Commeyras, A., Taillades, J., Collet, H. *et al.*, (2004) Formation of oligopeptides under prebiotic conditions: the primary pump, *OLEB*, **34**, 35
- [35] de Marcellus, P., Meinert, C., Nuevo, M., Filippi, J. J., Danger, G., Deboffle, D., Nahon, L., Le Sergeant d'Hendecourt, L., Meierhenrich, U. J., (2011), Non-racemic Amino Acid Production by Ultraviolet Irradiation of Achiral Interstellar Ice Analogs with Circularly Polarized Light, *Astrophys.J.* **727**, L27-L34
- [36] Kwon, J., Tamura, M., Lucas, P. W., Hashimoto, J., Kusakabe, N., Kandori, R., Nakajima, Y., Nagayama, T., Nagata, T., Hough, J. H., (2014), Near-infrared Circular Polarization Images of NGC 6334-V, *Astrophys.J.Letters*, **765**, L6
- [37] Danger, G., Orthous-Daunay, F.-R., de Marcellus, P., Modica, P., Vuitton, V., Duvernay, F., Flandinet, L., Le Sergeant d'Hendecourt, L., Thissen, R., Chiavassa, T., (2013), Characterization of laboratory analogs of interstellar/cometary organic residues using very high resolution mass spectrometry, *GeO.CoA.*, **118**, 184
- [38] Le Sergeant d'Hendecourt, L. (2011), Molecular complexity in astrophysical environments: from astrochemistry to astrobiology?, EPJ web of conferences, Chemistry in Astrophysical Media, AstrOHP 2010, eds. Th. Pino, E. Dartois, 060016p1-p18

[39] Oró, J., (1961), Comets and the Formation of Biochemical Compounds on the Primitive Earth, *Nature* **190**, 589

[40] Pross, A., (2013), The Evolutionary Origin of Biological Function and Complexity, *Journal of Molecular Evolution*, **76**, 185-191

[41] Pross, A (2012), What is life: when chemistry becomes biology, Wiley

[42] Pascal, R, (2012), Suitable Energetic Conditions for Dynamic Chemical Complexity and the Living State, *Journal of Systems Chemistry* **3**, 3

7

Modèle de structure moléculaire de la matière organique insoluble isolée de la météorite de Murchison

Sylvie Derenne¹, François Robert²

¹METIS, UMR CNRS 7619, UPMC,
4 Place Jussieu, 75252 Paris cedex 05, France

²IMPMC, UMR CNRS 7590, Muséum National d'Histoire
Naturelle, 61 rue Buffon, 75005 Paris, France

I. Introduction

Les chondrites carbonées sont connues pour contenir des quantités importantes (jusqu'à 4 %) de matière organique, dont la part la plus importante se présente sous forme de matière organique insoluble (MOI). De nombreuses études réalisées depuis 1970 visaient à décrypter la structure chimique de cette MOI, principalement dans la météorite de Murchison. En effet, une connaissance précise de la structure de la part macromoléculaire organique apporte des informations irremplaçables qui permettent de remonter aux mécanismes de sa synthèse et aux conditions de sa formation. Au cours des dix dernières années, nous avons pris part à ces travaux, dans le but de reconstituer la structure générale de la MOI de Murchison.

La MOI, qui constitue plus de 75 % en masse de l'ensemble de la matière organique, est isolée de la roche totale par extraction à l'eau et aux solvants pour en retirer les composés organiques solubles puis ensuite par des traitements successifs à HF/HCl pour dissoudre la majeure partie de la matrice minérale. Ces traitements aux acides sont connus pour ne pas altérer la MOI (Durand et Niclaise 1980). Les résidus acides insolubles sont enrichis en MOI mais contiennent de la matière inorganique principalement composée d'oxydes, de sulfures et de chlorures d'après la diffraction aux rayons X.

La structure chimique de la MOI isolée de Murchison a été étudiée à la fois avec des méthodes destructives et non destructives. Les premières comportent des dégradations

thermiques et chimiques suivies par une chromatographie en phase gazeuse-spectrométrie de masse (CG/SM) (Studier et al. 1972 ; Lévy et al. 1973 ; Hayatsu et al. 1977, 1980, 1983 ; De Vries et al. 1993 ; Komiya and Shimoyama 1996 ; Sephton et al. 1998, 2000, 2004 ; Rémusat et al. 2005a, 2005b ; Huang et al. 2007 ; Yabuta et al. 2007) et les secondes englobent principalement des techniques spectroscopiques (résonance magnétique nucléaire [RMN], spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier [IRTF], spectroscopie d'absorption des rayons X [XANES], et résonance paramagnétique électronique [RPE]), en même temps que la microscopie électronique en transmission à haute résolution (ME-THR) (Cronin et al. 1987 ; Ehrenfreund et al. 1992 ; Gardinier et al. 2000 ; Cody et al. 2002, 2008 ; Cody and Alexander 2005 ; Binet et al. 2002, 2004a, 2004 b ; Derenne et al. 2002, 2005 ; Yabuta et al. 2005 ; Wirick et al. 2006). Bien que chaque technique, à elle seule, ne puisse apporter des informations définitives sur la structure chimique d'un matériau aussi complexe, la combinaison des résultats peut être utilisée pour reconstruire la structure moléculaire de la MOI. Toutefois, les données quantitatives sont des paramètres essentiels pour élaborer un tel modèle et pour en évaluer la validité. C'est pourquoi nous utiliserons uniquement les études fournissant ces paramètres et nous ferons appel à nos observations qualitatives pour étayer nos discussions. Il importe également de constater que des variations dans les compositions élémentaires globales ont été relevées dans la littérature (probablement en fonction des procédés d'isolement des résidus acides). Pour surmonter ce biais analytique, tous les paramètres quantitatifs utilisés ici ont été obtenus à partir du même résidu, qui contenait 19 % de matière minérale (Gardinier et al. 2000).

Les détails sur cette structure révèlent des informations sur la formation de la MOI dans l'espace. En conséquence, la dernière partie de l'article aborde les voies possibles d'organosynthèse dans le contexte cosnochimique de la formation du Système solaire.

2. Modélisation de la structure chimique de la MOI

2.1 Contraintes analytiques

Des méthodes analytiques, dont des techniques spectroscopiques, microscopiques, et de dégradation ont été utilisées pour identifier les contraintes analytiques discutées ci-dessous. Les conditions expérimentales de ces méthodes ont été décrites en détail dans les articles d'origine.

2.1.1 Unités aromatiques

La composition élémentaire de la MOI isolée de Murchison révèle une aromaticité assez élevée avec un rapport atomique hydrogène sur carbone d'environ 0,7 (Gardinier et al. 2000).

La nature aromatique de la MOI isolée de Murchison a été confirmée par la présence d'une bande intense à 1600 cm⁻¹ dans son spectre IRTF (Gardinier et al. 2000) et d'une forte absorption à 285,5 eV dans son spectre C-XANES, ce qui correspond à la transition ls-Π* des carbones aromatiques comme dans le cas des hydrocarbures polyaromatiques (Derenne et al. 2002 ; Wirick et al. 2006 ; Cody et al. 2008). De plus, une forte aromaticité a été déduite de l'étude pionnière en RMN du ¹³C à l'état solide, le spectre de la MOI de Murchison étant dominé par un pic à 130 ppm dans Cronin et al. (1987). Des études plus poussées par RMN du ¹³C (Gardinier et al. 2000 ; Cody et al. 2002) ont révélé que la plupart de ces carbones aromatiques étaient non protonés, conduisant à deux hypothèses : soit les unités polyaromatiques sont de très grande taille (d'où un nombre important d'atomes de carbone non protonés) soit, si elles sont de plus petite taille, elles doivent être fortement substituées. Les résultats de METHR et des RPE rapportés ci-dessous sont clairement en faveur de la seconde hypothèse.

En METHR, les couches aromatiques se présentent sous forme de franges. Ces couches peuvent être isolées ou empilées ensemble pour former des domaines cohérents. Une méthode d'analyse d'image a été développée pour déduire des données semiquantitatives des images de METHR (Rouzaud and Clinard 2002). Dans la MOI de Murchison, la distribution des longueurs de franges indique que les couches aromatiques sont plutôt de petite taille, la plupart présentant des diamètres entre 0,25 et 1 nm, c'est-à-dire de 1 à 4 cycles de largeur, les valeurs moyennes correspondant à deux à trois cycles (Derenne et al. 2005). De plus, un degré d'organisation relativement faible est déduit de la contribution relativement élevée des franges isolées (65 %). Ceci est confirmé par l'étude des domaines cohérents car plus de 70 % d'entre eux sont constitués uniquement de deux couches empilées, et seulement 30 % en comportent trois. Enfin, l'espacement moyen entre couches est de 0,49 nm, c'est-à-dire bien supérieur à celui du graphite (0,3354 nm).

La présence d'unités aromatiques avait aussi été déduite d'études par dégradation chimique, en particulier des oxydations utilisant l'acide trifluoroacétique, l'acide nitrique, le dichromate de potassium, l'oxyde de cuivre, ou encore le tétr oxyde de ruthénium comme réactifs (Hayatsu et al. 1977, 1980 ; Rémusat et al. 2005a, 2005b). Toutefois, la formation d'acides benzène hexa- et tétracarboxylique avait été dans un premier temps envisagée comme signature de la présence d'unités polyaromatiques hautement condensées (Hayatsu et al. 1977), mais cette interprétation a été revue (Hayatsu and Anders 1981). En effet, le degré élevé de carboxylation des produits d'oxydation est aussi cohérent avec un niveau élevé de substitution des unités aromatiques initiales. Plus récemment, les produits d'oxydation au RuO₄ ont suggéré que les unités aromatiques soient moins condensées dans la MOI de Murchison que dans les charbons de haut rang. (Rémusat et al. 2005a, 2005b). Les produits aromatiques avec un à quatre cycles sont abondamment produits lors de pyrolyses avec une plus faible abondance des composés les plus lourds (Studier et al. 1972 ; Hayatsu et al. 1977 ; Komiya et Shimoyama 1996 ; Sephton et al. 1998, 2000 ; Rémusat et al. 2005 b ; Yabuta et al. 2007). Comme le démontrent les données spectroscopiques ci-dessus, ces unités aromatiques préexistent dans la MOI et ne sont donc pas le produit d'une aromatisation secondaire consécutive aux pyrolyses. Bien que les aromatiques les plus lourds soient les plus difficiles à détecter par CG/SM, la diminution de l'abondance des produits aromatiques quand leur taille augmente est en accord avec la faible taille des unités polyaromatiques observée par METHR.

2.1.2 *Liaisons aliphatiques*

La spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier et la RMN du ^{13}C montrent que les carbones aliphatiques contribuent avec les aromatiques à la structure de la MOI. En considérant le rapport de CH_2 sur CH_3 , ces deux techniques indiquent un niveau élevé de ramifications dans les chaînes aliphatiques (Ehrenfreund et al. 1992 ; Gardinier et al. 2000). Depuis 1977, un certain nombre de dégradations chimiques ont été réalisées sur la MOI de Murchison utilisant un large éventail de réactifs comme l'acide trifluoroacétique, l'acide nitrique, le dichromate de potassium ou l'oxyde de cuivre (Hayatsu et al. 1977, 1980). Toutefois, la plupart de ces études n'a fourni que peu d'informations sur les liaisons aliphatiques.

A l'inverse, le tétr oxyde de ruthénium est un agent d'oxydation doux et sélectif qui détruit préférentiellement les cycles aromatiques en les convertissant en CO_2 . Les structures aliphatiques et acycliques libérées se présentent sous forme d'acides carboxyliques. Ces groupes fonctionnels carboxyliques marquent soit des points d'attachement dans le kérogène, soit des positions de groupements fonctionnels labiles, tels que des doubles liaisons carbone-carbone et des liaisons éther (Stock and Wang 1986). Il a été montré que cette méthode est particulièrement efficace pour l'étude des structures aliphatiques dans les kérogènes (Boucher et al. 1990). Cette oxydation révèle la courte longueur des chaînes dans la MOI de Murchison (moins de trois carbones pour les chaînes latérales portées par des unités aromatiques et entre deux et sept carbones pour les ponts aliphatiques reliant des unités aromatiques) (Rémusat et al. 2005a, 2005b ; Huang et al. 2007). La courte longueur de ces chaînes est corroborée par l'absence de doublets n -alcanes/ n -alc-1-ène après pyrolyse CG-SM, ces derniers pouvant être détectés à partir de 8 carbones. Toutefois, quand on étudie les gaz libérés, on identifie des alcanes et alcènes depuis le méthane jusqu'au C_4 (Rémusat et al. 2005b). Les liaisons aliphatiques libérées par oxydation au RuO_4 montrent un niveau élevé de ramifications, avec substitution par des groupes méthyles et éthyyles. Ces substitutions sont randomisées en raison d'une diversité isomérique. De plus, la présence de chaînes aliphatiques reliant plusieurs unités aromatiques (Rémusat et al. 2005a, 2005b) est en accord avec le fort degré de réticulation révélé par RMN du ^{13}C à l'état solide.

2.1.3 *Localisation de l'oxygène*

Outre le carbone et l'hydrogène, l'oxygène est l'élément le plus abondant dans la MOI. Les analyses spectroscopiques révèlent plusieurs formes de groupements fonctionnels contenant de l'oxygène. En effet, les spectres C-XANES présentent une forte absorption à 288,9 eV qui suggère la présence de groupements carbonyles (Wirick et al. 2006). La RMN du ^{13}C en phase solide a confirmé la présence en faible quantité de ces groupes (résonance à 200 ppm) et a révélé des quantités importantes de carbone lié à l'oxygène (comme dans les alcools ou éthers aliphatiques, à 55 ppm) ainsi que des groupements carboxyliques (acides et/ou esters, aux environs de 168 ppm) (Gardinier et al. 2000 ; Cody et al. 2002). La présence de ces groupements est de plus confirmée par une forte production de CO_2 et CO lors d'une pyrolyse sous vide de la MOI. En effet, la production de ces gaz est indicative de réactions de décarboxylation et de décarbonylation lors du traitement

thermique (Rémusat et al. 2005b). Des produits de pyrolyse contenant de l'oxygène ont également été identifiés ; il s'agit du phénol et de plusieurs cétones aromatiques. Ces produits indiquent la présence d'éthers phénoliques qui avaient été antérieurement suggérés par l'oxydation au CuO (Hayatsu et al. 1977) ou par pyrolyse en présence d'eau (Sephton et al. 1998), bien que dans ces dernières expériences l'atome d'oxygène puisse provenir du réactif. Toutefois, les produits de pyrolyse polaires étant mal détectés avec une colonne apolaire en CG-SM, une méthode spécifique a été utilisée : la pyrolyse en présence d'hydroxyde de tétraméthylammonium (Challinor 1989).

L'hydroxyde de tétraméthylammonium est à la fois une base et un agent de méthylation, permettant la coupure des liaisons polaires et la méthylation *in situ* des produits de pyrolyse. En utilisant cette technique, des esters méthyliques d'acides aromatiques ont été identifiés en même temps que des esters méthyliques de diacides à courtes chaînes, révélant ainsi la présence de liaisons esters entre résidus aromatiques (Rémusat et al. 2005b).

En ce qui concerne les liaisons aliphatiques, les informations les plus précieuses sur les groupes oxygènes ont été obtenues par oxydation au RuO₄ qui a produit des hydroxy- et carboxy-esters montrant que des groupes fonctionnels éthers et esters sont présents dans ces chaînes (Rémusat et al. 2005a, 2005b).

2.1.4 Spéciation des composés soufrés

Un certain nombre de composés contenant du soufre sont libérés lors de la pyrolyse de la MOI de Murchison (Lévy et al. 1973 ; Komiya et Shimoyama 1996) ce qui concorde avec une teneur importante de soufre dans cette MOI. Cette teneur varie largement dans la littérature (Tableau I). Ceci s'explique probablement par le fait que, selon la procédure d'isolement, le soufre élémentaire (S₈) est plus ou moins éliminé. Dans le présent modèle, nous avons utilisé la teneur en soufre organique qu'ont déterminée Hayatsu et Anders (1981).

Tous les produits de pyrolyse comportent des cycles thiophènes, mais ces cycles peuvent préexister ou se former lors de la pyrolyse (Rémusat et al. 2005b). Pour étudier cette question, nous avons utilisé la spectroscopie XANES au seuil K du soufre qui a révélé que 24 % du soufre organique était dans les thiophènes, les 76 % restants se trouvant dans des sulfures aliphatiques (Derenne et al. 2002 ; Rémusat et al. 2005b).

2.1.5 Spéciation de l'azote

Parmi les hétéroéléments, nous avons également montré que l'azote était présent dans la MOI. Un seul composé contenant de l'azote, à savoir le benzonitrile, a pu être détecté dans le pyrolysat de Murchison. L'utilisation d'hydroxyde de tétraméthylammonium n'a pas amélioré cette détection montrant l'absence (ou du moins la très faible contribution) des fonctions polaires azotées comme les amides ou amines. Ce point a été confirmé par RMN du ¹⁵N à l'état solide sur la MOI d'Orgueil qui a révélé que l'azote est présent prin-

cipalement dans des unités hétérocycliques comme les pyrroles. Il faut remarquer que les mêmes résultats ont été obtenus pour Orgueil et Murchison en ce qui concerne les produits de pyrolyse azotés. Les conclusions qui ont été tirées à partir d'Orgueil sur la spécification de l'azote sont donc probablement également valables pour Murchison. La forte stabilité thermique de ces structures concorde avec l'absence de produits de pyrolyse azotés et la libération de N₂ uniquement à des températures élevées (900 °C) (Rémusat et al. 2005b). On peut émettre l'hypothèse d'une faible contribution des groupes nitriles en se basant sur le spectre RMN de la MOI d'Orgueil avec un rapport [N Pyrrolique] sur [N Nitrile] d'approximativement 1 à 5. Aucune autre forme d'azote (amide ou amine) n'a été détectée avec une limite de détection de 5 % par rapport à l' N total de la MOI.

2.2 Modèle statistique de la structure de la MOI

L'ensemble des résultats obtenus à partir des différentes techniques que nous venons de décrire a fourni un ensemble de paramètres que nous avons utilisés pour construire un modèle de structure moléculaire pour la MOI. Les 11 paramètres quantitatifs qui ont été utilisés sont présentés dans le Tableau I. À des fins comparatives, sont également rapportées dans ce tableau des valeurs de la littérature pour les mêmes paramètres, obtenues par analyse élémentaire et par RMN sur des échantillons de MOI isolés par d'autres laboratoires. La structure ainsi obtenue (figure 1) rend compte des unités moléculaires (atomes ou groupes fonctionnels) dont l'abondance dépasse 3 %. Il en résulte que nous avons écarté les occurrences moléculaires rares pour limiter la structure à ≈200 atomes de carbone. Ceci n'a pas d'incidence sur la structure globale à l'intérieur des barres d'erreurs affectées à chaque paramètre. La comparaison entre les paramètres du modèle et les paramètres mesurés est présentée dans la figure 2, qui montre qu'à ±10 % le modèle correspond à toutes les données disponibles.

Il importe de noter que les données quantitatives publiées dans la littérature sur les résidus de Murchison (tableau I) concordent également assez bien avec les paramètres présentement utilisés. En particulier, la fraction d'hydrogène aliphatique a été calculée entre 0,70 et 0,74 par Cody et Alexander (2005) à partir de données de RMN du ¹H. Nous avons recalculé ce paramètre à partir de notre modèle et nous obtenons une valeur de 0,68 en bon accord avec la valeur expérimentale.

Cette structure (figure 1) doit être considérée comme un modèle statistique et non comme la solution unique aux paramètres mesurés. Des modifications qualitatives mineures comme une isomérie de position mèneraient aussi à la constitution d'une structure acceptable. Soulignons aussi que du fait de sa faible taille, ce modèle de structure ne peut rendre compte de la grande diversité de produits identifiés lors des pyrolyses ou des oxydations.

Bien que la MOI météoritique ait été comparée depuis longtemps aux kérogènes terrestres, il faut relever que la structure modélisée est très sensiblement différente de ce qui a été rapporté pour les kérogènes et les charbons (Behar and Vandenbroucke 1986). En effet, quand des échantillons terrestres immatures sont étudiés, ceux-ci contiennent de longues chaînes aliphatiques faiblement ramifiées signant leur origine biologique.

Tableau 1. Récapitulatif des paramètres chimiques et moléculaires de la MOI de Muchison utilisée pour modéliser la structure

	Paramètres	Valeur expérimentale	Techniques analytiques	Autres données de la littérature
I.	CH ₂ aliphatique / CH ₃ aliphatique	2,0 ± 0,2 ^[1]	¹³ C RMN, IRTF	1,57–1,79 ^[2]
2.	C aromatique non protoné / C aromatique protoné	2,80 ± 0,28 ^[1]	¹³ C RMN	2,33 ^[2] ; 1,86–2,70 ^[3]
3.	C aromatique / C aliphatique	3,0 ± 0,3 ^[1]	¹³ C RMN	2,76 ^[2] ; 3,08–3,28 ^[3] ; 1,82–2,17 ^[4]
4.	C acide / C total	0,070 ± 0,014 ^[1]	¹³ C RMN	0,074 ^[2]
5.	S thiophénique / S aliphatique	3,17 ± 0,31 ^[5]	S-XANES	
6.	N en tant que nitriles / N total	0,15 ± 0,05 ^{a[5]}	¹⁵ N RMN	
7.	Nombre moyen de cycles (2-D)	2,3 ± 0,3 ^[6]	METHR	
8.	H / C	0,70 ± 0,04 ^[1]	Analyse élémentaire	0,70 ^[7–9] ; 0,71 ^[10] ; 0,38 ^[11] ; 0,52 ^[12] ; 0,48 ^[13] ; 0,53 ^[14]
9.	O / C	0,22 ± 0,02 ^[15]	Analyse élémentaire	0,16 ^{b[7]} ; 0,12 ^[10, 13] ; 0,25 ^[14]
10.	N / C	0,03 ± 0,006 ^[5]	Analyse élémentaire	0,031 ^[7] ; 0,027 ^[10, 16] ; 0,015 ^[12] ; 0,029 ^[14] ; 0,035 ^[8] ; 0,039 ^[9]
II.	S / C		Analyse élémentaire	0,021 ^[10, 13]
	Petites unités aromatiques		RPE, RMN ¹³ C, METHR	
	Chaînes courtes		RMN ¹³ C, oxydation-CG-SM	
	Aliphatiques h autrement branchés		IRTF, RMN ¹³ C, oxydation-CG-SM	
	Aliphatiques fortement substitués		IRTF, RMN ¹³ C, pyrolyse CG-SM	

Note : RMN = résonance magnétique nucléaire ; IRTF = spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier ; XANES = spectroscopie d'absorption des rayons X ; METHR = microscopie électronique en transmission à haute résolution ; RPE = résonance paramagnétique électronique ; CG-SM = chromatographie gazeuse/ spectrométrie de masse.

^a Valeur déterminée pour la matière organique insoluble (MOI) d'Orgueil. ^b Calculé par différence.

[1] Gardinier et al. (2000) ; [2] Cody et al. (2002) ; [3] Cody and Alexander (2005) ; [4] Yabuta et al. (2005) ; [5] Rémusat et al. (2005b) ; [6] Derenne et al. (2005) ; [7] Hayatsu et al. (1977) ; [8] Komiya and Shimoyama (1996) ; [9] Yabuta et al. (2005) ; [10] Hayatsu and Anders (1981) ; [11] Robert and Epstein (1982) ; [12] Kerridge et al. (1987) ; [13] Zinner et al. (1988) ; [14] Cody et al. (2002) ; [15] Binet et al. (2002) ; [16] Alexander et al. (1998) ; [17] Pearson et al. (2000) ; [18] Sephton et al. (2003).

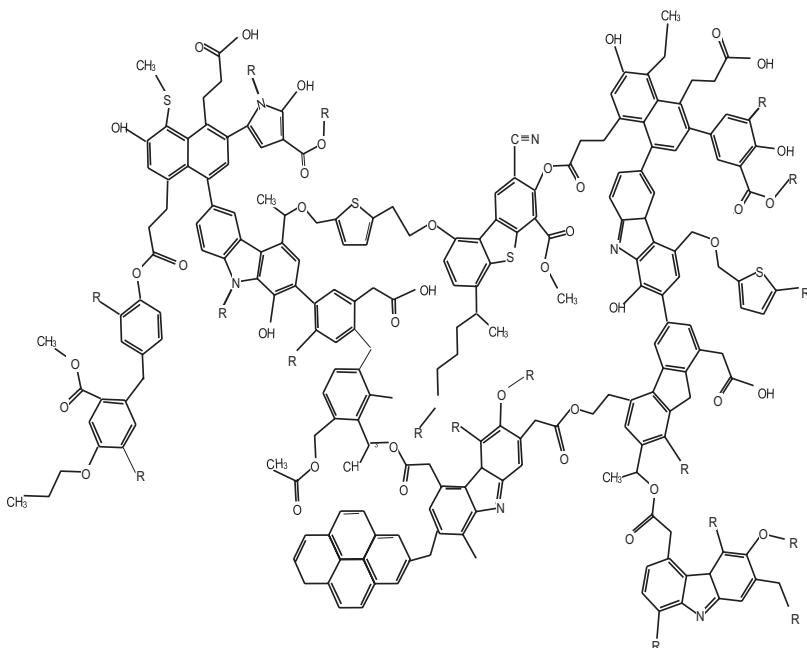


Figure 1. Modèle de structure moléculaire de la matière organique insoluble de Murchison élaboré à partir de paramètres élémentaires et moléculaires (cf. figure 2). R représente une unité organique.

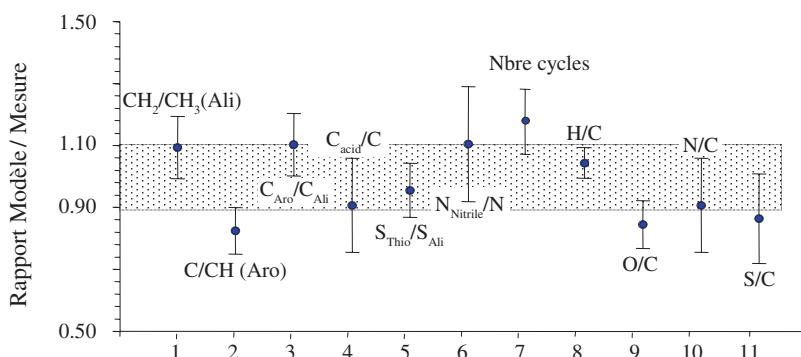


Figure 2. Rapport entre les valeurs des paramètres énumérés dans le tableau 1 calculés à partir de la structure modélisée de la figure 1 et celles mesurées expérimentalement dans la MOI de Murchison.

Ces longues chaînes aliphatiques ne contribuent pas à la MOI des météorites. Une augmentation de la maturité dans les échantillons terrestres induit la libération de ces chaînes et en conséquence induit une augmentation non seulement de l'aromaticité, mais aussi de la taille des groupes aromatiques en raison d'une cyclisation thermique. Dans les météorites Orgueil, Murchison, et Tagish Lake, la taille des groupes aromatiques reste faible même quand l'aromaticité augmente (Derenne et al. 2006). Ceci est probablement la conséquence du niveau de substitution qui diffère fortement entre les matériaux terrestres et les météorites.

3. Les implications cosnochimiques

Cette partie se base sur plusieurs caractéristiques spécifiques de la MOI.

3.1 Les composés organiques dans l'espace

Des molécules organiques sont présentes dans une grande diversité d'environnements astronomiques. Elles sont détectées dans des atmosphères stellaires, dans des nuages moléculaires interstellaires denses et froids, et dans des disques circumstellaires associés à des formations stellaires. Cette matière organique comprend des particules de poussières à l'état gazeux et solide d'échelles nanométriques (10–500 nm) à la fois en phase gazeuse et en phase solide. En plus des informations obtenues par spectroscopie (température, densités et espèces moléculaires), les simulations théoriques apportent aussi des contraintes sur les conditions physiques dans lesquelles ces molécules se forment parce que les vitesses de réactions chimiques dépendent du temps, de la température et des densités (Herbst and Millar 2008).

3.1.1 Du milieu interstellaire à la phase T-Tauri du Soleil

Les étoiles de type solaire se forment à partir de « noyaux prestellaires » froids et denses ($n_{\text{H}} \approx 10^6 \text{ cm}^{-3}$, $T \approx 10 \text{ K}$) qui comportent une distribution complexe de nombreuses espèces organiques et de poussières. Les populations de poussières avec leurs manteaux de glace forment un vaste réservoir d'espèces organiques. Le noyau qui en résulte devient opaque et forme ce que l'on appelle un jeune objet stellaire (YSO), dans lequel les enveloppes internes chaudes sont chauffées par la protoétoile centrale ($n_{\text{H}} \approx 10^{78} \text{ cm}^3$, $T \approx 10 \text{ K}$) et où une chimie organique complexe est parfois également observée (Ceccarelli 2004). Une bonne partie de cette matière est éjectée et l'étoile qui vient de naître commence son existence sous la forme d'un système stellaire T-Tauri encerclé par un disque protoplanétaire dense. La température moyenne du disque est d'environ 100 K, alors que les régions centrales, proches de l'étoile, là où les planètes telluriques et les planétésimaux chondritiques se sont formés, atteignent la température de vaporisation des silicates réfractaires et des oxydes (jusqu'à 2000 K) (Dullemond et al. 2002 ; Siebenmorgen and Krugel 2010).

Ainsi il ressort de manière évidente de cette brève description, qu'une évolution profonde des espèces organiques peut se produire à chacune des différentes étapes de la formation de notre Système solaire (Herbst and van Dishoeck 2009). A cet égard, le défi posé à la cosmo-chimie organique est de proposer un lien entre observations astronomiques et chondritiques.

Dans les noyaux prestellaires, la chimie en phase gazeuse est déclenchée par la présence de H₂. Si la température excède la température de sublimation du CH₄ ou du CO condensé sur des grains, des chaînes de réactions ions-molécules commençant par H₃⁺ formées via H₂ + H₂⁺ → H₃⁺ + H, ont produit une variété d'ions moléculaires organiques complexes (Herbst and Wakelam 2008 ; Woodall et al. 2008). En conséquence des processus impliqués dans ce type de chimie ionique, les molécules organiques produites dans la phase gazeuse sont principalement pauvres en hydrogène (Herbst and Millar 2008) et peuvent former de longues chaînes carbonées. La situation est différente sur les grains. Ici, le CO solide peut être hydrogéné par l'intermédiaire de réactions impliquant de l'hydrogène atomique et produisant entre autres CH₃CO, CH₃CHO, C₂H₅OH (Charnley 2001). Ces molécules sont libérées dans la phase gazeuse lorsque la température permet la sublimation des grains, c'est-à-dire pendant la formation des YSO.

On sait peu de choses sur la fraction organique gazeuse à l'intérieur des disques T-Tauri en raison des difficultés d'observation associées à ces petits objets astronomiques (le rayon de ces disques est de l'ordre de grandeur des dimensions du Système solaire actuel). L'essentiel de nos connaissances sur cette fraction provient de l'étude des molécules organiques volatiles dégagées dans l'échappement gazeux des comètes (Bockelée-Morvan et al. 2004). Ce sont les espèces parentes de celles qui se sont évaporées du noyau glacé des comètes. Une forte corrélation des abondances relatives est établie entre ces espèces cométaires et les molécules interstellaires, démontrant que la fraction volatile observée dans les coeurs parents du disque T-Tauri est incorporée dans les corps du Système solaire qui se sont formés à des températures aussi basses que 30 K.

3.1.2 Hydrocarbures aromatiques polycycliques

Parce que leurs tailles réduites leur permettent de subir des températures élevées, les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) ont été initialement proposés comme la source des bandes aromatiques observées dans l'infrarouge dans les spectres du milieu interstellaire diffus. À partir des caractéristiques infrarouges de ces HAP, leurs sources étaient attribuées à un composé comportant au moins des centaines d'atomes de carbone. Bien que la plupart des modèles concluent que les HAP se composent de 50 atomes de carbone en moyenne, soit ~ 20 cycles aromatiques (Pendleton et Allamandola 2002 ; Visser et al. 2007 ; Tielens 2008), la taille des unités aromatiques dans l'espace interstellaire reste un débat ouvert (Kwok 2004). Par exemple, des composites carbonés atténusés ont été obtenus en chauffant CH₄ à des températures allant jusqu'à 3000 K, suivies d'une expansion rapide dans une chambre à vide puis une condensation à température ambiante (Sakata et al. 1987). La spectrométrie de masse du matériel qui en résulte suggère que la plupart de leurs éléments aromatiques ne possèdent qu'un à deux cycles, c'est-à-dire 10 atomes de carbone. Bien qu'on ne sache pas encore quel matériau permet la meilleure

approximation pour la poussière interstellaire carbonée (Kwok 2004), il est clair qu'il comprend à la fois des éléments aromatiques et des éléments aliphatiques.

Dans les disques T-Tauri, l'émission infrarouge est attribuée à la présence de HAP ayant 100 atomes de carbone avec un mélange à parties égales de molécules neutres et ionisées. Les variations dans les abondances relatives de HAP s'expliquent par leur photodissociation causée par l'intensité du champ de rayonnement ultraviolet (UV) subi par l'étoile centrale (Ehrenfreund et al. 2006 ; Visser et al. 2007). L'absence de détection de ces HAP dans différents disques est attribuée à la faible efficacité des photons visibles pour l'excitation des HAP et non à leur absence dans le disque. La composition organique du disque T-Tauri solaire est mieux connue maintenant grâce aux analyses obtenues sur les échantillons rapportés par la mission spatiale Stardust (Sandford et al. 2006). Dans ces échantillons, de nombreuses espèces organiques sont des HAP d'une taille typique largement inférieure à celles provenant de l'espace interstellaire, c'est-à-dire quelques cycles aromatiques.

Les HAP observés dans les disques ne sont pas attribués à un processus de formation *in situ* après la phase d'effondrement. Ils sont plutôt considérés comme des produits interstellaires. En effet, la formation et la croissance des HAP à l'intérieur d'un disque nécessiteraient 1°) de fortes températures (approximativement 1000 K), 2°) une haute densité, 3°) une grande abondance des précurseurs des cycles aromatiques - probablement de l'acétylène ? (Frenklach et Feigelson 1989 ; Cherchneff et Barker 1992) et 4°) pour les HAP les plus petits, un champ de rayonnement UV faible pour empêcher une rapide photodissociation. Toutefois, des simulations expérimentales ont montré (Nuth et al. 2008) qu'à des températures entre 500 K et 900 K un revêtement carboné se forme à la surface des grains par l'intermédiaire de réactions de type Fischer–Tropsch. Les structures macromoléculaires de ces revêtements ressemblent à celles que l'on trouve dans la MOI chondritique produite par notre modèle, montrant à son tour que les disques T-Tauri sont capables de produire des précurseurs de MOI en quantités assez importantes.

Dans la plupart des modèles de disques T-Tauri, ces conditions correspondent à des régions proches de l'étoile centrale (<0,1 UA) et il est improbable que cette production de HAP *in situ* ait une incidence sur la population de HAP interstellaire observée à des rayons plus importants dans le disque (Visser et al. 2007). Cette conclusion a été obtenue grâce à une étude détaillée des taux de destruction des HAP par les photons d'UV dans les disques T-Tauri (Siebenmorgen et Krugel 2010).

3.2 Comparaison avec le milieu interstellaire

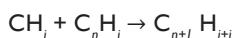
3.2.1 Le « spectre infrarouge universel » autour de 3,3 µm

La structure de la figure 1 fournit le spectre observé autour de 3,3 µm dans le milieu interstellaire (galactique et extragalactique) (Pendleton et Allamandola 2002). Ce spectre est particulier dans le sens que le rapport $-\text{CH}_2/-\text{CH}_3$ dans les unités aliphatiques est proche de 2 (Ehrenfreund et al. 1991, 1992). Dans Murchison, le rapport mesuré par RMN est également de 2 (Gardinier et al. 2000). Ces valeurs sont

bien plus basses que celles trouvées dans les kérogènes terrestres où apparaissent de longues chaînes – avec $[\text{CH}_2/\text{CH}_3] > 10$ – dans la macromolécule. Ce rapport résulte de la combinaison de deux caractéristiques : les chaînes aliphatiques sont courtes et fortement ramifiées. La faible valeur de ce rapport est le résultat de la combinaison statistique de C et de H dans les chaînes aliphatiques présentant tous les isomères possibles. Par exemple, une chaîne unique de cinq carbones rattachés à une unité a un rapport de 4/1, alors que la même chaîne avec cinq carbones présentant tous les isomères possibles ont un rapport CH_2/CH_3 de 3/2. Cette tendance qu'a le rapport CH_2/CH_3 de diminuer lors de l'isomérisation est une règle générale. Il est donc possible d'affirmer que le faible rapport CH_2/CH_3 de la matière organique extraterrestre est une conséquence directe de la distribution aléatoire de C et de H dans les chaînes aliphatiques. Cette distribution signe l'absence d'activité biochimique régissant le mécanisme d'elongation des chaînes. Cette affirmation s'applique à l'organosynthèse solaire comme interstellaire.

3.2.2 Relation aromatiques-aliphatiques

Les données spectroscopiques et microscopiques sur la MOI ont révélé que les groupements aromatiques comprennent une proportion relativement faible de carbones protonés permettant ainsi de penser qu'ils sont hautement substitués. On peut raisonnablement émettre l'hypothèse que les groupements aromatiques contenus dans ces matériaux résultent de la cyclisation et de l'aromatisation de chaînes linéaires. Il en résulte que plus les chaînes linéaires sont ramifiées, plus les noyaux aromatiques sont substitués. Le degré élevé de ramifications dans les unités aliphatiques est donc totalement en accord avec le faible niveau de protonation des groupes aromatiques. Ces spécificités offrent une base pour un modèle de synthèse organique dans l'espace : la matière insoluble serait le résultat d'une combinaison statistique de toutes sortes de liaisons impliquant CH_3 , CH_2 , ainsi que des radicaux CH dans la phase gazeuse, produisant à la fois des groupes aliphatiques et aromatiques. Ces radicaux organiques libres résulteraient de rayonnements énergétiques comme des rayons cosmiques ou des UV. Dans un tel modèle, la synthèse organique se produirait par addition successive d'unités monocarbonées comme cela avait été suggéré par Herbst (2001) grâce à deux mécanismes possibles (l'insertion de carbone ou l'association radiative). Pareil processus d'elongation se terminerait par une cyclisation spontanée quand la longueur de chaîne atteint sept atomes de carbone. Ce processus peut prendre la forme de la réaction schématique suivante :



Dès que la chaîne principale du radical aliphatique compte plus de sept atomes de carbone, la cyclisation se produit spontanément, suivie d'une aromatisation. Cette cyclisation est rendue possible en particulier dans la phase gazeuse. Ce processus de cyclisation/aromatisation est couramment observé, par exemple, après traitement thermique de polymères aliphatiques (Madorsky 1964). Des cycles fusionnés sont alors formés grâce au mécanisme classique de cyclisation. Un exemple schématique est donné en figure 3. Il en résulte : 1°) qu'aucune chaîne linéaire longue ne contribue au réseau macromoléculaire et 2°) que les composés aromatiques sont fortement substitués en raison de la nature fortement ramifiée des aliphatiques.

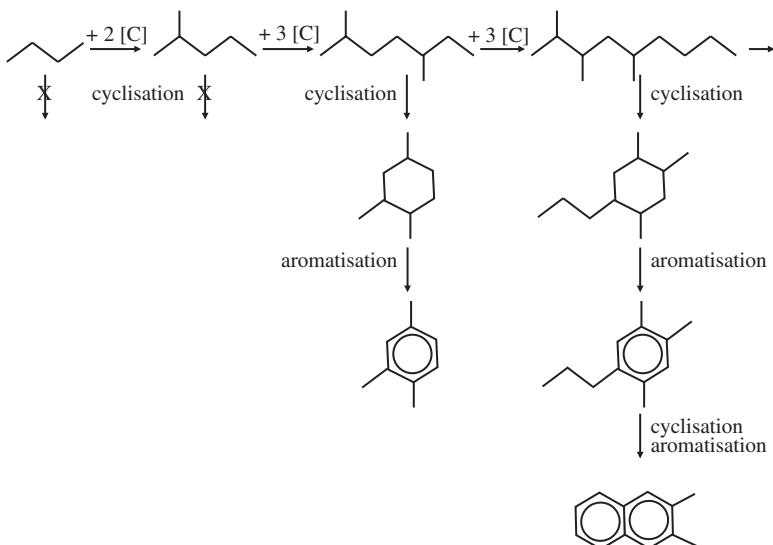


Figure 3. Illustration d'une voie possible de formation des unités aromatiques dans la phase gazeuse. La molécule initiale montre un ion ou un radical ayant quatre atomes carbone. Les atomes d'hydrogène ne sont pas indiqués par souci de clarté. Ce schéma ne tient pas compte des hétéroéléments.

On pourrait également *a priori* prendre un autre mécanisme en compte : celui-ci mettrait en jeu l'ajout de chaînes aliphatiques sur des groupements aromatiques préexistants. Ce phénomène serait favorisé par la présence de radicaux aromatiques qui captureraient des radicaux aliphatiques. Une observation récente tend à exclure ce mécanisme. Une étude NanoSIMS de Murchison montre que la matière organique qui présente des enrichissements élevés en deutérium (supposés liés aux radicaux libres organiques) est distribuée de façon hétérogène à la fois dans la MOI et dans la roche totale (Rémusat et al. 2009). Autrement dit, les radicaux organiques ne semblent pas être le noyau de la polymérisation de toute la MOI.

Malheureusement, comme on ne dispose pas de simulations expérimentales à ce jour, il n'est pas possible de préciser 1°) la nature des espèces qui réagissent (ions, radicaux et espèces neutres), 2°) l'implication d'un éventuel catalyseur dans les réactions de condensation (surfaces des grains ?) et 3°) les conditions physicochimiques (T, redox, etc.) qui ont prévalu au moment de la formation de la MOI. En raison de son rapport D/H élevé, il a souvent été considéré dans la littérature que cette MOI s'est formée à basse température ($T < 200$ K) (Robert 2006). Toutefois, dans le cas de la météorite Orgueil, il a été montré récemment que le deutérium a été ajouté à la MOI après sa formation (Rémusat et al., 2006). Donc, la température à laquelle le mécanisme ci-dessus peut se produire peut atteindre 650 K, c'est-à-dire la température au-dessus de laquelle les chaînes aliphatiques commencent à être instables.

Notons que les cycles sont loin d'être saturés en H. Si l'élongation des chaînes implique une chimie ionique, le processus de neutralisation produit des fragments qui ont tendance à présenter au moins un atome de H de moins que l'ion parent, ce qui est illustré par la réaction de dissociation recombinaison suivante : $C_nH_2^+ + e \rightarrow C_nH + H$ (Herbst et van Dishoeck 2009). Étant donné que la moitié des HAP dans les disques T-Tauri est ionisée (Tielens 2008), le fait que les cycles dans la MOI sont non saturés renforce l'idée que la matière présente dans les météorites a été condensée dans un milieu fortement ionisé.

3.2.3 La taille des unités aromatiques

Les unités aromatiques de la structure macromoléculaire de la MOI sont beaucoup plus petites que celles qui ont été postulées pour les HAP interstellaires (Allamandola et al. 1999 ; Galvez et al. 2002 ; Kwok 2004). La taille des HAP interstellaires a fait l'objet d'amples discussions dans la littérature en astronomie pour rendre compte des caractéristiques des spectres IR ainsi que des modèles de leur formation, évolution et destruction (voir, par exemple, les synthèses par Tielens 2008 et Herbst et van Dishoeck 2009). De manière analogue au modèle moléculaire proposé ici pour la MOI chondritique, plusieurs modèles moléculaires bidimensionnels ont été publiés au sujet des HAP interstellaires. Ils impliquaient tous des groupements dont la taille était de 50 à 100 atomes de carbone. Il existe une situation semblable quand on compare les HAP de la comète Wild 2 analysés dans les échantillons ramenés sur Terre par la mission Stardust : les HAP dans Wild 2 sont également beaucoup plus petits que leurs homologues interstellaires. Il faut considérer cette dissemblance comme un problème sérieux concernant l'origine de la matière organique dans le Système solaire.

Il y a deux issues à ce problème :

1°) Les HAP de la MOI chondritique résultent de la photodissociation de HAP interstellaires plus grands (Derenne et al. 2005). A partir des observations récentes réalisées à l'observatoire Spitzer, plusieurs auteurs ont revu cette interprétation (Geers et al. 2006 ; Visser et al. 2007 ; Siebenmorgen et Krugel 2010). Ils ont montré que pratiquement tous les HAP doivent être détruits quand ils sont à des distances du disque correspondant au lieu de formation des planètes telluriques et des corps parents des météorites. Comme on observe cependant des HAP dans les disques T-Tauri et que la formation des HAP dans les zones opaques des disques (dans les zones inaccessibles à l'observation optique) est supposée trop lente pour pouvoir rivaliser avec leur destruction, ils suggèrent que la turbulence verticale reconstitue la surface du disque.

2°) La MOI chondritique est formée dans les parties les plus chaudes du disque T-Tauri solaire (Nuth et al. 2008) et rediffusée sur de longues distances par la turbulence (Bockelée-Morvan et al. 2002).

Bien que la première interprétation ne puisse être rejetée, la seconde semble davantage concorder avec les compositions isotopiques de la MOI.

3.3 Signatures de l'altération des corps parents

Il faut souligner ici qu'étant donné que le rapport D/H est supérieur dans les matières organiques que dans les argiles, le fait qu'une organosynthèse se produise dans les fluides circulants du corps parent peut être écarté. Par conséquent, cette matière organique a été synthétisée dans un autre environnement que le corps parent puis a été mélangée aux précurseurs de la matrice minérale. Toutefois, une fois dans la roche, la circulation de l'eau a pu altérer la structure moléculaire des compositions chimiques/isotopiques. Nous allons aborder ce processus d'altération dans cette section.

3.3.1 Spéciation de l'oxygène et du soufre

La spéciation moléculaire de l'oxygène et du soufre dans les chaînes peut être considérée comme la conséquence de l'altération du corps parent. La principale preuve de cette conclusion a été obtenue en comparant les météorites Orgueil et Murchison. Les fonctions contenant de l'oxygène sont probablement en rapport avec l'altération aqueuse subie par les chondrites carbonées primitives. En effet, la circulation d'eau chaude pourrait avoir entraîné une oxydation dans la MOI conduisant à la formation de groupes fonctionnels éther et ester. Après pyrolyse (Rémusat et al. 2005b), une quantité de phénol et d'homologues substitués est libérée, supérieure à partir d'Orgueil que de Murchison, en accord avec la teneur en oxygène mesurée par analyse élémentaire, plus élevée pour Orgueil (16,6 % en poids) que pour Murchison (14,5 % en poids). De plus, les résultats de pyrolyse et d'oxydation au tétr oxyde de ruthénium suggèrent que dans Orgueil l'oxygène est davantage relié au carbone aromatique comme dans les phénols, alors que dans Murchison, l'oxygène est davantage localisé à l'intérieur de liaisons aliphatiques comme dans des groupes fonctionnels éthers ou esters.

Quand on compare Orgueil et Murchison, une teneur largement supérieure en soufre total est constatée dans Murchison d'après l'analyse élémentaire. La diffusion à rayons X et l'analyse XANES au seuil K du soufre a révélé que 29 % du soufre de Murchison est présent dans des minéraux (17 % de sulfures comme la pentlandite et 12 % de sulfates), alors que la totalité du soufre est organique dans Orgueil. Toutefois, le soufre organique qui en résulte reste trois fois supérieur dans Murchison que dans Orgueil (par rapport au carbone). En plus de cette différence quantitative majeure, la nature du soufre organique diffère entre les deux météorites. Bien que dans les deux cas, le soufre organique apparaît principalement sous forme de sulfures aliphatiques et de thiophènes, le rapport sulfures sur thiophènes est de 1,3 dans Orgueil et de 3,1 dans Murchison (Derenne et al. 2002 ; Rémusat et al. 2005b). Cette contribution relativement plus élevée des thiophènes par rapport aux sulfures aliphatiques dans Orgueil oriente vers un événement hydrothermal plus important dans cette météorite, étant donné qu'il est connu que les sulfures aliphatiques sont convertis en thiophènes sous contrainte thermique (Riboulleau et al. 2000).

3.3.2 Relation entre fractions organiques solubles et insolubles

Grâce à la RMN du ^{15}N à l'état solide, on a montré que l'azote se trouve principalement dans des fonctions pyrrole. L'absence virtuelle de groupes amides dans la MOI empêche *a priori* cette macromolécule d'être la source des acides aminés se présentant dans la fraction soluble des chondrites carbonées. De plus, la comparaison des rapports isotopiques D / H, $^{15}\text{N} / ^{14}\text{N}$ et $^{13}\text{C} / ^{12}\text{C}$ conduisent à écarter une origine commune à la MOI et aux acides aminés solubles (Rémusat et al., 2005b). A l'inverse, les acides aminés proviendraient d'un autre réservoir d'azote ; par exemple, l'irradiation par UV des glaces interstellaires riches en HCN (en présence d'aldéhydes et/ou de cétones) peut produire des acides aminés (Lerner 1997 ; Muñoz Caro et al. 2002).

A contrario, d'autres entités de la MOI semblent partager une origine commune avec leurs homologues solubles. Ces derniers comportent des hydrocarbures aromatiques (Pering et Ponnampерuma, 1971). De plus, Huang et al. (2007) ont montré une relation entre les acides aliphatiques solubles et les liaisons aliphatiques de la MOI, à partir de leurs rapports $^{13}\text{C} / ^{12}\text{C}$ et D / H.

Donc, la fraction soluble semble être un mélange de produits provenant de processus différents : dégradation hydrothermale de la MOI, réactions à l'intérieur de la glace médiées par la lumière ultraviolette, contamination terrestre, etc. Ceci contraste avec ce à quoi on s'attend : un continuum allant de petites molécules solubles aux grandes molécules, insolubles. Une autre explication pourrait être que les composés solubles proviendraient d'un précurseur qui est maintenant complètement converti en produit, la MOI étant la part restante d'un matériau initialement plus composite.

3.3.3 Les caractéristiques de la MOI révèlent-elles une organosynthèse dans le disque d'accrédition T-Tauri solaire ?

Comme le font remarquer Alexander et al. (2007) et l'ont montré expérimentalement Nuth et al. (2008), une synthèse efficace des HAP à partir d'hydrocarbures linéaires simples dans le gaz solaire nécessite de fortes températures (1100–900 K) et pressions (10^7 – 10^6 bars). Alexander et al. (2007) ont donc estimé que la production de MOI ne survient probablement pas dans la nébuleuse solaire. Toutefois, plusieurs caractéristiques de la structure chimique de la MOI constituent des arguments en faveur d'une formation dans le disque d'accrédition T-Tauri solaire comme discuté ci-dessous. Comme évoqué précédemment, notre interprétation de la relativement petite taille des unités aromatiques en fait partie. On en trouve d'autres indices dans la nature des radicaux libres (tels qu'étudiés par résonance paramagnétique nucléaire – RPE), dans la distribution de D / H au niveau moléculaire et dans la localisation des gaz rares dans ce que l'on appelle la phase Q, riche en matière organique. Nous traitons ces points successivement ci-dessous.

La résonance paramagnétique électronique a révélé la présence d'une quantité significative de radicaux libres dans la MOI provenant de Murchison. Ces radicaux libres pré-

sentent des zones de concentrations élevées par rapport à l'ensemble de la MOI (Binet et al. 2002). Cette hétérogénéité semble inédite parmi les macromolécules organiques naturelles et peut donc être considérée comme une spécificité de la matière organique extraterrestre (en plus d'Orgueil et de Murchison, elle a également été observée dans Tagish Lake ; Binet et al. 2004a). En outre, il faut noter que comme les échantillons terrestres, ces radicaux libres survivent aux traitements acides drastiques employés pour isoler la MOI (Binet et al. 2002).

Qui plus est, des structures di-radicaloïdes ont été trouvées dans la MOI (Binet et al. 2004a, 2004b). Ces structures sont hautement réactives ce qui tend à indiquer qu'elles sont protégées au sein de microdomaines. Le mécanisme de formation de ces radicaux reste inconnu, mais en partant de leur structure chimique, on peut envisager deux origines possibles : 1°) une condensation de petites unités aromatiques dans un milieu fortement irradié (rayons UV, cosmiques et vents stellaires) et 2°) une condensation inhibée des radicaux aromatiques chauds dans un gaz froid, empêchant ainsi les liaisons pendantes de capturer les radicaux hydrogène. Ce qui est intéressant, c'est que ces deux environnements peuvent être reproduits en laboratoire. Des expériences préliminaires vont dans le sens d'une formation de di-radicaloïdes pendant la condensation des cycles contenus dans une phase gazeuse. Toutefois, leur distribution spatiale reste troublante. Les conditions physicochimiques de leur synthèse étant, pour le moment, largement inconnues, la production de ces di-radicaloïdes lors d'expérimentations en laboratoire représente un défi qui déboucherait sur de nouvelles contraintes quant aux conditions de la formation de la MOI. Quoi qu'il en soit, leur formation au cours de l'événement hydrothermal apparaît comme fortement improbable, l'eau ayant tendance à supprimer les radicaux.

Deux autres observations sont également en faveur d'une organosynthèse dans le disque T-Tauri, bien qu'elles n'aient été rapportées à ce jour que dans la MOI d'Orgueil.

Des études récentes associant des données de NanoSIMS et de RPE pulsée ont démontré que les radicaux organiques sont les porteurs d'un enrichissement en deutérium exceptionnel (Gourier et al. 2007), probablement acquis après la formation du réseau macromoléculaire. Il est difficile de faire coïncider ce processus de deutération avec la faible densité du milieu interstellaire. En l'état actuel, l'explication la plus simple est d'admettre que cet échange isotopique s'est produit dans les régions irradiées par UV du disque T-Tauri solaire.

Le xénon, de même que les autres gaz rares, qui sont, par rapport à la composition solaire, fractionnés selon leurs masses, sont mécaniquement piégés (non absorbés ou enfouis dans les cycles carbonés) entre les réseaux des couches macromoléculaires de la MOI (Marrocchi et al. 2005). Une telle localisation est là aussi, peu compatible avec une condensation directe dans l'ISM où la faible densité du xénon empêche une telle addition par simple piégeage ($[H] < 10^3 \text{ cm}^{-3}$ correspondant à $[X_e] < 10^{13} \text{ cm}^{-3}$).

Références

- Alexander C. M. O'D., Fogel M., Yabuta H., et Cody G. D. 2007. *The origin and evolution of chondrites recorded in the elemental and isotopic compositions of their macromolecular organic matter.* Geochimica et Cosmochimica Acta 71: 4380–4403.
- Allamandola L. J., Hudgins D. M., et Sandford S. A. 1999. *Modeling the unidentified infrared emission with combinations of polycyclic aromatic hydrocarbons.* The Astrophysical Journal 511: L115–L119.
- Behar F. et Vandenbroucke M. 1986. *Représentation chimique de la structure des kérogènes et asphaltènes en fonction de leur origine et de leur degré d'évolution.* Revue de l'Institut Français du Pétrole 41 : 173–188.
- Binet L., Gourier D., Derenne S., et Robert F. 2002. *Heterogeneous distribution of paramagnetic radicals in insoluble organic matter from the Orgueil and Murchison meteorites.* Geochimica et Cosmochimica Acta 66: 4177–4186.
- Binet L., Gourier D., Derenne S., Pizzarello S., et Becker L. 2004a. *Diradicaloids in the insoluble organic matter from the Tagish Lake meteorite: Comparison with the Orgueil and Murchison meteorites.* Meteoritics & Planetary Science 39: 1649–1654.
- Binet L., Gourier D., Derenne S., Robert F., et Ciofini I. 2004b. *Occurrence of abundant diradicaloid moieties in the insoluble organic matter from the Orgueil and Murchison meteorites: A fingerprint of its extraterrestrial origin?* Geochimica et Cosmochimica Acta 68: 881–896.
- Bitz M. C. Sr. et Nagy B. 1966. *Ozonolysis of “polymer-type” material in coal, kerogen, and in the Orgueil meteorite: A preliminary report.* Proceedings of the National Academy of Sciences 56: 1383–1390.
- Bockelée-Morvan D., Gauthier D., Hersant F., Hure J.-M., et Robert F. 2002. *Turbulent raedila mixing in the solar nebula as the source of crystalline silicates in comets.* Astronomy & Astrophysics 384: 1107–1118.
- Bockelée-Morvan D., Crovisier J., Mumma M. J., et Weaver H. A. 2004. The composition of cometary volatiles. In *Comets II*, edited by Festou M. C., Keller H. U., et Weaver H. A. Tucson, Arizona: The University of Arizona Press. pp. 391–412.
- Boucher R. J., Standen G., Patience R. L., et Eglinton G. 1990. *Molecular characterization of kerogen from the Kimmeridge clay formation by mild selective chemical degradation and solid state ^{13}C -NMR.* Organic Geochemistry 16: 951–958.
- Ceccarelli C. 2004. In *Star formation in the interstellar medium: In honor of David Hollenbach, Chris McKee and Frank Shu*, vol. 323. Astronomical Society of the Pacific Conference Series. pp. 195–203.

- Challinor J. M. 1989. A pyrolysis-derivatisation-gas chromatography technique for the structural elucidation of some synthetic polymers. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis* 16: 323–333.
- Charnley S. B. 2001. In *The bridge between the big bang and biology: Stars, planetary systems, atmospheres, volcanoes: Their link to life*, edited by Giovannelli F. Rome: Consiglio Nazionale delle Ricerche. 139 p.
- Cherchneff I. et Barker J. R. 1992. Polycyclic aromatic-hydrocarbons and molecular equilibria in carbon rich stars. *The Astrophysical Journal* 394: 703–716.
- Cody G. D. III et Alexander C. M. O'D. 2005. NMR studies of chemical structural variation of insoluble organic matter from different carbonaceous chondrite groups. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 69: 1085–1097.
- Cody G. D. III, Alexander C. M. O'D., et Tera F. 2002. Solid state ^1H and ^{13}C nuclear magnetic resonance spectroscopy of insoluble organic residue in the Murchison meteorite: A self-consistent analysis. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 66: 1851–1865.
- Cody G. D., Alexander C. M. O'D., Yabuta H., Kilcoyne A. L. D., Araki T., Ade H., Dera P., Fogel M., Militzer B., et Mysen B. O. 2008. Organic thermometry for chondritic parent bodies. *Earth and Planetary Science Letters* 272: 446–455.
- Cronin J. R., Pizzarello S., et Frye J. S. 1987. ^{13}C NMR spectroscopy of the insoluble carbon of carbonaceous chondrites. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 51: 299–303.
- De Vries M. S., Reihs K., Wendt H. R., Golden W. G., Hunziker H. E., Fleming R., Peterson E., et Chang S. 1993. A search for C_{60} in carbonaceous chondrites. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 57: 933–938.
- Derenne S., Robert F., Binet L., Gourier D., Rouzaud J.-N., et Largeau C. 2002. Use of combined spectroscopic and microscopic tools for deciphering the chemical structure and origin of the insoluble organic matter in the Orgueil and Murchison meteorites (abstract #1182). 33rd Lunar and Planetary Science Conference. CD-ROM.
- Derenne S., Rouzaud J.-N., Clinard C., et Robert F. 2005. The size discontinuity between interstellar and chondritic aromatic structures: A high resolution transmission electron microscopy study. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 69: 3911–3918.
- Derenne S., Rouzaud J.-N., Robert F., et Pizzarelli S. 2006. Polyaromatic units from Tagish Lake insoluble organic matter (abstract #1251). 37th Lunar and Planetary Science Conference. CD-ROM.
- van Dishoeck E. F. et Blake G. A. 1998. Chemical evolution of star-forming regions. *Annual Review of Astronomy and Astrophysics* 36: 317–368.
- Dullemond C. P., van Zadelhoff G. J., et Natta A. 2002. Vertical structure models of T Tauri and Herbig Ae/Be disks. *Astronomy & Astrophysics* 389: 464–474.

Durand B. et Nicaise G. 1980. Procedures for kerogen isolations. In *Kerogen*, edited by Durand B. Paris: Technip. pp. 35–53.

Ehrenfreund P. et Charnley S. B. 2000. *Organic molecules in the interstellar medium, comets and meteorites: A voyage from dark clouds to the early Earth*. Annual Review of Astronomy and Astrophysics 38: 427–483.

Ehrenfreund P., Robert F., d'Hendecourt L., et Behar F. 1991. Comparison of interstellar and meteoritic organic matter at 3.4 μm . *Astronomy & Astrophysics* 252: 712–717.

Ehrenfreund P., Robert F., et d'Hendecourt L. 1992. *Similarity of the infrared spectrum of an Orgueil organic polymer with interstellar organic compounds in the line of sight towards IRS 7*. Advances in Space Research 12: 4.53–4.56.

Ehrenfreund P., Rasmussen S., Cleaves J., et Chen L. 2006. *Experimentally tracing the key steps in the origin of life: The aromatic world*. Astrobiology 6: 490–520.

Frenklach M. et Feigelson E. D. 1989. *Formation of polycyclic aromatic-hydrocarbons in circumstellar envelopes*. The Astrophysical Journal 341: 372–384.

Galvez A., Herlin-Boime N., Reynaud C., Clinard C., et Rouzaud J. N. 2002. *Carbon nanoparticle from laser pyrolysis*. Carbon 40: 2775–2789.

Gardinier A., Derenne S., Robert F., Behar F., Largeau C., et Maquet J. 2000. *Solid state CP/MAS ^{13}C NMR of the insoluble organic matter of the Orgueil and Murchison meteorites: Quantitative study*. Earth and Planetary Science Letters 184: 9–21.

Geers V. C., Augereau J. C., Pontoppidan K. M., Dullemond C. P., Visser R., Kessler-Silacci J. E., Van Dishoeck E. F., Blake G. A., Boogert A. C. A., Brown J. M., Lahuis F., et Merín B. 2006. *C2D Spitzer-IRS spectra of disks around T tauri stars—II. PAH emission features*. Astronomy & Astrophysics 459: 545–556.

Gourier D., Robert F., Delpoux O., Binet L., Vezin H., Moissette A., et Derenne S. 2007. *Extreme deuterium enrichment of organic radicals in the Orgueil meteorite: Revisiting the interstellar interpretation?* Geochimica et Cosmochimica Acta 72: 1914–1923.

Hayatsu R. et Anders E. 1981. *Organic compounds in meteorites and their origins*. Topics in Current Chemistry 99: 1–37.

Hayatsu R., Matsuoka S., Scott R. G., Studier M. H., et Anders E. 1977. *Origin of organic matter in the early solar system—VII. The organic polymer in carbonaceous chondrites*. Geochimica et Cosmochimica Acta 41: 1325–1339.

Hayatsu R., Winans R. E., Scott R. E., McBeth R. L., Moore L. P., et Studier M. H. 1980. *Phenolic ethers in the organic polymer of the Murchison meteorite*. Science 207: 1202–1204.

- Hayatsu R., Scott R. G., et Winans R. E. 1983. Comparative structural study of meteoritic polymer with terrestrial geopolymers coal and kerogen. Meteoritics 15: 3–10.
- Herbst E. 2001. The chemistry of interstellar space. Chemical Society Reviews 30: 168–176.
- Herbst E. et Millar T. J. 2008. In *Low temperatures and cold molecules*, edited by Smith I. W. M. London: Imperial College Press. 1 p.
- Herbst E. et van Dishoeck E. F. 2009. Complex organic interstellar molecules. Annual Review of Astronomy and Astrophysics 47: 427–480.
- Herbst E. et Wakelam V. 2008. The Ohio State University astrophysical chemistry group. <http://www.physics.ohio-state.edu/eric/research.html>.
- Huang Y., Alexandre M. R., et Wang Y. 2007. Structure and isotopic ratios of aliphatic side chains in the insoluble organic matter of the Murchison carbonaceous chondrite. Earth and Planetary Science Letters 259: 517–525.
- Komiya M. et Shimoyama A. 1996. Organic compounds from insoluble organic matter isolated from the Murchison carbonaceous chondrite by heating experiments. Bulletin of the Chemical Society of Japan 69: 53–58.
- Kwok S. 2004. The synthesis of organic and inorganic compounds in evolved stars. Nature 430: 985–991.
- Lerner N. R. 1997. Influence of Allende minerals on deuterium retention of products of the Strecke synthesis. Geochimica et Cosmochimica Acta 61: 4885–4893.
- Lévy R. L., Grayson M. A., et Wolf C. J. 1973. The organic analysis of the Murchison meteorite. Geochimica et Cosmochimica Acta 37: 467–483.]
- Madorský S. L. 1964. *Thermal degradation of organic polymers*. New York: Interscience Publishers.
- Marrocchi Y., Derenne S., Marty B., et Robert F. 2005. Interlayer trapping of noble gases in insoluble organic matter of primitive meteorites. Earth and Planetary Science Letters 236: 569–578.
- Muñoz Caro G. M., Meierhenrich U. J., Schutte W. A., Barbier B., Arcones Segovia A., Rosenbauer H., Thiemann W. H.-P., Brack A., et Greenberg J. M. 2002. Amino acids from ultraviolet irradiation of interstellar ice analogues. Nature 416: 403–406.
- Nuth J. A., Johnson N. M., et Manning S. 2008. A self-perpetuating catalyst for the production of complex organic molecules in protostellar nebulae. The Astrophysical Journal 673: L225–L228.
- Pearson V. K., Sephton M. A., Franchi I. A., et Gilmour I. 2000. Intra-and inter-meteorite heterogeneity in carbon and nitrogen abundance and isotopic compositions within CM chondrites (abstract #1823). 31st Lunar and Planetary Science Conference. CD-ROM.

Pendleton Y. J. et Allamandola L. J. 2002. *The organic refractory material in the diffuse interstellar medium: Mid-infrared spectroscopic constraints.* The Astrophysical Journal Supplement Series 138: 75–98.

Pering K. L. et Ponnampерuma C. 1971. *Aromatic hydrocarbons in the Murchison meteorite.* Science 173: 237–239.

