Aix*Marseille université
Socialement engagée

CONSEIL D'ADMINISTRATION D'AIX-MARSEILLE UNIVERSITE

DELIBERATION n° 2021/07/20-01-CA

Le **Conseil d'administration**, en sa séance du 20 juillet 2021, sous la présidence d'Éric BERTON, Président,

Vu le Code de l'Education,
Vu les Statuts d'Aix-Marseille Université modifiés,

DECIDE :

OBJET : Création de l'Institut Origines – de la formation des Planètes à l'émergence de la vie

Le Conseil d'administration approuve la création de l'institut Origines s'inscrivant dans l'objectif de développement de la recherche scientifique et de la formation sur le plan national et international, tel qu'annexé à la présente délibération.

Cette délibération est adoptée à l'unanimité des membres présents et représentés.

Membres en exercice : 36
Quorum : 18
Présents et représentés : 28

Fait à Marseille le 20 juillet 2021,

Eric BERTON,
Président d'Aix-Marseille Université

Université d'Aix-Marseille · AMU ·

Aix-Marseille Université - Jardin du Pharo - 58 boulevard Charles Livon - 13284 Marseille cedex 07 - France
Tél. : +33 (0)4 91 39 65 00 - Fax : +33 (0)4 91 31 31 36 - www.univ-amu.fr

Projet d'Institut Origines,

De la formation des Planètes à l'émergence de la vie

"All the News That's Fit to Print"

The New York Times

Late Edition
Today, clouds, breezy, rain, high 68. **Tonight,** rain, some heavy winds, low 51. **Tomorrow,** very windy, clouds, few sunny breaks, cooler, high 59. Weather map, Page C8

VOL CLXIX ... No. 58,482 NEW YORK, SATURDAY, NOVEMBER 20, 2038 $7.00

ANOTHER EARTH

NASA HABEX OBSERVATORY REVEALS FIRST EARTH-LIKE PLANET WITH OXYGEN AND WATER ORBITING NEARBY SUN-LIKE STAR

Credit: NASA

Artist's rendering of the Earth-like planet HR 4785 c, discovered by NASA's HabEx telescope.

Landmark discovery is 'just the beginning'

This article is by ***Amy Ball.***

WASHINGTON – NASA announced today that its space telescope, HabEx, has observed clear evidence of an Earth-like planet orbiting another star. The planet, named HR 4785 c, is similar in size to Earth, and orbits a sun-like star 28 light years away. It has oxygen and water vapor in its atmosphere, and thanks to a glint of light HabEx observed reflected from its surface, NASA said liquid water oceans likely are present.

"Finding another Earth has been a holy grail for humankind's exploration of the universe, and we've finally done it," said NASA Administrator Ann Park, speaking at NASA Headquarters.

Detection of potentially life-bearing conditions on HR 4785 c was made possible, NASA said, by the mission's 52-meter-wide starshade — a flower-shaped screen that flies in formation with the telescope and blocks stars' light in order to reveal hidden planets and their atmospheric composition.

The discovery comes two years into a planned five-year mission, which has also already delivered cutting-edge insights to astronomers worldwide. "HabEx is a discovery machine, and researchers around the world are making breakthroughs with it," said NASA Science Administrator Kari Ryan.

Continued on page A6

La « Une » possible du New York Times le jour de la découverte d'une exoplanète jumelle de la Terre (flyer de la mission HABEX proposée au decadal de la NASA pour 2040)

Table des matières

1. L'Astrobiologie, un enjeu scientifique et sociétal pour le XXIème siècle 3

2. Motivation 5

3. Implications locales, industrielles et sociétales 7

4. Attractivité, rayonnement et positionnement de l'Institut Origines 9

5. Organisation de l'Institut 13

6. Le Projet de Formation de l'Institut Origines 24

7. La Place de l'innovation dans l'Institut Origines 29

8. Feuille de route de l'Institut Origines 29

Annexe A : Liste des laboratoires, personnels et partenaires industriels impliqués dans le projet d'Institut Origines 31

Annexe B : Revue de presse non exhaustive illustrant le rayonnement sociétal de quelques membres de l'Institut Origines (période 2018-2020) 38

Annexe C : Liste des différentes structures existantes au niveau national, de l'Union Européenne ou hors UE 55

Annexe D : Unités d'Enseignement actuellement enseignées et dont les thèmes recouvrent ceux de l'Institut Origines 58

1. L'Astrobiologie, un enjeu scientifique et sociétal pour le XXIème siècle

Récompensée par le Prix Nobel de Physique 2019, la découverte de la première planète extrasolaire en 1995 a révolutionné l'astronomie moderne au même titre que la révolution Copernicienne. Depuis, la détection de plus de 4000 exoplanètes repose de manière radicale non seulement le problème de l'origine de la vie mais aussi celui de sa possible présence et distribution dans la Galaxie. Outre sa dimension spécifiquement scientifique, ce problème a une dimension philosophique avérée. En effet, l'histoire de la philosophie occidentale recèle une longue et riche tradition spéculative ayant soutenu la thèse de l'existence d'une pluralité de mondes différents, mais aussi semblables ou identiques au nôtre. Approcher ces problèmes sur le plan strictement *scientifique* est désormais envisageable. Les avancées rapides de techniques observationnelles sophistiquées, ainsi que la possibilité de mobiliser de nombreux chercheurs de champs disciplinaires différents, souvent éloignés, ouvrent de nouvelles perspectives pour aborder ce défi. Il s'agit en outre d'une occasion particulièrement prometteuse de coopération interdisciplinaire entre les sciences et les sciences humaines et sociales à commencer par la philosophie présente dans le projet depuis le départ.

Les grandes agences spatiales, telles que la NASA et l'ESA, se sont d'ores et déjà saisies de ce défi avec une politique spatiale d'envergure et l'objectif clairement affiché de découvrir une « jumelle » de la Terre. *La loi de programmation de la recherche LPR 2021-2030, mise en place par le gouvernement français, inscrit en priorité des grandes questions scientifiques à résoudre, celles liées aux origines de la vie et à la détection d'autres Terres dans l'Univers (voir rapport annexe LPR p10/47)*. De son côté, l'INSU a entamé une réflexion sur le thème de l'Astrobiologie (Exobiologie pour la communauté française) afin d'identifier le positionnement des équipes françaises mais aussi les nouvelles compétences à acquérir ainsi que les développements instrumentaux à mettre en œuvre dans la communauté française.

Dans ce contexte aussi favorable, l'environnement de l'AMU est particulièrement propice à la mise en œuvre formelle d'un **Institut Origines**, un institut destiné à fédérer cette importante communauté sur un thème porteur, très compétitif et international, vecteur d'innovations technologiques scientifiques et sociétales, largement ouvert sur la formation des étudiants, doctorants et post-doctorants. Ce thème engloberait aussi, d'une manière plus inclusive, les attentes d'un grand public fasciné par un sujet qui porte en lui de profondes aspirations sociétales et culturelles tant il est vrai que l'origine de la vie est une question aussi ancienne que l'Humanité elle-même.

Ce document, rédigé par un ensemble de scientifiques de l'AMU, d'horizons et de disciplines très différents mais souhaitant participer collectivement à cette aventure hors du commun, propose la création de l'**Institut Origines** de Marseille, un institut hors les murs qui, s'appuyant sur des équipes et des personnels existants, compte fédérer une large communauté scientifique, attirer les meilleurs spécialistes internationaux de différents domaines, inter-croiser et transmettre des savoirs multiples, ouvrir le sujet aux étudiants de nombreux horizons et, finalement, faire rayonner ce pôle scientifique au niveau régional, national et, bien sûr, international. L'évolution actuelle de l'Astrobiologie, au sein de disciplines présentées dans ce

document, est exponentielle et potentiellement porteuse d'une transformation majeure de la société. Cette proposition, mûrement réfléchie et documentée, arrive à un moment particulièrement propice, celui de la mise en place des idées, des techniques, des infrastructures, des collaborations et de l'enthousiasme des acteurs d'un domaine scientifique en complète mutation, l'Astrobiologie.

Une opportunité à saisir !?

Mots clés : vie dans l'Univers – formation des planètes – habitabilité – émergence de la vie – planétologie – exoplanètes – astrobiologie – chimie prébiotique – astrochimie – cosmochimie – instrumentation – philosophie – épistémologie - paradigmes – connaissance du vivant – place de l'homme dans l'Univers

2. Motivation

La vie est-elle répandue dans l'univers, et si oui, quelles conditions lui sont nécessaires pour apparaître sur d'autres planètes que sur la Terre ? Cette question est à coup sûr l'une des plus anciennes, peut-être la plus ancienne de toutes celles que, générations après générations, se pose inlassablement l'Humanité. Au III^{e} siècle avant notre ère, le philosophe Épicure soutenait que « ce n'est pas seulement le nombre des atomes, c'est celui des mondes qui est infini dans l'univers. Il y a un nombre infini de mondes semblables au nôtre ». Notre seule galaxie, la Voie lactée, compte au moins 100 milliards d'étoiles semblables au Soleil, peut-être quatre fois plus. Et il existe des centaines de milliards de galaxies (dont certaines beaucoup plus grandes que la Voie lactée) dans l'univers observable. De ce point de vue, la découverte en 1995 de la première planète orbitant autour d'une autre étoile que notre Soleil, par M. Mayor et D. Queloz avec le spectrographe ELODIE de l'Observatoire de Haute Provence (OSU Pythéas, AMU), constitue une étape majeure, couronnée en 2019 par le prix Nobel de physique. Bien que de caractéristiques très différentes des planètes de notre système solaire, la découverte de cette première exoplanète a ouvert un nouveau domaine de recherche, l'exoplanétologie, qui connaît un essor fulgurant. Ce domaine s'appuie sur un développement instrumental à la pointe de la technologie qui repousse sans cesse les limites, pas seulement pour leur détection mais aussi pour déterminer précisément leurs propriétés physiques. En outre, l'exploration de plus en plus intensive du système solaire par des missions spatiales robotiques laisse entrevoir que la Terre n'est peut-être pas le seul corps orbitant autour du Soleil à pouvoir abriter (ou à avoir abrité) de la vie. La planète Mars, comme aussi les lunes glacées que sont Europe, Encelade et Titan autour des planètes géantes Jupiter et Saturne, sont suspectées d'abriter des conditions favorables à l'émergence du vivant, notamment du fait de la présence potentielle de sources hydrothermales (satellites glacés) où l'évidence d'eau liquide dans des conditions favorables à cette émergence dans un passé lointain (Mars).

Il semble donc désormais possible d'obtenir dans un avenir proche des premiers éléments de réponse à cette question authentique et récurrente dans l'histoire de l'Humanité. Pour autant, les limitations instrumentales d'une part et la diversité inattendue des systèmes planétaires découverts à ce jour d'autre part, ajoutent un degré de complexité et soulèvent nombre de questions. La vie peut-elle se développer dans des environnements aussi extrêmes que ceux autour d'étoiles très différentes de notre Soleil ? Le dioxygène de l'atmosphère terrestre, gaz biogénique produit de la photosynthèse, peut-il être considéré comme une signature fiable de la vie à la surface d'une planète quelconque ? Quels sont les marqueurs atmosphériques permettant à coup sûr d'identifier la présence de vie ? Que nous apprend le passé de la Terre ? Comment les phénomènes climatiques globaux influent-ils sur le développement de la vie ? Le champ magnétique joue-t-il vraiment un rôle clé sur les conditions environnementales permettant le développement de la vie ? De très nombreuses contingences non nécessairement connues a priori se posent aux chercheurs et méritent des approches autant spécifiques que globales, nécessitant davantage de fortes collaborations interdisciplinaires.

Répondre à de telles questions nécessite de rassembler des expertises dans des domaines de recherches aussi éloignés que la biologie et l'instrumentation spatiale pour ne citer que deux disciplines aux antipodes l'une de l'autre et ainsi de mettre en place de fortes collaborations interdisciplinaires. Nous proposons donc de tirer profit des multiples expertises présentes au sein de l'Université d'Aix-Marseille pour mettre en place un institut hors murs, l'**institut Origines**. Ses objectifs sont multiples: fédérer une communauté interdisciplinaire autour des grandes questions scientifiques liées à l'origine de la vie, de sa présence et aux possibilités de détection dans notre Galaxie ; rapprocher les expertises dans des domaines différents, mais complémentaires, qui permettront d'avancer sur les aspects touchant à l'origine de notre système solaire, à l'évolution de la matière au sein de celui-ci et en quoi cette évolution a pu jouer un rôle dans l'émergence de la vie sur Terre. Notre objectif sera aussi de déterminer quelles approches techniques et scientifiques permettraient l'identification d'une vie extraterrestre, de manière à élaborer des modèles d'exoplanètes réalistes présentant potentiellement des conditions « ad minima » d'habitabilité. Par ailleurs, cet institut permettra d'amplifier la notoriété et la visibilité des chercheurs de l'AMU dans un domaine très compétitif sur les plans national et international, y compris dans les domaines médiatiques et culturels, qui sont généralement très bien perçus par le grand public.

Concrètement, il s'agit de favoriser le dialogue et les interactions entre différentes disciplines scientifiques intéressées par :

- La formation et l'évolution des systèmes planétaires de manière générique
- L'origine et l'évolution de la matière organique et son interaction avec la matière minérale qui constitue de fait les planètes, du milieu interstellaire au système solaire
- La primo évolution des atmosphères primitives de planètes telluriques et en particulier celle de la Terre où des données de géochimie sont partiellement accessibles, débouchant pratiquement sur une proto-biosphère
- La compréhension des mécanismes, vraisemblablement planétaires, menant au vivant et de leurs relations à ces primo-environnements
- Les implications de ces questions fondamentales pour les sciences humaines, en particulier dans les domaines de la signification de l'évolution, de l'environnement global, de la spéciation et du devenir de notre espèce.

Ces rapprochements de ces compétences permettront de générer de nouvelles approches concernant :

- La mise au point de nouvelles techniques instrumentales, qui permettront de fournir des observables requises pour l'identification de sites propices à l'émergence de la vie
- L'élaboration de modèles d'exoplanètes réalistes, basés sur nos connaissances de la Terre, qui permettront de fournir des prédictions permettant d'orienter le développement instrumental et qui viendront en appui à l'analyse et à l'interprétation des données des grands instruments, tant au sol que spatiaux.

- le développement de modèles et d'expérimentations qui permettront de mieux comprendre la chimie menant au vivant ainsi que les mécanismes pouvant « mimer » les traceurs de vie.

Cet Institut regroupera des astrophysiciens, des chimistes, des physiciens, des biologistes, des géologues, des géophysiciens, et des philosophes et épistémologues. L'**Institut Origines** découle naturellement de la mise en place dès 2016 du pôle sciences planétaires de l'OSU Pythéas, qui visait à fédérer les activités de cinq unités de recherche affichant depuis plusieurs années la thématique « Planétologie » (LAM, CEREGE, OHP (UMS), PIIM, CINAM, IRPHE). A ce noyau initial d'une trentaine de chercheurs et enseignants-chercheurs se joignent aujourd'hui d'autres experts en biochimie, biologie moléculaire, génétique, en formes de vie dans les milieux extrêmes issus des UMR de l'OSU (MIO, IMBE) ou d'autres UMR hors OSU (UNIS, Institut d'Histoire en Philosophie, Centre Gilles Gaston Granger). L'**annexe A** du présent document dresse la liste des participants au projet d'institut, ainsi que leurs laboratoires d'appartenance. La construction d'une telle synergie aura des retombées naturelles au niveau de l'enseignement où une nouvelle offre de Master, construite sur les compétences de l'**Institut Origines**, pourrait être mise en place au partenariat avec l'OSU PYTHEAS. Cela permettra également de faciliter les demandes interdisciplinaires au niveau des appels d'offres Régionaux, Nationaux et Européens.

*En quoi l'**Institut Origines** se différencie-t-il de l'Institut de Physique de l'Univers (IPHU) ?*

*IPHU s'intéresse à la formation des grandes structures de l'univers en faisant le pont entre l'Univers primordial, dominé par les particules élémentaires, et leur assemblage progressif pour former ces grandes structures. L'**Institut Origines**, quant à lui, s'intéresse aux conditions de formation des systèmes planétaires, puis des environnements planétaires permettant une possible apparition de la vie, y compris sur la Terre. L'**Institut Origines** mettra un accent particulier sur la formation des planètes, des lunes et des petits corps, et sur l'apparition des molécules de base de la vie dans leurs environnements. Il étudiera tout particulièrement le rôle des processus fondamentaux dans cette évolution, tant au niveau de la formation des environnements planétaires « habitables », qu'à celui des systèmes vivants et de leur primo-évolution.*

3. Implications locales, industrielles et sociétales

Parce qu'elle touche à des questions profondément humaines et civilisationnelles, la recherche de la vie sur d'autres planètes que notre Terre intéresse énormément le grand public. Le fort intérêt du public pour la recherche de la vie, et en particulier la recherche de planètes semblables à la Terre, est bien illustré par le nombre de conférences publiques, d'interviews radio/TV, de documentaires télévisés qui lui sont dédiés (cf **Annexe B**). On a pu en particulier noter le fort écho qu'obtiennent les annonces sur les planètes de petite taille.

Les thématiques portées par l'institut Origines, tant par ses aspects scientifiques (systèmes solaires, origine de la vie...) que techniques (missions spatiales) et "philosophiques" sont particulièrement attrayantes pour le grand public, et peuvent être un outil puissant de diffusion de la culture scientifique et technique (CST) et pour développer l'attrait des jeunes pour la science, la technologie, l'ingénierie et les mathématiques (STEM) qui sont centrales dans les sociétés technologiquement avancées. Plusieurs membres de l'institut Origines sont déjà largement impliqués dans diverses actions de CST (nuit des chercheurs, fête de la Science...) ou participent à des actions auprès des scolaires. L'institut fédérera ces initiatives et les enrichira d'un aspect encore plus interdisciplinaire pour proposer un catalogue d'interventions dans le domaine de la CST, en lien avec Nicolas CLAIRE, Vice-président d'AMU pour la culture et patrimoine scientifique. D'autre part, l'institut travaillera avec la cellule CSTI de l'académie d'Aix Marseille afin de proposer des interventions auprès des scolaires de l'enseignement primaire et secondaire dans le cadre des projets déjà existants.

En fonction de l'importance des résultats obtenus, nous avons publié régulièrement des communiqués de presse. Nous avons également une activité de sensibilisation des publics importante et régulière sous forme d'expositions, d'ateliers pédagogiques, de créations artistiques, d'édition (papier, vidéo) et de conférences publiques. Nous poursuivrons donc cette activité notamment pour les résultats que nous obtiendrons dans le cadre du présent projet. Tous les résultats obtenus au cours des projets de l'**Institut Origines** seront également présentés lors de diverses réunions internationales et une partie du soutien financier demandé y sera consacrée.

Enfin, des conférences grand public pourront être organisées sur les aspects philosophiques et éthiques et les conséquences en matière de culture, de rationalité et de civilisation et des interrogations que suscitent ces explorations. Si la philosophie se caractérise, comme le disent Platon et Aristote, par sa capacité de s'émerveiller, la manière d'énoncer philosophiquement cet étonnement devant le monde permettra de répondre aux attentes d'un large auditoire. Pour mener à bien cette mission, l'expertise de l'équipe communication / diffusion des connaissances de l'OSU Institut Pythéas qui aura la responsabilité de ce volet, constitue un atout pour l'**Institut Origines**.

L'**Institut Origines** possède également une composante technologique forte. L'enracinement de la direction de l'Institut au sein d'un laboratoire spatial majeur de l'astronomie Française, le LAM, dont les programmes sont directement financés par le CNES et l'ESA, lui apportera les moyens d'être une force de proposition concrète dans les compétitions à venir pour de nouvelles missions spatiales et instruments en vol vers les planètes et petits corps, grâce aux moyens d'étude, de développement et d'étalonnage des instruments disponibles au LAM. Plusieurs de ses membres participent actuellement au développement et à l'exploitation scientifique d'observatoires spatiaux, tels que CHEOPS et PLATO de l'Agence Spatiale Européenne (ESA) ou de missions NASA et ESA d'exploration du système solaire telles que Bepi Columbo, JUICE, ou Europa-Clipper. Ce contexte exceptionnel permet de nombreux partenariats avec des acteurs industriels Français et Européens : Airbus Industries, Thales Alenia Space, SAFRAN, etc. L'ESA ayant récemment formulé le souhait d'externaliser une partie de ses développements instrumentaux dans des laboratoires Européens, la composante spatiale de l'**Institut Origines** pourra se

renforcer encore davantage via l'utilisation accrue des plateformes techniques du LAM. Ces développements se font en parallèle de la mise en place d'un ensemble de systèmes expérimentaux permettant de simuler les environnements qui sont les cibles potentielles des missions spatiales. Cette synergie entre développement de missions et simulations, maintenant admise par les instituts spatiaux (ESA, CNES) au cœur de leurs stratégies, a déjà une place naturelle au sein de l'**Institut Origines**, permettant de développer un pôle unique régional et national. La participation de la Société COMEX au projet d'institut donnera, sans doute aucun, lieu à des développements instrumentaux communs originaux dans la région marseillaise.

De façon complémentaire, le périmètre d'action de l'**Institut Origines**, recouvrant une gamme de disciplines significativement plus large que celles représentées actuellement au LAM, lui donnera l'assise thématique la plus pertinente pour concevoir de l'instrumentation spatiale dans des domaines émergents tels que ceux de la détection in situ de biomolécules et de la détection à distance de biosignatures dans les atmosphères et sur les surfaces des planètes et exoplanètes. Ces développements seront pilotés au sein de l'institut sur la base d'une feuille de route des développements d'instruments et de nouveaux concepts de missions qui sera partagée avec la direction des programmes du CNES et les directions des programmes "Science" et "Exploration" de l'ESA. L'institut sollicitera ces directions pour désigner des représentants dans son conseil scientifique et stratégique.

4. Attractivité, rayonnement et positionnement de l'Institut Origines

Conscients des enjeux scientifiques liés aux nombreuses avancées en lien avec la thématique de l'**Astrobiologie** (i.e. habitabilité dans le Système Solaire, études poussées de la planète Mars, retours d'échantillons extraterrestres et développement rapide de la recherche et l'étude des exoplanètes), les grandes universités et les organismes de recherche établissent de nombreux instituts analogues à celui que nous proposons. Tous font largement appel à l'interdisciplinarité, un enjeu majeur de l'organisation de l'Astrobiologie.

Ainsi, **en France,** le Centre National d'Études Spatiales (CNES) développe cette thématique à travers son programme Exobiologie et soutient déjà, tout à la fois scientifiquement et financièrement, plusieurs laboratoires d'AMU qui se trouvent associés dans le présent projet d'**Institut Origines**. Par ailleurs, plusieurs structures se sont développées en France autour de thèmes communs à ceux de l'**Institut Origines** (OCAV sur Paris, LIO sur Lyon et Origins of Life sur Grenoble). Loin de présenter une redondance, ces instituts (ou assimilés) ont une couverture thématique ou des approches scientifiques différentes et souvent complémentaires de celles de l'**Institut Origines**. Ces instituts sont soit comparables en taille (OCAV) à l'**Institut Origines,** soit plus petits (Origins of Life). Le LIO est un cas à part avec un éventail de thèmes plus large se concentrant sur des thèmes proches de l'institut IPHU sur AMU et avec une couverture mineure des thèmes centraux de l'**Institut Origines** (et par la même occasion ceux d'OCAV et Origins of Life). Par rapport à ces instituts, l'**Institut Origines** se distingue par une très forte implication dans les missions spatiales (système solaire, exoplanètes), un axe SHS plus prononcé (ce dernier est absent des

instituts de Lyon et de Grenoble), mais aussi par une approche plus originale sur la chimie menant au vivant. Enfin, les instituts OCAV et Origins of Life sont aussi fortement impliqués que l'**Institut Origines** dans le développement de futurs instruments sol, mais cependant sur des technologies différentes. De par son originalité thématique, l'**Institut Origines** apporte une contribution unique en France et complémentaire aux approches existantes sur les questions liées aux origines des planètes et de la vie.