Rémusat L., Derenne S., et Robert F. 2005a. *New insight on aliphatic linkages in the macromolecular organic fraction of Orgueil and Murchison meteorites through ruthenium tetroxide oxidation.* Geochimica et Cosmochimica Acta 69: 4377–4386.

Rémusat L., Derenne S., Robert F., et Knicker H. 2005b. *New pyrolytic and spectroscopic data on Orgueil and Murchison insoluble organic matter: A different origin than soluble?* Geochimica et Cosmochimica Acta 69: 3919–3932.

Rémusat L., Guan Y., et Eiler J. M. 2009. *Organic constituents in carbonaceous chondrites; evidence for preservation of pristine particles of mixed origins (abstract #1294).* 40th Lunar and Planetary Science Conference. CD-ROM.

Ribouleau A., Derenne S., Sarret G., Largeau C., Baudin F., et Connan J. 2000. *Pyrolytic and spectroscopic study of a sulphur-rich kerogen from the "Kashpir oil shales" Upper Jurassic, Russian platform.* Organic Geochemistry 31: 1641–1661.

Robert F. 2006. Solar system deuterium/hydrogen ratio. In *Meteorites and the early solar system II*, edited by Lauretta D. and Mc Sween H. Y. Jr. Tucson, Arizona: The University of Arizona Press. pp. 341–352.

Rouzaud J. N. et Clinard C. 2002. *Quantitative high resolution transmission electron microscopy: A promising tool for carbon materials characterization.* Fuel Processing Technology 77–78: 229–235.

Sakata A., Wada S., Onaka T., et Tokunaga A. T. 1987. *Infrared spectrum of quenched carbonaceous composite (QCC). II. A new identification of the 7.7 and 8.6 micron unidentified infrared emission bands.* The Astrophysical Journal 320: L63–L67.

Sandford S. A., Aléon J., Alexander C. M., Araki T., Bajt S., Baratta G. A., Borg J., Bradley J. P., Brownlee D. E., Brucato J. R., Burchell M. J., Busemann H., Butterworth A., Clemett S. J., Cody G., Colangeli L., Cooper G., D'Hendecourt L., Djouadi Z., Dworkin J. P., Ferrini G., Fleckenstein H., Flynn G. J., Franchi I. A., Fries M., Gilles M. K., Glavin D. P., Gounelle M., Grossemey F., Jacobsen C., Keller L.P., Kilcoyne A. L. D., Leitner J., Matrajt G., Meibom A., Mennella V., Mostefaoui S., Nittler L. R., Palumbo M. E., Papanastassiou D. A., Robert F., Rotundi A., Snead C. J., Spencer M. K., Stadermann F. J., Steele A., Stephan T., Tsou P., Tyliszczak T., Westphal A. J., Wirick S., Wopenka B., Yabuta H., Zare R. N., et Zolensky M. E. 2006. *Organics capture from comet 81P/Wild 2 by the StarDust spacecraft.* Science 314: 1720–1724.

Sephton M. A., Pillinger C. T., et Gilmour I. 1998. *$\delta^{13}C$ of free and macromolecular aromatic structures in the Murchison meteorite.* Geochimica et Cosmochimica Acta 62: 1821–1828.

- Sephton M. A., Pillinger C. T., et Gilmour I. 2000. *Aromatic moieties in meteoritic macromolecular materials: Analyses by hydrous pyrolysis and $\delta^{13}\text{C}$ of individual compounds*. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 64: 321–328.
- Sephton M. A., Love G. D., Watson J. S., Verchovsky A. B., Wright I. P., Snape C. E., et Gilmour I. 2004. *Hydropyrolysis of insoluble carbonaceous matter in the Murchison meteorite: New insights into its macromolecular structure*. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 68: 1385–1393.
- Siebenmorgen R. et Krugel E. 2010. *The destruction and survival of polycyclic aromatic hydrocarbons in the disks of T Tauri stars*. *Astronomy & Astrophysics* 511: 1–8.
- Stock L. M. et Wang S.-H. 1986. *Ruthenium tetroxide catalysed oxidation of coals. The formation of aliphatic and benzene carboxylic acids*. *Fuel* 65: 1552–1562.
- Studier M. H., Hayatsu R., et Anders E. 1972. *Origin of organic matter in early solar system—V. Further studies of meteoritic hydrocarbons and a discussion of their origin*. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 36: 189–215.
- Tielens A. G. G. M. 2008. *Interstellar polycyclic aromatic hydrocarbon molecules*. *Annual Review of Astronomy and Astrophysics* 46: 289–337.
- Visser R., Geers V. C., Dullemond C. P., Augereau J.-C., Pontoppidan K. M., et van Dishoeck E. F. 2007. *PAH chemistry and IR emission from circumstellar disks*. *Astronomy & Astrophysics* 466: 229–241.
- Wirick S., Flynn G. J., Jacobsen C. et Keller L. P. 2006. *Organics in the Murchison meteorite using carbon XANES spectroscopy (abstract #1418)*. 37th Lunar and Planetary Science Conference. CD-ROM.
- Woodall J., Agundez M., Markwick-Kemper A. J. et Millar T. J. 2008. *The UMIST data base for astrochemistry*. <http://www.udfa.net/>.
- Yabuta H., Naraoka H., Sakanishi K., et Kawashima H. 2005. *Solid-state ^{13}C NMR characterization of insoluble organic matter from Antarctic CM2 chondrites: Evaluation of the meteoritic alteration level*. *Meteoritics & Planetary Science* 40: 779–787.
- Yabuta H., Cody G. D. III , et Alexander C. M. O'D. 2007. *Chondritic organic matter as an indicator of nebular and parent body processing: Extended pyrolysis studies for CM, CI, CR, CO, CV, ordinary and Tagish Lake group meteorites (abstract #2304)*. 38th Lunar and Planetary Science Conference. CD-ROM.

8

Modélisations chimiques du milieu interstellaire

Valentine Wakelam

Laboratoire d'Astrophysique de Bordeaux

Les étoiles et les planètes se forment à partir de la matière interstellaire, mélange de gaz et de grains de poussières. Connaître la composition de cette matière au cours de ce processus est relié à plusieurs problématiques de l'astrophysique. La composition chimique du gaz et de la poussière va influencer les processus de formation des étoiles notamment par la fraction d'ionisation du gaz qui déterminera le couplage avec le champ magnétique et l'abondance des refroidisseurs radiatifs. Contraindre l'évolution de cette composition va aussi permettre d'apporter des réponses sur l'importance de la complexité de la matière interstellaire pour la complexité moléculaire du Système solaire. Pour étudier la composition chimique, les astrochimistes développent des modèles qui calculent la compétitivité entre la formation et destruction des molécules dans la phase gazeuse, leur formation et destruction sur la surface des grains interstellaires et les processus d'échange entre le gaz et les grains. Ce sont ces modèles qui sont présentés dans ce papier.

I. Introduction

La chimie du milieu interstellaire est décrite par un grand nombre de processus du fait de la diversité des conditions de température et densité que l'on peut y trouver. Dans les régions peu denses, la température est généralement élevée et la matière est exposée à des flux de photons UV et/ou X empêchant la survie des molécules. Dans les régions plus denses comme les nuages moléculaires, une chimie à plus basse température, impliquant des réactions ion-neutre mais également neutre-neutre, produit la formation de molécules plus ou moins complexes. Dans ce type d'environnement, les interactions avec la surface des grains (absorption, évaporation, réactions de surface) deviennent importantes. Quelque soit la densité, les particules à haute énergie du rayonnement cosmique interagissent avec la matière pour produire de la dissociation et de l'ionisation.

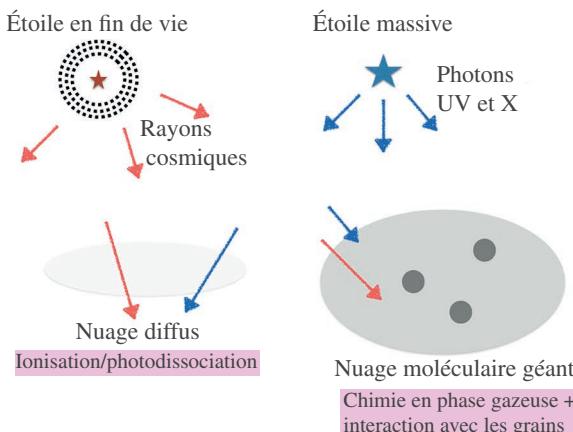


Figure 1. Processus physico-chimiques dominant dans le milieu interstellaire

La figure 1 résume ces processus qui déterminent la composition chimique, en fonction des environnements.

Pour certains environnements, il est possible de créer des modèles « simplifiés ». Pour les régions dominées par les photo-dissociations (PDR) par exemple, des modèles stationnaires sont adéquats car la chimie évolue très rapidement vers un état stationnaire. L'approximation de l'état stationnaire n'est en revanche plus possible pour des régions où la densité devient suffisante pour empêcher la pénétration des photons UV et la température suffisamment basse pour produire une cinétique hors équilibre. Dans ce type de milieu, l'aspect hors équilibre est encore renforcé par les réactions à la surface des grains interstellaires. Dans les régions denses des nuages moléculaires, les photodissociations par les photons UV peuvent en général être négligées car le flux UV provenant des sources environnantes du nuage est absorbé par les parties externes du nuage. Lorsque l'on veut modéliser la chimie dans un objet aussi complexe au niveau de sa structure qu'un disque protoplanétaire, il est très dangereux de faire ce genre d'approximation car tous les processus décrits au début de cette introduction peuvent jouer un rôle à un rayon ou une hauteur dans le disque. Il vaut mieux dans ce cas construire un modèle qui prenne en compte aussi bien que possible l'ensemble des processus physico-chimiques.

Les modèles de chimie permettent de calculer l'évolution de la composition chimique d'un milieu en fonction du temps pour des conditions physiques données et à partir d'une composition initiale. La chimie du milieu interstellaire n'étant généralement pas à l'état stationnaire, le temps et donc l'âge des objets est un facteur important. L'évolution de l'abondance des composés chimiques est déterminée par les réactions chimiques couplant entre elles les espèces modélisées. Au niveau numérique, le modèle résout une équation différentielle à chaque pas de temps pour chaque composé sachant que ces équations sont couplées entre elles. Dans les modèles actuels, il y a plusieurs centaines de composés chimiques (donc d'équations différentielles) et plusieurs milliers de réactions chimiques.

Nous sommes donc en présence de systèmes hautement non linéaires nécessitant des méthodes numériques sophistiquées pour les résoudre.

Avant donc de se lancer dans des modèles très sophistiqués en incluant des processus dynamiques tels que la turbulence pour les disques par exemple, il est indispensable de comprendre les limitations des modèles chimiques afin d'en comprendre leur force. La première question que l'on peut se poser est : peut-t-on mettre des barres d'erreur sur les abondances que l'on calcule avec les modèles chimiques ? Ce n'est qu'à partir de l'estimation d'une barre d'erreur que l'on peut 1) faire une comparaison quantitative avec des observations et d'autre part améliorer les modèles en réduisant leur barre d'erreur. L'erreur sur les abondances calculées est déterminée par la propagation des erreurs sur les paramètres du modèle. Parmi ces paramètres, on compte les vitesses (ou taux) de réaction chimique. Pour tester les modèles, il est nécessaire de comparer les prédictions à des abondances observées dans le milieu interstellaire. Les nuages moléculaires denses représentent à priori les meilleurs « objets tests » car on peut les considérer comme relativement simples du point de vue de la structure physique même si des observations à haute résolution angulaire montreraient certainement des structures à petite échelle. En quantifiant l'accord ou le désaccord entre modèles et observations, il est possible de définir si un modèle reproduit une partie significative des abondances observées. Lorsqu'il y a désaccord, une interprétation logique peut être donnée comme l'incomplétude du réseau sans remettre en question les accords obtenus. Certaines espèces sont formées sur les grains interstellaires comme le méthanol (CH_3OH) et leur abondance observée ne peut être reproduite par un modèle ne tenant compte que de la phase gazeuse. Lorsque l'on étudie la sensibilité des modèles chimiques aux incertitudes des paramètres, il devient évident qu'il faut être très prudent lorsque l'on essaie de contraindre certains paramètres comme l'âge à partir de la comparaison entre modèle chimique et observations. Le nombre de paramètres d'un modèle chimique (y compris les taux de réactions) qui peuvent être ajustés pour reproduire une observation est trop important pour qu'il n'y ait qu'une réponse unique à un problème. Il est donc nécessaire de contraindre ces paramètres par d'autres méthodes que la comparaison du modèle chimique aux observations. Les taux de réaction par exemple peuvent être étudiés par des méthodes expérimentales et théoriques. Une grosse partie de mon travail a été d'améliorer les réseaux de réactions chimiques pour le milieu interstellaire. Cela a impliqué la construction d'une base de données de cinétique en ligne (KIDA) et d'outils d'administration permettant une mise à jour efficace, rapide et de qualité des données. Une deuxième conséquence est la mise en place de nombreuses collaborations avec des groupes de physico-chimistes intéressés à travailler sur des problèmes astrophysiques. Ce genre de collaboration m'a permis de découvrir un domaine et des gens passionnantes. Ce travail souvent ingrat (l'étude d'une réaction peut prendre plusieurs années) ne représente souvent pour nous qu'une ligne dans un long fichier de réactions chimiques. C'est pourquoi il est important de le valoriser en améliorant les collaborations entre physico-chimistes et astrophysiciens.

Dans les milieux denses où les grains sont froids, les molécules de la phase gazeuse peuvent rester collées sur la surface des grains lorsqu'elles entrent en collision avec celles-ci. Une fois sur le grain, les molécules peuvent diffuser et une réaction chimique peut avoir lieu lorsque deux espèces se rencontrent. Les molécules peuvent être réintroduites dans la phase gazeuse par des processus thermiques directs ou indirects. L'interaction avec la surface des grains peut

donc influencer la composition chimique en phase gazeuse même dans les sources froides. Le couplage entre la chimie en phase gazeuse et à la surface des grains est un domaine peu exploré qui contrôle pourtant l'évolution de nombreux objets astrophysiques. Cet aspect crucial de la chimie interstellaire va constituer une part importante de la recherche en astrochimie future.

2. Généralités sur les modèles chimiques et les méthodes d'amélioration

Cette section donne quelques notions de base nécessaires pour comprendre le mode de fonctionnement des modèles chimiques en phase gazeuse. J'y décris également les méthodes pour améliorer les prédictions des modèles chimiques. Afin de « calibrer » les modèles, les abondances calculées sont comparées aux abondances observées. La comparaison implique de connaître la précision des modèles et donc les barres d'erreur sur les abondances calculées. Ces barres d'erreur sont obtenues en étudiant la propagation de l'incertitude sur les taux de réactions (et/ou sur les autres paramètres du modèle) au cours de l'évolution chimique.

2.1 Les modèles chimiques en phase gazeuse

Sans rentrer dans les détails, un modèle chimique dépendant du temps permet de calculer l'évolution de l'abondance des composés chimiques en fonction du temps pour un jeu de paramètres donné et à partir d'un état initial. Les paramètres sont : la température (T) et la densité du gaz (n_{H} , généralement la densité en cm^{-3} de protons totale du gaz), le taux d'ionisation par les particules du rayonnement cosmique (ζ en s^{-1}), l'extinction visuelle (A_v , sans unité, ce paramètre est proportionnel à la densité de colonne de gaz et donc indirectement de poussières), les abondances élémentaires et le réseau de réactions chimiques (liste des réactions et taux de réaction). L'évolution de la composition chimique du gaz est déterminée par les réactions chimiques considérées dont les taux peuvent dépendre de la température.

Du point de vue numérique, un modèle consiste à résoudre des équations différentielles du type :

$$\frac{dn_i}{dt} = \sum_{l,m} k_{lm} n_l n_m - n_i \sum_{i \neq j} k_{ji} n_j$$

représente la densité des espèces (en cm^{-3}) tandis que est le taux de réaction. Le premier terme de l'équation représente donc la somme des taux de production de l'espèce tandis que le deuxième terme est la somme des taux de destruction de l'espèce. Il faut ici faire la différence entre taux de réaction et taux de production ou destruction. Le premier terme représente la vitesse de réaction tandis que le deuxième représente le produit entre la vitesse de réaction et la densité des réactants. Le modèle doit donc résoudre un système d'équations différentielles couplées à chaque pas de temps. Pour résoudre ce système, des méthodes numériques sophistiquées provenant d'ODEPACK¹ sont utilisées. A titre

¹ <http://www.netlib.org/odepack/>

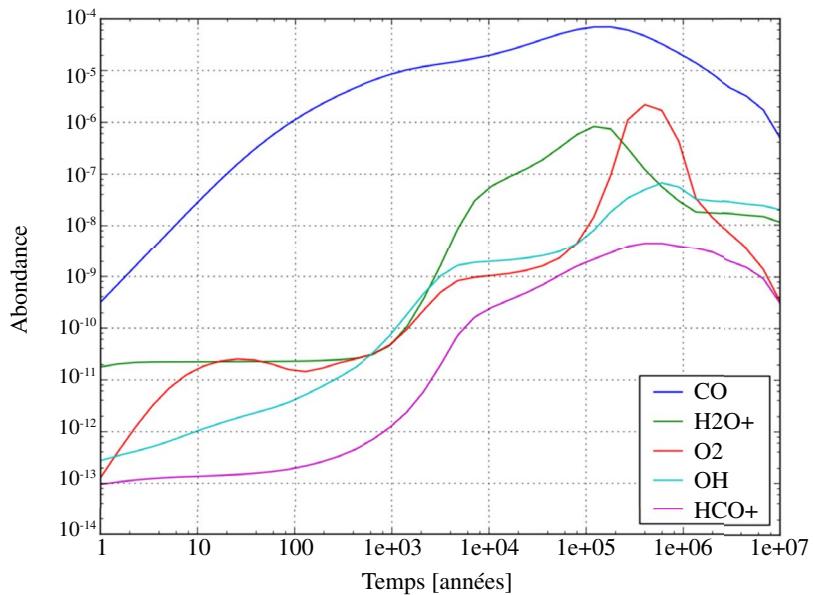


Figure 2. Abondances moléculaires en fonction du temps calculées par un modèle chimique en phase gazeuse pour les conditions d'un nuage moléculaire (10 K , $n_{\text{H}} = 2 \times 10^4\text{ cm}^{-3}$ et $A_v = 10$).

d'illustration, un résultat typique d'une simulation pour des conditions typiques de nuage moléculaire (10 K , $n_{\text{H}} = 2 \times 10^4\text{ cm}^{-3}$ et $A_v = 10$) est donné à la figure 2.

Les réactions chimiques considérées dans les modèles sont représentatives des différents processus présents dans le milieu interstellaire. Les réactions d'ordre un ($\text{A} \rightarrow \text{B} + \text{C}$) représentent les interactions avec le rayonnement cosmique et les photons UV. Les taux de ces réactions sont exprimées en s^{-1} et dépendent du taux d'ionisation total de H_2 par le rayonnement cosmique pour le premier et de l'extinction visuelle pour le deuxième. Les réactions d'ordre deux ($\text{A} + \text{B} \rightarrow \text{C} + \text{D}$ ou $\text{A} + \text{B} \rightarrow \text{C} + h\nu$) sont exprimées en cm^3s^{-1} et décrivent tout un tas de processus : réactions bimoléculaires entre espèces neutres ou entre une espèce neutre et une espèce chargée, réactions de recombinaisons dissociatives des ions, associations radiatives etc. Les taux de ces réactions peuvent dépendre de la température suivant la formule classique :

$$k(T) = \alpha \left(\frac{T}{300} \right)^{\beta} e^{-\gamma/T}$$

α , β , et γ étant les trois paramètres définissant le taux. Les réactions à trois corps ne sont généralement pas incluses dans les modèles du milieu interstellaire du fait des faibles densités. Seules les parties très internes des disques protoplanétaires peuvent être concernées. Quelques notions sur la façon de traiter la chimie à la surface des grains seront données dans le dernier chapitre de ce manuscrit.

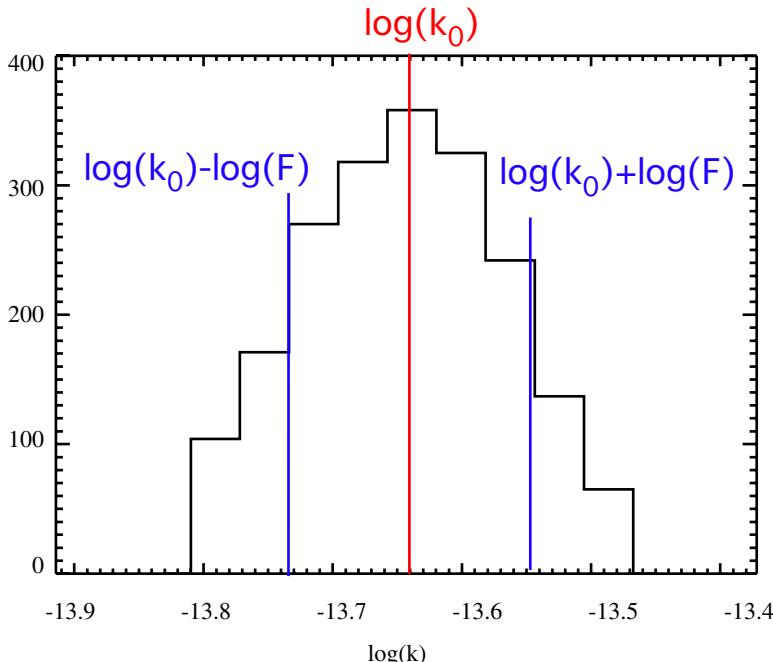


Figure 3. Distribution des valeurs du taux de la réaction $C_9H_2 + CR \rightarrow C_9H + H$ utilisées pour étudier la propagation d'incertitudes liées aux taux de réactions dans un nuage moléculaire. Le taux moyen est $2.3 \times 10^{14} \text{ cm}^3$ et le facteur d'incertitude F de 1.5. CR ici représente une particule du rayonnement cosmique.

2.2 Propagation d'incertitudes

Chaque vitesse de réaction chimique utilisée dans les modèles est entachée d'une incertitude que nous prenons sous la forme d'un facteur en log-normal F . Si F est un facteur 2, cela veut dire que la valeur du taux de la réaction à 1σ est comprise entre $k_0/2$ et $2k_0$, k_0 étant la valeur moyenne du taux généralement donnée dans les bases de données. La méthode pour suivre la propagation des incertitudes consiste à faire varier tous les taux de réactions en même temps en tirant de façon aléatoire leur valeur dans cet intervalle d'incertitude. Les taux de réactions se calculent donc à partir de la formule :

$$\log(k_i) = \log(k_{i,0}) + \varepsilon_i \log(F_i)$$

ε_i étant une variable aléatoire de distribution normale de valeur moyenne 0 et d'écart type 1. Un exemple de la distribution d'un taux de réaction ainsi calculé est donné à la figure 3. Pour un réseau de 4500 réactions, on effectue en général 2500 tirages parce que la dispersion des abondances calculées varie peu au-delà de ce nombre.

Le choix d'une distribution en log-normal suggère que la valeur moyenne du taux de réaction est une valeur « préférée ». Ce n'est cependant pas toujours le cas et la forme de

l'incertitude dépend de la nature des incertitudes [1]. Dans le cas des bases de données pour le milieu interstellaire, l'origine de l'incertitude sur les taux de réaction n'est pas connue et par ailleurs, la majorité des incertitudes ont une valeur probablement erronée. Vasyunin et al. [2] a montré que pour les sources qui nous intéressent, la forme de la distribution des incertitudes influençait peu la distribution des abondances calculées. Le fait de prendre une distribution en log-normal pour l'incertitude des taux de réaction a pour effet d'obtenir en général des abondances en log-normal sauf lors de variations très brutales des abondances ou lorsqu'il y a hypersensibilité ou bistabilité [3].

2.3 Définition de l'incertitude sur les abondances

La figure 4 montre le résultat typique d'une simulation pour un nuage moléculaire. Chaque courbe représente l'abondance calculée pour un jeu de taux de réaction chimique. Pour utiliser ce résultat il faut maintenant en extraire une barre d'erreur. Le premier réflexe dans ce cas est d'utiliser la déviation standard pour chaque espèce à chaque pas de temps :

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\log(x_i) - \overline{\log(x)})^2}$$

N étant le nombre de tirages, x_i l'abondance obtenue avec le tirage i et $\overline{\log(x)}$ la valeur moyenne, en log, de l'abondance sur tous les tirages. Ce calcul se fait généralement en log compte tenu des faibles valeurs des abondances. Dans le cas où les valeurs obtenues à un temps donné t sont distribuées selon une gaussienne en log, $\pm 1\sigma$ représente l'enveloppe qui contient 68 % des courbes au temps t . 2σ (95.4 %) nous donnerait donc une bonne idée de l'erreur sur les abondances chimiques calculées par le modèle. Une fois la barre d'erreur calculée, on représente en général sur la même courbe l'abondance moyenne ainsi que l'enveloppe qui contient 95.4 % des courbes (voir la figure 5).

Je n'ai jusqu'à présent parlé que des incertitudes du modèle dues aux taux de réaction. Il peut cependant y avoir des erreurs introduites par une incertitude sur les autres paramètres du modèle comme la température, la densité, le taux d'ionisation par le rayonnement cosmique ou les abondances élémentaires [4].

2.4 Incertitudes sur les rapports d'abondance

Il est souvent utile lors de comparaisons avec les observations d'utiliser des rapports d'abondance entre deux molécules observées plutôt que des abondances par rapport à l'hydrogène moléculaire qui est une donnée obtenue de façon indirecte et souvent entachée d'une grande erreur. Soit un rapport d'abondance R entre x_i et x_j ($R = \frac{x_i}{x_j}$). Si on calcule le log sur le rapport d'abondance on a donc $\log(R) = \log(x_i) - \log(x_j)$. L'incertitude $\Delta \log(R)$ vaut donc $\Delta \log(x_i) + \Delta \log(x_j)$. Ce calcul va cependant surestimer l'erreur sur le rapport dans le cas où les espèces sont chimiquement reliées. La figure 6 montre l'évolution du rapport d'abondance de CS/SO dans le cas d'un cœur chaud de faible masse avec la barre d'erreur sur le rapport calculé en additionnant les erreurs sur chacune des abondances

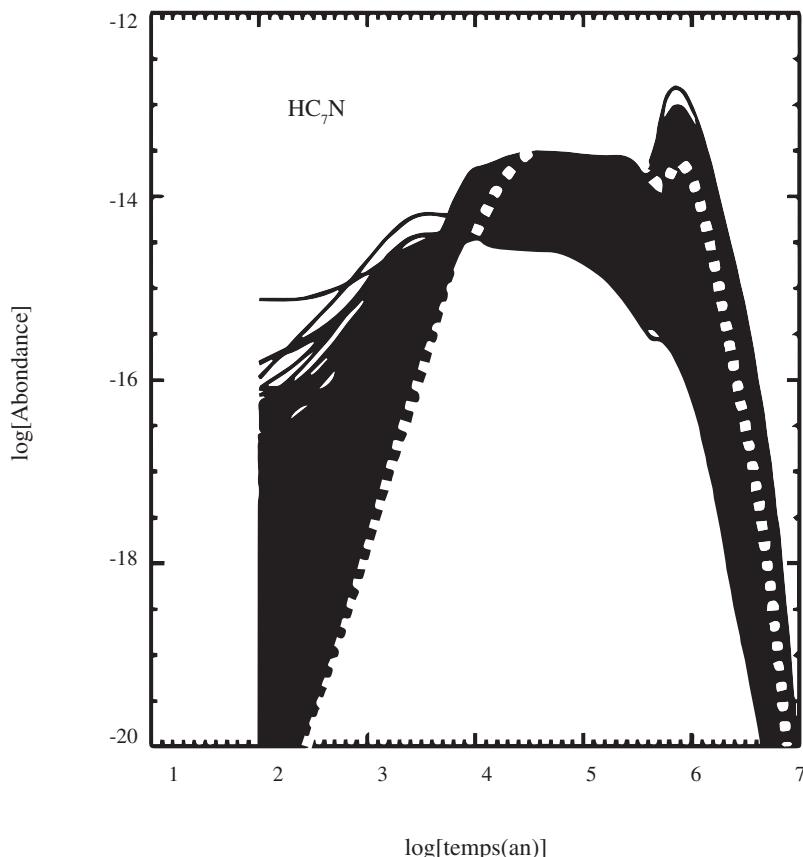


Figure 4. Résultat d'une simulation Monte-Carlo pour étudier la propagation des incertitudes des taux de réactions.

$\Delta \log(x_i) + \Delta \log(x_j)$. Sur le même graphique, nous avons tracé les erreurs calculées directement sur les rapports $\frac{x_i}{x_j} (\Delta \log(x_i/x_j))$.

2.5 Définition d'une réaction importante

L'importance d'une réaction pour un réseau chimique est une notion qu'il est nécessaire de définir. On peut définir une réaction importante comme étant celle qui va produire ou détruire majoritairement un composé. Ces réactions sont généralement déterminées en regardant le taux de production ou de destruction d'un composé à un temps donné. Ce taux est obtenu en multipliant la vitesse de la réaction par les densités (cm^{-3}) des réactants. La méthode classique pour trouver les réactions importantes d'un réseau consiste donc à chercher les réactions qui produisent les taux les plus élevés. De cette

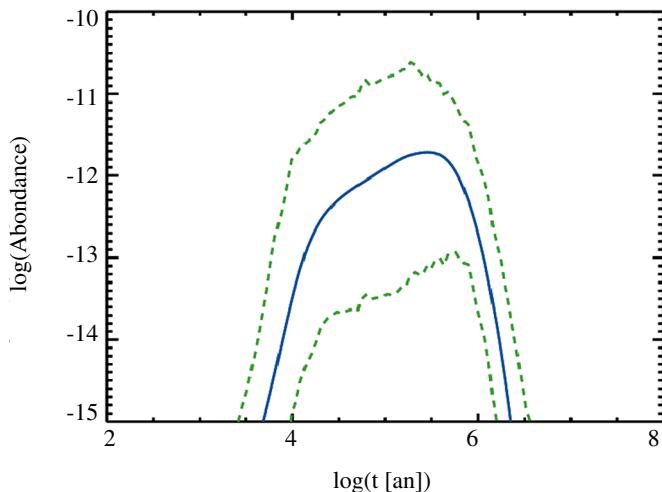


Figure 5. Abondance moyenne de HC_7N (ligne continue) avec sa barre erreur (lignes pointillées) due aux incertitudes sur les taux de réaction.

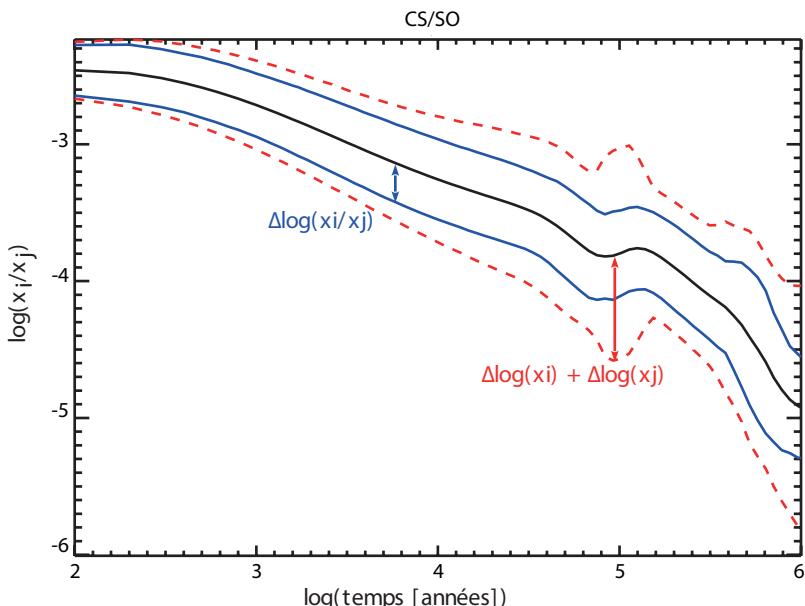


Figure 6. Incertitudes sur les rapports d'abondance CS/SO calculées en additionnant l'incertitude sur chaque abondance (courbes rouges) ou calculées directement sur les rapports d'abondance (courbes bleues).

façon cependant, on ne repère pas vraiment les réactions qui contrôlent l'abondance des espèces. Prenons l'exemple de la molécule d'oxygène moléculaire. La réaction qui forme majoritairement cette espèce dans les conditions classiques de nuage moléculaire est la réaction neutre-neutre $O + OH \rightarrow O_2 + H$. Diminuer le taux de cette réaction d'un facteur 10 ne changera cependant pas l'abondance de O_2 car le taux de destruction de O_2 ($k_{n_{OH} n_O}$) reste le même [5]. En effet, cette réaction étant également la principale voie de destruction de OH, l'abondance de OH est alors multipliée par 10. Dans d'autres cas, la réaction peut même être complètement supprimée et une autre réaction prendra la place. Une façon de contourner le problème est de regarder quantitativement de quelle façon chaque réaction va influencer l'abondance des espèces. On peut alors identifier des réactions qui ne sont pas directement liées à la production ou à la destruction d'une espèce mais qui vont influencer son abondance de façon indirecte. Le principal problème de cette méthode est qu'on ne peut pas mettre en évidence des phénomènes de sensibilité couplés : l'action combiné de plusieurs réactions.

L'autre aspect de la question est lié aux espèces chimiques. Nous avons deux façons de définir les réactions importantes. La première est de regarder le modèle dans son ensemble et de chercher les réactions qui influencent le plus d'espèces chimiques. L'autre approche est de sélectionner des espèces importantes, par exemple celles observées dans le milieu étudié ou des espèces majoritaires, et d'extraire les réactions importantes pour ces espèces. Toutes ces approches sont généralement complémentaires.

2.6 Etudes de sensibilité

Pour identifier les réactions qui influencent quantitativement le plus les abondances des espèces, il y a la méthode longue et la méthode rapide. La méthode longue consiste à faire varier le taux de chaque réaction chimique d'un certain facteur l'un après l'autre et de regarder pour chaque modification comment les abondances varient. Le nombre de modèles calculé est alors égal au nombre de réactions chimiques du réseau.

La méthode plus rapide consiste à faire varier toutes les réactions en même temps et de calculer les coefficients de corrélation de Pearson définis comme suit :

$$P_j^i(t) = \frac{\sum^l (\log(x_j^l(t)) - \overline{\log x_i(t)})(\log k_i^l - \overline{\log k_i})}{\sqrt{\sum^l (\log(x_j^l(t)) - \overline{\log(x_i(t))})^2 \sum^l (\log(k_i^l) - \overline{\log(k_i)})^2}}$$

Où $\overline{\log(x_i(t))}$ et $\overline{\log(k_i)}$ sont les valeurs moyennes de l'abondance de l'espèce j et le taux de la réaction i . Plus P est grand, plus la corrélation et l'importance de la réaction i est grande pour l'espèce j . Nous travaillons ici en log parce que nous manipulons des petits nombres.

On peut donc ensuite regarder P pour des espèces données ou sommer P pour chaque réaction pour avoir un impact global des réactions. Quelle que soit la méthode, l'importance des réactions peut dépendre du facteur par lequel leur taux est multiplié.

2.7 Comparaisons entre modèles et observations

La modélisation, quelle qu'elle soit, nécessite d'être confrontée à l'observation pour être validée. Les comparaisons sont cependant loin d'être des choses faciles à réaliser et nécessitent l'établissement de critères d'accord. Les comparaisons que nous faisons entre les prédictions des modèles chimiques et les abondances observées nous permettent d'identifier les processus (chimiques ou physiques) manquants ou erronés plutôt que de réellement valider nos modèles étant donné le nombre de paramètres libres. Il faut bien avoir conscience du fait que les modèles chimiques sont loin de reproduire l'ensemble des processus qui existent dans la réalité et sont un peu à l'image du manque de résolution spatial que nous avons au niveau des observations. Les modèles sont généralement testés sur les nuages moléculaires qui sont supposés être les objets dont la physique est la plus simple car ils sont au premier ordre dynamiquement stables.

2.8 Abondances observées dans les nuages denses

Les deux nuages communément utilisés pour faire ce type de comparaison sont LI34N et TMC-I. LI34N (aussi nommé LI87) est un nuage froid et sans source interne connue. Il est suffisamment isolé pour en faire une source très largement étudiée. Quatre régions caractérisées par des pics d'émission de molécules, principalement azotées ont été identifiées [6] : North (N), South (S), Center (C) et West (W). TMC-I est un nuage moléculaire situé dans le Taureau qui présente trois pics d'émission moléculaire provenant de trois familles de molécules : CP pour Cyanopolyne Peak, SO pour le pic de molécules soufrées et NH₃ pour le pic de molécules azotées. Les pics pour lesquels nous avons le plus d'observations sont LI34N North et TMC-I CP. La liste des molécules détectées dans ces deux nuages avec leur abondance par rapport à H₂ est donnée dans la tableau I. La majorité des données regroupées dans ce tableau proviennent d'un compte rendu de conférence [7] où les abondances sont données sans barres d'erreur.

2.9 Critères d'accord

Les abondances moléculaires calculées à partir de spectres observés sont généralement données avec des barres d'erreur qui correspondent aux erreurs de calibration dues à l'instrument de mesure et aux perturbations atmosphériques. Les erreurs dues aux hypothèses de transfert radiatif ou de géométrie de l'objet observé ne sont jamais prises en compte car impossibles à quantifier. Lorsque l'on compare les abondances déterminées par l'observation avec les modèles chimiques, il est nécessaire de connaître l'incertitude rattachée aux abondances prédictes par les modèles chimiques. L'incertitude qui serait due à l'incomplétude du modèle du point de vue de la chimie ou de la physique ne peut pas être estimée. Celle produite par une méconnaissance des paramètres du modèle en revanche peut être calculée suivant les méthodes décrites dans ce chapitre. On peut donc au final comparer les valeurs observées et théoriques en tenant compte de leurs barres d'erreur respectives. La figure 7 montre l'exemple d'une telle comparaison dans le cas où il y a un accord (pour la molécule de OH) et dans celui où il n'y a pas d'accord (cas de CH₃OH). On dit qu'il y a accord lorsque, à un temps donné, il y a recouvrement entre les

Tableau 1. Abondances moléculaires observées dans TMC-1 (CP) et L134N (N) (/H₂).

Molécule	TMC-I (CP)	L134N (N)	Molécule	TMC-I (CP)	L134N (N)
C ₂	5x10 ⁻⁸	-	HCOOH	≤2x10 ⁻¹⁰	3x10 ⁻¹⁰
CH	2x10 ⁻⁸	1x10 ⁻⁸	HC ₃ N	2x10 ⁻⁸	8.7x10 ⁻¹⁰
CO	8x10 ⁻⁵	8x10 ⁻⁵	HC ₂ NC	5x10 ⁻¹⁰	-
CS	4x10 ⁻⁹	1.7x10 ⁻⁹	HNC ₃	6x10 ⁻¹¹¹	-
NO	≤ 3x10 ⁻⁸	6x10 ⁻⁸	CH ₂ CN	6x10 ⁻¹⁰	≤1x10 ⁻⁹
OH	2x10 ⁻⁷	7.5x10 ⁻⁸	C ₄ H ₂	1x10 ⁻⁹	-
SO	2x10 ⁻⁹	3.1x10 ⁻⁹	C ₅ H	6x10 ⁻¹⁰	-
C ₂ H	2x10 ⁻⁸	≤ 5x10 ⁻⁸	CH ₃ OH	3x10 ⁻⁹	3.7x10 ⁻⁹
C ₂ S	8x10 ⁻⁹	6x10 ⁻¹⁰	CH ₃ CHO	6x10 ⁻¹⁰	6x10 ⁻¹⁰
CCO	6x10 ⁻¹¹	-	C ₃ H ₃ N	4x10 ⁻⁹	≤1x10 ⁻¹⁰
H ₂ S	≤ 5x10 ⁻¹⁰	8x10 ⁻¹⁰	C ₃ H ₄	6x10 ⁻⁹	≤1.2x10 ⁻⁹
HCN	2x10 ⁻⁸	1.2x10 ⁻⁸	C ₆ H	2x10 ⁻¹⁰	-
HNC	2x10 ⁻⁸	4.7x10 ⁻⁸	HC ₅ N	4x10 ⁻⁹	1x10 ⁻¹⁰
OCS	2x10 ⁻⁹	2x10 ⁻⁹	C ₆ H ₂	5x10 ⁻¹¹	-
SO ₂	≤ 1x10 ⁻⁹	≤ 1.6x10 ⁻⁹	CH ₃ C ₃ N	8x10 ⁻¹¹	-
C ₃ H	1x10 ⁻⁸	3x10 ⁻¹⁰	CH ₃ C ₄ H	4x10 ⁻¹⁰	-
C ₃ N	6x10 ⁻¹⁰	≤ 2x10 ⁻¹⁰	HC ₇ N	1x10 ⁻⁹	2x10 ⁻¹¹
C ₃ O	1x10 ⁻¹⁰	≤ 5x10 ⁻¹¹	HC ₉ N	5x10 ⁻¹⁰	-
C ₃ S	1x10 ⁻⁹	≤ 2x10 ⁻¹⁰	HCO ⁺	8x10 ⁻⁹	1.2x10 ⁻⁸
H ₂ CO	5x10 ⁻⁸	2x10 ⁻⁸	HCS ⁺	4x10 ⁻¹⁰	6x10 ⁻¹¹
H ₂ CS	7x10 ⁻¹⁰	6x10 ⁻¹⁰	N ₂ H ⁺	4x10 ⁻¹⁰	6.8x10 ⁻¹⁰
NH ₃	2x10 ⁻⁸	9.1x10 ⁻⁸	HCNH ⁺	2x10 ⁻⁹	≤3.1x10 ⁻⁹
H ₂ CCN	5x10 ⁻⁹	≤ 1x10 ⁻⁹	C ₃ H ₂ N ⁺	1x10 ⁻¹⁰	-
H ₂ C ₂ O	6x10 ⁻¹⁰	≤ 7x10 ⁻¹⁰	H ₂ O	≤7x10 ⁻⁸	≤3x10 ⁻⁷
C ₃ H ₂	1x10 ⁻⁸	2x10 ⁻⁹	O ₂	≤7.7x10 ⁻⁸	≤1.7x10 ⁻⁷
C ₄ H	9x10 ⁻⁸	1x10 ⁻⁹	SiO	≤2x10 ⁻¹²	≤3x10 ⁻¹²
CN	5x10 ⁻⁹	8.2x10 ⁻¹⁰	C	-	≥1x10 ⁻⁶

enveloppes des abondances observées et modélisées définies par leurs barres d'erreur. Dans le cas où il n'y a pas d'accord, nous calculons la différence (en unité de log) entre les limites des enveloppes les plus proches, c'est ce que l'on appelle la distance de désaccord. Ainsi, à chaque temps d'intégration du modèle, nous pouvons avoir trois paramètres qui permettent de quantifier l'accord ou le désaccord. Le premier paramètre est la fraction de molécules (F) dont l'abondance est reproduite par le modèle : on compte à chaque temps le nombre de molécules pour lesquelles on a un accord puis on normalise par le nombre total de molécules observées. Le deuxième paramètre est la distance totale de désaccord (D) : on ajoute les distances de désaccord à chaque pas de temps pour les molécules non reproduites. Le dernier paramètre consiste à multiplier la fraction de molécules reproduite par le rapport entre le minimum de D (sur tous les temps) et la distance de désaccord à chaque temps : $\frac{\min(D)}{D(t)} \times F(t)$.

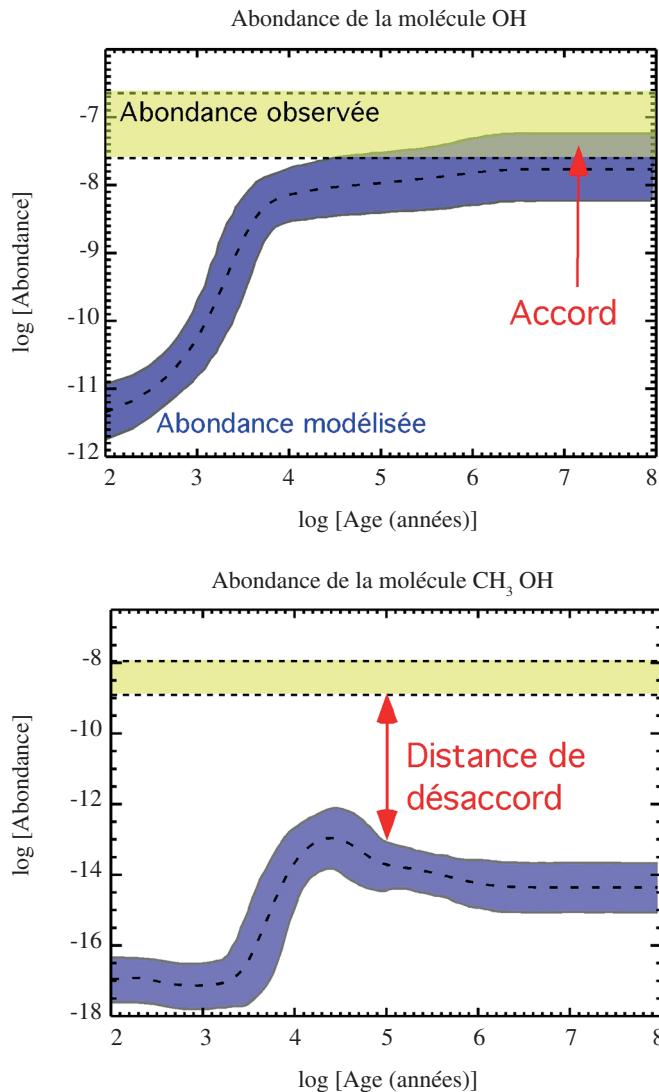


Figure 7. Exemples de comparaison entre abondance observée et abondance calculée par le modèle. Les abondances du modèle sont calculées pour un nuage moléculaire et comparées aux abondances dans TMC-1.

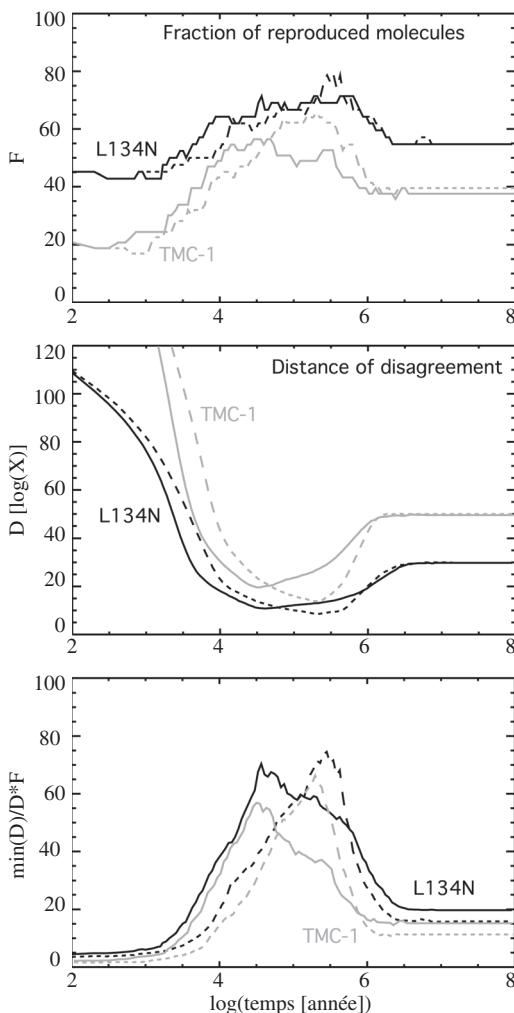


Figure 8. Paramètres accord et de désaccord entre modèles et observations dans les deux nuages moléculaires L134N et TMC-1. Les courbes pleines et pointillées ont été obtenues pour des taux de réactions du type $C + C_n$ différents.

Un exemple de ces trois paramètres en fonction du temps est donné à la figure 8. Sur cette figure, nous montrons la comparaison pour les deux nuages moléculaires et pour deux modèles où les taux des réactions du type $C + C_n$ ont été changés [8]. Le problème que nous avons souvent rencontré c'est que cet accord dépend de tous les paramètres [4].

3. Généralités sur les modèles gaz-grain

La section 2 a décrit en détail le fonctionnement d'un modèle chimique pour le milieu interstellaire ne prenant en compte que les processus en phase gazeuse. Dans le milieu interstellaire, le gaz et mélangé à des petits grains de poussière (de taille caractéristique de $0.1 \mu\text{m}$) principalement composé de silicates [9]. Ces grains de poussière influencent la composition chimique par les processus suivants :

- le collage des molécules de la phase gazeuse sur la surface des grains interstellaires : Lorsque qu'une molécule du gaz entre en collision avec un grain interstellaire, elle a une certaine probabilité de rester collée sur la surface. Cette probabilité étant mal connue, elle est généralement prise égale à 1. L'efficacité de ce processus dépend de la section efficace des grains et de la vitesse relative entre le grain et la molécule qui elle dépend de la température du gaz ;
- les réactions de surface : Sur la surface des grains, les espèces chimiques peuvent diffuser. L'efficacité de cette diffusion dépend de la masse de la molécule et de la température de surface du grain. L'hydrogène est la seule espèce présumée pouvoir bouger à 10 K mais à plus haute température, les espèces plus lourdes peuvent se mouvoir. Une fois que deux espèces se rencontrent sur le grain, elles peuvent réagir pour former des produits. Certaines de ces réactions peuvent présenter des barrières d'activation ;
- l'évaporation thermique directe des espèces collées sur les grains : La température peut briser les liaisons de van der Walls reliant les espèces à la surface des grains et permettre l'évaporation de ces espèces dans la phase gazeuse. La température d'évaporation des espèces dépend de cette énergie de liaison qui dépend de chaque espèce et de la nature des surfaces. Ce sont des paramètres qui sont obtenus par des mesures de laboratoire et qui sont mal connues pour un grand nombre de composés complexes ;
- l'évaporation par le biais des particules du rayonnement cosmique : Lorsqu'une particule du rayonnement cosmique entre en collision avec un grain interstellaire, le grain est chauffé de façon ponctuelle, ce qui permet l'évaporation partielle des molécules. L'efficacité de ce processus dépend de la taille des grains et le chauffage stochastique est assez mal connu ;
- l'évaporation par le biais des réactions exothermiques : Lorsque qu'une réaction de surface est exothermique, l'excès énergétique relâché au cours de la réaction peut permettre l'évaporation partielle des produits. Ce processus a été ajouté récemment au modèle [10] et l'efficacité est un paramètre peu contraint.

Tous les processus décrits au-dessus sont exprimés sous la forme de taux qui s'ajoutent à l'équation 1.1. Ces équations sont en partie décrites dans ma thèse et on les trouve également dans un papier de *benchmark* entre Nautilus et le code développé par Dimtry Semenov [11]. D'autres références peuvent également être utiles : Hasegawa et al. [12, 13] et Hersant et al. [14]. Le système d'équations formé par ces processus est encore

plus complexe que celui d'un modèle purement en phase gazeuse et les comportements chimiques deviennent extrêmement non linéaires et très difficiles à comprendre.

4. Conclusion

Cet article décrit les principales caractéristiques des modèles qui permettent aux astrophysiciens d'étudier la chimie ayant lieu dans le milieu interstellaire. Dans les conditions extrêmes de ces environnements, les processus physico-chimiques ne sont pas les mêmes que sur la surface de la Terre et de nouvelles expériences en laboratoire ou de nouvelles théories doivent être développées pour étudier au niveau microscopique les processus d'interactions entre espèces chimiques et avec la surface des grains interstellaires.

Pour aller plus loin dans la description de ces processus, trois articles de revue en anglais sont disponibles : Wakelam et al. [15, 16] et Agúndez & Wakelam [17].

Remerciements

La recherche de V. Wakelam est financée par une bourse Européenne ERC Starting Grant (3DICE, grant agreement 336474).

Références

- [1] Carrasco, Dutuit, Thissen, Banaszkiewicz, Pernot, Planetary and Space Science, Volume 55, Issue 1-2, pp. 141-157 (2007)
- [2] Vasyunin, Sobolev, Wiebe, Semenov, Astronomy Letters, vol. 30, p. 566-576 (2004)
- [3] Wakelam, Herbst, Selsis, Massacrier, Astronomy and Astrophysics, Volume 459, Issue 3, December 1, pp. 813-820 (2006)
- [4] Wakelam, Herbst, Le Bourlot, Hersant, Selsis, Guilloteau, Astronomy and Astrophysics, Volume 517, id.A21, 10 pp. (2010)
- [5] Quan, Herbst, Millar, Hassel, Lin, Guo, Honvault, Xie, The Astrophysical Journal, Volume 681, Issue 2, pp. 1318-1326 (2008)
- [6] Dickens, Irvine, Snell, Bergin, Schloerb, Pratap, Miralles, The Astrophysical Journal, Volume 542, Issue 2, pp. 870-889 (2000)
- [7] Ohishi, Irvine, Kaifu, Astrochemistry of Cosmic Phenomena: Proceedings of the 150th Symposium of the International Astronomical Union, held at Campos do Jordão, São Paulo, Brazil, August 5-9, 1991. Edited by P. D. Singh. International Astronomical Union. Symposium no. 150, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, p. 171 (1992)
- [8] Wakelam, Loison, Herbst, Talbi, Quan, Caralp, Astronomy and Astrophysics, Volume 495, Issue 2, pp. 513-521 (2009)

- [9] Tielens A.G.G.M., The Physics and Chemistry of the Interstellar Medium, by A.G.G.M. Tielens, Cambridge, UK: Cambridge University Press (2010)
- [10] Semenov, Hersant, Wakelam, Dutrey, Chapillon, Guilloteau, Henning, Launhardt, Piétu, Schreyer, Astronomy and Astrophysics, Volume 522, id.A42, 12 pp. (2010)
- [11] Garrod, Wakelam, Herbst, Astronomy and Astrophysics, Volume 467, Issue 3, pp. 1103-1115 (2007)
- [12] Hasegawa, Herbst, Leung, Astrophysical Journal Supplement Series, vol. 82, no. 1, pp. 167-195 (1992)
- [13] Hasegawa & Herbst, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, vol. 261, no. 1, pp. 83-102 (1993)
- [14] Hersant, Wakelam, Dutrey, Guilloteau, Herbst, Astronomy and Astrophysics, Volume 493, Issue 3, pp. L49-L52 (2009)
- [15] Wakelam, Smith, Herbst, Troe, Geppert, Linnartz, Öberg, Rueff, Agúndez, Pernot, Cuppen, Loison, Talbi, Space Science Reviews, Volume 156, Issue 1-4, pp. 13-72 (2010)
- [16] Wakelam, Cuppen, Herbst, *In « Astrochemistry and Astrobiology »*, edited by Ian W. M. Smith, Charles S. Cockell and Sydney Leach, Publisher: Springer; (2013)
- [17] Agúndez & Wakelam, Chemical Reviews, vol. 113, No. 12, pp. 8710-8737 (2013)

9

La chimie avant la vie Processus pré-biotiques et précurseurs chimiques élémentaires à l'origine de la vie

Raffaele Saladino

Dipartimento di Scienze Ecologiche e Biologiche, Università
della Tuscia, Viterbo, Italie

I. Éléments de preuve sur la faible sélectivité de la chimie pré-biotique et sur l'origine de l'appareil génétique et du métabolisme

Les informations sur les conditions environnementales de notre planète (ou de planètes semblables) dans la période de l'origine de la vie sont très limitées. Cependant, il est raisonnable de supposer que les premiers processus prébiotiques ont eu lieu à partir de composés chimiques élémentaires en présence de sources d'énergie appropriées. L'expérience montre que dans certaines conditions expérimentales des réactions ont lieu avec une sélectivité faible conduisant à des mélanges très complexes de produits de réaction. Ces résultats, apparemment en contraste avec la sélectivité des réactions qui ont lieu aujourd'hui dans la cellule, ont été probablement d'une grande importance pour fournir la grande variabilité des structures moléculaires nécessaires à l'origine du premier organisme vivant. Quelle que soit la structure chimique de ces molécules primordiales, l'organisation et la réplication de la première cellule a nécessité des familles de substances avec certaines fonctions, aptes en particulier à stocker et à transférer l'information (les acides nucléiques), et à fournir le matériau et l'énergie pour les processus métaboliques. Ainsi, la chimie pré-biotique devait fournir des voies de synthèse adéquates pour les composants et les produits intermédiaires du métabolisme et de l'appareil génétique (peut-être semblables à ceux trouvés aujourd'hui). Malgré cela il y a la possibilité de voies de synthèse totalement indépendantes pour ces « deux mondes » (et pour de nombreux autres qui peuvent être envisagés, comme le monde des lipides), la possibilité de processus pré-biotiques capable de former simultanément toutes les molécules nécessaires demeure un objectif d'un grand intérêt scientifique. Seulement un cadre uniifié de ce type nous fait imaginer une cellule immédiatement efficace et prête à des événements évolutifs.

I.1 La formamide. Un précurseur chimique multifonctionnel

La formamide (NH_2CHO , figure 1) est un composé ubiquitaire dans l'univers [1], qui contient tous les éléments chimiques nécessaires à la synthèse de biomolécules (C, H, N, O), à l'exception du phosphore, qui a sans doute une source minérale. La forte présence de la formamide est due à la facilité avec laquelle ce composé est formé à partir de mélanges d'oxydes de carbone, de l'azote ou de l'ammoniac, autant dans des conditions spatiales (énergie de rayonnement ou énergie de l'impact) que dans des conditions terrestres (activité volcanique et géothermique, processus d'oxydoréduction et de choc électrique) [2]. Une fois formée, la formamide peut former les biomolécules ou être partiellement dégradée pour donner des composés de poids moléculaires inférieurs, tels que le cyanure d'hydrogène (HCN) et le formaldéhyde (HCOH), qui sont tous réactifs pour la synthèse des bases nucléiques et des sucres [3]. Pour cette raison, on considère que la formamide est un précurseur chimique multi-fonctionnel, c'est à dire capable de générer dans le milieu réactionnel de nombreux composés qui peuvent contribuer à beaucoup des procédés de synthèse et augmenter la variabilité des structures moléculaires. Le contrôle cinétique et thermodynamique de tous ces procédés de synthèse, qui détermine la composition exacte du mélange réactionnel (et donc le potentiel pré-biotique), dépend de la nature de la source d'énergie et de la composition du milieu réactionnel, et en fin de compte des propriétés chimique et physique de l'environnement dans lequel se déroule le processus [4].

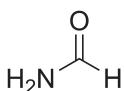


Figure 1. La formamide.

I.2 Les minéraux catalysent la chimie pré-biotique de la formamide. La notion de chimie mimétique

Indépendamment de l'environnement spécifique dans lequel les processus prébiotiques peuvent se produire, la présence de minéraux est très probablement un facteur commun de toutes les réactions ayant conduit à la formation de biomolécules. Le rôle des minéraux dans la chimie pré-biotique est bien défini, ils peuvent concentrer les précurseurs chimiques de solutions diluées, ils peuvent agir comme des catalyseurs et peuvent protéger les produits de la réaction de phénomènes de dégradation [5]. Cette fonction est particulièrement évidente dans le cas de la chimie de la formamide. Quand la formamide est chauffée à une température élevée (160°C) on observe la formation d'un noyau purine comme le seul produit de la réaction [6]. Ce noyau, en dépit d'être un composé hétérocyclique, n'est pas l'une des bases nucléiques présentes aujourd'hui dans l'ADN et l'ARN. La situation change considérablement lorsque la réaction est répétée avec une température plus basse en présence de simples oxydes métalliques ou minéraux largement présents sur la surface de la planète, tels que SiO_2 , Al_2O_3 et les argiles [7]. Dans ce dernier cas, on peut obtenir un grand nombre de produits de réaction, dont les bases nucléiques adénine, cytosine et uracile, l'hypoxanthine (un isomère de la guanine) et certains dérivés de l'imidazole (figure 2) [8].

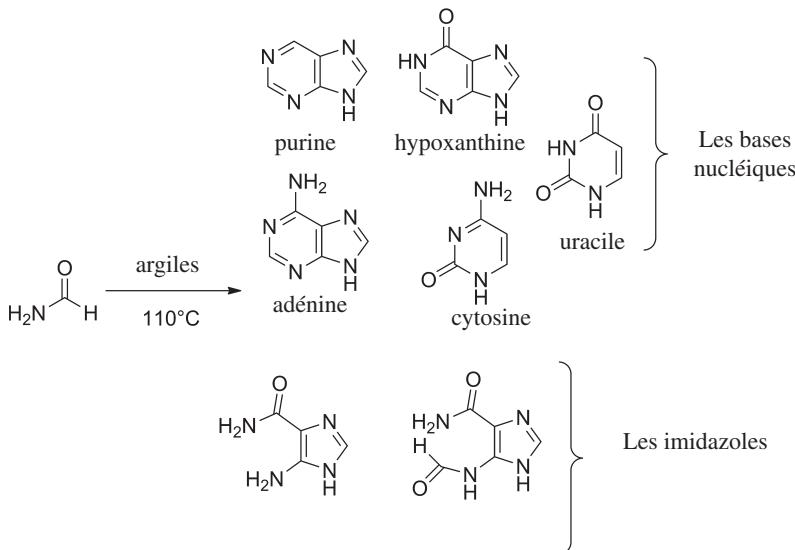


Figure 2. La réaction de la formamide avec les argiles.

Très intéressant de noter que les dérivés de l'imidazole obtenus à partir de la réaction de la formamide sont exactement les mêmes intermédiaires utilisés aujourd'hui dans la cellule pour la voie de biosynthèse de l'hypoxanthine riboside (inosine), qui est l'intermédiaire clé pour la production de nucléosides puriques. La similarité entre la chimie pré-biotique et la voie de biosynthèse suggère la possibilité que les processus biologiques de la cellule (au moins certains), ont évolué en utilisant la chimie pré-biotique comme un modèle moléculaire, une notion qu'on a appelé « chimie mimétique » [9]. La « chimique mimétique » nous permet de mieux comprendre la liaison entre les processus pré-biotiques et l'origine de la vie. Avant la vie, seules les molécules disponibles étaient en mesure de déterminer la sélection des structures moléculaires les plus importantes des cellules (les structures de la cellule primitive n'ont pas toutes eu les mêmes possibilités d'être formées en fonction de la disponibilité des molécules). Depuis, l'évolution a sélectionné et optimisé les architectures chimiques de plus en plus complexes y compris des mécanismes de réaction très sophistiqués.

1.3 La composition des minéraux peut changer la sélectivité de la chimie pré-biotique. Le cas des analogues de la poussière cosmique

La composition élémentaire des minéraux peut modifier la sélectivité de la chimie pré-biotique de la formamide en modifiant l'efficacité avec laquelle se produisent les processus de dégradation et de condensation nécessaires pour la synthèse des biomolécules. Cette possibilité est évidente dans le cas de la condensation thermique de la formamide

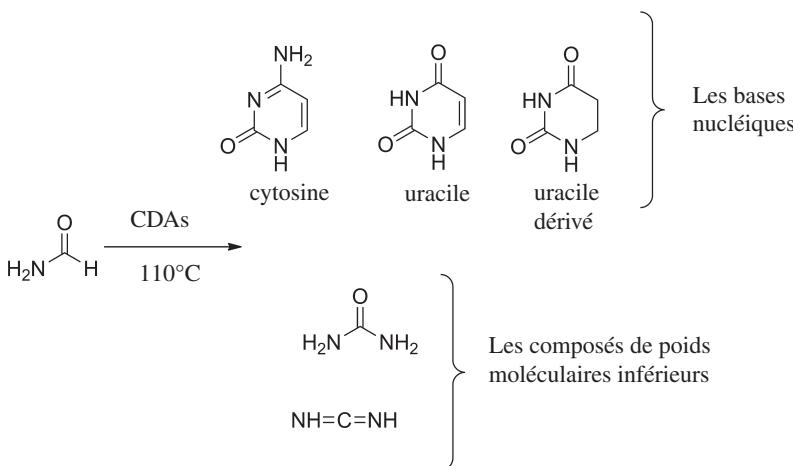


Figure 3. La réaction de la formamide avec les analogues de la poussière cosmique (CDAs).

en présence d'analogues de la poussière cosmique (CDAs) [10]. Ces composés sont des matériaux amorphes produits par des techniques au laser à partir de simples mélanges d'oxydes métalliques qui ont des compositions élémentaires très semblables à la poussière présente dans l'espace interstellaire [11]. Lorsqu'on chauffe la formamide en présence d'une série de ces analogues (qui montrent une différente quantité de fer et de magnésium ; par exemple FeSiO_4 , MgFeSiO_4 et MgSiO_4), cela conduit exclusivement à la formation de bases nucléiques pyrimidiques et de composés de poids moléculaires inférieurs (figure 3). La poussière cosmique a montré une sélectivité et réactivité plus grande que celle de minéraux analogues (olivine, forsterite et fayalite) sur notre planète. La sélectivité et l'efficacité de la réaction dépendent principalement de la présence du fer, qui doit donc avoir un rôle important dans le mécanisme de formation des produits. En effet, l'étude de ces mécanismes a montré que la formation de bases nucléiques du type pyrimidique nécessite une réaction redox qui n'est pas nécessaire pour les purines [12]. Dans ce cas, un métal redox actif tel que le fer peut avoir un rôle important. On en déduit que les minéraux ayant une composition élémentaire différente (et donc caractérisant différents milieux réactionnels) produisent des biomolécules avec une différente sélectivité. Chaque milieu de réaction aura une chimie pré-biotique particulière, similaire dans ses grandes lignes, mais variable pour la distribution qualitative des biomolécules.

1.4 Conditions pour la synthèse de l'appareil génétique et du métabolisme. Le cas du dioxyde de titane

Le dioxyde de titane (TiO_2) est un exemple d'oxyde répandu sur notre planète qui est capable de catalyser la synthèse des intermédiaires de l'appareil génétique et du métabolisme par la formamide [13]. La sélectivité de la réaction est sous le contrôle de la source d'énergie. Dans des conditions de condensation thermique (réaction qu'on porte à la température de

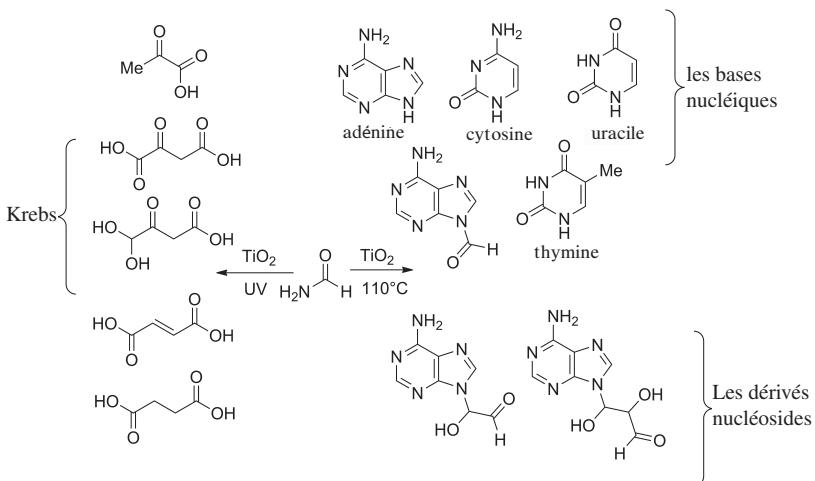


Figure 4. La réaction de la formamide au dioxyde de titane.

110°C) la formamide réagit à la présence du TiO_2 (anatase) pour former les bases nucléiques (y compris la thymine, pour laquelle il n'existe pas de synthèse directe) et de nombreux autres dérivés nucléosides de grande complexité structurale (caractérisée par la présence d'une liaison covalente entre la base hétérocyclique et un sucre acyclique) (figure 4) [14].

La formation des dérivés nucléosides en une seule réaction (pas observée auparavant), est rendue possible par la génération « *in situ* » de la formaldéhyde qui polymérisé pour former du sucre (réaction du formose [15]). La sélectivité de la réaction change complètement dans certaines conditions photochimiques (UV-visible, anatase), au cours desquelles on ne forme plus les bases nucléiques, mais des intermédiaires du cycle de l'acide citrique (cycle de Krebs), une des voies métaboliques les plus importantes de la cellule et probablement la plus ancienne parmi les premières à se produire [16]. Donc, il y a la possibilité de créer des conditions expérimentales à partir de la formamide et du TiO_2 pour la synthèse du mécanisme génétique (thermique) et du métabolisme (photochimique) dans les mêmes conditions de réaction mais en présence de différentes sources d'énergie.

1.5 Conditions pour la synthèse de l'appareil génétique et du métabolisme. Le cas des minéraux de bore et du zinc et la première preuve de l'émergence d'une peptidase abiotique

Les minéraux du zirconium sont parmi les plus anciens de notre planète [17] et ils peuvent catalyser la synthèse de molécules qui sont à la fois des composantes de l'appareil génétique et du métabolisme. En effet, la chauffe de la formamide à 110°C en présence de quantités catalytiques de baddeleyite (ZrO_2) et d'orthosilicate de

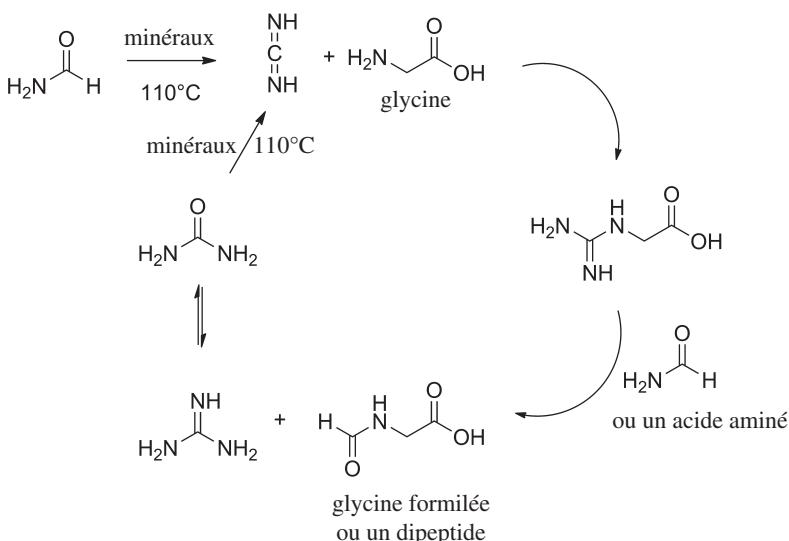


Figure 5. Le cycle de la peptidase abiotique.

zirconium (ZrSiO_4) conduit à la formation de bases nucléiques et de quelques-uns des plus simples intermédiaires du cycle de Krebs, y compris l'acide succinique et l'acide fumaraïque [18]. Des résultats similaires ont été obtenus en effectuant la réaction en présence des minéraux de bore. Les minéraux de bore ont déjà été étudiés dans le cadre de la chimie pré-biotique où l'on a mesuré leur propriété de sélectionner la formation du ribose, le sucre de l'ARN, en raison de la complexification des groupes diol vicinal typiques de ce sucre [19]. Dans le cas de la condensation thermique de la formamide, conduite en présence des minéraux de bore, à côté de la synthèse de bases nucléiques et des simples intermédiaires du cycle de Krebs, on observe également la formation d'acides aminés et de leurs dérivés (comme dans le cas de la glycine formylée) et la formation de la carbodiimide, un produit de déshydratation de la formamide, très utilisé en tant que réactif pour la formation de la liaison peptidique entre les acides aminés, même quand ils ne sont pas activés [20]. La formation des acides aminés dans ces conditions expérimentales est due, très probablement, à une réaction de « Strecker » entre des aldéhydes, de l'ammoniac et du cyanure d'hydrogène produit par la dégradation « *in situ* » de la formamide [21]. La présence de la carbodiimide dans le milieu de réaction suggère la possibilité d'un cycle chimique qui peut réaliser la fonction globale d'une peptidase abiotique. En particulier, la dégradation de la formamide produit de la carbodiimide qui peut réagir avec un acide aminé présent dans le milieu réactionnel en l'activant. Cet intermédiaire peut ensuite réagir à l'excès de formamide pour former les acides aminés formylés (que l'on isole sous forme de produit final), et de l'urée, ce qui à son tour peut être déshydraté pour former le carbodiimide et faire repartir le cycle catalytique (figure 5) [22].

Les acides aminés formylés sont parmi les modèles les plus étudiés pour la formation de la liaison peptidique. Et il est donc raisonnable de suggérer que le même

cycle de réaction, qui fonctionne en présence de plusieurs acides aminés (et dans une moindre mesure de formamide), peut former des peptides de différente complexité structurelle, en représentant ce que nous pourrions appeler une peptidase abiotique.

I.6 Conditions pour la synthèse de l'appareil génétique et du métabolisme. Le cas des météorites

Les météorites ont longtemps été le centre d'attention dans les théories de l'origine extra-terrestre de la vie.

Dans ce cas, ils sont normalement considérés comme des objets célestes capables de transporter sur notre planète des biomolécules et des formes de vie élémentaires de l'espace [23]. De nombreuses études ont mis en évidence la présence (même si en petite quantité) de plusieurs composés organiques dans les météorites, dont les bases nucléiques, des acides aminés et des sucres et d'autres dérivés normalement absents dans la cellule [24]. En plus de ce rôle de transport, les météorites peuvent être aussi de potentiels catalyseurs pour les processus pré-biotiques, en présentant une composition élémentaire complexe qui augmente leur réactivité. La première démonstration de cette possibilité a été obtenue par l'analyse de la réactivité thermique de la formamide en présence des météorites de composition et d'origine très différentes [25, 26]. Quelles que soient les conditions expérimentales, les réactions ont produit simultanément les bases nucléiques et les intermédiaires du cycle de Krebs (acides mono- et poly-carboxyliques), montrant pour la première fois la capacité de synthétiser les deux familles de composés nécessaires pour la cellule dans les mêmes conditions expérimentales. Outre des acides aminés, des sucres et des lipides ont été également isolés, complétant le répertoire de produits chimiques nécessaires pour un processus d'agrégation primordial de la cellule (figure 6). Dans ces réactions, les météorites de fer ont été trouvées plus réactifs que les autres, ce qui confirme le rôle de catalyseur dans le contrôle de la sélectivité de la synthèse pré-biotique.

I.7 Le problème de la stabilité des bases nucléiques. La formation et la stabilité des oligonucléotides et le premier exemple de phosphorylase abiotique

Une fois synthétisées, les biomolécules doivent rester stables pendant une période suffisamment longue pour assurer la possibilité de leur agrégation dans la première cellule [27]. Des études sur la stabilité thermique des bases nucléiques ont montré que la durée de vie moyenne de ces composés n'est pas très élevée pour garantir leur complète disponibilité [28].

Une solution à ce problème est encore à rechercher dans les propriétés multifonctionnelles de la formamide. En fait, des études sur la dégradation thermique des nucléosides en présence de formamide ont montré que les purines sont dégradées pour former des pyrimidines [29], qui, à leur tour, sont dégradées pour former des composés de poids moléculaire mineur (tels que l'urée), en plus de régénérer la même formamide [30]. Elle peut à son tour se condenser (en présence de minéraux) pour former les bases puriques et pyrimidiques en générant un cycle (qu'on peut appeler le cycle de

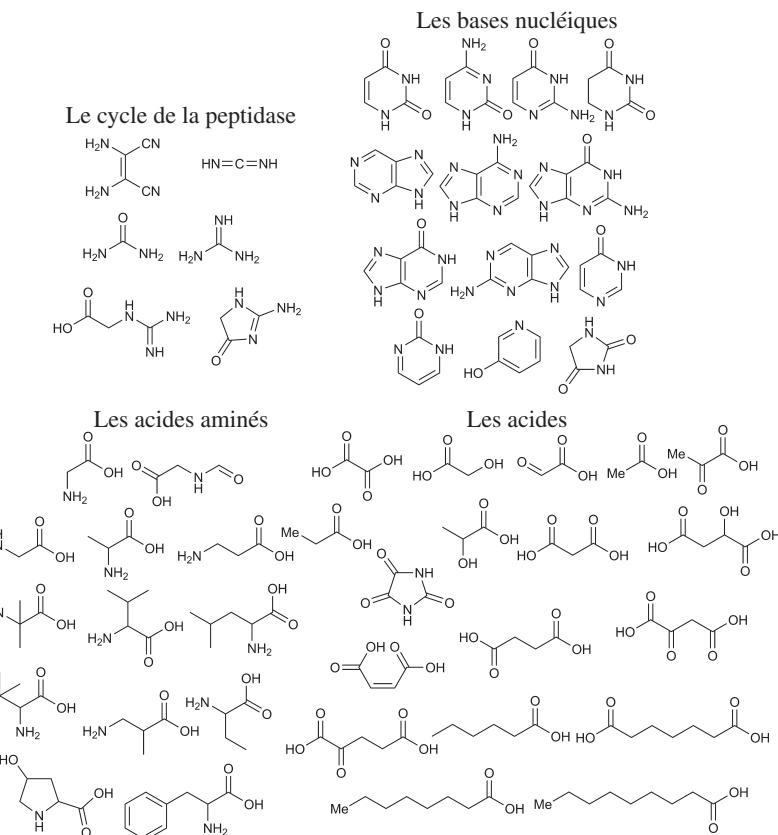


Figure 6. Les structures des molécules obtenues par la réaction de la formamide avec les météorites.

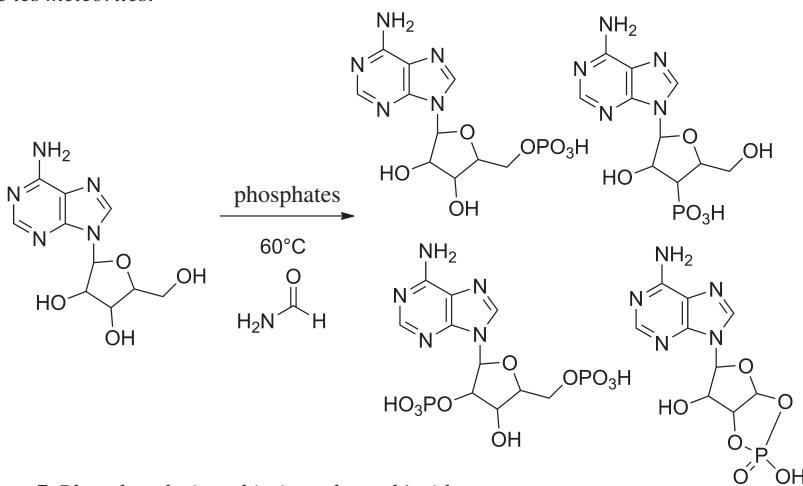


Figure 7. Phosphorylation abiotique de nucléosides.

la vie moléculaire), au cours duquel les processus de dégradation et de synthèse sont répétés au fil du temps, en laissant les molécules toujours disponibles pour les événements pré-biotiques. Dans ce cycle il n'y a plus aucun problème de stabilité. La formamide est également en mesure de stabiliser les molécules d'ADN et d'ARN. Les acides nucléiques, et en particulier l'ARN, sont relativement instables dans de l'eau à cause de l'hydrolyse (également non enzymatique) de la liaison entre le sucre et le phosphate. Cette réactivité est inhibée dans la formamide, comme démontré par l'étude de la stabilité thermique des acides nucléiques (dans la formamide isolée ou mélangée avec de l'eau) [31]. Cela donne à penser que, si il y a des conditions pré-biotiques dans lesquelles les nucléotides peuvent être formés et polymérisés dans la formamide, les oligonucléotides correspondants seront stabilisés par le même milieu réactionnel. La phosphorylation des nucléosides pour obtenir les nucléotides est un processus pré-biotique difficile à réaliser. Le problème est dû principalement à l'absence de phosphate libre sur la Terre primitive, et plus généralement à la faible réactivité du phosphate dans l'eau. Pour cette raison, des théories ont été proposées qui ne nécessitent pas la présence de ce groupe chimique dans les premières molécules d'acide nucléique. La réaction de phosphorylation peut se produire facilement en utilisant des minéraux comme donneurs de phosphate et en conduisant la réaction dans le formamide. Cette possibilité est due au fait que la formamide montre une valeur élevée de la constante diélectrique qui lui permet de dissoudre les minéraux, ce qui libère le phosphate dans la solution. En particulier, lorsque les nucléosides sont chauffés dans de la formamide, en présence de phosphates minéraux, on observe la formation d'un mélange des nucléotides mono-phosphates et des nucléotides mono-phosphates cycliques. La réaction se déroule avec un rendement élevé et représente, à l'état actuel des connaissances, la procédure de phosphorylation la plus efficace dans les conditions pré-biotiques. Les mono-phosphates cycliques sont également suffisamment réactifs pour former les oligonucléotides correspondants. Le système composé des nucléosides, de la formamide, et des minéraux ressemble à une phosphorylase abiotique primitive.

Références

- [1] (a) R. Saladino, C. Crestini, G. Costanzo and E. Di Mauro, *Top. Curr. Chem.*, 2005, 259, 29–68.
(b) R. Saladino, C. Crestini, F. Ciciriello, G. Costanzo and E. DiMauro, *Chem. Biodiversity*, 2007, 4, 694–720.
- [2] (a) E. Herceg and M. Trenary, *Ciencia*, 2006, 14, 104–113.
(b) R. Stribling and S. L. Miller, *Icarus*, 1987, 72, 48–52.
(c) M. H Moore, R. L. Hudson and R. F. Ferrante, *NASA Conf. Publ.*, 2002, 208–212.
(d) L. von Hippel, C. Bussek, J. Sauer, M. Sauer and D. Arntz, Dietrich, German Pat., DE, 19617040 CI 19971030, 1997.
(e) E. A. McKenna, A. Othonos, N. Kiratzis and M. Stoukides, *Ind. Eng. Chem. Res.*, 1993, 32, 1904–1913.
(f) T. Koike, T. Kaneko, K. Kobayashi, S. Miyakawa and Y. Takano, *Biol. Sci. Space*, 2003, 17, 188–189.
- [3] R. Saladino, G. Botta, S. Pino, G. Costanzo, E. Di Mauro, *Chem. Soc. Rev.*, 2012, 41, 5226–5265.

- [4] (a) Y. Loidreau and T. Besson, *Tetrahedron*, 2011, 67, 4852–4857.
(b) T. Kakumoto, K. Saito and A. Imamura, *J. Phys. Chem.*, 1985, 89, 2286–2291.
(c) J. C. Boden and R. A. Back, *Can. J. Chem.*, 1970, 48, 2965–2968.
(d) I. K. Kostakis, A. Elomri, E. Seguin, M. Iannelli and T. Besson, *Tetrahedron Lett.*, 2007, 48, 6609–6613.
(e) I. Nouira, I. K. Kostakis, C. Dubouilh, E. Chosson, M. Iannelli and T. Besson, *Tetrahedron Lett.*, 2008, 49, 7033–7036.
(f) D. K. Paul and S. D. Worley, *J. Phys. Chem.*, 1990, 94, 8956–8959.
(g) D. K. Paul, S. D. Worley, N. W. Hoffman, D. H. Ash and J. Gautney, *J. Catal.*, 1989, 120, 272–277.
- [5] G. Costanzo, R. Saladino, C. Crestini, F. Ciciriello and E. Di Mauro, *BMC Evol. Biol.*, 2007, 7, 1–18.
- [6] (a) H. Yamada, M. Hirobe, K. Higashiyama, H. Takahashi and K. T. Suzuki, *Tetrahedron Lett.*, 1978, 42, 4039–4042.
(b) H. Yamada, M. Hirobe, K. Higashiyama, H. Takahashi and H. Suzuki, *J. Am. Chem. Soc.*, 1978, 100, 4617–4618.
- [7] R. Saladino, C. Crestini, G. Costanzo, R. Negri and E. Di Mauro, *Bioorg. Med. Chem.*, 2001, 9, 1249–1253.
- [8] R. Saladino, C. Crestini, U. Ciambecchini, F. Ciciriello, G. Costanzo and E. Di Mauro, *ChemBioChem*, 2004, 5, 1558–1566.
- [9] A. Eschenmoser and E. Loewenthal, *Chem. Soc. Rev.*, 1992, 21, 1–16.
- [10] R. Saladino, C. Crestini, V. Neri, J. R. Brucato, L. Colangeli, F. Ciciriello, E. Di Mauro and G. Costanzo, *ChemBioChem*, 2005, 6, 1368–1374.
- [11] (a) A. Rotundi, J. R. Brucato, L. Colangeli, G. Ferrini, V. Mennella and E. Palomba, *Meteorit. Planet. Sci.*, 2002, 37, 1623–1635.
(b) L. Colangeli, T. Henning, J. R. Brucato, D. Clément, D. Fabian, O. Guillois, F. Huisken, C. Jäger, E. K. Jessberger, A. Jones, G. Ledoux, G. Manico, V. Mennella, F. J. Molster, H. Mutschke, V. Pirronello, C. Reynaud, J. Roser, G. Vidali and L. B. F. M. Waters, *Astron. Astrophys. Rev.*, 2003, 11, 97–152.
- [12] R. Saladino, C. Crestini, G. Costanzo and E. Di Mauro, *Current Organic Chemistry*, 2004, 8, 1425–1443.
- [13] (a) A. A. Berezhnoy and A. B. Klumov, *Icarus*, 2008, 195, 511–522.
(b) G. Meinhold, *Earth-Sci. Rev.*, 2010, 102, 1–28.
- [14] R. Saladino, U. Ciambecchini, C. Crestini, G. Costanzo, R. Negri and E. Di Mauro, *ChemBioChem*, 2003, 4, 514–521.
- [15] (a) R. Shapiro, *Origins Life Evol. Biospheres*, 1988, 18, 71–85.
(b) A. W. Schwartz and R. M. de Graaf, *J. Mol. Evol.*, 1993, 36, 101–106.

- [16] (a) R. Saladino, J. R. Brucato, A. De Sio, G. Botta, E. Pace and L. Gambicorti, *Astrobiology*, 2011, 11, 815–824.
(b) G. Heinrich, *Z. Naturforsch.*, 1965, 20b(3), 209–211.
- [17] H. Rauchfuss, *Chemical Evolution and Origin of Life*, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2008.
- [18] R. Saladino, V. Neri, C. Crestini, G. Costanzo, M. Graciotti and E. Di Mauro, *J. Mol. Evol.*, 2010, 71, 100–110.
- [19] (a) A. Ricardo, M. A. Carrigan, A. N. Olcott and S. N. Benner, *Science*, 2004, 303, 196.
(b) B. F. Prieur, *C. R. Acad. Sci. Chim./Chem.*, 2001, 4, 667–670.
(c) R. Scorei and V. M. Cimpoiașu, *Origins Life Evol. Biospheres*, 2006, 36, 1–11.
- [20] R. Saladino, M. Barontini, C. Cossetti, E. Di Mauro and C. Crestini, *Origins Life Evol. Biospheres*, 2011, 41, 317–330.
- [21] A. Strecker, *A. Annalen der Chemie und Pharmazie*, 1850, 75 (I), 27–45.
- [22] R. Saladino, G. Botta, S. Pino, G. Costanzo, E. Di Mauro, *Frontiers in Bioscience* 2013, 18, 1275–1289.
- [23] (a) B. A. Cohen, T. D. Swindle, D. A. Kring, *Science* 2000, 290, 1754–1756.
(b) C. Chyba, C. Sagan, *Nature* 1992, 355, 125–132.
- [24] S. Pizzarello and E. Shock, *Cold Spring Harb Perspect Biol* 2010;2: <http://dx.doi.org/10.1101/cshperspect.a002105>
- [25] R. Saladino, C. Crestini, C. Cossetti, E. Di Mauro and D. Deamer, *Origins Life Evol. Biospheres*, 2011, 41, 437–451.
- [26] R. Saladino, G. Botta, M. Delfino, E. Di Mauro, *Chemistry. A European J* 2013, 19, 16916–16922.
- [27] E. Di Mauro, R. Saladino and N. Trifonov, *Journal of Biomolecular Structure and Dynamics*, 2013, 1–11.
- [28] (a) H. S. Shapiro and E. Chargaff, *Biochim. Biophys. Acta*, 1957, 26, 596–608.
(b) H. Venner and Hoppe-Seyler's Z., *Physiol. Chem.*, 1966, 344, 189–196.
(c) E. Chargaff and H. S. Shapiro, *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.*, 1968, 59, 161–163.
(d) R. Shapiro and S. Kang, *Biochemistry*, 1969, 8, 1806–1810.
(e) N. K. Kochetkov, E. I. Budovskii, E. D. Sverdlov, N. A. Simukova, M. F. Turchinskii and V. N. Shibaev, in *Organic chemistry of nucleic acids*, ed. N. K. Kochetkov and E. I. Budovskii, Plenum Press, London and New York, 1972, Part B, ch. 8, p. 425, and ch. 10, p. 472.
(f) E. R. Garrett and P. J. Mehta, *J. Am. Chem. Soc.*, 1972, 94, 8542–8547.
(g) T. Lindahl and O. Karlstrom, *Biochemistry*, 1973, 12, 5151–5154.
(h) R. Shapiro and M. Danzig, *Biochim. Biophys. Acta*, 1973, 319, 5–10.
(i) A. Soukup and R. R. Breaker, *RNA*, 1999, 5, 1308–1325.
(j) Y. Li and R. R. Breaker, *J. Am. Chem. Soc.*, 1999, 121, 5364–5372.

[29] R. Saladino, E. Mincione, C. Crestini, R. Negri, E. Di Mauro, G. Costanzo, *J. Am. Chem. Soc.*, 1996, 118, 5615-5619.

[30] R. Negri, R., G. Costanzo, R. Saladino, E. Di Mauro, *Biotechniques*, 1996, 21, 910-917.

[31] (a) R. Saladino, C. Crestini, F. Ciciriello, E. Di Mauro and G. Costanzo, *J. Biol. Chem.*, 2006, 281, 5790-5796.

(b) R. Saladino, C. Crestini, V. Busiello, F. Ciciriello, G. Costanzo and E. Di Mauro, *J. Biol. Chem.*, 2005, 280, 35658-35669.

Troisième partie

Transition vers
la vie primitive
et diversité

Troisième partie

Transition vers la vie primitive et diversité

Présentation

I. Introduction générale

Cette troisième partie présente quelques aspects majeurs qui caractérisent la vie terrestre.

En premier lieu, le rôle essentiel de l'eau dans les processus chimiques qui conduisent au vivant. Ensuite sont présentées deux caractéristiques du vivant : l'irruption de la complexité qu'Emmanuelle Javaux montre par ses travaux sur les traces de vie dans les matériaux datant du précambrien, et d'autre part, l'adaptabilité attestée par la grande variété de bactéries dites extrémophiles, dont Pierre Nabet présente la découverte et les étonnantes propriétés. Les recherches sur la vie sont aujourd'hui remarquablement prises en charge par les mathématiciens ; Martine Ben Amar présente des théorisations de morphogenèses permises par de récents développements mathématiques. Enfin, nous plaçons dans cette partie les réflexions épistémologiques et philosophiques qu'Ernesto Di Mauro nous livre après avoir présenté des fabuleuses synthèses de molécules biologiques effectuées dans un accélérateur de particules.

Notons que, lorsque nous parlons de la vie, et particulièrement si nous envisageons une vie au-delà de la Terre, nous devons impérativement, à propos des caractéristiques de la vie, préciser que nous parlons des caractéristiques de la vie terrestre, car nous n'avons aucune idée de ce que peut être un processus que l'on puisse qualifier de vivant en dehors de la vie que nous connaissons sur Terre.

De quelle que façon que l'on veuille définir la vie, on sait au moins qu'on peut la décrire. La description de la vie que nous connaissons consiste essentiellement en l'analyse de l'interaction de cycles métaboliques avec les cycles génétiques. Les premiers recueillent et remodèlent l'énergie, les autres la récoltent et les nouvelles formes qui en découlent peuvent le faire selon les mêmes réactions reproductibles et reproduites. Quels que soient ces cycles, on sait, qu'ici sur Terre, ils se passent dans l'eau. Dans le premier chapitre 10 : « *Eau et sel : premières molécules de la vie* », Giuseppe Zaccâï met l'accent sur le rôle primordial de la présence de l'eau. Pour que toute cette vie puisse éclore, il affirme le rôle non moins essentiel du sel.

Est-ce que les premières traces de la vie sont perdues à tout jamais ? Est-ce qu'on arrive à pouvoir se faire une idée approximative de LUCA, de notre supposé ancêtre commun et universel, uniquement par la bioinformatique, par la génomique comparée et par des hypothèses ? Dans le chapitre 11 « *Premières traces et diversification de la vie* », Emmanuelle Javaux nous démontre que non. En combinant l'approche déductive top-down et l'approche inductive bottom-up, elle arrive à des conclusions solides.

Les organismes dits extrémophiles se développent lorsqu'ils rencontrent des conditions extrêmes de température, salinité ou pression. L'étude de la microbiologie et de la biochimie des extrémophiles représente une opportunité unique pour préciser les limites du vivant et permet d'aborder la question de l'existence de la vie sur d'autres planètes. Le texte de Pierre Nabet « *les organismes vivants extrémophiles* » présente une analyse de ces recherches en soulignant qu'elles ont montré que les êtres vivants ont colonisé toutes les niches écologiques de la planète, même les plus improbables selon les critères qu'on a sur la vie. Les concepts importants qu'on peut en tirer sont donc que la vie est un phénomène robuste et, qu'une niche étant donnée, il est très probable (et on le constate) qu'elle s'y développe. D'où la vision probabiliste de la vie au-delà de la Terre, bâtie autour de règles d'adaptabilité et de maîtrise de la physiologie, dont les extrémophiles sont les témoins.

La vie sur la Terre suit des paramètres précis. La forme est substance, comme nous l'apprend Martine Ben Amar. Elle nous le démontre au moyen d'un formalisme 3D établi en utilisant une approche pragmatique inspirée de celle du physicien Lev Landau sur l'élasticité des corps et basée sur les symétries. Affirmer que la forme est substance signifie qu'on donne une forte valeur au fait que « Contrairement à la matière inerte où les forces proviennent de l'extérieur, la matière vivante contrôle principalement sa morphologie ». Au niveau biologique, les processus sont complexes et souvent mal connus. Le but de cet essai est d'éclairer de façon rigoureuse les limites de cette affirmation. Si on arrivait à maîtriser ces processus, on pourrait mieux comprendre ce qu'on appelle matière vivante.

On n'a aucune raison de penser que ces règles invoquées soient valides seulement ici sur Terre. Comme la chimie du carbone est a priori la même partout dans l'Univers, les règles des interactions macromoléculaires doivent être valables partout.

Et c'est en raisonnant « à propos de génération moléculaire spontanée », comme le fait Ernesto Di Mauro, qu'on peut mieux se rendre compte de ces principes unificateurs. Ce type d'observations montre d'un côté que la route qui mène des composés simples à l'accumulation de l'information chimique sous forme transmissible est possible de façon

tout à fait spontanée, de l'autre que les conditions dans lesquelles on arrive à tracer cette route ne sont pas limitées aux différentes niches du milieu terrestre. La nécessité s'exerce à un niveau simple, les premières compositions moléculaires suivent un profil de réactions obligé par leurs structures, le hasard combinatoire entre en scène à partir d'un certain niveau de complexité, le niveau qui sépare le non-vivant du vivant. Ces réflexions conduisent Ernesto di Mauro à un développement épistémologique et philosophique sur la nature et la définition de la vie qui nous a conduits à placer son article en conclusion des trois premières parties, et à revenir sur ces thèmes dans l'épilogue de l'ouvrage.

2. L'eau terrestre : son rôle dans la complexification qui conduit à la vie

Dans le chapitre 10, Giuseppe Zacciaï décrit les propriétés physiques et chimiques de l'eau. Il montre le rôle essentiel de l'eau liquide dans le vivant terrestre, rencontré dans quasiment tous les environnements (aussi bien dans les mers Arctiques qu'au fond des océans ou des déserts les plus arides, par exemple). Ceci a fait naître la notion de « Zone habitable » du Système solaire, et plus généralement de tout système solaire, tout en insistant sur la disparité existante entre Mars et la Terre.

On y décrit des propriétés exceptionnelles de l'eau, des ions et de leurs interactions, de l'adaptation des molécules du vivant à des conditions extrêmes de salinité, de température et du rôle de cette recherche pour comprendre les conditions d'apparition de la vie. Tous les matériaux prébiotiques sont présents, partout où se trouvent rassemblés leurs éléments. Cependant, au-delà de la Terre, aucune des grandes molécules qui sont à la base des métabolismes et des génomes n'a été détectée. Une certitude est aujourd'hui acquise : toute cette vie terrestre n'a pu se produire que grâce à la présence d'eau liquide. Or l'eau liquide n'existe pas dans le milieu interplanétaire ou interstellaire où règne une température proche du zéro absolu. Seules peuvent donc s'y former des molécules minérales ou des molécules organiques, sans doute complexes, mais qui ne peuvent pas aboutir à la complexité du vivant terrestre.

La raison essentielle du rôle de l'eau est dans sa structure dipolaire qui autorise des catalyses très complexes. Une raison supplémentaire, d'ordre thermodynamique, est collinaire de cette capacité physico-chimique de l'eau : les molécules organiques présentes dans les milieux extraterrestres sont en état thermodynamique stable. Au contraire, le milieu terrestre a toujours été le siège de processus thermodynamiques instables, favorables à la création et à la destruction permanente de structures, et cette dynamique a favorisé la formation de structures successives relativement stables, et toujours susceptibles de structurations plus complexes.

Complexité et plasticité se conjuguent dans le développement du vivant. La Terre n'a pas livré, et de loin, les secrets sur l'origine de la vie qu'elle abrite. Mais des travaux de plus en plus précis cernent les développements qui conduisent aux synthèses de la vie. Cet ouvrage ne pouvait pas avoir l'ambition de couvrir l'ensemble des recherches actuelles

dans ces domaines. Mais il aborde trois domaines essentiels : l'irruption de la complexité, l'adaptabilité des organismes vivants, et enfin, les recherches pour modéliser les divers aspects du vivant.

3. Premières traces et diversification de la vie

Emmanuelle Javaux, dans le chapitre II, nous emmène dans la reconstruction de l'histoire de la vie sur la Terre. Deux voies s'ouvrent. D'une part, l'approche « top down », celle de la paléontologie et de la géologie, c'est-à-dire celle qui remonte le temps depuis la biodiversité actuelle jusqu'à LUCA. Cet acronyme pour « Last Universal Common Ancestor » désigne le dernier ancêtre commun des trois domaines de la vie : Bacteria, Archaea et Eucaria. D'autre part, l'approche « bottom up » qui remonte de la chimie prébiotique mène à l'origine de la vie et décrit son évolution. L'auteure donne un aperçu de l'état actuel des connaissances et souligne la difficulté de la tâche. L'article est accompagné de quelques planches et de nombreuses références. L'irruption de la complexité du vivant date d'environ quatre milliards d'années. La recherche des premières traces de vie sur Terre est essentiellement pluridisciplinaire. Emmanuelle Javaux nous montre que toutes les sciences de la Terre et presque toutes les sciences de la vie sont parties dans ces recherches.

En remontant dans le temps, Emmanuelle Javaux appelle « top-down » cette approche, on arrive à l'hypothèse de LUCA, le fameux ancêtre commun. L'accumulation de résultats et leurs convergences vers un processus chronologiquement attesté est la clé de cette approche. Les investigations dans les roches les plus anciennes, celles du précambrien, ont donné de très nombreuses traces de microorganismes. Mais, pour les rassembler dans un modèle de développement de la vie sur Terre, il faudrait d'abord être sûr qu'elles sont d'origine endogène et non importées par des événements divers. Il faut ensuite pouvoir les dater avec précision ; il faudra enfin arriver à construire l'arbre généalogique de cette évolution. De nombreux travaux sont en cours, mais beaucoup d'incertitudes subsistent. Toutefois, Emmanuelle Javaux peut préciser des événements importants, comme l'avènement des cyanobactéries qui sont à l'origine d'une modification radicale de l'atmosphère terrestre (oxygène). Tous ces travaux visent à faire remonter l'évolution jusqu'à l'apparition de « l'ancêtre commun ».

Mais l'origine de la vie terrestre appelle une approche véritablement « bottom-up », c'est-à-dire un modèle qui, partant des molécules qui semblent être les prémisses indispensables de la vie terrestre, décrit et explique la formation de la membrane enveloppant une cellule, élément indispensable à la thermodynamique du vivant, mais aussi le couple métabolisme-génétique, qui permet le développement et la multiplication de toutes les cellules de la vie terrestre.

Certes, les traces de vie putatives interprétées à partir de l'analyse de roches sédimentaires datant de 3.8 à 3.5 Ga sont encore discutées mais au fur et à mesure que le temps passe, ces traces de vie deviennent plus convaincantes, jusqu'au point où elles arrivent à rencontrer les évidences obtenues en descendant, en partant de ce qu'on connaît et qu'on

peut développer par des moyens mathématiques de plus en plus puissants et fiables. Une analyse critique de ces défis nous est présentée, qui puisse nous mettre en condition de vérifier nos hypothèses, tout en sachant que les plus fondées de ces hypothèses se basent sur ce que nous connaissons des extrémophiles.

4. La plasticité du vivant : les bactéries extrémophiles

Dans les années 1960, des biologistes ont découvert des organismes vivants dans des conditions extrêmes, à savoir dans la Mer Morte (340 g/l de NaCl) et dans les sources chaudes du Parc de Yellowstone (60° C et même 80° C). Depuis lors, d'autres organismes vivants ont été mis en évidence dans des conditions tout aussi extrêmes : pH très alcalin, pH très acide, pression élevée, très sec ou radioactif. Pierre Nabet (cf. chapitre 12) dresse le répertoire de ces découvertes. Du fait de ses extraordinaires capacités d'adaptation, la vie a pu surmonter toutes les catastrophes que la Terre a subies au cours de son histoire et s'adapter à des milieux et conditions très éloignées de celles que nous rencontrons aujourd'hui dans notre biosphère terrestre. La découverte de bactéries vivant dans des conditions très éloignées de celles du milieu terrestre végétal et animal apporte la preuve de cette adaptation, quel que soit le sens dans lequel elle s'est produite, puisque certaines hypothèses ont pu être émises concernant le rôle premier des fosses océaniques au contact de failles volcaniques pour y placer la première apparition de la vie sur Terre.

Toutes sortes de niches écologiques ont été découvertes depuis 50 ans, correspondant à des conditions auxquelles les bactéries présentes dans la biosphère animale et végétale de la Terre ne survivaient pas.

Les chercheurs étudient les modifications morphologiques, celles du métabolisme qui caractérisent ces bactéries, afin d'imaginer les processus qui ont permis ces adaptations. Bien entendu, la forme de vie qui a pu perdurer à travers tous ces âges géologiques est la cellule vivante, la bactérie. Mais nous ignorons si des formes plus développées (êtres multicellulaires) ont pu apparaître avant ceux que la paléontologie nous révèle, et qui remontent « seulement » à environ 670 millions d'années. Ces phénomènes compliquent singulièrement les hypothèses que les chercheurs peuvent élaborer pour tracer un processus d'apparition et de développement de la vie sur Terre.

5. La résolution mathématique de la représentation des morphogenèses

Contrairement à la matière inerte où les forces proviennent de l'extérieur, la matière vivante contrôle principalement sa morphologie. Au niveau biologique, les processus sont complexes et souvent mal connus. Martine Ben Amar présente des développements (cf.

chapitre 13) sur des questions ouvertes en biologie du développement et en particulier au cas de l'embryogénèse des Villis. Des idées très générales ont été dégagées au moyen d'un formalisme 3D établi en utilisant une approche pragmatique inspirée de celle du physicien Lev Landau sur l'élasticité des corps et basée sur les symétries.

Le déploiement des outils mathématiques permet désormais de représenter et d'expliquer les phénomènes biologiques. Des modèles à base d'agents sont mis en œuvre dans des phénomènes d'une grande complexité, en particulier dans les processus physiologiques. La méthode de sélection des variables les plus pertinentes par des tests de sensibilité aux variations (tests par équations différentielles aux dérivées partielles) ont montré leur efficacité. Mais les outils de l'Analyse mathématique permettent de forger des théories descriptives et explicatives, en particulier dans l'étude des morphogenèses et du développement. La géométrie différentielle (calcul tensoriel) permet de traiter des phénomènes de développements avec une grande élégance.

Martine Ben Amar présente une variété de travaux qui montrent que la plasticité du vivant, qui est sans doute son caractère le plus original, peut être prise en compte dans des travaux féconds, d'une grande variété. Le terme « plasticité » n'ayant pas de définition précise, elle utilise la notion d'élasticité, parfaitement définie et mesurable, pour mettre en œuvre le tenseur de gradient de déformation défini à partir d'une relation vectorielle entre configuration de départ et configuration d'arrivée. Il s'agit du produit du tenseur d'élasticité par un tenseur dit de croissance contenant les aspects biologiques à grandes échelles.

On est frappé par la puissance explicative des développements qu'elle présente par l'utilisation du calcul tensoriel. Les exemples qu'elle donne de l'utilisation du tenseur pour l'étude de la fleur Brugmansia et de l'algue verte, pour n'en citer que deux, sont d'une grande beauté.

6. A propos de génération moléculaire spontanée

Dans le chapitre 14, Ernesto Di Mauro qui est à la fois biologiste et philosophe, décrit les extraordinaires expériences qu'il a effectuées en collaboration avec des physiciens russes. Il expose (cf. chapitre 14) l'état actuel de la génération moléculaire spontanée. Ses recherches le conduisent à des réflexions philosophiques.

6.1 Sur la voie de la création expérimentale de la vie

Ernesto Di Mauro décrit les extraordinaires expériences qu'il a effectuées en collaboration avec des physiciens russes. Des protons accélérés frappent une cible formée de molécules minérales ; ils y provoquent la formation de toutes sortes de molécules de grande taille, surtout des molécules organiques, et particulièrement des structures indispensables à la formation des cellules vivantes. Ces processus chimiques ont été explicités par Raffaele Saladino (cf. chapitre 9).

Il décrit des réactions synthétiques, effectuées à partir de composés simples (notamment la formamide NH₂COH) et des catalyseurs simples soumis à des conditions physiques simples, ces réactions donnant lieu aux composés pré-biotiques les plus importants. Il explique les rôles complémentaires des ARN (molécule originale) et ADN (invention chimique), dont la différence chimique et structurale est minime. Pour lui, « la chimie pré-biotique travaille sur la simplicité, l'évolution sur la complexité ». Il dit également que « En conclusion : ces résultats entraînent la génération première des systèmes proto-métaboliques et proto-génétiques, indiquant que l'émergence de systèmes chimiques capables de s'auto-reproduire et de transmettre leur information n'exigea pas une complexité excessive, étant plutôt le résultat de l'interaction entre le hasard combinatoire et la nécessité thermodynamique des atomes les plus abondants. »

Ces résultats conduisent Ernesto di Mauro à une réflexion épistémologique et philosophique sur la vie.

6.2 Des conséquences philosophiques

Découvrir l'origine de la vie impose de répondre à une question : qu'est-ce que la vie ? Les spécialistes de la question des origines se sont, en définitive, tous plus ou moins accordés pour réduire la vie à trois caractéristiques fondamentales : le métabolisme, le matériel génétique et enfin une membrane qui isole le tout de l'environnement. La difficulté tient au fait de savoir quel système est apparu le premier ! Devançant l'opposition entre ces approches, Ernesto Di Mauro, dans un cadre approprié unitaire et considérant les aspects énergétiques, évolutifs, proto-métaboliques et proto-environnementaux propose une voie simple pour un système réactif prébiotique complet.

Au sujet de la complexité, Ernesto Di Mauro note « la chimie prébiotique travaille sur la simplicité, l'évolution sur la complexité ». Mais il affirme aussi : « si les conditions de l'expérience sont rassemblées, les mêmes résultats apparaîtront ». Il s'interroge aussi sur les nombreuses tentatives de définitions de la vie. Nous reviendrons, dans l'introduction de cet ouvrage, sur ces réflexions, leur portée scientifique ainsi que leur portée philosophique.

Le comité de lecture de l'AEIS

10

H₂O : première molécule de la vie

Giuseppe Zaccai

CNRS, Institut de Biologie Structurale et
Institut Laue-Langevin, Grenoble

I. La planète bleue

Dans l'étude d'une vie extraterrestre potentielle, la recherche de conditions essentielles, sans lesquelles la vie comme nous la connaissons actuellement ne serait pas possible, constitue une approche sérieuse. Cependant, sur Terre, la vie s'est adaptée à une multitude de conditions différentes et on trouve des organismes vivants dans quasiment tous les environnements. Au fond des océans à des pressions mille fois la pression atmosphérique et des températures de plus de 110°C ; sous les glaciers et dans les mers arctiques à des températures proches de zéro ; dans des lacs saturés en sel ; dans des sources chaudes et acides à plus de 80°C et pH 2 ; dans des étangs alcalins à pH 9 ; dans des déserts arides où pendant les périodes de manque d'eau les organismes se mettent en dormance pour attendre des jours meilleurs ; dans des réservoirs d'eau hautement radioactive ; et même sous terre dans les interstices des roches.

On serait tenté de croire que par le génie de l'évolution, il n'existe pas de milieu où la vie ne pourrait pas se propager. Et pourtant, si on examine bien les conditions énumérées en début de paragraphe comme exemples de milieux physico-chimiques extrêmes, on verra que, malgré de grandes variations en température, pression, salinité et pH, elles ont toutes une propriété en commun : l'eau dans sa phase liquide.

A noter, par exemple, que certains organismes hyperthermophiles peuvent vivre à des températures bien au-dessus de 110°C (on a même suggéré des survies pour quelques heures à 130°C). Toutefois cela n'est possible qu'à la condition que la pression soit suffisante pour maintenir l'eau à l'état liquide à ces températures. Pour mémoire rappelons qu'il suffit d'une pression de 10 fois la pression atmosphérique pour porter le point d'ébullition de l'eau à 180°C.

Il est donc raisonnable de conclure que la présence d'eau liquide constitue, en effet, une des conditions essentielles pour l'existence de la vie telle qu'elle est connue sur Terre. Dans certaines vues de la Terre prise de l'Espace, on dirait que sa surface est complètement recouverte d'eau. La Terre, planète bleue océane en contraste avec Mars la planète rouge sauf pour les pôles où des petites taches blanches de glace carbonique et aqueuse existent. Mars et la Terre se trouvent toutes deux dans la Zone habitable du Système solaire. C'est à dire à une distance du soleil où il fait ni trop chaud ni trop froid pour que l'eau liquide puisse subsister. Pour une planète, se trouver dans la Zone habitable constitue peut-être une condition nécessaire à la vie, mais en considérant la situation de Mars elle n'est sûrement pas suffisante. Les conditions à la surface de Mars sont particulièrement hostiles à l'existence d'eau liquide, ceci à cause de facteurs comme le manque d'atmosphère, indépendamment de si la planète se trouve dans la Zone habitable ou pas.

Revenons à la Terre : non seulement l'eau n'y manque pas, mais les conditions sont telles que ses trois phases, liquide, solide (glace) et gazeuse (vapeur d'eau) coexistent à la surface et dans l'atmosphère ; coexistence qui donne lieu aux grands cycles de passages entre les phases et détermine les phénomènes du climat. De ces trois phases, seule la phase liquide entretient la vie et dans ce qui suit on présentera les propriétés spéciales de l'eau liquide qui lui confèrent un rôle incontournable dans les processus du vivant.

2. L'eau en biologie

Le dogme fondateur de la biologie moléculaire et générale peut se résumer ainsi :



L'ADN, l'ARN et les protéines forment les grandes familles de macromolécules biologiques.

L'ADN est le support de l'information génétique. Dans la *réplication*, l'ADN d'une cellule mère est recopié fidèlement pour passer dans les cellules filles. Dans le processus de *transcription*, l'ADN est recopié en ARN qui sera ensuite traduit en polypeptides correspondant à l'expression du génome dans un processus appelé *traduction*. Les polypeptides vont se replier dans le milieu aqueux en des structures tridimensionnelles déterminées pour former les protéines actives qui seront adressées à leurs lieux d'action dans la cellule. La découverte des *rétrovirus*, virus à génome ARN intégré à l'ADN de la cellule, a incité d'ajouter au schéma du dogme une flèche supplémentaire dans le sens ARN à l'ADN pour représenter la *transcription reverse*. Les protéines sont les actrices principales du vivant par leurs rôles moléculaires d'enzymes catalyseurs des réactions biochimiques, de transporteur (par exemple d'oxygène par l'hémoglobine) de canaux membranaires, de récepteurs et détecteurs de signaux chimiques (par exemple, hormonaux) ou physiques (par exemple, la détection de la lumière par la rhodopsine dans la rétine, première étape de la vision) et aussi par leur rôle structurant des muscles et des tissus (par exemple, par le collagène de la matrice extracellulaire).

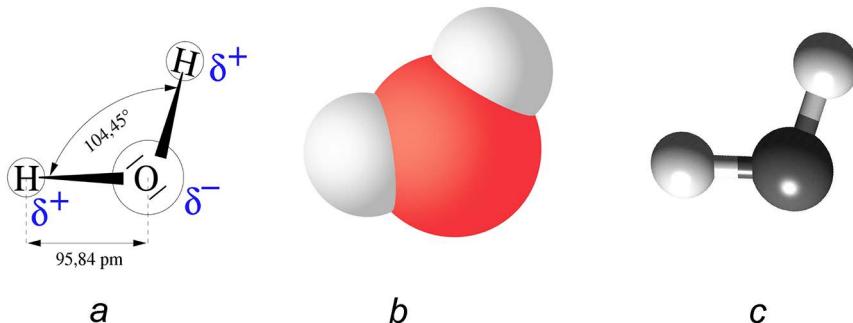


Figure 1. Trois représentations de la molécule d'eau.

Cependant, le schéma est trompeur ou tout au moins sérieusement réducteur. En effet, chacune des séries de réactions représentées, respectivement, par la réPLICATION, la transcription, la transcription reverse, et la traduction ne se déroule pas spontanément, même en présence de tous les substrats nécessaires (par exemple, les nucléotides nécessaires pour synthétiser les nouveaux brins d'ADN pendant la réPLICATION). Chacune des étapes consiste en une série de réactions fortement catalysées et contrôlées mettant en jeu plusieurs autres facteurs et de grands complexes de protéines avec l'ARN ou l'ADN, comme l'ADN polymérase pour la réPLICATION, l'ARN polymérase pour la transcription, et le ribosome pour la traduction. Le ribosome est un grand édifice macromoléculaire composé de plusieurs protéines et d'ARN où l'ARN assure la fonction enzymatique pour catalyser la formation de la chaîne polypeptidique. Il en découle que le schéma du dogme représente un état abouti de la vie et non pas une évolution historique, puisque on a déjà besoin des produits de la chaîne (les protéines) pour ses premières étapes comme la réPLICATION de l'ADN.

Les réactions du schéma se déroulent toutes en milieux aqueux, donc en présence d'eau, mais aussi d'ions de sels de certains types et à certaines concentrations. L'eau et le sel jouent deux rôles indépendants : (i) ils créent l'environnement propice à la stabilité des structures des protéines, de l'ADN et de l'ARN ; (ii) ils participent en tant qu'entités chimiques aux réactions.

2.1 La molécule H_2O

On peut représenter la molécule H_2O de plusieurs manières en fonction de la propriété que l'on veut souligner. La figure 1a représente l'atome d'oxygène et les deux hydrogènes avec la localisation de l'excès de charge positive (δ^+) sur les atomes H et l'excès de charge négative (δ^-) dû au doublet libre sur l'atome O.

Dans le modèle tridimensionnel en figure 1b, le rayon d'une sphère représentant le nuage électronique, est proportionnel au rayon de l'atome représenté et la distance entre les centres des sphères est proportionnelle à la distance entre atomes. La représentation en figure 1c respecte les distances et les angles des liaisons mais pas les volumes des atomes pour une vue plus dégagée des interactions entre atomes.

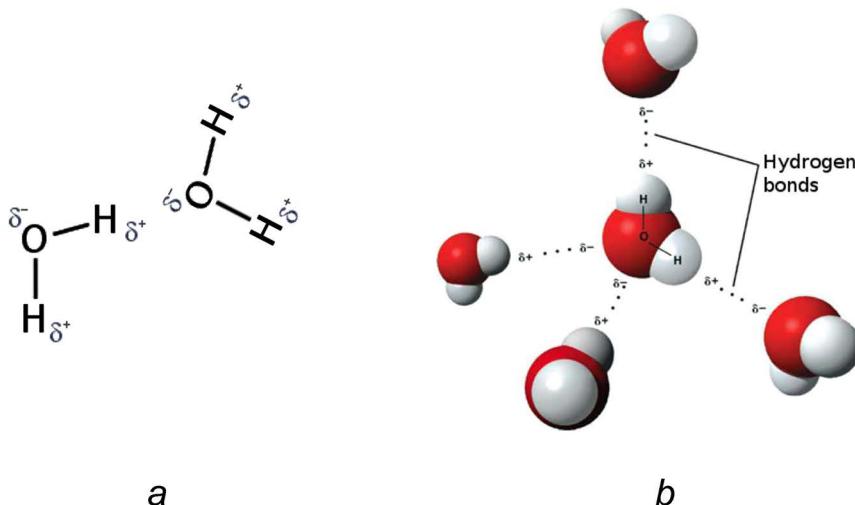


Figure 2. Interaction électrostatique entre molécules d'eau. (Adapté de John L. Finney dans la référence [8]).

2.2 La liaison H, la glace et l'eau liquide

L'interaction entre molécules d'eau est dans l'essentiel électrostatique par la distribution de charge visible dans la figure 2a. Dans le jargon chimique on dit qu'une molécule H_2O forme des liaisons hydrogène (liaisons H) avec ses partenaires par deux sites donneurs (les deux atomes H) et deux sites accepteurs (les doublets libres sur l'atome O). Ainsi une molécule d'eau peut s'entourer de quatre autres molécules d'eau en tétraèdre (figure 2b).

Par la formation de liaisons H, plusieurs molécules d'eau peuvent se structurer dans des assemblages ordonnés ou désordonnés (figure 3). La glace, forme solide de l'eau est constituée d'un réseau ordonné de liaisons H. En revanche, la structure en liaisons H de l'eau liquide est non seulement désordonnée mais également hautement dynamique.

2.3 La danse de l'eau

Une simulation de l'eau liquide révèle la structure désordonnée des molécules reliées par les liaisons H (figure 4). Cependant, la structure n'est pas figée, statique.

Les liaisons H se font et se défont pour se reformer avec d'autres partenaires dans une échelle de temps de l'ordre de la picoseconde (10^{-12} s).

Philip Ball dans son ouvrage H_2O a biography [1] a représenté la molécule d'eau comme un petit bonhomme ; son corps est l'atome d'oxygène O, ses deux mains, les atomes

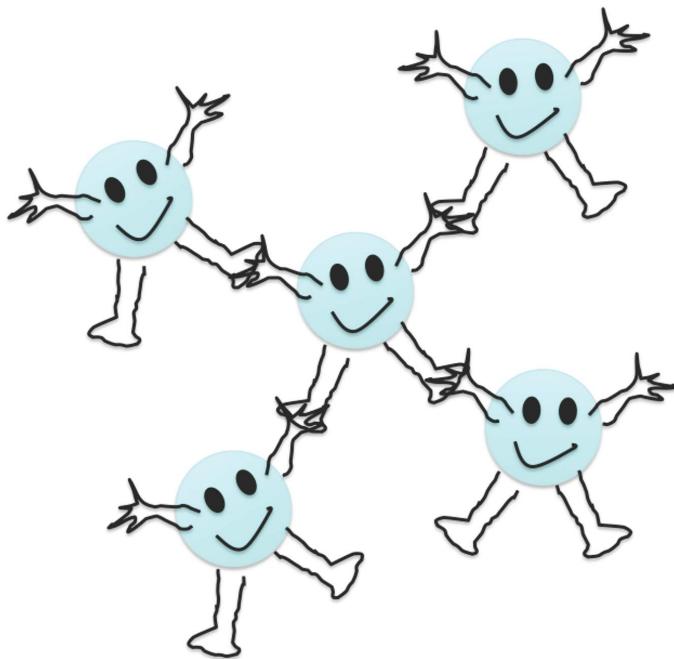


Figure 3. La danse de l'eau : interaction entre molécules d'eau représentée par des petits bonhommes. (Redessiné à partir de la référence [1]).

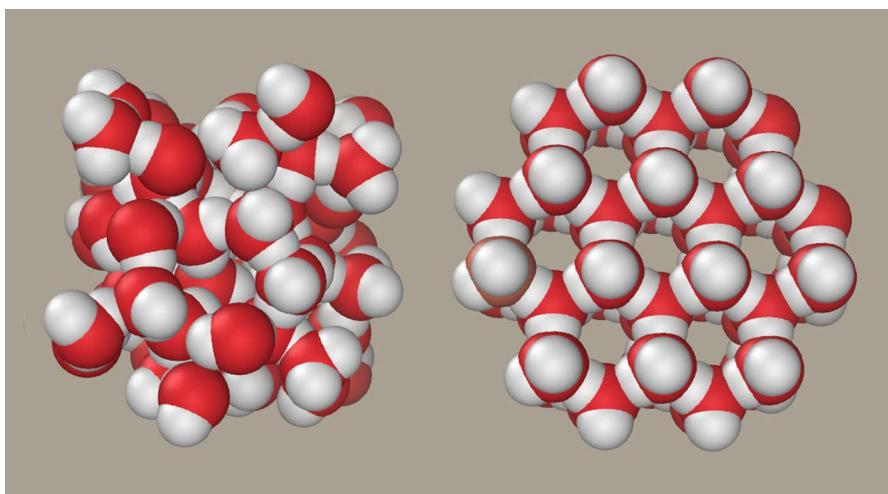


Figure 4. Désordre et ordre dans l'eau (à gauche) et la glace (à droite). (D'après J.L. Finney).

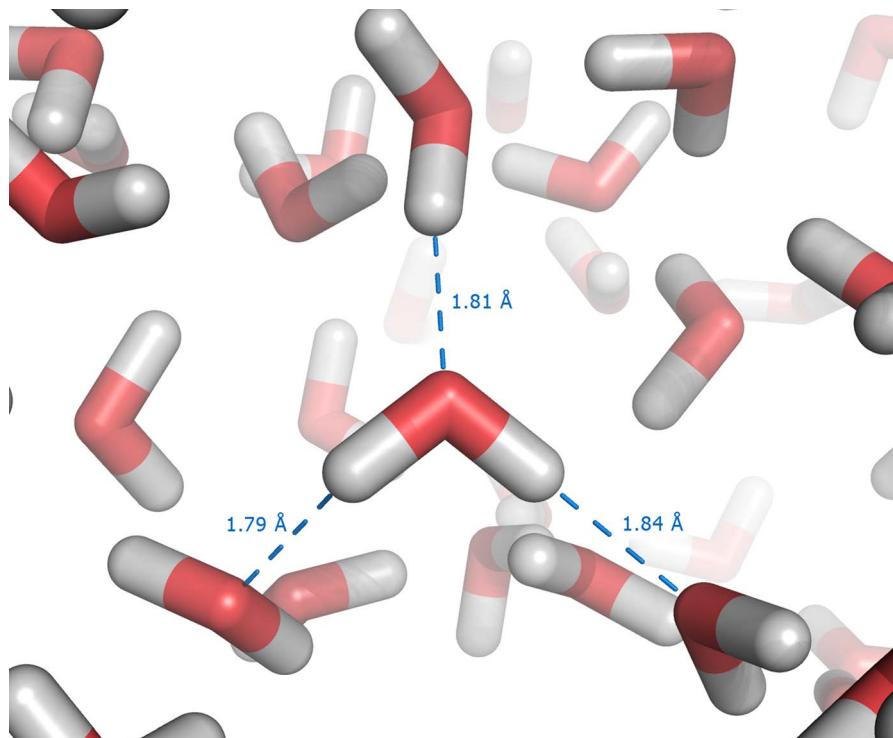


Figure 5. Simulation de l'eau liquide en dynamique moléculaire. (Adapté de John L. Finney dans la référence [8]).

d'hydrogène H (donneurs de liaison H) et les deux pieds, les doublets libres (accepteurs de liaisons H) (figure 5). Une liaison H est formée par la main d'un bonhomme tenant le pied d'un autre. La liaison ne dure pas longtemps. La main lâche le pied pour en prendre un autre. Le pied libéré est pris rapidement par une autre main. La foule est ainsi en mouvement perpétuel ; les corps tournent pour trouver d'autres partenaires, les mains les pieds se joignent, se lâchent. C'est la danse de l'eau ! Une danse qui confère au liquide une grande entropie.

3. Thermodynamique de l'effet hydrophobe

La fonction d'énergie (ou d'enthalpie) libre est associée au deuxième principe de la thermodynamique qui règle l'évolution d'un système physicochimique.

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S \quad (\text{I})$$

L'équation de Gibbs (I) stipule qu'à température T donnée, une variation d'énergie libre du système, ΔG , sera égal à la variation d'enthalpie ΔH moins la variation d'entropie multipliée par la température, $T\Delta S$. La formation de liaisons dans un système contribuera à une baisse d'enthalpie (ΔH négatif), Le désordre du système contribuera à une augmentation d'entropie. La contribution, $-T\Delta S$ négatif, à la variation d'énergie libre prenant une importance accrue avec l'augmentation de la température.

Le deuxième principe requiert qu'un système à deux états évolue vers l'état qui minimisera son énergie libre, c'est à dire vers des valeurs négatives de ΔG .

Considérons maintenant une solution aqueuse de molécules apolaires (par exemple le benzène) incapables par leur structure chimique de former des liaisons H. En l'état A, les molécules de benzène sont entourées de molécules d'eau. En l'état B, elles se regroupent pour minimiser leur surface de contact avec l'eau. En A, la danse de l'eau est perturbée. Par référence à l'image de Ball, c'est comme si des bonhommes dans la foule (les molécules de benzène) refusaient de donner la main ou de se laisser prendre le pied. Les molécules devront se réorganiser pour réduire les contacts défavorables, ce qui résultera en une baisse d'entropie.

En revanche, ce contact est déjà minimisé dans l'état B, qui est donc de plus faible énergie libre que l'état A. Le système évoluera vers l'état B. L'agrégation entre eux de groupements apolaires en solution aqueuse pour éviter le contact avec l'eau et minimiser la baisse d'entropie fournit une vision simple de l'effet hydrophobe.

3.1 L'effet hydrophobe contribue à la structure moléculaire des cellules

L'effet hydrophobe procure un élément déterminant dans l'organisation des cellules au niveau moléculaire. Les membranes cellulaires sont formées par des molécules constituées de têtes polaires et de queues apolaires qui s'organisent en bicouche de façon à soustraire les parties apolaires du contact avec l'eau. Une contribution importante au repliement tridimensionnel des polypeptides en protéines actives provient de la tendance à « cacher » des parties apolaires de la chaîne dans un cœur compact de la structure, loin du contact avec l'eau.

Notons en rappel que l'effet hydrophobe nécessite la présence d'eau en son état dynamique et mobile.

4. Les neutrons révèlent la dynamique de l'eau intracellulaire

L'importance incontournable de l'eau pour les processus biologiques a mené naturellement à vouloir comprendre quel est son état dans le milieu intracellulaire.

En fait, certains auteurs ont voulu croire que l'eau dans le cytosol biologique possédait une dynamique fortement perturbée par le milieu encombré de macromolécules et structures intracellulaires. La diffusion de neutrons constitue un outil de choix pour étudier la dynamique de l'eau et des macromolécules biologiques. Les faisceaux de neutrons produits dans les réacteurs de recherche sont utilisés comme des faisceaux de lumière avec des avantages spécifiques pour analyser la structure et la dynamique de la matière vivante.

Les neutrons sont des particules de charge neutre de la même taille et masse que les protons. Comme dans un jeu de billard, des neutrons de vitesse connue, incidents sur des molécules d'eau vont rebondir sur les atomes qu'ils rencontrent. Si on mesure l'angle de sortie et la vitesse des neutrons après l'interaction, par l'application des principes de conservation d'énergie et de quantité de mouvement, on aura l'information sur la dynamique des atomes. Pour différentes raisons théoriques et pratiques, la diffusion neutronique a été particulièrement performante pour mesurer la dynamique de l'eau, *in situ*, dans des cellules vivantes.

Ainsi, Jasnin et al. et Stadler et al. ont démontré, respectivement, que l'eau dans le cytosol des bactéries [2] et des hématies [3] est aussi dynamique que l'eau liquide libre, sauf pour une fraction d'environ 10 % qui est légèrement ralenti, correspondant aux couches d'hydratation des macromolécules (l'eau liée). Cela a mis en évidence le fait (réconfortant pour la validité de toutes les études de biochimie *in vitro*) que la grande majorité de l'eau intracellulaire ne présente pas de comportement anormal. Il s'agit de l'eau échangeable. (N.B. l'eau dite liée est aussi échangeable, mais très lentement).

5. Eau et dynamique des macromolécules biologiques

Les neutrons ont également enrichi nos connaissances sur la dynamique des macromolécules biologiques en mettant en évidence son importance pour la fonction biologique [4].

La relation structure-fonction constitue l'hypothèse de base de la biologie moléculaire structurale. Toutefois depuis les débuts des études structurales, il s'est avéré qu'une vision structurelle simpliste d'interaction comme, par exemple, l'image de clé et de serrure pour l'interaction d'une enzyme avec son substrat, n'était pas valable. Tout au moins, il fallait supposer des clés et des serrures dynamiques qui s'adapteraient les unes aux autres avec une mobilité intérieure. Les données neutrons sur la protéine membranaire, bactériorhodopsine (figure 6), sont significatives dans ce contexte (figure 7) [5]. La bactériorhodopsine présente une activité, importante pour la bioénergétique de la cellule, de pompe à protons activée par la lumière. Son activité est bien caractérisée en fonction de conditions extérieures. Notamment, bien que sa structure reste intégrée à faible hydratation, la protéine nécessite un milieu d'hydratation minimum pour être active (hydratation minimum qui correspond au déclenchement de la mobilité observé par neutrons). La mesure a permis de porter les fluctuations carrées moyennes en fonction de la

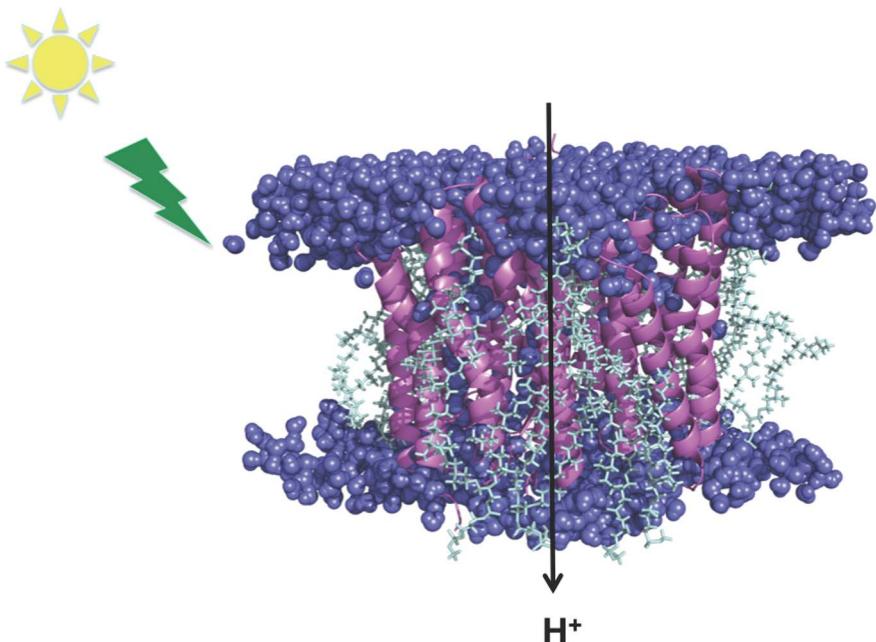


Figure 6. Modèle de la bactériorhodopsine dans la membrane pourpre de *Halobacterium salinarum*. La protéine en hélices alpha est colorée en violet, les lipides sont représentés par leur structure chimique, les boules bleues sont les molécules d'eau. La bactériorhodopsine est une pompe à protons activée par la lumière. Pour chaque photon absorbé, un proton est transféré à travers la membrane, de l'intérieur de la cellule vers l'extérieur (du haut en bas dans la figure). (D'après Doug Tobias).