L'**Institut Origines**, de par la taille importante de l'Université Aix-Marseille, permet de regrouper un nombre conséquent de chercheurs à travers douze laboratoires, incluant aujourd'hui **près de 80 personnels permanents chercheurs ou enseignants-chercheurs (voir Annexe A)**, et de proposer des programmes d'enseignement attractifs qui formeront la future génération des spécialistes de l'Astrobiologie et des systèmes planétaires en France. La mise en place de cette structure permettra à Aix-Marseille Université de se hisser au **premier plan national sur les thématiques des origines des systèmes planétaires et de la vie**. Aix-Marseille Université atteindra ainsi le niveau de certaines grandes universités américaines ayant développé l'approche proposée par notre Institut, qui consiste à favoriser au niveau local la recherche interdisciplinaire et l'enseignement autour des Origines. Par exemple, l'Université de Cornell a mis en place l'institut Carl Sagan, du nom de celui qui fut l'un des pères de ce nouveau champ interdisciplinaire. Cet Institut compte actuellement une cinquantaine de chercheurs permanents. Cependant, en faisant fi des aspects autour de la chimie prébiotique, l'institut Carl Sagan présente un spectre thématique plus restreint que celui offert par notre institut. En outre, la plupart des instituts susmentionnés ne couvrent pas l'éventail complet des recherches proposé par l'**Institut Origines** à Aix-Marseille Université.

Au niveau international, la prestigieuse agence NASA a fédéré un réseau d'instituts universitaires répartis sur le territoire des États-Unis, le NASA Astrobiology Institute (NAI). Cette structure a laissé la place à un réseau plus souple, les RCNs (Research Coordinated Network) pour y intégrer plus facilement les établissements universitaires. En Europe, le Centre d'Astrobiologie de Madrid, créé en 1999, est aujourd'hui considéré comme un institut d'excellence par le gouvernement espagnol. L'Université de Berne s'est également dotée d'un institut d'astrobiologie, ce qui est aussi le cas dans plusieurs universités aux Pays-Bas et en Allemagne. En outre, un Institut Européen vient d'être créé, et va fédérer les instituts d'astrobiologie nationaux et régionaux distribués dans les différents territoires. **L'annexe C** du document présente un état des lieux des différents instituts d'astrobiologie existants de par le monde.

Aix-Marseille Université intègrera cette dynamique internationale via la création de l'Institut Origines. Ce dernier sera rattaché à l'Institut d'Astrobiologie Européen (EAI), qui fédère les recherches se développant dans ces thématiques à l'échelle de notre continent.

Le spectre des thématiques recouvertes par l'Institut Origines, qui possède toutes les caractéristiques d'un institut d'astrobiologie, est très étendu. Pour essayer d'apporter des réponses aux questions fondamentales telle que celle des conditions requises à l'émergence de la vie ou celle de la présence de vie sur d'autres planètes dans la Galaxie, notre institut incorpore plusieurs disciplines majeures telles que l'*astrochimie*, qui s'intéresse au mode de formation des molécules complexes et des grains et petits corps primitifs dans les milieux interstellaire/circumstellaire/interplanétaire ; les *sciences planétaires,* qui étudient, par le biais de la physique, de la géologie et de la chimie, les conditions de formation et d'évolution des corps gravitant autour du Soleil ou d'autres étoiles ; la *biologie*, qui a pour objet l'étude des êtres vivants dans leur environnement et, dans ce cadre spécifique de l'Astrobiologie, pourrait y contribuer par l'étude et la compréhension des mécanismes d'évolution prébiotique dans différents environnements. Enfin, la *philosophie*, qui permettra d'apporter une réflexion sur la place de l'Homme et les changements de représentations induits qui en découleraient dans le contexte d'une découverte de vie extraterrestre, de la question esthétique de sa représentation jusqu'au questionnement que l'impact qu'une telle recherche prospective peut avoir sur l'épistémologie des sciences concernées : physique, chimie, biologie, sciences environnementales, cosmologie, etc.

Rappelons que ce sont des ingénieurs et chercheurs d'AMU qui ont mis au point l'instrument ELODIE à l'Observatoire de Haute-Provence et ainsi permis la découverte de la première exoplanète ouvrant ainsi un domaine majeur de l'astronomie du XXIème siècle, celui de l'étude des exoplanètes.

L'attribution du Prix Nobel de Physique 2019 à Michel Mayor et Didier Queloz consacre effectivement l'importance actuelle et le développement rapide de ce nouveau champ disciplinaire, nécessairement lié à celui de l'Astrobiologie. L'attribution de ce Prix Nobel nous paraît justifier pleinement la création de l'**Institut Origines** à Aix-Marseille Université. En affichant clairement un pôle de compétences fort et structuré, il permettra d'attirer des étudiants européens et confèrera un rayonnement sans pareil à Aix Marseille Université. La création de l'**Institut Origines** sera ainsi à la hauteur des ambitions affichées par Aix-Marseille Université et ne pourra que contribuer à son attractivité internationale.

L'**Institut Origines** aura vocation à se développer au-delà d'Aix-Marseille Université, en fédérant à terme l'ensemble des chercheurs de la région Grand Sud s'intéressant au développement de ces thématiques, et des partenaires industriels impliqués dans le développement instrumental.

Notre objectif est de construire une structure de référence, qui pourra jouer un rôle de leader au niveau national, en termes de recherche, de formation, et de développement technique.

Par ailleurs, l'**Institut Origines** sera en interaction directe avec les instituts d'astrobiologie européens, tels que le Centro de Astrobiologia en Espagne ou encore

le UK Centre for Astrobiology au Royaume-Uni, dont les tailles et les thèmes de recherche sont équivalents. De plus, les liens forts existants actuellement entre nos chercheurs d'Aix Marseille Université et ceux d'universités hors UE permettront à l'**Institut Origines** de rayonner au niveau international via des interactions avec la Chine (projet de mise en place d'un centre d'Astrobiologie), les États-Unis d'Amérique (NASA et différents centres universitaires), ainsi que l'institut ELSI du Japon.

La liste des meilleures universités et Centres de Recherche Américains dans le domaine de l'astrobiologie et de l'exploration des corps primitifs du système solaire est en cours de constitution, et sera proposée pour validation au groupe projet de l'institut avant des prises de contact formelles fondées sur une présentation concise et attrayante des activités de l'Institut. Cette liste comprend d'ores et déjà l'Université Cornell, dont le pôle d'astrobiologie a été fondé par Carl Sagan, et le Jet Propulsion Laboratory à Pasadena, CA et son Université mère Caltech. Les modes de collaboration proposés, en cours d'analyse, comprendront des échanges de professeurs, des accueils d'étudiants, et des co-habilitations de cours ou de filières parmi celles proposées par l'Institut.

L'**Institut Origines** de Marseille sera donc une vitrine exceptionnelle pour notre université en s'élevant au niveau des plus grands instituts promouvant la recherche autour des origines. L'excellence scientifique de l'**Institut Origines** permettra d'attirer vers notre université les meilleurs éléments en devenir (étudiants, post-doctorants, chercheurs et professeurs invités, etc). Cette association d'excellences en recherche scientifique et en enseignement universitaire ne pourra que renforcer l'attractivité d'Aix Marseille Université.

Enfin, le rayonnement de l'**Institut Origines** nous permettra de mettre en place un ensemble d'opérations avec le secteur privé au travers d'initiatives telles que du mécénat ou des partenariats Institut/entreprise. A titre d'exemple, alors que l'Institut Origines est encore en balbutiement, nous bénéficions actuellement d'un fort soutien de l'entreprise ADEFY (https://adefy.fr) qui nous a mis en contact avec une chargée de communication spécialisée dans la recherche de financements participatifs. L'objectif de cette collaboration est d'établir une démarche visant à valoriser le projet de l'**Institut Origines** auprès de mécènes et partenaires privés potentiels. L'ensemble de la prestation (~50 keuros) sera pris en charge par l'entreprise ADEFY. Parallèlement nous avons commencé à approcher des entreprises pour des cofinancements de thèse sur des thématiques couvertes par l'Institut Origine. Nous sommes partenaires de l'entreprise Bertin Technologies, mais nous voulons élargir à des entreprises telles que ALCATEL et le CS GROUP par exemple. OPTITEC est prêt à nous aider pour monter des dossiers de demandes de co-financement de thèse par la Région. À court terme, et grâce au soutien d'ADEFY nous voulons également ouvrir à la recherche de supports financiers pour un programme de "business entrepreneurship" ou d'incubateurs.

5. Organisation de l'Institut

L'**Institut Origines** de Marseille organisera un cycle de séminaires mensuels, des réunions entre doctorants, des tables rondes entre chercheurs, des numéros spéciaux de revues internationales à comités de lecture, ainsi que des ateliers et conférences nationales et internationales. Ces réunions interdisciplinaires, ou spécialisées le cas échéant, permettront aux chercheurs d'acquérir ou de renforcer une culture scientifique dans des domaines en dehors ou à l'intérieur de leurs expertises initiales. Elles susciteront surtout de nouveaux axes de recherche dans des thématiques en plein développement. L'objectif de l'Institut sera d'initier des projets nouveaux et de mettre en place des demandes de financements en réponse à des appels régionaux (AMU, région, etc), nationaux (ANR, CNES) et internationaux (ERC, ESA, Europlanet, etc). La mise en place de l'Institut constituera une pépinière à nouveaux projets et formera un lieu d'épanouissement scientifique pour les étudiants et jeunes chercheurs mais aussi devrait renforcer la transmission intergénérationnelle des savoirs. La Figure 1 représente le projet de gouvernance de l'**Institut Origines**.

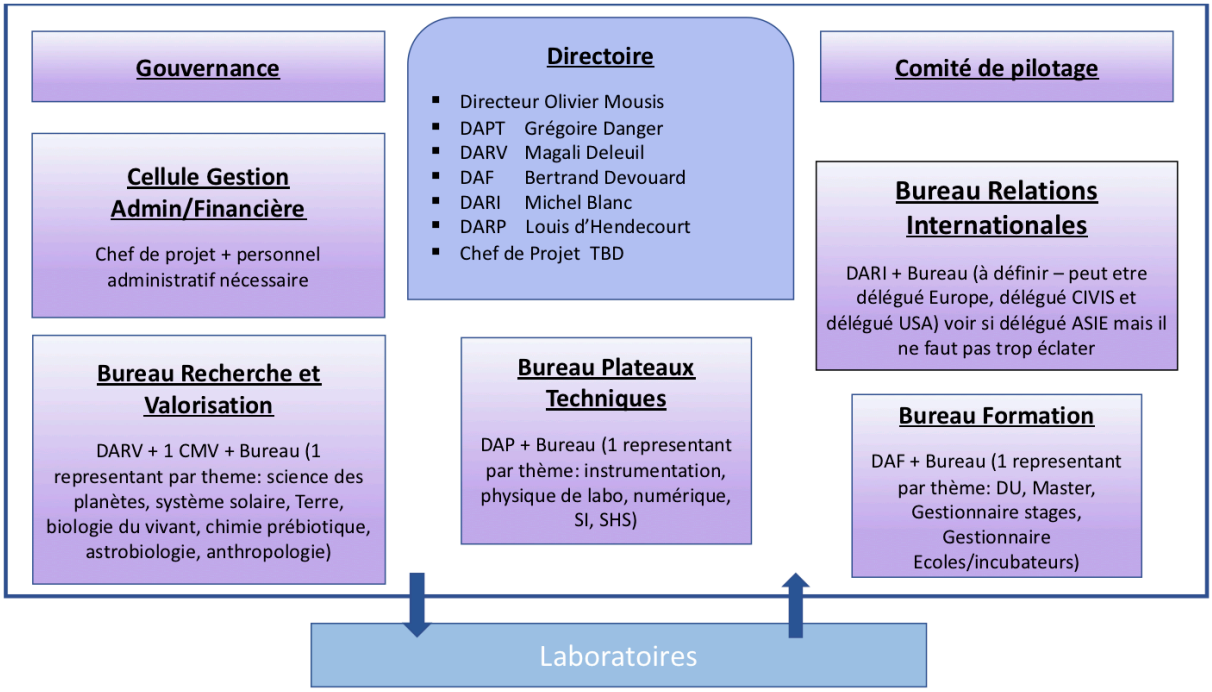


Fig. 1. *Proposition de gouvernance de l'**Institut Origines**. DAPT: Direct. Adj. Plateau Technique, DARV: Direct. Adj. Recherche et Valorisation, DAF = Direct. Adj Formation, DARI = Direct. Adj Relations Internationales, DARP: Direct. Adj Relations Publiques.*

Six thèmes de recherches interdisciplinaires ont été identifiés au sein de l'Institut Origines :

Thème 1 : Planétologie

Les conditions d'émergence de la vie sur Terre sont naturellement liées à celles qui ont donné lieu à la genèse du système solaire. La planétologie, dont l'un des objectifs principaux est de comprendre les processus physiques, chimiques, géologiques et dynamiques qui ont sculpté l'ensemble des corps du système solaire au cours de leur formation et de leur évolution, regroupe des chercheurs issus à la fois des laboratoires LAM et CEREGE.

L'équipe de planétologie du LAM étudie les conditions de formation et d'évolution du système solaire, avec un accent particulier sur l'origine des petits corps (ex : astéroïdes, comètes, objets transneptuniens). Pour ce faire, les planétologues utilisent des données issues des missions spatiales ou bien acquises depuis les observatoires sol ou spatiaux et développent en parallèle des modèles numériques qui simulent les processus physiques, chimiques et dynamiques en jeu afin d'interpréter les données obtenues. Ces chercheurs et enseignants-chercheurs ont joué un rôle majeur dans la mission Rosetta et sont impliqués dans plusieurs missions d'exploration du système solaire en cours (Hayabusa 2) et à venir (ESA Bepi Colombo, ESA Juice, NASA Europa-Clipper), et consacrent une part importante de leur temps à la préparation de futurs projets spatiaux (ex : mission conjointe NASA/ESA vers Uranus et/ou Neptune). Ils sont également très impliqués dans des programmes d'observation sols et spatiaux des petits corps. Dans ce domaine des petits corps, l'équipe occupe une position de leader sur la scène internationale. Elle s'intéresse également à l'évolution dynamique et thermodynamique des disques protoplanétaires. Les processus de transport et d'agglomération dans les disques protoplanétaires sont, avec l'évolution chimique, d'une importance capitale pour comprendre comment la matière primordiale s'est organisée pour former les petits corps, les planètes et leurs satellites. Le LAM, qui a longtemps été impliqué dans des études théoriques de la formation de planètes, a récemment acquis une nouvelle expertise dans le domaine de l'évolution chimique et isotopique du matériau primordial.

Les planétologues du CEREGE sont des spécialistes de la géologie des corps solides du système solaire : petits corps (astéroïdes), planètes (Mars, Terre), et leurs satellites (Lune). Ils sont particulièrement reconnus pour leurs travaux sur les météorites, témoins des origines et de l'évolution du système solaire, et seuls échantillons extra-terrestres disponibles en dehors des missions spatiales de retour d'échantillons (qui restent à ce jour très modestes, à l'exception des missions Apollo pour la Lune). Les activités de recherche de l'équipe s'étendent depuis la formation de ces corps dans le disque protoplanétaire il y a 4.5 milliards d'années, jusqu'à des phénomènes récents (impacts sur les surfaces planétaires : cratères et éjectas associés), en passant par l'évolution des petits corps (altération aqueuse,

métamorphisme thermique, structure interne). Divers outils sont utilisés pour lire l'histoire du système solaire enregistré dans les météorites, les micrométéorites et les surfaces planétaires : géophysique de terrain, paléomagnétisme, géochimie isotopique (isotopes de l'oxygène, nucléides cosmogéniques), géologie, pétrographie, minéralogie et géochimie. Les planétologues du CEREGE étudient également les variations temporelles du champ magnétique terrestre (CMT), ce dernier jouant un rôle majeur dans le maintien d'une protection magnétosphérique contre le bombardement cosmique et intervenant comme condition critique pour l'évolution d'une biodiversité à la surface. Pour ce faire, ils utilisent des approches géophysiques, géochimiques et de spectrométrie de masse par accélérateur, pour en comprendre l'origine et les conséquences sur le bombardement cosmique.

Un autre volet consiste en l'analyse des anomalies magnétiques mesurées autour de la Terre, de Mars et de la Lune. L'inversion de ces données obtenues par les missions spatiales est contrainte par des mesures d'échantillons en laboratoire, et à l'étude de leur comportement en condition de pressions et températures crustales. Les résultats ont des implications sur le fonctionnement de dynamos anciennes mais aussi sur l'évolution crustale (serpentinisation de la croûte martienne par exemple).

Enfin, l'équipe du CEREGE est également reconnue pour ses travaux sur les cratères d'impact météoritiques terrestres. Les impacts sont en effet un processus majeur de l'évolution des surfaces planétaires, et leur étude sur Terre permet d'en comprendre les mécanismes. Par la mise en œuvre de méthodes géophysiques, pétrologiques et minéralogiques, l'équipe du CEREGE contribue à la compréhension des mécanismes responsables de la structure des cratères d'impact et de leurs éjecta, ainsi qu'à l'activité hydrothermale qui peut être engendrée par ces impacts, et qui est reconnue pour avoir été potentiellement favorable au développement de la vie sur la Terre primitive ou sur d'autres planètes (Mars...).

Le rapprochement entre les planétologues du LAM et du CEREGE est déjà effectif avec le projet FRIPON dont ils sont co-porteurs. L'objectif scientifique est d'observer, via un réseau de caméras s'étendant sur toute la France (et bientôt toute l'Europe), l'entrée atmosphérique des météorites afin de déterminer leur régions sources et de les retrouver au sol.

Thème 2 : Exoplanètes

Une étape clé dans la recherche de la vie extraterrestre est de trouver des sites favorables à l'émergence et au développement d'une forme de vie. Outre la recherche de formes de vie en milieux extrêmes présentes ou passées dans le système solaire, il convient aussi de rechercher des planètes hors du système solaire, d'en déterminer les propriétés et d'identifier celles qui seraient le plus à même d'abriter de la vie.

L'OSU Pythéas, et plus particulièrement le LAM, fait partie des acteurs majeurs

dans le domaine de la détection et de la caractérisation des exoplanètes. Rappelons que la première exoplanète a été découverte grâce à des observations réalisées à l'OHP par M. Mayor et D. Queloz avec le spectrographe ELODIE conçu par des opticiens de l'observatoire de Marseille.

Dans ce domaine de recherche extrêmement compétitif, l'équipe du LAM a à son actif, la découverte de planètes remarquables appartenant à des populations de planètes complètement absentes de notre Système Solaire: des planètes géantes fortement irradiées ou super-denses, des super-Terres dont le rayon est compris entre 1 et 4 $R_{\oplus}$, des naine brunes à très petites période orbitale ou encore des planètes géantes à très grande séparation de leur étoile. Ces résultats ont été obtenus grâce au développement de programmes de recherche ambitieux qui mettent en jeu les principales méthodes de détection des exoplanètes: imagerie, vitesse radiale, transits. Ces programmes s'appuient sur les instruments à la pointe des développements technologiques, au sol avec le spectrographe SOPHIE à l'OHP et l'imageur d'exoplanètes SPHERE sur le VLT, ou dans l'espace avec les missions spatiales CoRoT, Kepler et CHEOPS et donc s'inscrivent en parfaite adéquation avec les feuilles de route scientifiques et techniques des agences spatiales (CNES, ESA, NASA) et les domaines d'excellence technologique du LAM: instrumentation au sol et spatiale, optique active et adaptative mais aussi traitement du signal sur de gros volumes de données. La reconnaissance internationale des membres de l'équipe dans ces domaines est attestée par leur très forte implication et leurs rôles de coordination dans toutes les étapes de la préparation et de l'exploitation scientifique de ces grands instruments sol et spatiaux (SPHERE, SPiRou, CHEOPS, PLATO,...).

Aujourd'hui le défi scientifique, reconnu par les grandes agences (NASA, ESA mais aussi au niveau national l'INSU), est donc clairement la **détection de planètes potentiellement habitables** et, sur le long terme, la **mise en évidence de biomarqueurs** sur ces objets. Atteindre cet objectif nécessite de déterminer l'origine de la diversité observée dans les populations d'exoplanètes afin de placer notre propre système solaire dans le contexte général de la formation planétaire et comprendre quels mécanismes ont conduit à sa formation. De telles études ne peuvent que bénéficier du rapprochement d'expertises complémentaires dans des domaines aussi divers que celui des sciences planétaires depuis la terre interne jusqu'aux mécanismes de circulation des atmosphères, des paléobotanistes ou du magnétisme terrestre. L'objectif est de pouvoir élaborer des modèles de planètes réalistes qui pourront être utilisés pour contraindre et orienter les développements instrumentaux de nouvelle génération, indispensables pour la détection ou l'analyse détaillée d'exoplanètes telluriques dans la zone habitables de leur étoile **(voir axe instrumentation)**. Ces modèles pourront permettre de définir et fournir des prédictions quantitatives en termes d'observables qui guideront les développements instrumentaux et, sur le plus long terme, fourniront les outils de modélisations nécessaires à l'analyse de données.

Thème 3 : Astrochimie et cosmochimie

De plus en plus de modèles proposent qu'une partie de la matière organique du système solaire ait eu pour origine le milieu interstellaire, et plus particulièrement les nuages moléculaires denses dans la phase finale de leur évolution. L'astrochimie s'intéresse à comprendre la réactivité chimique menant à la formation de matière organique complexe dans les environnements de formation d'étoiles. Cette approche permet de déterminer quelle diversité moléculaire aurait pu être injectée au sein de la nébuleuse proto-solaire et comment cette matière a pu évoluer pour aboutir à la matière organique telle que détectée au sein des météorites. La cosmochimie s'intéresse aux différentes étapes qui ont permis de faire évoluer cette matière vers celle actuellement présente au sein des corps interplanétaires représentés par les comètes et astéroïdes et en partie échantillonnée par les météorites et certaines missions spatiales. Comprendre cette filiation entre les zones de formation des systèmes planétaires et la matière telle qu'observée dans notre système planétaire est important pour comprendre la possibilité de retrouver une telle diversité moléculaire dans d'autres systèmes planétaires que le nôtre. Ce point est crucial en astrobiologie car la matière exogène, matière contenue au sein des corps interplanétaires, auraient pu jouer un rôle dans l'émergence du vivant sur Terre. Ainsi comprendre son universalité pourrait apporter de nouvelles réponses quant à la possibilité de trouver d'autres environnements au sein de systèmes planétaires permettant le développement d'une chimie prébiotique, un prérequis pour l'émergence des systèmes vivants.

- **Approche réductionniste : mécanisme de formation de molécules organiques complexes**

Le PIIM développe des systèmes expérimentaux (RING, CHARTS, AHIIA, MICMOC) permettant de simuler l'évolution des glaces interstellaires et ainsi d'étudier la réactivité menant à la formation de molécules détectées dans différents environnements astrophysiques. Ces expérimentations permettent de reproduire en laboratoire les premiers matériaux de l'Univers que sont les glaces interstellaires et les différents processus énergétiques (effets thermiques, photochimiques…) auxquels elles ont été soumises. L'accès aux grandeurs fondamentales (barrières d'activation, énergies de diffusion, sections efficaces de photodissociation, ...) est ainsi désormais possible. Ces expérimentations permettent de plus d'expliquer la présence de ces molécules organiques complexes dans les environnements cométaires, mais aussi de proposer de nouvelles molécules à détecter. Ces données physico-chimiques permettent d'identifier les processus spécifiques du MIS se déroulant à basses températures et sous flux de rayonnements énergétiques. Ces expériences permettent de mieux comprendre les observations et de mieux contraindre les modèles d'évolution chimique de différents environnements astrophysiques.