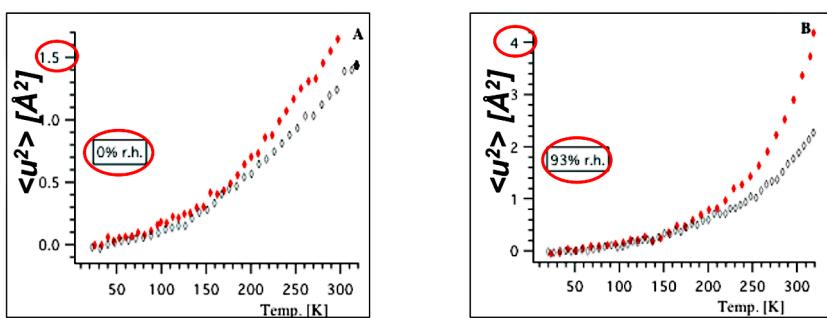


Figure 7. Fluctuations carrées moyennes mesurées par neutrons en fonction de la température dans la membrane pourpre (figure 6). Le marquage isotopique a permis de séparer les mouvements de la bactériorhodopsine (en noir) d'une part et des lipides de l'autre (en rouge). A) Les mouvements de la membrane à basse hydratation ; B) Les mouvements à hydratation élevée. (Adapté de la référence [5]).

température, respectivement pour les parties lipidique et protéique de la membrane. Plus la pente de la courbe est raide, plus le système est « mou » ou dynamique. On voit que toutes les conditions sont « dures » aux basses températures jusqu'à environ 200 K (-73°C) où les pentes augmentent brutalement. En bout des courbes, vers les températures physiologiques, on constate que les lipides sont plus mobiles que les protéines mais surtout que la mobilité des lipides et des protéines est beaucoup plus importante en forte hydratation (panel de droite en figure 7) que dans la membrane sèche. On note les valeurs de fluctuations proches de 4 \AA^2 pour les lipides dans la membrane hautement hydratée comparée à $1,5 \text{ \AA}^2$ à faible hydratation.

La relation hydratation-dynamique-fonction a été observée par des mesures neutrons sur plusieurs autres protéines [4] en développant un modèle physique simple d'oscillateur quasiharmonique pour analyser les courbes mesurées (fluctuations-carrée-moyenne en fonction de la température) [6] ainsi que sur l'ARN [7].

6. Conclusion

L'eau liquide présente une structure désordonnée hautement dynamique à entropie élevée. Elle est essentielle à la vie pour plusieurs raisons : par les réactions biochimiques en solution aqueuse ; par l'effet hydrophobe qui joue un rôle déterminant dans le repliement des polypeptides en protéines actives et l'auto assemblage de structures cellulaires comme les membranes ; par les effets de l'hydratation qui déclenche la dynamique fonctionnelle dans les macromolécules biologiques. La dynamique de l'eau intracellulaire a été montrée être semblable à celle de l'eau libre, confortant ainsi les études *in vitro* et la validité des effets énumérés ci-dessus.

Pour plus de documentation sur l'eau et la vie, on pourrait consulter l'ouvrage édité par Lynden-Belle et collaborateurs [8].

Références

- [1] Ball P. (1999) *H_2O : A Biography of Water*. Weidenfeld & Nicolson.
- [2] Jasnin M., Moulin M., Haertlein M., Zaccai G., Tehei M. (2008) Down to atomic-scale intracellular water dynamics. *EMBO Rep* **9**: 543-547.
- [3] Stadler A. M., Embs J. P., Digel I., Artmann G. M., Unruh T., Büldt G., Zaccai G. (2008) Cytoplasmic water and hydration layer dynamics in human red blood cells. *J Am Chem Soc* **130**: 16852-16853.
- [4] Zaccai G. (2013) The ecology of protein dynamics. *Current Physical Chemistry, Special Issue on Quantum Nanobiology and Biophysical Chemistry*, K.J. Jalkanen, Ed **3**: 9-16.
- [5] Lehnert U. (2002) Effet de l'hydratation sur les mouvements thermiques locaux de la Membrane Pourpre étudié par diffusion neutronique et marquage isotopique. Thèse de Doctorat de l'Université Joseph Fourier de Grenoble.

- [6] Zaccai G. (2000) How soft is a protein ? A protein dynamics force constant measured by neutron scattering. *Science* **288**: 1604-1607.
- [7] Roh J. H., Briber R. M., Damjanovic A., Thirumalai D., Woodson S. A., Sokolov A. P. (2009) Dynamics of tRNA at Different Levels of Hydration. *Biophys. J.* **96**: 2755-2762.
- [8] Lynden-Bell R. M., Morris S. C., Barrow J. D., Finney J. L., Harper C. L. Jr (editors) (2010) Water and Life: The unique properties of H_2O . CRC Press, Boca Raton, London, New York.

11

Premières traces et diversification de la vie

Emmanuelle J. Javaux

PAL³ Lab (Palaeobiogeology-Palaeobotany-Palaeopalynology), Université de Liège, Quartier Agora, Bâtiment B18, Allée du six août, 14 B - 4000 Liège (Sart Tilman), Belgique

I. Introduction

Pour aborder la question de l'origine et les débuts de la vie, deux approches sont possibles (figure I). L'approche « bottom-up » tente de tester des hypothèses expliquant le passage de molécules simples se formant de manière abiotique dans diverses conditions (spatiales, hydrothermales marines ou terrestres, rivage ou lac) vers les premières membranes, codes génétiques, métabolismes et cellules. C'est principalement l'approche de la chimie prébiotique et d'une partie de la biologie théorique et expérimentale, et même de la philosophie des sciences. Il est important de réaliser que nous ne connaîtrons jamais comment la vie est apparue sur la Terre, nous pouvons seulement tester des chemins possibles, des hypothèses.

La seconde approche dite « top-down » part de la vie telle qu'on la connaît aujourd'hui, et cherche à reconstruire l'évolution des lignées jusqu'à l'ancêtre commun, LUCA, en reculant dans le temps. LUCA, the « Last Universal Common Ancestor » ou le cénancêtre, est le dernier ancêtre commun des trois domaines de la vie, Bacteria, Archaea et Eucarya (Woese et al, 1990). LUCA n'est pas la première forme de vie ni la première population de cellules, mais un microorganisme déjà complexe, avec de l'ATP, de l'ARN, des protéines et probablement (bien que sans consensus général) avec de l'ADN et une membrane cellulaire lipidique (Pereto et al, 2004). D'autres lignées cellulaires sont donc apparues avant LUCA et ont pu même coexister un temps avec les trois domaines de la vie et échanger avec eux du matériel génétique (Forterre et al, 2005). Cette approche est celle de la phylogénie moléculaire, qui examine le contenu en gènes ou protéines d'organismes des trois domaines, les comparent, et construit des arbres d'évolution qui sont également des hypothèses de chemins évolutifs possibles. Cette approche ne peut remonter dans le temps que jusqu'à LUCA.

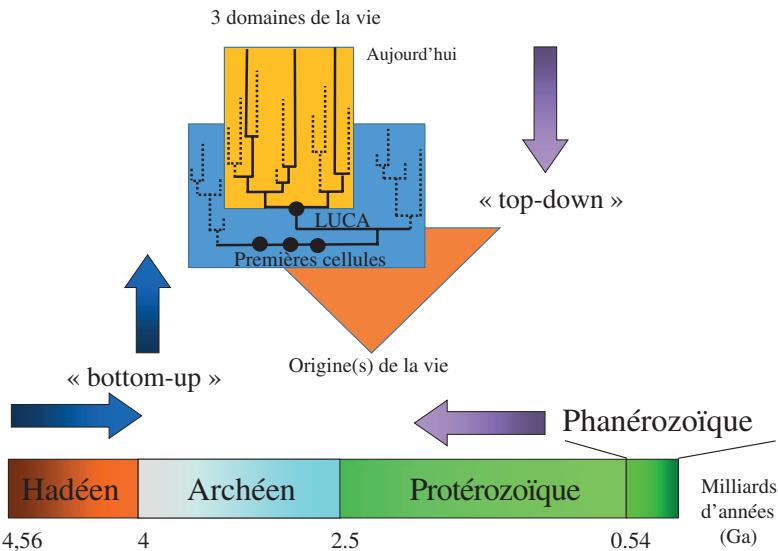


Figure 1. Echelle des temps géologiques et approches bottom-up et top-down pour l'étude de l'origine et l'évolution de la vie (modifié de Forterre *et al.*, 2005). Explications dans le texte.

L'approche top-down est aussi celle de la paléontologie et de la géologie, qui étudient des fossiles morphologiques (macroscopiques et microscopiques) et chimiques (molécules, abondances et rapports isotropiques) et leur contexte géologique (paléo environnements, âge), documentant la succession et l'âge minimum d'apparition d'ancêtres de formes plus jeunes ou témoins de lignées disparues, d'innovations biologiques au cours du temps, et l'évolution des trois domaines de la vie, et peut-être même des traces de vie avant LUCA. Biologistes et paléontologues travaillent ensemble pour dater les embranchements des arbres évolutifs grâce à des fossiles bien identifiés et datés, et ainsi construire des horloges moléculaires, permettant de proposer un âge minimum pour l'origine de grandes étapes dans l'évolution, comme l'âge des premiers animaux (environ 800 millions d'années ; Erwin *et al.*, 2011), du dernier ancêtre commun des cellules à noyau (LECA, Last Eukaryotic Common Ancestor, entre 1,1 à 1,9 milliards d'années ; Eme *et al.*, 2014), et de LUCA. Ces derniers ancêtres communs ne sont donc pas les premières cellules à l'origine des domaines de la vie. Outre leur âge respectif, de nombreuses questions et hypothèses existent aussi quant à la relation entre les trois domaines de la vie, et leur ordre d'apparition (figure 2). L'hypothèse la plus commune est celle de l'apparition des procaryotes (bactéries et archées) avant les eucaryotes, et récemment, une origine des eucaryotes au sein d'un groupe particulier d'archées (Spang *et al.*, 2015). Plusieurs modèles impliquant différents types de procaryotes dans l'eucaryogenèse ont été proposés pour expliquer ces scénarios (revue par Lopez-Garcia, 2011), mais d'autres alternatives sont envisagées, comme l'apparition d'un LUCA complexe proto-eucaryote ou acaryote vers les trois domaines (revue dans Penny *et al.*, 2014).

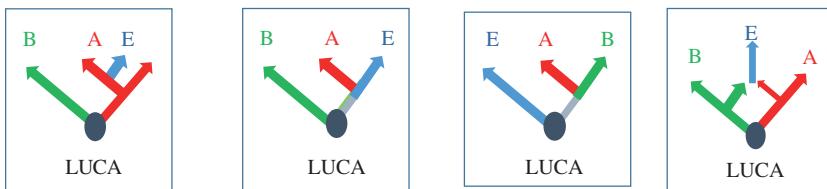


Figure 2. Différents modèles de diversification des trois domaines de la vie à partir de LUCA (A : Archaea, B : Bacteria, E : Eucarya, LUCA : Last Universal Common Ancestor).

2. Terre habitable

Suite à son accrétion il y a 4,567 milliards d'années, la Terre s'est refroidie et différenciée en différentes couches (croûte-manteau-noyau). Des analyses de minéraux microscopiques (zircons) indiquent que la Terre est devenue habitable relativement rapidement (à partir de 4,4-4,3 milliards d'années) c'est-à-dire qu'elle réunissait les conditions minimales nécessaires pour que la vie apparaisse, soit de l'eau liquide (d'origine multiple, principalement du dégazage et de météorites), un contact entre cette eau liquide et des minéraux, peut-être formant une croûte (les minéraux concentrant des éléments chimiques), et une atmosphère exerçant une pression suffisante pour que l'eau liquide soit stable à la surface de la planète (Martin et al, 2011). Ces conditions d'habitabilité impliquent peut-être aussi la nécessité d'un champ magnétique protégeant l'atmosphère de l'érosion par les vents solaires (et donc un noyau différencié lui aussi en une graine solide et un noyau externe liquide), et une activité géologique recyclant les éléments chimiques utilisés par la vie (Javaux et Dehant, 2010). Ces caractéristiques pourraient ne pas être indispensables à l'élosion de la vie, mais peut-être bien à sa persistance et son évolution sur une planète (ou une lune).

La vie est donc peut être apparue très tôt, mais malheureusement nous n'avons aucune roche préservée de cette période pour le prouver. Une période de bombardement intense de météorites, le LHB (Late Heavy Bombardment), entre 4 et 3,9 Ga, est documentée par des traces d'impact sur la lune et les planètes proches de la Terre, et aurait pu rendre la surface de la Terre temporairement inhabitable. Peu après, les premières roches sédimentaires datant de 3,8 à 3,5 Ga témoignent d'un cycle géologique bien établi, et enregistrent peut-être des possibles traces de vie, qui sont cependant très discutées. Relativement rapidement, les trois domaines de la vie (bactéries, archées et eucaryotes) se diversifient dans des niches écologiques variées.

3. Traces de vie et défis

Les roches sont les archives de l'histoire de la Terre et de la vie. Malheureusement, cet enregistrement est incomplet et altéré par divers processus au cours des temps géologiques. A partir de ces pièces fragmentaires, les géologues et paléobiolo-

gistes tentent de reconstituer l'évolution de la vie et de la planète. Pour reconstruire l'histoire de la vie, les chercheurs utilisent quatre grands types de traces ou « biosignatures » (processus ou faits explicables uniquement par la biologie). Les biosignatures comprennent des fossiles, le fractionnement isotopique d'éléments utilisés par la vie (c'est-à-dire l'utilisation préférentielle du plus léger isotope d'un élément comme le carbone ou le soufre, relativement aux autres isotopes de ces mêmes éléments), des molécules organiques complexes fossiles (des lipides, des pigments), et des structures rocheuses d'origine microbienne ou « biosédimentaires » (comme les stromatolites, structures laminées calcaires) (figure 3). Cependant certains processus physiques ou chimiques peuvent, dans certaines conditions, imiter la vie. Il faut donc une grande rigueur et prudence dans l'interprétation de traces de vie très ancienne.

La première étape vise à comprendre le contexte géologique : quel type d'environnement les roches étudiées représentent-elles ? Est-il possible d'y retrouver des traces de vie ? Ces roches sont-elles les vestiges d'un environnement dont les conditions physico-chimiques permettaient à la vie de se développer mais aussi d'y être préservée ? Que nous apprennent ces conditions sur le type de vie, de métabolismes, qui ont pu s'y adapter ? Tenant en compte le fait que d'autres formes de vie ont pu y coexister sans être préservables dans ces conditions ! À quel point ces roches ont-elles été transformées par divers processus géologiques (diagenèse, métamorphisme, hydrothermatisme...), altérant ou effaçant les biosignatures éventuelles ? La composition (minéraux) et les structures (laminations, veines, taille et classement de grains...) préservées dans les roches à différentes échelles spatiales, macroscopiques (une région, une falaise, un sondage, un banc de roche) et microscopiques (une section de roche, un minéral), peuvent être caractérisées avec des outils de plus en plus performants, jusqu'à l'échelle nanométrique, et permettent de comprendre les conditions de formation de la roche.

Ces analyses permettent aussi de déterminer si les traces de vie potentielles sont bien endogènes (dans la roche et non une contamination) et syngénétiques (de l'âge de la roche, et non d'une autre origine, par exemple des microorganismes amenés par des fluides circulant dans une fracture, ou creusant la roche déjà solidifiée, ou provenant de l'érosion de roches plus anciennes), avant d'aborder la question de leur biogénicité (leur origine biologique). L'origine biologique est avérée ou au moins probable lorsqu'on ne peut concevoir, dans l'état des connaissances actuelles, aucune autre explication non-biologique pour expliquer les observations dans les conditions de préservation étudiées. Dans des conditions hydrothermales par exemple, la présence de matière organique et/ou d'un fractionnement isotopique du carbone similaire à la vie peuvent être aussi d'origine chimique abiotique. La matière organique peut migrer autour de minéraux, formant des pseudofossiles. De nouveau, l'étude détaillée du contexte, à différentes échelles, permettra de trancher.

L'âge des roches est déterminé au moyen de plusieurs techniques, notamment en utilisant des isotopes radioactifs présents naturellement dans les minéraux. C'est en effet l'âge des roches que l'on détermine et pas l'âge des traces de vie elles-mêmes ! Déterminer la syngénicité de biosignatures potentielles est donc crucial !

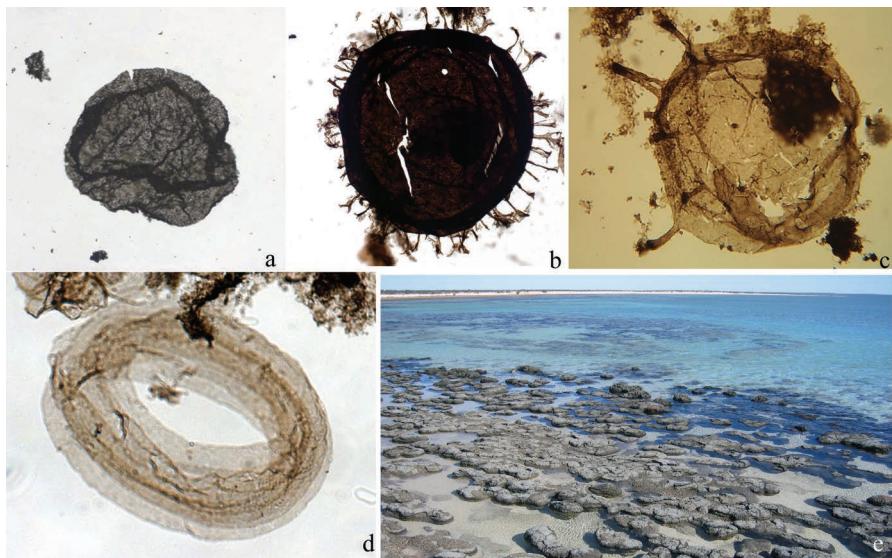


Figure 3. Exemples de microfossiles précambriens (a-d) et stromatolites actuels (e). a : microfossile à affinité biologique inconnue de 3,2 Ga, Moodies Group, Afrique du Sud (diamètre : 160 µm) ; b : protiste *Shuiyousphaeridium macroreticulatum*, 1,7 Ga, Ruyang Group, Chine (diamètre : 300 µm) ; c : protiste *Tappania plana*, 1,5 Ga, Roper Group, Australie (diamètre : 120 µm) ; d : cyanobactérie *Obruchevella*, ~1 Ga, Mboui-Mayi Super-group, RDC (diamètre : ~350 µm) ; e : stromatolites actuels de Shark Bay, Australie.

Pour mieux comprendre les phénomènes de fossilisation, et faciliter l'interprétation de biosignatures potentielles, les géobiologistes font des expériences de fossilisation artificielle et/ou observent des processus de fossilisation en cours dans une large gamme de conditions environnementales actuelles jusqu'aux plus extrêmes où la biodiversité est détaillée par les microbiologistes (e.g. figure 3e ; Lepot et al, 2014 ; Couradeau et al, 2013). Ces études permettent de caractériser des biosignatures spécifiques à certains habitats ou conditions physico-chimiques et de reconnaître les biais de préservation. Certains de ces sites extrêmes sont souvent utilisés comme analogues des premiers habitats ou d'habitats extraterrestres, mais dans une certaine limite, les organismes actuels extrémophiles résultant d'adaptations secondaires très lointaines des premières formes de vie.

L'actualisme (« le présent est la clé du passé ») n'est pas toujours applicable à des temps très anciens où les conditions ont pu être très différentes, par exemple lorsque les océans étaient plus riches en soufre ou en fer ou pauvre en oxygène ou en nutriments nécessaires à certains métabolismes.

4. Les premières traces de vie au Précambrien

L'échelle des temps géologiques est divisée en quatre éons : l'Hadéen, depuis l'accrétion de la Terre (4,567 Ga, gigayear : milliards d'années) jusqu'à 4 Ga ; l'Archéen, de 4 Ga à 2,5 Ga ; le Protérozoïque, de 2,5 Ga à 0,54 Ga ; et le Phanérozoïque, de 0,54 Ga à aujourd'hui. Les trois premiers éons forment le Précambrien (figure 1, figure 4). Les premières traces de vie décrites sont controversées car elles proviennent soit dans de roches très modifiées par des fluides et hautes pressions et températures (métamorphisme), et/ou il existe des explications non biologiques pour expliquer leur origine. Il s'agit de particules carbonées associées à un fractionnement isotopique du carbone compatible avec la vie, dans des roches de 3,8 Ga au Groenland (Isua) et de 3,5 Ga en Australie (Chert Apex), ainsi que de micro-tunnels dans des laves de 3,5 Ga en Afrique du Sud. Vers 3,45 Ga, le fractionnement isotopique du soufre semble suggérer l'évolution du métabolisme de réduction du soufre connu chez des bactéries actuelles, et des stromatolites associés à de la matière organique, la présence d'organismes probablement photosynthétiques mais ne produisant pas d'oxygène (revue dans McLoughlin, 2011). Entre 3,45 Ga et 3,2 Ga, des cellules fossilisées de 100 à 300 µm de diamètre (0,1 à 0,3 millimètres) préservées dans des argiles en Afrique du Sud ou dans des cherts (roches riches en silice) en Australie et forment un assemblage de microfossiles convaincants mais l'identité de ces cellules vivant en milieu marin peu profond est inconnue (figure 3a ; Javaux et al, 2010 ; Sugitani et al, 2015). La méthano-génèse, production de méthane par des archées, semble exister depuis au moins 2,8 Ga, comme en témoigne la signature isotopique spécifique associée à la matière organique de l'époque (fractionnement isotopique du carbone très négatif). Les cyanobactéries sont des microorganismes très importants dans l'histoire de la vie et de notre planète du fait de leur métabolisme : elles ont inventé la photosynthèse oxygénique (produisant de l'oxygène moléculaire O₂) et ainsi modifiant la chimie des océans et de l'atmosphère de la planète toute entière, visible aujourd'hui dans le spectre atmosphérique de la Terre. Cet effet planétaire est enregistré dans les roches dès 2,45 Ga (signatures chimiques et minérales) mais localement peut-être depuis au moins 3,2 Ga (Lyons et al, 2014) (figure 4). Les microfossiles les plus anciens qui peuvent être identifiés comme des cyanobactéries fossiles datent de 2,1 Ga, même si d'autres fossiles plus anciens existent mais ils sont trop simples et moins diagnostiques (figure 3d). Les cyanobactéries sont d'importants producteurs primaires, et ont donné naissance, grâce à l'endosymbiose d'une cyanobactérie dans une cellule hôte eucaryote, aux chloroplastes des eucaryotes photosynthétiques (algues et plantes), conduisant à de nouvelles diversifications de la vie et la conquête des continents (la « terrestrialisation »).

Donc, à l'archéen, au moins deux des trois domaines de la vie, les bactéries et les archées, ou des organismes ayant des métabolismes laissant les mêmes biosignatures dans le registre géologique, se diversifiaient déjà. Il est possible que les premiers eucaryotes soient apparus aussi très tôt, mais leurs traces fossiles avérées les plus anciennes datent de 1,8 Ga. Au protérozoïque, la vie continue à se diversifier dans des conditions particulières, comme en témoignent l'analyse géochimique des roches mais aussi des assemblages de microfossiles (par exemple la Formation Gunflint datée à 1,8 Ga au Canada) : les océans sont stratifiés, l'atmosphère et l'eau peu profonde sont oxygénées (mais beaucoup moins qu'actuellement), et les eaux plus profondes sont anoxiques et riches en soufre (sulfidiques) ou anoxiques et riches en fer, mais rarement oxiques (figure 4).

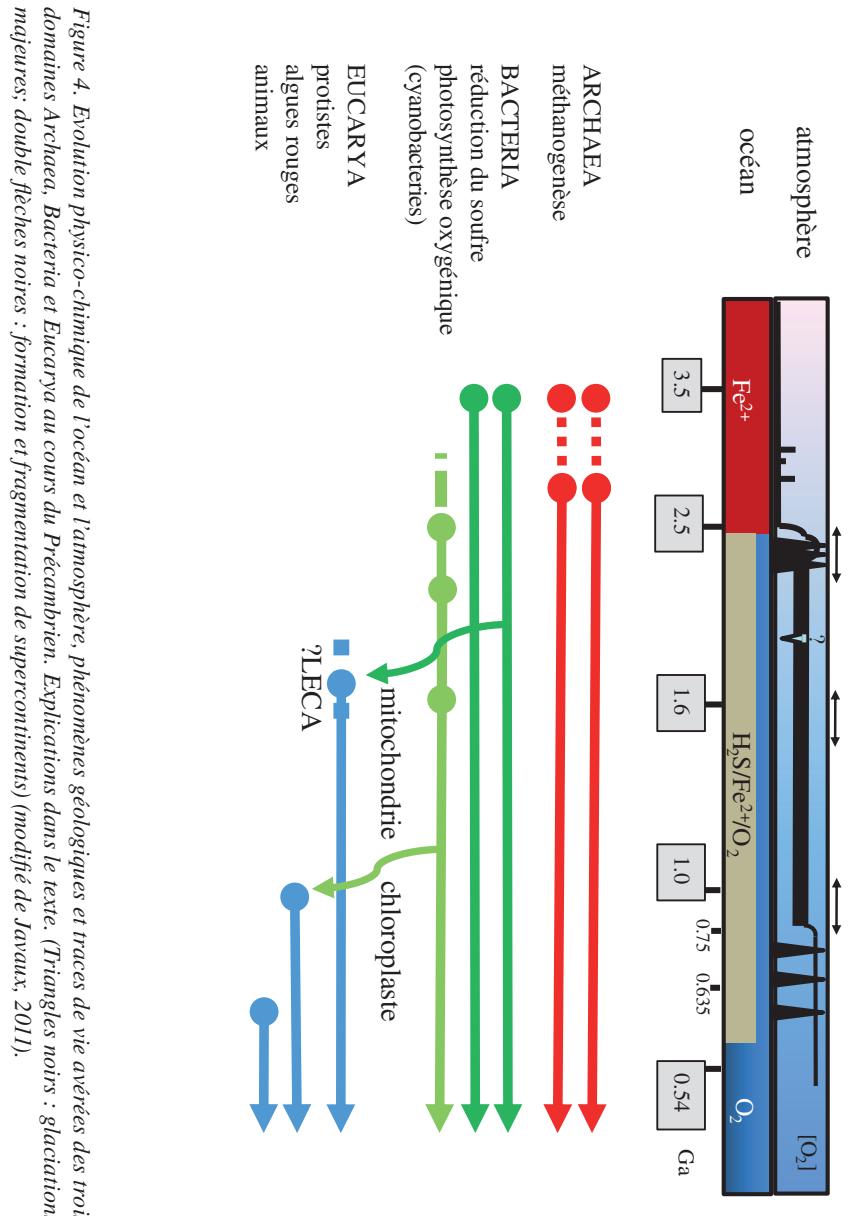


Figure 4. Evolution physico-chimique de l'océan et l'atmosphère, phénomènes géologiques et traces de vie avérées des trois domaines Archaea, Bacteria et Eucarya au cours du Précambrien. Explications dans le texte. (Triangles noirs : glaciations majeures; double flèches noires : formation et fragmentation de supercontinents) (modifié de Javaux, 2011).

LECA, le dernier ancêtre commun des eucaryotes, était un microorganisme unicellulaire complexe, un protiste aérobie, hétérotrophe, capable de se mouvoir grâce à un flagelle, et formant des formes résistantes lui permettant de s'adapter à diverses niches écologiques (Koumandou et al, 2013). Ce n'était donc pas le premier eucaryote. La mitochondrie est d'origine bactérienne, ainsi que le chloroplaste des eucaryotes photosynthétiques, mais la naissance de la première cellule eucaryote n'est pas encore comprise, comme décrit plus haut. Les premiers fossiles eucaryotes sont reconnaissables par une combinaison de caractères inconnue chez les procaryotes : une paroi organique décorée d'appendices, stries concentriques, plaques organiques, pustules... récalcitrante avec une ultrastructure complexe, et de grande taille (bien que la taille considérée seule n'est pas un critère suffisant, des petites cellules eucaryotes de 1-2 µm et des grandes bactéries de plusieurs centaines de µm existant dans la nature) (figure 3b-c ; Javaux et al, 2003). Des microfossiles de ce type apparaissent puis se diversifient entre 1,7 Ga et 1,5 Ga en Chine, Australie, Sibérie, Svalbard, Russie, Inde... et documentent l'évolution de cellules à noyau avec un cytosquelette, des endomembranes, et la multicellularité eucaryote, mais leur position avant ou après LECA est inconnue. Entre 1,2 et 0,75 Ga, d'autres assemblages témoignent de la diversification d'algues rouges multicellulaires et donc de la photosynthèse chez les eucaryotes, ainsi que d'autres algues et des protistes hétérotrophes à paroi organique ou certains portant des écailles et des traces de prédation. Vers la fin du Protérozoïque, les premiers animaux apparaissent, microscopiques puis macroscopiques, et développent un nouveau niveau de multicellularité avec des tissus et organes, des squelettes calcaires, de la prédation, et les algues macroscopiques continuent à se diversifier, annonçant les écosystèmes du Phanérozoïque. Les eucaryotes sont donc présents tôt dans l'histoire de la vie mais jouent un rôle écologique important seulement à partir de 800 millions d'années. Les causes de ces modalités d'évolution sont sans doute multiples et liées à l'oxygénéation croissante des océans, la disponibilité de nutriments, et la prédation par des protistes puis des animaux (e.g. Javaux, 2011 ; Butterfield, 2014 ; Knoll 2014).

5. Conclusion

C'est donc en combinant les approches de plusieurs disciplines scientifiques au sein de la géologie (géochimie, géochronologie, géophysique, paléontologie, sédimentologie), de la biologie cellulaire et moléculaire, de la chimie, et de la planétologie, que l'on peut tenter de reconstituer le puzzle de la co-évolution de la Terre et de la vie, sachant que la plupart des pièces n'ont jamais laissé de traces ou ont été détruites. C'est aussi cette collaboration multidisciplinaire qui permet d'aborder la question de la vie ailleurs, des conditions d'habitabilité, et de développer des missions exobiologiques pour tenter d'y répondre.

Références

- Butterfield N. J., 2014. Early evolution of the Eukaryota. *Palaeontology*, 58, 5-17.
- Couradeau E., Benzerara K., Gérard E., Estève I., Moreira D., Tavera R., and López-García P., 2013. Cyanobacterial calcification in modern microbialites at the submicrometer scale. *Biogeosciences*, 10, 5255-5266, <http://dx.doi.org/10.5194/bg-10-5255-2013>.

- Erwin D. H., Laflamme M., Tweedt S. M., Sperling E. A., Pisani D., and Peterson K. J., 2011. The Cambrian Conundrum: Early Divergence and Later Ecological Success in the Early History of Animals. *Science*, 334, 1091-1097.
- Forterre P., 2013. The Common Ancestor of Archaea and Eukarya Was Not an Archaeon Hindawi Publishing Corporation Archaea, <http://dx.doi.org/10.1155/2013/372396>
- Forterre P., Gribaldo S., and Brochier C., 2005. LUCA : à la recherche du plus proche ancêtre commun universel. *Medecine/Sciences*, 21, 860-865.
- Eme L., Sharpe S. C., Brown M. W., and Roger A. J., 2014. On the age of eukaryotes: evaluating evidence from fossils and molecular clocks. *Cold Spring Harbour Persp. In Biol.* <http://dx.doi.org/10.1101/cshperspect.a016139>
- Gargaud M., Albarede F., Arndt N., Cleaves K., Gounelle M., Javaux E. J., Pinti D., and Raymons S., in press. Chronological history of life on Earth. In Gargaud et al, 2015. Encyclopedia of Astrobiology, 2nd Edition Springer.
- Javaux E.J., 2011. Evolution of early eukaryotes in Precambrian oceans. In: Gargaud, M., Lopez-Garcia P., Martin H. (Eds): *Origins and Evolution of Life: an astrobiology perspective*. Cambridge University Press, p. 414-449.
- Javaux E. J. and Dehant V., 2010. Habitability from stars to cells. *Astronomy Astrophysics Review*, 18, 383-416.
- Javaux E. J. and Lepot, K., in press. The Paleoproterozoic microfossil record: implications for the evolution of the biosphere during Earth's Middle-age. In: D. Johnston, S. Poulton (Eds) "Revolutions in the early Proterozoic: Tracking geochemical and geobiological change" Topics in Geobiology. Springer.
- Javaux E. J., Knoll A. H., and Walter M. R., 2003. Recognizing and interpreting the fossils of early eukaryotes. *Origins of Life and Evolution of the Biosphere*, 33, 75-94
- Javaux E. J., Marshall C. P., and Bekker A., 2010. Organic-walled microfossils in 3.2 billion-year-old shallow-marine siliciclastic deposits. *Nature*, 463, 934-938.
- Javaux E. J. and Benzerara K., 2009. Microfossils in M. Gargaud, C. Mustin, J. Reisse, O. Vandenabeele-Trambouze Traces de vie présente ou passée : quels indices, signatures ou marqueurs ? *Comptes Rendus Palevol*, special issue 8, 605-615.
- Knoll A. H., 2014. Paleobiological perspective on early eukaryotic evolution. *Cold Spring Harbor Perspectives in Biology*. <http://dx.doi.org/10.1101/cshperspect.a016121>
- Koumandou V. L., Wickstead B., Ginger M. L., van der Giezen M., Dacks J. B., and Field M. C., 2013. Molecular paleontology and complexity in the last eukaryotic common ancestor. *Crit Rev Biochem Mol Biol*, 48(4): 373-396.

Lepot K., Deremiers L., Namsaraev Z., Compère P., Gérard E., Verleyen E., Tavernier I., Hodgson D. A., Wilmette A., and Javaux E. J., 2014. Organo-mineral imprints in fossil cyanobacterial mats of an Antarctic lake. *Geobiology*, 12(5), 424-450. <http://dx.doi.org/10.1111/gbi.12096>

Lopez-Garcia P., Moreira D., Forterre P. and Douzery E. J. P., 2011. The Origin of eukaryotes. In: Gargaud M., Clayes P., Lopez-Garcia P., Martin H., Montmerle T., Pascal R., and Reisse J. (Eds). *From Suns to Life*. Springer, p 269-279.

Lombard J., López-Garcia P., Moreira D., 2012. **THE EARLY EVOLUTION OF LIPID MEMBRANES AND THE THREE DOMAINS OF LIFE**. *Nature Reviews Microbiology*, 10, 507-515.

Lyons T. W., Reinhard C. T., and Planavsky N. J., 2014. The rise of oxygen in Earth's early ocean and atmosphere. *Nature*, 506, 307–315.

McLoughlin N., 2011. Archean traces of life. In Gargaud M., Amils R., Quintanilla J. C., Cleaves J. H., Irvine W. M., Pinti D. L. and Viso M. (eds). *Encyclopedia of Astrobiology*, p 74-84.

Penny D., Collins L. J., Daly T. K., and Cox S. J., 2014. The Relative Ages of Eukaryotes and Akaryotes. *J Mol Evol*. <http://dx.doi.org/10.1007/s00239-014-9643-y>

Pereto J., Lopez-Garcia P., and Moreira D., Ancestral lipid biosynthesis and early membrane evolution. *Trends Biochem Sci* 2004; 29, 469-77.

Martin H., Alabréde F., Cleays P., Gargaud M., Marty B., Morbidelli A. and Pinti, D. L., 2011. Building a habitable planet. In Gargaud, M., Clayes P., Lopez-Garcia P., Martin H., Montmerle T., Pascal R., and Reisse J. (Eds). *From Suns to Life*. Springer, p 97-151.

Spang A., Saw J. H., Jorgensen S. L., Zremba-Niedzwiedzka K., Martijn J., Lind A. E., van Eijk R., Schleper C., Guy L., and Ettema T. J., 2015. Complex archaea that bridge the gap between prokaryotes and eukaryotes. *Nature*, 521, 173–179.

Storme J. Y., Golubic S., Wilmette A., Kleinteich J., and Javaux E. J. (in press). Raman characterization of the UV-protective pigment gloeocapsin and its role in the survival of cyanobacteria. *Astrobiology*

Sugitani K., Mimura K., Takeuchi M., Lepot K., Ito S., and Javaux E. J., 2015. Early evolution of large micro-organisms with cytological complexity revealed by microanalyses of 3.4 Ga organicwalled microfossils. *Geobiology*. <http://dx.doi.org/10.1111/gbi.12148>

Woese C. R., Kandler O., and Wheelis M. L., 1990. Towards a natural system of organisms: proposal for the domains Archaea, Bacteria, and Eucarya. *PNAS*, 87, 4576-4579.

12

Les organismes vivants extrémophiles

Pierre Nabet

Biochimie médicale
Faculté de médecine
Université de Lorraine

I. Introduction

Dans une publication fondamentale de 1977, Woese et Fox [1] ont proposé que le domaine des procaryotes (cellules dépourvues de noyau) est en fait composé de deux groupes distincts par la similarité de certains de leurs gènes et la dissemblance d'autres, les Bacteria et les Archaea (ces derniers, nommés ainsi car on pensait qu'ils étaient les plus primitifs, ce qui n'a pas été confirmé). Ainsi, en comptant les Eukarya (cellules à noyau), cela fait trois règnes du vivant. Les méthanogènes, micro-organismes procaryotes qui produisent du méthane comme sous-produit métabolique de la vie en conditions anoxiques, ont été parmi les premiers à être classés dans le règne des Archaea. D'autres organismes ont rejoint ce règne dont les halophiles, vivant dans les eaux à forte concentration en sels (340 g/l dont principalement du NaCl) [2] et dont des organismes microbiens proliférant de 60° C et à 82° C dans les sources hydro-thermales, des thermophiles [3]. Cela pouvait donner lieu à penser que les Archaea correspondaient aux extrémophiles et vice versa. Cependant on a découvert depuis des extrémophiles dans les trois règnes du vivant, et il est certain qu'il existe des Archaea non extrémophiles.

Depuis ces découvertes, les recherches concernant la vie sur terre ont montré que les êtres vivants avaient colonisé toutes les niches écologiques de la planète, même les plus improbables selon les critères qu'on avait alors sur la vie.

On classe habituellement les organismes extrémophiles selon le paramètre physico-chimique auquel ces organismes se sont adaptés dans des conditions extrêmes. Mais, bien entendu, on peut aussi les classer selon leur genre ou leurs capacités biologiques.

Classement proposé actuellement :

Milieu à haute température	hyperthermophiles
Milieu à très basse température	psychrophiles
Milieu hypersalin	halophiles
Milieu à pH extrême	a) pH alcalin, alcalophiles b) pH acide, acidophiles
Milieu sous pression élevée	barophiles
Milieu très sec à anhydre	xérophiles
Milieu radioactif	radiotolérants

On s'est également aperçu que des organismes existaient dans des conditions extrêmes alliant plusieurs des caractéristiques citées ci-dessus. En particulier dans les roches situées dans la croûte terrestre, les sous-sols océaniques ou continentaux, les mines de sel profondes ou les aquifères profonds.

On arrive de nos jours à comprendre quelles sont les modifications biochimiques des constituants de ces organismes qui leur permettent de vivre ou de subsister dans ces conditions extrêmes. Les découvertes qui en ont suivi, ont donné lieu à des applications biotechnologiques très importantes, mais ce n'est pas l'objet de cet article d'en détailler leurs caractéristiques.

Il est apparu évident, au fur et à mesure de ces découvertes et au fur et à mesure des découvertes rapportées par les sondes spatiales sur les conditions physico-chimiques trouvées dans les astres, les astéroïdes ou les comètes (Encelade, Mars, Pluton...), que les scientifiques n'ont pu que rapprocher ces différents domaines et émettre l'hypothèse que la vie pourrait aussi exister ailleurs que sur la terre [4].

Voyons donc plus en détails ces données.

2. Les thermophiles et les hyperthermophiles

Ce sont souvent des procaryotes très répandus sur notre planète et le plus souvent proches des zones tectoniques, qu'elles soient terrestres (Islande, les Açores, le Parc naturel de Yellowstone ; la température environnante est inférieure à 100°C et le milieu

est souvent acide) ou qu'elles soient marines (au fond de certains océans où une ligne de fracture de la croûte terrestre existe, ce sont souvent des agents hyperthermophiles et en même temps acidophiles là où existe du soufre qui est oxydé en acide sulfurique). On trouve dans cette dernière catégorie des Archaea comme par exemple l'espèce *Pyrolobus fumarii* trouvé dans la dorsale médio-atlantique, qui vit et croît à 113°C dans des cheminées noires [5]. Ajoutons que, autour de ces cheminées très chaudes au fond des océans, tout un monde d'Eucaryotes s'est créé mais à distance suffisante du jet chaud pour qu'on ne puisse plus qualifier ces espèces de thermophiles. Cependant cette vie complexe originale obtient son énergie de la présence des Archaea et bactéries hyperthermophiles qui se trouvent, elles, dans le jet chaud.

3. Les halophiles

Ce sont des bactéries, des Archaea ou des eucaryotes, capables de croître (et même nécessitant la présence) dans des milieux riches en sel (NaCl) entre 2% et 30% du milieu. On trouve ces organismes dans la mer (3,5% de NaCl), les marais salants, les lacs hyper-salés, la mer Morte. Ces milieux peuvent être très alcalins (pH entre 9 et 12) avec principalement du carbonate de sodium (mais sans calcium ni magnésium qui précipitent dans ces conditions). On peut citer les bassins d'évaporation Solmax ; de la saumure provenant des mines de sel de Lorraine (Varangéville) où des plantes recolonisent le terrain malgré de fortes teneurs en sels complexes [6].

4. Les piézophiles ou barophiles

On trouve des micro-organismes, vivant dans les fosses des océans comme par exemple la fosse des Marianne (moins 10 790 m), où la pression est de l'ordre de 110 mégapascals (1100 atmosphères). À ces profondeurs la température est de l'ordre de 3 à 4°C, il y règne une obscurité absolue et ces organismes sont à la fois piézophiles et psychrophiles [7]. La pression est également élevée au niveau des cheminées des dorsales océaniques et les organismes sont ici piézophiles et thermophiles. Les piézophiles sont incapables de vivre à pression ordinaire.

5. Les acidophiles et les alcalophiles

C'est dans la région du Rio-Tinto en Andalousie, au sud-est de l'Espagne, qu'existe un lieu minier, un écosystème, qui, selon la NASA, ressemblerait à des sites situés dans le sous-sol de Mars [8]. Ces roches contiennent très peu d'oxygène et beaucoup de métaux lourds dont du fer lié à du soufre. On y trouve de nombreux micro-organismes qui croissent à des pH inférieurs à 2. C'est l'oxydation aérobie par les micro-organismes qui fabriquent du soufre élémentaire (S^0) et des ions hydrogènes (H^+) ; ce qui conduit à de l'acide sulfurique d'où les pH très acides. À l'autre extrémité existent des micro-organismes qui vivent dans des milieux à forte concentration en sel, dans des sources

chargées en carbonates et où le pH peut-être supérieur à 9. On y trouve des cyanobactéries filamenteuses et des bactéries pourpres. Mais on trouve aussi des sources d'eau faiblement salée contenant beaucoup de sels de calcium et dont le pH est supérieur à 11. Même à ces pH, des bactéries sont présentes et adaptées au milieu.

6. Bactéries et Archaea psychrophiles (adaptés au froid)

Ce sont des organismes capables de proliférer vers 12°C, de résister à un séjour prolongé à 0°C et, pour certains, à des températures de moins 1,6°C. On les trouve dans des boues froides, riches en sels, au fond des océans, sous les pôles et les banquises. Ces bactéries se retrouvent aussi en microbiologie alimentaire où elles peuvent proliférer et conduire à des intoxications à partir d'aliments conservés à basse température (*Pseudomonas*, *Listeria*). Mais on y trouve aussi des eucaryotes comme le ver des glaciers (*Mesenchytræus solifugus*) qui tolère des températures de moins 6 à moins 7°C sans congeler.

7. Organismes résistants à des radioactivités élevées

Certaines bactéries aérobies, comme *Deinococcus radiodurans* survivent à des irradiations de l'ordre de 3 à 5 millions de Rads (à titre de comparaison on sait que 100 Rads sont mortels pour l'homme). On montre que, chez ces organismes, les gènes essentiels sont répétés plusieurs fois et que, de plus, ils possèdent des moyens enzymatiques très efficaces de réparation du DNA prenant comme modèle les gènes non touchés [9]. En fait cette bactérie est polyextrémophile [10].

À la suite de l'accident de Tchernobyl, on a retrouvé plusieurs espèces de plantes et d'oiseaux qui avaient résisté à la forte radioactivité ambiante. Les quelques études biologiques réalisées montrent que ces espèces possèdent un système efficace enzymatique de lutte contre les radicaux libres et que celui-ci était fortement augmenté [11] [12].

8. Les xérophiles

Organismes ayant besoin de très peu d'eau et /ou pouvant subsister en absence d'eau. L'eau étant nécessaire au métabolisme (voir chapitre 10 Zaccai), la survie de ces organismes en son absence se fait par des mécanismes de protection de la cellule contre la dénaturation, en attendant des temps humides meilleurs.

Ce sont des bactéries, des champignons, des plantes, des insectes, des nématodes (exemple de la crevette *Artemia salina*) pouvant résister, souvent par enkystement, à l'absence d'eau.

9. Exemple particulier des Tardigrades

Il est intéressant de faire mention ici du cas particulier des Tardigrades. Ce sont des eucaryotes complexes, représentant plus de 1000 espèces recensées à ce jour, et occupant des niches écologiques extrêmes. Ces organismes de 0,1 à 1,5 mm de longueur, possédant huit pattes courtes terminées par des griffes puissantes leur permettant de s'accrocher fortement, peuvent perdre 99% de leur eau sans mourir, d'entrer en cryptobiose en n'utilisant que 0,01% de leur activité vitale et de rester ainsi 8 à 10 ans, pour revivre ensuite si les conditions redeviennent favorables. Ce sont des polyextrémophiles pouvant résister au froid, à la chaleur, à la pression, aux radioactivités élevées. Lors du projet TARSE, partie de la mission Vie FOTON M3, certains de ces organismes ont été placés sur orbite basse autour de la terre à 250/290 km pendant 12 jours et ont ainsi été exposés au froid, au vide et aux radiations spatiales. Plus de 50% des individus ont repris vie au retour de la mission sur Terre [11] [12].

10. Conclusion

De ce rapide survol concernant l'adaptation de la vie à des conditions extrêmes, on peut retenir que cette vie (celle connue sur Terre), possède suffisamment de ressources potentielles pour subsister et même proliférer dans un large éventail de milieux extrêmes. Des applications scientifiques et médicales ont été et sont nombreuses mais ce n'est pas l'objet de notre livre et nous n'insisterons pas.

Il est intéressant de constater que cette adaptabilité extrême est, en fait, le résultat de la combinatoire d'un nombre peu élevé de facteurs :

- contrôle de la fluidité des membranes à l'aide de l'utilisation d'acides gras plus ou moins saturés ;
- maintien de la structure spatiale des protéines actives (les enzymes) par d'autres protéines spécialisées : les protéines chaperones ;
- haute concentration de molécules « antigel » dans la cellule comme le tréhalose, disaccharide non réducteur ;
- copies multiples des gènes essentiels à la vie (house-keeping genes) conjointement à un système efficace de réparation de l'ADN.

Références

- [1] Phylogenetic structure of the Prokaryotic domain. The primary kingdom, (1977), Woese C.R. and Fox G.E, PNAS, 74, n°11, 5088-5090.
- [2] Sixty-three years of the Microbiology of Dead-Sea, (1999), Volcani B. E., Internat.Microbio., 2, 195-198, Springer Verlag Iberica.
- [3] Extreme life discovery in Yellowstone Bodes Well for Astrobiologists, Science Daily, 6 May 2005.
- [4] The Yellowstone Thermophiles Conservation project, World Foundation for Environment and Development, 21 April 2004.
- [5] Di-Myo-Inositol phosphate and novel UDP-sugars accumulate in the extreme hyperthermophile *Pyrolobus fumarii*, (2008), Gonçalves L. G.et al., Extremophiles, 12, n°3, 383-389.
- [6] En savoir plus sur la récolte de sel (2014), la mer et les marais, LUXIMER.
- [7] High rates of microbial carbon turnover in sediments in the deepest oceanic trench on Earth, (2013), Glud R. N. et al., Nature Geoscience, 6, 284-288.
- [8] The Rio-Tinto basin, Spain : Mineralogy, sedimentary geobiology and implication for interpretation of Outcrop rocks at Meridani Planum Mars, (2005), Fernandez-Remolar D. C. and al., Earth and Planetary Science Letters, 240, n°1, 149-167.
- [9] Rising from Ashes : DNA repair in *Deinococcus radiodurans*, (2010), Cox M. M., PLOS Genetics, 6, n°1, e 1000815.
- [10] Organismes polyextrêmes : *Deinococcus radiodurans*, « Conan la bactérie », NatureXtreme (Online19-04-2011).
- [11] Absurd creature of the week. The incredible critter that's tough enough to survive in space, March 21-2011, Simon M. retrieved.
- [12] Tardigrades survive exposure to space in low earth orbit, (2008), Jönsson K. I. et al., Current Biology, 18, n°17, R729-R731.

Martine Ben Amar

Laboratoire de Physique Statistique, Ecole Normale Supérieure,
UPMC, Université Paris 6, CNRS, 24 rue Lhomond, 75005 Paris, France

Institut Universitaire de Cancérologie, Faculté de médecine,
UPMC, Université Paris 6, 91 Bd de l'Hôpital, 75013 Paris, France

I. Introduction

Les formes adoptées par le vivant au cours du développement ont toujours fasciné les scientifiques et les artistes depuis l'œuvre pionnière de d'Arcy Thomson [1], mais aussi de Léonard de Vinci [2]. Cependant, la compréhension du lien entre les morphologies observées et les connaissances que nous avons de la biologie, de la biochimie et de la physique liées aux processus de croissance sont beaucoup plus récents. La morphogenèse et l'embryogenèse sont le résultat de processus complexes impliquant la constitution des tissus biologiques, cellulaires ou conjonctifs, les facteurs chimiques (certains étant plus spécifiques comme les morphogènes et les facteurs dits de croissance) et les interactions physiques agissant à différentes échelles, temporelles ou spatiales. Les tissus biologiques sont habituellement classés en deux catégories selon leurs propriétés mécaniques : les tissus durs (par exemple, les os ou les dents) et les tissus mous que sont les muscles, les artères, les tendons, ou les plantes. L'élasticité des tissus mous est complexe et très éloignée de l'élasticité de Hooke. Ceux-ci acceptent de grandes déformations régies par les lois de l'élasticité finie, relativement difficile à analyser. Outre leur comportement non-linéaire, ces tissus sont anisotropes, car ils contiennent des fibres qui se réorganisent lors de fortes tensions ou contraintes. La théorie de l'élasticité finie constitue le cadre approprié pour décrire leurs propriétés, dans la mesure où on peut oublier les transitoires où se manifestent éventuellement leurs propriétés visco-élastiques. Dans cette logique d'appréhension des processus de croissance, beaucoup d'études ont porté sur l'établissement de relations dites constitutives pour ces matériaux non usuels que sont les matériaux biologiques tels que la peau, les vaisseaux, le poumon, le cerveau, le foie, les reins [3]. Ces relations définissent la densité d'énergie élastique en fonction du tenseur des déformations, la loi Hookéenne se limitant à une forme quadratique de ce dernier.

Toutefois la prédiction des contraintes et des déformations sous charges externes appliquées reste une tâche difficile. Le but de ce texte est de montrer un formalisme récent, entièrement basé sur l'élasticité finie, traité à partir d'une approche variationnelle. Les propriétés mécaniques sont modélisées relativement simplement afin de trouver les formes de croissance plus complexes. La description cinématique de la croissance est basée sur la décomposition multiplicative, le tenseur de gradient de déformation défini à partir d'une relation vectorielle entre configuration de départ et configuration d'arrivée étant simplement le produit du tenseur classique d'élasticité par un tenseur dit de croissance contenant les aspects biologiques à grandes échelles. Cependant, même si le principe d'une telle étude reste simple, les difficultés et les complexités (au sens richesse des morphologies observées) surgissent à cause de l'interaction entre les outils mathématiques comme les tenseurs et les géométries des corps, que ce soit à l'instant initial ou au cours du temps.

Cette interaction entre géométrie et forçage, caractéristique de la mécanique des solides, laquelle traite essentiellement d'objets de taille finie, est fascinante, mais limite les prédictions théoriques et probablement la compréhension physique. Dans certains cas de géométries, malheureusement trop simplistes, des solutions explicites (au sens analytique) symétriques peuvent être trouvées, tels des cylindres, des plaques, etc. Dans ce cas, une approche variationnelle de bifurcation « à la Landau » donne une démarche théorique permettant de quantifier les seuils de paramètres à l'origine des changements de forme, principalement le taux de croissance par unité de volume à l'instant t et les formes obtenues une fois la bifurcation réalisée. Des études avancées dans le cadre d'objets initialement sphériques ou cylindriques mais aussi multicouches ont permis de quantifier les résultats de la croissance en biologie comme l'invagination des oursins [4], la morphologie des biofilms [5, 6], la forme de fleurs à pétales unique [7] sans parler des villis de nos intestins [8,9] ou nos empreintes [10]. Par ailleurs même si la question ne sera pas ici abordée, la croissance peut se faire dans de mauvaises conditions entraînant des pathologies comme la torsion anormale des tibias, les réactions inflammatoires, la croissance des tumeurs ou celle des noisetiers tortillards.

2. Morphogenèse

Commençons par les objets initialement minces, plaques ou coques. La croissance de tels objets donne probablement la plus impressionnante collection de morphologies, tant les formes obtenues peuvent se ramifier à l'infini et présenter des structures quasi-fractales comme certaines de nos fleurs [7, 11] ou végétaux. Ils ont l'intérêt de constituer des systèmes minimaux où les concepts de géométrie différentielle et d'élasticité avec croissance peuvent se marier avec succès afin d'expliquer les formes observées dans la nature. Citons la croissance de fleurs, les feuilles des plantes, certaines algues unicellulaires comme l'algue verte [12, 13]. Sous des hypothèses appropriées, la dimensionnalité du problème peut être réduite rendant le traitement mathématique bidimensionnel et l'élasticité vise à prédire le comportement d'une surface à deux dimensions. Pour ce faire, dans notre groupe, nous avons adapté les équations dites de Foppl-Von Karman [13] et montré que, dans des conditions soit anisotropes soit inhomogènes, la croissance impose à la surface mathématique deux courbures : la courbure dite moyenne et la courbure de

Gauss. Connaissant le tenseur de croissance, lequel est fixé par les processus biologiques, il est alors possible de déterminer ces courbures et donc en principe la géométrie de la surface. Toutefois ce problème mathématique, qui consiste à déterminer dans un espace à trois dimensions une surface avec courbures prescrites, n'est pas toujours soluble ; il s'agit d'une condition trop exigeante et parfois la surface mathématique ne peut représenter une surface physique car elle contient des singularités de type trous ou auto-intersections. Ainsi, le système ne peut pas suivre rigoureusement les exigences de la croissance biologique engendrant de fait des contraintes élastiques. La structure physique devient alors déterminée par un problème variationnel dont le but est la minimisation de l'énergie élastique à contraintes imposées. Comme tout écart à la courbure de Gauss est très coûteux en énergie, il devient plus avantageux de suivre la courbure de Gauss, responsable d'un coût élastique proportionnel à l'épaisseur h de l'objet afin d'annuler les contraintes correspondantes, si possible. Les contraintes restantes induites par la courbure moyenne sont moindres, de l'ordre de h^3 . Il est aussi à noter que la courbure moyenne imposée est due à une croissance différentielle au travers de l'épaisseur de l'échantillon, tandis que la courbure de Gauss est due à l'anisotropie ou l'inhomogénéité dans le plan tangent. Deux exemples ont été traité avec succès dans notre groupe : l'algue verte (voir figure I, gauche) et le brin d'herbe (figure I, droite)

L'algue verte (figure I, à gauche) encore appelée *Acetabularia acetabulum* est une algue qui évolue en passant de la forme de chapeau « chinois » pour devenir ondulée. Les biologistes [12] ont associé cette transformation de forme à une transition génétique qui serait responsable d'un changement dans l'anisotropie de croissance au cours du temps. Avec Julien Dervaux [13], j'ai mis en application cette information biologique et nous avons introduit dans notre modèle les effets d'un tenseur de croissance anisotrope dans les équations de Foppl-VonKarman. En géométrie radiale, ce tenseur est diagonal et caractérisé par deux valeurs propres distinctes dans la direction radiale et ortho-radiale. La forme « chapeau chinois » est due à une croissance radiale plus forte que dans la direction ortho-radiale, la forme ondulée est due à la situation inversée. Quant au flambage du brin d'herbe (figure I, à droite) il est provoqué par une nervure centrale rigide qui bloque la croissance au centre entraînant des contraintes élastiques. Un double rang périodique de cellules apparaît, lequel avait été prédit quantitativement dans un autre contexte par B. Audoly et collaborateurs [15].

Considérons maintenant les coques : parmi les objets biologiques minces, la botanique offre de très beaux exemples en raison de l'énorme variété des formes, lesquelles sont associées aux colorations engendrées par la diffusion de pigment. Choisissons les fleurs à un seul pétale. On se limitera aux cas de fleurs présentant un axe de symétrie afin de pouvoir être décrites facilement avec les outils de la géométrie différentielle et on se concentre sur deux cas différents : la surfinia, variété de pétunia, et la brugmansia (figure 2). Ces fleurs ont généralement cinq pétales qui ont fusionné dans le cas des surfinias et se trouvent fermement reliés entre eux par l'intermédiaire de nervures dans le cas des brugmansias. Certaines caractéristiques géométriques de la floraison des fleurs peuvent être expliquées par les contraintes générées par la croissance qui se sont accumulées dans le bourgeon. Ce qui se passe à l'intérieur du bourgeon résulte d'une interaction complexe entre la génétique et la biologie cellulaire dans un espace très confiné. Nous traduisons cette interaction à l'échelle macroscopique par une courbure de Gauss

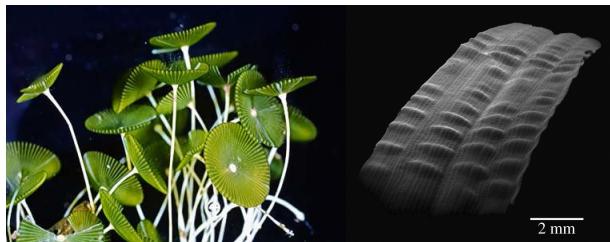


Figure 1. Morphologie de structures quasi-planes, à gauche l'algue verte après son inversion de forme, à droite, le brin d'herbe. Pour ce dernier, il est à noter l'existence d'une nervure centrale avec de part et d'autre un double rang d'instabilités [14]

imposée que pour simplifier nous prenons constante, positive ou négative. Après la floraison, la relaxation des contraintes ainsi que l'absorption d'humidité est à l'origine de la forme finale de la fleur. Pour nous la relaxation consistera à trouver la surface de courbure de Gauss constante qui minimise l'énergie élastique restante engendrée par la courbure moyenne : c'est ce qu'on appelle l'énergie de flexion.

Pour simplifier l'analyse, nous avons considéré le cas d'une courbure de Gauss constante, positive ou négative. Bien que peu de fleurs à un pétales satisfassent à cette propriété mais il existe toutefois de bons candidats comme les deux déjà mentionnés. Nous avons montré que, malgré cette hypothèse simpliste du point de vue biologique, on obtient une réelle compréhension de la complexité et de la richesse de la morphologie des tissus vivants fins et non planaires. En particulier, les fleurs en forme de cloche comme la surfinia ou la brugmansia répondent à ce modèle géométrique. Même si les processus biologiques se produisant à l'échelle microscopique qui conduisent à ces formes sont beaucoup plus compliqués, le simple problème considéré ici à courbure de Gauss constante imposée jette une certaine lumière sur la forme de ces fleurs. En particulier, il est possible de prédire les ondulations survenant à une certaine distance de la tige qui pallient à la singularité mathématique de la pseudo-sphère, surface mathématique idéale de courbure de Gauss négative mais qui devient singulière à distance finie. Cela s'applique parfaitement à la surfinia (courbure de Gauss négative). Pour les surfaces de courbure de Gauss positive, il devient difficile de fabriquer une jolie fleur, c'est pourquoi la forme se construit par morceaux découpés, renversés et reconstitués avec de grosses nervures. Ceci explique aussi pourquoi les nervures sont très rigides pour la brugmansia (courbure de Gauss positive, figure 2 droite), ce qui n'est pas le cas pour la surfinia (figure 2 gauche) et enfin le nombre de pétales sélectionnés qui est cinq dans les deux cas. Pour des détails plus techniques, nous renvoyons le lecteur à [7].

Considérons maintenant le cas des colonies vivantes. Les biofilms sont les colonies que les bactéries réalisent en formant un gel qui adhère aux parois solides. Au-delà du niveau cellulaire, ces structures gélatineuses vivantes présentent des propriétés élastiques assez éloignées des modèles classiques. Elles adhèrent au substrat solide, pouvant maintenir des contraintes résiduelles fortes renforcées par des fibres qu'elles fabriquent tout en se multipliant. En outre, ces colonies vivantes ont la possibilité d'adapter et de modifier

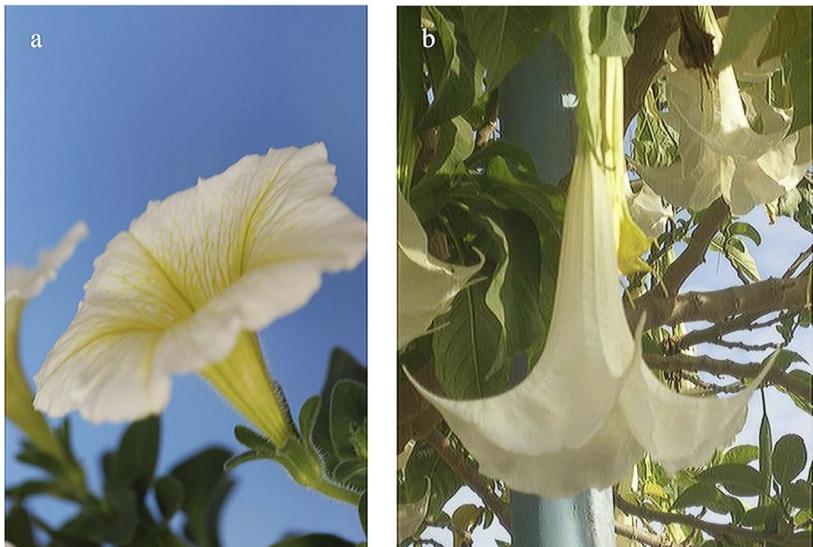
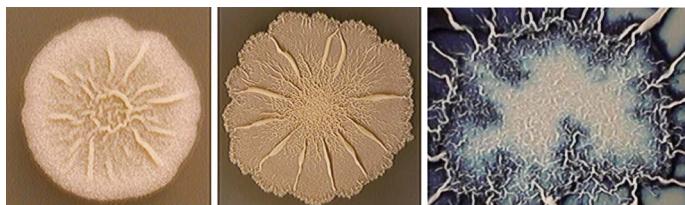


Figure 2. Exemple de fleurs à un pétales dont il est possible de prédire la forme avec succès suivant la minimisation de l'énergie élastique. En a) la surfinia et en b) un exemple de brugmansia. Les détails techniques font appel à la géométrie différentielle et à la minimisation de l'énergie à la fois de l'élasticité du pétales mais aussi des nervures et se trouvent dans la référence [7].

l'expression génétique au cours de leur développement comme toute espèce invasive à l'instar des cellules tumorales. L'interaction entre les contraintes mécaniques et la génétique, appelée mécano-transduction, est un facteur clé pour leur adaptation à tout changement de conditions externes et leur développement. Des expériences récentes portant sur la bactérie *Bacillus subtilis* [5,6], concernant le développement d'une goutte initiale contenant quelques cellules sur un substrat solide a conduit en quelques jours à des structures étonnantes que l'on peut observer sur la figure 3.

Nous avons expliqué cette morphologie par notre modèle de croissance volumétrique avec incompressibilité, en considérant un disque circulaire mince ayant une adhérence moyenne avec un substrat rigide. Cette adhérence est représentée par un assemblage de ressorts qui peuvent se rompre lors des déplacements induits par la croissance. Notre objectif était d'évaluer si un disque mince croissant peut présenter une variété aussi riche de structures que celles observées dans la figure 3 en raison du caractère élastique de la matrice extracellulaire constituée de polysaccharides et de protéines. Pour limiter le nombre de paramètres indépendants, nous nous sommes limités à des modèles simples pour représenter la croissance, l'élasticité, l'adhérence, la résistance à la surface, tous ces facteurs physiques pouvant être étendus à une modélisation plus détaillée. Toutefois la conclusion essentielle de ce travail était que les structures observées s'expliquent parfaitement par une croissance élastique avec décollement ou non du substrat (appelé



*Figure 3. Biofilms de *Bacillus subtilis*. Un disque plat de biofilm (épaisseur 100 µm) se développe sur un substrat d'agar-agar (expérience de Julien Dervaux avec son aimable autorisation). Gauche : Après 24 heures le diamètre est de 1,5 cm environ. Après 96 heures il est de 4,5 cm. Les deux figures présentent une ondulation du bord et une déformation (hors du plan). Un centre désordonné est toujours observé. Sur la droite un marqueur bleu diffuse dans la partie délamинée, indiquant l'existence d'une zone de délamination aussi déstabilisée.*

délamination en terme technique), mais que les instabilités ne peuvent s'expliquer que par une croissance anisotrope plus rapide dans la direction ortho-radiale. La géométrie la plus étonnante reste la focalisation de plis suivant le rayon qui maximise les contraintes anisotropes suivant ces plis tout en les relaxant sur la majorité du disque.