- **Approche holistique : Des grains des nuages moléculaires denses à la matière organique météoritique**

Les mêmes systèmes expérimentaux que ceux utilisés dans l'approche réductionniste permettent le développement d'une approche holistique ayant pour objectif d'étudier de manière globale l'évolution des glaces du nuage moléculaire dense, pour comprendre les différentes étapes qui ont pu faire évoluer la matière organique formée à partir de ces glaces vers celles actuellement observée au sein des

météorites, en particulier avec l'expérience MICMOC. En effet, l'altération à basse température d'analogues de glace interstellaire mène à la formation d'une grande diversité moléculaire qui va évoluer lors de la formation d'un système planétaire pour mener à une matière organique telle que connue au sein des comètes et astéroïdes. Ainsi les phases de nébuleuse protosolaire, du disque protoplanétaire ou d'hydrothermalisme au sein de certains corps interplanétaires provoquent une évolution de cette matière qui est étudiée à travers ces expérimentations. Le PIIM associe ces expérimentations à des développements innovants en chimie analytique permettant de déterminer les compositions moléculaires des phases gazeuses, liquides ou solides issues de ces expérimentations, développements essentiels pour comprendre les différentes étapes d'évolution de la matière lors de la formation d'un système planétaire.

- **Du laboratoire à l'observation et aux développements de missions spatiales**

L'ensemble des études en laboratoire développées par le PIIM est essentiel pour comprendre les observations à distance ou in situ d'objets astrophysiques effectuées par le LAM (satellites glacés, comètes, astéroïdes) ou le CEREGE (matière météoriques). Par ailleurs, ces expérimentations fournissent des données nécessaires pour contraindre les modèles d'évolution physique et chimique de corps interplanétaire tels que ceux développés au LAM. Comprendre l'évolution de la matière au sein de nuages moléculaires denses est un point essentiel pour déterminer la filiation pouvant exister entre le MIS et la matière présente au sein de systèmes planétaires et a fortiori l'origine de la matière organique de notre système Solaire. Ces études allient les observations à distance des environnements de formation d'étoile, les missions spatiales ayant pour objectifs l'analyse des corps de notre système planétaire et le développement d'expérimentation en laboratoire simulant les environnements observés. Ainsi le couplage de cet ensemble de compétences au sein de l'**Institut Origines** de Marseille ouvre des possibilités sur la compréhension future de l'origine de la matière organique composant les objets de notre système solaire.

Thème 4 : Astrobiologie

L'axe Astrobiologie de l'**Institut Origines** touche aux questions de **l'origine de la vie**, de son **évolution** et de sa **distribution dans l'univers**. Ce domaine scientifique pluri- et interdisciplinaire est particulièrement dynamique depuis la découverte de la 1ère exoplanète en 1995.

La question de **l'origine de la vie** est abordée dans l'institut par des recherches sur les conditions physico-chimiques pouvant mener à l'émergence d'une chimie prébiotique, en particulier sur les planètes telluriques et donc sur la Terre primitive, un exemple mieux connu dans son historicité et sur laquelle la vie est effectivement apparue. Un des projets interdisciplinaires majeurs entre astrochimie, géochimie, chimie organique et métabolomique (LCE, BIP, PIIM, CEREGE, IMBE) est d'étudier la

matière organique primitive exogène, dont les météorites nous fournissent des échantillons, pour comprendre sa chimie dans les conditions de la Terre primitive et analyser (au travers de l'étude des mécanismes de conversion d'énergie libre microbiens) les déséquilibres thermodynamiques ambiants nécessaires à l'émergence de la vie. Des expérimentations en laboratoire fourniront des informations essentielles sur la gamme de paramètres physico-chimiques (température, pH, irradiation, composition atmosphérique, etc.) dans laquelle un « paysage chimique prébiotique » peut effectivement se développer, à partir des briques simples qui le constituent (acides aminés, bases nucléiques et sucres par exemple). Ces travaux préciseront aussi la notion d'**habitabilité, plus particulièrement en la reliant aux conditions physico-chimiques et planétologiques de l'émergence du vivant**. L'institut offrirait une opportunité unique permettant d'allier un très large éventail de compétences depuis l'observation de la matière organique exogène à la production d'analogues les plus représentatifs possible de cette matière. A partir de cette matière placée dans les conditions aqueuses de la Terre primitive, le défi est de mettre en évidence l'émergence de systèmes auto-catalytiques hors-équilibre, une chimie soumise à une évolution moléculaire proto-darwinienne, prélude indispensable aux systèmes biochimiques.

L'émergence et l'évolution du vivant peut être également abordée par l'étude des organismes capables de se développer aux limites du vivant dans des conditions de température, pH, pression, salinité etc…qui, d'un point de vue anthropocentré, sont extrêmes. Ces environnements, tels les environnements océaniques profonds, qui sont étudiés depuis plusieurs années par le MOI et l'IMBE, constituent des modèles d'étude importants pour la compréhension de la transition d'une chimie prébiotique aux premières proto-cellules. Ils peuvent être considérés comme des milieux analogues à ceux qui prévalaient sur la Terre primitive. Des systèmes hydrothermaux, tel le site de Prony en NC étudié par le MIO, sont alimentés par les réactions de serpentinisation où l'hydratation des roches ultramafiques (constituant principal du manteau) produit du méthane, des hydrocarbures à chaîne courte, du formiate et de l'acétate qui alimentent un écosystème microbien très particulier. Sur la Terre primitive, à l'Hadéen, la serpentinisation en abondance pourrait avoir engendré de nombreux systèmes hydrothermaux alcalins, riches en ces composés au sein d'un océan acide (pH vers 5). Dans ces conditions, l'établissement de gradients de protons et d'oxydoréduction aurait constitué une importante source d'énergie chimio-motrice qui aurait permis les premières réactions biochimiques à l'origine de l'émergence de la vie sur Terre. L'étude d'analogues modernes à ces environnements primitifs est donc non seulement cruciale pour la compréhension des origines de la vie sur Terre mais aussi pour la détection de vie potentielle sur d'autres planètes où la serpentinisation peut exister tels que Mars ou Encelade.

La question de la **distribution de la vie dans l'univers** reste évidemment complètement ouverte aujourd'hui. Les progrès en instrumentation améliorent sans cesse nos capacités en matière de caractérisation des exoplanètes (voir axes instrumentation et exoplanètes) et notre capacité à pouvoir peut-être détecter la vie ailleurs. La détection d'une biosignature sur ces planètes est bien sûr un des enjeux majeurs de la recherche contemporaine en astronomie et la réflexion sur la notion de biosignature est primordiale : peut-on définir une biosignature fiable ? Le dioxygène,

gaz biogénique produit par la photosynthèse sur Terre, peut-il être considéré comme une signature fiable de la vie sur une planète ? Quels peuvent être les faux positifs ? Peut-on détecter des traces d'activités biologiques (ou biochimiques) par la métabolomique ? Que nous apprend la Terre du passé ? A l'instar des travaux réalisés ces dernières années au sein de l'OSU (OHP (UMS Pytheas), LAM, CEREGE) par des astronomes et paléobotanistes, **la mise en place de l'Institut Origines et le rapprochement de chercheurs avec un tel éventail de compétences, offrirait une opportunité unique pour développer un ensemble d'outils permettant de faire entrer l'Astrobiologie dans une nouvelle phase de la compréhension du vivant, de son émergence à sa présence sur les exoplanètes**.

Thème 5 : Instrumentation

Les recherches sur l'origine de la vie ont donné lieu à un développement instrumental important qui a porté sur différents aspects depuis la détection des molécules primordiales dans l'univers à l'origine du vivant et à l'identification des premières traces de vie sur notre planète. Les laboratoires de l'AMU impliqués dans le projet d'**Institut Origines** possèdent des expertises complémentaires dans ce domaine depuis les analyses de terrain, la physique et la chimie de laboratoire, jusqu'au développement de grands instruments spatiaux. Leur rapprochement permettra d'augmenter le transfert de compétences et les collaborations sur le développement instrumental, avec aussi une optimisation des ressources de l'Université. Des collaborations ont déjà été initiées avec le tissu industriel local (COMEX, etc) et feront l'objet de rapprochements à l'avenir. La COMEX est spécialisée dans le développement et les tests d'instruments pour les environnements extrêmes (haute pression, vide, haute température). Elle met ses moyens d'essais à la disposition des industriels et des organismes de recherche. Intervenant dans le domaine maritime et le domaine spatial, elle peut faire la liaison entre la recherche de l'institut et l'industrie. Parmi les installations disponibles sur le site de la COMEX à Marseille figurent l'HYDROSPHERE (qui est « ESA Ground Based Facility »), le CE4000 (pour tester des pressions allant jusqu'à 400bar avec un diamètre de 2.5m) et le CENTRE HYPERBARE.

Fig. 2. *De gauche à droite : le Centre Hyperbare de la COMEX à Marseille, développement d'une machine de tests industriels à 3000bar, le CE4000 pour des*

tests à 400bar (diamètre 2.5m).

L'**Institut Origines** permettra de créer une très forte synergie entre les chercheurs instrumentalistes et les autres disciplines. Trois thèmes sont identifiés :

- **Physique et chimie de laboratoire**

Comme indiqué précédemment, le PIIM développe des dispositifs expérimentaux en soutien aux projets de futurs instruments spatiaux ; il développe aussi des protocoles nécessaires à l'analyse et au traitement des données issues de futures spatialisations d'outils analytiques embarqués. Par exemple, dans le cadre du consortium Cosmoorbitrap sous l'égide du CNES, la technologie FT-orbitrap, spectromètre de masse haute résolution, est en cours de spatialisation. Dans le cadre de ce développement, le PIIM possède un GC-orbitrap commercial unique dans la communauté française de planétologie qui permet, dans un premier temps, de tester en laboratoire une nouvelle technologie pouvant être embarquée dans de futures missions spatiales dont l'objectif serait par exemple la recherche de biomarqueurs. Avec la mise en place du plateau de métabolomique MALLABAR, l'IMBE développe également des outils de caractérisation in situ des paysages chimiques dans divers environnements. En collaboration avec la COMEX, ils construisent actuellement le prototype d'un engin permettant le captage de molécules organiques à l'état de traces sans échantillonnage de matrice (eau, glace, sols, etc.). Dans ce cas aussi, il est prévu de rendre cet outil télé-opérable de manière à le déployer dans des environnements extrêmes. Par ailleurs, le CEREGE possède les plateformes ACHIM et ASTER, toutes deux dédiées à l'étude du champ magnétique terrestre et à très haute visibilité internationale. Enfin, le laboratoire de magnétisme des roches et paléomagnétisme est également une entité du CEREGE.

- **Études de la matière organique dans le système solaire**

Le LAM possède une **expertise importante dans le domaine des caméras embarquées dans les missions d'exploration du système solaire**. Ce savoir-faire lui vaut de participer aux missions spatiales d'envergures en cours ou en phase de projet. Le PIIM propose de développer un instrument PROBICE destiné à être embarqué dans une sonde afin de faire des mesures in situ ; cet instrument permettra l'échantillonnage de la matière organique sous forme condensée afin **d'analyser et de caractériser les composés volatils dans le système solaire** (surfaces glacées de corps du système solaire, atmosphères, aérosols atmosphériques, etc). Avec ses capacités polyvalentes d'échantillonnage, l'instrument pourra également servir de plateforme de distribution pour l'analyse de cette matière par d'autres instruments embarqués sur la même mission tel que la spectrométrie de masse très haute résolution de type FT-orbitrap.

- **Caractériser les planètes habitables hors du système solaire et identifier les biosignatures**

Hors du système solaire, le grand défi est désormais la recherche de planètes rocheuses, déterminer leurs propriétés physiques et surtout identifier celles qui seraient susceptibles d'abriter la vie. Sur ces aspects, le LAM est en première ligne avec au sol l'exploitation du spectrographe SPIRou, et dans l'espace avec la mission

CHEOPS de l'ESA. Ces instruments permettront de comprendre la formation et l'évolution des populations de petites planètes à courte période orbitale dans des conditions physiques très différentes de celles du système solaire en termes d'insolation. L'OHP est également un acteur de premier plan dans la détection et la recherche d'exoplanètes par la mesure des vitesses radiales via l'utilisation du télescope de 193 cm et les spectrographes ELODIE puis SOPHIE.

Sur le plus long terme, la mission PLATO de l'ESA dont le LAM sera un des centres de données, ouvrira le domaine des planètes analogues à la Terre et donc l'identification de sites susceptibles. Il reste toutefois à imaginer les projets d'observations (stratégies, techniques de réduction) des futurs instruments des grands observatoires (VLT, Keck, etc.) ou à proposer de futurs instruments pour l'E-ELT qui permettront de mieux caractériser la chimie des atmosphères des petites planètes dans la zone habitable d'étoiles semblables au Soleil.

L'**Institut Origines** permettra de conduire des études fondées sur nos connaissances de la biologie des organismes vivants sur Terre, études qui permettront la définition des spécifications (bandes et résolutions spectrales, sensibilités à atteindre, types d'objets à étudier en priorité) des instruments futurs dédiés à la recherche et la mesure de marqueurs de vies (biomarqueurs) sur les exoplanètes.

Thème 6 : Pluralité des mondes

La philosophie est née de l'émergence d'une forme de rationalité et d'un type de discours qui allaient ouvrir en Occident une tradition de pensée originale. Ce type de discours et cette forme de rationalité sont apparus au VI^{e} siècle avant notre ère en Ionie, sur les côtes d'Asie mineure, dans la cité grecque de Milet. Là, Thalès, Anaximandre, Anaximène notamment formèrent ce que l'on a considéré après-coup comme une école, l'école milésienne. L'unité que l'on a accordé à leur démarche tient au moins à trois raisons : i) il s'agit d'enquêter sur l'origine des choses et des phénomènes, ii) cet ensemble forme un tout complexe qui est désigné sous le terme de nature, de *phusis*, dont l'étude va devenir la physique, iii) les explications pour rendre compte de ce tout et des phénomènes qui le constituent abandonneront tout recours à des puissances, des êtres ou des forces surnaturelles.

Ainsi la philosophie naît-elle de la recherche d'explications physiques et rationnelles sur l'origine, la formation du cosmos et sur les formes de vie qui pourraient le peupler. Malgré la multitude des inflexions et des mutations que chaque époque fera subir à la philosophie, cette dernière continuera d'accorder à la physique un statut épistémique privilégié. Descartes la tiendra encore pour le tronc dont sortent toutes les autres sciences et « dont les racines sont la métaphysique ». Si chaque domaine, depuis les physiciens-philosophes de l'époque de Milet, a su trouver sa propre voie, fixer ses propres méthodes et se constituer en discipline autonome, les surfaces de contact entre physique et philosophie sont restées constantes dans la tradition, vieille

de plus de vingt-cinq siècles, qui n'a jamais vraiment cessé de les unir. C'est dans cette longue filiation que l'Institut d'histoire de la philosophie (EA 3276) entend inscrire sa participation aux recherches, aux réflexions et au renouvellement des offres d'enseignement au sein de l'**Institut Origines**.

Concernant le sujet qui intéresse au premier chef l'**Institut Origines**, la philosophie a de longue date pensé la thèse d'une pluralité des mondes. Anaximandre concevait la nature féconde et productrice. De sa puissance infinie d'engendrement naissaient des germes cosmiques et de chacun de ces germes naissaient, dans un espace et dans un temps sans fin, un monde. La thèse de la pluralité infinie des mondes sera reprise par Démocrite et plus précisément Épicure qui, dans sa *Lettre à Hérodote*, soutient que « ce n'est pas seulement le nombre des atomes, c'est celui des mondes qui est infini dans l'univers. Il y a un nombre infini de mondes semblables au nôtre et un nombre infini de mondes différents », sans compter les thèses sur la question des intermondes. Descartes encore dans sa lettre à Chanut du 6 juin 1647 écrira « je ne vois point que le mystère de l'Incarnation, et tous les autres avantages que Dieu a faits à l'homme, empêchent qu'il n'en puisse avoir fait une infinité d'autres très grands à une infinité d'autres créatures. Et bien que je n'infère point pour cela qu'il y ait des créatures intelligentes dans les étoiles ou ailleurs, je ne vois pas aussi qu'il y ait aucune raison, par laquelle on puisse prouver qu'il n'y en a point ».

Le Centre Gilles Gaston Granger (UMR7304) viendra, pour sa part, nourrir à la fois le thème 6 (métaphysique et histoire de la philosophie ancienne et moderne) et proposer d'intégrer, sur les 5 thèmes précédents, les éclairages épistémologiques de son équipe de spécialistes (qui comprend notamment un doctorant sous contrat inter-ED en philosophie et cosmologie avec le CPT et un doctorant sous contrat inter-ED Big Data et environnement avec l'IMBE). La plupart ont en effet une double formation, d'une part en physique, biologie, chimie, cosmologie, et d'autre part en épistémologie, en philosophie et en histoire des sciences, permettant ainsi de travailler sur une question philosophique qui traverse l'exo- puis l'astrobiologie : celle de la définition de la vie et du rôle que cette question joue dans les pratiques des scientifiques.

On sera ainsi amené à se positionner face aux différentes interprétations du « principe anthropique » ; celui-ci qui énonce qu'un univers observable implique l'émergence d'observateurs. Or, cet univers observable n'aurait pas pu exister si les lois et les valeurs des constantes de la physique avaient été infinitésimalement différentes. Si les lois biologiques peuvent être réduites aux lois de la physique, l'origine de l'émergence de la vie sur Terre, ou ailleurs, peut-elle être considérée comme « codée » ou « programmée » (M. Subotowicz, 1989) dans l'Univers ? Est-ce que cela nous amène à « localiser » l'origine de la vie non plus dans les conditions qu'offrent la Terre mais dans celles qu'offre l'Univers ? Comment l'« impératif cosmique » (C. de Duve, 2007) conditionne-t-il l'émergence de la vie par les lois déterministes de la physique et de la chimie ? Quelle forme prendrait le principe anthropique face aux nouvelles hypothèses cosmologiques comme celle des multivers (Z. Galantai, 2016) ? Une approche par la philosophie de la cosmologie permettra ces investigations épistémologiques.

6. Le Projet de Formation de l'Institut Origines

Les compétences croisées au sein de l'**Institut Origines** couvrent cinq domaines de première importance en termes de croissance et de visibilité dans les années à venir : la planétologie (Système Solaire et exoplanètes), l'Astrobiologie, l'astrochimie, l'instrumentation associée à ces thématiques, et enfin les Sciences Humaines et Sociales. **L'ensemble des compétences de l'Institut débouchera vers une offre d'enseignements ouverte à une large diversité de filières, en concertation avec les différentes composante d'AMU, mais aussi vers une formation universitaire dédiée unique en France.** L'offre sera construite autour d'un parcours de formation identitaire pour l'**Institut Origines**, qui sera visible aux échelles **locale, nationale, européenne et internationale**. Une partie de cette offre est actuellement existante au travers d'UE dont les thèmes sont communs à ceux qui seront enseignés par l'**Institut Origines** (voir **Annexe D**).

L'offre de formation de l'Institut est envisagée en deux temps :

Court terme (2022-2024):

- **Mise en place d'une "Graduate School"** sur les cycles **Master** et **Doctorat**, avec des enseignements complémentaires comprenant de des UE scientifiques et techniques proposés dans plusieurs masers de l'UFR Sciences et de l'OSU Pythéas, mais aussi des Écoles thématiques.
- Mise en place d'un **Diplôme d'Université (2022 ou 2023).**

Moyen terme (2024-2026):

- Création d'un **Master international d'Astrobiologie** qui rassemblerait, notamment des partenaires enseignants/étudiants issus des universités membres de **CIVIS**

Les actions de de diffusion de la culture scientifique et technique ont été développées dans la Section 3.

Le souhait de l'institut Origines est de pouvoir mettre en place au plus tôt, dès la rentrée 2022, les premiers éléments d'une *Graduate School*, outil parfaitement dimensionné à notre offre actuelle de formation-recherche-valorisation. Cette Graduate School proposera des modules optionnels) ou supplémentaires (crédités ou bonifiés en M1 dans divers masters, principalement de l'UFR Sciences et de l'OSU Pythéas, afin de permettre aux étudiants de se construire des parcours personnalisés et d'acquérir des compétences complémentaires via une immersion dans des thématiques de recherche active, mais aussi via une ouverture d'esprit et de questionnement scientifique, avec des modules d'histoire des sciences et d'épistémologie.

En complément des enseignements de master, des **modules d'enseignement seront proposés dans les différentes écoles doctorales relevant des domaines de l'Institut Origines** (physique, chimie, biologie, environnement, ingénierie, philosophie, épistémologie, mais aussi culture et sociétés). Le **lien master-doctorat** pourra être réalisé par des participations communes des deux publics à des écoles thématiques.

Pour contourner les contraintes d'emplois du temps, ces enseignements seront proposés sous forme de SPOC (Small Private Online Course), de cycles de séminaires à distance (ce qui permettra l'intervention facilitée d'enseignants-chercheurs internationaux), mais aussi des périodes regroupant des "travaux pratiques" en présentiel, sur le modèle de ce qui se fait en télé-enseignement. Certaines de ces activités pourraient être proposées à des étudiants particulièrement méritants dès la fin du cycle licence, afin "d'amorcer la pompe" de la Graduate School.

Nous souhaitons également pour cette Graduate School développer l'internationalisation, avec un **recrutement international a l'entrée du Master et du Doctorat**.

Le détail de la nature, du volume et de l'insertion de ces nouveaux enseignements dans les maquettes existantes (et à venir en 2024) seront discutées avec les composantes concernées, et leur financement devra tenir compte à la fois du budget attribué à l'institut et d'éventuels soutiens du projet TIGER. Notre Graduate School sera initialement définie en s'appuyant sur les maquettes d'enseignement existantes dans les différentes disciplines et dans les écoles partenaires, avec un apport limité de nouvelles formations. Un tel jeu de construction pourrait dessiner des parcours « **Institut Origines** » au sein de l'offre de formation existante, puis se développer progressivement et de façon souple au fur et à mesure du développement de l'institut et des succès de son ouverture internationale.

La Graduate School sera capable d'articuler des parcours « recherche » (jusqu'à bac + 8) mais aussi « professionnalisants » (jusqu'à bac + 5), avec une formations plus importante aux outils, méthodes et technologies dans les parcours proposés (formation "par" la recherche). **Cette Graduate School sera donc largement interdisciplinaire et « polytechnique » (au sens original du terme), avec une double couverture, thématique et technique, large.**

La couverture thématique large de l'offre de formation de l'**Institut Origines** sera articulée autour de la proposition :

« Faire découvrir aux étudiants comment s'assemble un système planétaire habitable, depuis les briques de base des planètes, des lunes et des petits corps, jusqu'aux briques de base de la vie, et comment on peut l'observer aux différentes époques de son évolution. »

La couverture « polytechnique » pourra par exemple suivre le « **cycle de la donnée spatiale** », avec à la clé le développement de connaissances dans les théories de la mesure, l'instrumentation, les outils et infrastructures de l'observation, le "big data", le machine-learning, la modélisation, les analyses en laboratoires. **Ces méthodes pourront aisément s'adosser aux formations des disciplines techniques de base et permettront d'intégrer des participations d'écoles d'ingénieurs.**

La composante SHS pourra également alimenter les contenus des enseignements mis en place par l'Institut. Elle permettra de proposer une réflexion sur l'histoire des doctrines et des représentations relatives aux domaines de recherche de l'**Institut Origine** mais aussi de proposer une formation solide en philosophie des sciences créée sur mesure et adaptée aux différents profils scientifiques, comme le statut et le rôle de l'erreur dans la construction du savoir expérimental ; les modes de raisonnement utilisés par les scientifiques, les régimes de preuve qu'ils mobilisent, et les notions de paradigme et de programme de recherche. Ces cours seront couplés à une introduction à l'histoire des sciences et des techniques qui sera focalisée sur les instrumentations utilisées en astrophysique, astrochimie, chimie prébiotique, biochimie et biologie, ainsi que sur les relations que ces instrumentations entretiennent entre elles dans le cadre de l'étude des systèmes planétaires et de l'origine de la vie. Les cours de philosophie feront aussi appel, plus spécifiquement, à la philosophie de la chimie, de la physique et de la biologie pour comprendre la construction de ces savoirs, leurs relations et les représentations du monde qu'ils impliquent. Enfin, un cours d'épistémologie dédié à l'étude des systèmes complexes sera également proposé aux étudiants et aura pour but de les faire réfléchir sur les fondements de la complexité, les modèles complexes, les avantages et les limites d'une approche complexe dans un cadre interdisciplinaire. Ces cours auront pour objectif d'aider les étudiants à intégrer une réflexion sur ces disciplines et sur les rôles qu'elles ont joués, et qu'elles jouent toujours, dans l'étude de la vie en général, et de la vie extraterrestre en particulier.

L'ouverture internationale et le recrutement peuvent être réalisés au prix d'un investissement initial modeste mais très structurant, via la constitution d'un réseau d'universités partenaires du projet dans les principaux pays dominant le monde académique (UE, UK, USA, Chine, Japon, Corée du sud), en portant une attention particulière à l'université européenne CIVIS et au consortium des Universités Euro-Méditerranéennes Téthys portés par AMU. Ces universités « partenaires » devront être sollicitées pour nous adresser des « letters of commitment » dans lesquelles elles s'engageront à échanger avec l'**Institut Origines** des étudiants, professeurs et modules de formation (en commençant par exemple par des écoles d'été internationales où les étudiants d'AMU pourront rencontrer des étudiants du meilleur niveau de nombreux autres pays). Pour chaque université partenaire, l'**Institut des Origines** désignera un « ambassadeur », i.e. une personne chargée d'animer la collaboration et d'être pro-active dans les recrutements, l'université partenaire désignant également un correspondant.

L'institut intégrera dans ses modes et outils de collaboration tous ceux qui sont accessibles à AMU en tant que membre de CIVIS. Un action de sensibilisation des membres de l'Institut à la valeur ajoutée que présente la participation à CIVIS pour les activités de recherche, de formation et d'innovation sera organisée auprès de toutes les équipes membres de l'Institut, avec la participation de la vice-présidence chargée des relations internationales. Au-delà de ce "pilier" de la politique européenne de l'Institut que représentera CIVIS, l'Institut va identifier à court terme des partenaires européens offrant une valeur ajoutée spécifique sur ses thématiques, que ce soit des universités (Universités de Liège en Belgique, de Leiden aux Pays-Bas, de Graz en Autriche, ou University College London qui porte le projet spatial ARIEL de l'ESA,...), des organismes de recherche (comme le Centre d'Astrobiologie INTA-CAB à Madrid),

ou des sociétés scientifiques (comme l'association européenne d'astrobiologie, ENEA).

Le diplôme d'Université de deuxième cycle (DU), ouvert en formation initiale et en formation continue, s'adressera principalement aux enseignants du second degré, mais aussi aux étudiants, salariés ou retraités désireux d'acquérir des connaissances dans le domaine des sciences de l'univers et de l'Astrobiologie. Ce dispositif pourra être financé via le Compte Personnel de Formation, qui permet de cumuler des droits à la formation professionnelle. Ce DU combinera des **enseignements à distance** et des stages en présentiel, en particulier des "**écoles**", réalisées sur les sites de l'OSU Pythéas (Observatoire de Haute-Provence, mais aussi station marine d'Endoume). Certains enseignements de ce DU seront proposés, sous forme d'**UE supplémentaires, créditées ou bonifiées, aux étudiants des masters de physique, chimie et biologie de la faculté des Sciences, de l'OSU Pythéas (master STPE), de la faculté ALLSH et des écoles d'ingénieur.** Quelques UE pourront être proposées dès le niveau licence, afin de donner de la visibilité aux enseignements de master. Ces enseignements transverses seront mis en place avec les responsables de filières dans les UFR concernés. La **mutualisation** de ces enseignements avec le DU, ainsi que le recours à l'enseignement à distance associé à des périodes de stage ou des écoles, permettront une mise en place souple **dans le cadre des maquettes existantes**, en évitant la multiplication des enseignements nouveaux et en contournant les contraintes d'emploi du temps.

Dans un second temps, et en s'appuyant sur les expériences des enseignements mis en place en master, école doctorale et du DU, nous souhaitons mettre en place un master international d'astrobiologie, dans le cadre d'une collaboration étroite avec les universités membres de **CIVIS**. Nous avons identifié plusieurs laboratoires à la pointe de la recherche dans des laboratoires d'universités membres de CIVIS (Université Libre de Bruxelles, Sapienza Univrsita di Roma, Stockholms universitet, University of Glasgow). L'appui de CIVIS nous permettra d'accéder à un vivier important d'étudiants, assurant la pérennité d'une telle formation. Ce master pluridisciplinaire comportera des enseignements théoriques et pratiques dans les domaines de la Physique, la Chimie, les Sciences de la Terre et de l'environnement, la Biologie, les Sciences Spatiales, la philosophie mais aussi l'informatique, le traitement du signal et l'intelligence artificielle (données de masse) qui touchent à des aspects de l'étude des systèmes planétaires. La structuration du Master permettra aux étudiants d'acquérir une spécialisation professionnelle progressive à partir de leur formation antérieure et d'obtenir ainsi un diplôme valorisé sur le marché du travail. Les étudiants auront l'opportunité d'opter pour un parcours européen Erasmus Mundus et de bénéficier du réseau des collaborations internationales entre instituts d'astrobiologie. Sur la totalité du master (M1 + M2), les étudiants effectueront plusieurs mois de stages professionnels et réaliseront de nombreux travaux sous forme de projets. Nous proposons en effet d'appuyer le master sur :

- Un travail par projets courts afin que les étudiants acquièrent des compétences à travers des études ciblées et applicatives.

- Un stage professionnel long en laboratoire ou entreprise, selon le choix de l'étudiant.
- **Un projet scientifique en immersion**, par exemple sur 15 jours ou 3 semaines, encadré par des spécialistes extérieurs, pour les familiariser au travail de recherche et les aider à prendre en main des techniques innovantes telles que l'intelligence artificielle pour l'analyse des données.
- Des cycles de séminaires avec des intervenants extérieurs, experts de leurs domaines.

En fonction des parcours, **une grande partie des enseignements sera donnée en anglais**. Grâce à cette formation, les étudiants acquerront une culture multidisciplinaire, à la fois scientifique et instrumentale, ouverte sur les domaines connexes de l'environnement, des sciences de la Terre, de l'astrophysique, et des sciences humaines. A l'issue du parcours de Master, les étudiants pourront s'orienter vers différents métiers : chercheurs et enseignants-chercheurs dans les domaines de la planétologie, mais également de l'environnement (télédétection, changement climatique, bases de données…), des sciences de la Terre (sismologie, géochimie, …), de l'astrophysique, ainsi que des sciences de la communication ; fonctions de responsabilité dans les agences spatiales (chef de projet, responsable thématique, …), les entreprises industrielles du domaine spatial (ingénierie spatiale, management de projet, développement logiciel, …), enfin les média et la communication scientifique tant la demande sociétale est forte dans ce domaine nouveau de l'Astrobiologie.

Enfin, en raison de son attractivité et des nombreuses techniques d'analyses mises en oeuvre pour l'étude des systèmes planétaires, **l'Institut Origines** fournira un **environnement idéal pour accueillir des apprentis issus de formations en alternance** (IUT, Ecoles d'Ingénieurs, entreprises, etc). Ce cadre renforcera le lien existant entre la formation supérieure et l'entreprise/sociétal.

L'aspect interdisciplinaire de l'Institut permet également de former les étudiants sur des techniques fondamentales telle que l'Astronomie mais leur permettra aussi d'acquérir des compétences qu'ils pourront utiliser dans de nombreux domaines du secteur privé. Par exemple, nos étudiants seront formés dans la gestion des Big Data et l'utilisation du Machine Learning qui est autant nécessaire pour le traitement des données issues des observations que pour Google. Par ailleurs, d'autres enseignements leur permettront de se former sur des techniques analytiques multi-échelles de pointe en utilisant des échantillons uniques (matériaux extraterrestres présentant de très grandes diversités moléculaires, complexités des matrices minérales et/ou organique) ce qui leur confèrera des compétences uniques que d'autres formations plus généralistes ne sont pas capables de leur fournir. L'ensemble des compétences qu'ils acquièrent seront valorisées via la mise en place de business entrepreneurship qui permettra aux étudiants d'être mis en relation directe avec les tissus économiques locaux, nationaux et /ou internationaux. Cette approche sera de plus renforcée par notre volonté d'établir des partenariats avec des entreprises privées dans le cadre du développement de notre institut. Par exemple, les étudiants pourraient être mis en immersion pendant 15 jours pour travailler sur des projets qui seraient encadrés par des entreprises privées impliquées dans le développement de

l'Institut. Ces approches permettront d'ouvrir à nos étudiants des perspectives uniques pour leur insertion dans la vie active au sein d'entreprises locales ou nationales.

7. La Place de l'innovation dans l'Institut Origines

Les activités thématiques et techniques de l'Institut ont vocation à engendrer de l'innovation, au sens d'un transfert des inventions "académiques" vers le marché et d'une création de valeur ajoutée, dans trois domaines :

1. l'instrumentation pour les recherches sur les origines des planètes et de la vie, en particulier à travers le développement de biocapteurs capables de détecter des molécules complexes à des niveaux de concentration extrêmement bas et dans des conditions éloignées des conditions normales de température et de pression ;

2- les logiciels de traitement des données et de reconnaissance de formes complexes et de signaux faibles dans des volumes de données très importants. Ces aspects, qui bénéficieront des dernières avancées en Intelligence Artificielle, recevront une attention particulière ;

3- les plateformes technologiques pourront faire l'objet de partenariats avec des industriels, en particulier les PME innovantes de la région PACA et au-delà, à différents niveaux : ouverture de l'utilisation d'une plateforme académique à des utilisateurs industriels et réciproquement; co-développement et/ou coexploitation de plateformes.

8. Feuille de route de l'Institut Origines

Démarrage de l'institut (fin 2021):

- Mise en place d'une gouvernance et d'un fonctionnement propres

Printemps 2022 :

- Ouverture d'appels à projets interdisciplinaires
- Développement de partenariats avec des **Universités Etrangères**
- Développement de partenariats avec des **industriels**

Septembre 2022 :

- Démarrage de la **Graduate School** par la mise en place d'**UE** transverses dans plusieurs masters de l'UFR Sciences et de l'OSU, principalement.
- Création d'un **Diplôme d'Université.**
- Lancement d'une série d'**écoles thématiques/incubateurs**
- Mise en place de la plateforme technologique

2024

- Création d'un **Master international d'Astrobiologie** avec les partenaires CIVIS
- Sélection de 2-3 axes thématiques (théoriques et/ou expérimentaux) **fédérateurs et prioritaires**
- Soumission de projets pour **financements nationaux et Européens**

En permanence : communication scientifique, recherche de **mécènes et de partenariats privés**

Annexe A : Liste des laboratoires, personnels et partenaires industriels impliqués dans le projet d'Institut Origines

Cette liste est non-exhaustive et sera susceptible d'être élargie entre le moment de la soumission de la lettre d'intention et la finalisation du dossier. Les ETP sont définis par le recoupement des thématiques de recherche individuelles avec celles du projet d'institut.

Laboratoire d'Astrophysique de Marseille (UMR7326 - CNRS-INSU, CNES, Aix-Marseille Université)

Laboratoire d'Astrophysique de Marseille (LAM)				
PERSONNEL PERMANENT				
NOM	**Prénom**	**Statut**	**Email**	**ETP (%)**
BEUZIT	Jean-Luc	Directeur de Recherche CNRS	Jean-luc.beuzit@lam.f	20
BLANC	Michel	Professeur Emérite UPS	michel.blanc@irap.om	50
BOISSE	Isabelle	Astronome-Adjoint	isabelle.boisse@lam.fr	100
BOTTI	Thierry	Ingénieur de Recherche CNRS	thierry.botti@osupythe	25
CANTALLOUBE	Faustine	Chargée de Rercherche CNRS	faustine.cantalloube@	75
CARTER	John	Astronome-Adjoint	john.carter@u-psud.fr	50
CHOQUET	Elodie	Astronome-Adjointe	elodie.choquet@lam.fr	100
DELEUIL	Magali	Professeur des Universités AMU	magali.deleuil@lam.fr	100
DELSANTI	Audrey	Maître de Conférences AMU	Audrey.Delsanti@lam.	100
DIDIER	Melody	Ingénieur de d'Etudes CNRS	melody.didier@osupyt	25
DOHLEN	Kjetil	Ingénieur de Recherche CNRS	kjetil.dohlen@lam.fr	25
FABRON	Christophe	Ingénieur de Recherche CNRS	christophe.fabron@lan	25
FETICK	Romain	Chargé de Rercherche ONERA	romain.fetick@onera.fr	50
FIGON	Patrick	Ingénieur de Recherche CNRS	Patrick.Figon@osupytheas.fr	
FUSCO	Thierry	Directeur de Recherche ONERA	thierry.fusco@onera.fr	50
GROUSSIN	Olivier	Astronome-Adjoint	olivier.groussin@lam.fr	100
GUTERMAN	Pascal	Ingénieur de Recherche CNRS	pascal.guterman@lam	70
HUGOT	Emmanuel	Chargé de Rercherche CNRS	emmanuel.hugot@lam	5
JAQUET	Marc	Ingénieur de Recherche CNRS	marc.jaquet@lam.fr	25
JORDA	Laurent	Astronome-Adjoint	laurent.jorda@lam.fr	100
LAMY	Laurent	Astronome-Adjoint	laurent.lamy@obspm.f	50
LANZONI	Patrick	Ingénieur d'Etudes AMU	patrick.lanzoni@lam.fr	20
LE COROLLER	Hervé	Astronome	herve.lecoroller@lam.f	50
MOUSIS	Olivier	Professeur des Universités AMU	olivier.mousis@lam.fr	100
NEICHEL	Benoit	Chargé de Rercherche CNRS	benoit.neichel@lam.fr	15
PRIETO	Eric	Ingénieur de Recherche CNRS	eric.prieto@lam.fr	25
SANTERNE	Alexandre	Astronome-Adjoint	alexandre.santerne@la	100
SAUVAGE	Jean-François	Chargé de Rercherche ONERA	jean-francois.sauvage(	50
VERNAZZA	Pierre	Chargé de Rercherche CNRS	pierre.vernazza@lam.f	100
VIGAN	Arthur	Chargé de Rercherche CNRS	arthur.vigan@lam.fr	90
ZAMKOTSIAN	Frédéric	Directeur de Recherche CNRS	frederic.zamkotsian@l	25

PERSONNEL NON PERMANENT				
ACUNA	Lorena	Doctorante AMU		100
AGUICHINE	Artem	Doctorant AMU		100
BOUQUETY	Axel	Postdoctorant CNES		100
CORTES-ZULETA	Pia	Doctorant AMU		100
FERRAIS	Martin	Doctorant AMU		100
HEIDARI	Neda	Doctorante Univ. Téhéran/AMU		100
HOULLE	Mathis	Doctorant AMU		100
HOYER	Sergio	Postdoctorant CNES		100
LOPEZ	Théo	Doctorant AMU		100
MERCIER	Guillaume	Doctorant AMU		100
NARDIELLO	Domenico	Postdoctorant CNES		100
RENDON-RESTREPO	Steven	Doctorant AMU		100
SULIS	Sophia	Postdoctorant CNES		100
TENELANDA OSORIO	Laura Isabel	Doctorante AMU		50
XIE	Chen	Doctorant AMU		100

Observatoire de Haute-Provence
(UMS 3470 Institut Pythéas, OSU AMU/CNRS)

PERSONNEL PERMANENT				
NOM	**Prénom**	**Statut**	**Email**	**ETP (%)**
ARNOLD	Luc	Ingénieur de Recherche CNRS		20
HEBRARD	Guillaume	Directeur de Recherche CNRS		20
LE COROLLER	Hervé	Ingénieur de Recherche CNRS		10
MOREAU	François	Ingénieur de Recherche CNRS		20

Centre Gilles Gaston Granger
(UMR 7304 AMU/CNRS)

PERSONNEL PERMANENT				
NOM	**Prénom**	**Statut**		**ETP (%)**
DI LIBERTI	Giuseppe	Maître de Conférences AMU		20
DUTREUIL	Sébastien	Chargé de Rercherche CNRS		30
DURAFOUR	Jean-Michel	Professeur des Universités AMU		25
KOCH	Isabelle	Maître de Conférences AMU		10
MOTTA	Sébastien	Maître de Conférences AMU		10
TARANTO	Pascal	Professeur des Universités AMU		20
PERSONNEL NON PERMANENT				
BEYNE	Simon	Doctorant AMU		
BIERENT	Rudolph	Chercheur Associé		
LLORED	Jean-Pierre	Professeur Ecole Centrale Casablanca		
TROCME-NADAL	Léo	Doctorant AMU		

Institut d'Histoire en Philosophie
(EA 3276 - Aix-Marseille Université)

PERSONNEL PERMANENT				
NOM	**Prénom**	**Statut**		**ETP (%)**
CORRADI	Michèle	Maître de Conférences AMU		20
PARIENTE-BUTTERLIN	Isabelle	Professeur des Universités AMU		20
TORDESILLAS	Alonso	Professeur des Universités retraité		20
		3		
PERSONNEL NON PERMANENT				
de PERETTI	François-Xavier	ATER AMU		20
GARZEND	Maureen	Chercheuse Associée		20
ROCHE	Elisabeth	Chargée d'Enseignement		20
TORDESILLAS	Alonso	Professeur des Universités retraité		20

Mediterranean Institute Of Oceanography (M.I.O) Marseille
(CNRS, IRD, Aix-Marseille Université, Université de Toulon)

PERSONNEL PERMANENT				
NOM	**Prénom**	**Statut**		**ETP (%)**
CAYOL	Jean-Luc	Maître de Conférences AMU		10
COMBET-BLANC	Yannick	Chargé de Rercherche IRD		10
ERAUSO	Gaël	Professeur des Universités AMU		25
GALES	Grégoire	Maître de Conférences AMU		20
GAUSSIER	Hélène	Maître de Conférences AMU		10
MICHOTEY	Valérie	Professeur des Universités AMU		20
POSTEC	Anne	Maître de Conférences AMU		20
QUEMENEUR	Marianne	Chargée de Rercherche IRD		60
ROMMEVAUX	Céline	Chargé de Rercherche CNRS		10
TAMBURINI	Christian	Directeur Recherche CNRS		10
DOLLA	Alain	Directeur Recherche CNRS		10
GAREL	Marc	Ingenieur étude CNRS		10
ARMOUGOM	Fabrice	Ingenieur de Recherche IRD		10

Institut Méditerranéen de Biodiversité et d'Ecologie Marine et Continentale (UMR7263 CNRS, Université d'Aix-Marseille, IRD, Université d'Avignon)

PERSONNEL PERMANENT				
NOM	**Prénom**	**Statut**		**ETP (%)**
CHEVALDONNE	Pierre	Directeur de Recherche CNRS		20
ERESKOVSKY	Alexander	Directeur de Recherche CNRS		20
GREFF	Stéphane	Ingénieur d'Etudes AMU		20
MOLINARI	Sacha	Technicien CNRS		20
PEREZ	Thierry	Directeur de Recherche CNRS		25
SIMMLER	Charlotte	Chargé de Recherche CNRS		20
PERSONNEL NON PERMANENT				
GRENIER	Marie	Doctorante		20
MAUDUIT	Morgane	Doctorante		20
DERRIEN	Maire	Doctorante (recrutement en 2021)		20

Centre Européen de Recherche et d'Enseignement des Géosciences de l'Environnement (CEREGE) (IRD, Coll. France, CNRS-INSU, Aix-Marseille Université)

PERSONNEL PERMANENT				
NOM	**Prénom**	**Statut**		**ETP (%)**
AUMAITRE	Georges	Ingénieur de d'Etudes CNRS		20
BARD	Edouard	Professeur au Collège de France		30
BARONI	Mélanie	Maître de Conférences AMU		50
BELLIER	Olivier	Professeur des Universités AMU		10
BORSCHNECK	Daniel	Ingénieur de Recherche CNRS		??
BORGOMANO	Jean	Professeur des Universités AMU		10
DEMORY	François	Ingénieur d'Etudes CNRS		20
DEVOUARD	Bertrand	Professeur des Universités AMU		80
GATTACCECA	Jérôme	Directeur de Recherche CNRS		60
KEDDADOUCHE	Karim	Ingénieur d'Etudes CNRS		20
MATHE	Pierre-Etienne	Maître de Conférences AMU		20
PERRIN	Mireille	Directeur de Recherche CNRS		10
QUESNEL	Yoann	Maître de Conférences AMU		40
ROCHETTE	Pierre	Professeur des Universités AMU		60
SIAME	Lionel	Maître de Conférences AMU		50
THOUVENY	Nicolas	Professeur des Universités AMU		80
UEHARA	Minoru	Ingénieur de Recherche CNRS		30
VISEUR	Sophie	Ingénieur de Recherche AMU		10
		12		600
PERSONNEL NON PERMANENT				
SIMON	Quentin	Post-Doc Collège de France		30
KRAMER-RUGG	Lisa	Doctorante AMU		60

Unité de Neurobiologie des Canaux Ioniques et de la Synapse (UNIS UMR S 1072, INSERM, Aix-Marseille Université)

PERSONNEL PERMANENT				
NOM	**Prénom**	**Statut**		**ETP (%)**
FANTINI	Jacques	Professeur AMU		10

Laboratoire Physique des Interactions Ioniques et Moléculaires (UMR7345 - CNRS-INSIS, Aix-Marseille Université)

PERSONNEL PERMANENT				
NOM	**Prénom**	**Statut**		**ETP (%)**
BORGET	Fabien	Maître de Conférences AMU		100
BOUQUET	Alexis	Chargé de Rercherche CNRS		100
CHIAVASSA	Thierry	Professeur des Universités AMU		100
COUTURIER	Isabelle	Maître de Conférences AMU		100
DANGER	Grégoire	Maître de Conférences AMU		100
DUVERNAY	Fabrice	Maître de Conférences AMU		100
LAYET	Jean-Marc	Professeur des Universités AMU		5
LE SERGEANT I	Louis	Directeur de Recherche émérite CNRS		100
MINISSALE	MARCO	Chargé de Rercherche CNRS		20
NOBLE	Jennifer	Chargée de Rercherche CNRS		20
PASCAL	Robert	Directeur de Recherche émérite CNRS		100
PIETRI	Nathalie	Maître de Conférences AMU		100
RIGHEZZA	Michel	Professeur des Universités AMU		100
VINOGRADOFF	Vassilissa	Chargé de Rercherche CNRS		100
		13		
PERSONNEL NON PERMANENT				
ASSADOURIAN	Cécile	Doctorant AMU		100
GARCIA	Adeline	Doctorant AMU		100
GUTTIERREZ	Alejandro	Postdoctorant AMIDEX		100
JAVELLE	Thomas	Doctorant ENS		100
LAYSSAC	Yohann	Doctorant AMU		100
RUF	Alexander	Post-doctorant CNES		100
TENELANDA OS	Laura Isabel	Doctorant AMU		50

Bioénergétique et Ingénierie des Protéines
(UMR7281 - CNRS, Aix-Marseille Université)

PERSONNEL PERMANENT				
NOM	**Prénom**	**Statut**		**ETP (%)**
BAYMANN	Frauke	Chargé de Rercherche CNRS		20
DUVAL	Simon	Chargé de Rercherche CNRS		20
NITSCHKE	Wolfgang	Directeur de Recherche CNRS		20
SCHOEPP-COTHENET	Barbara	Directeur de Recherche CNRS		20

Centre Interdisciplinaire de Nanoscience de Marseille
(UMR7325 - CNRS, Aix-Marseille Université)

PERSONNEL PERMANENT				
NOM	**Prénom**	**Statut**		**ETP (%)**
FERRY	Daniel	Chargé de Rercherche CNRS		100
GRAUBY	Olivier	Maître de Conférences AMU		100
LAFFON	Carine	Chargé de Rercherche CNRS		100
PARENT	Philippe	Directeur de Recherche CNRS		100

Laboratoire Information Génomique et Structurale
(UMR7256 - CNRS, Aix-Marseille Université)

PERSONNEL PERMANENT				
NOM	**Prénom**	**Statut**		**ETP (%)**
ABERGEL	Chantal	Directeur de Recherche CNRS		20
CLAVELERIE	Jean-Michel	Professeur des Universités AMU		30
SANTINI	Sébastien	Ingénieur de Recherche CNRS		20