3. Embryogenèse

L'embryogenèse est un des domaines où nos modèles sont les plus adaptés. En effet l'élasticité permet de quantifier des formes alors même que les hypothèses biologiques sont imprécises et contradictoires, particulièrement lorsqu'elle concerne la vie in-utero. Ici nous voulons montrer la richesse de comportement d'une simple couche élastique mince en croissance posée sur un substrat ainsi que le comportement de couches superposées présentant une croissance différentielle. Nous nous focaliserons sur la morphologie des tissus épithéliaux : de la peau aux pre-villis et villis [9]. La croissance d'une couche mince et élastique attachée à un substrat souple ou rigide reste un système très riche et idéal d'étude pour de nombreuses instabilités. Elles se produisent lors du gonflement ou le séchage de gel [16]. Cette géométrie, commune à de nombreux embryons correspond également à l'intérieur des organes constitué d'un épithélium rattaché à un mésenchyme.

Elle intervient souvent dans de nombreuses transformations au cours de l'embryogenèse. La compréhension de cette géométrie simple dans diverses situations permet des traitements de structures plus complexes (voir figure 5) qui se produisent comme les empreintes digitales [10], les villosités (ou villi) [7], les structures apparaissant sur la peau des pachydermes, par exemple les rhinocéros et les hippopotames [18, 19]. Ces instabilités de surface sont fréquemment observées sur des matériaux souples, tels les élastomères, les hydrogels et les tissus mous biologiques, lorsqu'ils sont comprimés ou se trouvent sous divers stimuli internes/externes. Leur importance a grandi avec l'augmentation régulière de création et d'utilisation de nouveaux matériaux.

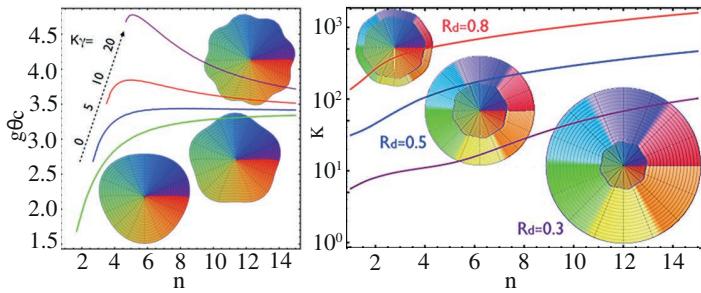


Figure 4. Figures déduites de la modélisation montrant les instabilités de contour en fonction du paramètre d'anisotropie de croissance : $g\theta$. En cas de croissance favorisée dans la direction ortho-radiale, $g\theta > 1$. Sur la gauche, il n'y a pas de délamination, la structure demeure collée au substrat. Sur la droite, le modèle inclut la délamination au centre qui ondule ainsi que le contour. Figures déduites de [6].

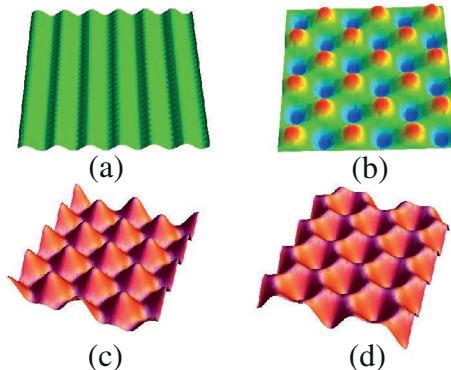


Figure 5. Modes de déstabilisation d'une couche élastique mince attachée sur substrat d'après [17]. On peut obtenir soit des plis rectilignes (a), des carrés (b), des hexagones sortant (c) comme des villis, des hexagones entrants ou cryptes. Ces structures résultent d'un modèle non-linéaire.

Biot, dans une série de papiers célèbres [20, 21] semble être le premier à avoir démontré l'existence de modes d'instabilités à la surface d'un demi-espace élastique néo-Hookeen incompressible. Ses travaux sont à l'origine de la singularité dite de Biot : pour une monocouche, l'élasticité à elle seule ne peut pas prédire la longueur d'onde des rides apparaissant en gonflage par exemple, posant le problème de la sélection de la longueur d'onde. Nous avons résolu ce problème par la compétition avec un « effet de peau » qui donne la valeur de la longueur d'onde proportionnelle à l'épaisseur initiale de la sous couche en croissance divisée par une correction logarithmique d'ordre un, dans des situations concrètes [16]. On peut également résoudre ce problème de singularité par un effet de tension de surface ou capillarité. Il a été démontré [22] que le plissement prédict par Biot reste très sensible aux défauts dans le matériau.

Pour les bicouches, la sélection de longueur d'onde devient encore plus confuse [9], dépendant fortement du rapport des paramètres des deux couches concernées tels que les modules de cisaillement, les épaisseurs et l'existence d'une couche intermédiaire rigide comme cela se produit souvent dans les milieux biologiques [8]. Cependant dans le cas de multiples interactions, comme l'existence de deux couches, il n'est pas nécessaire de faire intervenir la tension de surface pour résoudre le problème de sélection comme nous l'avons montré pour les papilles dermiques [10]. En se restreignant à la géométrie la plus simple, la couche infinie fixée sur un substrat rigide en l'absence de tout défaut, il est possible d'aborder analytiquement le post-flambage qui est riche d'informations physiques, d'autant plus qu'est introduite l'anisotropie de croissance. Le post-flambage est un traitement faiblement non-linéaire. A titre d'exemple, nous avons montré que le seuil d'instabilité linéaire ne dépend que des valeurs propres du tenseur de croissance dans le plan horizontal et ne dépend pas de celle suivant la verticale. Toutefois ce genre d'analyse linéaire ne permet pas de distinguer entre les hexagones, les carrés ou les rayures car elle ne prédit que la longueur d'onde des structures périodiques.

Seul le régime faiblement non linéaire appelé aussi le régime post-flambage peut permettre de prédire les structures observées. Nous avons montré, par un traitement non-linéaire de minimisation de l'énergie élastique que les hexagones rentrant au centre sont favorisés grâce à une bifurcation sous-critique [19] dans le cas de la croissance isotrope ou le gonflement des gels. Trouver des bifurcations sous-critiques en élasticité, c'est à dire avec saut du paramètre de contrôle, n'est pas si fréquent en cela et mérite d'être souligné, d'autant que cela correspond également à des expériences récentes impliquant des gels de polymère [24, 25]. Ces travaux constituent une première approche, pour la compréhension des structures biomécaniques comme la peau des mammifères par exemple. Etant donné que les fibres peuvent se produire dans la pratique, la possibilité pour les tissus d'avoir une anisotropie intrinsèque provoquée par des fibres est également à prendre en considération. Comme toute bifurcation sous critique, elle sera très sensible à toute modification de la loi constitutive du matériau considéré, ce qui explique que toutes les structures prédictes, stries, carrés, hexagones ou cryptes peuvent être observées.

Ces tissus fibreux surgissent également dans des conditions pathologiques comme la cicatrisation ou l'inflammation. Enfin, lorsque la croissance dans le plan, présente une anisotropie, des structures plus complexes peuvent être observées tels que les instabilités en zigzag (pré-villi) qui apparaissent dans les premiers stades de la formation des villosités. Il est peu connu en effet que l'apparition de villi dans le duodénum démarre par des précurseurs sous formes de plis longitudinaux dans le tube croissant dans l'embryon, lesquels se déstabilisent suivant une instabilité zigzag. Puis la pointe des zigzags se déstabilise, sortant du mésenchyme pour finalement donner naissance à des doigts qui ne feront que croître. Cette structure de villis est surtout étudiée sur les embryons de poulets et plus récemment sur ceux des dindes (pour des raisons pratiques et aussi éthiques) mais semblent être communes à de nombreux mammifères. Toutefois, elle semble être inexistante sur la souris. Nous présentons dans la figure 7 un bel échantillon récemment publié que nous a communiqué Diego Bohorquez ainsi qu'un exemple de nos simulations [9].

L'anisotropie de croissance est nécessaire pour expliquer l'instabilité zigzag de cette structure.

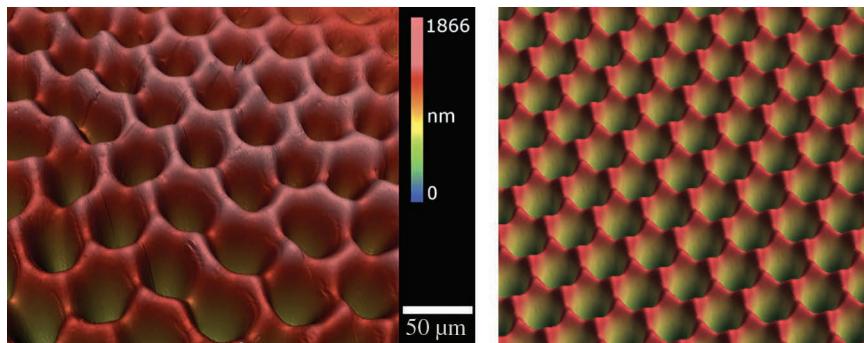


Figure 6. Figures de gonflage d'un gel sur substrat montrant que les hexagones entrants sont sélectionnés expérimentalement [23], modèle théorique de [17] confirmant ce résultat. Dans cette analyse, il n'existe pas de paramètre ajustable et l'accord théorie-expérience est remarquable.

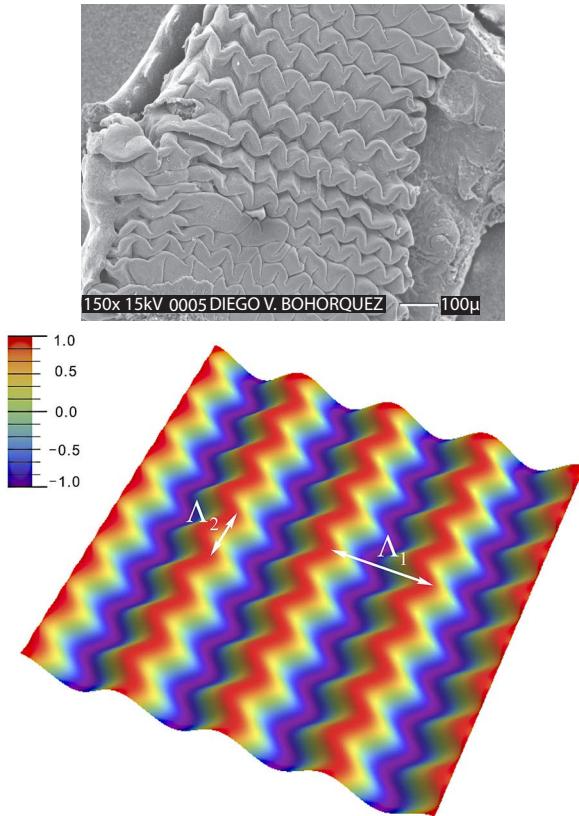


Figure 7. Structure de pré-villi présente dans le duodénum apparaissant à un certain stade de l'embryogénèse. Ici il s'agit d'un fragment de duodénum d'un embryon de dinde (figure donnée par D. Bohorquez) autour d'une dizaine de jours après la fécondation et d'une simulation correspondant à [9].

4. Conclusion

Beaucoup de morphologies existantes souvent complexes et ramifiées peuvent s'expliquer par la croissance volumétrique de tissus mous. Ces tissus possèdent souvent des microstructures qui changent leurs propriétés élastiques macroscopiques : on s'éloigne du simple modèle de l'élasticité de Hooke, voire du modèle néo-Hookeen pour rentrer dans des lois constitutives variées encore débattues actuellement, en particulier quand ces tissus contiennent des fibres. Toutefois beaucoup de ces structures sont en fait provoquées par le couplage élasticité géométrie, ce qui provoque aussi la difficulté du traitement théorique. Toutes nos études ont montré l'importance de l'anisotropie de croissance, c'est à dire le fait que la croissance n'est pas équivalente dans les trois directions de l'espace sans laquelle la plupart des observations rencontrées ne peuvent être expliquées. Le modèle présenté ici où la croissance est une quantité tensorielle traite naturellement cette anisotropie de croissance, caractéristique essentielle des matériaux fibreux.

Remerciements

C'est un immense plaisir de remercier ici tous les étudiants en thèse et post-doctorants qui m'ont permis au cours des dix dernières années de comprendre les particularités des tissus mous et biologiques. Toute cette aventure a commencé avec Alain Goriely, visiteur en 2004-2005 à l'Ecole Normale Supérieure et s'est poursuivie avec Julien Dervaux, Miguel Trejo, Pasquale Ciarletta et Martin Mueller, puis Fei Jia et Min Wu.

Références

- [1] Thompson d'A.W. On Growth and Form. Cambridge: Cambridge University press, 1961.
- [2] Ritcher J. P. The Notebooks of Leonardo Da Vinci. New York: Dover, 1970.
- [3] Fung Y .C. Biomechanics: Mechanical Properties of Living Tissues. Second edition, New York: Springer 1993.
- [4] Ben Amar M. and Goriely A. Growth and Instabilities in elastic tissues, Jmps, 2005, 53(10), p. 2284–2319.
- [5] Dervaux J., Magniez J. and Libchaber A. On growth and form of *Bacillus subtilis* biofilms, à paraître. <http://cmd25jmcl4.sciencesconf.org/38980/document>
- [6] Ben Amar M. and Wu M. Patterns in biofilms: from contour undulations to fold focusing, preprint de l'Ecole Normale Supérieure.
- [7] Ben Amar M., Mueller M. and Trejo M. Petal shapes of sympetalous flowers: the interplay between growth, geometry and elasticity. New Journ. Phys, 2012, 14.

- [8] Bohórquez D. V., Bohórquez N. E. and Ferket, P. R. Ultrastructural development of the small intestinal mucosa in the embryo and turkey poult: A light and electron microscopy study. *Poult Sci*, 2011, 90(4), p. 842–855.
- [9] Ben Amar M. and Jia F. Anisotropic growth shapes intestinal tissues during embryogenesis. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.*, 2013, 110 (26), p. 10525–10530.
- [10] Ciarletta P. and Ben Amar M. Papillary networks in the dermal-epidermal junction of skin: a biomechanical mode, Special Issue: "Recent Advances on the Biomechanics of Growth and Remodeling. *Mech. Res. Com.*, 2011, 42, p. 668-676.
- [11] Liang H. and Mahadevan L. Growth, geometry, and Mechanics of a blooming lily. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.*, 2011, 108, p. 5516–5521
- [12] Serikawa K. A. and Mandoli D. F. An analysis of morphogenesis of the reproductive whorl of *Acetabularia acetabulum*. *Planta*. 1998, 207, p. 96 -104.
- [13] Dervaux J. and Ben Amar M. Morphogenesis of growing soft tissues. *Phys.Rev.Lett.*, 2008,101, p. 068101-068104.
- [14] Dervaux J., Ciarletta P. and Ben Amar M. Morphogenesis of thin hyperelastic plates: a constitutive theory of biological growth in the Foppl-Von Karman limit. *JMPS*, 2009, 57, p. 458-471.
- [15] Audoly B., Roman B. and Pocheau A. Secondary buckling patterns of a thin plate under in plane compression. *Eur. Phys. J. B*, 2002, 27, p. 7–10.
- [16] Ben Amar M. and Ciarletta P. Swelling instability of surface-attached gels as a model of soft tissues growth under geometric constraints. *J. Mech. Phys. Solids*, 2010, 58, 935-954.
- [17] Jia F. and Ben Amar M. Theoretical analysis of growth or swelling wrinkles on constrained soft slab. *Soft Matter*, 2013, 9, p. 8216-8226.
- [18] Luck C. P. and Wright P. G. Aspects of the anatomy and physiology of the skin of the hippopotamus (*H. amphibius*). *Experimental Physiology*, 1964, p. 49, 1-14.
- [19] Shadwick R. E., Russel P. A. P. and Laugh R. F. The structure and mechanical design of rhinoceros dermal armor. *Phil. Trans. Biol. Sci.*, 1992, 337, p. 419-428.
- [20] Biot M. A. Surface instability of rubber in compression. *Appl. Sci. Res.*, 1963, 12, p.168-182.
- [21] Biot M. A. Mechanics of incremental deformation. New York: Wiley, 1965.
- [22] Cao Y. P. and Hutchinson J. W. From wrinkles to creases in elastomers: the instability and imperfection-sensitivity of wrinkling. *Proc. R. Soc. A*, 2012, 468, p. 94-115.

[23] Breid D. and Crosby A. J. Surface wrinkling behavior of finite circular plates. *Soft Matter*, 2009, 5, p. 425–431

[24] Dervaux, J. and Ben Amar, M. Mechanical Instabilities of Gel. *Annu. Rev. Condens. Matter Phys.*, 2012, 3, p. 311-332.

[25] Dervaux J., Couder Y., Guedea-Boudeville M.A. and Ben Amar M. Shape transition in artificial tumors: from smooth buckles to singular creases. *Phys. Rev. Lett.*, 2011, 107, p. 018103-018106. <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevLett.107.018103>

14

A propos de génération moléculaire spontanée

Ernesto Di Mauro

Dipartimento di Biologia e Biotecnologie
"Charles Darwin", Università di Roma "Sapienza", Italie

I. À propos du cadre chimique

La vie consiste en l'interaction intime entre métabolisme et génétique, tous deux organisés autour des éléments les plus répandus dans l'Univers (hydrogène, oxygène, azote, carbone).

L'interaction transmissible de cycles métaboliques et génétiques aboutit aux hyper-cycles d'organisation et de désorganisation de l'information chimique du vivant et du non-vivant. La recherche de l'origine de la vie a longtemps souffert des attitudes divergentes présentées par les aphorismes « génétique d'abord » ou « métabolisme d'abord ». Surmontant l'opposition entre ces approches par un cadre théorique et expérimental unitaire, et prenant en considération les aspects énergétiques, évolutifs, proto-métaboliques et proto-environnementaux nous proposons une voie simple qui amène à un système réactif pré-biotique complet [1, 2]. En particulier, nous avons étudié les réactions synthétiques qui produisent, à partir de composés monocarbonés comme l'acide cyanhydrique (HCN) et sa forme hydratée la formamide (NH_2COH), et en présence de catalyseurs simples, les composés pré-biotiques les plus importants. Nous avons observé, en présence de dizaines de catalyseurs d'origine terrestre et de 12 météorites [3], la formation de toutes les bases nucléiques présentes dans l'ARN et l'ADN, d'acides aminés, d'acides carboxyliques, et d'agents de condensation.

Le détail et l'ensemble de ces synthèses, les formes d'énergie employées (chaleur, radiations UV et à haute intensité), les catalyseurs et les panneaux de composés obtenus sont décrits dans le chapitre 9 de Raffaele Saladino de ce livre. Il faut porter une attention particulière aux synthèses conduites à haute énergie dans les Accélérateurs de Dubna (Russie), capables de fournir *one-pot* une variété extrêmement riche de différents com-

posés d'intérêt biogénique [4], obtenus dans des conditions qui, à cause du type d'énergie employée, peuvent être considérées compatibles avec cet environnement spatial qui embrasse l'Univers entier. Faisons-nous violence et, restant focalisés sur nos éprouvettes, ne suivons pas ici les chimères mentales qui nous arrivent de loin, de la pensée d'Anaxagore sur la Panspermie et de son idéologie universelle qui unifie esprit, matière et vie, reprise par Platon dans l'*Apologie*, ou des intuitions sur l'Infini vivant de Giordano Bruno (dans *De Infinito, universo e mundo*, 1585), la vraie raison de sa condamnation au bûcher le 17 février de l'année du Seigneur 1600.

Dans le même cadre chimique $\text{NH}_2\text{COH}/\text{catalyseurs}$, on observe notamment la formation de nucléosides surtout à partir des bases uracile et cytosine. Dans une perspective biogénique c'est d'un réel intérêt d'abord parce que la formation de nucléosides en conditions pré-biotiques n'avait jamais été décrite et, surtout, parce que la présence de nucléosides dans la soupe primordiale indique la route possible vers l'origine des acides nucléiques. En avançant sur le chemin qui mène vers la complexité, l'activation des précurseurs est nécessaire pour que les processus de polymérisation aient lieu en conditions obéissant aux règles simples et sévères de la thermodynamique. Cette activation se produit facilement, toujours en restant dans le même cadre chimique : les nucléosides, en présence de chaleur, de formamide et d'une source quelconque de phosphate minéral se phosphorylent dans toutes les positions possibles, aboutissant à des mono-phosphates cycliques [5, 6].

Le cadre chimique en question paraît donc solide.

2. À propos de matériaux pré-génétiques

À ce point on doit se poser la question : ces précurseurs activés, auxquels on parvient en parcourant des routes synthétiques assez simples et qui pour se former ne nécessitent pas de conditions extrêmes, ni de matériaux exotiques, ni de temps étendus, sont-ils capables de suivre la voie qui, en descente thermodynamique, les amène vers la polymérisation et donc vers l'accumulation d'information chimique et, de là, vers la sélection darwinienne capable de leur attribuer une fonction ur-biologique ? Pour répondre à cette question nous avons étudié, en partant de la formation pré-biotique des nucléotides cycliques [5, 6], leur polymérisation spontanée en oligonucléotides [7, 8], leur liaison terminale fournissant des polymères plus étendus [9, 10], et finalement la présence, dans ces séquences néo-générées, d'une activité ribozymique qui permet le déplacement terminal de nucléotides entre oligomères générés abiotiquement [11].

Prenons en considération d'abord le côté chimique et physico-chimique du problème de l'auto-génération de polymères nucléiques. Des réflexions motivées sur les solutions envisagées pourront ainsi être considérées dans le cadre plus ample de l'origine de la vie.

On accepte communément que l'ADN est une invention cellulaire car, pour pouvoir le synthétiser, un appareil complexe est nécessaire. En même temps, on accepte

que la molécule originale soit l'ARN. La différence chimique et structurale entre les deux est minime, un hydrogène H dans l'ADN au lieu d'un groupe hydroxylique OH en position 2' du sucre ribose qui compose l'unité monomérique structurale nucléotidique, et la thymine au lieu de l'uracile dans l'ARN. Là aussi les différences chimiques sont marginales. Pourquoi donc cette différence majeure, cette possibilité pour l'ARN d'être la molécule originelle et pour l'ADN de rester, au contraire, reléguée à une fonction disons bibliothécaire, dépositaire ? La raison en est simple et éclairante : la biochemiomimèse. Ce terme, introduit assez récemment par Eschenmoser et Löwenthal [12], indique la propriété des systèmes biologiques d'être basés sur l'existant.

Les processus génétiques et métaboliques n'inventent rien de nouveau, ils exploitent et enrichissent ce qui est disponible en termes de composés, et ce qui est possible en termes de réactivité. La vie complique, intègre, complète, mais au niveau basal ne crée pas. Les inventions biochimiques pour les êtres vivants, là où elles arrivent, sont de caractère essentiellement secondaire.

La polymérisation de l'ARN et de l'ADN se produit par l'attaque de l'oxygène 3' du ribose sur le phosphate α du monomère entrant. Réaction simple qui se répète identique à chaque passage d'addition d'un nucléotide, 4 milliards de fois pour faire le fil de l'ADN d'une seule de mes cellules, un brin copié sur l'autre. La même chose se passe pour l'ARN dans la transcription génétique, en copiant de façon extrêmement délicate, efficace et précise un morceau d'un brin d'ADN, qui est son template-moule. Mais au début, quand les moules n'existaient pas encore ? La figure I décrit la réaction qui mène à la polymérisation sans moule dont le premier passage est basé sur la propriété dite stacking, capacité des bases nucléiques de former des piles, l'une sur l'autre uniquement du fait de leurs structures intrinsèques.

Le long de ces piles a lieu la polymérisation, les liaisons se forment, en simplifiant un peu, comme en tirant sur une fermeture-éclair. Pour tout complément voir [1, 7, 8].

Les mécanismes de polymérisation ont été décrits en particulier pour le 3',5' GMP cyclique [7, 8], pour le 3',5' AMP cyclique [7], et ils ont été observés pour le 3',5' CMP cyclique (en cours d'étude), tandis que pour la forme cyclique de la quatrième base (uracile) l'étude n'a pas encore été faite. Une propriété, à première vue secondaire, de la réaction est qu'elle est favorisée par la présence de séquences complémentaires [10] et que, dans ce cas, sa précision est faible [13]. Des erreurs se produisent. Mais quoique cela soit gênant du point de vue biochimique, tous les biologistes savent bien que l'erreur est la base de l'évolution. Les erreurs créent la matière sur laquelle s'exerce le choix. Mais pour cela il faut attendre que les séquences simples soient devenues longues et complexes, que les oligonucléotides soient devenus des gènes, qu'à côté d'un génotype on puisse trouver un phénotype. Les erreurs de réPLICATION, propriété fondamentale du système, génèrent la complexité.

Les matériaux semblent avoir été bien choisis.

interaction catalyse polymérisation

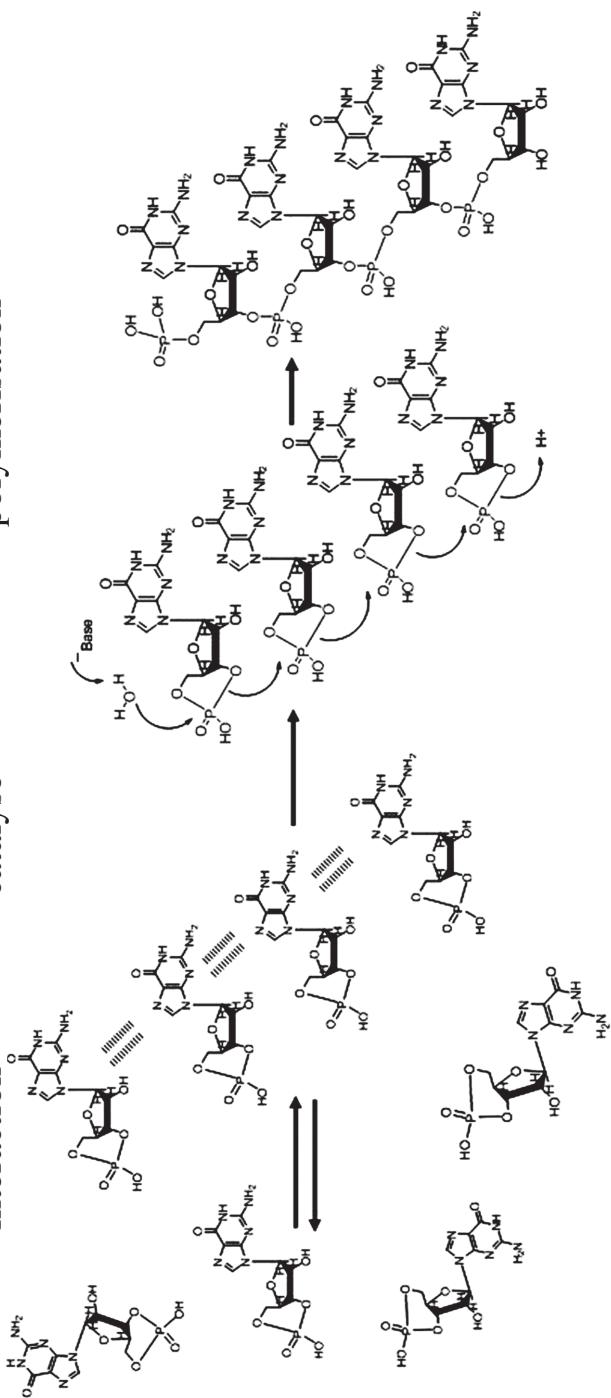


Figure 1. La génération spontanée des premiers acides nucléiques. Partant de nucléotides autogénites et activés de façon naturelle (1), les propriétés structurelles et fonctionnelles qui les caractérisent causent d'abord une structuration ordonnée (2), puis leur réaction de polymérisation (3), jusqu'à produire de façon totalement abiotique les premières molécules de matériel prégénétique. D'après la référence 8.

3. À propos de la complexité

La chimie pré-biotique travaille sur la simplicité, l'évolution sur la complexité. Nos expériences nous ont montré qu'on peut en principe passer des composés à un atome de carbone HCN/NH₂COH jusqu'aux nucléotides cycliques. Et que ceux-ci peuvent polymériser spontanément. Est-ce qu'on a là la possibilité de commencer à entrevoir la route vers la complexité ?

Pour envisager la naissance de la complexité, l'approche doit être elle aussi plus complexe. La capacité combinatoire des processus biologiques est sans limites. L'ensemble des nuances des couleurs d'un pré au printemps est à chaque fois différent, les formes qu'ont pu prendre les dinosaures (celles qui ont existé et celles qui sont restées dans le domaine du possible), les formes infinies tissulaires (chapitre 13 de ce livre, Martine Ben Amar), les combinaisons des bases nucléiques de l'ADN de mon génome, n'ont pas de limites. Les composants de base sont simples. Leur combinaison ne l'est pas. De ceci dérive :

- une interprétation rigoureuse et motivée de la pensée de Jacques Monod, résumée au mieux par le titre de son ouvrage capital : *Le Hasard et la Nécessité*. La nécessité est la structure chimique et la réactivité canalisée des molécules initiales, le hasard vient de leur combinaison potentiellement infinie ;
- une forte simplification dans la recherche des composés revêtus de fonction potentielle dans le cadre de la chimie pré-biotique. Miller a synthétisé un grand nombre d'acides aminés en partant d'un mélange de gaz, en partant de l'air [14]. À côté des acides aminés qu'on retrouve dans les protéines biologiques, dans l'am-poule de Miller on observait un grand nombre de composés dont les organismes ne font pas usage. D'où vient le choix ?
- la possibilité d'envisager les premiers processus pré-biotiques et potentiellement biogéniques par une approche top-down. Ce qui existe aujourd'hui dans mon ADN a été là dès le début. Une fois que le choix est fait, il est très improbable (ou alors il faut trouver les raisons pour expliquer le contraire) que le système puisse changer. Surtout parce que le vivant est compliqué. Et plus la complexification est grande, plus nombreuses sont les ficelles qui tiennent uni le système, plus il devient difficile d'en modifier les règles. De là la question : est ce que les séries de réactions qui produisent les acides nucléiques dans les systèmes vivants aujourd'hui sont les mêmes qu'au début ? Ou, au moins, sont-elles ressemblantes ? Ou peuvent-elles au moins nous indiquer la direction correcte qui a mené à leur évolution ?

La réponse paraît rassurante et positive. Nous avons observé que les oligonucléotides qui se génèrent spontanément [1, 2, 7, 8] sont capables de communiquer, de se passer les nucléotides [11]. La figure 2A décrit schématiquement cette réaction ayant lieu entre une séquence d'oligoG et une séquence complémentaire d'oligoC. La réaction génère des molécules à séquence combinée. La figure 2B montre une image de dynamique moléculaire qui décrit la possibilité d'interaction. Le détail est important : il nous indique que la réaction la plus simple pour un généticien (bouger un nucléotide d'une séquence à l'autre) est en effet le fruit d'une structure extrêmement complexe. Ici le problème de compréhension de l'évolution devient presque un problème esthétique.

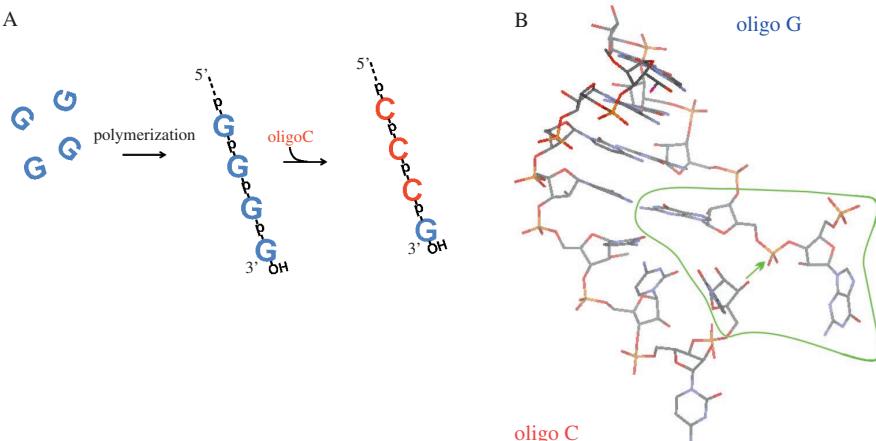


Figure 2A. Les séquences simples sont capables de se passer des informations. Ici, très schématiquement, un oligonucléotide auto-synthétisé (*polyG*) réagit avec un oligonucléotide complémentaire (*polyC*), en mélangeant les séquences. *2B.* Modèle 3D de la réaction de mélange-séquence : géométrie possible capable d'initier la coupure du nucléotide terminal à 5' du brin oligonucléotidique. La direction de l'attaque en ligne est montrée par la flèche verte, les trois nucléotides qui participent directement à la réaction sont encadrés en vert. Reproduit de Ref. 11.

Les oligonucléotides à génération spontanée sont donc capables de produire aussi, spontanément, l'augmentation de l'information chimique du système.

En conclusion : ces résultats entraînent la génération première de systèmes proto-métaboliques et proto-génétiques, indiquant que l'émergence de systèmes chimiques capables de s'auto-reproduire et de transmettre leur information n'exigea pas une complexité excessive, étant plutôt le résultat de l'interaction entre le hasard combinatoire et la nécessité thermodynamique des atomes les plus abondants.

La possibilité de voir se former ensemble, dans le même cadre chimique, les représentants de tous les composés nécessaires tant pour les acides nucléiques que pour le métabolisme, suggère une solution au vieux problème :

« quod negant omnino posse reperiri, avesne ante an ova generata sint, cum et ovum sine ave et ave sine ovo gigni non possit » (Censorinus, De die Natali, IV, 3). (En niant qu'on puisse jamais dire lesquels des oiseaux ou des œufs auraient été engendrés les premiers, vu qu'on ne peut admettre la génération de l'oiseau sans œuf, ni de l'œuf sans oiseau)

L'œuf et la poule sont nés ensemble. Censorinus, instituteur du II^e siècle, le premier à formuler clairement l'énigme, ne possédait pas les instruments pour cette solution. Les mots « systèmes » (au pluriel), « émergence » et « information », ne sont pas ici superflus. Les mots « hasard » et « nécessité » non plus.

4. À propos des définitions

Génétique et métabolisme ensemble, quand ils sont actifs et que leurs cycles tournent et s'en-trelacent, sont la vie. Mais est-ce que de cela on peut tirer une définition ? Qu'est-ce qu'on cherche quand on parle de « vie » sur les autres planètes, ou ailleurs ? Une définition pragmatique est :

« Life is a self-sustained chemical system capable of undergoing Darwinian evolution » [15]. (La vie est un système chimique autoentretenu susceptible d'une évolution darwinienne).

Si on considère que la vie n'est pas du tout « self-sustained » puisqu'elle se nourrit d'énergie qui vient d'ailleurs [elle est hétérotrophe, comme le dit correctement Oparine [17]], qu'elle n'est pas un système mais plutôt un processus, et qu'une définition appuyée sur le changement, sur ce qui n'existe pas encore, est assez boîteuse du point de vue de la logique formelle, on se rend compte qu'il reste à trouver une bonne définition. Est-ce que la vie peut seulement être décrite mais ne peut pas être définie ?

Non, E.T. Trifonov [16] a comparé, à l'aide une profonde analyse structuraliste à la Lévi-Strauss, les 123 définitions de la vie les plus acceptées et il a conclu :

« Life is self-reproduction with variations [16] ».

A bien y regarder, le seul mot en commun entre les deux définitions est *self*: la vie est identité. C'est toujours mieux que la définition d'Emile Cioran :

« La vie est le kitsch de la matière, ...la vie est rupture, hérésie, dérogation aux normes de la matière » [18].

Cela nous ramène à la rassurante formulation de Christian De Duve prononcée en 1990 lors d'une Conférence à Rome :

« La vie appartient à la trame même de l'Univers. Si elle n'était pas une manifestation obligatoire des propriétés combinatoires de la matière, il eut été absolument impossible qu'elle prenne naissance naturellement. »

et aux idées de Jacques Monod.

André Breton dans Les vases communicants, extension de son manifeste du Surréalisme cachée sous une venimeuse polémique contre De Chirico, nous dit :

« N'est-ce pas là faire encore trop bon marché de la parole d'Engels : « La causalité ne peut être comprise qu'en liaison avec la catégorie du hasard objectif, forme de manifestation de la nécessité » ? J'ajouterais que le rapport causal, pour troubler qu'il soit ici, est réel, non seulement du fait qu'il s'appuie sur l'universelle action réciproque, mais encore du fait qu'il est constaté. »

Hasard et nécessité sont là déjà, avant Monod, mis en relation avec la causalité.

À ce point il devient plus qu'important de comprendre la signification des mots causalité, hasard, constaté.

Pour le mot causalité la réponse est facile : la pensée scientifique (voir les mots de De Duve) traduit causalité par thermodynamique.

Pour le mot hasard il suffit de s'adresser à Denis Diderot. Les premiers mots de Jacques Le Fataliste sont :

« Comment s'étaient-ils rencontrés ? Par hasard, comme tout le monde. Comment s'appelaient-ils ? Que vous importe ? D'où venaient-ils ? Du lieu le plus prochain. Où allaient-ils ? Est-ce que l'on sait où l'on va ? Que disaient-ils ? Le maître ne disait rien ; et Jacques disait que son capitaine disait que tout ce qui nous arrive de bien et de mal ici-bas était écrit là-haut ».

Pour le mot constaté la pensée moderne est un peu plus élaborée. Pour cela il faut nous adresser à la phénoménologie de la perception et/ou à ce mouvement (très contesté) de la philosophie italienne qui porte le nom de « Pensée Faible » (Pensiero Debole). Les mots centraux (tout en gardant clairement conscience que toute simplification est violence) sont :

« Il trascendentale, quello che rende possibile ogni esperienza del mondo, è la caducità : l'essere non è ma ac-cade ; forse anche nel senso che cade-presso, che accompagnava in quanto caducità ogni nostra rappresentazione... L'accadere - l'*Er-eignis* nei molteplici sensi che Heidegger assegna al termine - è quello che lascia sussistere i tratti metafisici dell'essere pervertendoli mediante l'esplicitazione della loro costitutiva caducità e mortalità » [19]. Le transcendantal, ce qui rend possible toute expérience du monde, est la caducité : l'être n'est pas mais arrive ; peut-être aussi dans le sens qu'il arrive-à-côté, qu'il accompagne, en tant que caducité, toutes nos représentations...ce qui se-passe, le *Er-eignis* dans les sens multiples que Heidegger attribue au terme, est ce qui laisse subsister les traits métaphysiques de l'être en les pervertissant au moyen de l'explication de leurs caducité et mortalité constitutives.

On est alors renvoyé à la signification d'*Er-eignis* dans Holzwege de Martin Heidegger. A la lettre, Ereignis signifie « 'eigen, propre', coup d'œil, appropriation, événement, éventualité, l'événement qui reste interdit à la vérité comme certitude de la subjectivité. »

Qu'est-ce que nous pouvons tirer de tout cela ? Simplement que nous sommes là parce qu'on nous voit, que nous sommes là parce que la nécessité a vérifié a posteriori le hasard, tout comme dans la physique quantique un électron se fixe, existe, arrive, si on le mesure, si on l'observe, si on le « constate » (dans le mot d'André Breton).

On le sait, un des problèmes centraux de la science d'aujourd'hui est la non-correspondance entre physique euclidienne et physique quantique. Où placer la vie, dans ce nœud de non-correspondance ? Breton nous suggère la solution Surréelle.

Condition d'apparition de la vie :

« ... nil igitur fieri de nilo posse fatendum'st, semine quando opus est rebus, quo quæque creatæ aëris in teneras possint proferrire auras ». Nous devons donc conclure que rien ne peut venir de rien, puisque les choses ont besoin d'une graine, que chaque être créé peut être mis en avant dans les douces brises de l'air (Lucrèce, *De rerum natura*).

Lucrèce met en vers la pensée d'Épicure, soigneusement il nous passe la « summa » de la pensée ancienne. À cette pensée on ne peut pas ne pas adhérer, en la précisant à l'aide des mots de De Duve et de Monod. Et comme la chimie de tout cela est simple, spontanée et identique a priori, on a bon droit de chercher ces semences partout dans l'Univers, là où les conditions permettent qu'elles éclosent.

Remerciements

Je remercie Mme Silvia Lopizzo pour l'aide essentielle apportée dans la préparation du texte.

Références

- [1] Saladino R., Crestini C., Pino, S., Costanzo G., Di Mauro E., Formamide and the origin of life, *Physics Of Life Reviews* (2012) 9, 84-104.
- [2] Saladino R., Botta G., Pino S., Costanzo G. and Di Mauro E., Genetics first or metabolism first ? The formamide clue. *Chemical Society Review* (2012) 41, 5526–5565.
- [3] Saladino R., Botta G., Delfino M. and Di Mauro E., Meteorites as Catalysts for Prebiotic Chemistry. *Chemistry-A European Journal* (2013) 19, 16916-16922.
- [4] Saladino R., Botta G., Delfino M., Di Mauro E., Kapralov M., Timoshenko G., Krasavin E. Rozanov A., Production of Prebiotic Compounds by High-Energy Irradiation of formamide. *JINR News*, (2013) 4, 16-19.
- [5] Costanzo G., Saladino R., Crestini C., Ciciriello F., Di Mauro E., Nucleoside phosphorylation by phosphate minerals. *Journal of Biological Chemistry* (2007) 282, 16729-16735.
- [6] Saladino R., Crestini C., Ciciriello F., Pino S., Costanzo G., Di Mauro E., From formamide to RNA : the roles of formamide and water in the evolution of chemical information. Special Issue on "The Origin of life and Microbiology". *Research In Microbiology*, (2009) 160, 441-448.
- [7] Costanzo G., Pino S., Ciciriello F., Di Mauro E., Generation of long RNA chains in water. *The Journal of Biological Chemistry* (2009) 284, 33206–33216.

- [8] Costanzo G., Saladino R., Botta G., Giorgi A., Scipioni A., Pino S., and Di Mauro E., Generation of RNA molecules by base catalyzed click-like reaction. *Chem BioChem* (2012) 13, 999-1008.
- [9] Pino S., Ciciriello F., Costanzo G., Di Mauro E., Nonenzymatic RNA Ligation in Water. *The Journal of Biological Chemistry* (2008) 283, 36494-36503.
- [10] Pino S., Costanzo G., Giorgi A., Di Mauro E., Sequence Complementarity-Driven Nonenzymatic Ligation of RNA. *Biochemistry*, (2011) 50, 2994-3003.
- [11] Pino S., Costanzo G., Giorgi A., Šponer J., Šponer J. E. and Di Mauro E., Ribozyme Activity of RNA Nonenzymatically Polymerized from 3',5'Cyclic GMP. *Entropy* (2013) 15(12), 5362-5383.
- [12] Eschenmoser A., Loewenthal E., Chemistry of potentially prebiological natural products, in « *Chemical Society Reviews* », (1992), 21, 1-16.
- [13] Pino S., Trifonov E., and Di Mauro E., On the observable transition to living matter. *Genomics. Proteomics and Bioinformatics*, (2011) 9(I-2),7-14.
- [14] Miller S. L., A production of amino acids under possible primitive Earth conditions. *Science*, 1953, 117, 528-529.
- [15] Joyce G. F., (1994) in Deamer D. W., and Fleischaker G. R., (eds.), *The foreword of Origins of Life: The Central Concepts*. Jones and Bartlett, Boston.
- [16] Trifonov E. N., Vocabulary of definitions of life suggests a definition. *Journal of Biomolecular Structure & Dynamics* (2011) 29, 259–266.
- [17] Oparin A. I., in *Vozniknovenie Zhisni na Zemle* (The Origin of Life on Earth), (Moscow, Izdatelstvo Akademii Nauk SSSR), 3rd ed., 1957, [Translated in English (New York Academic Press Inc), 1957].
- [18] Cioran E., *Histoire et utopie*. Paris : Gallimard Folio 1992.
- [19] Vattimo G., *Il pensiero debole*. 1983, Feltrinelli, Milano.

Quatrième partie

Recherche spatiale et
signatures extraterrestres

Quatrième partie

Recherche spatiale et signatures extraterrestres

Présentation

I. Introduction générale

Est-ce que l'on peut vraiment étendre au reste de l'Univers les concepts et les cadres en partie théoriques – vérifiés ici sur Terre ? Thérèse Encrenaz, dans le chapitre 15 « *La recherche de la vie dans l'Univers* » nous donne les coordonnées pour arriver à une réponse objective.

Les points de référence pour ces coordonnées sont les missions sur Mars, les données solides qu'on peut en tirer et l'analyse des informations concernant les exoplanètes, obtenues récemment en quantité tout à fait inattendue. Dans ce domaine, la principale surprise est venue de la nature des exoplanètes géantes, situées dans le voisinage proche de leur étoile, attestant que d'autres systèmes planétaires sont très différents du nôtre. Ce qui est particulièrement important à ce sujet est la vitesse de développement de nouvelles techniques d'analyse telles que la spectroscopie de transit et l'identification de possibles indicateurs de l'existence des processus biotiques qui en découlent. De là à espérer identifier des exoplanètes habitables, le pas est vite franchi.

Sauf que ... sauf que, comme le souligne Giovanna Tinetti, dans le chapitre 16, « *Planétologie Galactique* », les sciences planétaires au-delà des limites de notre Système solaire en sont aujourd'hui à leurs balbutiements. La surprenante conclusion que notre système n'est pas du tout paradigmatic nous oblige à considérer les piliers théoriques de notre quête avec grande précaution. Il n'empêche que les données

concernant les exoplanètes sont recueillies avec une étonnante profusion, qu'elles sont bien décrites en fonction de leur masse et de leur distance à leur étoile, ainsi que de leur rayon, et que les observations concernant les atmosphères exoplanétaires par télédétection sont de plus en plus fiables. Tout en gardant un esprit critique, ici autant que nécessaire, le moment où la planétologie comparée devient une science mûre s'approche.

Dans le dernier chapitre 17, Jean-Pierre Bibring évoque ensuite la découverte de la grande diversité des structures planétaires examinées dans la Voie lactée.

La conviction est que l'univers est mû par une dynamique répondant à des lois que la physique décrit à sa manière ; en revanche, l'évolution des divers éléments de l'Univers est, chaque fois, une histoire particulière. Une immense variété de configurations nous interdit désormais de considérer le modèle solaire autrement que comme une variété parmi d'innombrables autres occurrences, comme le montrent les travaux d'Alessandro Morbidelli (Chapitre 3).

On sait que certaines conditions sont nécessaires pour qu'apparaisse la vie telle que nous la connaissons sur Terre. Nous ne savons pas encore si, dans certaines conditions que l'on pourrait qualifier de suffisantes, une forme d'auto-organisation et d'autoréplication pourrait se manifester, qui aurait dès lors les caractères essentiels de la vie telle que nous la connaissons.

Mais l'extraordinaire abondance de l'univers nous conduit à penser que la vie doit exister ailleurs, ou avoir existé et peut-être avoir laissé des traces de son passé, ou que des circonstances puissent être considérées comme des prémisses de vie, qu'elle soit semblable à la vie terrestre ou qu'elle en diffère. Et nous voilà donc à la recherche de ces indices.

2. Les missions spatiales à la recherche du vivant

2. I Les missions dans le Système solaire

Thérèse Encrenaz, qui s'est consacrée à l'étude du Système solaire, fait, au chapitre 16 l'inventaire de missions terrestres (télescopes au sol) et spatiales qui, depuis plus de trente ans, sont à l'exploration détaillée de tous les objets du Système solaire. L'enjeu majeur est la recherche de traces de vie extraterrestre.

La recherche de vie extraterrestre a débuté lorsque les sondes spatiales et les télescopes ont permis d'analyser les structures chimiques à la surface des objets solides du Système solaire.

Les nombreux satellites des planètes géantes ont donné lieu à une sélection qui a particulièrement visé la planète Titan de Saturne. Les révélations de la sonde Voyager, en 1980, ont donné lieu au projet Cassini, lancé en 1997. Il est en orbite autour de Saturne et a largué, en 2005, le module d'exploration « Huyghens » sur Titan. Ce module a confirmé les importantes quantités de matériaux organiques et particulièrement d'hydrocarbures à la surface de Titan.

Parmi les planètes telluriques, Mars, plus éloignée du Soleil que la Terre, est l'objet d'importantes investigations parce que son passé peut avoir connu les conditions de surface analogues à celles de la Terre. Venus, plus proche et beaucoup plus chaude que la Terre, nous donnera peut-être des informations sur l'état de la Terre primitive.

Les satellites des planètes géantes sont une deuxième voie d'exploration, Titan en particulier.

2.2 A la recherche d'exoplanètes

« Sommes-nous seuls dans l'Univers ? » Cette question posée de tout temps essentiellement par les philosophes, est depuis les années soixante une préoccupation importante au sein du monde scientifique. Non seulement des sondes spatiales ont exploré les planètes du Système solaire, mais encore des planètes extrasolaires (appelées exoplanètes) ont été découvertes (environ 2000 en 2014). Est alors apparue la notion de « zone habitable » pour les planètes et exoplanètes, à savoir celle où l'eau existe à l'état liquide, conformément à l'idée que nous nous faisons de la vie, ici sur Terre. Thérèse Encrenaz décrit l'étude spatiale des planètes et les méthodes permettant de détecter les exoplanètes. Elle insiste sur les projets élaborés pour poursuivre l'exploration des planètes du Système solaire, (essentiellement Mars et Titan) et des exoplanètes.

Une nouvelle révolution se déroule depuis près de dix ans : les astronomes ont appris à détecter des planètes extrasolaires, à mesurer leurs masses, à détecter leurs orbites, à analyser même leurs compositions chimiques.

Depuis 1992, date de la première détection d'une planète hors du Système solaire, les missions spatiales sont à la recherche d'exoplanètes.

Les méthodes de détection sont de deux types : la mesure du déplacement périodique de l'étoile par rapport au centre de gravité « étoile-planète » d'une part et, d'autre part, l'affaiblissement de la luminosité de l'étoile par le passage de la planète devant l'étoile.

Notons que, dans le premier cas, si l'on admet qu'une étoile peut avoir plusieurs planètes, il faut que le centre de gravité des planètes soit décalé suffisamment par rapport à l'étoile, ce qui doit arriver périodiquement puisque les diverses planètes ont des cycles orbitaux différents. Le déplacement du centre de gravité de l'ensemble planétaire a pour conséquence un déplacement du centre de gravité de l'étoile, l'ensemble étoile-planètes évoluant autour du centre de gravité commun. On détecte dès lors le déplacement de l'étoile.

Pour la « détection par transit », c'est-à-dire par diminution de la luminosité de l'étoile du fait du passage de la planète devant l'étoile, il faut que le plan orbital de la planète passe par la terre. On conçoit donc que, dans cette méthode d'observation, beaucoup de planètes doivent nous échapper.

Ajoutons que la détection par transit est aussi une détection spectroscopique qui nous fournit des éléments concernant la composition atmosphérique des planètes.

C'est une prouesse technologique car, pour une planète « géante », la diminution de luminosité de l'étoile est de l'ordre de 1/100 de celle de l'étoile et pour une planète du type « Terre », ce rapport tombe à 1/10.000.

Du fait de ces incomparables performances, la détection par transit est désormais privilégiée.

Ces recherches appellent une puissance de détection qui suscite d'importants développements des instruments. Dans son article, Thérèse Encrenaz nous donne les principales caractéristiques des futurs télescopes terrestres et spatiaux. Des progrès spectaculaires sont donc attendus dans les prochaines décennies.

3. La composition des planètes dans notre Galaxie !

3.1 Déjà, une importante moisson de résultats

La découverte des premières exoplanètes date de 1992. Depuis lors, leur étude a fait l'objet d'un développement révolutionnaire. La liste des références donnée par Giovanna Tinetti en témoigne à suffisance avec pas moins de 115 références ! Les informations actuelles signalent que, statistiquement, chaque étoile du Système solaire héberge au moins une planète. Le Système solaire n'apparaît que comme une des nombreuses configurations possibles. Les tailles et masses planétaires sont essentiellement variables et vont de « super-Jupiters » à des objets nettement plus petits que la Terre, leur distribution ne respectant pas nécessairement celle du Système solaire (avec les petites planètes proches du Soleil et les planètes géantes éloignées). De nombreuses questions se posent : origine, formation et processus physique de leur création ? Mais aussi : composition chimique de leur atmosphère éventuelle ? Présence d'eau ? Sous quelle forme (solide, liquide ou gazeuse) ? Mais encore amélioration de leur détection ? De leur observation ? ...

3.2 Les défis technologiques de la planétologie extraterrestre

Giovanna Tinetti est à l'origine de nombreuses découvertes de planètes extrasolaires et de l'analyse de leurs atmosphères (ou de leurs surfaces).

Elle décrit les moyens et les résultats de ces mesures ; elle fait aussi un bilan prévisionnel des moyens à mettre en œuvre pour obtenir la solution de difficultés observationnelles redoutables : une planète d'une étoile proche du Système solaire se déplace autour de son étoile. Si, un jour, on peut, grâce à des masques efficaces, sélectionner la lumière qui nous vient de cette planète, comment pourrons-nous accumuler suffisamment d'informations sur cette planète pour pouvoir en composer une image fiable, combien d'informations spectroscopiques pour en analyser les molécules présentes dans son atmosphère ou à sa surface ? Si cette planète est du type « terre », que sa durée de rotation autour de son étoile est de l'ordre de l'année, combien d'années faudra-t-il pour accumuler les informations nous donnant une première image ? Comment assurer la stabilité du télescope, sa directivité, et l'accompagnement du mouvement de la planète ? Ce sont des défis technologiques qui appellent de longues recherches et des investissements lourds.

Mais, au bout de cette recherche, quelles sont les signatures d'une trace, d'une forme de vie ?

Les conditions d'habitabilité qui sont retenues sont celles que nous connaissons dans la biosphère terrestre, avec ses végétaux et ses animaux. Ayons tout de même présente à l'esprit l'existence de bactéries vivant dans des conditions très variées et très éloignées des conditions de la vie végétale et animale. Quoi qu'il en soit, la recherche de vie analogue à la vie terrestre conduit à privilégier d'abord la température superficielle permettant la présence d'eau liquide, facteur considéré comme indispensable. La distance à l'étoile, en fonction de l'énergie émise par l'étoile, définit des plages de distance en fonction de la taille et de l'âge de l'étoile. Les étoiles naines, qui sont les plus nombreuses (90 %) sont de bonnes candidates dans cette recherche. Elles présentent l'avantage (on l'a vu au chapitre 2) d'avoir une stabilité énergétique de longue durée. Notons tout de même que la vie n'a sans doute pas besoin de milliards d'années pour apparaître dans un environnement favorable, et qu'une fois établie, sa durabilité ne se compte pas inéluctablement en milliards d'années.

Ces questions, à peine abordées aujourd'hui, ne peuvent qu'exalter l'ardeur des chercheurs.

4. Les objectifs et les premiers résultats de la sonde Rosetta et du robot Philae

Jean-Pierre Bibring nous emmène dans l'exploration des comètes et, plus généralement, dans l'étude de la diversité de l'Univers à partir d'un exemple : le couple Rosetta-Philae (satellite-robot). Il insiste sur la difficulté de la réalisation de ce projet (initiation du projet en 1986, lancement en 2004, arrivée sur la comète Churyumov-Gerasimenko en 2014 !). Il rappelle les espoirs et désespoirs des chercheurs lors de l'atterrissement « délicat » sur la comète, puis sur la richesse des résultats obtenus d'une part par Rosetta et d'autre part par Philae. Ensuite l'auteur nous décrit l'extrême diversité de l'Univers « plus on découvre, plus la diversité augmente ». Enfin il décrit le modèle de Nice et le Grand Tack, admis maintenant, pour la formation du Système solaire, du couple Terre-Lune et de la présence de l'eau terrestre.

Enfin, l'article de Jean-Pierre Bibring, transcrit par Jean-Pierre Treuil, se prolonge par le rapport d'un débat tenu à l'issue d'une conférence qu'il a prononcée à l'AEIS.

Au-delà des questions techniques, deux problèmes majeurs ont été évoqués.

L'origine de l'eau terrestre : le taux de deutérium de l'eau de la comète est, d'après les premières mesures, différent de celui de l'eau terrestre, ce qui infirmerait l'origine cométaire de l'eau terrestre, conformément d'ailleurs aux hypothèses de Thérèse Encrenaz et aux convictions de François Robert (annexe 2). La Terre a eu, tout au long de son histoire, une couverture nuageuse à 50 % favorisant une stabilité climatique. C'est l'inclinaison de son axe sur le plan de l'écliptique qui en est sans doute l'origine. L'histoire commune de la Terre et de la Lune est à l'origine de cette configuration.

Sur ce simple constat viennent se greffer les questions de savoir quelle est la probabilité d'une telle occurrence, quelles sont les probabilités pour que se réalisent ailleurs les circonstances favorables qui se sont accumulées sur la Terre, ou qu'apparaissent, dans d'autres circonstances, différentes mais tout aussi favorables, des enchaînements de phénomènes d'une complexité analogue à celle de la vie terrestre ...

La réponse, d'après Jean-Pierre Bibring, est dans l'immense diversité des configurations astreignantes qui laisse la place pour des probabilités non nulles de voir se réaliser ailleurs ces formes de complexité. Mais comment mesurer de telles probabilités ? Et, pour finir, ne doit-on pas attendre des résultats de nos recherches que nous devons chercher dans d'autres directions ? Et Jean-Pierre Bibring de conclure qu'une bonne recherche peut être une recherche qui montre que la question était mal posée.

Le comité de lecture de l'AEIS

Thérèse Encrenaz

LESIA Observatoire de Paris, CNRS, UPMC, UPD

I. Introduction

Le questionnement sur la pluralité des mondes habités remonte à l'origine de l'Humanité. Les philosophes grecs puis latins l'ont mentionné dans leurs écrits, qu'il s'agisse de Démocrite, Epicure, Aristote ou Sénèque. Avec l'avènement du système de Copernic, plus d'un millénaire plus tard, le débat refait surface, avec Giordano Bruno, Galilée, puis Huygens et plus tard Fontenelle et enfin Flammarion. Mais la discussion reste surtout philosophique. En 1877, l'astronome italien Schiaparelli croit détecter sur la planète Mars la trace de canaux rectilignes, preuve de l'existence sur la planète d'une forme de vie intelligente. Il s'agit en fait d'une illusion d'optique, mais le mythe d'une vie martienne aura la vie dure, jusqu'à l'arrivée des premières sondes spatiales sur Mars dans les années 1960 (voir Chapitre 10, Partie I).

Avec l'exploration spatiale des planètes géantes, l'intérêt grandit autour de Titan, le plus gros satellite de Saturne, dont l'atmosphère, riche en hydrocarbures et en nitriles, pourrait ressembler (en beaucoup plus froid) à celle de la Terre primitive. A l'exception de Io, les satellites galiléens de Jupiter abritent sans doute sous leur surface un océan d'eau salée qui, dans le cas d'Europe, pourrait atteindre en profondeur le noyau silicaté. Voilà d'autres niches potentiellement intéressantes pour l'exobiologie.

Quant aux planètes extrasolaires, les outils nécessaires à leur détection - directe ou indirecte – ne sont apparus qu'à la fin du XX^e siècle et au début du XXI^e siècle. Depuis une quinzaine d'années, la spectroscopie des exoplanètes par transit a fourni les premières informations sur leur composition atmosphérique. L'intérêt des exobiologistes se porte à présent sur la recherche d'exoplanètes habitables, celles qui devraient d'après leur température, garder l'eau sous forme liquide. Nous ne sommes qu'au tout début d'un nouveau domaine de recherche appelé à exploser dans les décennies à venir.

2. La recherche de vie sur Mars

Dès le début de l'exploration spatiale, il y a une cinquantaine d'années, la recherche de la vie sur Mars a été un objectif prioritaire pour les planétologues. La mission Viking, lancée en 1975, a été explicitement conçue à cet effet et, suite aux résultats négatifs concernant la détection de la vie sur Mars, l'exploration spatiale de Mars par la NASA a été interrompue pendant environ deux décennies. Elle a repris à la fin des années 1990 avec une succession d'orbiteurs et de véhicules de surface qui nous ont permis de réaliser des progrès importants sur notre compréhension de l'histoire de l'eau sur Mars, et sur la présence passée d'eau liquide à sa surface. Parmi les résultats les plus intéressants, on peut citer les suivants : (1) avec l'expérience MAG/ER de Mars Global Surveyor, la découverte d'un champ magnétique rémanent fossile dans les anciens plateaux du sud, apportant la preuve d'un effet dynamo et probablement d'une magnétosphère dans le premier milliard d'années de l'histoire de Mars ; (2) la découverte de l'eau sous les calottes polaires de Mars par l'expérience Gamma Ray Spectrometer à bord de la mission Mars Odyssey ; (3) la cartographie des argiles dans les plateaux anciens de l'hémisphère sud et la détection de sulfates dans les régions chaotiques par OMEGA/Mars Express, apportant la preuve que l'eau liquide a coulé en abondance au début de l'histoire de la planète, puis sous forme d'inondations épisodiques plus récentes et localisées. Plus récemment, des mesures radar MARSIS à bord de Mars Express et SHARAD à bord de Mars Reconnaissance Orbiter, nous ont permis de mieux comprendre la quantité de glace d'eau sous les calottes polaires. Une autre découverte importante de MARSIS est la cartographie de la constante diélectrique du sol qui fait apparaître une région de faible émissivité dans l'hémisphère nord, indiquant la présence de sédiments poreux ou une forte concentration d'eau. Les limites de cette région sont en coïncidence remarquable avec la ligne de rivage identifiée par l'altimètre laser de Mars Global Surveyor, ce qui apporte un soutien important à l'hypothèse selon laquelle un océan liquide aurait autrefois recouvert les plaines du nord.

Depuis Août 2012, le véhicule Mars Science Laboratory de la NASA, rebaptisé Curiosity, est en opération dans cratère Gale, à la surface de Mars, avec l'objectif de caractériser la géologie, la minéralogie et les abondances élémentaires du sol (figure 1). Les échantillons sont prélevés à la surface et analysés par le laboratoire du véhicule, avec l'objectif principal de rechercher la matière organique et de tester les conditions d'habitabilité passées et présentes de la planète. Les résultats ont montré que, dans le passé, le site analysé, autour de Gale Crater, pouvait avoir été un milieu habitable. Dans l'avenir, l'exploration spatiale de Mars va se poursuivre selon plusieurs étapes : la mission MAVEN (Mars Atmosphere and Volatile Evolution), lancée par la NASA en novembre 2013, permettra de déterminer l'échappement atmosphérique de la planète ; la mission ExoMars, menée par l'Europe et la Russie, comprendra le Trace Gas Orbiter (TGO), qui sera lancé en 2016, pour caractériser la composition de l'atmosphère martienne, et le rover d'ExoMars, qui sera lancé en 2018, pour une analyse du sol martien à de plus grandes profondeurs sous la surface. En 2020, la NASA prévoit de lancer Mars-2020, un successeur de Curiosity, prévu comme une étape préliminaire en vue d'une future mission de retour d'échantillons martiens.

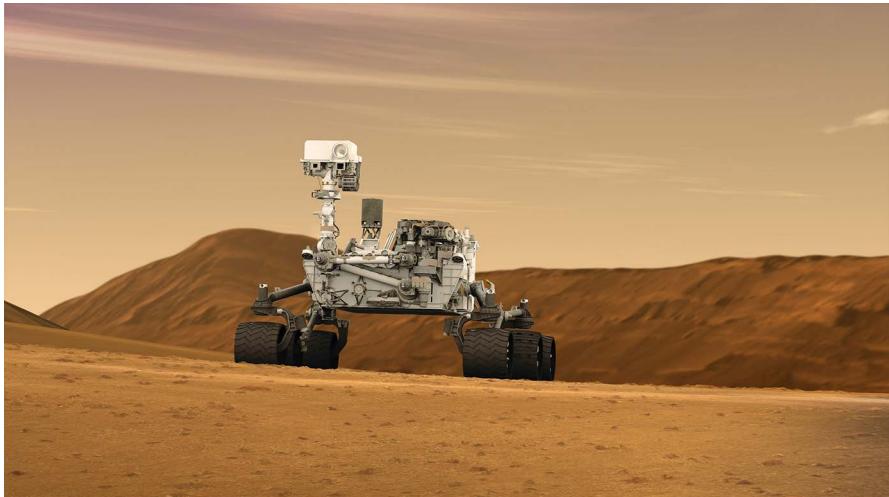


Figure 1. Le robot Curiosity de la NASA, en opération à la surface de Mars depuis Août 2012. Son objectif principal est la recherche de molécules organiques et l'analyse des conditions d'habitabilité (© NASA)

3. La révolution des exoplanètes

La découverte de planètes extrasolaires a constitué pour l'astronomie une véritable révolution. Depuis des millénaires, les philosophes et les scientifiques avaient discuté de leur existence ; depuis 1992, les premières exoplanètes ont été découvertes, d'abord autour d'un pulsar puis, en 1995, autour d'une étoile de type solaire. C'était déjà une découverte historique, mais la principale surprise est venue de la nature des exoplanètes géantes, situées dans le voisinage proche de leur étoile hôte. Sur la base du scénario de formation du Système solaire, où les planètes géantes se forment loin du Soleil (voir chapitre 10, Partie I), cette situation était totalement inattendue. Les astronomes ont découvert que le Système solaire n'est pas unique, mais aussi que d'autres systèmes planétaires sont très différents du nôtre.