Microbes, Evolution, Phylogénie et Infection
(UMR D-258 - IRD, Aix-Marseille Université)

PERSONNEL PERMANENT				
NOM	**Prénom**	**Statut**		**ETP (%)**
ABI-RACHED	Laurent	Chargé de Rercherche CNRS		30
PONTAROTTI	Pierre	Directeur de Recherche CNRS		70

COMPAGNIE MARITIME D'EXPERTISES (COMEX)

PERSONNEL PERMANENT		
NOM	**Prénom**	**Statut**
WEISS Peter	Peter	Chef du Département Espace
OSKIAN	Alexandre	Chef du Département Ingénierie et Services
DOMBROWSKI	Eric	Chef du Département Marine
PEER	Makthoum	Ingénieur Département Espace
GOBERT	Thibaud	Ingénieur Département Espace
PACHOUD	Gibert	Ingénieur ROV
BRICOUT	Silvère	Technicien Supérieur ROV

Annexe B : Revue de presse non exhaustive illustrant le rayonnement sociétal de quelques membres de l'Institut Origines (période 2018-2020)

URL d'articles disponibles en ligne :

https://www.cieletespace.fr/actualites/a-t-on-decouvert-la-plus-petite-planete-naine

https://www.cieletespace.fr/actualites/hygiea-l-asteroide-qui-reveille-la-bataille-de-pluton

https://www.lefigaro.fr/sciences/l-asteroide-hygie-nouvelle-planete-naine-du-systeme-solaire-20191030

https://www.lepoint.fr/astronomie/l-asteroide-hygie-serait-la-plus-petite-planete-naine-du-systeme-solaire-31-10-2019-2344530_1925.php

https://www.leparisien.fr/societe/hygiea-une-nouvelle-planete-naine-30-10-2019-8183007.php

https://www.cieletespace.fr/actualites/le-vlt-detaille-une-montagne-sur-vesta

https://www.franceculture.fr/emissions/la-methode-scientifique/la-methode-scientifique-du-mardi-17-avril-2018

https://www.sciencesetavenir.fr/espace/planetes/les-planetes-en-diamant-une-belle-theorie-mais-des-arguments-precaires_147563

https://www.leparisien.fr/sciences/un-signe-de-vie-sur-venus-5-questions-sur-la-decouverte-qui-enthousiasme-la-nasa-15-09-2020-8385135.php

https://www.france24.com/fr/20191218-super-terre-et-exoplanètes-dans-le-viseur-du-télescope-cheops

https://cms-fr.ngeo.com/espace/2019/03/leurope-pionniere-dans-la-recherche-dexoplanetes

https://www.jpl.nasa.gov/news/news.php?feature=7211

https://www.cieletespace.fr/actualites/olivier-mousis-il-faut-envoyer-une-sonde-plonger-dans-l-atmosphere-d-uranus-ou-de-neptune

https://www.20minutes.fr/marseille/2457403-20190223-marseille-si-rate-mission-spatiale-uranus-neptune-va-pleurer

https://www.corsematin.com/articles/la-presence-deau-sur-mars-nous-invite-a-y-plonger-85468

https://www.lefigaro.fr/sciences/2018/11/14/01008-20181114ARTFIG00280-une-super-terre-autour-de-l-etoile-de-barnard-l-une-de-nos-plus-proches-voisines.php

https://lejournal.cnrs.fr/articles/la-renaissance-des-grandes-expeditions-scientifiques

https://ssd.jpl.nasa.gov/sbdb.cgi?sstr=8153%20Gattacceca;old=0;orb=1;cov=0;log=0;cad=0#orb

Vidéo de vulgarisation de nos travaux :

Intervention de Louis Le Sergeant d'Hendecourt et de Grégoire Danger du PIIM dans l'émission de France 5 le 24/09/2020 :
https://www.france.tv/france-5/science-grand-format/1952535-et-si-la-terre-etait-unique.html

Publication Mousis, Deleuil et al. (2020) (voir https://www.cnrs.fr/fr/et-si-les-mini-neptunes-etaient-des-planetes-oceans-irradiees) vulgarisée par un média anglo-saxon : https://www.youtube.com/watch?v=hms_Qkvk1SI (>45000 vues depuis fin juillet 2020)

Intervention du PIIM dans France Culture le 02/06/2020 :
https://www.franceculture.fr/emissions/la-methode-scientifique/il-etait-une-fois-lespace-il-etait-une-fois-la-vie

Que connait-on de l'apparition de la vie sur Terre, chimiquement parlant ? A quand remonte l'idée d'une chimie organique prébiotique ? D'où est venue l'idée d'une panspermie ? En quoi l'expérience de Miller-Urey a-t-elle consisté ?

Centre de la nébuleuse Trifide. Photo prise par le télescope Hubble. • *Crédits : Subaru Telescope (NAOJ), Hubble Space Telescope, Martin Pugh; Processing: Rober*

Il fut un temps où le consensus scientifique penchait vers la soupe, la soupe primordiale, celle des tout débuts de notre planète, où le mélange moléculaire couplé à l'intense rayonnement et de puissants éclairs d'orages primitifs aurait conduit et à l'assemblage des protéines nécessaires à l'apparition de la vie. Mais ça, c'était avant. Avant que l'on ne connaisse mieux les comètes, les météorites, et la chimie prébiotique spatiale. Observation après expérience, un nombre de plus en plus important de ces molécules dites « prébiotiques » semblent avoir pu se former dans le froid interplanétaire, et ce dès les tout débuts du système solaire. Et si, tout compte fait, les prémices de la vie venaient de l'espace ?

Il était une fois l'espace, il était une fois la vie. C'est le programme prébiotique qui est le nôtre pour l'heure qui vient. Bienvenue dans La Méthode scientifique en direct.

Et pour évoquer ces prémices de ce qui, à terme, deviendra sur notre planète, le vivant (et pourquoi pas à ce moment là sur d'autres), nous avons le plaisir de recevoir aujourd'hui **Pauline Poinot**, biochimiste et chimiste analyste, maîtresse de conférence et chercheuse interdisciplinaire à l'Institut de chimie des milieux et matériaux de Poitiers et **Grégoire Danger**, maître de conférence au laboratoire de physique des interactions ioniques et moléculaires de L'Université Aix Marseille, CNRS et chercheur associé au Laboratoire d'Astrophysique de Marseille.

Magali Deleuil du LAM filmée avec les deux prix Nobel de physique 2019
https://www.youtube.com/watch?v=bxsQmodpmrE (>380 000 vues en quelques jours)

Coupures de presse :

Pourquoi il faut se rendre sur Uranus et Neptune

ASTROPHYSIQUE

Mieux connaître ces deux géantes de glaces, c'est le pari du scientifique marseillais, Olivier Mousis, avec le soutien d'une centaine d'astrophysiciens du monde entier.

L'objectif des scientifiques est de parachuter une sonde sur les deux planètes afin de collecter des données précieuses et inédites. PHOTOS DR

Dans l'atmosphère d'Uranus et de Neptune se cachent des informations importantes sur l'histoire du système solaire et sur la formation des exoplanètes», annonce d'emblée l'astrophysicien Olivier Mousis du laboratoire d'astrophysique de Marseille. Et pour cause : « *Plus de la moitié des exoplanètes détectées à ce jour*, poursuit-il, *ressemblent à ces deux géantes de glaces quant à leur masse et à leur taille.* » Bref, sous les doux et profonds reflets bleutés d'Uranus et Neptune se tiennent des réponses qui pourraient éclairer d'une lumière nouvelle toute la science des planètes. Des premiers éléments ont certes été obtenus depuis la Terre grâce aux télescopes -et ce bien que l'éclat dans le ciel des deux planètes les plus lointaines du système solaire soit 10 fois moins intense en regard de celles qui les précèdent…

Fil d'ariane

On sait par exemple que leur belle couleur provient non pas d'un vaste océan d'eau glacée mais d'un brouillard de petits cristaux de méthane en suspension dans leur haute atmosphère. « *Mais depuis la Terre, on ne peut étudier que ces minces couches supérieures de leur atmosphère* », déplore Olivier Mousis. Ce dernier rêve donc de pouvoir parachuter une sonde dans les cieux afin qu'elle collecte au cours de sa descente « kamikaze » des données précieuses et inédites : « *Nous pourrons alors connaître la composition de l'atmosphère, notamment en gaz rares. Ils sont ce fil d'Ariane qui permet de remonter le temps jusqu'à la formation d'une planète* », souligne-t-il. Et ils pourraient conduire à réviser (ou pas) l'hypothèse actuelle supposant que les deux géantes de glaces se sont formées à partir de gaz mais aussi de glaces analogues à celles des comètes. Mais atteindre ces planètes avec une sonde est une gageure ! Seule la mission américaine Voyager les a frôlées à ce jour. C'était en 1986… Heureusement, pour se lancer dans cette aventure hors norme, Olivier Mousis peut compter sur le soutien d'une centaine d'astrophysiciens et de scientifiques du monde entier. Ils étaient réunis l'an passé à Marseille lors d'un colloque exceptionnel afin de définir les contours de cette exploration spatiale inédite. Le fruit de leurs discussions vient d'ailleurs de faire l'objet d'un numéro spécial de la prestigieuse revue scientifique *Space Science Reviews*. « *Pour y parvenir, nous avons besoin d'unir le savoir-faire américain et européen à l'image de ce qui a brillamment fonctionné pour Saturne avec la sonde Cassini-Huyguens* », insiste le chercheur. D'ici là, un autre défi les attend : trouver des financements auprès de la Nasa et de l'Agence spatiale européenne (ESA). Les obstacles terrestres sont parfois plus durs à franchir que les milliards de kilomètres qui nous séparent des secrets de ces deux géantes de glaces.

Jean-Baptiste Veyrieras

« Une première fenêtre de tir se présente en 2032 »

Olivier Mousis, professeur d'astrophysique au laboratoire d'astrophysique de Marseille, Université Aix-Marseille

La Marseillaise : Pourquoi l'exploration d'Uranus et Saturne demeure encore un défi ?

Olivier Mousis : L'éloignement de ces planètes constitue un premier challenge. Il faut compter plusieurs années après le lancement de la sonde par une fusée puissante pour atteindre l'une d'entre elle. Seule une source électrique à base de combustible nucléaire, identique à celle qui a équipé la sonde Cassini-Huyguens, peut y parvenir. Et seule à ce jour la Nasa est capable de fabriquer ce type d'alimentation. D'où l'importance d'un partenariat entre la Nasa et l'ESA. Sur le plan financier, cela coûte également très cher. Il faut compter plusieurs milliards d'euros pour fabriquer à la fois la sonde qui pourra se positionner en orbite autour de ces planètes et son petit module qu'elle aura la charge de larguer dans l'atmosphère.

Si ce projet est accepté par les deux agences spatiales, à quel horizon un lancement pourrait-il avoir lieu ?

O.M. : Une première fenêtre de tir se présente en 2032. Cette année-là, les orbites relatives de la Terre et de la planète Uranus seront favorables à un voyage des plus rapides. En plus des informations sur la formation des géantes de glace, cette mission Uranus pourrait nous renseigner sur les anneaux de cette planète et nous aider à comprendre pourquoi l'axe de rotation d'Uranus est quasiment aligné sur le plan de son orbite, un peu comme si elle roulait autour du Soleil.

À choisir, votre préférence irait toutefois à Neptune ?

O.M. : L'exploration d'Uranus serait déjà une mission exceptionnelle. Le petit plus de Neptune ce sont ses lunes et notamment Triton et ses geysers affleurant en surface. En survolant ces panaches, la sonde pourrait peut-être y détecter des traces de vie.

Propos recueillis par J.-B.V.

REPÈRES

Uranus

Située à près de 2,5 milliards de kilomètres de la Terre, Uranus est la septième planète du système solaire et la première géante de glaces -sa taille est environ 4 fois celle de la Terre. Très éloignée du Soleil, la température dans les couches supérieures de son enveloppe de gaz avoisine les -220°C. Elle fut découverte en 1781 par l'astronome anglais William Herschel grâce à un télescope de « sept pieds ».

Neptune

Elle se trouve à deux milliards de kilomètres après Uranus et présente à peu près la même taille que sa grande sœur. Son existence fut prédite en 1846 par le savant français Urbain Le Verrier sur la base des perturbations de l'orbite d'Uranus. Elle possède 14 satellites naturels parmi lesquels Triton est le plus gros.

PLUSIEURS PROJETS DE MISSIONS

La décennie qui s'ouvre sera-t-elle celle de Vénus, plus de trente-cinq ans après le dernier atterrissage d'un engin sur son sol (la soviétique Vega 2, en 1985)? Beaucoup y croient, motivés, avant même la possibilité d'y chercher des traces de vie, par au moins une question essentielle : pourquoi Vénus et la Terre, aux configurations initiales très proches, ont-elles autant divergé, la première étant devenue une vraie fournaise en surface, sans aucune trace d'eau?

Derrière cette question et l'histoire de cette « planète qui a mal tourné », comme elle est souvent désignée, c'est sans doute un peu du destin de la Terre qui se joue aussi, notamment pour comprendre le rôle d'un effet de serre incontrôlé dans le devenir d'une planète. Mais les chercheurs veulent aussi mieux comprendre les secrets de son atmosphère, de son éventuelle activité volcanique a priori sans mouvements tectoniques, de l'origine de mystérieuses taches sombres dans ses nuages…

« Il y a eu beaucoup de projets abandonnés pour Vénus. Il y a une forte attente. Elle est passionnante », indique Franck Montmessin, chercheur du CNRS au Laboratoire atmosphères, milieux, observations spatiales (Latmos), justement embarqué dans un projet de mission européenne, EnVision. Celle-ci n'est pas encore acceptée, mais fait partie d'un dernier trio en compétition – l'Agence spatiale européenne tranchera en 2021. EnVision devra cartographier la surface de Vénus pour confirmer notamment s'il existe encore une activité volcanique, comme a semblé le dire Venus Express, une autre sonde européenne arrivée autour de la planète en 2006 avant de s'y écraser volontairement, en 2014. Un instrument analysera aussi la composition de l'atmosphère mais a priori hors des longueurs d'onde de la phosphine, une molécule qui vient d'y être détectée et pourrait être un indice de vie vénusienne. *« Cette histoire de phosphine renforce notre motivation d'y retourner »*, constate Olivier Mousis, professeur à l'université d'Aix-Marseille au Laboratoire d'astrophysique de Marseille (LAM), associé à un projet de la NASA pour analyser l'atmosphère de Vénus.

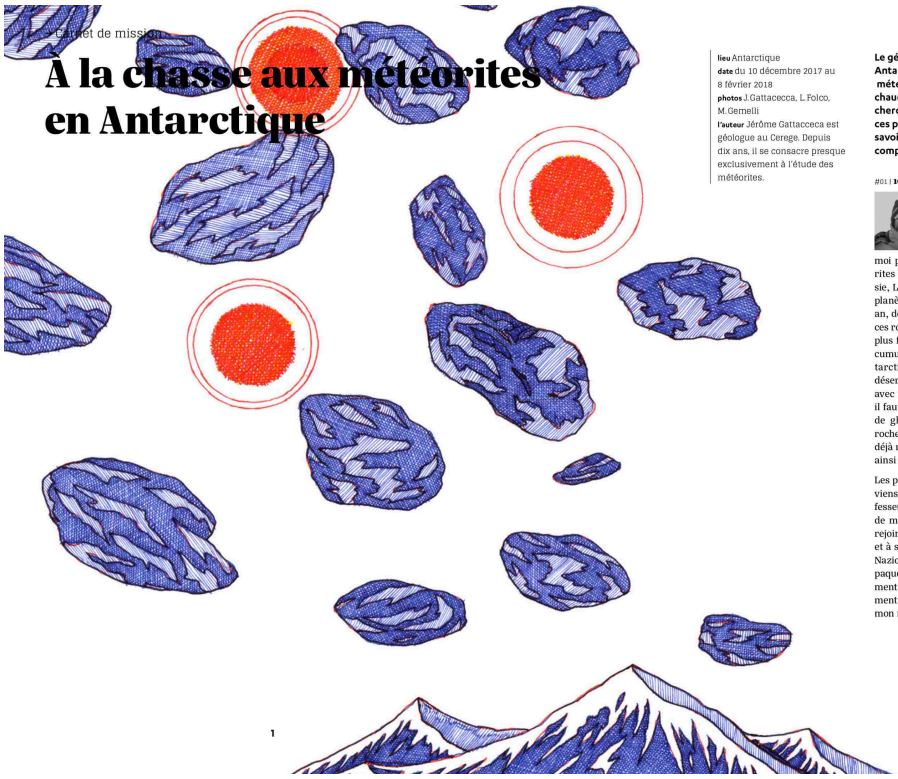
Américains, Russes, Indiens…

Quels gaz nobles sont présents, quelle quantité d'eau reste-t-il, quelle est la concentration en hydrogène lourd, marqueur de l'histoire de l'eau sur cette planète qui en est aujourd'hui dépourvue en surface ?… *« Ce genre de mesures est important, car on pense que celles réalisées dans le passé ont pu être contaminées et il faut lever les doutes »*, précise Olivier Mousis.

Les questions ne manquent donc pas et la NASA a reçu plusieurs propositions de missions pour la prochaine décennie, des orbiteurs ou même des atterrisseurs, sans pour l'instant en avoir accepté une seule. Les Russes aussi travaillent à un successeur des célèbres sondes Venera, les premières à avoir atterri sur Vénus (et même sur une autre planète) en 1970 et en 1972 après de nombreux échecs néanmoins. Les Indiens, forts de leurs récents succès autour de la Lune et de Mars, envisagent d'envoyer Shukrayaan en orbite, avec peut-être en plus un ballon-sonde pour percer eux aussi les mystères de l'atmosphère.

« J'adorerais que l'Europe et les Etats-Unis s'associent à nouveau, comme pour Cassini-Huygens autour de Saturne [2004-2017], *afin d'avoir un orbiteur et un atterrisseur avec un parachute »*, espère Olivier Mousis, rassuré par le fait que la responsable du programme planétaire de la NASA, Lori Glaze, est une « vénusienne », qui a longtemps dirigé le groupe de réflexion sur l'exploration de Vénus de l'agence spatiale. ■

D. L.



Le carnet de mission

À la chasse aux météorites en Antarctique

lieu Antarctique
date du 10 décembre 2017 au 8 février 2018
photos J. Gattacecca, L. Folco, M. Gemelli
l'auteur Jérôme Gattacceca est géologue au Cerege. Depuis dix ans, il se consacre presque exclusivement à l'étude des météorites.

p.1/14

Le géologue Jérôme Gattacceca est parti deux mois en Antarctique, en décembre 2017 et janvier 2018, à la chasse aux météorites. Une première pour ce spécialiste des déserts chauds tel le désert d'Atacama, au Chili, où il a l'habitude de chercher les précieuses roches extraterrestres. Les météorites, ces pierres tombées du ciel sur notre Terre permettent d'en savoir plus sur les origines du Système solaire, mais aussi sur la composition et l'évolution de Mars ou de la Lune.

#01 | **10/12/2017. Le départ**

C'est le grand jour du départ vers l'Antarctique ! Un nom qui fait rêver, presque une autre planète. Je me rends sur le continent blanc pour la première fois, et fort probablement la dernière, en compagnie de trois collègues italiens qui ont fait appel à moi pour [je suppose] mon expérience de la recherche de météorites dans les déserts chauds (Atacama au Chili, Sahara en Tunisie, Lut en Iran). Si elles tombent en quantité égale partout sur la planète – on dénombre environ 20 000 chutes de météorites par an, dont seule une petite dizaine seront retrouvées en moyenne –, ces roches venues de différents corps de notre Système solaire sont plus faciles à débusquer dans les zones désertiques, où elles s'accumulent au sol sans être recouvertes ni érodées. À ce titre, l'Antarctique est un terrain de jeu particulièrement favorable. Dans les déserts chauds, les météorites se mêlent aux roches terrestres et, avec un ratio de 1 météorite pour 1 million de cailloux terrestres, il faut avoir les yeux bien aiguisés ! En Antarctique, où une calotte de glace de plusieurs kilomètres d'épaisseur recouvre le socle rocheux, ce ratio est beaucoup plus favorable. Sur les 57 000 pierres déjà répertoriées et étudiées par les scientifiques, 34 000 viennent ainsi du continent antarctique et 20 000 des déserts chauds…

Les préparatifs pour ce voyage ont été relativement simples car je viens me greffer à une expédition organisée par Luigi Folco professeur à l'université de Pise et grand habitué de la recherche de météorites en Antarctique. Grosso modo, il ne me reste qu'à rejoindre mes collègues italiens à Rome ce soir avec mon bagage et à suivre la danse organisée pour moi par le PNRA (Programma Nazionale di Ricerche Antartiche, l'institut polaire italien). Même le paquetage a été étonnamment rapide, car je récupérerai mes vêtements chauds, prêtés par l'Institut Polaire Français (Ipev), directement en Tasmanie d'où partira le bateau pour l'Antarctique. À part mon monumental sac de couchage qui me permettrait de survivre

1

2

DÉCOUVERTE

La Provence Alpes
Vendredi 26 juin 2020

Un caillou extraterrestre dans le sol provençal

Les recherches de météorites à la suite du bolide observé le 2 juin dernier ont été infructueuses. Déserts du Chili, d'Iran, du Sahara... et les environs de Cabrières d'Aigues (Vaucluse) : les terrains de chasse sont divers et variés pour les passionnés de météorites comme Jérôme Gattacceca, directeur de recherche CNRS au Cerege (Centre Européen de Recherche et d'Enseignement des Géosciences de l'Environnement). Et ils sont parfois à deux pas de chez soi !

Ainsi, le 2 juin dernier, à 22h14, un météore très brillant était observé par de nombreux depuis le quart Sud-Est de la France. Au même moment, cinq caméras du réseau national Fripon (Fireball Recovery and InterPlanetary Observation Network) enregistraient la trajectoire de l'objet : après quelques heures de calculs, il devenait probable que quelques dizaines de grammes du caillou extra-terrestre aient survécu à son entrée atmosphérique à haute vitesse (16,6 km/s, soit près de 60 000 km/h) et soient tombés le long d'une ellipse allongée entre la Tour d'Aigues et Cabrières d'Aigues. Il n'en fallait pas moins pour motiver Jérôme Gattacceca et son équipe d'aller prospecter sur le terrain à la recherche ces potentielles météorites. Mais trouver un petit caillou tombé sur une zone s'étalant sur une ellipse de 10 km de long et 1,5 km de large n'est pas une mince affaire...

68 000 m² de terrains ont été parcourus

"Nous avons privilégié l'hypothèse d'une météorite de 2 cm de diamètre environ, et nous nous sommes concentrés sur une zone de recherche au Nord-Ouest de l'ellipse de chute potentielle, quelques kilomètres au Nord-Ouest du village de Cabrières d'Aigues", explique le chercheur. Les terrains à prospecter concernant un unique propriétaire, les démarches ont été rapides : "Ça a été une très bonne surprise, nous avons reçu un super accueil : le propriétaire nous a même dit que s'il trouvait quelque chose, il nous le donnerait ! Ça a été l'occasion de lui distribuer des papiers d'informations sur les météorites ainsi qu'à ses employés, au cas où... La nouvelle a également rapidement diffusé dans le village, et les gens venaient nous demander si on avait trouvé quelque chose. C'est une excellente occasion de faire de la vulgarisation scientifique en dehors des salles de conférences".

Quelques dizaines de grammes du caillou extra-terrestre ont survécu à son entrée atmosphérique.

Car après une journée de recherches et 68 000 m² de terrains méthodiquement parcourus sur un terrain de recherches favorable (vignes et vergers), la météorite n'a pas daigné pointer le bout de sa croûte de fusion (la surface sombre du caillou qui a fondu pendant l'entrée dans l'atmosphère).

Il ne fallait toutefois pas tomber dans le piège des fausses météorites, car elles ne sont pas les seules roches à être sombres ! "La géologie locale était super intéressante : nous avons trouvé des galets sombres, qui attirent l'œil quand on cherche des météorites, mais également de nombreux fossiles du Miocène (il y a -23 à -5,3 millions d'années, ndlr), comme des huîtres, des coquillages, des dents de requins".

Chou blanc pour la météorite, donc, qui, si elle existe, repose toujours dans cette région, "mais une expérience très positive !" conclut le chercheur. En attendant la prochaine ! Un bolide très rapide observé dans la nuit du 20 au 21 juin

Le 21 juin, à 01h02 du matin, comme pour fêter l'arrivée de l'été, un bolide lumineux a été observé depuis le Sud-Est de la France et l'Italie. L'objet est resté lumineux entre Castellane (Alpes-de-Haute-Provence) et Gênes (Italie), à une altitude comprise entre 120 et 100 km, et sur une trajectoire longue de près de 220 km qu'il a parcouru... en 3 secondes ! Car avec une vitesse d'entrée de près de 69 km/s (près de 250 000 km/h !), ce météoroïde hyper-véloce s'est complètement sublimé dans l'atmosphère. Malgré sa luminosité, aucune météorite n'est arrivée au sol !

Karl Antier

La Marseillaise

ACCUEIL POLITIQUE SOCIAL SOCIÉTÉ ECONOMIE FRANCE INTERNATIONAL ENVIRONNEMENT SPORT CULTURE LOISIRS

Des poussières d'étoiles à l'émergence de la vie

Des chercheurs marseillais du laboratoire de Physique des Interactions Ioniques et Moléculaires (PIIM) ont montré qu'au moins une des briques élémentaires constitutives de l'ADN a pu être produite dans les conditions extrêmes du système solaire primitif.

MARIE-LAURE THOMAS / 23/02/2020 | 11H06

Comment la vie est-elle apparue sur Terre ? Comment pourrait-elle apparaître ailleurs ? Une double interrogation qui nécessite de comprendre d'où proviennent les briques de base qui ont permis d'échafauder les complexes moléculaires nécessaires à l'apparition de la vie sur notre planète. Et quelles sont les conditions environnementales qui ont été nécessaires à ce que les systèmes chimiques présents dans la « soupe primitive » de la terre archaïque puissent s'auto-organiser de manière pérenne. À ces deux questions, les travaux de Grégoire Danger, chercheur au laboratoire PIIM (CNRS / Aix-Marseille université), avec le concours de l'Institut de chimie de milieux et matériaux de Poitiers (CNRS / université de Poitiers) tentent de répondre. On savait déjà qu'au sein des nuages de gaz et de poussières qui composent les étoiles en formation, deux des trois grands ingrédients moléculaires nécessaires à la vie sur Terre peuvent se former : les acides aminés et les sucres. Il ne manquait qu'un troisième ingrédient, les bases nucléiques, qui sont à l'origine de la constitution de l'ADN, molécule essentielle pour la conservation de l'information génétique de tout être vivant. Grâce aux expériences de notre « archéologue » moléculaire, c'est désormais chose faite. Pour cela, il fallait reproduire en laboratoire les conditions de formation des nébuleuses solaires : « À très basse température et à très basse pression, nous avons mélangé de l'eau, de l'ammoniaque et du méthanol, molécules observées majoritairement dans ces environnements interstellaires, pour recréer les glaces telles qu'on les observe dans ces nuages moléculaires denses », explique Grégoire Danger. « Cette glace a été irradiée par rayonnement UV, qui est celui qu'émet l'étoile lorsqu'elle s'est formée. Le rayonnement UV casse ces molécules pour former des radicaux qui, lorsqu'on réchauffe la glace, réagissent pour former des milliers de molécules différentes », poursuit le chercheur. Parmi cette très grande diversité moléculaire générée, une substance élémentaire attire l'attention des scientifiques : la cytosine, base nucléique entrant dans la composition de l'ADN. Déterminer les conditions nécessaires à la vie L'important désormais pour Grégoire Danger et son équipe, est de comprendre quelles conditions environnementales sont nécessaires à l'émergence d'un système chimique capable de faire émerger la vie : « On va donc simuler expérimentalement l'environnement de la terre primitive, pour soumettre nos résidus à cet environnement, et observer comment évolue cette matière. Car sans les conditions adaptées, la matière ne produira rien. Détecter un acide aminé sur une comète n'engage pas la capacité à créer de la vie sur Mars, Titan ou Vénus. Ce qui compte c'est l'environnement local de la planète », explique Grégoire Danger. Déterminer les paramètres nécessaires à l'émergence d'une chimie prébiotique ouvre de grandes perspectives pour la recherche d'éventuelles formes de vie extraterrestres. « L'intérêt de la grande diversité moléculaire présente dans l'univers, ouvre une potentialité beaucoup plus importante d'environnements possibles pouvant sélectionner des systèmes chimiques capables d'évoluer selon les mêmes processus que les systèmes vivants », conclut Grégoire Danger.

FÊTE DE LA SCIENCE

Du discours scientifique à l'expérience théâtrale

Fabrication de comètes, balade dans les profondeurs de la Méditerrannée grâce à la réalité virtuelle, expériences scientifiques pour apprendre notamment comment gonfler un ballon sans air... Installée sur la place Bargemon, la fête de la science a encore fait le plein hier.

Et pour ceux qui préféraient être spectateurs plutôt qu'acteurs, la compagnie de théâtre "Les Sens des Mots" proposait à l'intérieur de l'espace Bargemon, une pièce de théâtre écrite à deux voix : l'une scientifique, l'autre, poétique. La collection Binôme présentait ainsi "Vers où nos corps célestes", un texte écrit par Julie Ménard issu de sa rencontre avec la chercheuse en astrophysique Magali Deleuil.

Lu à trois voix, le voyage spatial proposé est la parfaite définition de la science-fiction, *stricto sensu* : dans un futur proche, une histoire d'amour naît dans un vaisseau spatial habité par des "décrocheurs", ces humains nés dans l'espace, loin de la Terre, le tout conté dans un langage réinventé.

L'aventure commence par un dialogue exceptionnel entre "la poète et la savante" : Julie Ménard, auteur, et Magali Deleuil, chercheuse au laboratoire d'astrophysique de Marseille, ont une heure, montre en main, pour échanger sur les travaux de Magali autour des systèmes planétaires. Julie découvre le monde de l'astrophysique et doit en faire une pièce de 30 minutes. Un mois d'écriture plus tard, le texte est livré à la troupe de Binôme.

La compagnie de théâtre "Les sens des mots" a tenu le pari, en montrant la science sous un jour poétique. /PHOTO L-D.P.

Pour écrire sa pièce, Julie Ménard s'est inspirée d'un "*paradoxe*" dans le propos scientifique de Magali : elle, qui a passé sa vie à la recherche d'une exoplanète s'avoue très attachée à la Terre et espère, à demi-mot qu'on ne trouvera jamais de "Planète B" habitable.

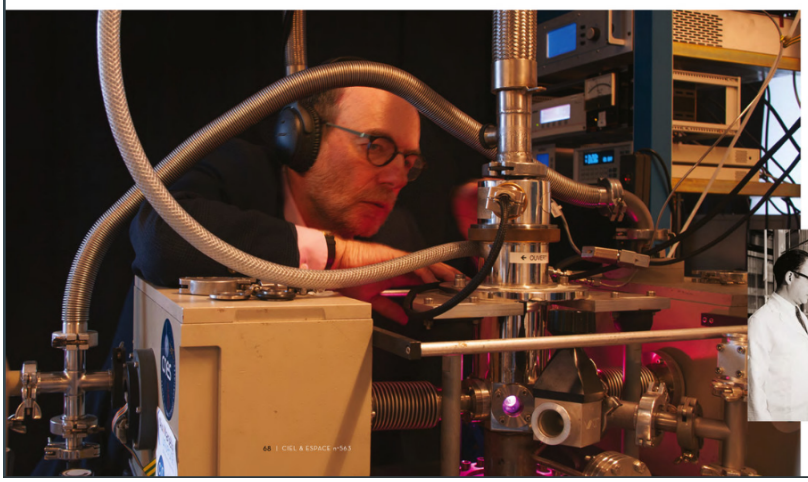
La pièce convertit ainsi un discours savant en une interrogation profondément humaine: quelle est notre attache particulière à la Terre? La découverte d'une autre planète est-elle seulement souhaitable? Tant de questions qui restent en "gravitation", mais pour "Les sens des mots", le pari est réussi : le temps d'une représentation, la science a montré son jour le plus poétique face à un public conquis.

Lillie de PAVANT

À MARSEILLE

L'EXPÉRIENCE QUI EXPLORE LES ORIGINES DE LA VIE

Quels ingrédients, quelles conditions ont été réunis jadis sur Terre pour l'apparition de la vie ? Pour percer ce secret, une équipe française tente une nouvelle recette pour la célèbre expérience de Miller, réalisée pour la première fois dans les années 1950.



REPORTAGE

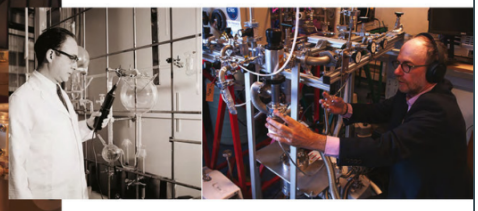
Évidemment, le décor n'est pas le même. Mais au quatrième étage du campus universitaire Saint-Jérôme, au nord de Marseille, en ce jour pluvieux de novembre 2018, il y a un petit quelque chose de *Retour vers le futur*. Avec, dans le rôle d'Emmett Brown (alias Doc) : Louis d'Hendecourt. L'astrophysicien du laboratoire de Physique des interactions ioniques et moléculaires (PIIM) peaufine sa propre machine à remonter le temps. Pour voyager non pas 30 ans, mais 4 milliards d'années en arrière, à l'époque de la Terre primitive. Avec cet objectif ambitieux en tête : comprendre comment, avec l'aide des astéroïdes et des comètes, le vivant a surgi de l'inerte.

"Attention, ça, c'est un genre de taser, prévient-il en se munissant d'un instrument oblong terminé par une pointe en métal et branché sur le secteur. *Une décharge de 20 000 V va créer un arc électrique qui va faire grimper la température dans ce tube* [une sorte de lampe au centre d'un enchevêtrement de tuyaux, de câbles et de manivelles, NDLR] *jusqu'à générer un plasma [1] à 100 000 °C."* Taser bien en main, le chercheur s'approche prudemment de sa machine avant de stopper net son élan : *"Zut ! J'ai oublié de mettre en route le refroidisseur ! C'est indispensable pour que la manip n'explose pas sous l'effet de la chaleur !"* En même temps que l'on frémit à l'idée de ce qui aurait pu se produire, il tourne une manivelle, qui déclenche une soufflerie de tous les diables. Quand il actionne enfin son taser, casque antibruit sur les oreilles, une étincelle bleutée jaillit, puis toutes les machines se taisent. Les plombs du laboratoire viennent de sauter.

Avec cette expérience, dite MicMoc, savant mélange de technologie de pointe et de bricolage, d'à-peu-près et d'ingéniosité, l'esprit du Doc et de son convecteur spatio-temporel n'est pas loin. Celui de Stanley Miller et de sa soupe primitive l'est encore moins. C'est que, pour progresser dans notre compréhension de l'émergence de la vie, l'une des plus grandes énigmes de la science actuelle, Louis d'Hendecourt et son équipe entendent poursuivre l'œuvre de ce pionnier de la chimie prébiotique, en poussant d'un cran la sophistication de son expérience historique. Début des années 1950, le jeune Stanley Miller, doctorant à l'université de Chicago sous la direction du prix Nobel de chimie Harold Urey, conçoit l'une des "manips" les plus célèbres de l'histoire des sciences. Pour comprendre le contexte dans lequel il la met en place, remontons la DeLorean d'un siècle dans le passé.

En 1859, Charles Darwin publie *L'origine des espèces*, dans lequel il montre que les espèces qui s'adaptent le mieux à l'environnement évoluent graduellement des formes simples

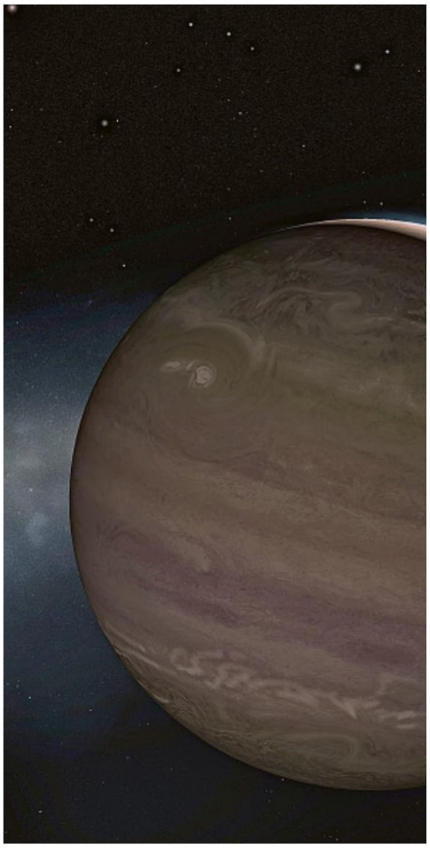
En 1953, Stanley Miller (au centre) essaye de reproduire les conditions de la Terre primitive pour créer des molécules nécessaires au vivant. Louis d'Hendecourt (à droite) et Grégoire Danger entendent refaire cette expérience historique, mais en l'améliorant. © DR et S. Martin/CAE



Recherche Twitter
Sup-Recherche-Innov
@sup_recherche
Soutenant les nombreux programmes spatiaux lancés en 2020, @sup_recherche accueille #ExoSystèmes1, 1er atelier d'une série sur les #exoplanètes, dont l'objectif est de structurer la communauté française autour des grands thèmes de ce domaine👍
IUF @InstUnivFr · 16h
La communauté française en #exoplanète réunie au Ministère @sup_recherche pour l'atelier #exosystemes1 !
Avec le soutien de l'@InstUnivFr !
Pour plus d'informations sur l'atelier : exosystemes1.sciencesconf.org
ATELIER DU 28 AU 30 JANVIER 2020
AMPHITHÉÂTRE STOURDZÉ
5:05 PM · 29 janv. 2020 · Hootsuite Inc.
4 Retweets 7 J'aime

Nouvelle découverte **extraterrestre** à l'Observatoire de Haute-Provence

En 1995, la première exoplanète était découverte à l'Observatoire de Haute-Provence par Michel Mayor et Didier Queloz, récompensés par le prix Nobel de physique 2019. Mais les recherches ne s'arrêtent pas là...



Les coïncidences n'en sont parfois pas : la première pierre de l'Institut d'Astrophysique de Paris (IAP) a été posée sur le site de l'Observatoire de Paris en janvier 1938. Les fondations de l'Observatoire de Haute-Provence (OHP) ont-elles commencé l'année précédente. Le résultat d'une décision prise en 1936 par Jean Zay, alors ministre de l'Éducation Nationale, de créer un Service de Recherche d'As-trophysique, qui serait composé d'un observatoire (l'OHP) et d'un laboratoire de traitement des images et des données (l'IAP). Ces deux entités, rattachées au CNRS (Centre National de la Recherche Scientifique) à sa création en 1939, fonctionnent encore de concert : la preuve avec la découverte de WASP-148b et c, faite par l'équipe menée par Guillaume Hébrard, qui est rattaché aux deux institutions.

Perturbations planétaires autour de WASP-148..." Cette phrase ressemble à un extrait de film de science-fiction. Pourtant ce n'est qu'une information révélée par une équipe internationale menée par Guillaume Hébrard. Le directeur de recherche au CNRS, qui travaille également à l'Institut d'Astrophysique de Paris (IAP) et à l'Observatoire de Haute-Provence (OHP), annonce aujourd'hui l'observation depuis le sol des interactions entre deux exoplanètes à 810 années-lumière de la Terre : une première mondiale !

En 1781, l'astronome britannique William Herschel découvrait ce qui allait être la septième planète du Système solaire : Uranus. Mais quelques années plus tard, le comportement de cette planète géante gazeuse localisée à près de 2,9 milliards de kilomètres laissaient les astronomes de l'époque songeurs : un objet semblait perturber la trajectoire de cette nouvelle planète.

La position de cet astre énigmatique fut calculée par Urbain Le Verrier, guidant Johann Gottfried Galle qui l'observa au télescope quelques jours après : en 1846, la famille des planètes du Système solaire s'élargissait avec la découverte de la planète Neptune ! Car si le Soleil, de par sa masse, est l'objet le plus attractif du Système solaire, les planètes, de masse moindre, ont néanmoins une influence gravitationnelle plus subtile mais non-négligeable, sur les autres planètes.

En 1995, la première exoplanète était découverte à l'Observatoire de Haute-Provence (OHP, CNRS) par l'équipe suisse composée de Michel Mayor et Didier Queloz, récompensée par le prix Nobel de physique 2019. Plus de 25 ans après, ce sont plus de 4 170 exoplanètes qui ont été découvertes dans notre galaxie. Autour de ces milliers d'astres, certaines semblent orbiter seules autour de leur étoile, tandis que d'autres sont de véritables systèmes planétaires comme notre Système solaire : 7 exoplanètes ont par exemple été détectées autour de l'étoile TRAPPIST-1 en 2017 !

Découverte d'une planète

Et qui dit système planétaire, dit potentielles interactions entre les exoplanètes composant ce système. Détecter ces perturbations gravitationnelles entre planètes n'est cependant pas chose aisée : les exoplanètes ne sont quasiment jamais observées directement. Leur détection est indirecte, les méthodes principalement utilisées étant la "méthode des transits" et la "méthode des vitesses radiales", c'est-à-dire que les astrophysiciens détectent les infimes variations de luminosité ou les mouvements radiaux d'une étoile pour déterminer la présence d'une planète. Détecter des interactions entre planètes revient donc à observer d'infimes variations d'infimes variations ! De telles observations ont été réalisées depuis l'espace à partir de 2010 par la méthode des transits : lorsqu'une planète est perturbée par une autre, le moment où elle va passer devant son étoile (le fameux "transit") va être décalé. Il peut être en avance ou en retard de quelques secondes, voire quelques minutes. Mais ce décalage est difficile à observer depuis le sol puisque l'influence de l'atmosphère et les erreurs des instruments peuvent très rapidement empêcher l'observation d'un si petit décalage. Ce sont dix années d'observations de l'étoile WASP-148 avec divers instruments, dont le télescope de 193 cm de diamètre de l'OHP, qui ont permis de détecter deux exoplanètes orbitant cette étoile située à environ 810 années-lumière du Soleil. La première WASP-148b, a été suspectée par la méthode des transits et confirmée par des observations menées à l'OHP. Observations qui ont permis de déterminer plus précisément sa masse (au moins 30% de celle de Jupiter) et sa période de révolution de 8,8 jours.

> Une première depuis le sol pour mieux comprendre les exoplanètes.

Mais également de découvrir une deuxième planète, WASP-148c, de masse inférieure à 40% de celle de Jupiter, et bouclant un tour complet en 34,5 jours, soit quasi-exactement 4 fois plus que WASP-148b. Ce qui n'est pas nécessairement une coïncidence, ce phénomène de résonance étant régulièrement observé. Mais qui a par contre un avantage certain : il amplifie les interactions gravitationnelles entre les deux planètes ! C'est ainsi que des observations complémentaires ont permis de mettre en évidence des décalages de 2 à 30 minutes dans les horaires des transits. Une première pour des observations depuis le sol qui devraient nous permettre de mieux appréhender les caractéristiques des systèmes exoplanétaires.

Karl Antier

RENCONTRE AVEC Guillaume Hébrard Directeur de Recherche au CNRS

La première observation de ce type depuis le sol

Guillaume Hébrard est Directeur de recherche au CNRS et travaille à l'Institut d'astrophysique de Paris (IAP) et à l'Observatoire de Haute-Provence (OHP). Il a dirigé l'équipe internationale qui publie aujourd'hui l'annonce de la première observation depuis le sol d'exoplanètes interagissant gravitationnellement entre elles.

Quel est l'intérêt, encore aujourd'hui, d'étudier les exoplanètes ?

Il y en a pleins ! Il ne faut pas oublier que la première exoplanète a été découverte il y a 25 ans seulement, ici-même, à l'OHP.

Nous sommes toujours dans la phase d'exploration de ces univers : tout reste à découvrir, et nous ne pouvons le faire qu'en défrichant et en découvrant le maximum d'exoplanètes, afin d'en cerner toute la diversité.

Et dans cette exploration, quelle place tiennent WASP-148b et c ?

L'observation des décalages de transits associés à des interactions gravitationnelles entre planètes permet de déterminer la masse des planètes.

Or, cette masse peut également être déterminée via une autre méthode, celle des « vitesses radiales ».

C'est donc extrêmement intéressant, puisque cela nous permet de calculer un même paramètre, la masse d'une exoplanète, avec deux méthodes différentes. Et donc de les comparer et de quantifier les incertitudes.

Ce qui nous a d'ailleurs permis de déterminer que nous n'avions pas un très bon accord, de l'ordre de quelques dizaines de pourcents, entre les résultats de ces deux méthodes de calculs.

Comment s'est déroulé cette découverte qui a nécessité 10 ans d'observations ?

Cette observation est le fruit d'une collaboration internationale en termes d'humains et d'équi-pements. Tout est parti de l'observation, par l'instrument SuperWASP (Observatoire de Roque de los Muchachos, La Palma, Canaries), de 3 transits autour de l'étoile WASP-148.

En utilisant le télescope de 193 cm couplé au spectrographe SOPHIE de l'OHP, qui est un des meilleurs du monde, nous avons confirmé l'existence de cette planète, WASP-148b et complété ses caractéristiques physiques.

Mais nous avons eu la surprise de découvrir une deuxième planète, WASP-148c, qui mettait 4 fois plus de temps que la première pour faire le tour de l'étoile.

Ce qui nous a immédiatement fait penser que cela pouvait amplifier les effets de résonance gravitationnelle entre elles. Les modèles réalisés par les astrophysiciens de l'IAP ont confirmé nos espoirs, et des observations complémentaires par différents télescopes nous ont permis de modéliser encore plus précisément ces interactions et les paramètres orbitaux et physiques des deux planètes.

Guillaume Hébrard est Directeur de recherche au CNRS et travaille à l'Institut d'astrophysique de Paris (IAP) et à l'Observatoire de Haute-Provence (OHP).

> "Tout reste à découvrir pour cerner toute la diversité des exoplanètes".

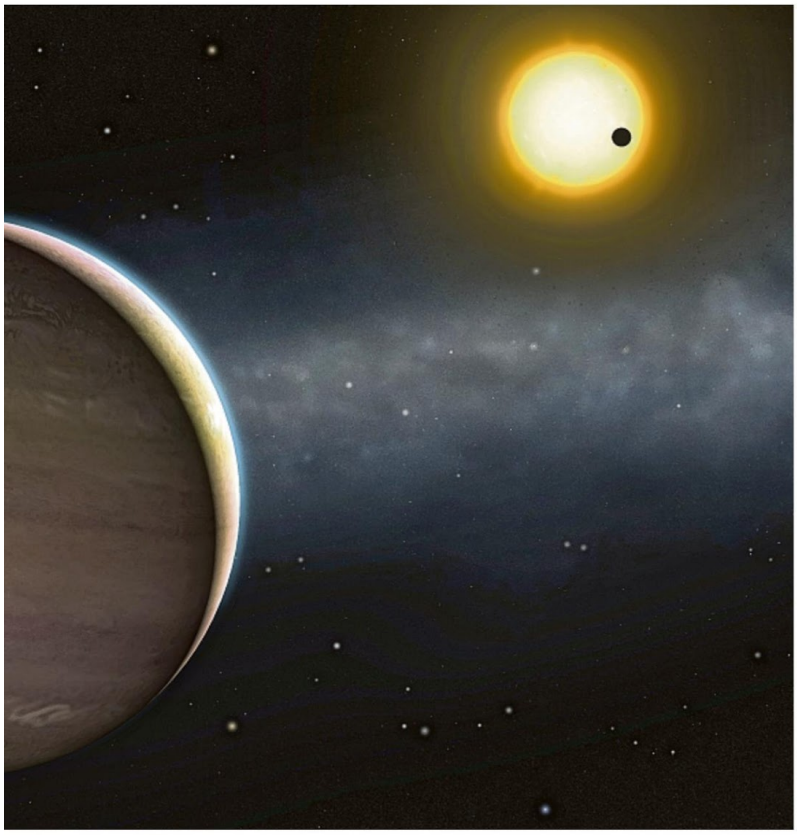
Et qui continue d'être surveillé ?