En plus de la méthode de chronométrage permettant d'identifier une planète autour d'un pulsar à partir de l'analyse de son signal radio périodique, les premières exoplanètes ont été détectées par vélocimétrie : la méthode consiste à mesurer le mouvement relatif de l'étoile hôte, vu de la Terre, par rapport au centre de gravité du système étoile-planète. Depuis le début des années 2000, une nouvelle méthode s'est avérée également très puissante : la détection d'exoplanètes par transit. La présence de la planète est déduite de la légère diminution du signal stellaire quand celui-ci est occulté par la planète (environ 1 % pour la planète de la taille de Jupiter, et 10^{-4} pour une planète de type terrestre). Les campagnes d'observation à partir de télescopes au sol ont été très fructueuses pour la détection d'exoplanètes géantes par transit. Pour les petites exoplanètes, les plus intéressantes du point de vue de l'exobiologie, l'exploration depuis l'espace est nécessaire, afin d'obtenir la stabilité photométrique requise. Le satellite français CoRoT, en opération entre 2007

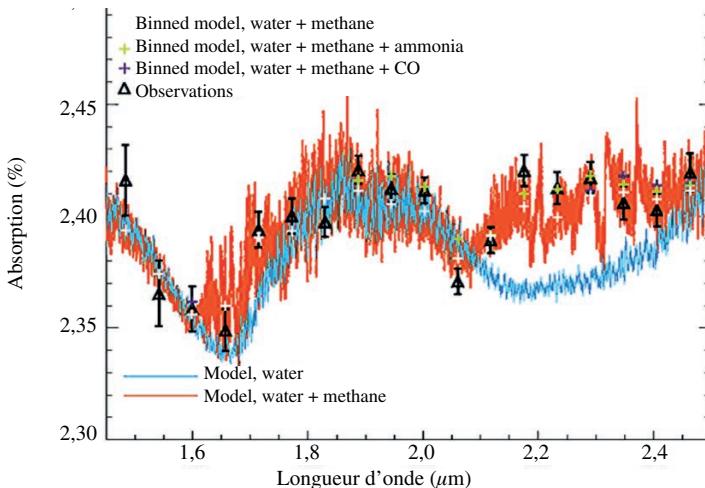


Figure 2. Exemple de spectre d'exoplanète (HD 189733b) par transit primaire. Les observations sont indiquées par des triangles (en noir). Les courbes représentent deux modèles incluant (en bleu) la vapeur d'eau, et (en orange) la vapeur d'eau et le méthane. La comparaison suggère fortement la présence des deux molécules. D'après M. Swain et al. Nature 452, 328, 2008.

et 2012, et surtout le satellite américain Kepler en opération entre 2009 et 2013, ont écrit une nouvelle page de l'histoire de l'exploration des exoplanètes. Nous connaissons aujourd'hui près de 2000 exoplanètes, dont plus de 1200 exoplanètes en transit dans plus de 600 systèmes planétaires ; de plus, Kepler a identifié plusieurs milliers de candidats possibles. Les étoiles hôtes de la plupart d'entre eux sont trop faibles pour une confirmation par vélodimétrie, mais leur identification en tant que candidats est importante pour des études statistiques sur les diverses populations d'exoplanètes.

4. La caractérisation des exoplanètes par spectroscopie de transit

Le développement de la méthode des transits a ouvert un nouveau champ de recherche, actuellement en plein développement : la spectroscopie par transit. Les premières mesures ont été réalisées lors des transits primaires (quand la planète passe devant l'étoile). Dans ce cas, l'atmosphère est observée par transmission devant la lumière stellaire au terminateur (qui correspond au passage jour-nuit). Des observations dans l'UV et dans le visible ont été enregistrées par le HST (Télescope spatial Hubble) (déttection de H I et C II dans l'UV, Na I, diffusion Rayleigh). Des espèces moléculaires ont été détectées dans l'atmosphère neutre, dans le domaine du proche infrarouge (H_2O , CH_4 , CO_2 , figure 2). Les transits secondaires (quand la planète passe derrière l'étoile), nous offrent une détection directe de l'émission de l'exoplanète du côté jour, et est également très utile pour la

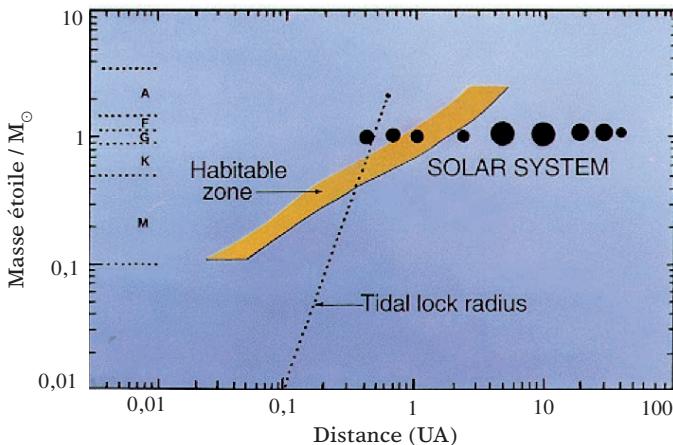


Figure 3. Position de la zone habitable d'une étoile en fonction de sa masse. La ligne en pointillé indique la région en deçà de laquelle la rotation synchrone est attendue. D'après J. F. Kasting et al. Icarus 101, 108, 1993.

caractérisation atmosphérique. Des données spatiales ont été obtenues avec le HST et le satellite infrarouge Spitzer. De nombreux articles ont été publiés, conduisant notamment à l'identification de H_2O , CH_4 , CO et CO_2 . Très probablement, les observations spectroscopiques utilisant transits primaires et secondaires vont se développer dans la décennie à venir, les deux techniques ayant leurs avantages et leurs limites spécifiques.

5. Comment rechercher les exoplanètes habitables ?

Jusqu'à présent, pour des raisons de faisabilité, les observations de spectroscopie de transit ont été limitées à des « Jupiters chauds », ces exoplanètes géantes très proches de leur étoile. Pour les futures observations, les astronomes définissent les moyens, à la fois depuis la Terre et dans l'Espace, qui leur permettront d'explorer des planètes potentiellement habitables. Quelles sont les conditions à remplir par ces planètes ? Une première catégorie d'objets doit être capable d'accueillir de l'eau liquide sur sa surface, c'est à dire d'avoir une température d'équilibre supérieure à 0°C , dans la gamme d'environ $270\text{ K} - 400\text{ K}$ (la limite supérieure dépendant de la pression du milieu). La température d'équilibre peut être calculée à partir de la fraction de l'énergie stellaire absorbée par la planète et convertie en chaleur thermique (ce calcul dépend de l'albédo de la planète, pour laquelle une hypothèse est nécessaire). Pour une étoile donnée, la région où l'eau peut être liquide définit une plage de distances à l'étoile appelée la Zone habitable (HZ, figure 3). Dans le cas du Soleil, la Zone habitable s'étend d'environ 0,7 à 1,5 UA. Pour les étoiles plus brillantes, la région couvre de plus grandes distances ; en revanche, pour les

étoiles naines de type M (qui constituent environ 90 % de la population stellaire), la zone habitable est située à environ 0,05-0,1 UA ; ces étoiles sont donc particulièrement adaptées à des observations de transit.

Quelles sont les signatures spectrales (aussi appelées « bio-marqueurs ») qui pourraient être utilisés pour identifier la présence de la vie sur une exoplanète ? L'oxygène a été proposé d'abord parce que, en l'absence de vie, sa présence en de grandes quantités n'est pas attendue. L'oxygène a une signature spectrale à 0,7 µm. L'ozone a été ensuite suggéré comme un meilleur traceur parce que sa signature à 9,7 µm est très forte, et peut être observée à côté d'autres molécules-clés (CH_4 à 7,7 µm, CO_2 à 15 µm, H_2O à 6,2 µm, NH_3 à 10,5 µm), dans un domaine spectral plus favorable que le visible pour la caractérisation spectroscopique des exoplanètes. Il faut aussi mentionner la signature spectrale de la végétation, marginalement présente sur le spectre de la Terre autour de 0,7 µm, mais qui sera probablement difficile à détecter sur une exoplanète.

6. Les projets à venir

Plusieurs projets sont actuellement en préparation ou en cours de développement pour explorer les atmosphères des exoplanètes potentiellement habitables. En ce qui concerne les observations au sol, avec la nouvelle génération de très grands télescopes (ELT) de 30-40 m de diamètre, tous équipés avec les systèmes les plus performants d'optique adaptative, on peut s'attendre à gagner un facteur d'environ 10 à 16 en sensibilité par rapport aux plus grands télescopes actuels, d'où un gain d'un facteur 100 à 250 sur le temps d'observation, dans l'infrarouge proche et moyen. Le nombre d'exoplanètes observables par spectroscopie de transit sera donc considérablement augmenté. L'E-ELT (European Southern Observatory), d'un diamètre de 39 mètres, doit être construit à Cerro Armazones au Chili. Sa première lumière est prévue pour l'horizon 2022 et une série d'instruments focaux est en cours de définition.

Dans le cas de l'exploration spatiale, plusieurs projets sont à l'étude ou en cours de développement. Sur le côté de l'ESA, la petite mission CHEOPS, en partenariat avec la Suisse, a été approuvée par l'ESA en 2012, pour un lancement prévu en 2017. Son objectif est de mesurer avec précision les masses et rayons d'exoplanètes en transit autour d'étoiles brillantes, et de définir des cibles appropriées pour la spectroscopie de transit. Toujours à l'ESA, PLATO, sélectionné en 2014 dans le cadre des missions M3, est un suivi de CoRoT et Kepler avec un accent particulier sur les étoiles brillantes, afin d'identifier des cibles futures pour la spectroscopie ; le lancement est prévu autour de 2022. Du côté de la NASA, la mission TESS, prévue pour un lancement en 2016, est, comme PLATO, un suivi de Kepler orienté vers la détection de planètes autour d'étoiles proches et brillantes. Un autre projet spatial important pour la caractérisation des exoplanètes est le Télescope spatial James Webb (JWST). Le lancement du successeur du HST, qui comprend un télescope de 6 mètres et plusieurs instruments infrarouges, est prévu pour 2018. L'instrument NIRSpec (0,6-5 µm) et l'instrument MIRI (5-28 µm) seront tous deux bien adaptés à la spectroscopie de transit des exoplanètes.

En résumé, avec le programme d'exploration spatiale de Mars, la future mission JUI-CE vers les satellites glacés extérieurs, et les différents projets consacrés à l'étude des exoplanètes, l'exploration d'environnements habitables planétaires devrait connaître des progrès significatifs dans les décennies à venir. Une nouvelle science, l'exo-planétologie, est en train d'émerger et de se développer sur des bases interdisciplinaires, regroupant astronomes, planétologues, physiciens de sciences de la Terre, chimistes et biologistes.

Références

- Coustenis, A. & Encrenaz, Th., *Life beyond Earth: The Search for Habitable Worlds*. Cambridge University Press, 2013
- Perryman, M., *The Exoplanet Handbook*. Cambridge University Press, 2011
- Tinetti, G., Encrenaz, T., & Coustenis, A., Spectroscopy of planetary atmospheres in our Galaxy. Astron. Astrophys. Rev. 21, id. 63, 2013

16

Planétologie galactique

Giovanna Tinetti

University College London – Department of Physics & Astronomy, Office G05, Gower St, WC1E 6BT London, UK

I. Introduction

Si on devait choisir un seul adjectif pour définir le domaine des exoplanètes, cet adjectif serait « révolutionnaire ». Au cours des dernières années, presque 2000 planètes ont été trouvées autour de tous les types d'étoiles, y compris les étoiles pulsantes et binaires. Étant les restes des processus de formation stellaire, les planètes semblent plutôt être omniprésentes et, en réalité, la présence d'une étoile hôte n'est même pas une circonstance obligatoire. Les estimations statistiques actuelles indiquent que, en moyenne, chaque étoile dans notre galaxie hébergerait au moins un compagnon planétaire [1], c'est à dire que notre Voie lactée est bondée de cent milliards de planètes.

L'aspect le plus révolutionnaire de ce jeune domaine est la découverte que le Système solaire ne semble pas être le paradigme dans notre Galaxie, mais plutôt l'une des nombreuses configurations possibles. Par exemple, il y a des planètes qui orbitent autour de deux étoiles, ainsi que des planètes qui accomplissent un tour de révolution en moins d'un jour ou qui suivent des trajectoires si excentriques qu'elles ressemblent à des comètes. Cette variété de paramètres stellaires et orbitaux se traduit dans les températures planétaires qui s'étendent sur plus de deux ordres de grandeur. De façon inattendue, les tailles et les masses planétaires ne semblent pas être « quantifiées » comme il arrive dans le Système solaire, où les planètes terrestres sont bien séparées de Neptune et Uranus, qui sont, à leur tour, bien distincts de Jupiter et de Saturne. Au lieu de cela, un continu de tailles et de masses semble exister, des « super-Jupiters » aux objets plus petits que la Terre [2, 3].

Bien que la fréquence relative des planètes « singulières » par rapport à celles supposées « normales » (les planètes du Système solaire représentant la normalité) puisse être le résultat d'un biais de sélection provoqué par les techniques de détection utilisées jusqu'à présent – principalement les méthodes de vitesse radiale et de transit – il est

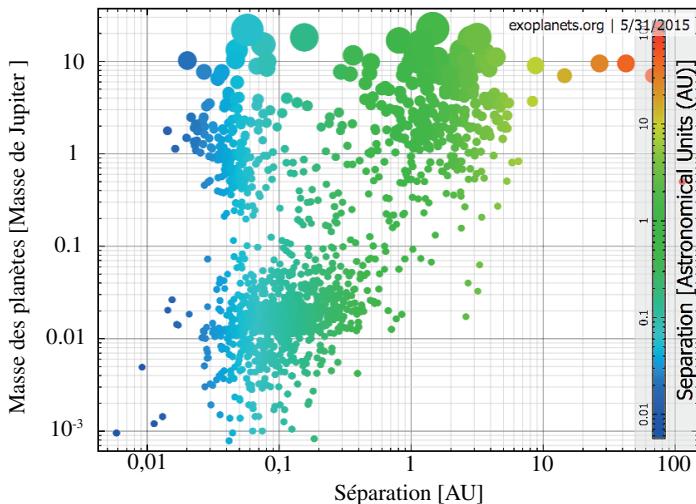


Figure 1. Planètes connues aujourd’hui, tracées en fonction de la masse et de la distance de l’étoile.

indéniable qu'il existe une grande diversité parmi les planètes autour d'autres étoiles. Dans le court terme, nous devrions être en mesure d'en apprendre plus sur la question. La mission GAIA de l'Agence spatiale européenne (ESA) devrait trouver plusieurs milliers de nouvelles planètes avec l'astrométrie [4,5], une technique sensible à des planètes situées en moyenne à quelques unités astronomiques de leur étoile. Les instruments ESO-VLT SPHERE [6], Gemini Planet Imager [7] et Subaru SCExAO [8] ont été construits pour détecter des planètes massives et jeunes situées à grande distance de leurs étoiles, un domaine pas encore exploré jusqu'à présent.

Avec ces chiffres dans le domaine de la science exoplanétaire, l'accent doit passer de la découverte à la compréhension : c'est à dire comprendre la nature des planètes et leur histoire. Les questions suivantes doivent être abordées :

- Quelle est l'origine de la diversité des (exo)planètes observées ?
- Comment et où se forment les planètes ?
- Quels sont les processus physiques responsables de l'évolution des planètes ?

Dans toutes les disciplines, la taxonomie est souvent la première étape vers la compréhension, mais nous n'avons pas encore, à ce jour, une simple taxonomie des planètes et des systèmes planétaires. Pour les planètes qui transitent devant leurs étoiles – dont plus de 1000 sont connues aujourd’hui – les paramètres observables les plus simples sont le rayon planétaire et la masse, lorsque des mesures en vitesse

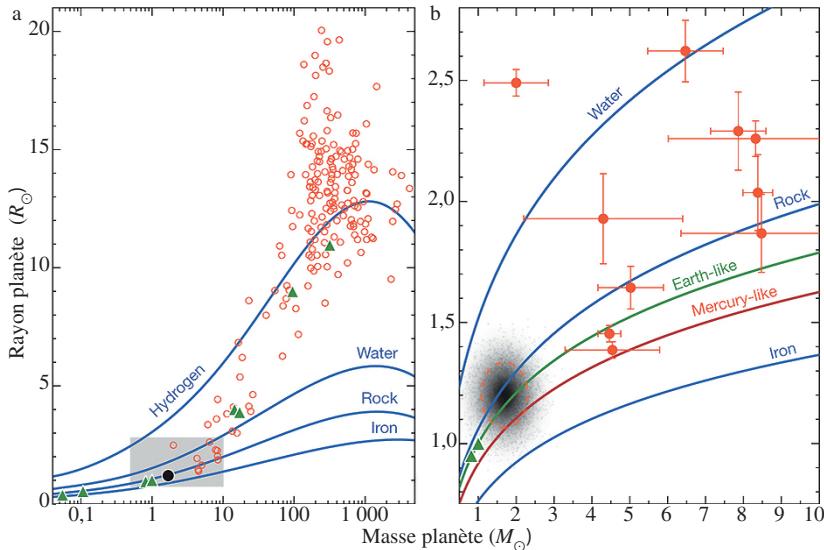


Figure 2. Masses et rayons des planètes en transit actuellement confirmés [9]. Les planètes extrasolaires sont notées par des cercles rouges et les planètes du Système solaire sont représentées par des triangles verts. Les lignes verte et rouge indiquent des compositions semblables à la Terre (67 % roche, 33 % de fer) et de la composition du mercure comme (40 % roche, 60 % de fer).

radiale sont disponibles. La masse et le rayon nous permettent d'estimer la densité moyenne planétaire. Dans la figure 2, il est évident que même les géants de gaz ont un large éventail de structures intérieures et des compositions de base, comme indiqué par les différentes densités observées [10, 11]. Bien que cela ait stimulé un travail théorique très intéressant sur les structures internes et les équations d'état de l'hydrogène à haute pression et température, les implications sur les mécanismes de formation et d'évolution planétaire sont encore mal connues. Très probablement, les différentes densités reflètent les différentes compositions et tailles des noyaux planétaires qui, à leur tour, dépendent à la fois du mécanisme et du lieu de formation de la planète. Les objets plus légers que 10 masses terrestres (super-Terres/mini-Néptunes, figure 2b) sont encore plus énigmatiques, car ils peuvent souvent être expliqués de différentes manières [12-14]. Parmi ceux-ci, Kepler-10 b, Kepler-78 b, CoRoT-7b et 55 Cnc-e ont tous de grandes densités et orbitent autour d'étoiles G comme notre Soleil avec des périodes de moins d'un jour. En revanche, GJ 1214 b et Kepler-11 d, e, f ont des densités beaucoup plus faibles et reçoivent moins de rayonnement stellaire en raison de leur période plus longue ou d'une étoile parente plus froide. Dans les prochaines années, des missions spatiales spécifiques, telles que TESS (NASA) [15], CHEOPS (ESA) [16] et PLATO (ESA) [115], en combinaison avec des observations de vitesse radiale, permettront de mesurer les tailles et les masses de quelques milliers de nouvelles planètes (surtout des planètes de petite-taille) complétant les statistiques actuelles de densités planétaires disponibles dans le voisinage solaire.

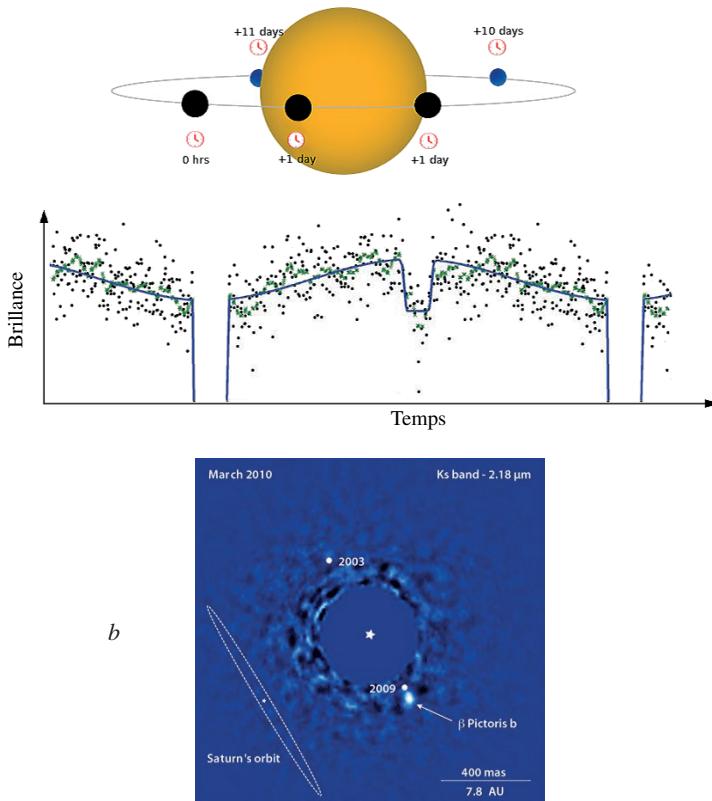


Figure 3. (a) Courbe de phase du Jupiter chaud HAT-P7b en orbite autour de son étoile comme observée par Kepler [17]. Les événements du transit et éclipse se produisent à 10 h et 35 h, respectivement. (b) Image de la planète β-Pic b, située 8-15 unités astronomiques de l'étoile, comme observée avec l'instrument VLT-Naco [18].

Comme expliqué précédemment, la densité planétaire est un paramètre très important, mais ne peut pas être utilisée comme un discriminant de la variété des cas que nous observons. Nous avons besoin d'informations supplémentaires pour continuer. L'autre moyen d'observation clé pour comprendre les planètes est la composition chimique et l'état de leur atmosphère. Connaitre de quoi les atmosphères sont faites est essentiel pour clarifier, par exemple, si une planète est née dans l'orbite actuelle où elle est observée ou si elle a suivi une migration longue ; il est également important de comprendre le rôle du rayonnement stellaire sur les processus d'échappement, l'évolution chimique et la circulation atmosphérique. À ce jour, deux méthodes peuvent être utilisées pour sonder les atmosphères exoplanétaires : la spectroscopie en transit et en éclipse, et la spectroscopie en imagerie directe. Ces sont des méthodes très complémentaires et nous devrions poursuivre les deux pour obtenir une connaissance cohérente des planètes en dehors de notre Système solaire (figure 3).

2. Observations des atmosphères exoplanétaires par télédétection

2.1 Transit

Quand une planète passe devant son étoile (transit), la lumière de l'étoile est réduite de quelques pour cent, ce qui correspond au rapport des surfaces planète/étoile (profondeur de transit). Le rayon R_p planétaire peut être déduit de cette mesure. Si des espèces atomiques ou moléculaires sont présentes dans l'atmosphère de l'exoplanète, le rayon apparent est plus grand aux longueurs d'ondes correspondantes aux signatures spectrales de ces espèces (absorption) [19-21]. La profondeur du transit, κ , en fonction de la longueur d'onde, λ , est donnée par :

$$K(\lambda) = \frac{R_p^2 + 2 \int_0^{z_{max}} (R_p + z)(1 - e^{-\tau(z,\lambda)}) dz}{R_*^2} \quad 2.1$$

où R_* est le rayon stellaire, z l'altitude au-dessus de R_p et τ est la profondeur optique. L'équation (2.1) a une solution unique, à condition de connaître R_p avec précision ; R_p est le rayon planétaire auquel la planète devient opaque pour toutes λ . Pour une planète de type terrestre, R_p coïncide généralement avec le rayon à la surface. En revanche, pour une planète gazeuse, R_p peut correspondre à une pression atmosphérique de 1-10 bars en fonction de la transparence de l'atmosphère.

2.2 Eclipse

Une mesure d'émission thermique/réflexion de la planète peut être obtenue par l'observation de l'éclipse planétaire, en imputant la différence entre le signal combiné étoile plus planète, mesuré juste avant et après l'éclipse, et le flux stellaire seul, mesuré lors de l'éclipse. Ces observations fournissent des mesures du flux émis et/ou réfléchi par la planète en unités du flux stellaire [22, 23]. Le rapport des flux planète/étoile $\phi(\lambda)$ est défini comme :

$$\phi(\lambda) = \frac{R_p^2 F_p(\lambda)}{R_*^2 F_*(\lambda)} \quad 2.2$$

En contraste avec les observations en transit, le côté jour de la planète est observé, ce qui rend les deux techniques vraiment complémentaires.

2.3 Courbes de phase

En plus des observations en transit et en éclipse, on peut suivre le système étoile-planète au cours de la période orbitale. Cette mesure nous permet d'enregistrer l'émission de la planète à différents angles de phase. Les observations des courbes de phase doivent être effectuées depuis l'espace, du fait qu'elles s'étalent généralement sur un intervalle de temps de plus d'une journée [17, 24-26, 116].

2.4 Imagerie directe

Le contraste de luminosité planète/étoile peut typiquement être compris entre 10^4 et 10^{10} en fonction des nombreux paramètres du système – l'âge, la distance, la taille planétaire, la température, etc. – et de la plage des longueurs d'onde observée. Par exemple, Jupiter a un contraste de l'ordre de 10^9 par rapport au Soleil dans le visible et une séparation angulaire de $0.5''$ à 10 pc. L'utilisation d'un système coronographique [27,28] est donc essentielle pour extraire le signal planétaire de la lumière stellaire.

Les aberrations de front d'onde et les tavelures sont un autre problème critique qui doit être atténué. Des miroirs déformables [29] et des techniques de calibration des tavelures, telles que l'imagerie différentielle angulaire [30], peuvent être utilisés efficacement pour résoudre ce problème.

3. Faits marquants et problèmes avec les données spectroscopiques

3.1 Faits saillants

La vapeur d'eau semble être omniprésente dans les atmosphères des Jupiters chauds en transit observés à ce jour et avec des températures comprises entre 800 et 2200 K [31-39]. La présence supplémentaire d'espèces carbonées, comme le méthane, le monoxyde de carbone et le dioxyde de carbone, dans ces atmosphères a été confirmée par des observations et simulations spectrales [26, 35, 40-43, 50], mais leurs abondances relatives ne sont pas encore claires [40, 44-47]. Des observations au sol dans la bande L ont été interprétées comme portant la signature de la fluorescence de méthane dans l'atmosphère d'un de ces Jupiters chauds [50]. Ce serait très important de diagnostiquer dans la structure physique de la haute atmosphère de ces planètes sondées la présence d'un constituant atmosphérique mineur. Des espèces azotées (par exemple HCN, NH₃) sont très probablement présentes [48, 49], mais les observations actuelles ne sont pas suffisamment précises pour indiquer leur présence. Dans les atmosphères des Jupiters très chauds, où les températures approchent 3000 K, des espèces exotiques notamment présentes dans les naines brunes, comme les oxydes métalliques (TiO, VO) ou des hydrures métalliques (CrH, TiH, etc.), ont été proposées pour expliquer les observations effectuées par Hubble STIS et WFC3 [31, 52, 53]. Ces espèces sont importantes, car elles peuvent influencer à la fois l'albédo planétaire et la structure thermique verticale de la planète. Le sodium et le potassium sont présents dans la plupart des Jupiters chauds analysés [54-57]. En dehors de ces métaux alcalins, les spectres dans le visible apparaît dominé par la diffusion de Rayleigh ou des condensats/poussières [58, 59].

On s'attend à ce que les Neptunes chaudes soient riches en méthane [48, 60, 61], mais pour l'instant leur composition chimique n'est pas du tout claire. Des observations spectroscopiques de meilleure qualité et sur une plage de longueur d'ondes plus étalée

seront nécessaires pour avoir une compréhension complète d'objets comme GJ 436b et GJ 3740b [63, 64]. La super-Terre tiède GJ 1214b est la première super-Terre qui a été sondée par spectroscopie [65]. Des observations du VLT ont été suivies par d'autres observations spatiales et terrestres [66] qui suggèrent l'existence d'une atmosphère plus lourde que l'hydrogène moléculaire ou une couverture nuageuse, mais des observations supplémentaires sont nécessaires pour confirmer sa composition [67].

La stabilité des atmosphères des planètes en transit a été sondée par des observations UV avec Hubble [68-70] : les processus d'échappement hydrodynamique sont susceptibles de se produire pour la plupart des planètes en orbites trop proches de leur étoile parente [71-75]. Aussi, des courbes de phase orbitales dans le IR [24, 25, 76, 77] et des mesures de « cartographie en éclipse » [78] ont fourni de premiers éléments décisifs sur les propriétés thermiques et dynamiques des atmosphères des Jupiters chauds.

En parallèle avec les études des planètes transitantes, de nouveaux instruments au sol pour l'imagerie directe sont attendus dans la prochaine décennie pour permettre des observations de jeunes planètes chaudes situées à grande distance de leur étoile mère, c'est à dire planètes gazeuses jeunes formées dans les régions extérieures de leur disque planétaire, et n'ayant pas (encore ?) migrées vers l'étoile.

Des mesures en photométrie multi-bandes et en spectroscopie ont été obtenues dans le proche infrarouge (1-5 mm) pour quelques jeunes planètes gazeuses, comme β Pic-b [79, 80], GJ 504 b [81] et les planètes présentes autour de RH 8799 [82]. Ces observations seront perfectionnées et étendues à des dizaines d'objets avec des instruments spécifiques, tels que SPHERE et GPI. La comparaison entre la composition chimique de ces jeunes objets gazeux et la composition des planètes migrées sondées par transit, va nous permettre de comprendre le rôle joué par la migration et par l'irradiation extrême.

3.2 Questions ouvertes et solutions possibles

Bien que le domaine de la spectroscopie exoplanétaire ait été très fructueux au cours des dernières années, pour progresser dans ce domaine il y a quelques obstacles sérieux qui doivent être surmontés, en particulier les suivants :

1. *C'est souvent difficile de séparer le signal planétaire des effets systématiques des instruments*

Dans le passé, des modèles paramétriques ont été largement utilisés par la plupart des équipes pour simuler les effets systématiques de l'instrument. Cette approche a donné lieu à beaucoup de débats concernant l'utilisation des différents choix paramétriques pour supprimer les erreurs systématiques. Même si la paramétrisation est suffisante, il est souvent difficile de déterminer quelle est la combinaison de ces paramètres qui peut le mieux saisir les effets systématiques de l'instrument. Des algorithmes d'apprentissage de la machine sans surveillance n'ont pas besoin d'être formé avant l'utilisation et ils ne nécessitent pas d'information auxiliaire préalable pour décrire l'étoile, l'instrument ou la planète. L'approche de l'apprentissage machine consiste à apprendre les caractéristiques

d'un instrument à partir des observations, ce qui permet de séparer les effets systématiques du signal astrophysique. Cette approche garantit un degré élevé d'objectivité par rapport aux méthodes traditionnelles. Chez Waldmann [83, 84], Waldmann et al. [51] et Morello et al. [85, 86], l'analyse en composantes indépendantes (ACI) [87] a été adoptée comme un moyen efficace pour décorréler le signal de l'exoplanète de l'effet systématique instrumental dans le cas de Hubble NICMOS, Spitzer IRS et IRAC.

2. L'activité stellaire est la source majeure de bruit astrophysique.

Le bruit stellaire est une source importante d'instabilité spectrale et temporelle de mesures temporelles exoplanétaires [88]. Cela est particulièrement vrai pour les étoiles tardives, ainsi que pour les nombreuses étoiles qui n'appartiennent pas à la séquence principale. Les mécanismes de correction de la variabilité stellaire doivent être une partie intégrante de l'analyse des données. Le problème de l'élimination de l'activité stellaire est un domaine de recherche très actif [89]. Dans Waldmann [51], les méthodes présentées au point 1 pour décorréliser le bruit systématique ont été utilisées avec succès pour éliminer/réduire les effets de l'activité stellaire dans les courbes de lumière photométriques observées par Kepler.

3. Les données disponibles aujourd'hui sont incomplètes.

Il n'y a pas suffisamment de couverture de longueur d'onde et la plupart du temps les observations n'ont pas été enregistrées simultanément (figure 4).

4. Un calibrage absolu au niveau de 10^{-4} n'est pas garanti par les instruments actuels

Il faut être très prudents quand on combine plusieurs ensembles de données qui n'ont pas été enregistrés simultanément.

5. L'interprétation des spectres en transmission ou en émission, telles que mesurés par transit, éclipse et par imagerie directe, n'est pas toujours unique.

En spectroscopie de transit, l'imprécision dans l'extraction des abondances moléculaires peut dériver de l'imprécision en R_p (équation (2.1)). Concernant la spectroscopie en émission dans l'infrarouge, les abondances moléculaires sont biaisées par le profil thermique vertical atmosphérique ; voir par exemple Tinetti et al. [90] pour une discussion plus détaillée. Pour déparer les informations relatives aux abondances moléculaires et au rayon planétaire ainsi que celles relatives aux abondances moléculaires et au gradient thermique vertical, une couverture de longueur d'onde large est nécessaire conjointement à un signal sur bruit (SNR) adéquat et une bonne résolution spectrale (voir point 7). Les observations en imagerie directe souffrent également du manque de connaissance du rayon planétaire, et souvent aussi de la masse. Lorsque la masse et le rayon ne sont pas connus, l'incertitude sur les solutions possibles devient plus importante.

6. Listes de données moléculaires précises pour les modèles de transfert radiatif.

Il est très important d'avoir des listes de données moléculaires précises pour les modèles de transfert radiatif, et ce fait n'est pas toujours pris en compte. En conséquence, les abon-

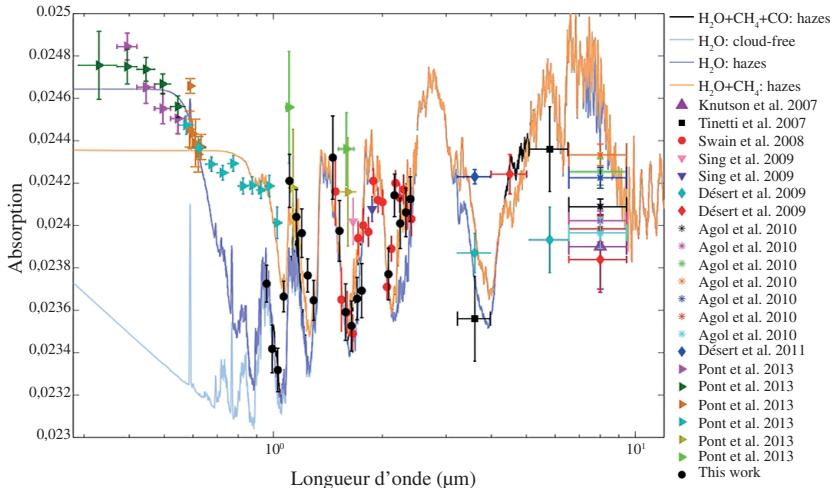


Figure 4. Spectres en transmission de la planète HD 189733b y compris toutes les mesures de haute précision disponibles dans la littérature (Hubble/STIS - ACS- WFC3 - NICMOS, Spitzer/IRAC de l'espace, IRTF/SpeX du sol) [116]. Les données observées simultanément sont tracées avec la même couleur. Nous soulignons que la combinaison des données observées dans des époques différentes est une opération risquée : les effets systématiques de l'instrument et l'activité stellaire peuvent empêcher une mesure précise de la profondeur de transit. Ligne noire : spectre simulé d'une atmosphère qui contient de l'hydrogène moléculaire, de la vapeur d'eau, du méthane, du dioxyde de carbone, et des poussières/nuages. Ligne orange : spectre simulé d'une atmosphère qui contient de l'hydrogène moléculaire, de la vapeur d'eau, du méthane, et des poussières/nuages. Ligne violette : spectre simulé d'une atmosphère qui contient de l'hydrogène moléculaire, de la vapeur d'eau et des poussières/nuages. Ligne bleu clair : spectre simulé d'une atmosphère qui contient de l'hydrogène moléculaire et de la vapeur d'eau.

dances des espèces moléculaires sont souvent dérivées de listes de données incomplètes ou extrapolées à partir de mesures ou de calculs à basse température. Cette question, surtout conjointement avec le point 3, peut introduire des erreurs importantes. Par exemple, toutes les revendications actuelles concernant les planètes riches ou pauvres en carbone [91] publiées dans la littérature ne sont pas fondées, pour cette raison. Ce problème est bien connu des spectroscopistes, et des listes de données moléculaires à des températures élevées sont en train d'être calculées *ab initio* ou mesurées en laboratoire [92].

7. Nous sommes confrontés à des observations à très bas SNR.

Bien que l'adoption de nouvelles méthodes et de modèles d'analyse de données puissent répondre à certaines des questions énumérées ci-dessus, le manque de données est quelque chose que nous ne pouvons pas résoudre à court terme. Le lecteur peut se référer à Tinetti et al. [90] et Tessenyi et al. [93] pour une discussion plus approfondie de ces paramètres.

8. Enfin, une population d'objets est nécessaire pour tirer des conclusions.

Dans la prochaine décennie on pourra observer quelques dizaines d'objets en spectroscopie, mais pour comprendre la nature des planètes et leur histoire on aura besoin d'observer plutôt des centaines d'objets, et pour cela on aura besoin de missions spécifiques dans l'espace.

4. La prochaine décennie et au-delà

Dans le paragraphe 3.2, j'ai identifié les obstacles qui ne peuvent pas être résolus à court terme (en particulier, les points 3, 4 et 7) : une nouvelle génération d'observatoires est nécessaire pour répondre à ces questions scientifiques. Dans la prochaine décennie, de nouveaux grands observatoires de l'espace et du sol seront en ligne, notamment JWST et E-ELT. Parmi d'autres objectifs scientifiques, ils contribueront de manière significative aux observations spectroscopiques des exoplanètes en transit ou en imagerie directe [94-96]. Des instruments et des missions dédiées à cette recherche sont à l'étude.

L'idée d'un observatoire dans le demain de l'infrarouge dans l'espace dédié aux études des atmosphères exoplanétaires n'est pas nouvelle : dans les années 1980 Bracewell [97] et Angel et al. [98] ont proposé que des exoplanètes autour d'étoiles proches puissent être détectées dans l'IR (6-17 μm) et leurs spectres analysés en vue de la recherche de signatures spectrales de CO₂, H₂O, O₃, CH₄ et NH₃. La proposition de mettre en œuvre cette idée sous la forme d'un interféromètre IR dans l'espace est arrivée près de dix ans plus tard [99]. Le concept, nommé DARWIN, a d'abord été proposé à l'ESA en 1993, alors que seulement 3 planètes gravitant autour d'une étoile à neutrons étaient connues. Ses objectifs principaux étaient de détecter des planètes comme la Terre autour d'étoiles proches, pour analyser la composition de leurs atmosphères et évaluer leur capacité à abriter la vie comme nous la connaissons. Des concepts de missions similaires ont été proposés à la NASA aux Etats-Unis (Terrestrial Planet Finder-Interferometer[100]). La recherche d'un jumeau de la Terre autour d'un jumeau du Soleil comme seul berceau de la vie était un projet trop géocentrique pour pouvoir survivre à la « révolution exoplanétaire » et aucune de ces missions très difficiles et couteuses n'a été mise en œuvre. Vingt ans de découvertes d'exoplanètes nous ont appris que les voies d'accès aux planètes habitables sont multiples, mais les plus intéressantes sont celles qui nous aident à éclaircir les processus physiques et chimiques qui sont absents dans notre Système solaire [101, 102].

Au cours des dernières années, des concepts de mission pour la spectroscopie IR en transit de l'espace ont été proposés et étudiés par l'ESA et la NASA, en particulier THESE [103], Finesse [104], EChO [105] et ARIEL. La spectroscopie en transit et en éclipse nous permet de mesurer des signaux atmosphériques de la planète au niveau de 10⁴ par rapport à l'étoile. Aucune résolution angulaire n'est nécessaire : les signaux de l'étoile et de la planète sont différenciés en utilisant les connaissances des éphémérides planétaires. Cela ne peut être réalisé qu'avec une plateforme stable dans l'espace. Parmi ces concepts de mission, on a une meilleure connaissance des performances d'EChO, l'*Exoplanet Characterisation Observatory*, car cela a été étudié par

l'ESA comme mission candidate M3 [106]. L'objectif d'EChO est de fournir des observations à faible-moyenne résolution ($R = 30\text{-}300$), en simultané avec des observations multi-longueur d'onde spectroscopique, de 0,55 à 11(16) μm , de quelques centaines de planètes, y compris des planètes chaudes et tempérées, des planètes gazeuses et des super-Terres orbitant autour de différents types stellaires. Ces mesures vont permettre la récupération de la composition moléculaire et la structure thermique des atmosphères observées. La conception de l'ensemble de la chaîne de détection et du satellite a été optimisée pour atteindre un degré élevé de stabilité photométrique (soit environ 100 ppm en 10 h) et de répétabilité. Le télescope considéré à une surface collectrice de 1,13 m², était limité en diffraction à 3 μm et positionné au niveau de L2. Ce point de Lagrange fournit un environnement thermique froid et stable, ainsi qu'un grand champ de vision pour permettre d'observer efficacement les cibles réparties dans le ciel.

La mission candidate ESA-M4 ARIEL (*Atmospheric Remote-sensing Infrared Exoplanet Large-survey*) a, comme EChO, l'objectif d'étudier en spectroscopie de transit un grand nombre (~500-1000) d'exoplanètes déjà découvertes. ARIEL, par contre, se focalisera sur des planètes chaudes et tièdes sur une plage de longueur d'onde de 0,55 à 8 μm . Les figures 5 et 6 montrent un modèle du vaisseau spatial d'ARIEL, les signatures spectrales des molécules clés présentes dans une atmosphère planétaire et des simulations des spectres d'exoplanètes comme observées par ARIEL.

Si une mission de petite/moyenne taille optimisée pour la spectroscopie en transit doit être lancée dans la prochaine décennie, serait-il logique d'envisager une grande mission de spectroscopie en transit plus tard ? Cela n'est pas certain. Pour illustrer la situation, il est utile d'examiner d'abord quelques notions de base. Le nombre d'électrons par élément spectral sur le détecteur à partir de l'étoile (N_*) et planétaire (N_p) sont :

$$N_* = \frac{\Delta F_* A_{eff} \eta Q}{n} t \quad \text{et} \quad N_p = \phi N_* = \phi \frac{\Delta F_* A_{eff} \eta Q}{n} t \quad 4.1$$

où ϕ est le contraste planète/étoile défini en (2.2), ΔF_* est le flux stellaire dans la bande spectrale observée (photons s⁻¹ m⁻²), A_{eff} est la surface efficace (m²), η est l'efficacité instrumentale (sans dimension), Q est l'efficacité quantique des détecteurs (e-/photon) et t est le temps d'intégration (s). Si nous faisons l'hypothèse que les observations sont dominées par le bruit des photons stellaires, le SNR par élément spectral est :

$$\text{SNR} = \frac{N_p}{\sqrt{N_*}} = \phi \sqrt{\frac{\Delta F_* A_{eff} Qt}{n}} \quad 4.2$$

Le SNR augmente linéairement avec le diamètre (D) du télescope. Le coût d'un télescope augmente, selon les modèles des coûts les plus optimistes, comme D à la puissance 1,2. Or, certains modèles indiquent un exposant de 2 [107]. Par conséquent, une augmentation du diamètre du télescope d'un facteur de 2 cause une augmentation des coûts d'un facteur de 2 à 4, tout en doublant le SNR, qui aurait un impact faible, voire négligeable sur l'avancement de la recherche.

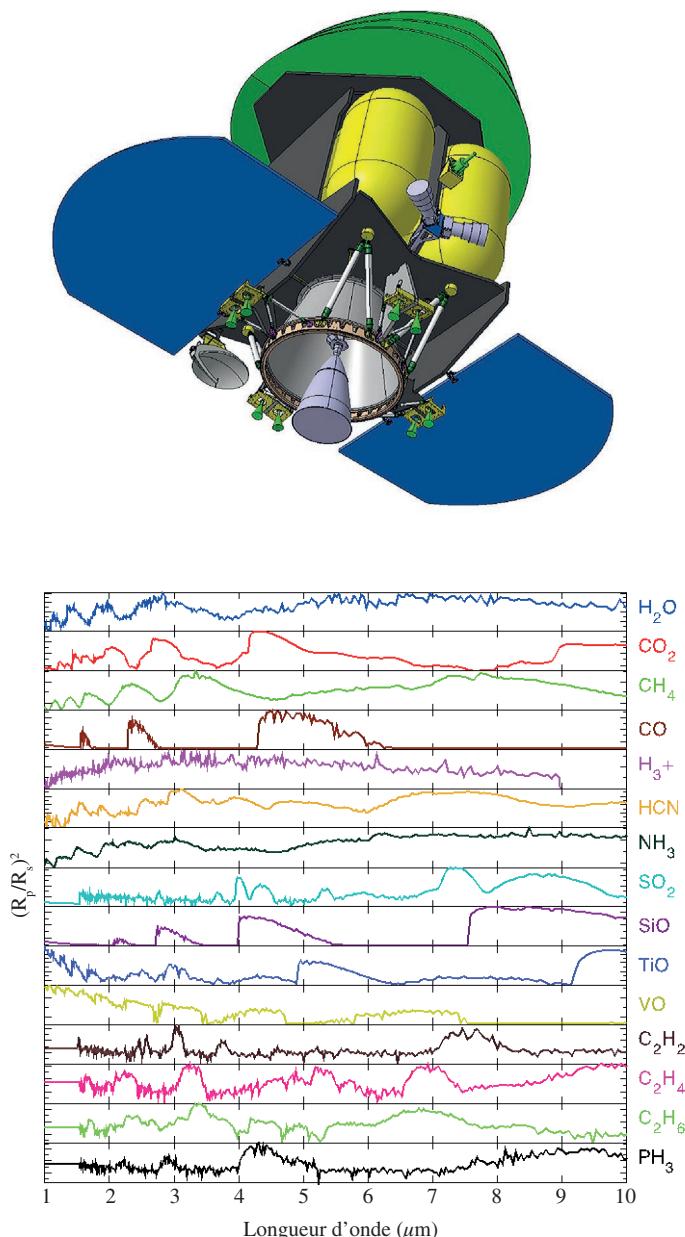


Figure 5. Haut : modèle du vaisseau spatial d'ARIEL proposé par Airbus France. Bas : signatures spectrales des molécules clés présentes dans une atmosphère planétaire. Les observations faites par ARIEL vont s'étaler sur une plage de longueur d'onde de 0.55 à 8 mm pour permettre de détecter les espèces moléculaires, la structure thermique de ces atmosphères, la couverture nuageuse et éliminer le bruit stellaire.

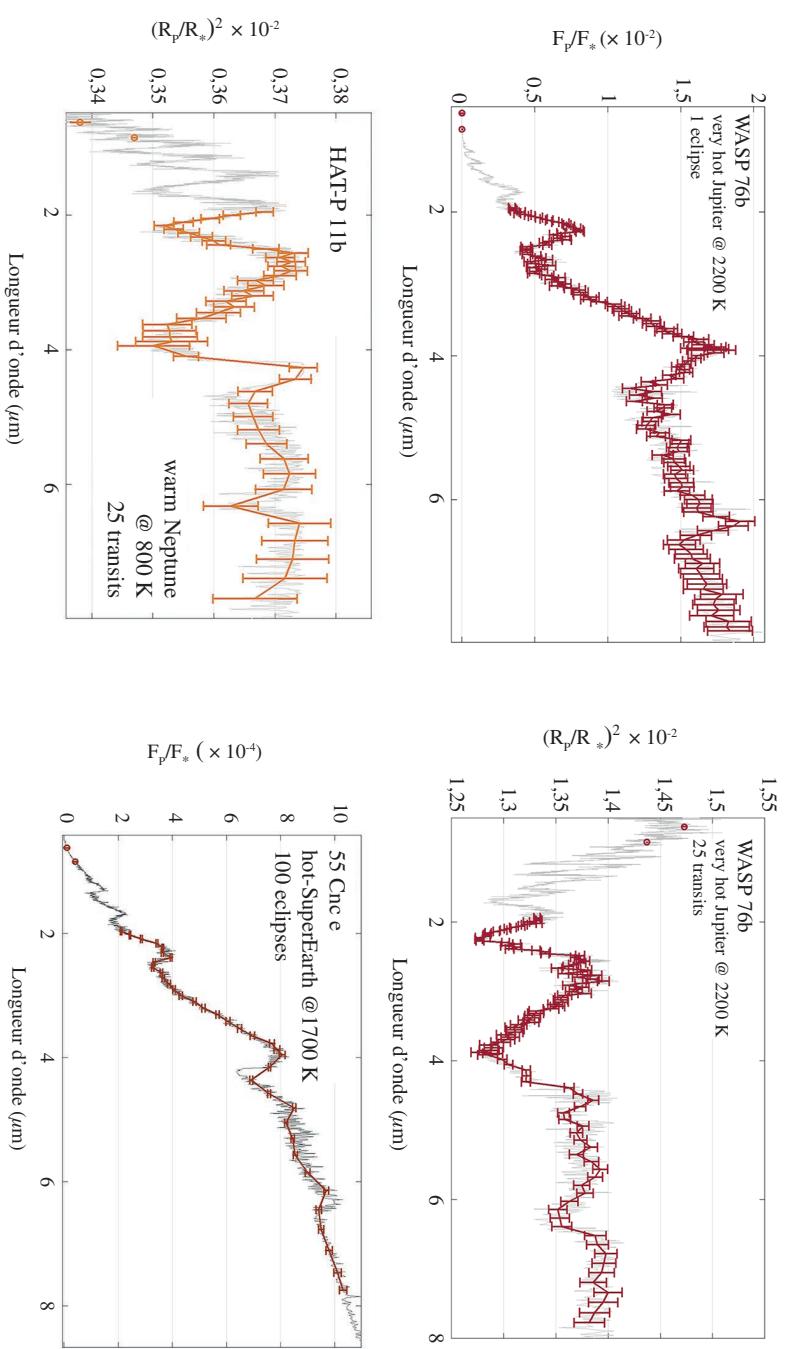


Figure 6. Simulations des spectres d'exoplanètes comme observées par ARIEL. ARIEL se focalisera sur des planètes chaudes et froides : on montre ici les spectres en transit et en éclipse d'un Jupiter chaud (WASP-76b), un spectre d'un Neptune tiède en transit (HAT-P-11b) et un spectre en éclipse d'une super-Terre chaude (55Cnc e).

Pour être très performants, nous devrions viser une amélioration d'au moins un facteur 10 pour le SNR, et cela nécessiterait d'abandonner l'idée d'une plateforme mobile, et très stable au profit d'une grande structure, déployable, comme les télescopes spatiaux monolithiques qui sont limités par la taille de carénage à environ 4 m de diamètre. Ladite structure peut représenter une charge en essayant d'atteindre la stabilité de pointage requise par les observations en transit et certainement pourrait limiter la capacité à re-pointer rapidement d'une cible à l'autre dans le ciel. En tout cas, un facteur 10 d'amélioration pour le SNR pourrait ne pas être suffisant pour arriver à observer les atmosphères des planètes comme la Terre autour d'étoiles semblables au Soleil. Pour ces objets, en fait, les transits devraient se produire une fois par an, et 5-6 transits (en supposant une durée de vie de la mission d'environ 5 ans) ne seront pas suffisants pour recueillir les photons nécessaires.

L'imagerie directe de l'espace est la prochaine étape technologique qu'il faudrait considérer. Des télescopes spatiaux avec différents types de coronographes sont à l'étude aux Etats-Unis, en Europe et au Japon [108-114]. Une mission pour l'imagerie directe sera techniquement plus difficile qu'une manip de transits dans l'espace et certainement plus chère. Ladite mission, cependant, ouvrirait l'exploration spectroscopique des planètes à plus grande séparation de l'étoile, un domaine qui n'est pas accessible avec les transits.

Dans les deux dernières décennies, le domaine des exoplanètes nous a surpris en termes de créativité et d'idées innovantes, alors peut-être ne devrions-nous pas être trop étonnés si une nouvelle technologie ou une nouvelle stratégie d'observation arrivait à nous sauver de cette impasse.

Remerciements

Royal Society et European Research Council (programme ExoLights).

Références

- [1] Cassan A., et al. 2012 One or more bound planets per Milky Way star from microlensing observations. *Nature* 481, 167–169. (<http://dx.doi.org/10.1038/nature10684>).
- [2] Batalha N.M., et al. 2013 Planetary candidates observed by Kepler. III. Analysis of the first 16 months of data. *Astrophys. J. Suppl.* 204, 24. (<http://dx.doi.org/10.1088/0067-0049/204/2/24>).
- [3] Fressin F., Torres G., Charbonneau D., Bryson S.T., Christiansen J., Dressing C.D., Jenkins J.M., Walkowicz L.M., Batalha NM. 2013 The false positive rate of Kepler and the occurrence of planets. *Astrophys. J.* 766, 81. (<http://dx.doi.org/10.1088/0004-637X/766/2/81>).
- [4] Perryman et al. 2014 Astrometric exoplanet detection with GAIA. *ApJ* 797 14. (<http://dx.doi.org/10.1088/0004-637X/797/1/14>).
- [5] Sozzetti A., Giacobbe P., Lattanzi M.G., Micela G., Morbidelli R., Tinetti G. 2013 Astrometric detection of giant planets around nearby M dwarfs: the Gaia potential. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* 437, 497–509. (<http://dx.doi.org/10.1093/mnras/stt1899>).

- [6] McLean I.S., Casali MMBuzit J-L, et al. 2008 SPHERE: a planet finder instrument for the VLT. In Ground-based and airborne instrumentation for astronomy II (eds McLean I.S., Casali MM). Proc. SPIE, vol. 7014, 701418 (12 pp.). Bellingham,WA: SPIE. (<http://dx.doi.org/10.1117/12.790120>).
- [7] Hartung M, et al. 2013 Final A&T stages of the Gemini planet finder. (<http://arxiv.org/abs/1311.4423>).
- [8] Jovanovic N, et al. 2013 SCExAO as a precursor to an ELT exoplanet direct imaging instrument. (<http://arxiv.org/abs/1310.0476>).
- [9] Howard A.W., et al. 2013 A rocky composition for an Earth-sized exoplanet. *Nature* 503, 381–384. (<http://dx.doi.org/10.1038/nature12767>).
- [10] Guillot T. 2005 The interiors of giant planets: models and outstanding questions. *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.* 33, 493–530. (<http://dx.doi.org/10.1146/annurev.earth.32.101802.120325>).
- [11] Fortney J.J., Marley M.S., Barnes JW. 2007 Planetary radii across five orders of magnitude in mass and stellar insolation: application to transits. *Astrophys. J.* 659, 1661–1672. (<http://dx.doi.org/10.1086/512120>).
- [12] Adams E.R., Seager S, Elkins-Tanton L. 2008 Ocean planet or thick atmosphere: on the mass–radius relationship for solid exoplanets with massive atmospheres. *Astrophys. J.* 673, 1160–1164. (<http://dx.doi.org/10.1086/524925>).
- [13] Grasset O., Schneider J, Sotin C. 2009 A study of the accuracy of mass–radius relationships for silicate-rich and ice-rich planets up to 100 Earth masses. *Astrophys. J.* 693, 722–733. (<http://dx.doi.org/10.1088/0004-637X/693/1/722>).
- [14] Valencia D, Guillot T, Parmentier V, Freedman RS. 2013 Bulk composition of GJ 1214b and other sub-Neptune exoplanets. *Astrophys. J.* 775, 10. (<http://dx.doi.org/10.1088/0004-637X/775/1/10>).
- [15] Ricker G.R., et al. 2014 Transiting Exoplanet Survey Satellite (TESS) SPIE, 9143, id. 914320.
- [16] Broeg C, et al. 2013 CHEOPS: a transit photometry mission for ESA's small mission programme. *Eur. Phys. J. Web Conf.* 47, 3005. (<http://dx.doi.org/10.1051/epjconf/20134703005>).
- [17] Borucki W.J., et al. 2009 Kepler's optical phase curve of the exoplanet HAT-P-7b. *Science* 325, 709. (<http://dx.doi.org/10.1126/science.1178312>).
- [18] Lagrange A-M, et al. 2010 A giant planet imaged in the disk of the young star β Pictoris. *Science* 329, 57–59. (<http://dx.doi.org/10.1126/science.1187187>).
- [19] Seager S, Sasselov DD. 2000 Theoretical transmission spectra during extrasolar giant planet transits. *Astrophys. J.* 537, 916–921. (<http://dx.doi.org/10.1086/309088>).
- [20] Brown TM. 2001 Transmission spectra as diagnostics of extrasolar giant planet atmospheres. *Astrophys. J.* 553, 1006–1026. (<http://dx.doi.org/10.1086/320950>).
- [21] Tinetti G, Liang M-C, Vidal-Madjar A, Ehrenreich D, Lecavelier des Etangs A, Yung YL. 2007 Infrared transmission spectra for extrasolar giant planets. *Astrophys. J.* 654, L99–L102. (<http://dx.doi.org/10.1086/510716>).

- [22] Charbonneau D, et al. 2005 Detection of thermal emission from an extrasolar planet. *Astrophys. J.* 626, 523–529. (<http://dx.doi.org/10.1086/429991>).
- [23] Deming D, Seager S, Richardson L.J., Harrington J. 2005 Infrared radiation from an extrasolar planet. *Nature* 434, 740–743. (<http://dx.doi.org/10.1038/nature03507>).
- [24] Harrington J, Hansen B.M., Luszcz S.H., Seager S, Deming D, Menou K, Cho JY-K, Richardson L.J. 2006 The phase-dependent infrared brightness of the extrasolar planet ν Andromedae b. *Science* 314, 623–626. (<http://dx.doi.org/10.1126/science.1133904>).
- [25] Knutson H.A., Charbonneau D, Allen L.E., Fortney J.J., Agol E, Cowan N.B., Showman A.P., Cooper C.S., Megeath ST. 2007 A map of the day–night contrast of the extrasolar planet HD 189733b. *Nature* 447, 183–186. (<http://dx.doi.org/10.1038/nature05782>).
- [26] Snellen I.A.G., de Kok R.J., de Mooij E.J.W, Albrecht S. 2010 The orbital motion, absolute mass and high-altitude winds of exoplanet HD 209458b. *Nature* 465, 1049–1051. (<http://dx.doi.org/10.1038/nature09111>).
- [27] Lyot B. 1939 The study of the solar corona and prominences without eclipses (George Darwin Lecture, 1939). *Mon. Not. R. Astron. Soc.* 99, 580.
- [28] Shaklan SGuyon O. 2013 Imaging Earth-like planets around late-type stars with low-inner working angle PIAA coronagraphy. In Techniques and instrumentation for detection of exoplanets VI (ed Shaklan S). Proc. SPIE, vol. 8864, 886414 (8pp.). Bellingham, WA: SPIE. (<http://dx.doi.org/10.1117/12.2025319>).
- [29] Trauger J.T., Traub WA. 2007 A laboratory demonstration of the capability to image an Earth-like extrasolar planet. *Nature* 446, 771–773. (<http://dx.doi.org/10.1038/nature05729>).
- [30] Marois C, Macintosh B, Barman T, Zuckerman B, Song I, Patience J, Lafrenière D, Doyon R. 2008 Direct imaging of multiple planets orbiting the star HR 8799. *Science* 322, 1348–1352. (<http://dx.doi.org/10.1126/science.1166585>).
- [31] Barman T. 2007 Identification of absorption features in an extrasolar planet atmosphere. *Astrophys. J.* 661, 191. (<http://dx.doi.org/10.1086/518736>).
- [32] Tinetti G, et al. 2007 Water vapour in the atmosphere of a transiting extrasolar planet. *Nature* 448, 169–171. (<http://dx.doi.org/10.1038/nature06002>).
- [33] Grillmair C.J., Burrows A, Charbonneau D, Armus L, Stauffer J, Meadows V, van Cleve J, von Braun K, Levine D. 2008 Strong water absorption in the dayside emission spectrum of the planet HD 189733b. *Nature* 456, 767–769. (<http://dx.doi.org/10.1038/nature07574>).
- [34] Beaulieu J.P., et al. 2010 Water in the atmosphere of HD 209458b from 3.6–8 μ m IRAC photometric observations in primary transit. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* 409, 963–974. (<http://dx.doi.org/10.1111/j.1365-2966.2010.16516.x>).
- [35] Swain M.R., Vasish G, Tinetti G. 2008 The presence of methane in the atmosphere of an extrasolar planet. *Nature* 452, 329–331. (<http://dx.doi.org/10.1038/nature06823>).
- [36] Crouzet N, McCullough P.R., Burke C, Long D. 2012 Transmission spectroscopy of exo-planet XO-2b observed with Hubble Space Telescope NICMOS. *Astrophys. J.* 761, 7. (<http://dx.doi.org/10.1088/0004-637X/761/1/7>).

- [37] Deming D, et al. 2013 Infrared transmission spectroscopy of the exoplanets HD 209458b and XO-1b using the wide field camera-3 on the Hubble Space Telescope. *Astrophys. J.* 774, 95. (<http://dx.doi.org/10.1088/0004-637X/774/2/95>).
- [38] Birkby J.L., de Kok R.J., Brogi M, de Mooij E.J.W., Schwarz H, Albrecht S, Snellen I.A.G. 2013 Detection of water absorption in the day side atmosphere of HD 189733 b using ground-based high-resolution spectroscopy at 3.2 μ m. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* 436, L35–L39. (<http://dx.doi.org/10.1093/mnrasl/stl07>).
- [39] Kreidberg L, et al. 2014 A PRECISE WATER ABUNDANCE MEASUREMENT FOR THE HOT JUPITER WASP-43b. *ApJ* 793 L27 (<http://dx.doi.org/10.1088/2041-8205/793/2/L27>).
- [40] Swain M.R., et al. 2009 Water, methane, and carbon dioxide present in the day-side spectrum of the exoplanet HD 209458b. *Astrophys. J.* 704, 1616–1621. (<http://dx.doi.org/10.1088/0004-637X/704/2/1616>).
- [41] Tinetti G, Deroo P, Swain M.R., Griffith C.A., Vasisht G, Brown L.R., Burke C, McCullough P. 2010 Probing the terminator region atmosphere of the hot-Jupiter XO-1b with transmission spectroscopy. *Astrophys. J.* 712, L139–L142. (<http://dx.doi.org/10.1088/2041-8205/712/2/L139>).
- [42] Swain M.R., Vasisht G, Tinetti G, Bouwman J, Chen P, Yung Y, Deming D, Deroo P. 2009 Molecular signatures in the near-infrared dayside spectrum of HD 189733b. *Astrophys. J.* 690, L114–L117. (<http://dx.doi.org/10.1088/0004-637X/690/2/L114>).
- [43] de Kok R.J., Brogi M, Snellen I.A.G., Birkby J, Albrecht S, de Mooij E.J.W. 2013 Detection of carbon monoxide in the high-resolution day-side spectrum of the exoplanet HD 189733b. *Astron. Astrophys.* 554, A82. (<http://dx.doi.org/10.1051/0004-6361/201321381>).
- [44] Madhusudhan N, Seager S. 2009 A temperature and abundance retrieval method for exoplanet atmospheres. *Astrophys. J.* 707, 24–39. (<http://dx.doi.org/10.1088/0004-637X/707/1/24>).
- [45] Lee J-M, Fletcher L.N., Irwin P.G.J. 2012 Optimal estimation retrievals of the atmospheric structure and composition of HD 189733b from secondary eclipse spectroscopy. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* 420, 170–182. (<http://dx.doi.org/10.1111/j.1365-2966.2011.20013.x>).
- [46] Line M.R., Zhang X, Vasisht G, Natraj V, Chen P, Yung YL. 2012 Information content of exoplanetary transit spectra: an initial look. *Astrophys. J.* 749, 93. (<http://dx.doi.org/10.1088/0004-637X/749/1/93>).
- [47] Waldmann I. P. et al. 2015 Tau-REx I: A Next Generation Retrieval Code for Exoplanetary Atmospheres *ApJ* 802 107 (<http://dx.doi.org/10.1088/0004-637X/802/2/107>).
- [48] Moses J.I., et al. 2011 Disequilibrium carbon, oxygen, and nitrogen chemistry in the atmospheres of HD 189733b and HD 209458b. *Astrophys. J.* 737, 15. (<http://dx.doi.org/10.1088/0004-637X/737/1/15>).
- [49] Venot O, Hébrard E, Agúndez M, Dobrijevic M, Selsis F, Hersant F, Iro N, Bounaceur R. 2012 A chemical model for the atmosphere of hot Jupiters. *Astron. Astrophys.* 546, A43. (<http://dx.doi.org/10.1051/0004-6361/201219310>).
- [50] Swain M.R., et al. 2010 A ground-based near-infrared emission spectrum of the exoplanet HD 189733b. *Nature* 463, 637–639. (<http://dx.doi.org/10.1038/nature08775>).

- [51] Waldmann I.P., Tinetti G, Deroo P, Hollis M.D.J, Yurchenko S.N., Tennyson J. 2013 Blind extraction of an exoplanetary spectrum through independent component analysis. *Astrophys. J.* 766, 7. (<http://dx.doi.org/10.1088/0004-637X/766/1/7>).
- [52] Swain M, et al. 2013 Probing the extreme planetary atmosphere of WASP-12b. *Icarus* 225, 432–445. (<http://dx.doi.org/10.1016/j.icarus.2013.04.003>).
- [53] Stevenson K.B., Bean J.L., Seifahrt A, Desert J-M, Madhusudhan N, Bergmann M, Kreidberg L, Homeier D. 2013 Transmission spectroscopy of the hot-Jupiter WASP-12b from 0.7 to 5 microns. *Astrophys. J.* Submitted. (<http://arxiv.org/abs/1305.1670>)
- [54] Charbonneau D, Brown T.M., Noyes R.W., Gilliland RL. 2002 Detection of an extrasolar planet atmosphere. *Astrophys. J.* 568, 377–384. (<http://dx.doi.org/10.1086/338770>).
- [55] Redfield S, Endl M, Cochran W.D., Koesterke L. 2008 Sodium absorption from the exoplanetary atmosphere of HD 189733b detected in the optical transmission spectrum. *Astrophys. J.* 673, L87–L90. (<http://dx.doi.org/10.1086/527475>)
- [56] Snellen I.A.G., Albrecht S, de Mooij E.J.W., Le Poole RS. 2008 Ground-based detection of sodium in the transmission spectrum of exoplanet HD 209458b. *Astron. Astrophys.* 487, 357–362. (<http://dx.doi.org/10.1051/0004-6361:200809762>).
- [57] Colon K.D., Ford E.B., Redfield S, Fortney J.J., Shabram M, Deeg H.J., Mahadevan S. 2011 Probing potassium in the atmosphere of HD 80606b with tunable filter transit spectrophotometry from the Gran Telescopio Canarias. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* 419, 2233–2250. (<http://dx.doi.org/10.1111/j.1365-2966.2011.19878.x>).
- [58] Knutson H.A., Charbonneau D, Noyes R.W., Brown T.M., Gilliland RL. 2007 Using stellar limb-darkening to refine the properties of HD 209458b. *Astrophys. J.* 655, 564–575. (<http://dx.doi.org/10.1086/510111>).
- [59] Sing D.K., et al. 2011 Hubble Space Telescope transmission spectroscopy of the exoplanet HD 189733b: high-altitude atmospheric haze in the optical and near-ultraviolet with STIS. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* 416, 1443–1455. (<http://dx.doi.org/10.1111/j.1365-2966.2011.19142.x>).
- [60] Line M.R., Liang M.C., Yung YL. 2010 High-temperature photochemistry in the atmosphere of HD 189733b. *Astrophys. J.* 717, 496–502. (<http://dx.doi.org/10.1088/0004-637X/717/1/496>).
- [61] Venot O, Agúndez M, Selsis F, Tessenyi M, Iro N. 2013 The atmospheric chemistry of the warm Neptune GJ 3470b: influence of metallicity and temperature on the CH₄/CO ratio. *Astron. Astrophys.* 562, A51. (<http://dx.doi.org/10.1051/0004-6361/201322485>).
- [62] Knutson, H. A., Benneke, B., Deming, D. & Homeier, D. 2014 A featureless transmission spectrum for the Neptune-mass exoplanet GJ 436b. *Nature* 505, 66–68.
- [63] Fukui A, et al. 2013 Optical-to-near-infrared simultaneous observations for the hot Uranus GJ 3470b: a hint of a cloud-free atmosphere. *Astrophys. J.* 770, 95. (<http://dx.doi.org/10.1088/0004-637X/770/2/95>).
- [64] Fraine A., et al. 2014 Water vapour absorption in the clear atmosphere of a Neptune-sized exoplanet *Nature* 513, 526–529 (<http://dx.doi.org/10.1088/0004-637X/770/2/95>)
- [65] Bean J.L., Miller-Ricci Kempton E, Homeier D. 2010 A ground-based transmission spectrum of the super-Earth exoplanet GJ 1214b. *Nature* 468, 669–672. (<http://dx.doi.org/10.1038/nature09596>).