Le 4 juillet, le télescope spatial TESS (Transiting Exoplanet Survey Satellite, NASA) va termi-ner sa campagne d'observation de 9 transits consécutifs de WASP-148b devant son étoile.

Cela devrait nous permettre de réaliser une analyse globale encore plus complète de ce système planétaire en combinant toutes les observations réalisées. Cela va être passionnant, car il n'y a pas beaucoup de systèmes planétaires comme celui-ci.

Qui plus est, leur configuration est stable, ce qui va nous per-mettre également d'étudier les évolutions des planètes entre leur formation et leur situation actuelle.

Propos reccueillis par K. A.



"TRANSIT" OU "VITESSE RADIALE"

Deux méthodes pour explorer les mondes de demain

On ne détecte jamais directement les exoplanètes : retour sur les deux méthodes principales de détection de ces mondes lointains.

Sur les 4 171 exoplanètes découvertes aujourd'hui, seules 26 ont été photographiées directement.

Ce qui sous-entend que l'existence des 4 145 autres a été confirmée via des méthodes de détection indirectes. Parmi elles, deux sont à l'origine de 96% des découvertes : la méthode dite des "transits" et celle des "vitesses radiales".

La première est la plus facile à appréhender : par un hasard géométrique, il peut arriver qu'une exoplanète passe entre la Terre et l'étoile autour de laquelle elle orbite.

En enregistrant précisément la luminosité de l'étoile

C'est ce qui arrive dans le Système solaire lors de transits de Mercure ou de Vénus : le petit disque noir de la planète traverse alors le disque du Soleil.

Les télescopes ne peuvent observer ce phénomène avec autant de détails pour les exoplanètes. Par contre, en enregistrant précisément la luminosité de l'étoile, les astronomes auront l'impression que celle-ci diminue très légèrement à intervalles réguliers, au moment où la planète masque une infime fraction de la surface de l'étoile. Cette méthode des "transits" est à l'origine de 77% des exoplanètes découvertes aujourd'hui. La deuxième méthode nécessite un spectrographe, qui va décomposer la lumière de l'étoile, de la même manière que les gouttes d'eau décomposent celle du Soleil lorsqu'on observe un arc-en-ciel.

Sauf que cet arc-en-ciel artificiel, le spectre de l'étoile, est bien plus précis ! En l'analysant avec attention, et grâce à l'effet Doppler-Fizeau, les astrophysiciens sont capables de déterminer si l'étoile est animée de petits mouvements, notamment si elle s'éloigne et se rapproche de nous à intervalles réguliers. De tels mouvements trahissent généralement la présence d'une ou plusieurs planètes, dont la masse peut alors être déterminée. Cette méthode des "vitesses radiales" est celle utilisée à l'OHP avec le télescope de 193 cm et spectrographe SOPHIE.

K. A.

Exoplanètes : le lien caché

Le Laboratoire d'astrophysique de Marseille vient de montrer que les planètes de types super-Terre et sous-Neptune, que l'on croyait très différentes, ont un point commun

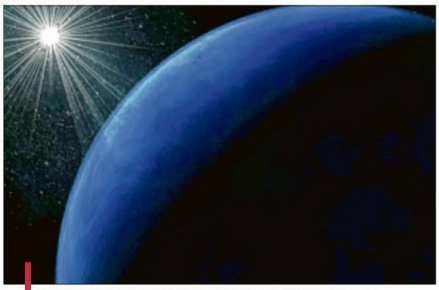
C'est un peu comme le nez au milieu de la figure, s'amuse le Pr Olivier Mousis. *Tout le monde le voit mais on finit par ne plus y prêter attention…"*

Dans un article à paraître dans une grande revue scientifique internationale, cet éminent chercheur du Laboratoire d'astrophysique de Marseille (Lam) et son équipe viennent, en effet, de mettre en évidence un phénomène qui était passé jusque-là totalement inaperçu, alors même qu'il apparaissait sur la plupart des observations.

Au terme de deux ans de travaux et d'innombrables simulations numériques, les scientifiques marseillais sont ainsi arrivés à la conclusion que les exoplanètes de type super-Terre et celle de type sous-Neptune (*lire ci-dessous*) étaient issues d'un même mécanisme de formation, et que le seul élément qui les différenciait, était la quantité d'eau qu'elles contenaient. Et le Pr Mousis de s'appuyer pour cela sur les règles élémentaires de la physique, telles qu'on peut les apprendre au collège, concernant le comportement d'un liquide porté à haute température.

"Mondes océans"

"*Si l'on prend une super-Terre, qu'on lui rajoute un océan très profond - il doit représenter au moins 20% de la masse totale de la planète - et qu'on place cette super-Terre au plus près d'une étoile, on obtient une planète de type sous-Neptune.*" Et de s'en expliquer : "*À proximité de l'étoile, la super-Terre est chauffée à blanc. L'eau qu'elle contient change alors d'état pour devenir supercritique, à mi-chemin entre l'état liquide et l'état gazeux. Tout son océan devient à son tour supercritique et augmente de volume, ce qui fait que la planète se dilate, devenant beaucoup plus grosse, alors que sa masse totale, elle, ne varie pas.*"



Ce qui différencie les exoplanètes, selon les scientifiques marseillais, est la quantité d'eau qu'elles contiennent. /PHOTOS DR

Super-Terre ou sous-Neptune ?

Vingt-cinq ans après la découverte de la toute première exoplanète (planète située à l'extérieur de notre système solaire) par les astrophysiciens Michel Mayor et Didier Queloz - tous deux d'ailleurs récompensés par le prix Nobel de physique - en utilisant les instruments de l'Observatoire de Provence, près de 4 300 de ces corps célestes ont été identifiés.

Ces exoplanètes que l'on repère essentiellement en mesurant leur masse et leur rayon, se répartissent pour moitié en planètes géantes et pour l'autre en planètes de faible masse dont les dimensions s'inscrivent entre celle de notre Terre (12 742 km) et celle de Neptune (49 244 km).

On distingue alors les super-Terres dont le diamètre est supérieur à celui de la Terre, et les sous-Neptune dont le diamètre est inférieur à celui de Neptune. La confirmation de l'existence d'exoplanètes a surtout relancé les conjectures sur la présence de vie extraterrestre, mais également sur la possibilité de découvrir une planète jumelle de la Terre, susceptible d'accueillir tout ou partie de l'humanité. Seule ombre au tableau : la plus proche des exoplanètes connues à ce jour, se trouve à 4,2 années-lumière de la nôtre, soit environ 40 000 000 000 000 km…

Ph.G.

Formes de vies

Et Olivier Mousis d'en tirer une conclusion passionnante : il y aurait dans l'univers beaucoup plus de ces "mondes océans" qu'on ne le pensait jusqu'à présent ; des mondes cependant bien moins fréquentables que celui que parcourt l'acteur Kevin Kostner, à la barre de son trimaran, dans le film d'anticipation *Waterworld*. Ce type de planète ressemble, en effet, davantage à une grosse marmite d'eau bouillante qu'à un paisible plan d'eau dédié à la baignade.

Autre enseignement apporté par cette découverte : les exoplanètes de type sous-Neptune dont on pensait que leur grande dimension était liée à leur atmosphère très riche en hydrogène et en hélium - on supposait que ces deux gaz représentaient jusqu'à 30 % de leur masse - en sont en fait bien moins pourvues. Et de souligner aussi que "*ce travail contribue à mieux comprendre le contexte de l'origine du système solaire*".

Un système qui comporte d'ailleurs plusieurs "mondes océans", très riches en eau. C'est le cas de certaines lunes de Jupiter et de Saturne, et notamment d'Europe à propos de laquelle le chercheur marseillais se dit convaincu que des formes de vie seront, un jour, découvertes sous sa calotte de glace et son gigantesque océan de 90 km de profondeur…

Philippe GALLINI

Avec Origines, la vie extraterrestre sera dans l'objectif

C'est un projet aux passionnantes implications que porte depuis bientôt deux ans le Pr Mousis (*photo ci-contre*) avec la création de l'institut Origines, au sein d'Aix-Marseille Université. Cet institut "hors les murs" aura pour mission de réunir l'ensemble des compétences et des disciplines qui travaillent sur les origines de la vie dans l'univers et, par extension, sur les possibilités de vie extraterrestre.

Avec toutes les implications que cela suppose, y compris sur le plan sociétal. Comme le souligne le chercheur marseillais, ce nouveau domaine de recherche qui mobilise déjà de nombreuses équipes dans le monde, notamment aux États-Unis, autour de la Nasa, mais aussi en France, à Paris et Grenoble, ne peut que renforcer la visibilité de l'université provençale. Origines permettra également de stimuler les étudiants par la création de filières spécialisées comme l'exobiologie ou encore l'établissement de passerelles avec l'industrie. Avec, pour Olivier Mousis, une autre ambition et non des moindres : "*Mettre un coup d'arrêt à la fuite des cerveaux en donnant une bonne raison aux chercheurs de rester chez nous !*"

À la chasse aux pierres extraterrestres dans le désert

Jérôme Gattacceca, CNRS, Centre européen de recherche et d'enseignement des géosciences de l'environnement (Cerege), à Aix-en-Provence

Pour trouver des météorites à étudier, Jérôme Gattacceca et ses collègues passent les déserts au peigne fin, comme d'autres iraient traquer les champignons. De l'Atacama chilien à l'Antarctique, le développement des campagnes de collecte, dans ces endroits particulièrement riches en matière extraterrestre, porte ses fruits.

Les météorites sont des roches extraterrestres qui atteignent la surface terrestre. S'il est possible d'aller chercher ces roches où elles se trouvent et de les rapporter sur Terre, l'opération est complexe et coûteuse. Différentes missions, humaines ou robotisées, ont récupéré environ 380 kilogrammes de roches et de sols lunaires sur notre proche voisine. Plus loin dans l'espace, moins d'un gramme de l'astéroïde Itokawa a été rapporté par la mission spatiale japonaise Hayabusa, en 2010. La mission américaine Stardust, de retour sur Terre en 2011, a quant à elle, collecté moins d'un milligramme de poussières de la comète Wild. Une autre manière d'obtenir ces pierres consiste peu ou prou… à attendre qu'elles tombent du ciel. En effet, même si l'espace interplanétaire est essentiellement vide, on y trouve des roches qui ont été arrachées à leur corps parent (*) par des impacts. Elles se retrouvent sur des orbites très elliptiques dans ce vide interplanétaire. Une infime fraction de ces petits objets, appelés météoroïdes, croise l'orbite de notre planète. Ils peuvent alors finir par la percuter. Une minorité d'entre eux survit à la traversée de l'atmosphère de la Terre et atteint sa surface : une météorite vient d'apparaître !

Contexte **Récolter des roches dans l'espace, ce qui peut nous aider à expliquer la formation des planètes, est une opération complexe, coûteuse, et qui ne permet de rapporter que de faibles quantités. Mais ces pierres, qui constituent la mémoire du Système solaire ancien, voyagent parfois d'elles-mêmes jusqu'à la Terre : ce sont ces météorites que les scientifiques entendent collecter et étudier.**

GÉOLOGUE
Jérôme Gattacceca est directeur de recherche au CNRS et géophysicien. Ses recherches portent sur la tectonique, le magnétisme des roches, les cratères d'impact et les météorites, son principal sujet d'étude actuel.

(*) **Un corps parent** est un astéroïde, une planète ou un satellite dont est issu le météoroïde qui donnera naissance à la météorite.

Reste à retrouver cet objet, si utile pour comprendre l'histoire du Système solaire…

Les statistiques jouent en notre défaveur. Environ une dizaine de tonnes de météorites, soit autour de 3 m^3 de roches, atteignent la surface terrestre chaque année. Au total, cela représente environ 20 000 chutes annuelles de météorites, essentiellement sous forme de pierres de quelques dizaines à quelques centaines de grammes, celles de plus de 1 kg étant plus rares (quelques milliers). Cela peut sembler beaucoup, mais la Terre est vaste – 510 millions de kilomètres carrés –, de sorte que, sur une surface de 1 km^2, il tombe une météorite de plus de 10 kg tous les 2 millions d'années en moyenne ! Par ailleurs, l'essentiel de la surface terrestre est recouvert par les océans et autres zones inhabitées.

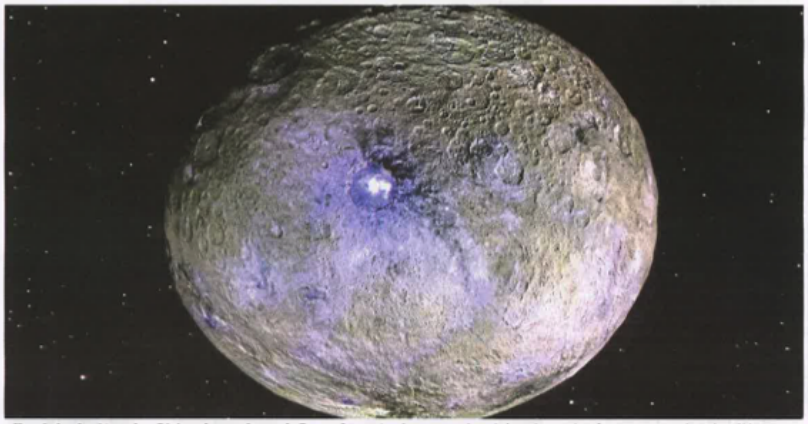
Chaque année, une dizaine de météorites sont récupérées après leur chute ; les 99,99 % restantes sont perdues… ou presque. Il est possible de retrouver celles tombées sur les

C'EST LE WEEK-END / PROVENCE TERRE DE SCIENCE

Cérès, un monde océan propice à la vie extraterrestre

ASTROPHYSIQUE

Longtemps déconsidérée par les spécialistes, la planète naine et gelée Cérès pourrait maintenir de la vie à sa surface.



« Vue de la planète naine Cérès prise par la sonde Dawn. Au centre, les zones plus claires du cratère Occator pourraient être liées à des affleurements d'eau saumâtre susceptibles de contenir des traces de vie. » PHOTO NASA

Si la vie a été présente sur Cérès, des traces pourraient encore être décelées aujourd'hui», affirment des astrobiologistes et astrophysiciens américains (Nasa) et français dans la revue *Astrobiologie* de janvier. Cette vie extraterrestre pourrait même toujours exister sur la plus petite planète naine du système solaire, située entre l'orbite de Mars et de Jupiter, au sein de la ceinture d'astéroïdes. Car celle-ci possède encore une grande quantité d'eau, certes moins que la terre, mais peut-être voire plus que Mars : « *Un océan d'eau liquide a sûrement façonné Cérès en profondeur depuis sa formation. Aujourd'hui, une partie de cet océan pourrait demeurer sous la surface, à plusieurs dizaines de kilomètres de profondeur, sous forme de poches d'eau salée* », atteste l'astrophysicien Alexis Bouquet du laboratoire d'astrophysique de Marseille (Aix-Marseille Université, CNRS, Cnes), co-auteur de cette revue scientifique. Ce monde-océan, à l'instar des fascinantes « lunes glacées » Encelade (Saturne) ou Europe (Jupiter), pourrait se révéler plus facilement explorable que ces dernières : « *Elle est bien plus proche de la Terre qu'Encelade ou Europe et le fait qu'elle ne subisse pas l'influence d'une planète massive en facilite l'approche par des sondes* », souligne-t-il.

Cet isolement pourrait toutefois avoir limité la vie au sein de l'océan intérieur. Car la vie a besoin d'énergie pour prospérer.

-90°C à sa surface

Sur terre, le soleil est la principale source d'énergie de la vie. Mais celle-ci prospère aussi parfois dans l'ombre, grâce à l'énergie géothermique. Ainsi, à proximité des dorsales océaniques s'échappent des panaches de fluides chauds, chargés en hydrogène et en minéraux, qui sont autant de nourritures pour des bactéries des abysses dites chimiotrophes. Qu'en est-il alors de Cérès ? Elle est de fait trop éloignée du soleil - il fait environ -90°C à sa surface ! L'absence de planète massive dans les parages l'empêche de surcroît de bénéficier d'une source majeure de chaleur géothermique via les phénomènes de marée. Alors ? « *La radioactivité naturelle des éléments comme l'uranium 235, le thorium 232 ou le potassium 40, qui sont des sources importantes d'énergie géothermique sur Terre, pourrait fournir suffisamment d'énergie sur Cérès pour favoriser le maintien d'une vie extraterrestre* », explique Alexis Bouquet, spécialiste de ces rayonnements. Si la mission Dawn, qui a survolé Cérès de 2015 à 2018, a fourni des résultats renforçant ces hypothèses, les scientifiques aimeraient en avoir le cœur net : « *C'est l'ambition d'un nouveau projet d'exploration porté par Julie Castillo-Rogez (Nasa) dans le cadre de la feuille de route sur l'exploration des mondes-océans de notre système solaire* », se réjouit-il. Et si la première preuve de l'existence d'une vie extraterrestre, longtemps recherchée sur la fantasmatique planète rouge Mars, nous était apportée par ce qui a longtemps été considéré… comme un « vulgaire » astéroïde.

Jean-Baptiste Veyrieras

« La radiolyse pourrait permettre à la vie de se maintenir sur Cérès »

Alexis Bouquet, astrophysicien au laboratoire d'astrophysique de Marseille (Aix-Marseille Université, CNRS, Cnes)

La Marseillaise : Comment la radioactivité naturelle peut-elle apporter une source d'énergie viable et durable à une possible vie extraterrestre sur Cérès ?

Alexis Bouquet : D'une part, les durées de vie des formes radioactives de l'uranium ou du potassium sont très longues, de l'ordre de plusieurs milliards d'années. Cérès, qui s'est formée au même moment que la Terre, recèle encore de ces éléments radioactifs en quantité suffisante pour constituer une véritable source d'énergie interne. Cette énergie issue du manteau et du noyau rocheux de Cérès pourrait ensuite provoquer dans la couche supérieure où se trouve l'océan, la radiolyse de l'eau. Cette décomposition chimique de l'eau dégage de l'hydrogène et de l'oxygène qui pourraient constituer une source directe de « carburants » pour une vie extraterrestre, à l'image des bactéries chimiotrophes sur Terre. Ce phénomène de radiolyse pourrait ainsi contribuer à rendre l'océan saumâtre de Cérès habitable, surtout au niveau du plancher océanique, à l'interface entre la roche et l'eau.

Comment explorer ces zones potentiellement habitables qui pourraient se situer à des kilomètres sous la surface ?

A.B. : Même si les conditions sur Cérès sont favorables à une exploration au sol par des robots, il est très difficile d'envisager un forage pour percer l'épaisse couche de glace qui recouvre ces poches d'eau liquide. Néanmoins, la mission Dawn a révélé des affleurements au niveau du cratère Occator, ainsi qu'un imposant cryovolcan, le mont Ahuna. Des analyses de la composition chimique de cette eau régurgitée en surface pourraient révéler la présence de molécules organiques liées à cette vie extraterrestre.

Propos recueillis par J.-B.V.

REPÈRES

4,57 milliards

La planète naine Cérès a le même âge que la Terre. Une hypothèse suggère qu'elle se serait formée aux abords de Neptune avant d'être éjectée de cette orbite lointaine vers la ceinture d'astéroïdes - dont elle représente un tiers de la masse totale.

1801

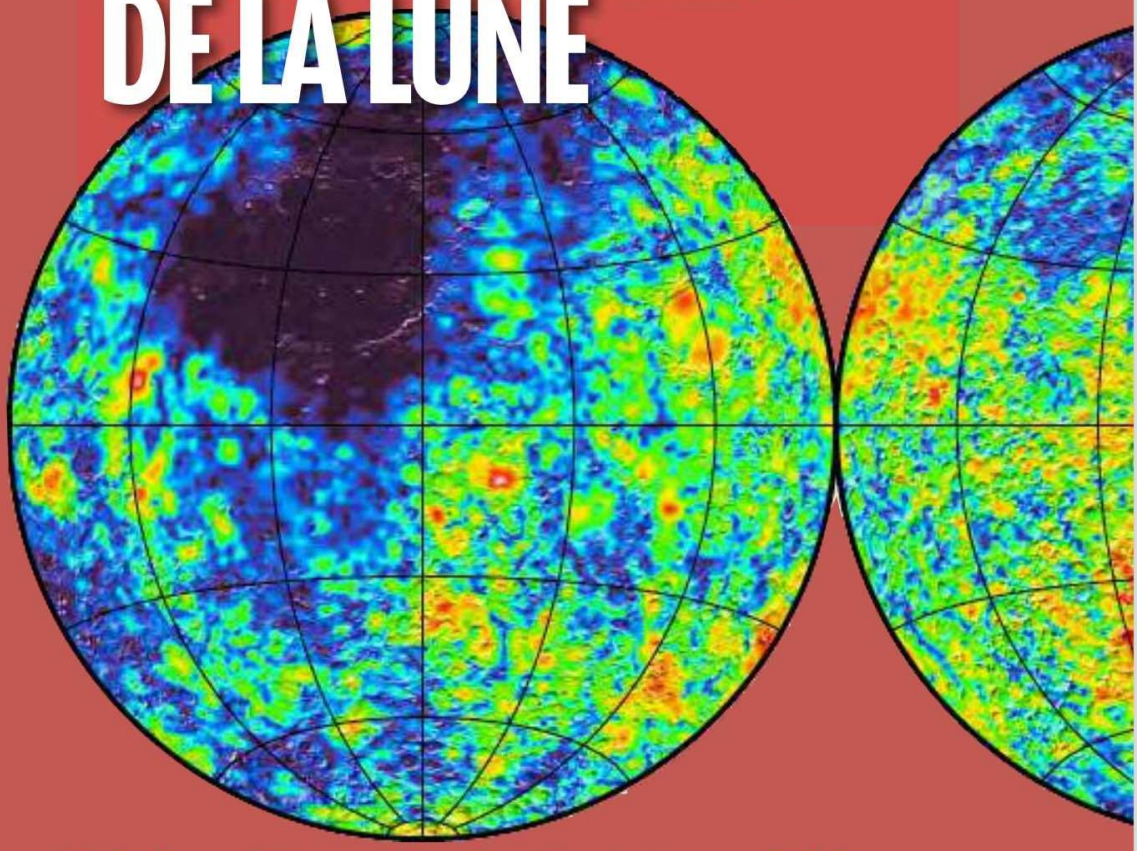
L'astronome sicilien Giuseppe Piazzi découvre par hasard un nouvel « astéroïde » dans le ciel. Il sera officiellement baptisé Cérès, en hommage à la déesse romaine protectrice de la Sicile.

2015

Début mars, la sonde spatiale Dawn de la Nasa, lancée en 2007 depuis le Cap Canaveral (Floride, États-Unis), se met en orbite autour de Cérès. Les données acquises jusqu'en 2018 vont profondément changer le visage de l'astre aux yeux des scientifiques.