- [66] Berta Z.K., et al. 2012 The flat transmission spectrum of the super-Earth GJ 1214b from wide field camera 3 on the Hubble Space Telescope. *Astrophys. J.* 747, 35. (<http://dx.doi.org/10.1088/0004-637X/747/1/35>).
- [67] Kreidberg L, et al. 2014 Clouds in the atmosphere of the super-Earth exoplanet GJ 1214b. *Nature* 505, 69–72. (<http://dx.doi.org/10.1038/nature12888>).
- [68] Vidal-Madjar A, Lecavelier des Etangs A, Désert J-M, Ballester G.E., Ferlet R, Hébrard G, Mayor M. 2003 An extended upper atmosphere around the extrasolar planet HD 209458b. *Nature* 422, 143–146. (<http://dx.doi.org/10.1038/nature01448>).
- [69] Linsky J.L., Yang H, France K, Froning C.S., Green J.C., Stocke J.T., Osterman SN. 2010 Observations of mass loss from the transiting exoplanet HD 209458b. *Astrophys. J.* 717, 1291–1299. (<http://dx.doi.org/10.1088/0004-637X/717/2/1291>).
- [70] Fossati L, et al. 2010 Metals in the exosphere of the highly irradiated planet WASP-12b. *Astrophys. J. Lett.* 714, 222. (<http://dx.doi.org/10.1088/2041-8205/714/2/L222>).
- [71] Yelle RV. 2004 Aeronomy of extra-solar giant planets at small orbital distances. *Icarus* 170, 167–179. (<http://dx.doi.org/10.1016/j.icarus.2004.02.008>).
- [72] Koskinen T, Aylward A, Miller S. 2007 A stability limit for the atmospheres of giant exo-solar planets. *Nature* 450, 845–848. (<http://dx.doi.org/10.1038/nature06378>).
- [73] García Muñoz A. 2007 Physical and chemical aeronomy of HD 209458b. *Planet. Space Sci.* 55, 1426–1455. (<http://dx.doi.org/10.1016/j.pss.2007.03.007>).
- [74] Koskinen T.T., Harris M.J., Yelle R.V., Lavvas P. 2013 The escape of heavy atoms from the ionosphere of HD 209458b. I. A photochemical and dynamical model of the thermosphere. *Icarus* 226, 1678–1694. (<http://dx.doi.org/10.1016/j.icarus.2012.09.027>).
- [75] Koskinen T.T., Yelle R.V., Harris M.J., Lavvas P. 2013 The escape of heavy atoms from the ionosphere of HD 209458b. II. Interpretation of the observations. *Icarus* 226, 1695–1708. (<http://dx.doi.org/10.1016/j.icarus.2012.09.026>).
- [76] Crossfield I.J.M., Hansen B.M.S., Harrington J, Cho J, Deming D, Menou K, Seager S. 2010 A new 24 micron phase curve for υ Andromedae b. *Astrophys. J.* 723, 1436–1446. (<http://dx.doi.org/10.1088/0004-637X/723/2/1436>).
- [77] Kataria T, et al. 2015 The atmospheric circulation of the hot Jupiter wasp-43b: comparing three-dimensional models to spectrophotometric data. *ApJ* 801, 86 (<http://dx.doi.org/10.1088/0004-637X/801/2/86>).
- [78] Majeau C, Agol E, Cowan NB. 2012 A two-dimensional infrared map of the extrasolar planet HD 189733b. *Astrophys. J. Lett.* 747, L20. (<http://dx.doi.org/10.1088/2041-8205/747/2/L20>).
- [79] Bonnefoy M, et al. 2013 The near-infrared spectral energy distribution of β Pictoris b. *Astron. Astrophys.* 555, A107. (<http://dx.doi.org/10.1051/0004-6361/201220838>).
- [80] Currie T, et al. 2013 A combined Very Large Telescope and Gemini study of the atmosphere of the directly imaged planet, β Pictoris b. *Astrophys. J.* 776, 15. (<http://dx.doi.org/10.1088/0004-637X/776/1/15>).
- [81] Janson M, et al. 2013 Direct imaging detection of methane in the atmosphere of GJ 504 b. *Astrophys. J. Lett.* 778, L4. (<http://dx.doi.org/10.1088/2041-8205/778/1/L4>).

- [82] Konopacky Q.M., Barman T.S., Macintosh B.A., Marois C. 2013 Detection of carbon monoxide and water absorption lines in an exoplanet atmosphere. *Science* 339, 1398–1401. (<http://dx.doi.org/10.1126/science.1232003>).
- [83] Waldmann I.P. 2013 On signals faint and sparse: the ACICA algorithm for blind de-trending of exoplanetary transits with low signal-to-noise. *Astrophys. J.* 780, 23. (<http://dx.doi.org/10.1088/0004-637X/780/1/23>).
- [84] Waldmann I.P. 2012 Of ‘cocktail parties’ and exoplanets. *Astrophys.* 747, 12. (<http://dx.doi.org/10.1088/0004-637X/747/1/12>).
- [85] Morello G, Waldmann I.P., Tinetti G, Micela G, Peres G, Howarth I. 2014 A new look at Spitzer primary transit observations of the exoplanet HD 189733b. *Astrophys. J.* 786, 22.
- [86] Morello G. et al. 2015 Revisiting Spitzer transit observations with independent component analysis: new results for the GJ 436 system *ApJ* 802 117 (<http://dx.doi.org/10.1088/0004-637X/802/2/117>).
- [87] Hyvarinen A. 1999 Gaussian moments for noisy independent component analysis. *IEEE Signal Process. Lett.* 6, 145–147. (<http://dx.doi.org/10.1109/97.763148>).
- [88] Ballerini P, Micela G, Lanza A.F., Pagano I. 2012 Multiwavelength flux variations induced by stellar magnetic activity: effects on planetary transits. *Astron. Astrophys.* 539, A140. (<http://dx.doi.org/10.1051/0004-6361/201117102>).
- [89] Micela, G. 2014 Correcting for stellar activity, *Exp. Astron.*, (<http://dx.doi.org/10.1007/s10686-014-9430-1>).
- [90] Tinetti G, Encrenaz T, Coustenis A. 2013 Spectroscopy of planetary atmospheres in our Galaxy. *Astron. Astrophys. Rev.* 21, 63. (<http://dx.doi.org/10.1007/s00159-013-0063-6>).
- [91] Madhusudhan N, et al. 2011 A high C/O ratio and weak thermal inversion in the atmosphere of exoplanet WASP-12b. *Nature* 469, 64–67. (<http://dx.doi.org/10.1038/nature09602>).
- [92] Tennyson J, Yurchenko S.N. 2012 ExoMol: molecular line lists for exoplanet and other atmospheres. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* 425, 21–33. (<http://dx.doi.org/10.1111/j.1365-2966.2012.21440.x>).
- [93] Tessenyi M, Tinetti G, Savini G, Pascale E. 2013 Molecular detectability in exoplanetary emission spectra. *Icarus* 226, 1654–1672. (<http://dx.doi.org/10.1016/j.icarus.2013.08.022>).
- [94] Clampin M. 2010 Pathways towards habitable planets: JWST’s capabilities for exoplanet science. In *Pathways towards habitable planets* (eds Coudé du Foresto and V, Gelino D.M., Ribas I) *Astron. Soc. Pac. Conf. Ser.*, no. 430, p. 167 San Francisco, CA: Astronomical Society of the Pacific.
- [95] Snellen I. 2013 Characterization of exoplanet atmospheres using high-dispersion spectroscopy with the E-ELT and beyond. *Eur. Phys. J. Web Conf.* 47, 11001. (<http://dx.doi.org/10.1051/epjconf/20134711001>).
- [96] Esposito S, Fini L, Kasper M, Verinaud C, Mawet D. 2013 Roadmap for PCS, the planetary camera and spectrograph for the E-ELT. In *Adaptive optics for extremely large telescopes*, Proc. 3rd AO4ELT Conf., Florence, Italy, 26–31 May (eds Esposito S, Fini L), paper I2804. Florence, Italy: INAF–Osservatorio Astrofisico di Arcetri. (<http://dx.doi.org/10.12839/AO4ELT3.I2804>).

- [97] Bracewell RN. 1978 Detecting nonsolar planets by spinning infrared interferometer. *Nature* 274, 780–781. (<http://dx.doi.org/10.1038/274780a0>).
- [98] Angel J.R.P., Cheng A.Y.S., Woolf N.J., 1986 A space telescope for infrared spectroscopy of Earth-like planets. *Nature* 322, 341–343. (<http://dx.doi.org/10.1038/322341a0>).
- [99] Léger A, Mariotti J.M., Mennesson B, Ollivier M, Puget J.L., Rouan D, Schneider J. 1996 The DARWIN project. *Astrophys. Space Sci.* 241, 135–146. (<http://dx.doi.org/10.1007/BF00644221>)
- [100] TPF Science Working Group. 1999 The Terrestrial Planet Finder (TPF): A NASA Origins Program to search for habitable planets. (eds CA Beichman, NJ Woolf, CA Lin-densmith). JPL Publication 99-003. (See http://exep.jpl.nasa.gov/TPF/tpf_book/TOC_d.pdf).
- [101] Absil O, et al. (on behalf of the Blue Dots community). 2010 Blue Dots Report, v2.02. (See http://www.blue-dots.net/sites/blue-dots/IMG/pdf/BD_report_V2-02.pdf).
- [102] Coudé du Foresto V, Gelino D.M., Ribas I (eds). 2010 Pathways towards habitable planets, Proc. Conf., Barcelona, Spain, 14–18 September. Astron. Soc. Pac. Conf. Ser., no. 430. San Francisco, CA: Astronomical Society of the Pacific.
- [103] Swain M.R., Deming D, Vasish G, Grillmair C, Henning T, Bouwman J, Akeson R. 2009 THESIS—the Terrestrial and Habitable-zone Exoplanet Spectroscopy Infrared Spacecraft. Astro2010: The Astronomy and Astrophysics Decadal Survey, Technology Development White Papers, no. 62. Washington, DC: National Academies. (See <http://www8.national-academies.org/astro2010/DetailFileDisplay.aspx?id=560>).
- [104] Deroo P.D., Swain M.R., Green RO. 2012 Spectroscopy of exoplanet atmospheres with the FINESSE Explorer mission. In Space telescopes and instrumentation 2012: optical, infrared, and millimeter wave (eds Clampin M.C., Fazio G.G., MacEwen H.A., Oschmann JM Jr.). Proc. SPIE, vol. 8442, 844241 (9pp.). Bellingham, WA: SPIE. (<http://dx.doi.org/10.1117/12.925236>).
- [105] Tinetti G, et al. 2012 EChO. *Exp. Astron.* 34, 311–353. (<http://dx.doi.org/10.1007/s10686-012-9303-4>).
- [106] Eccleston, P., et al. 2014 The EChO payload instrument – an overview *Exp. Astron.*, 11 (<http://dx.doi.org/10.1007/s10686-014-9428-8>).
- Tinetti G, et al. 2015, The EChO science case, *Exp. Astron.*, accepted, (<http://arxiv.org/abs/1502.05747>)
- [107] Stahl H.P., Henrichs T, Luedtke A, West M. 2012 Update on multivariable parametric cost models for ground and space telescopes. In Space telescopes and instrumentation 2012: optical, infrared, and millimeter wave (eds Clampin M.C., Fazio G.G., MacEwen H.A., Oschmann JM Jr.). Proc. SPIE, vol. 8442, 844224 (6pp.). Bellingham, WA: SPIE. (<http://dx.doi.org/10.1117/12.926363>)
- [108] Clampin M, Lyon R. 2010 The Extrasolar Planetary Imaging Coronagraph. In Pathways towards habitable planets (eds Coudé du Foresto V, Gelino D.M., Ribas I). Astron. Soc. Pac. Conf. Ser., no. 430, p. 383. San Francisco, CA: Astronomical Society of the Pacific.
- [109] New Worlds Study Team. 2010 The New Worlds Observer: the astrophysics strategic mission concept study. In Pathways towards habitable planets (eds Coudé du Foresto V, Gelino D.M., Ribas I). Astron. Soc. Pac. Conf. Ser., no. 430, p. 353. San Francisco, CA: Astronomical Society of the Pacific.

- [I10] Kasdin N.J., et al. 2012 Technology demonstration of starshade manufacturing for NASA's Exoplanet Mission Program. Space telescopes and instrumentation 2012: optical, infrared, and millimeter wave (eds Clampin M.C., Fazio G.G., MacEwen H.A., Oschmann JM Jr). Proc. SPIE, vol. 8442, 84420A (16pp.). Bellingham, WA: SPIE. (<http://dx.doi.org/10.1117/12.926790>).
- [I11] Guyon O, Hinz P.H., Cady E, Belikov R, Martinache F. 2013 High performance Lyot and PIAA coronagraphy for arbitrarily shaped telescope apertures. *Astrophys. J.* 780, 171. (<http://dx.doi.org/10.1088/0004-637X/780/2/171>).
- [I12] Serabyn E, Trauger J, Moody D, Mawet D, Liewer K, Krist J, Kern B. 2013 High-contrast imaging results with the vortex coronagraph. In Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series, no. 8864. (<http://dx.doi.org/10.1117/12.2024660>).
- [I13] Boccaletti A, Maire A-L, Galicher R, Baudoz P, Schneider J. 2013 SPICES a small space coronagraph to characterize giant and telluric planets in reflected light. *Eur. Phys. J. Web Conf.* 47, 15004. (<http://dx.doi.org/10.1051/epjconf/20134715004>).
- [I14] Enya K, et al. 2011 The SPICA coronagraphic instrument (SCI) for the study of exoplanets. *Adv. Space Res.* 48, 323–333. (<http://dx.doi.org/10.1016/j.asr.2011.03.010>)
- [I15] Rauer H, et al. 2014 The PLATO 2.0 Mission Exp. *Astron.*, 38, 249.
- [I16] Danielski C., et al. 2014. 0.94-2.42 μm ground-based transmission spectra of the hot Jupiter HD-189733b. *Astrophys. J.* 785, 35 (<http://dx.doi.org/10.1088/0004-637X/785/1/35>).

17

1986-2014
L'exploration des comètes,
renouveau du questionnement
sur la diversité des Mondes

Jean-Pierre Bibring

Université Paris Sud et Institut d'Astrophysique Spatiale,
IAS, Centre universitaire d'Orsay
Bât 120 – 121 91405 Orsay Cedex

Propos recueillis et transcrits par Jean Pierre Treuil
Académie Européenne Interdisciplinaire des Sciences (AEIS)

L'aventure de Rosetta et du robot Philae est une occasion de plonger dans l'histoire des explorations spatiales, en direction des comètes, et de leurs objectifs scientifiques, puis de revisiter la question des conditions d'émergence de la vie.

Au cours de cette longue aventure, débutée dans les années 1980 et dont vient de s'achever une étape, la vision que nous avons du Système solaire et de notre planète, de leurs particularités plus ou moins fortes par rapport aux objets du même type présents dans notre galaxie, a profondément changé. La thèse que nous voulons souligner ici est la suivante : une caractéristique de ce changement est la prise de conscience « d'une extrême diversité ». Au début de l'ère spatiale, imprégnés par plus de trois siècles de recherche de « lois universelles », nous étions convaincus de la « pluralité des mondes » ; nous imaginions alors ces mondes plus ou moins semblables, résultant de processus éventuellement complexes, mais reproductibles à l'identique, ou à quelques modifications mineures près. Or le changement d'échelle des observations, le fait « d'aller voir sur place » nous ont mis devant le fait d'une diversité inattendue.

C'est autour de cette thèse que s'organise cet article. Il comprend trois parties.

- La première partie reprend dans ses grandes lignes l'histoire de l'exploration des comètes, depuis la sonde Giotto jusqu'à Rosetta et Philae. L'objectif est de rappeler les questions posées et les réponses attendues de ces missions, mais aussi les défis techniques qu'il fallait surmonter.
- La seconde partie traite, sur un plan général, de la découverte de la diversité. Elle a pour arrière-plan une interrogation fondamentale, à savoir comment s'opère le « passage au vivant », constaté sur notre planète. Est-il « une manifestation obligatoire des propriétés combinatoires de la matière » [2] ? En tant que tel, un événement dont la nature peut être définie de façon universelle et qui survient quasi inévitablement ? Est-il au contraire le résultat d'un enchaînement particulier de multiples processus, localisés dans le temps et l'espace ; un enchaînement « contingent », dont aucune loi physique ne garantit à priori qu'il puisse se reproduire ailleurs de la même façon, voire même que sa nature puisse être définie de façon générique. La question reste bien sûr posée, mais la thèse avancée est que la progression des connaissances et l'exploration spatiale ont conduit à la prise de conscience évoquée plus haut : celle du couplage « lois (physiques) génératives, universelles, trajectoires spécifiques », la prise de conscience d'une « diversité fondamentale » des histoires de chaque système.
- La troisième partie traite concrètement de certaines des particularités de notre Système solaire et de notre planète, particularités en lien avec les questions auxquelles la mission Rosetta contribuera à fournir des réponses.

I. Rappel historique : de Giotto à Rosetta et Philae

L'exploration spatiale est l'une des grandes aventures de la fin du XX^e siècle et du début du XXI^e. Pour bien en évaluer l'histoire, il faut garder à l'esprit les « constantes de temps », les temps caractéristiques, à l'œuvre dans les projets spatiaux : de l'ordre de 20, 25 ans, voire plus, entre l'émergence du projet et son achèvement. Ainsi, prépare-t-on, aujourd'hui, en collaboration avec les japonais, une mission de « retour d'échantillons », avec des résultats attendus en 2052-2053.

Ces échelles de temps entraînent plusieurs conséquences. En premier lieu, elles impliquent que nous devons encore nous considérer comme au début de l'ère spatiale. Cinquante-huit ans seulement nous séparent du premier Spoutnik et certains acteurs des premières missions vivent encore. En second lieu, elles ont pour effet qu'entre le début et la fin d'une mission, la connaissance du domaine et, avec elle, les questions ayant motivé cette mission, les objectifs qui lui sont assignés, évoluent nécessairement.

De telles évolutions ont marqué la mission Rosetta. Celle-ci prend en effet ses racines dans la décennie des années 1980. Depuis cette époque, les idées sur la genèse du Système solaire et la trajectoire suivie, jusqu'à sa configuration actuelle, ont subi des changements

importants ; ceci, même si l'effondrement gravitationnel d'un nuage interstellaire - et sa transformation en un disque d'accrétion autour d'une étoile centrale - en reste toujours le processus central. La vision que nous avions de ce système, de l'histoire des objets qui le composent actuellement, s'en est trouvée profondément modifiée.

I.I 1986. Les survols de Halley

La comète de Halley est la plus connue des comètes, au moins c'était le cas avant l'exploit de Rosette. Au XX^e siècle, elle est apparue à deux reprises, en 1910, et en 1986, lors d'un passage, « peu spectaculaire » à l'œil nu. En 1986, les progrès accomplis en techniques spatiales ont permis d'aller la regarder de près ; cinq sondes furent lancées à l'époque : les deux sondes soviétiques VEGA, qui la survolèrent en mars 1986 à quelques 8000 km de distance ; la sonde Giotto, de l'ESA, passée à 600 km de son noyau ; enfin deux sondes japonaises.

On ne disposait pas à l'époque de moyens pour mettre de telles sondes en orbite autour de la comète, moyens qui auraient permis de rester dans son environnement immédiat durant une longue période ; avec la sonde Giotto et sa vitesse de l'ordre de 70 km/seconde, le temps d'observation se réduisait à quelques deux minutes. Cependant, l'analyse des matériaux éjectés par la pression de radiation solaire, lors du passage de la sonde dans la chevelure et la queue cométaire, a permis de recueillir des informations précieuses.

L'objectif général de ces sondes était de connaître la composition chimique du « matériau primitif », dont est formé le noyau cométaire : primitif, car constituant un échantillon du nuage dont l'effondrement gravitationnel a formé notre Système solaire, échantillon pris dans la phase finale de l'effondrement. Les questions auxquelles, à l'époque, on attendait des réponses, étaient notamment de savoir si les molécules carbonées incluses dans le noyau cométaire étaient davantage celles du méthane ou celles du gaz carbonique. Cette interrogation trouvait ses racines dans deux faits d'observation : l'un, relevant de l'étude des planètes, savoir que l'atmosphère de Vénus, de la Terre, de Mars même, privilégiait le gaz carbonique, alors que la composition gazeuse des planètes géantes donne une grande place au méthane. L'autre fait d'observation relevait de la biochimie et des expériences de Miller-Urey (1953) [12] et de ses suites, montrant que « l'on allait plus loin dans la complexité organique en partant de CH₄ qu'en partant de CO₂ ».

Giotto a fourni les premières images de la surface d'un noyau cométaire, révélant une structure accidentée, irrégulière, et surtout « très sombre » ; cet aspect sombre, « plus noir que du charbon », a surpris : il entrait en contradiction apparente avec l'hypothèse, qui pourtant se trouvait confirmée, d'une composition principale à base de glace d'eau. Le caractère très sombre (albédo inférieur à 5 %) et les analyses spectrales que les spectrographes de Giotto ont pu accompagner démentaient une quelconque domination de l'une ou l'autre des deux molécules, méthane et gaz carbonique. Les spectres affichaient au contraire la signature caractéristique d'une matière organique complexe. Mais son agencement macromoléculaire exact ne pouvait être déterminé car les instruments d'analyse de cette matière organique, en l'absence de prévision, n'avaient pas été mis en place.

Cette constatation a été une découverte majeure, inattendue, dont on n'a pas assez parlé à l'époque. Le fait d'avoir observé également la signature spectrale sur des grains éloignés du noyau, dans la queue cométaire, prouvait en outre que cette matière organique était très stable. Ce fait suggérait que le nuage, dans sa phase terminale d'effondrement, avait été « travaillé » par des processus chimiques complexes. Les composés macromoléculaires, stables, réfractaires, auxquels ils aboutissaient, incorporés dans les glaces cométaires, pouvaient se « véhiculer » partout et donc « ensemercer » tous les corps que ces comètes pourraient rencontrer. Une hypothèse émergeait : celle que les macromolécules produites par ces processus avaient été suffisamment spécifiques, pour constituer le « chaînon manquant » du passage vers le vivant.

Il fallait impérativement aller y voir de plus près. Ainsi est né le projet Rosetta.

I.2 La longue marche de Rosetta : quelques dates

La mission Rosetta est l'une des quatre « pierres angulaires » du programme à long terme de l'Agence Spatiale Européenne (ESA), baptisé « Horizon 2000 » [13]. Son histoire est tourmentée. Elle était au départ un projet conjoint de la NASA et de l'ESA, initié justement en 1986. L'idée émise alors était d'aller voir et de rapporter sur Terre des échantillons du matériau cométaire. Puis, de 1986 à 1992-1993, quelques hésitations sur le choix des lanceurs et des cibles, diverses difficultés financières et techniques se sont fait jour ; la NASA a fait douter de sa participation au projet. L'Agence Européenne a alors abandonné l'idée d'un partenariat avec la NASA et a décidé d'une mission moins ambitieuse : à défaut de pouvoir rapporter des échantillons sur Terre, il s'agirait d'envoyer le laboratoire sur place pour y effectuer mesures et observations.

Novembre 1993 est la date fondatrice de la mission ; c'est en effet la date où elle fut définitivement approuvée par le Comité des programmes scientifiques de l'Agence Spatiale Européenne. Pour autant, cette décision n'a pas fait du projet Rosetta un long fleuve tranquille. L'échec d'un vol de Ariane 5 et le maintien de la préférence pour ce lanceur ont rendu nécessaire le choix d'une autre cible que celle initialement prévue : à savoir, la comète Churyumov-Gerasimenko à la place de la comète Wirtanen, nouvel objectif approuvé en 2003. Rosetta a été finalement lancée le 2 mars 2004 à Kourou en Guyane, pour une arrivée sur la comète dix années plus tard.

Ce qui frappe, c'est la somme des contraintes rencontrées, de tous ordres, techniques, financières, organisationnelles ; ce sont les événements indépendants, survenus fortuitement, venant bouleverser les plans initiaux ; et surtout, la ténacité et les compétences qu'il a fallu mobiliser pour arriver au but.

I.3 Philae : prendre la mesure des défis technologiques surmontés

Le *lander*, autrement dit l'atterrisseur Philae, a été conçu, non pas comme un véhicule fourni par l'ESA sur lequel seraient installés des instruments développés par des instituts

après sélection, selon les procédures de l'Agence Spatiale Européenne, mais comme un instrument en soi. Philae, en tant que véhicule autonome, avec ses 10 instruments, a donc été conçu et développé – et est opéré – sous la responsabilité d'une équipe intégrée de scientifiques et d'ingénieurs, financée par plusieurs agences spatiales, dont la DLR allemande, le CNES français et l'ASI italienne.

Une des contraintes de la mission concernait la position orbitale de la comète sur laquelle aurait lieu la rencontre : il s'agissait d'effectuer un « rendez-vous » avec la comète dans des conditions où sa surface ne serait pas encore trop affectée par la reprise d'activité, liée au retour vers le Soleil : ainsi pourrait-on analyser un matériau de surface, mis à nu lors de la période orbitale précédente (passage au périhélie), dans un état aussi proche que possible de l'état primordial tant recherché. Pour garantir encore davantage la réussite de cet objectif - pouvoir atteindre un matériau vraiment « vierge » de toute influence depuis quatre milliards d'années - avait-on prévu une foreuse capable de prélever des échantillons sous la surface, jusqu'à une trentaine de cm. Il a donc été décidé que Rosetta rencontrerait la comète sur un point de son orbite distant du Soleil de quelques 4 Unités Astronomiques (UA), soit 4 fois la distance Terre-Soleil, et de larguer Philae à une distance de 3 UA.

D'autres contraintes concernaient les limites de poids et le matériel à charger : il fallait embarquer, dans une limite de quelques 100 kg, de quoi mener la dizaine d'expériences prévues, et donc une série d'instruments parmi lesquels deux spectrographes de masse ; un astucieux dispositif de sept caméras, le bien nommé CIVA (Shiva) ; un microscope infrarouge ; un magnétomètre... et la fameuse foreuse. Cette limite pondérale devait inclure par ailleurs un bloc électronique de 40 kg, pour le contrôle, les premiers traitements et la transmission des données. Il fallait aussi être capable de fournir l'énergie nécessaire au fonctionnement de l'opération en fonction des besoins, avec une puissance disponible de l'ordre de 9 watts, « la moitié de la puissance de la petite lampe du frigo ». Enfin - *last but not least* - faire fonctionner tous ces dispositifs sur une longue durée, sous des températures extérieures pouvant être très basses (moins 150 degrés), alors que le bloc électronique exigeait quant à lui, pour son fonctionnement propre, d'être porté au-dessus de moins 45 degrés !

Tels étaient les défis technologiques que les responsables en charge de l'atterrisseur avaient décidé d'affronter, voici vingt ans, lors du démarrage effectif du projet.

I.4 L'atterrissement sur la comète

Les opérations et les évènements qui ont précédé et suivi l'atterrissement de Philae ont été largement décrits dans la presse et les publications spécialisées. Rappelons en quelques éléments et d'autres défis à relever : choisir le site d'atterrissement ; décider du bon moment pour l'éjection du robot ; réussir son arrivée en chute libre sur la comète (un objet de 4 km en rotation), à un endroit précis, alors que l'orbiteur se trouve à 20 km de distance. Cette dernière étape était particulièrement difficile : une petite erreur sur l'instant, sur la direction ou sur l'impulsion de départ aurait eu comme conséquence que Philae se perde à jamais dans l'Espace. Le risque était grand, aussi le dispositif d'éjection

devait-il pouvoir être réglé de façon très fine, par exemple, sur la vitesse, avec une précision de l'ordre du cm par seconde !

Pourtant dans cette phase de descente, tout s'est bien passé : Philae s'est posé à 100 mètres de l'endroit prévu, des images récupérées ultérieurement ont montré la descente quasiment mètre par mètre, la granularité du site d'atterrissement a pu être étudiée au millimètre près.

C'est au moment de la plus grande joie que « l'horreur est arrivée » ... Quelques instants après l'atterrissement, une image transmise montrait que le robot était en mouvement ; tous les instruments - notamment celui affecté à la mesure du champ magnétique ambiant, un instrument très précis - confirmaient la triste nouvelle. Dans toute l'équipe, incertitudes, tensions, travail toute la nuit... et ils ont réussi : le lendemain matin, on réceptionnait l'image de Philae, sur sa position finale ; ainsi un engin fabriqué par l'homme s'était-il posé sur une comète ! L'image était dans le journal « Le Monde » dès l'après-midi. Le rêve était devenu réalité.

Les responsables des opérations ont pu comprendre ce qui s'était passé, savoir le non fonctionnement des ancrages et les rebonds qui en ont résulté. Ils ont localisé le site final d'atterrissement et déterminé la manière dont le robot Philae s'y trouvait positionné, « de guingois ». Malgré cet accident, tout un train de mesures a été effectué. La composition des grains soulevés - lors du premier impact et du dérapage de l'engin sur le sol - a pu être étudiée, à partir d'analyses spectrographiques programmées pour un autre usage, et qui se sont activées automatiquement. Par ailleurs, tout au long du parcours de descente et de sa suite, des mesures du champ magnétique ont été constamment effectuées, débouchant déjà sur une conclusion importante : à savoir, l'absence de champ magnétique rémanent, intrinsèque au noyau cométaire.

I.5 Premières observations : structures morphologiques du noyau cométaire

Bien avant que Philae n'atterrisse, les instruments à bord de l'orbiteur Rosetta avaient fourni une grande quantité d'informations, à savoir d'abord, une « panoplie fantastique » d'images, à une précision du mètre, et même plus grande encore, de l'ordre de la vingtaine de centimètres. Ces images montrent un objet fortement dissymétrique, un assemblage apparent formé de deux parties. La réflexion a déjà commencé pour trancher entre deux hypothèses : celle d'une réunion de deux objets primitivement distincts d'une part ou celle du début d'un processus de scission d'autre part.

La structure de surface de la comète est très irrégulière. On distingue nettement la présence de débris et celle de multiples filières d'érosion et de dépôts. Des jets de vapeur (dégazage) sont également visibles, et l'on peut en étudier la répartition et la physique. Cette structure résulte de processus liés à l'activité de la comète, dans son interaction avec le rayonnement solaire, tels par exemple des processus d'effondrement, conséquences du dégazage. La morphologie observée n'est pas la trace de processus d'impact : ces derniers n'ont plus cours ; l'accrétion est très ancienne, la comète étudiée - comme les autres objets cométaires - a été « hors de la zone d'influence des grands bombardements », ceux qui ont modelé le Système solaire interne.

1.6 Premières observations : composition chimique de la couche de surface de la comète

Les spectrographes placés à bord de Rosetta, avant même le largage du robot Philae, ont effectué à distance les premières analyses des matériaux de surface. Partout sur la comète, et à toutes les échelles de résolution, y compris les résolutions les plus fines que l'on ait pu atteindre, la constatation est la suivante : il n'y a nulle part de glace d'eau qui affleure, la surface est recouverte d'un matériau très sombre, formé de composants organiques complexes. Le fait que ces observations soient indépendantes de la résolution porte une indication importante : ces composants chimiques complexes, sont, à l'intérieur du noyau, uniformément mélangés aux autres constituants, dont la glace.

Comme évoqué déjà, les signatures spectrales recueillies sont celles de composés organiques, des hydrocarbures notamment, sous différentes formes et degrés de complexité. Par ailleurs, des analyses spectrales menées depuis l'orbite par Rosetta, dans la coma, avaient déjà mis en évidence la présence de groupements soufrés et azotés ; ces composés sont présents partout, indépendamment de la structure morphologique particulière de l'endroit observé : Philae pourrait les analyser en détail, quel que soit l'endroit où il se poserait.

2. Diversité et pluralité dans l'Univers

En cinquante ans les connaissances dans le domaine de la formation des systèmes planétaires ont progressé, contestant une certaine vision prématûrement unificatrice ; des questions nouvelles sont apparues.

2.1 De la diversité des mondes. Giordano Bruno visionnaire

Né juste après la parution du texte fondateur « Des révolutions des sphères célestes » de Copernic, Giordano Bruno [14] (1548-1600) pousse l'hérésie jusqu'à proposer que toutes les étoiles soient autant de Soleils, donc entourées de terres : cela le conduit à (ré) affirmer la thèse de la « pluralité des mondes », ce qui lui vaut d'être accusé par l'Inquisition, arrêté, jugé et brûlé vif, à Rome, en 1600, 33 ans avant le procès de Galilée ! Dans les décennies puis les siècles qui ont suivi, le développement scientifique a donné de plus en plus de poids à l'universalité des lois et processus qui gèrent la nature, au détriment d'un statut particulier de la Terre, et de la vie qu'elle porte. La Terre, puis le Soleil ne sont pas au centre de l'Univers ; le Soleil lui-même n'est qu'une étoile ordinaire, parmi des milliards de ses semblables, au sein d'une galaxie.

Cette prise de distance d'avec les conceptions où l'homme était au centre de l'Univers, a prévalu jusqu'aux débuts de l'exploration spatiale. Les premières prises de vues, par l'homme, de notre Planète, prises lors de la mission Apollo 8 en 1968, ont alors frappé les esprits, dans la mesure où elles imposaient concrètement « l'image d'un objet banal », flottant comme tant d'autres dans l'immensité du vide spatial. Enfin, depuis 1995, d'autres

systèmes planétaires ont été mis en évidence, dans notre Galaxie même : nous avons tout lieu de penser que leur nombre, au sein même de notre Galaxie, se chiffre également par milliards.

La thèse de Giordano Bruno sur la pluralité des mondes a donc fini par prévaloir dans les milieux scientifiques, sinon dans la culture générale de nos pays. Nous sommes encore largement imprégnés de cette pluralité, au terme de laquelle la vie sur Terre apparaît *a priori* comme un événement susceptible de se reproduire un nombre incommensurable de fois.

2.2 De la pluralité à la diversité

Les fantastiques progrès des moyens d'investigation, à des distances de plus en plus grandes, le fait de pouvoir désormais, observer sur place, ébranlent notre vision des mondes planétaires et des processus à l'œuvre tout au long de leur évolution. Ce qui domine est l'extraordinaire diversité qui les caractérise, et qui tranche avec le fait que tous proviennent de l'effondrement d'un même nuage primordial : en contraste avec l'unicité des points de départ, il existe une incroyable diversité des chemins d'évolution. Cette diversité doit être appréciée comme un phénomène majeur, une diversité fondamentale qui ne dément pas cependant l'universalité des lois gouvernant la nature physique : lois génériques et universelles, effets spécifiques. Tel est le paradigme qu'il faut maintenant avoir à l'esprit ; mais après l'apparition des théories mathématiques sur les systèmes non-linéaires et le « chaos déterministe », un tel paradigme doit-il vraiment nous étonner ?

2.3 Une diversité à toutes les échelles

Cette diversité des histoires fait apparaître chacune d'elles, à partir de situations initiales semblables, comme un cas exceptionnel, comme une accumulation de particularités.

- Aux grandes échelles, les particularités de chaque nuage proto-stellaire. Toutefois, les nuages sont-ils vraiment si particuliers : leurs effondrements peuvent-ils conduire à des séquences distinctes de processus chimiques ? Leurs compositions moléculaires en fin d'effondrement peuvent-elles être très différentes ? La question reste posée, mais concernant l'éventuelle « universalité » du vivant, elle est d'une grande importance. Prenons comme exemple la polarisation circulaire de la lumière, dans le rayonnement ultra-violet du Soleil ; elle est présente semble-t-il très tôt dans l'histoire du Soleil, « avant même qu'il soit parvenu dans la séquence principale ». L'hypothèse a été émise [10] que cette polarisation ait pu favoriser un certain type de chiralité [15] pour les molécules complexes, apparues au sein du nuage dans les glaces agrégées à la surface des grains de poussières ; qu'elle ait pu ainsi être l'un des facteurs de l'homochiralité du vivant. Un tel processus se reproduit-il de façon très fréquente, voire systématique, ou bien est-il au contraire rare ou exceptionnel ?

- En descendant la gamme des échelles spatiales, les particularités de chaque système planétaire. Depuis 1995, plus de 2000 systèmes d'exoplanètes ont été découverts dans notre galaxie. La présence d'un cortège de planètes orbitant autour d'une étoile apparaît désormais comme un fait banal. Mais cette pluralité s'associe à une « diversité insoupçonnée de structures » [8]. Mise en rapport avec le nombre encore limité des observations, elle rend hasardeuses les tentatives pour établir des typologies robustes de ces systèmes ; celui où nous vivons n'apparaît nullement représentatif. A chacun son évolution particulière.
- Enfin, au sein même de notre Système solaire, les particularités des objets qui le composent, pourtant tous nés à partir du même nuage initial ; on peut remarquer notamment « l'extraordinaire spécificité » de notre Terre, comparée aux autres planètes et à leurs satellites : présence des océans d'eau liquide, inexisteante ailleurs, et stabilité de cette couverture océanique, qui s'est maintenue dans une proportion quasi-constante depuis 4.5 milliards d'années... maintien, dont on commence seulement à comprendre les mécanismes ; présence de continents découpant ces océans, et existence d'une tectonique des plaques très active ; existence encore d'une couverture nuageuse restant stable autour de 50 % de la surface, sur de très longues périodes, alors que sur Vénus elle est totale et sur Mars très faible... stabilité dont les raisons nous échappent encore en partie, mais qui est exemplaire de la diversité des chemins d'évolution possibles.

2.4 Une démarche scientifique à deux niveaux

Cet état de fait entraîne une conséquence importante au niveau du travail scientifique : expliquer pourquoi, par exemple, la Terre et Mars sont si différentes. La réponse ne peut se réduire à faire appel à un déterminisme simple. Il faut recenser les processus physico-chimiques en œuvre à chaque période de l'histoire des objets étudiés, évaluer leurs poids respectifs, montrer pourquoi leurs interactions ont pu dévier l'objet, vers telle ou telle vallée du paysage dynamique.

Il faut ainsi effectuer un travail s'apparentant à celui d'un historien, savoir reconstituer étape par étape la trajectoire du système étudié à partir d'un état initial supposé connu : prêter attention à tous les événements, y compris ceux d'origine externe, à tous les aléas qui ont pu en affecter le cours ; ainsi essayer d'expliquer ce qui est arrivé, à partir des conditions initiales, des lois du changement et de la dynamique de l'environnement.

Une telle conception paraît complémentaire de la conception en œuvre dans les recherches sur les lois fondamentales, pour laquelle la science a essentiellement pour tâche la délimitation entre ce qui est possible et ce qui ne l'est pas [1] [7]. Projété dans le présent contexte, un tel objectif reviendrait à cerner les limites de la diversité des formes spécifiques que peuvent prendre les systèmes planétaires et, plus avant, cerner les limites de la diversité des formes pouvant être qualifiées de vivantes. Mais sur ce dernier objectif, peut-être ne dispose-t-on pas encore des outils conceptuels permettant de l'atteindre.

3. De l'évolution du Système solaire et de certaines particularités de la Terre

Concernant l'histoire de notre Système solaire et celle de notre planète, bien des questions demeurent irrésolues. L'espoir est que Rosetta, à la suite des précédentes missions cométaires, apporte de nouveaux éléments, contribuant à trancher entre les différents scénarios avancés. Il est utile de s'y attarder quelque peu, pour bien comprendre l'apport de la mission Rosetta, lorsque toutes les données recueillies auront pu être exploitées.

3.1 Jupiter, Saturne, et la migration des planètes géantes

Notre Système solaire présente une particularité absente dans nombre d'autres systèmes planétaires découverts. Dans ces derniers, des planètes gazeuses massives orbitent en effet à proximité de leur Soleil, après avoir migré en direction de celui-ci, depuis les régions où elles se sont formées : on les appelle « Jupiter chauds ». Dans notre Système solaire, les planètes géantes sont loin du Soleil. N'ont-elles donc pas migré ? Pourquoi auraient-elles échappé à ce processus, qui semble si général ? Est-ce une spécificité de notre Système solaire, qui aurait engendré celle des mondes planétaires, et en particulier de la Terre ? Une toute autre possibilité fait jour actuellement : les planètes géantes du Système solaire auraient également été affectées par le processus de migration, mais dans une forme totalement spécifique : selon un scénario proposé par nos collègues de Nice, la migration de Jupiter et Saturne, vers le centre, ne se serait pas poursuivie jusqu'à son terme. Elle se serait inversée, et cette inversion serait à l'origine de la configuration actuelle.

3.2 Le modèle de Nice

En 2005 en effet, une équipe d'astrophysiciens de l'Observatoire de la Côte d'Azur, sous la direction d'Alessandro Morbidelli, a effectué un ensemble de simulations de la dynamique du Système solaire, à partir d'un modèle connu sous le nom de « modèle de Nice » [16].

Ces simulations partent d'une situation initiale considérée comme plausible : celle d'une époque - environ 150 millions d'années après « l'instant zéro » - où la composante gazeuse du disque proto-planétaire a quasiment disparu, absorbée (antérieurement) par les planètes gazeuses. Les quatre planètes géantes forment alors une configuration plus compacte qu'aujourd'hui et, au-delà de la plus lointaine, s'étend une ceinture de petits corps glacés. Cette situation initiale est quasi stable, tout en évoluant lentement. À un certain moment, une instabilité se fait jour, suite à des ruptures de résonnances orbitales ; cette instabilité perturbe fortement l'ensemble, les planètes géantes partent vers l'extérieur, notamment Neptune, et traversent la ceinture des corps glacés, en provoquant l'éjection d'une grande partie des matériaux rencontrés ; mais, au cours du même processus, une petite partie de ces matériaux glacés migre également vers l'intérieur, vers les planètes rocheuses déjà formées, notamment la Terre et son satellite la Lune, lesquelles font ainsi l'objet d'un bombardement intense. Le processus s'arrête, lorsque l'espace interplanétaire est devenu quasi-vide ; les planètes géantes ont alors rejoint leurs positions actuelles.

Un tel scénario a reçu un accueil très positif, car il explique simultanément « de façon naturelle » plusieurs faits, entre autres [4] [3] : les caractéristiques orbitales actuelles des planètes géantes ; et aussi les datations des roches lunaires rapportées par les missions lunaires Apollo, datations qui ont conduit en effet à l'hypothèse d'un « Grand bombardement tardif », c'est-à-dire survenu environ 700 millions d'années après l'époque où le Système solaire pouvait être considéré comme déjà formé.

3.3 Le modèle du Grand Tack

Cependant, sur ce point de départ, d'autres travaux ont suivi. Citons ici [11] ceux publiés en 2011, par K. Walsh et A. Morbidelli, toujours en lien avec l'Observatoire de la Côte d'Azur. Ces travaux se concentrent sur la première étape de l'évolution, alors que la composante gazeuse est encore partiellement présente, disons entre l'instant zéro et 100 millions d'années, donc sur une période antérieure à celle du modèle de Nice initial.

Les graphiques présentés dans l'article cité montrent clairement la situation initiale de ce « modèle du Grand Tack » ; les planètes géantes s'étagent sur des distances au Soleil entre 3 U.A et 8 U.A. (1 U.A, rappelons-le, est la distance actuelle Terre/Soleil). On distingue alors la zone des petits corps rocheux, pauvres en composants volatils (zone se situant entre 0 et 3 U.A) et celle des petits corps glacés, riches en composants volatils (au-delà de 3 U.A, entre les planètes géantes et au-delà).

Dans une première phase, très courte (300 000 années), Jupiter et Saturne se rapprochent, surtout Jupiter, et grossissent encore un peu, surtout Saturne. Le retournement, « la grande virée de bord », a lieu lorsque ces deux planètes ne sont plus qu'à 1.5 U.A, pour Jupiter et ~ 2 U.A, pour Saturne. Antérieurement au retournement, les migrations vers l'intérieur ont, notamment, comprimé la zone des corps rocheux, qui s'est ainsi trouvée confinée en deçà de ~ 1 U.A.

Dans une seconde phase, après ce retournement, Jupiter et Saturne s'éloignent rapidement du Soleil, repoussant vers l'extérieur les deux autres planètes géantes, Uranus et Neptune. Ces mouvements modifient la distribution spatiale des corps rocheux et des corps glacés, alors que les planètes internes - Mercure, Vénus, la Terre et Mars - achèvent leur formation. A l'issue de cette seconde phase, l'ensemble du système est censé se trouver dans les conditions initiales du modèle de Nice, évoqué précédemment.

Le scénario du Grand Tack s'appuie sur une entrée en résonance de Jupiter et de Saturne, lorsque deux révolutions de Saturne valent trois révolutions de Jupiter. Cette entrée en résonance et le retournement qui en est résulté sont eux-mêmes une conséquence des caractéristiques de l'évolution antérieure des deux planètes, des vitesses respectives auxquelles elles ont accru leur masse et se sont rapprochées du Soleil : si par exemple, à l'époque du retournement, le rapport des masses avait été différent, le destin du Système solaire en eût été changé. Ce scénario fournit, d'une façon complémentaire à celui de Nice, une explication à deux autres faits d'observation : d'une part, la structure actuelle de la population des astéroïdes et des comètes, avec positions, excentricités des orbites, répartition spatiale des différentes catégories ; d'autre part, les

masses comparées de la Terre et de Mars, cette dernière étant beaucoup plus petite (~ 10 %) que la première, alors qu'une accrétion dans un disque homogène aurait conduit à des tailles similaires pour la Terre et Mars.

Les scénarios proposés dans ces modèles sont encore à confirmer. Il faut s'attendre probablement à bien des surprises. Les auteurs consacrent d'ailleurs une bonne part de leur article en annexe (*Supplementary Information*), à une discussion sur différentes variantes envisageables ; ainsi écrivent-ils, « *the scenario presented in the main paper and justified in the previous section is definitely not unique, even among those leading to the required tack of Jupiter at 1.5 A.U.* » Pour autant, ils illustrent comment un phénomène très général, comme la migration des planètes géantes, peut prendre de formes différentes, à l'origine de chemins d'évolution eux-mêmes différents de l'ensemble des planètes de ce système.

3.4 L'origine de l'eau terrestre

Dans l'hypothèse du scénario précédent, où l'accrétion des planètes internes (de Mercure à la Terre et Mars) s'est faite principalement à partir du matériau confiné dans un disque proche du Soleil (< 1 UA), donc composé de matériau essentiellement anhydre, comment et quand est arrivée l'eau présente aujourd'hui dans ces objets ? Les simulations numériques fournissent une réponse très différente de ce qui était considéré auparavant. C'est pendant l'accrétion même de ces objets que des grains venus du système externe, donc chargés d'eau sous la forme de glace, stable à ces distances élevées, se sont mélangés aux grains anhydres du disque interne : l'eau a donc été stockée dans la masse même des objets.

Comment alors a-t-elle pu remonter en surface, pour former, au moins sur Terre, des océans stables dans lesquels, ultérieurement, la vie a pu émerger ?

3.5 La Lune, les océans et la tectonique des plaques

A la fin de la période d'accrétion planétaire, quelques dizaines d'embryons planétaires devaient se trouver dans le système interne, soumis à des collisions parfois violentes. Ces impacts géants - voir par exemple [6] - ont joué un rôle majeur sur l'évolution ultérieure de ces objets. Un grand nombre d'entre eux ont tout simplement été détruits. La Terre a, semble-t-il, été frappée par un objet de masse supérieure au dixième de sa propre masse. La géométrie de cet impact a été critique pour les effets induits sur la Terre. De cet impact est né un disque de matière circumterrestre, au sein duquel la Lune s'est formée, dans un rapport de masse à la Terre suffisamment élevé pour avoir joué un effet gravitationnel majeur sur l'évolution ultérieure de la Terre, et en particulier de son climat : c'est à la Lune que l'on doit la stabilisation de l'angle (voisin de 23,3°) de son obliquité, angle qui fait l'axe de rotation diurne de la Terre par rapport au plan de sa révolution annuelle (écliptique). Sans la Lune, cet axe aurait subi des oscillations chaotiques, entraînant des changements climatiques extrêmement marqués, mettant en cause jusqu'à la stabilité des océans terrestres. Cet impact a chauffé l'ensemble de la Terre en un magma de plusieurs milliers de degrés, dont le refroidissement, par sa contraction, a repoussé l'eau vers la surface. Une partie est restée dans le manteau, assurant une viscosité à l'origine de la tectonique de

plaques très particulière qui s'y déroule ; une partie est remontée jusqu'à la surface, où les conditions atmosphériques, héritées en particulier de l'impact géant, correspondent au domaine de stabilité de l'eau liquide : les océans terrestres sont vraisemblablement stables depuis lors. Au total, la « géométrie particulière » du choc survenu aurait constitué un déterminant majeur de l'histoire terrestre, telle que nous la connaissons.

Références

- [1] de Duve Christian, « Singularités, jalons sur les chemins du vivant », Odile Jacob, 2005.
- [2] Deutsch David, Constructor Theory *Synthese* (2013) 190:4331-4359.
- [3] Gomes R., Levison H. F., Tsiganis K., & Morbidelli A. Origin of the cataclysmic Late Heavy Bombardment Period of the terrestrial planets *Nature* (2005) volume 435, 466.
- [4] Tsiganis K., Origin of the orbital architecture of the giant planets of the Solar System *Nature* (2005) Volume 435, 459-461.
- [5] Hartogh et al. Ocean-like water in the Jupiter-family comet 103P/Hartley 2 *Nature* (2011) Volume 478, Issue 7368, 218-220.
- [6] Jacobson Seth A., Morbidelli Alessandro et al. Highly Siderophile Elements in Earth'Mantle as a Clock for Moon forming Impact. *Nature* (2014) Volume 508, Issue 7494 84-87. <http://arxiv.org/abs/1504.01421>. Il existe toute une littérature sur ce sujet. Nous avons choisi celui-ci pour être en relation l'équipe de Nice.
- [7] Kastler Alfred, « Cette étrange matière » Stock, 1976 pages 156-157.
- [8] Mayor Michel, L'étonnante diversité des planètes extrasolaires, conférence de Michel Mayor à l'Académie des Sciences, 15 juin 2010.
- [9] Morbidelli Alessandro et al. Highly Siderophile Elements in Earth'Mantle as a Clock for Moon forming Impact. *Nature* (2014) Volume 508, Issue 7494 84-87. arXiv:1504.01421.
- [10] Modica Paola, Meinert Cornelia et al. Enantiometric excesses induced in amino acids by ultraviolet circularly polarized light irradiation of extraterrestrial ice analogs: a possible source of asymmetry for prebiotic chemistry. *The Astrophysical Journal* (2014), 788, 79.
- [11] Walsh Kevin, Morbidelli Alessandro et al. A low mass for Mars from Jupiter'early gas-driven migration. *Nature* (2011) Vol 475, Issue 7355, 206-209 <http://arxiv.org/abs/1201.5177>.
- [12] http://fr.wikipedia.org/wiki/Expérience_de_Miller-Urey
- [13] http://fr.wikipedia.org/wiki/horizon_2000
- [14] http://fr.wikipedia.org/wiki/giordano_bruno

[15] [http://fr.wikipedia.org/wiki/chiralit%C3%A9_\(chimie\)](http://fr.wikipedia.org/wiki/chiralit%C3%A9_(chimie))

[16] http://en.wikipedia.org/wiki/nice_model

[17] <http://www.cnes.fr/web/CNES-fr/11305-rosetta-rendez-vous-avec-la-comete-churyumov-gerasimenko.php>

[18] <http://www.cnes.fr/web/CNES-fr/11607-gp-rosetta-rosina-et-l-eau-de-la-terre.php>

[19] <http://www.cnrs.fr/cw/dossiers/doseau/decouv/cycle/eauMantTerr.html>

La discussion

Suite à l'exposé, une riche discussion a pris place, portant sur divers points, techniques, scientifiques et programmatiques. Nous détaillons ici certains d'entre eux, dans l'ordre de leur apparition. On peut consulter sur quelques-unes des questions abordées le blog de Rosetta [17] du CNES, dont nous avons repris, en complément, certaines informations.

Points techniques

I. Une première question a concerné le récent problème, déjà évoqué, rencontré dans la trajectoire de Rosetta.

Rosetta dispose de capteurs stellaires - les *star-trackers* - lui permettant de mesurer les positions angulaires d'un ensemble d'étoiles, et de les apprécier par rapport à la position de la comète toute proche. Elle connaît ainsi son orientation, donc celle de ses antennes de communication, et *in fine* sa position et sa trajectoire. Le survol programmé de la comète l'a fait passer à 16 km du noyau. C'est alors qu'un incident est survenu : un arrêt des capteurs, entraînant une sortie de la trajectoire calculée, et un risque de perte de la communication avec la Terre. L'hypothèse pour expliquer cet incident est qu'à cette courte distance (16 km) de la comète et à cet instant, de la vapeur ou des débris divers, issus du matériau cométaire par dégazage, ont brouillé les capteurs de Rosetta. Une procédure de sauvegarde, de « mise en sécurité », s'est mise alors automatiquement en place, orientant les panneaux solaires en direction du soleil, et attendant des commandes venues du sol. Les capteurs ont finalement pu redémarrer et l'équipe a pu reprendre le contrôle de la trajectoire de Rosetta. Se posait alors la question du choix de la nouvelle distance à maintenir entre l'orbiteur et la comète. Or, au fur et à mesure que la comète se rapproche du Soleil, son activité devient de plus en plus forte et les risques de brouillage augmentent. Aussi a-t-il été décidé, pour le moment, de fixer par prudence Rosetta dans une trajectoire pyramidale, à une distance de 80 à 100 km, plus grande que celle qui prévalait auparavant.

2. Une seconde question a concerné les modalités de communication entre Philae et Rosetta et entre Rosetta et la Terre : dimensions des antennes, puissances émises, puissances reçues à ces grandes distances, débits permis en kbits/s.

Cette question amène à donner plusieurs précisions techniques : d'abord, à 500 millions de km, le signal met environ une demi-heure pour parvenir à destination ; la puissance d'émission du robot Philae est de quelques watts. Le dispositif de communication entre le robot et Rosetta est prévu pour maintenir un débit de 10 kilo-bits par seconde jusqu'à une distance de 250 km ; les antennes de Rosetta pointées vers la Terre, hémisphériques d'environ 2 mètres, ont une puissance de l'ordre de plusieurs centaines de watts ; les antennes au sol sur Terre (antennes de 15 mètres et 35 mètres - antenne ESA de Cebreros en Espagne) sont, bien entendu, beaucoup plus puissantes (plusieurs kilo-watts) ; elles sont directives, mais malgré cette directivité, compte tenu de la distance, une toute petite partie de cette puissance est reçue par Rosetta : ce ne sont pas des lasers !

3. Un des participants s'est ensuite interrogé sur la conception et la maintenance des logiciels, un voyage si long, une dizaine d'années, lui paraissant impliquer des mises à jour en cours de route.

Effectivement, tout ne peut être figé au départ : le logiciel a bien la capacité d'être modifié, mais seulement à la marge, sur des tables de paramètres, ou des « patchs ». Il faut se rappeler que le débit est limité et qu'on ne peut pas passer d'énormes trains de commandes. Il a fallu cependant rafraîchir parfois les logiciels pilotant certains instruments. Pour ces modifications, on a souvent profité de moments particuliers du voyage, où Rosetta se trouvait plus proche de la Terre.

Questions de science

4. Un participant est revenu sur la question de la diversité des trajectoires des systèmes planétaires et des objets qui les composent. La constatation, sur Terre, de la présence d'êtres vivants dans des milieux pouvant être très différents, ne fournit-elle pas un argument pour l'hypothèse du caractère non-exceptionnel de la Vie, sa capacité à émerger dans les situations les plus diverses, dès lors que ces situations partageraient certaines caractéristiques globales ?

La réponse est que l'on ne connaît pas le degré de robustesse de la Vie, pour la raison que, fondamentalement, on ne sait pas définir précisément ce qu'est la Vie ; en conséquence, on ne sait pas caractériser les conditions dans lesquelles elle peut apparaître et s'adapter. À la racine de cette méconnaissance, réside peut-être le fait que nous ne disposons pas encore des concepts qui nous permettraient de progresser vraiment sur ces questions. Quoi qu'il en soit, le fait que l'on trouve sur Terre, des formes de vie - y compris, pour nous, dans des conditions « extrêmes » - ne démontre pas que la Vie possède un degré de robustesse, tel que le « passage de l'organique au vivant » se produise quasi inévitablement. Cette diversité terrestre procède d'une souche unique, d'une seule et même racine, à partir de laquelle l'arbre adaptatif s'est développé. Les formes de vie extrémophiles ne sont pas nécessairement apparues dans les milieux où elles sont observées aujourd'hui, elles s'y sont adaptées, en venant éventuellement d'ailleurs. Mentionnons ici l'un des processus ayant favorisé cette extension dans le temps et l'espace terrestre : la capacité de certains êtres vivants à prendre des formes « dormantes », leur permettant d'attendre - y compris pendant de très longues périodes - des conditions favorables à la reprise de leur métabolisme et de leur reproduction.

Ces faits ne démontrent pas non plus que la vie ne puisse exister ailleurs ; et de citer les projets concernant la recherche de traces fossiles d'une vie sur Mars. Si, en effet, dans le Système solaire, la vie est apparue ailleurs que sur la Terre, « c'est probablement sur Mars » ; les endroits les plus favorables, sur lesquels ces recherches porteront dans les missions en préparation, ont même pu être identifiés.

Les raisons qui nous amènent à insister sur ces points sont les suivantes : savoir, le sentiment que le balancier est peut-être allé trop loin, dans la prise de conscience de « la pluralité des mondes », pluralité incontestablement, mais de mondes dissemblables, vue la très grande disparité des chemins de l'évolution. Rappelons à ce propos les hésitations concernant la thèse de la « croissance de la complexité », conçue comme une loi d'évolution univoque, en œuvre dans notre univers.

5. Un autre participant revient sur les objectifs recherchés des missions spatiales comme celle de Rosetta et, plus directement, sur l'interrogation : « quelles sont les questions pour lesquelles vous attendez des réponses ? ».

Cette intervention amène à préciser à nouveau certains points, avec toujours la même idée centrale, celle de la compréhension de ce fait majeur qu'est la diversité ; en exergue, la conviction « qu'une bonne recherche est une recherche qui montre qu'on avait mal posé la question ». Ce qui est important, c'est « de comprendre les processus qui sont la clé de ces chemins d'évolution si différents, à toutes les échelles » ; comprendre ainsi les processus qui font que la Terre est devenue la Terre, que Mars est devenue Mars, etc. Il faut s'interroger sur la pertinence de notions générales, comme celle d'habitabilité par exemple, pourtant souvent mise en avant dans la vulgarisation des recherches sur les exoplanètes. La caractérisation des processus, aboutissant au fait qu'une planète soit habitée, ne se réduira jamais à la donnée de quelques grandeurs globales la qualifiant d'habitabile. Cette conviction naît de la constatation que « plus on découvre, plus ça diverge ». Pour aboutir à cette compréhension, une condition semble nécessaire : une remise à plat de nos conceptions du vivant.

6. Vient ensuite une question concernant le taux de Deutérium dans l'eau des glaces de Rosetta. Des mesures effectuées en août et septembre 2014 par l'instrument Rosina (voir le blog du CNES du 12 décembre 2014) [18] ont montré que le rapport D/H sur la comète était trois fois plus élevé que celui des océans terrestres. Ce rapport exclut-il une origine cométaire pour l'eau de nos océans, en favorisant à l'inverse une provenance liée aux astéroïdes, riches en matériel hydraté, telles certaines chondrites carbonées.

Il faut garder une certaine prudence face à une telle conclusion. L'eau provient bien d'un même matériau de départ ; viennent ensuite différents processus incorporant cette eau, avec des rapports D/H spécifiques, dans différents types de corps du Système solaire, planètes, astéroïdes et comètes. Privilégier un chemin - en l'occurrence un apport majoritaire d'eau océanique lors de l'accrétion primitive ou lors d'un bombardement secondaire par des astéroïdes - paraît encore prématuré.

7. Un participant s'interroge sur la parenté entre les composés organiques cométaires et ceux présents dans les nuages interstellaires avant leur effondrement.

Certes il y a une parenté, mais le fait important est qu'il existe une très grande différence de conditions, entre de tels nuages et le milieu présidant à la formation des comètes,

différences de densité, de turbulence, de température, d'intensité de rayonnement. Entre ces deux extrêmes prend place, au cours de l'effondrement, toute une chimie complexe - associant molécules et ions - laquelle soumise aux rayons cosmiques se trouve favorisée par la présence des grains de poussières et par les processus de surface qui peuvent s'y dérouler. Au bout du compte, les molécules carbonées présentes dans les nuages ne comprennent qu'un petit nombre d'atomes de carbone, alors que dans les comètes on peut trouver des composés comprenant plusieurs millions d'atomes.

Cette chimie est largement inconnue et difficile à reproduire. La radioastronomie fait cependant espérer reconnaître, à différentes étapes de la dynamique des nuages, la présence de certains composants bien identifiés. On peut alors, sur cette base, envisager des simulations qui permettront d'avoir une vue d'ensemble des processus.

8. Une autre question évoque les calculs visant à circonscrire les probabilités de telle ou telle trajectoire, de tel ou tel type de système planétaire, in fine la probabilité d'une vie « extraterrestre ».

Après tout ce qu'a été dit auparavant on ne s'étonnera pas de la réponse, à savoir que souvent ce type de calcul est sous-tendu par un *a priori*, un présupposé basé sur le raisonnement implicite suivant : la vie existe ailleurs avec une fréquence qui n'est pas infinitésimale ; il ne peut en être autrement vu la pluralité des mondes ; donc, une évaluation de la proportion de systèmes dans lesquels la vie est présente est possible par des raisonnements globaux. Or, là se trouve la question ; car comment quantifier en probabilité, par exemple, les combinaisons de facteurs qui ont conduit la Terre à être ce qu'elle est : facteurs telle que l'existence de la Lune, avec son rôle stabilisateur dans l'inclinaison de l'axe des pôles sur l'écliptique, assurant par là une certaine stabilité climatique. On peut évoquer un autre facteur, celui de la stabilité globale de la couverture nuageuse, constatée autour de 50 % de la surface totale. Or, on ne connaît pas vraiment la raison de cette stabilité, la combinaison des processus à l'œuvre pour la maintenir : comment alors quantifier la probabilité de retrouver « la même chose ailleurs » ?

9. Une dernière question concerne la radioactivité de la comète.

Cette radioactivité est présente nécessairement, mais elle n'est pas encore mesurée ; elle existe en effet, à cause du potassium 40 présent dans la comète comme dans tous les corps du Système solaire. Le rapport surface/volume de la comète fait que l'énergie produite (à raison de 10^8 watts/m³) est suffisamment dissipée, pour que la température de ce « radiateur cométaire » reste basse, et que la stabilité de la glace soit assurée.

Pour conclure

Le titre de ce livre fait référence à deux thèmes : « Formation des systèmes stellaires et planétaires » et « Conditions d'apparition de la vie ». Il s'agit clairement de deux sujets fondamentaux. Récemment, grâce notamment aux moyens technologiques disponibles, des progrès significatifs ont été apportés à leur connaissance et des liens étroits les ont réunis.

Le but de cet ouvrage est d'offrir, d'une part, un vaste panorama des connaissances actuelles et, d'autre part, un aperçu des questions posées, des expériences en cours, des espoirs, ...

Nous vivons une période riche en réponses qui soulèvent bien souvent plus de questions qu'elles n'en résolvent. C'est le plus souvent le lot de la recherche scientifique.

Le livre présenté ici remplit parfaitement la fonction qui lui a été assignée, à savoir :

- a) Faire connaître au plus haut niveau scientifique les avancées prodigieuses réalisées, au cours des deux dernières décennies, dans le domaine de l'Astrophysique et de l'Astrochimie ;
- b) Faire connaître, de ce fait, les équipes françaises qui occupent des positions éminentes dans la science internationale ;
- c) Permettre dans le même temps à un lecteur non spécialiste, mais averti dans le domaine des sciences, une lecture agréable et aisée et de très bon niveau dans un domaine pluridisciplinaire complexe.

Notre espoir est d'intéresser au plus haut point les jeunes aux sciences.

Mais ce livre répond également aux critères caractéristiques de ce qu'il convient d'appeler la recherche scientifique : un chercheur pose une question, conçoit et réalise les expérimentations capables, selon lui, de répondre à cette question, mais très souvent, la réponse n'est pas celle qu'il attend. Ce n'est pas un échec, au contraire, car de nouveaux horizons s'ouvrent, de nouvelles questions se posent et un jour, après une synthèse, la réponse apparaîtra....

Il en est de même pour ce livre : conçu et publié pour répondre à des questions principalement d'astrophysique et d'astrochimie, le lecteur attentif verra que ce livre est sous-tendu par le problème de la vie et de son apparition dans notre Système solaire.

Il nous revient en mémoire la discussion à la fin du colloque aeis-2014 qui a donné naissance à ce livre, la réticence qu'ont eue plusieurs des intervenants à aborder la définition de la vie, et on les comprend bien, dans l'optique de l'existence éventuelle d'autres formes de vie dans notre vaste univers.

Afin de détecter éventuellement de la vie sur Mars au moyen du robot-véhicule Discovery, les américains ont équipé ce robot d'un appareillage basé sur la chemiluminescence pour pouvoir détecter de façon très spécifique de l'ATP (adénosine tri phosphate). En effet, quelle que soit la façon dont un être vivant sur terre va produire l'énergie qui lui servira à maintenir ses structures et à se multiplier (oxydation de composés hydrogénés par l'oxygène, ou simplement transfert d'électron d'un donneur à un receveur), cette énergie est mise en réserve dans une molécule ubiquitaire présente chez tous les êtres vivants, à savoir l'ATP. Qu'est-ce d'autre qu'une définition de la vie par la pratique ?

A côté de disciplines telles que l'astrophysique et l'astrochimie, fort intéressantes par ailleurs, on y trouve bien sûr le problème de la vie. Le responsable scientifique de la mission ROSETTA / PHILAE, Jean-Pierre Bribing dit à propos de cette mission, qu'elle est « ...une occasion de plonger dans l'histoire des explorations spatiales en direction des comètes et de leurs objectifs scientifiques, de revisiter la question des conditions d'émergence de la vie, **question au centre du colloque AEIS 2014** ».

Quoi qu'il en soit, la recherche sur l'espace continue et s'amplifie non seulement sur Mars, mais aussi sur Pluton et sur Encelade qui semblent aussi contenir de l'eau liquide dans leurs sous-sols. Thérèse Encrenaz nous le rappelle dans son article, autant à l'aide de robots déposés, qu'avec des spectrophotomètres performants depuis la terre. Cette auteure parle d'ailleurs d'une nouvelle discipline scientifique qui est en train de naître : la planétologie. Et là aussi la biologie (la recherche sur la vie) aura un rôle très important.

On peut aussi relever au cours d'une lecture attentive que sitôt les éléments formés lors du big-bang, on constate leur capacité à se lier, à s'agréger, à former des amas de plus en plus denses, et que, selon l'environnement, les composants néoformés sont divers (pour les molécules complexes selon les grains de poussière sur lesquels la chimie de carbone, de l'oxygène et de l'azote va s'effectuer). E. Di Mauro nous dit bien comment la polymérisation sans moule des polynucléotides se produit par ce qu'il appelle, la propriété de Stacking, et cela se passe aussi pour l'accrétion des nuages interstellaires dont nous parlent Patrick Hennebelle et Nicolas Prantzos.

On doit alors concevoir la chimie de façon différente de celle qui nous a été enseignée : cette complexification serait donc une propriété intrinsèque de la nature ? Quels champs de réflexion et/ ou d'expérimentations cela ouvre !

Enfin, une lecture linéaire de ce livre nous montre que l'ensemble des thèmes traités suit une logique pressante qui, à bien y regarder, permet de manière cohérente des synthèses aux différents niveaux.

La première partie (formation de systèmes stellaires et planétaires) est un parcours complet. On passe de l'origine des éléments chimiques par nucléosynthèse (Nicolas Prantzos) à leurs assemblages aboutissant à la formation des étoiles (Patrick Hennebelle), à la complexité (justement définie «étonnante») et diversité des systèmes planétaires (Alessandro Morbidelli, Thérèse Encrenaz) jusqu'aux aspects clés, du point de vue de la vie, constitués par l'origine, la distribution et la dynamique des multiples interactions de cette molécule clé qui est l'eau (Francis Albarède). L'épaisseur des progrès récents sur ces sujets est telle que le cadre qu'on arrive à en tirer est satisfaisant : on «voit» la route qui amène de la naissance des atomes à leur organisation en macrosystèmes.

L'eau revient souvent dans les textes, et fort justement. Car si on peut tirer –dès les études sur la distribution de l'eau dans le Système Terre-Lune (Francis Albarède)– un cadre clair et détaillé, son rôle dans l'origine de la vie peut être considéré à partir de points de vue différents. De l'exposé de Giuseppe Zaccai, il résulte d'une part de manière claire que l'eau, et les aspects physico-chimiques de ses interactions avec la matière vivante dont elle est partie intégrale, règle les interactions entre génotype et phénotype. D'autre part, elle ne joue pas un rôle prédominant dans les synthèses prébiotiques des matériaux de base qui –dans les études de Raffaele Saladino– peuvent accepter la présence de l'eau, mais peuvent aussi bien s'en passer. Et en effet les racines prébiotiques plus profondes –celles qui impliquent les premières polymérisations, la première création d'information génétique– envisagent un monde organique où l'eau n'est pas vraiment nécessaire. La vie sur la Terre a peut-être bien eu des moments initiaux purement organiques ; puis l'eau a pris les rênes.

Voilà un point unifiant qui mérite encore des travaux. Est-ce qu'on peut imaginer des systèmes dans lesquels informations génétiques et cycles métaboliques se forment, interagissent et transmettent l'information de cette série définie d'interactions (à savoir : la vie) sans eau ?

L'ensemble des thèmes examinés dans la deuxième partie «Les briques de la vie primitive et les environnements planétaires» nous dit avec une facilité toute relative que l'on peut faire des découvertes importantes dans ce domaine, aujourd'hui !

On se penche sur un panorama nouveau, on fouille un terrain presque vierge. On trouve qu'il est important de tracer les modèles du passage de l'Astrochimie à l'Astrobiologie (Louis Le Sergeant d'Hendecourt) et faire des modélisations chimiques du milieu interstellaire (Valentine Wakelam) tout en traçant les règles pour arriver à la question centrale : quel est le point de passage entre chimie et vie ?

Et il est réconfortant que ces règles esquissées trouvent des réponses expérimentales dans les analyses de la matière de Murchison (Sylvie Derenne et Francois Robert), dans les premiers résultats de la Mission Rosetta/Philae (Jean-Pierre Bribing/Jean-Pierre Treuil), et dans les synthèses prébiotiques obtenues à partir de composés à un seul atome de carbone (Raffaele Saladino).

La vie aurait-elle des racines profondes dans le cosmos ? Cette question entraîne que l'on sache de quoi l'on parle : qu'est-ce qu'on peut définir en tant que «vie». La réponse naturellement manque et à la fin des discussions et de la lecture, on se rend compte que la vie peut être décrite mais non définie. Cela nous aide à nous focaliser sur la vie que nous connaissons : les extrémophiles (Pierre Nabet) et les règles qui gouvernent morphogenèse et embryogenèse (Martine Ben Amar) sont ici traitées comme système-modèle. On voudrait en savoir plus : deux systèmes-modèles ne résument pas la vie. Mais ils sont bien choisis.

La lecture de l'ensemble, sa métalecture, nous enseigne que l'origine des éléments importants est la même partout dans l'Univers, et que la chimie du Carbone est la même ici sur la Terre qu'aux frontières ultimes (si elles existent) et que donc ce qu'on cherche (et décrit) dans le Système solaire est valable partout. Alors, oui : les racines sont profondes, quoique les extrémophiles, c'est peut-être nous, gâtés, organismes hydro-méso-philes qui profitons d'une niche tout à fait spéciale en un moment autant spécial, et qui nous posons cette question.

Bien que des certitudes soient progressivement acquises –la lecture de cet ouvrage nous y conforte– nous sommes encore face à des questions pour lesquelles nous n'avons que des réponses partielles, ou provisoires. Il arrive même que la communauté scientifique tarde à s'accorder sur la portée de résultats acquis.

Quelle est la source majeure des nucléosynthèses ? Nuages primordiaux à haute température ? Etoiles en formation ? Supernovae par effondrement d'étoiles géantes rouges ?

La masse de fer qui se trouve dans le noyau terrestre a-t-elle été acquise dans le nuage primordial qui s'est effondré en donnant le Système solaire ? Et cette matière initiale possédait-elle des éléments lourds provenant exclusivement d'explosions supernovae ?

Comment le couple Terre-Lune s'est-il formé ? Si l'on accorde l'idée de l'impact géant, peut-on imaginer de trouver des traces qui attesterait l'hypothèse de l'impacteur ?

Des hypothèses avancent l'idée que l'eau terrestre a été apportée par les impacts de multitudes de comètes. Ce que l'on sait de l'histoire du Système solaire ne priviliege-t-il pas la présence permanente d'eau sur Terre, explicitement posée par Thérèse Encrénaz et soutenue par les mesures isotopiques de François Robert ?

Enfin, la vie sur Terre vient-elle d'ailleurs, ou a-t-elle une origine endogène, terrestre ? Si les molécules prébiotiques se forment très aisément dans tout l'univers, pourquoi ne se seraient-elles pas formées préférentiellement sur la Terre ? C'est l'hypothèse majeure initiée par Christian de Duve, qui priviliege le contact des

effluents des failles volcaniques avec l'eau des fosses océaniques. Il ajoute que, si les conditions qui ont produit la vie sur Terre se trouvent rassemblées à une autre époque et en un autre lieu, alors une autre histoire d'apparition de vie a pu, peut ou pourra se produire. C'est sur cette idée simple que se fonde la recherche de vie extraterrestre.

Pour évaluer les probabilités de cette apparition, il convient d'analyser d'abord les conditions *sine qua non* de ces successions de phénomènes. Ces conditions peuvent résulter de l'analyse, appuyées sur l'histoire de la Terre, de sa formation, de sa géologie, de sa paléontologie. Elles peuvent aussi être expérimentées.

Les résultats expérimentaux extraordinaires obtenus à ce jour permettent d'imaginer que les laboratoires arriveront, dans un avenir peut-être pas très éloigné, à produire du vivant. Mais il n'est pas certain pour autant que le modèle que nous pourrons en tirer nous donnera des conjectures sur le déroulement des événements qui ont produit l'avènement de la vie terrestre.

Nous savons bien, aussi, que l'évolution est une histoire, qu'elle aurait pu être différente, qu'elle a eu des phases multiples depuis la formation de ce que nous appelons « l'ancêtre commun », qui est une hypothèse généralement admise, mais que nous ignorons si, avant cet « ancêtre commun », qui date de 670 millions d'années pour les êtres multicellulaires, mais sûrement à près de 4 milliards d'années pour les bactéries, la Terre a connu ou non des apparitions de cellules vivantes dans différents lieux, à différentes époques, dans différentes conditions de température, de pression, et de concentrations d'éléments.

Ernesto Di Mauro, par exemple, de toutes les définitions qui ont pu être données de la vie, donne la préférence à « l'identité ». Cette option pourrait privilégier l'hypothèse d'une entité primordiale, dotée de capacités à gérer une thermodynamique hors d'équilibre, par exemple, une membrane assurant une interface entre son intérieur et son environnement, avec des arrangements moléculaires que la physique interprète comme une diminution d'entropie aux dépens de son environnement. Il s'agit essentiellement de phénomènes créant de l'ordre par des structurations internes. On peut donc voir, dans cette hypothèse, le principe d'individuation qui se manifeste particulièrement chez les animaux, et qui, chez l'homme, accomplit la personne.

Mais une membrane ne fait pas la vie que nous connaissons sur Terre. Ernesto Di Mauro nous montre que la vie terrestre a inventé simultanément le métabolisme et la génétique. C'est-à-dire à la fois l'œuf et la poule ; Lucrèce nous a transmis sur ce point la pensée d'Épicure : rien ne peut venir de rien. L'œuf et la poule sont consubstantiels. Cette réflexion philosophique, toujours encadrée par les données scientifiques, peut conduire à une dialectique complexe qui lie la causalité au hasard sous le contrôle du « constat ». C'est tout notre schéma mental, scientifique, qui est en jeu ici. La causalité est le résultat de notre conception scientifique fondamentale.

C'est la thermodynamique qui nous permet de représenter la dynamique de la nature. Le hasard, c'est le mot, assez vide de sens, par lequel nous désignons les concours de circonstances, rencontres de lignes causales tellement nombreuses et complexes que nous ne pouvons les prendre en charge que globalement, par des évaluations probabilistes. Enfin, le constat représente notre recours à la nature, non pour y trouver des vérités, mais pour conforter notre vision.

Et c'est toujours par l'examen minutieux, exigeant, des phénomènes naturels que les scientifiques échafaudent des modèles et des théories. Cette induction a des conséquences puissantes, puisqu'elle produit des représentations intelligibles, qu'elle apporte des explications, et, enfin, prodige de la puissance de la théorie, permet des prédictions.

Le comité de lecture¹ de l'AEIS

¹ Gilbert Belaubre (Ingénieur du Corps des Manufactures de l'État), Ex-Président de l'AEIS, membre du comité de lecture

Ernesto Di Mauro (Université de Rome/La Sapienza), membre du comité de lecture

Pierre Nabet (Université de Lorraine/Nancy), Président de la section de Nancy de l'AEIS, membre du comité de lecture

Jean Schmets (Université de Liège), membre du comité de lecture

Glossaire et Acronymes

Glossaire

- **Albedo** : pouvoir réfléchissant (du latin : blancheur). C'est le rapport de la lumière réfléchie à la lumière incidente.
- **Conditions viriales (ou virielles)** : (du latin vis : force) concerne l'énergie cinétique totale d'un système. Cette énergie cinétique est liée à la masse. La notion de viriel a été introduite par Clausius. C'est l'application de cette notion aux effets gravitationnels des galaxies qui a permis de détecter des anomalies profondes qui ont suscité l'hypothèse de la matière noire et de l'énergie sombre.
- **Éléments** : Les éléments chimiques sont désignés par leurs symboles chimiques du tableau de Mendéléïev. On donne en général un rang dans ce tableau, dit Numéro Atomique, correspondant au nombre de protons (ou d'électrons) de chaque élément, en portant ce nombre à gauche et en bas du symbole. On donne aussi la masse atomique exprimée, à peu de chose près, par la somme des protons et des neutrons du noyau de l'élément, en la portant à gauche et en haut du symbole. Par exemple pour l'hélium 4 : ${}_2^4\text{He}$
- **Fonction de Masse Initiale (FMI), (IMF en anglais)** : fonction empirique qui décrit la répartition des masses initiales pour une population d'étoiles.
- **ISM (Inter Stellar Medium)** : désigne la matière qui existe dans l'espace entre les étoiles d'une galaxie
- **Masse de Jeans, rayon de Jeans, longueur de Jeans** : en référence aux travaux de Sir James JEANS, physicien anglais qui a étudié l'effondrement gravitationnel au sein d'un nuage gazeux.
 - Masse de Jeans : masse minimale, à température et masse volumique données, pour que le nuage commence son effondrement.
 - Longueur de Jeans : longueur au-delà de laquelle le nuage stellaire s'effondrera.
 - Rayon de Jeans : rayon minimal pour qu'une sphère de masse donnée soit stable.
 - Temps de chute libre : c'est le temps mis par un nuage de masse M pour s'effondrer lorsque aucune autre force que la gravitation n'intervient.
- **Masse Solaire (MS)** : environ 330 000 fois celle de la Terre.

■ **Parsec** : distance à laquelle une Unité Astronomique perpendiculaire au plan de visée est vue sous un angle d'une seconde d'arc.

- L'unité astronomique est la distance moyenne de la Terre au Soleil, soit à peu près 150 Mkm.
- Le parsec vaut environ 3,2 années-lumière, ou encore $3,08 \times 10^{16}$ m.

■ Température : notation

- C : degré Celcius, ou centigrade, utilisé dans le monde entier, sauf monde anglo-saxon.
- K : degré Kelvin ou degré « absolu ». Zéro K (0 K) est la limite basse de l'agitation moléculaire. Le Zéro K correspond à -273° C. On note, par exemple, 200 MK pour deux cents millions de degrés Kelvin.

Acronymes

■ **ARIEL** (ESA-M4 ARIEL) : Atmospheric Remote-sensing Infrared Exoplanet Large-survey.

■ **CHEOPS** (CHaracterising ExOPlanets Satellite) : petit satellite suisse, télescope de 30 cm, très précis, lancement en 2017.

■ **ECHO** (Exoplanet CCharacterisation Observatory) : projet européen destiné à l'exploration des exoplanètes, lancement en 2022.

■ **ISO** (Infrared Space Observatory) : projet MIT ; petits télescopes en vue du traitement par télescope géant infrarouge JWST, lancement en 2017.

■ **NGTS** (Next Generation Transit Survey) : système formé de 12 télescopes installés au Chili.

■ **PLATO** (PLAnetary Transits and Oscillations of stars) : satellite comportant 32 télescopes, lancement en 2024.

■ **TESS** (Transiting Exoplanets Survey Satellite).

■ **TPF-I** (Terrestrial Planet Finder Interferometer).

■ **VLT** (Very Large Telescope) : télescope géant, projet européen, installé dans les Andes chiliennes, doté de 4 télescopes de 8,2 m de diamètre, plus 4 télescopes auxiliaires, destiné à la prospection des galaxies et des étoiles de la Voie lactée, opérationnel depuis 2012.

Annexe 1

Origine du rayonnement stellaire

Les étoiles sont visibles parce qu'elles sont le siège de réactions thermonucléaires.

Ces réactions consistent en la formation, à partir d'éléments légers, d'éléments plus lourds, et cette transmutation est fortement exothermique ; l'énergie produite est rayonnée dans l'espace et c'est elle qui rend les étoiles lumineuses.

Dans l'Univers primordial, les éléments successifs du tableau de Mendeleïev ont été certainement formés. Mais l'hydrogène reste l'élément le plus important (90 %). C'est la transformation de l'Hydrogène en Hélium qui, au sein des étoiles, se produit à une température de l'ordre de 10 MK (dix millions de degrés) et qui dégage une énergie que l'étoile expulse sous forme de rayonnement.

C'est le Physicien Hans Bethe qui a donné son nom aux deux cycles qui produisent l'énergie de radiation des étoiles.

I. Le premier cycle de Bethe

Le cycle de Bethe pour les étoiles de masse égale ou inférieure à celle du soleil est dit « cycle proton-proton ».

Nous désignerons ci-après les atomes par leurs symboles (H, He, Si, etc.), accompagnés de leur numéro atomique (nombre d'électrons et de protons, à droite du symbole)

et de leur masse atomique (cette masse est très proche du nombre de protons et de neutrons du noyau et c'est ce nombre que nous donnons, à gauche du symbole). Ex : ^1H pour l'Hydrogène, ^2H pour le deutérium, etc. Deux atomes d'Hydrogène ^1H s'associent pour donner un atome de Deutérium ^2H , un proton étant transmuté en neutron par émission d'un positron. Puis cet isotope s'unit à un atome d'Hydrogène pour donner un isotope de l'Hélium, $^3\text{He}^2$. Enfin, deux $^3\text{He}^2$ s'unissent pour former un atome d'Hélium $^4\text{He}^2$, en restituant les deux ^1H de la deuxième phase.

Cet ensemble de réactions est fortement exothermique. L'énergie dissipée par notre Soleil provient de cette « fusion » de l'hydrogène.

Notons que cette fusion thermonucléaire est celle de la bombe H. Elle se produit à une température de 10 MK environ, obtenue dans la bombe H par amorçage par une bombe atomique à l'Uranium, dite bombe A. Le projet de maîtriser cette source d'énergie est le projet ITER.

2. Le deuxième cycle de Bethe

Dans les étoiles plus massives, c'est le 2^{ème} cycle qui se produit.

Il s'agit d'une fusion de 4 atomes d'Hydrogène qui finissent par donner 1 atome d'Hélium par l'intermédiaire de réactions thermonucléaires au cours desquelles un atome de Carbone est transmuté successivement en isotopes de l'Azote et de l'Oxygène pour se retrouver à son état initial au terme de six transmutations, toutes exothermiques. Si bien qu'au final, le Carbone, qui a favorisé la transmutation et a retrouvé son état initial, a en quelque sorte « catalysé » la fusion de l'Hydrogène en Hélium en libérant deux positrons et une énergie correspondant à la perte de masse due à la fusion.

Du point de vue du rendement, ces deux cycles sont équivalents. Mais le deuxième est favorisé par la température plus élevée qui règne dans les étoiles massives.

Annexe 2

Le deutérium, traceur de l'histoire de l'Univers, du Soleil et de la Terre

I. Introduction

Les recherches chimiques effectuées sur des météorites et, désormais, dans l'espace (surtout par spectrographie), ont révélé l'importance de la mesure précise des taux d'isotopes de divers éléments, en particulier du deutérium.

Ces recherches ont été menées depuis 1980 environ, principalement par Samuel Epstein, François Robert, Marc Chaussidon, Sylvie Derenne et les astrophysiciens Alessandro Morbidelli et le groupe du Centre d'Astrophysique de Meudon. Nous donnerons, au long de cette présentation, quelques références majeures concernant ces recherches récentes, favorisées par le développement des techniques de spectrométrie.

La formation des isotopes et leur proportion par rapport à l'élément d'origine sont des phénomènes qui peuvent se produire dans des conditions très variées.

La nature nous montre le résultat de ces transformations. Il est souvent difficile d'accéder à leurs conditions de réalisation.

Dans ce domaine, l'astrophysique et l'astrochimie ont apporté une quantité impressionnante d'informations.

L'intérêt de ces informations est double.

D'une part, elles nous montrent que les formations d'isotopes peuvent résulter de réactions de type chimique dans lesquelles des molécules organiques peuvent jouer un grand rôle.

D'autre part, l'interprétation de fractionnements isotopiques, c'est-à-dire des proportions d'isotopes de certains matériaux, en particulier du deutérium, peut nous renseigner sur les conditions qui les ont fait apparaître. En l'occurrence, nous avons déjà des informations sur la chronologie des événements qui ont abouti à la formation du Système solaire et nous sommes sur la voie de l'élucidation de questions controversées, telles que l'origine de l'eau terrestre, la formation de la Lune, la chronologie de formation des divers types d'astéroïdes du Système solaire (Robert, 2006).

Toutes ces recherches sont basées sur la détection spectroscopique ; cette technologie a fait d'immenses progrès depuis quarante ans.

Les mesures spectrométriques dans l'espace effectuées en majeure partie par le télescope spatial Hubble ont montré que le taux de deutérium (par rapport à l'hydrogène) était extrêmement varié.

L'hypothèse d'un taux initial uniforme, inspirée par la théorie du Big Bang, imposait donc des recherches et des explications.

Les travaux importants, effectués dans ce sens, sont présentés au point 2 (espace intersidéral) et au point 3 (Système solaire).

Parallèlement, une série de découvertes ont révélé l'existence de réactions nucléaires dites de spallation, sur le disque protoplanétaire d'étoiles en formation. Ces phénomènes pourront apporter des informations précieuses sur la chronologie de l'évolution du Système solaire. Ces réactions sont présentées au point 3.

A l'intérieur même du Système solaire, les différences de taux isotopiques nous conduisent à des conclusions, provisoires peut-être, mais que les prélèvements *in situ* devraient valider.

Ces modifications de la composition des amas primitifs du disque protoplanétaire ont été définitivement enregistrées dans la formation initiale de protoplanètes qui ont, après une phase chaotique, engendré le système planétaire et ses cohortes de débris que nous connaissons. Thérèse Encrenaz décrit cette genèse au chapitre 4. Nous présenterons les éléments de preuves apportées par des recherches récentes (chapitre 7).

La découverte de composés organiques et de l'eau, partout dans l'Univers, a suscité un grand étonnement et des hypothèses très variées et contradictoires.

Il ne faut pourtant pas s'en étonner car la chimie organique, base de la vie, était considérée naguère comme une branche très originale de la chimie, alors que, depuis l'exploration spectrométrique de l'espace, il nous est apparu que cette chimie des premiers éléments du Tableau de Mendeleïev représentait la partie la plus commune et la plus généralement produite de l'ensemble des constructions moléculaires que recèle l'Univers.

De nombreux chapitres de cet ouvrage sont consacrés à ce foisonnement.

En revanche, un point crucial de cette investigation concerne le fait que les molécules organiques sont un puissant facteur de modification de l'équilibre originel entre deutérium et hydrogène, si bien que le rapport D/H s'est révélé capable de nous apporter les informations essentielles concernant l'évolution de l'Univers, l'évolution des nuages interstellaires, l'évolution du Système solaire et enfin, celle de notre Terre.

2. Le deutérium dans l'évolution de l'Univers

Le rapport D/H, c'est-à-dire l'appropriation de deutérium par un milieu contenant de l'hydrogène (qu'il soit libre ou associé en molécules) est un puissant outil de recherche en astrochimie.

En effet, de la théorie du Big Bang vient l'hypothèse d'une fréquence uniforme du deutérium, dite « rapport D/H universel » dans l'Univers initial, liée au rapport entre matière baryonique et photons (Schramm, 1998). A une époque de stabilisation relative, cette fragmentation (concentration) était de 50×10^{-6} (Geiss and Gloeckler, 1998).

Le deutérium est, ultérieurement, détruit dans les étoiles, par transmutation progressive en hélium (cycle de Bethe).

Dans l'espace interstellaire, le taux de deutérium a évolué différemment selon les conditions de température et de présence d'éléments ou de molécules, en particulier de molécules organiques.

1 - Dans le milieu interstellaire quasi-vide, à 50 K environ, le taux est de l'ordre de 16×10^{-6} . Ce taux a été mesuré par le télescope spatial Hubble.

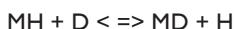
Dans le même milieu, le taux de deutérium de la vapeur d'eau est de 9×10^{-4} , mesuré par l'ISO (Observatoire Spatial Infrarouge).

2 - Dans les nuages interstellaires, à une température de l'ordre 150 à 200 K, on a un taux variant de 200×10^{-6} .

3 - Dans la matière organique des nuages interstellaires, froids, ce taux atteint $1,7 \times 10^{-2}$.

Les molécules, en particulier organiques, jouent donc un rôle essentiel dans ces échanges hydrogène-deutérium.

En gros, une molécule M établit un équilibre hydrogène – deutérium dans une réaction réversible qui ne dépend que de la température et qu'on peut écrire schématiquement :



La constatation essentielle concerne donc l'enrichissement préférentiel en deutérium, à partir du mélange initial, interstellaire, en hydrogène et deutérium, par des réactions à basse température (10 à 200 K), en faveur des molécules (surtout organiques). Cet enrichissement est constant dans les météorites qui contiennent toujours des éléments organiques (Robert F. and Epstein S., 1982). Au contraire, quand la température s'élève, la réaction s'inverse.

Dès 1977, des recherches ont montré que le taux de fractionnement ne dépend que de la température (Richet et al., 1977).

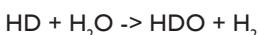
La cause supposée de cet enrichissement est une plus grande vitesse de réaction chimique dans l'incorporation du deutérium par les molécules hydrogénées.

Nous nous permettrons d'émettre l'hypothèse que les réactions faisant passer le deutérium libre dans un état associé doivent être légèrement exothermiques et qu'à l'inverse, une élévation de température favorise la libération du deutérium. Cette hypothèse est en accord avec le résultat concernant le rôle majeur de la température dans ces réactions.

Réactions de transformations hydrogène – deutérium :

I. Réactions directes

Exemple : la réaction de transformation qui donne HDO (eau lourde) est :



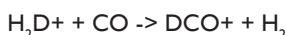
Le fractionnement isotopique f s'écrit :

$$f(\text{H}_2-\text{H}_2\text{O}) = (\text{D}/\text{H})_{\text{H}_2\text{O}} / (\text{D}/\text{H})_{\text{H}_2}$$

2. Réactions favorisées par la présence de matériaux. Dès qu'on rencontre de la matière, et en particulier de la matière organique, ces réactions sont largement facilitées.

Elles se produisent préférentiellement dans un milieu à $T < 50$ K (Guélin et al., 1982).

Le deutérium est transféré vers la matière organique par une réaction du type :



Les mesures spectroscopiques ont révélé des taux de deutérium extrêmement élevés dans les milieux interstellaires denses : environ 1000 fois plus élevés que ceux que l'on constate dans le Système solaire.

En revanche, dans les milieux où règne une température spatiale plus élevée (300 K ou plus), à proximité d'étoiles, on constate un renversement des équations d'équilibres isotopiques et une diminution des taux de deutérium « organique » au profit du deutérium libre ou en HD.

Par exemple :



Pour conclure, le taux de deutérium, dans l'Univers, résulte d'un taux initial de la nucléosynthèse originelle et il est essentiellement lié à la température et à la présence de molécules, particulièrement de molécules organiques.

Le taux de deutérium est donc un « marqueur » des divers types de milieux interstellaires.

Nous allons voir qu'il joue le même rôle dans le Système solaire, ce qui permettra sans doute d'élucider bien des questions.

3. La spallation dans le disque protoplanétaire et l'évolution du Système solaire

Les investigations concernant l'origine du Système solaire ont débuté avec l'étude attentive des météorites.

Elle a montré que la mesure des taux d'isotopes de certains éléments, et particulièrement du deutérium, présentaient une gamme très étendue de résultats. L'interprétation qui a d'abord prévalu était que ces objets provenaient du milieu interstellaire, donc d'origines très variées. Mais, lorsque des mesures de ces mêmes éléments ont pu être effectuées dans l'espace, les résultats, pour des corps similaires, ont été tellement différents que l'hypothèse extrasolaire a été fragilisée (Epstein et al., 1976 et Robert & Epstein, 1982).

Des études parallèles sur les isotopes à la surface de la Terre, de la Lune et du Soleil ont incliné vers une interprétation endogène propre au Système solaire (Robert F. et al., 1987).

En outre, à cette époque, l'hypothèse a été émise que des protons ou d'autres éléments de haute énergie, avaient provoqué des nucléosynthèses de spallation aux débuts de la formation du Système solaire. L'hypothèse généralement admise est que le Soleil, lors de la formation du disque protoplanétaire, avait irradié ce disque avec des protons très énergétiques qui avaient « cassé » des éléments lourds, ce qui avait provoqué la formation d'éléments légers, bore, lithium, beryllium, qui apparaissaient avec des proportions anormalement élevées par rapport aux taux que l'on constate dans l'Univers, comme résultat des nucléosynthèses primordiales (Robert et al., 1979).

Pour ce qui concerne le Bore, par exemple, le taux B11 / B10 est de 2,5 dans l'espace interstellaire (Méneguzzi et al., 1971) tandis qu'il est de 4,0 dans les résidus du disque protoplanétaire (Gibner et al., 1992).

Des observations interstellaires ont permis de constater l'existence de ce processus dans d'autres étoiles, ce qui a accrédité l'hypothèse du bombardement protonique.

Ces résultats ont fortement appuyé l'origine solaire de l'ensemble des astéroïdes et des planètes.

Les preuves de ces spallations se retrouvent dans tous les objets du Système solaire.

Or, les taux de ces transformations dépendent à la fois de la quantité relative d'éléments irradiés et de leur distance au Soleil.

Il s'ensuit que la connaissance précise de taux isotopiques devrait nous aider à établir la chronologie de l'évolution du Système solaire et le parcours de ses divers éléments.

Les questions qui se posent sont donc les suivantes :

- Quelle est la chronologie de l'évolution et de la stabilisation des divers objets du Système solaire ?
- Quelle est l'origine de l'eau condensée (liquide ou glace) dans les diverses planètes et astéroïdes ?
- Quelle est l'origine des matériaux organiques présents dans les objets du Système solaire, et quels sont leurs potentiels (passés, présents ou futurs) à développer des structures complexes et de la vie ?

La première question trouve sa réponse dans les modèles présentés par Morbidelli (chapitre 3) et Hennebelle (chapitre 2) et dans les résultats convergents des taux de deutérium dans les diverses planètes et astéroïdes.

Le modèle de Nice décrit la dynamique qui se stabilise dans l'état actuel du Système solaire.

Les taux de deutérium nous guident dans l'interprétation des processus.

Le taux de deutérium du Soleil est de 25×10^{-6} mesuré par spectroscopie coronaire. Celui de Jupiter et de Saturne est de $26 \pm 7 \times 10^{-6}$. Il a été mesuré par le télescope ISO (Observatoire Spatial Infrarouge), mesure confirmée in situ par la sonde Galileo à $26 \pm 7 \times 10^{-6}$.

Le taux D/H du Soleil était plus faible de quelques unités au début de sa formation (Robert F. et al., 1979).

Les planètes « glacées » (Uranus et Neptune) et les objets transneptuniens ont des taux D/H nettement plus élevés, de l'ordre de $40 \text{ à } 50 \times 10^{-6}$.

Pour ce qui concerne les planètes telluriques, Mars et Vénus ont perdu beaucoup de leurs atmosphères et leur taux de deutérium est sans doute assez élevé. En revanche, une estimation précise du taux terrestre a été faite. Il s'élève à 149×10^{-6} (Lécuyer et al., 1998).

Mais c'est dans l'immense variété des astéroïdes que les recherches ont été les plus intenses et les plus fructueuses.

Elles sont cependant très délicates parce que, à des taux correspondant à la position de ces objets, à leur origine, dans le disque d'accrétion, s'ajoute l'effet considérable de l'absorption préférentielle de deutérium par les molécules organiques (voir à ce sujet l'article de Derenne et Robert, chapitre 7).

Toutefois, nous le verrons à propos de l'origine de l'eau terrestre, il a été possible de relier le taux de deutérium originel à la position sur le disque protoplanétaire et d'établir une chronologie assez globale (chapitre 4) qui attend cependant des confirmations dans les développements à venir.

La question de l'origine de l'eau dans les diverses zones du Système solaire est directement liée à la première question. On le verra plus bas à propos de l'eau terrestre.

L'eau était sans doute présente dans le nuage primordial, origine du Soleil. Elle a pu aussi être créée dans les premiers événements de la formation du disque d'accrétion, en particulier lors de la spallation.

Enfin, les hypothèses qui ont pu être émises sur l'origine extrasolaire des matériaux organiques sont aujourd'hui fortement ébranlées. Ici aussi, le taux de deutérium est un indice convaincant.

Les recherches passionnées concernant l'existence de vie, ou au moins de structures hautement organisées dans le Système solaire (chapitre 15) ou dans d'autres systèmes stellaires (chapitre 16) donneront sans doute des débuts de réponses, voire des informations positives dans le cas de Mars, Titan ou d'autres satellites des grandes planètes. Mais quel sera l'indice pertinent, en l'absence d'une découverte « observable » *in situ* ?

Nous avons posé la question de la perception d'un signe de la vie terrestre que pourrait nous envoyer une sonde spatiale ayant atteint les confins du Système solaire, dans des lieux où la Terre n'apparaît plus que comme un objet minuscule, nous n'avons pas eu de réponse. Peut-on imaginer que la végétation qui couvre la terre soit détectable par la présence d'une molécule comme la chlorophylle ?

4. Le deutérium dans l'évolution de la Terre

Les mesures effectuées par Derenne et Robert (chapitre 4) ont montré que les météorites carbonées sont très enrichies en deutérium mais la localisation précise et l'origine de ce deutérium restaient à déterminer. Derenne et Robert ont montré que le rapport isotopique deutérium/hydrogène (D/H) était lié à la force de la liaison carbone-hydrogène dans les divers composés et ce résultat a été vérifié expérimentalement.

C'est un résultat important car il fragilise les hypothèses qui pouvaient être formulées sur les différences constatées de taux de deutérium dans les divers matériaux et leurs sites d'origine.

C'est entre autres le taux de deutérium de l'eau qui reste l'indice qui pourrait dépasser les thèses en présence.

François Robert, qui est parmi les observateurs les plus pertinents de ces taux isotopiques, constate que les météorites des zones sub-joviennes (entre Mars et Jupiter pour une grande part) ont un taux de deutérium qui est celui de l'eau terrestre, et qu'il est deux fois plus faible que celui des comètes.

La recherche de l'origine de l'eau terrestre a bénéficié, en 2000, d'une collaboration de Morbidelli et de Robert. Morbidelli a modélisé la dynamique des planétoides formés au début du développement du disque protoplanétaire, après l'éloignement de Jupiter et de Saturne. Cette modélisation, prenant en compte le taux de deutérium initial des diverses zones du disque, montre que l'origine des océans terrestres peut être attribuée aux chutes sur la Terre de planétoides formés dans les zones froides d'où viennent aussi les météorites carbonées, tous ces corps ayant la même composition en deutérium que l'eau des océans qui est fort différente de celle des comètes. Ainsi se précise peu à peu la chronologie de formation du système planétaire et en particulier de la Terre (Morbidelli et al., 2000 ; Dauphas et al., 2000).

Une hypothèse, due à Drake et Righter, suppose que les planétismaux à l'origine des Océans terrestres ont été formés à la même distance héliocentrique que les silicates qui forment le manteau terrestre, soit environ à 2 UA (Drake et Righter, 2002).

Ces ensembles d'hypothèses et de modèles sont en accord avec les résultats concernant les taux de deutérium.

Notons pour finir que, dans son article (chapitre 4), Thérèse Encrenaz décrit une certaine stabilité dans l'évolution de la Terre, que des mesures sur l'évolution du D/H confirment.

Cette constatation résulte de la modélisation du flux des H échappé dans l'espace (Hunten et McElroy, 1974) et de la mesure sur la Terre des taux de D/H sur des minéraux à différentes époques géologiques (Robert, 1989).

La Terre a donc bénéficié, dès sa formation, d'une structure qui a perduré à travers tous les âges géologiques, ce qui est une raison majeure du développement de la vie.

5. Conclusion générale

La prise en compte de l'évolution des taux d'isotopes, et en particulier du deutérium qui est le premier à jouer un rôle dans le développement de l'Univers, puis dans la dynamique des systèmes stellaires se révèle dès maintenant comme source primordiale dans la modélisation de ces événements.

Parmi les précurseurs de cette vision englobante de l'évolution de l'Univers, du Système solaire et de la Terre, Epstein et Robert, qui l'ont instaurée dès 1982, ont accompli des travaux de pionniers que nous tenons à souligner.

Certes, beaucoup de questions sont encore en suspens, mais les moyens à mettre en œuvre pour les élucider se précisent.

Références

- Dauphas N., Robert F., and Marty B. (2000) The late asteroidal and cometary bombardment of Earth as recorded in water deuterium to protium ratio. *Icarus*, 148, 508–512.
- Epstein R. I., Lattimer J. M., and Schramm D. N. (1976) The origin of deuterium. *Science*, 263, 198–202.
- Geiss J. and Gloecker G. (1998) Abundances of deuterium and helium in the protosolar cloud. *Space Science Rev.*, 84, 239–250.
- Gibner P. et all, *Astrophysical Journal* n° 391, L89-L92 (1992).
- Hunten D. M. and McElroy M. B. (1974) Production and escape of terrestrial hydrogen. *J. Atmos. Sci.*, 31, 305–317.
- Lécuyer C., Gillet Ph., and Robert F. (1998) The hydrogen isotope composition of sea water and the global water cycle. *Chem. Geol.*, 145, 249–261.
- Méneguzzi M., Audouze J., Reeves H., *Astronomy and Astrophysics*, n° 15, 337-359 (1971).
- Morbidelli A., Chambers J., Lunine J., Petit J. M., Robert F., and Valsecchi G. B. (2000) Source regions and timescales for the delivery of water on Earth. *Meteoritics & Planet. Sci.*, 35, 1309–1320.
- Richet P., Bottinga Y., and Javoy M. (1977) A review of hydrogen, carbon, nitrogen oxygen, sulphur, and chlorine stable isotope fractionation among gaseous molecules. *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.*, 5, 65–110
- Robert F., Merlivat L., and Javoy M. (1979) Deuterium concentration in the early solar system: An hydrogen and oxygen isotopic study. *Nature*, 282, 785–789.
- Robert F. (1989) Hydrogen isotope composition of insoluble organic matter from cherts. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 53, 453–460.
- Robert F. and Epstein S. (1982) The concentration of isotopic compositions of hydrogen carbon and nitrogen in carbonaceous chondrites. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 46, 81–95.
- Robert: Solar System Deuterium/Hydrogen Ratio (2006)
- Robert F. M., Javoy J., Halbout B., Dimon B., and Merlivat L. (1987) Hydrogen isotopes abundances in the solar system,
- Robert F. and Epstein S. (1982) The concentration of isotopic compositions of hydrogen carbon and nitrogen in carbonaceous chondrites. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 46, 81–95.
- Schramm D. D. (1998) Big-Bang nucleosynthesis and the density of baryons in the universe. *Space Sci. Rev.*, 84, 3–14.
- Guélin M., Langer W. D., and Wilson R. W. (1982) The state of ionization in dense molecular clouds. *Astron. Astrophys.*, 107, 107–127

Annexe 3

Liaisons électroniques. Leur caractère universel. L'importance capitale des liaisons faibles en biologie

On pourra s'étonner que, dans un ouvrage scientifique tel que celui-ci, un article présente des connaissances aussi élémentaires que les liaisons chimiques. La raison de ce choix est la suivante : nous voulons attirer l'attention du lecteur sur le fait que tout événement est, fondamentalement, l'occasion, sinon la conséquence, d'une modification de l'état quantique d'un ou plusieurs électrons, ou de l'interaction électrostatique de deux nuages électroniques.

Seules, les réactions nucléaires sont d'un autre type.

Nous souhaitons également rappeler que les liaisons hydrogène et les forces de Van der Waals, qui couvrent un vaste champ d'intensité, sont très largement responsables de la grande diversité, de la relative instabilité et de la complexité des développements biologiques, donc de l'évolution qui a mené à la vie terrestre.

Les propriétés de la matière, solide, liquide ou gazeuse, proviennent des interactions entre électrons et des interactions des électrons avec les noyaux atomiques. Souvent, les phénomènes examinés ne sont pas prépondérants au niveau élémentaire, mais ils engendrent, au niveau global, macroscopique, l'apparition de propriétés d'une grande importance pour le comportement du système étudié et pour leurs applications.

Ces interactions élémentaires sont à la base de tous les processus que nous offre la nature (à l'exception des interactions nucléaires).

Ces événements sont de deux ordres : d'une part, la capacité d'électrons constituant le nuage électronique d'un atome ou d'une molécule à s'associer au nuage d'un autre atome ou molécule (au sens que donne la physique quantique à la notion de « nuage électronique »). Ce phénomène est la base des liaisons chimiques ; il s'agit, pour l'électron considéré, d'acquérir un quantum d'énergie qui lui permet de créer cette association, dite liaison d'électrovalence.

D'autre part, toutes les forces électromagnétiques, électriques et électroniques que peuvent exercer les électrons assurent la cohésion de la matière, et particulièrement les structures de la matière condensée.

Les atomes qui peuvent ainsi être associés sont ceux dont la dernière « couche électronique » n'est pas saturée. Il s'agit donc, en priorité, des éléments de la première partie du tableau de Mendeleïev : Carbone, Azote, Oxygène, qui s'unissent aisément entre eux et à l'Hydrogène.

Les molécules qu'ils forment sont à la base de la chimie organique. On ne doit donc pas s'étonner de trouver partout, dans l'univers, ces molécules, et leurs assemblages plus ou moins complexes qui sont les « briques élémentaires de la vie ». L'inventaire ci-après des diverses liaisons électroniques montrera que les liaisons faibles sont un facteur essentiel d'innombrables associations plus ou moins stables qui sont à l'origine de la mouvance fondamentale des complexifications du vivant. Ici, encore, le chemin vers le vivant apparaît presque inéluctable dès lors que les conditions d'un milieu associatif favorable sont rassemblées.

Cette présentation, et les réflexions qui l'accompagnent, visent aussi à éluder toute forme de mystère concernant les prémisses de la vie.

Pour schématiser et sans entrer dans les interprétations quantiques qui appelleraient des développements théoriques, on peut classer ces interactions, en partant des plus fortes, de la manière suivante.

1 - Liaisons covalentes : il s'agit de liaisons très fortes faisant intervenir deux électrons qui forment une espèce de nasse enserrant deux noyaux atomiques. On les rencontre surtout en chimie, mais aussi dans la physique du solide et en cristallographie. Deux exemples : le diamant tient son extrême résistivité des liaisons doubles qui unissent les atomes de carbone ; une molécule de CO_2 est extrêmement stable grâce à ses deux liaisons covalentes.

2 - Electrovalence : on appelle ainsi (par la tradition du langage des chimistes), une liaison du même ordre liant deux noyaux atomiques par un seul électron. La plupart des sels ionisables correspondent à cette liaison. Ex. Na-Cl, qui est dissocié aisément lorsqu'il est dans un milieu aqueux, ce qui rend l'eau conductrice d'électricité et favorise l'électrolyse. On appelle aussi, pour cette raison, « liaison ionique » cette interaction.

A noter que dans certaines structures cristallines, les liaisons complexes peuvent être intermédiaires, du fait des liaisons électroniques complexes. On parle de « liaison ion-covalente » Ex : cas de la blende.

3 - Liaison hydrogène : les liaisons hydrogène sont des liaisons spécifiques d'un atome d'hydrogène (appartenant à une molécule) et d'un atome portant un doublet électronique sur une autre molécule. Cette liaison permet des associations de molécules, souvent à grande portée. Selon la taille des molécules, leur forme et la nature des noyaux atomiques en liaison, les distances entre ces noyaux et la puissance de la liaison couvrent une gamme étendue de valeurs, allant du niveau de la covalence à celles des forces de Van der Waals, qui sont présentées plus bas. La liaison hydrogène permet aux molécules de l'eau liquide et de l'ammoniac liquide de s'assembler de manière assez forte pour résister à des élévations de température, ce qui explique la température d'ébullition anormalement élevée de ces liquides. Lorsque ces liaisons sont assez fortes, elles s'apparentent aux liaisons chimiques, avec des distances entre atomes de l'ordre de 2 Angströms. Alors, les molécules adoptent des positionnements assez précis et stables. C'est ce qui se passe avec les enchaînements linéaires des molécules de l'eau liquide (densité assez forte), et la structure hexagonale-tétradaïque de la glace (densité plus faible).

La liaison hydrogène est largement responsable de la cohésion et de la résistance mécanique des polymères.

Les liaisons hydrogène des molécules biologiques sont plus faibles (la distance entre atomes est de l'ordre de 3 ou 4 Angströms). Cette souplesse favorise l'évolution des structures biologiques, ce qui explique son omniprésence dans ce domaine. Pour ne citer que deux exemples, ce sont des liaisons hydrogène qui unissent les doublets des chaînes ARN et ADN, elles aussi responsables du repliement des protéines. Notons, pour être complets et clairs, que les liaisons qui unissent entre elles les molécules qui forment les successions moléculaires le long de la double hélice sont des liaisons covalentes, beaucoup plus fortes, ce qui permet le détachement des deux branches de la double hélice sans rupture de la chaîne génomique.

« Liaisons hydrophobes » : voir Forces de Van der Waals.

4 – Cristaux : les liaisons électroniques qui assurent la cohésion des cristaux sont du type des liaisons chimiques, en ce sens que les molécules s'articulent les unes aux autres par des liaisons ioniques, mais lorsque l'arrangement est réalisé, les électrons établissent des liaisons d'atome à atome qui associent ainsi les atomes dans un réseau qui dépasse la structure moléculaire d'origine.

Mais l'intensité de liaison propre à la molécule est une donnée qui persiste et donne aux structures cristallines résultantes leur résistivité. C'est parce que les électrons restent attachés à leurs atomes que les plans d'arrangements du cristal (macroscopique) sont des plans de clivage.

5 - Liaison métallique : les métaux ne s'arrangent pas dans des structures cristallines parce qu'ils sont tous dotés d'une dernière couche électronique très incomplète, ce qui donne à leurs électrons une certaine labilité.

Il s'ensuit un phénomène spécifique : les électrons de cette couche forment un nuage qui se comporte indépendamment de son substrat atomique et qui constitue, en même

temps, un réseau assurant la résistivité de l'ensemble. Parallèlement, ce nuage est un réseau électronique qui donne au métal sa conductivité électrique. Dans une différence de potentiel entre deux points du métal, les électrons se comportent comme un fluide.

6 - Forces de Van der Waals : les forces de Van der Waals sont de nature essentiellement électrostatique et unissent des dipôles deux à deux. Leur nature n'est pas différente de celle de la liaison hydrogène, mais elles se manifestent avec une grande variété de molécules qui peuvent être dipolaires, auquel cas les assemblages se font de pôle positif à pôle négatif, comme dans le cas de l'eau. Ces forces peuvent également se manifester entre un dipôle et une molécule non polarisée, auquel cas le dipôle peut induire une polarisation de la molécule non polarisée. On voit même des molécules non dipolaires se polariser du fait des interactions entre nuages électroniques. Dans l'ordre ci-dessus, ces phénomènes ont reçu le nom des physiciens qui les ont découverts et théorisés : Keesom, Debye, et London.

Les forces de Van der Waals sont donc des forces attractives qui s'exercent au-delà de la distance où les nuages électroniques se repousseraient.

Elles conduisent aux effets suivants :

1. A l'interface d'un liquide et d'un gaz ou un liquide (non miscible au premier), les molécules qui sont en surface sont attirées vers l'intérieur, ce qui stabilise la surface et lui donne une résistance à la déformation. On appelle cette force tension superficielle. C'est cette force qui assure la cohésion d'une goutte d'eau dans l'air.

A noter que, à la surface d'un liquide et d'un gaz, des molécules passent en permanence d'une phase à l'autre, ce qui conduit à un équilibre liquide-gaz. Dans le cas de l'eau et de l'air, c'est la pression de vapeur saturante qui définit cet équilibre.

2. Au contact avec un solide, les molécules de surface peuvent être soit attirées, soit repoussées, selon la nature (chimique) des molécules en contact. Dans le premier cas, la surface de contact tend à s'étendre (mouillage) ; dans le second cas, il y a restriction au contact : phénomènes de ménisques, gouttes de mercure, etc. Le nom de capillarité est donné aux phénomènes de mouillage (on parle aussi d'hydrophilie et d'hydrophobie).

« Liaisons hydrophobes » : ces liaisons, très fréquentes en chimie biologique, concernent le confinement de radicaux ou de molécules qui semblent s'attirer. En fait, il s'agit d'un phénomène provoqué par les molécules d'eau en présence de structures non ionisables (électriquement neutres et ne se soumettant pas à l'ionisation des « forces de Debye »). Les molécules d'eau, unies par les forces de Van der Waals, créent, par leur nuage électronique, une force répulsive qui repousse les molécules ou radicaux, et les rassemble dans un espace restreint.

Ce phénomène a une grande importance en biologie car il provoque des structurations internes dans les milieux concernés. On trouve de nombreux exemples de ce phénomène au chapitre 10 de G. Zaccai.

Les liaisons électroniques, base des phénomènes énergétiques.

Pour conclure, les interactions électroniques, qui impliquent toujours le changement d'état quantique d'un ou plusieurs électrons, sont la condition de tout phénomène de la physique macroscopique et de la biologie.

Il n'est pas pour autant possible de décrire les phénomènes macroscopiques à partir de ces phénomènes fondamentaux. En revanche, il est important de mesurer les échelles de temps (la femtoseconde, 10^{-15} sec) et d'espace (le nanomètre) de ces événements, et aussi de constater qu'ils se produisent toujours en nombres gigantesques, et que c'est cette accumulation d'événements indépendants, hors de portée de notre contrôle, qui conduit à l'apparition, au niveau macroscopique, d'événements globaux déterministes, disons, pour être plus précis « d'un déterminisme pratique ». Les phénomènes de la physique statistique, ceux des relations entre phases, et ceux par lesquels apparaissent des structures, des formes, de la complexité relèvent de ce mode de représentation.

Annexe 4

La variété des astéroïdes du Système solaire

L'intérêt majeur de l'étude des astéroïdes du Système solaire réside dans le fait qu'elle contribuera sans doute à dresser une chronologie de la formation des divers objets du système.

Cette chronologie sera un puissant argument pour étayer ou affaiblir les diverses hypothèses qui ont pu être formulées au sujet de la dynamique initiale des planètes géantes, de leur évolution, de la date de formation des planètes telluriques et enfin, de questions concernant la formation de la Terre, de celle de la Lune et de l'origine de l'eau terrestre.

C'est pour mettre en perspective ces divers aspects que nous donnons ci-après les résultats acquis au sujet des diverses classes d'astéroïdes du Soleil.

I. Les déchets du disque protoplanétaire

Les planètes résultent d'agrégation d'objets ou disque protoplanétaire, formé sans doute à la suite d'un effondrement gravitationnel qui a donné naissance au Soleil ; mais beaucoup d'autres agrégats de petite taille, de quelques mètres, ou moins, à quelques kilomètres de diamètre, se sont mis en orbite autour du Soleil. On les appelle des astéroïdes.

La plus grande partie de ces astéroïdes ont des orbites qui se situent entre celles de Mars et de Jupiter d'une part, et au-delà de Neptune d'autre part, dans la zone dite « ceinture de Kuiper ».

Les orbites de ces astéroïdes dépendent de l'attraction solaire mais aussi de celle des deux planètes géantes Jupiter et Saturne. De ce fait, ces orbites ont pu prendre des plans et des excentricités très variées.

Les astéroïdes qui proviennent de la zone de formation des planètes telluriques sont particulièrement intéressants, parce qu'ils apportent des informations sur les conditions de formation de ces planètes.

Les astéroïdes ont des structures minérales variées selon leur âge et leur zone de formation.

On les classe d'après ces deux critères.

Les chondrites sont des astéroïdes formés, au moins partiellement, de chondres, c'est-à-dire de billes micrométriques composées largement de silicates. Les analyses isotopiques leur attribuent un âge de 4,65 milliards d'années, soit l'époque de la formation du Système solaire. C'est donc en tant que témoins de cette époque qu'elles retiennent l'attention des astrophysiciens. Provenant de la zone de formation des planètes telluriques, leur structure chimique est assez proche de celle de ces planètes d'où leur intérêt (chapitre 7).

La zone des planètes géantes, Jupiter et Saturne, a été le siège d'énormes nuages de vapeur d'eau qui, outre leur contribution à la formation des deux planètes géantes, ont donné naissance à de petits agglomérats de glace, les comètes. Celles-ci, prises dans les champs gravitationnels du Soleil d'une part, de Jupiter et Saturne d'autre part, ont pris des orbites très variées, le plus souvent à forte excentricité, et hors du plan diamétral du Soleil.

Les comètes, faites d'abord essentiellement d'eau, ont « ramassé », au cours des âges, des poussières de l'espace interplanétaire, poussières que l'on détecte couramment à leur surface.

Les astéroïdes transneptuniens forment la « ceinture de Kuiper ».

2. Les isotopes, témoins de la chronologie du Système solaire

La structure chimique des astéroïdes est un indice de leur origine géographique le long du disque d'accrétion.

Des recherches plus précises, fondées sur les taux d'isotopes des divers matériaux composant les astéroïdes, ont déjà apporté des renseignements sur l'évolution primordiale du Système solaire.

La convergence des observations spectroscopiques concernant les fragmentations isotopiques (annexe 2) devrait nous apporter une chronologie complète de la formation du Système solaire.

3. La surveillance des géocroiseurs

Les astéroïdes de la zone qui va de Mars à Jupiter ont des orbites qui peuvent les rapprocher de la Terre. On les appelle alors géocroiseurs. Ils sont répertoriés et surveillés par des systèmes automatiques, en vue de prévenir, si possible, leur rencontre avec la Terre.

Actuellement, plus de 600.000 astéroïdes sont répertoriés, et un peu plus de 20.000, potentiellement dangereux, sont surveillés.

A noter qu'en cas de risque de collision, le seul moyen susceptible d'éviter la collision semble être l'envoi d'une sonde suffisamment massive pour que sa mise en orbite autour de l'astéroïde dévie favorablement sa trajectoire.

Les astéroïdes qui tombent sur la Terre sont nommés météorites.

A noter pour finir que certains astéroïdes ont été pris en orbite par des planètes : on les appelle « troyens ».

En 2010, un astéroïde troyen en orbite autour de la Terre a été détecté.

Remerciements

Nous tenons d'abord à remercier les auteurs des divers chapitres de cet ouvrage : Mesdames et Messieurs Francis Albarède, Martine ben Amar, Jean-Pierre Bibring, Sylvie Derenne, Ernesto Di Mauro, Thérèse Encrenaz, Patrick Hennebelle, Emmanuelle Javaux, Louis Le Sergeant d'Hendecourt, Alessandro Morbidelli, Pierre Nabet, Nicolas Prantzos, François Robert, Raffaele Saladino, Giovanna Tinetti, Jean-Pierre Treuil, Valentine Wakelam et Giuseppe Zaccai . Ils ont tous accepté de nous donner des articles de haut niveau scientifique, et ont collaboré à la mise au point rigoureuse des iconographies et des normes de mise en page de notre Editeur EDP Sciences.

Pour ce qui concerne l'édition de l'ouvrage, nous tenons à remercier ceux qui ont permis l'aboutissement du projet, notre collègue Robert Franck, qui a mis au point, avec Madame France Citrini de EDP Sciences, le principe de l'édition, et notre collègue Pierre Nabet, qui a collaboré avec l'Equipe édition numérique de l'Inist-CNRS de Vandoeuvre-lès-Nancy pour la mise au point technique de l'ouvrage. Celle-ci est réalisée avec compétence et rigueur par Madame Sylvie Steffann, Messieurs Jean-François Nominé, François Debeaupuis et leurs collègues.

Nous n'oublions pas de remercier Monsieur Gilbert Brami pour la conception graphique de la couverture.

Nos remerciements vont aussi aux organismes et aux personnalités qui, en amont de notre projet, ont permis les contacts, les conférences préalables, l'organisation d'un colloque international et enfin la structuration de cet ouvrage.

L'école polytechnique et l'AX (Association des Anciens élèves) nous accueillent au 5 de la rue Descartes, 75000 Paris pour les séances mensuelles de l'AEIS. Nous remercions le

Président de l'AX, Laurent Billès-Garabedian, son Délégué Général Bruno Van Parys et Madame Sylvie Clairefond.

A chacune de ces séances, nous recevons les intervenants pressentis pour un colloque sur le thème de notre projet bisannuel. Les séminaires mensuels correspondants sont annoncés sur le serveur CORDIS-Wire de la Commission Européenne par l'intermédiaire de notre collègue Jean Schmets.

Le colloque lui-même se tient à l'Institut Henri Poincaré de Paris, haut lieu de la science mathématique française, dont nous tenons à remercier le Directeur, Cédric Villani, le Directeur-adjoint, Jean-Philippe Uzan, et Madame Florence Lajoinie, responsable de l'organisation technique de l'amphithéâtre Hermite.

Nos remerciements vont aussi aux personnalités qui ont accepté d'organiser avec nous le Colloque en présidant les sessions et en participant à la Table ronde, Mesdames et Messieurs Bruno Franzetti, Maryvonne Gerin, Louis le Sergeant d'Hendecourt, Christophe Malaterre, Marie-Christine Maurel, Marc Ollivier, François Robert et Alain Stahl.

Nous voulons aussi remercier notre collègue Gilles Cohen-Tannoudji qui a œuvré pour que Monsieur Jean-Pierre Bibring vienne, lors d'une de nos séances mensuelles, nous livrer les tout premiers résultats de la mission scientifique ROSETTA/PHILAE

Nous remercions enfin le Professeur Pierre Joliot, qui a prononcé l'allocution de clôture du colloque.



Présentation de L'ACADEMIE EUROPEENNE INTERDISCIPLINAIRE DES SCIENCES

L'Académie Européenne Interdisciplinaire des Sciences, AEIS, société savante (loi 1901), a pour but la recherche, la diffusion et la formation dans tous les domaines de la science. L'AEIS est répertoriée parmi les autres institutions de la capitale sur le site <http://www.paris.fr>

Cette société savante a seize années d'existence

L'Académie se propose :

- ▶ de rassembler et de faire étudier les différentes recherches et pensées scientifiques dans un cadre interdisciplinaire ;
- ▶ d'établir entre les scientifiques un langage commun nécessaire pour une mutuelle compréhension ;
- ▶ de faire connaître les plus récentes découvertes, inventions ou réalisations des domaines de la connaissance ;
- ▶ de participer à l'élargissement de la pensée, en particulier sur des sujets frontières des différentes disciplines, pour atténuer la rigueur des délimitations, souvent artificielles.

Ses membres sont issus du monde académique et industriel, les grandes disciplines scientifiques sont représentées : Physique, Mathématiques, Biologie, Philosophie des Sciences, Informatique, Sciences de la Terre, Théorie des systèmes complexes, Chimie, Biophysique, Biochimie, Médecine, Sciences cognitives....

L'Académie :

- ▶ tient des séances régulières à Paris, Nancy et Nice ;
- ▶ édite un bulletin mensuel ;
- ▶ possède des ramifications à Bruxelles, Genève et Rome ;
- ▶ organise des colloques interdisciplinaires sur des thèmes scientifiques et de société.

Principaux thèmes des colloques internationaux :

- ▶ **2002, « Biologie et conscience », avec le Prix Nobel Gerald M. Edelman, CNAM-Paris ;**
- ▶ **2004, « Fractales en progrès », pour les 80 ans de Benoît Mandelbrot, prix Nobel, Paris ;**
- ▶ **2005, « Physique et conscience », clôturant l'Année Mondiale de la Physique en France avec le prix Nobel Gilles de Gennes, Paris, Ministère de la Recherche ;**
- ▶ **2008, « Émergence, de la fascination à la compréhension », Université Paris Diderot ;**
- ▶ **2009, « Perspectives des approches expérimentales et théoriques de l'évolution », à l'occasion de l'année Darwin, Président du colloque Prof. Denis Noble membre de la « Royal Society », Université Paris Diderot ;**
- ▶ **2011, « Théories et modèles en sciences sociales », Président du colloque Prof. Raymond Boudon, membre de l'Institut, Université Paris Diderot ;**
- ▶ **2014, « Formation des systèmes stellaires et planétaires – Conditions d'apparition de la vie », Institut Henri Poincaré, Paris.**

Recrutement de Membres

L'ACADEMIE EUROPEENNE INTERDISCIPLINAIRE DES SCIENCES (AEIS) reçoit les candidatures de personnes ayant une forte culture scientifique. Cette culture peut être très générale ou fortement spécialisée, mais tous ses membres doivent être aptes à aborder des sujets interdisciplinaires qui sont au principe de ses projets. Les candidats doivent donc présenter un curriculum vitae qui expose leur niveau scientifique et leurs activités. Les productions intellectuelles, articles, ouvrages et brevets sont les témoignages les plus pertinents des capacités des candidats. Les éléments du CV sont détaillés sur l'entrée « candidatures » du site de l'AEIS désigné ci-dessous. Le CV doit être accompagné d'une lettre de motivation par laquelle le candidat exprime ce qu'il peut attendre de l'AEIS et ce qu'il pense pouvoir lui apporter en termes de compétence, de participation aux programmes de travail, et de gestion propre de l'Académie. Les dossiers sont adressés au Secrétaire Général de l'AEIS. Ils sont présentés à l'ensemble des membres qui formulent leurs avis, et la décision est prise par le Bureau selon les modalités prévues par le Règlement intérieur. Pour accéder aux modalités de candidature, aller sur le site :

<http://www.science-inter.com> ou écrire à Irene.herpe@science-inter.com
qui transmettra le dossier de candidature.



FORMATION DES SYSTÈMES STELLAIRES ET PLANÉTAIRES CONDITIONS D'APPARITION DE LA VIE

Nicolas Prantzos (IAP), Patrick Hennebelle (ENS/Obs.-Paris), Alessandra Morbidelli (CNRS/Obs.-Nice), Thérèse Encrenaz (LESIA/Obs.-Paris), Francis Albarède (ENS/Lyon), Louis Le Sergeant d'Hendecourt (IAS/UPS), Sylvie Derenne (METIS/CNRS/UPMC), François Robert (MNHM-Paris), Valentine Wakelam (Obs.-Bordeaux), Raffaele Saladino (U. della Tuscia), Giuseppe Zaccai (ILL/Grenoble), Emmanuelle Javaux (U. Liège), Pierre Nabet (U. Nancy), Martine Ben Amar (LPS/ENS), Ernesto Di Mauro (U. Sapienza/Roma), Giovanna Tinetti (U. College/London), Jean-Pierre Bibring (IAS/UPS) et Jean-Pierre Truel (AEIS)

Dans toutes les civilisations, l'Homme a été intrigué par son origine et celle de la vie. L'existence d'autres « civilisations » est une interrogation qui se perd dans la nuit des temps et est fondamentale pour l'humanité.

Cet ouvrage, dans la vision pluridisciplinaire de l'Académie, montre les progrès scientifiques qui ont été réalisés grâce principalement à l'exploration spatiale, dans la compréhension de la formation de notre Univers. Ces progrès sont vertigineux et, au fur et à mesure de la lecture de ce livre, on ne peut que s'étonner des capacités de l'homme à comprendre cet Univers et à en restituer la connaissance à tout un chacun.

Comment les systèmes planétaires se forment-ils et évoluent-ils ? Quelles sont les caractéristiques des systèmes planétaires extrasolaires ? Quelles sont les conditions physico-chimiques et les processus à l'origine de la vie ? Existe-t-il des traces de vie passée extraterrestre sur des planètes du système solaire ? Quelles signature de vie pouvons-nous détecter dans les systèmes planétaires, les exoplanètes ?

Cet ouvrage présente un point de vue actuel et pluridisciplinaire sur ces interrogations.

Les travaux de l'Académie Européenne Interdisciplinaire des Sciences portent depuis plus de dix ans sur les questions majeures auxquelles est confrontée la recherche à la croisée de plusieurs disciplines. Cette Collection présente les ouvrages issus de séminaires mensuels et de congrès/colloques bisannuels pluridisciplinaires auxquels sont associés de nombreux chercheurs invités. Notre ambition est de faciliter les échanges entre programmes de recherche spécialisés et d'informer un public plus large sur les avancées récentes.