UNE PLONGÉE VIRTUELLE DANS

LES ENTRAILLES DE LA LUNE

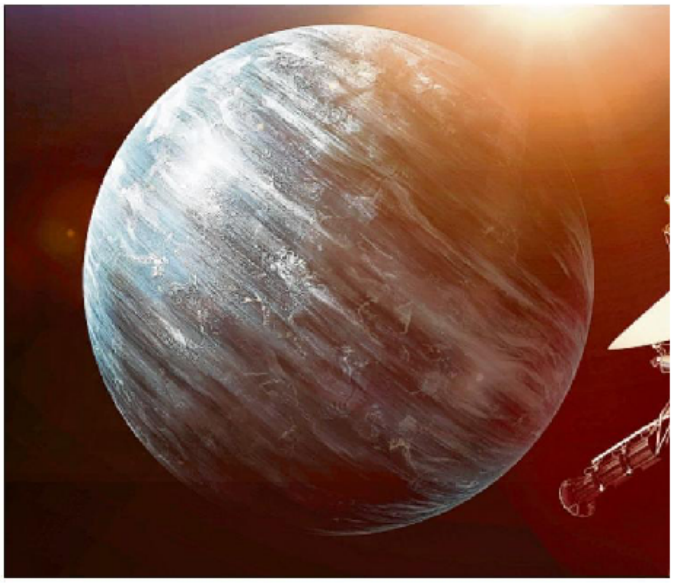


L'étude des propriétés magnétiques des roches, tout comme celle de leurs propriétés minéralogiques, géochimiques ou isotopiques, est une des clefs de lecture de l'histoire des corps solides du Système solaire. Les notions de champ magnétique et les mécanismes qui président à sa génération ne sont pas intuitifs et sont parfois entourés d'une aura de mystère. Comparativement, la notion de champ de gravité est mieux comprise du grand public ne serait-ce que parce que c'est ce champ de gravité qui nous fait garder les pieds sur Terre.

Espace : la Provence plus

Dossier réalisé par
Philippe GALLINI
pgallini@laprovence-presse.fr

Au début de cette semaine, le Laboratoire d'astrophysique de Marseille (LAM) a accueilli un important séminaire international, réunissant les meilleurs spécialistes mondiaux de l'exploration du système solaire externe, c'est-à-dire la partie située au-delà de Jupiter. Le but de cette réunion de travail était de définir les objectifs que les scientifiques souhaitent atteindre dans le cadre des futures missions spatiales qui seront envoyées vers les deux planètes géantes que sont Uranus et Neptune. Concrètement, il s'agissait pour la centaine de scientifiques présents, d'exprimer leurs besoins en termes de recueil de données puis de déterminer le moyen idéal de les récolter. Ce travail préparatoire a consisté notamment à déterminer les caractéristiques et les performances des instruments embarqués, mais également de la façon d'approcher au mieux les planètes visées. Pour cela, les chercheurs s'appuient sur l'expérience acquise avec la sonde américaine Galileo (NASA) qui avait traversé l'atmosphère de Jupiter, en 1995, et la mission américano-européenne Cassini-Huygens (ESA) qui en 2005, avait atteint Titan, la plus grande des lunes de Saturne. Le choix de Marseille et du LAM en particulier, pour tenir cette réunion au sommet, ne doit cependant rien au hasard. Olivier Mousis, l'un de ses chercheurs qui avait été contacté par l'Agence spatiale européenne (ESA) afin de participer à la première phase des travaux, consistant notamment à effectuer un prétri dans les différents types de sondes, avait très vite suggéré à ses pairs l'option phocéenne pour discuter de l'un des scénarios de mission les plus en vue. Le fait que ce genre d'événement, habituellement piloté par de grandes agences spatiales, se déroule au sein du LAM, confirme surtout que le laboratoire marseillais est plus que jamais considéré comme un interlocuteur de premier plan par la communauté des astrophysiciens.



Percer les secrets d'Uranus et de Neptune

Professeur d'astrophysique à Aix-Marseille-Université et chercheur au LAM depuis 2013, Olivier Mousis est considéré comme l'un des meilleurs spécialistes français des sondes spatiales de rentrée atmosphérique, ayant proposé à l'ESA deux missions à destination de Saturne qui n'ont malheureusement pas pu aboutir, faute de vaisseau transporteur disponible. Mais ce chercheur passionné ne désespère pas de parvenir à ses fins, d'autant que l'Europe et les États-Unis semblent disposés à coopérer sur un nouveau programme spatial à destination d'Uranus (*photo ci-dessous à gauche*) et/ou de Neptune (*photo ci-dessous à droite*) qui pourrait donner lieu à un lancement en 2032.

Une cinquantaine de spécialistes venus du monde entier était réunie en début de semaine au siège de Laboratoire d'astrophysique de marseille, sur le technopôle de Château-Gombert. /PHOTO DR

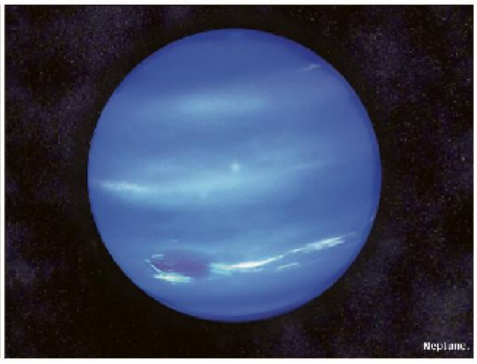
Réécrire les livres de SVT…

Les Américains devraient certainement prendre une décision en 2022 ou en 2023. Quant à l'ESA, elle a prévu de demander à l'Union européenne, une rallonge financière de 300 millions d'euros. "*Nous avons en outre deux bonnes raisons de nous intéresser à Uranus et Neptune*, explique Olivier Mousis. *Tout d'abord, il s'avère que parmi toutes les exoplanètes découvertes à ce jour, la plupart présentent les mêmes caractéristiques que nos deux grandes planètes glacées. Les étudier pourrait donc nous fournir de précieux éléments d'analyse pour les planètes situées à l'extérieur de notre système solaire, et inversement. L'autre raison est qu'il existe très peu de données sur Uranus et Neptune car ni l'une ni l'autre n'ont fait l'objet d'une exploration détaillée depuis le passage de la sonde américaine Voyager 2 en 1986 et 1989. Ce que nous allons y découvrir pourrait dès lors révolutionner nos connaissances et nous conduire à réécrire les livres de SVT…*" Reste à savoir comment les atteindre.

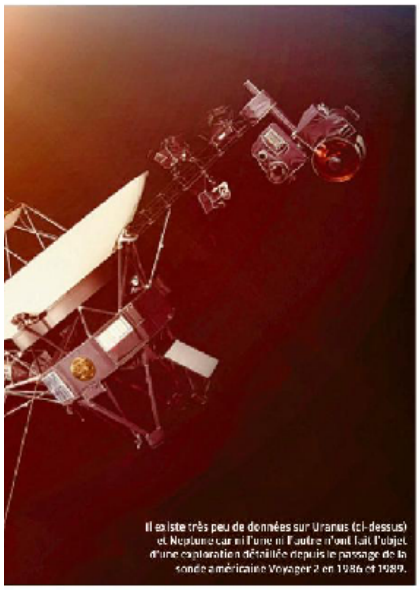
> "Ce que nous allons y découvrir pourrait dès lors révolutionner nos connaissances."
>
> OLIVIER MOUSIS, PROFESSEUR D'ASTROPHYSIQUE

"*Il y a trois possibilités*, répond Olivier Mousis. *La première option est d'envoyer sur l'une des deux planètes, avec sonde de rentrée atmosphérique européenne portée par un vaisseau mère américain. La seconde est de lancer un orbiteur européen qui se concentrerait sur Uranus ou Neptune, tandis que les États-Unis s'occuperaient de l'autre planète. La troisième option serait d'envoyer un atterrisseur européen, porté par un vaisseau US, se poser sur la surface de Triton qui est l'un des 14 satellites de Neptune.*"

Uranus.


Neptune.

que jamais dans la course !



Il existe très peu de données sur Uranus (ci-dessus) et Neptune car ni l'une ni l'autre n'ont fait l'objet d'une exploration détaillée depuis le passage de la sonde américaine Voyager 2 en 1986 et 1989.

L'Observatoire de Haute-Provence fait toujours référence

82 ans après l'ouverture du site, l'OHP et son principal télescope de 193 cm, multiplient les découvertes retentissantes. PHOTO DR

À la différence des instruments embarqués à bord d'un télescope spatial sur lesquels il est difficile, voire impossible d'intervenir, les appareils qui équipent un site terrestre peuvent être aisément remplacés ou améliorés. Dans le cas de l'Observatoire de Haute-Provence (OHP), le spectrographe *Élodie* grâce auquel avait été découverte, en 1995, la toute première exoplanète de l'histoire par Michel Mayor et Didier Queloz, deux chercheurs suisses de l'Observatoire de Genève, a donc fait place il y a douze ans au spectrographe *Sophie*. Grâce à ces deux instruments, près de 200 exoplanètes ont été identifiées au cours de ce dernier quart du siècle par les équipes internationales qui se succèdent sur la commune de Saint-Michel l'Observatoire.

Aménagé en 1937 à une centaine de kilomètres de Marseille, sur un plateau situé à 650 mètres d'altitude, l'OHP dispose en effet de quatre télescopes de 80, 120, 152 et 193 centimètres. Le plus puissant dont le miroir principal mesure 1,93 mètre de diamètre, a bénéficié de remises à niveau régulières qui lui permettent de compter. 82 ans après l'ouverture du site, parmi les équipements les plus performants du monde. Ce qui explique qu'il constitue toujours l'un des appareils plébiscités par les astrophysiciens dans leur quête incessante de nouvelles exoplanètes.

Être dans la zone d'habitabilité

Derrière la recherche d'exoplanètes se cache une ambition dont les scientifiques parlent peu, sans doute parce qu'elle relève encore largement de la fiction: celle de découvrir une seconde Terre susceptible d'accueillir l'humanité en cas de catastrophe majeure. Mais pour constituer une alternative viable, cette planète sœur devra non seulement se situer à une distance raisonnable de la nôtre afin que des vaisseaux puissent l'atteindre dans des délais relativement courts, mais elle devra surtout se trouver dans la zone habitable de son étoile. Cette zone a été définie par les experts comme étant celle à l'intérieur de laquelle l'eau peut se maintenir à l'état liquide et donc favoriser l'apparition ou l'existence d'une vie extraterrestre proche de celle que nous connaissons.

Dans le cas du système solaire, cette zone est comprise entre 142 et 235 millions de kilomètres de notre étoile; la Terre se trouvant à environ 150 millions de km du soleil. Mais cette distance varie fortement en fonction de la luminosité de chaque étoile; une moindre luminosité se traduisant par une distance inférieure, et inversement.

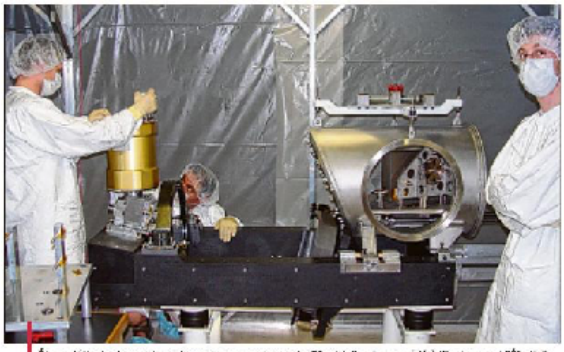
Une "super-Terre" distante de 75 000 milliards de km

Située à 8années-lumière de notre bonne vieille planète, elle est pourtant la troisième exoplanète la plus proche de notre système solaire.

Baptisée GJ411b (ou Lalande 21185b) et située dans la constellation de la Grande Ourse, cette "super-Terre" que l'on peut observer à l'œil nu, a été découverte, au début de ce mois, par une équipe internationale utilisant le spectrographe Sophie du télescope de 1,93 m de l'Observatoire de Haute-Provence (04); équipe dont faisait partie Melissa Hobson, doctorante au LAM. D'une masse trois fois supérieure à celle de la Terre, cette planète fait le tour de son étoile (son soleil) en 13 jours.

Probablement rocheuse, elle n'est cependant pas située dans la fameuse "zone habitable", car bien que la température de son soleil – une naine rouge – ne soit "que" de 3.400 °C – contre 5.500 °C pour le nôtre –, le fait qu'elle en soit cinq fois plus proche que ne l'est, par exemple, la planète Mercure de notre soleil, fait qu'elle reçoit 3,5 fois plus d'énergie que la Terre. Son étude est infiniment celle de son atmosphère promettent en revanche d'être riches d'enseignements, d'autant que sa très relative proximité pourrait la rendre observable en imagerie directe avec le futur ELT, le télescope géant de l'Observatoire Européen Austral (ESO) qui doit entrer en service en 2025, dans les Andes chiliennes.

Les chercheurs espèrent notamment comprendre le comportement de GJ411b, mais aussi grâce à elle, appréhender avec une plus grande précision les limites de la "zone habitable".



Étape délicate du montage du nouveau spectrographe "Sophie" qui a succédé à l'instrument "Élodie" sur le télescope de l'OHP, à Saint-Michel-l'Observatoire, dans les Alpes-de-Haute-Provence.

France et États-Unis côte à côte

Bien que leurs travaux nécessitent beaucoup de sérieux et de rigueur, les astrophysiciens n'en restent pas moins de grands enfants comme le prouve ce selfie pris en début de semaine, lors de la conférence en Lana, par Olivier Mousis (à droite) avec son visiteur David Atkinson, chercheur au Jet propulsion laboratory, le fameux centre de recherche de la Nasa, basé à Pasadena, en Californie.

Collaborations d'envergure

Très impliqué dans la recherche des exoplanètes, le LAM est devenu l'un des établissements de référence à la matière. Il était ainsi l'un des principaux laboratoires français engagés dans la mission du télescope spatial *CoRoT*, entre 2006 et 2014. Il a ensuite été associé à l'étude des données recueillies par le successeur de *CoRoT*, le télescope spatial *Kepler* (NASA), entre 2009 et 2018. Le LAM est actuellement l'un des partenaires du programme *Cheops*, un petit télescope spatial spécialisé dans l'étude de l'atmosphère des exoplanètes, développé par l'Observatoire de Genève, en partenariat avec l'ESA, dont le lancement est prévu entre le 15 octobre et le 14 novembre 2019. Il est également en lice dans le cadre de la mission *Plato* (ESA), un télescope spatial qui devrait prendre son envol en 2026. Le LAM sera aux premières loges du volet scientifique de cette mission, en charge tout à la fois de la définition des cibles, de la détermination des objectifs et de l'exploitation des résultats. Son ambition est de trouver et d'étudier des planètes extrasolaires mais aussi des systèmes planétaires pouvant abriter des zones de type "terre" situées dans la fameuse zone habitable. Avec l'espoir de pouvoir répondre un jour à cette question fondamentale: le système solaire et notre Terre constituent-ils un assemblage unique dans l'univers ou bien cette configuration a-t-elle pu se reproduire quelque part, dans l'immensité intersidérale...

La présence d'eau sur Mars nous invite à y plonger

La découverte d'un lac sous la surface glacée signifie qu'il peut y avoir de la vie

Vendredi, Mars n'avait pas été aussi proche de la Terre depuis quinze ans. À peine 57,6 millions de kilomètres nous séparaient de ce point rouge qui brille à l'horizon sud-est ces jours-ci. Une paille. Insuffisante pour distinguer quoi que ce soit à l'œil nu. Et certainement pas le lac d'eau liquide et très salée que la sonde Mars Express et son radar Marsis ont repéré il y a peu. Une découverte extraordinaire qui confirme les gros soupçons des scientifiques depuis quelques décennies. *"Je suis à cours d'idées pour expliquer cela d'une autre manière qui ne serait pas l'eau"*, indique Roberto Orosei, chercheur à l'Institut national d'astrophysique à la tête de l'équipe italienne ayant conclu à la présence aquatique sur la planète rouge.

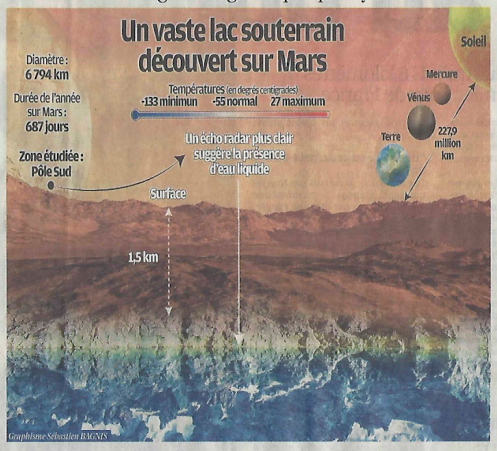
Autrement que sous la forme glacée habituellement observée. *"Cette découverte passionnante est un point culminant pour la science planétaire et contribuera à notre compréhension de l'évolution de Mars, de l'histoire de l'eau sur notre planète voisine et son habitabilité"*, indique Dmitri Titov, de la mission Mars Express.

> Une découverte extraordinaire qui confirme les soupçons des scientifiques

Car la présence d'eau non gelée signifie qu'il pourrait y avoir de la vie. Pour le moment, rien ne le prouve. Mais plusieurs indices le laissent imaginer. Et les similitudes entre ce lac martien et Vostok, *alter ego* terrien situé sous quatre kilomètres de glace en Antarctique, frappent les astrophysiciens.

En orbite depuis quinze ans autour de la planète rouge, la sonde s'évertue à localiser des cavités qui pourraient abriter de l'eau. Lacs, mers et rivières couvraient une grande partie de sa surface il y a plus de 3,7 milliards d'années, avant qu'une période de glaciation ne l'assèche. Le rover Curiosity explore un ancien lac long de 200 kilomètres pour y chercher des traces de vie.

Située environ 1,5 kilomètre sous la surface glacée et poussiéreuse de Mars et longue d'une vingtaine de kilomètres, la nappe phréatique découverte il y a peu au niveau du pôle Sud devrait son existence liquide à des perchlorates, des sels qui abaissent le point de fusion de l'eau. Mais qui dit sels dit aussi difficultés pour la vie à se développer. En en apprenant plus sur la teneur saline de ce lac sous-glaciaire, on obtiendra des indices sur la possibilité pour des êtres vivants de s'y trouver. La température de l'eau joue aussi un rôle essentiel. Elle serait, d'après les premiers calculs, d'environ -75°C. Ce qui n'empêcherait pas certaines bactéries ou acariens de survivre. De quoi alimenter les recherches scientifiques et les fantasmes des hommes. En attendant, il s'agit de trouver d'autres réservoirs de ce genre sur Mars.



Graphisme Sébastien RAGNIS

Marseille cherche la vie extraterrestre

L'existence encore à découvrir de traces de vie sur Mars ou d'autres planètes glacées du système solaire incite les terriens à parer toute éventualité. À Marseille, les scientifiques cogitent très sérieusement à la création d'un institut orienté vers la recherche de la vie dans l'univers. Chapeauté par l'Institut Pythéas qui gère notamment le laboratoire d'astrophysique (Lam), il réunirait des physiciens, des biologistes et des géologues, mais aussi des philosophes ou des sociologues. *"Car il y aura forcément une réflexion à avoir autour des enjeux de société qu'impliquerait la découverte de la vie ailleurs que sur Terre"*, souligne Olivier Mousis, astrophysicien au Lam. Un tel institut existe déjà aux États-Unis sous l'égide de la Nasa. Mais en Europe, plusieurs projets germent, à l'image de celui de Marseille, auquel la Comex s'est notamment associée.

"Il y a d'autres domaines qui semblent être similaires", note Elena Pettinelli, de l'équipe d'astrophysiciens italiens. *"Il n'y a aucune raison de dire que c'est le seul endroit"*. De nouvelles missions permettront d'en savoir plus. Mais un robot pourra-t-il goûter cette eau salée ? *"Le meilleur moyen est encore d'y aller"*, s'enthousiasme Olivier Moussis, astrophysicien et professeur à l'université d'Aix-Marseille.

En rentrant de sa mission spatiale, Thomas Pesquet avançait la date de 2035 pour une mission habitée vers la voisine rouge. Une question de moyens, tout simplement, les technologies permettant d'avancer vite. L'aller simple durerait entre six mois et deux ans et les radiations sur place sont plutôt fortes. Qui est partant ?

François TONNEAU

L'ÉDITO

Sommes-nous vraiment seuls dans l'univers ?

Par Franz-Olivier GIESBERT

Suite de la 1re page

Il y a 3,6 milliards d'années, la planète Mars, aujourd'hui aride et glacée, était comme une oasis du système solaire avec un climat chaud, des mers, des lacs, des rivières. Les scientifiques estiment que, de toutes les planètes, elle est celle qui a le plus de chances d'avoir jadis accueilli la vie et l'avenir nous dira s'il en reste encore, à l'état résiduel ou pas, dans le lac subglaciaire qui vient d'être mis au jour. En attendant, toutes les hypothèses sont encore permises dans la mesure où il est établi que des organismes dits extrémophiles peuvent survivre dans des milieux très hostiles.

Observez comme il se passe tous les jours quelque chose en astronomie. Le cosmos n'a pas fini de nous fasciner.

Devant l'immensité de ses mystères, l'espèce humaine est comme interdite, souvent saisie d'une sorte d'angoisse métaphysique, *"Le silence éternel de ces espaces infinis m'effraie"*, écrivait Blaise Pascal. Que nous soyons seuls ou pas dans l'univers, les deux perspectives ne sont-elles pas horrifiques, comme dit l'humoriste ? Nous ne sommes pas au bout de nos surprises.

La première exoplanète ou planète extrasolaire (51 Pégasi b) a été découverte en 1995 à l'Observatoire de Haute-Provence, à Saint-Michel-l'Observatoire, près de Forcalquier. La chasse était lancée. À ce jour, les scientifiques en ont déjà identifié plus de 3 700. Il s'agit de planètes à des années-lumière qui ne sont pas dans notre système solaire mais qui, comme la Terre, orbitent dans la zone habitable de leur étoile. Il y en aurait ainsi un milliard, susceptibles d'abriter la vie, rien que dans notre galaxie.

Y a-t-il une vie extraterrestre ? Personne ne connaît encore la réponse mais plus la science avance, moins devient invraisemblable la prédiction de l'astronome américain Carl Sagan : *"Quelque part quelque chose d'incroyable attend d'être connu."* À quoi le cosmologiste britannique Stephen Hawking, disparu il y a peu, ajoutait : *"Si les extraterrestres nous rendent visite un jour, je pense que le résultat sera semblable à ce qui s'est produit quand Christophe Colomb a débarqué en Amérique, un résultat pas vraiment positif pour les Indiens."*

L'ANALYSE D'OLIVIER MOUSIS ASTROPHYSICIEN AU LABORATOIRE D'ASTROPHYSIQUE DE MARSEILLE (LAM)

"On arrivera un jour à habiter sur Mars"

Olivier Mousis. /PHOTO DR

Le spécialiste de notre système solaire est-il aussi surpris que nous par la découverte d'un lac sur Mars ?

Non, ça ne me surprend pas. C'était prévu par la thermodynamique. C'est simple. Quand on est sur la banquise à zéro degré Celsius, l'eau gèle. Mais à partir d'une certaine pression, exercée par une colonne de glace, elle va à nouveau se liquéfier. Le poids de la glace suffit à cela. C'est un phénomène connu sur la planète Terre.

Où cela se manifeste-t-il ?

Dans la zone russe de l'Antarctique, un immense lac appelé Vostok, situé à plusieurs kilomètres sous la glace et environ 500 sous le niveau de la mer, a les mêmes propriétés que celui découvert sur Mars. Ce sont d'ailleurs les mêmes technologies par sonde radar qui, à soixante ans de distance, ont permis de découvrir ces deux lacs.

La différence, c'est qu'on n'avait pas les moyens de sonder Mars à l'époque...

Mais on sait qu'il y a de l'eau sur Mars depuis une cinquantaine d'années. On pense qu'il y a une couche d'un kilomètre d'épaisseur constituée de pergélisol, ou permafrost, tout autour de la planète. On en a même des preuves aujourd'hui. Sous cette masse gelée, pas étonnant qu'on ait trouvé ce lac.

Forcément, maintenant qu'on sait qu'il y a de l'eau, on imagine qu'il y a aussi de la vie sur Mars...

On a la preuve de l'existence de bactéries dans le lac Vostok en Antarctique. Étant donné que les propriétés sont les mêmes, on peut penser qu'il y a de la vie sur Mars. On a découvert du méthane sur cette planète. Or, cela signifie qu'il est apparu pour des raisons purement géologiques ou parce qu'il y a de la vie. On a aussi trouvé des carbonates, dont l'origine est soit géologique, soit issue d'organismes vivants. On a vu aussi de la boue récemment, preuve que de l'eau coule. C'est la même chose pour les geysers observés sur Saturne. S'il y a de l'eau chaude, on peut penser qu'il y a de la vie. Sans doute sous forme de bactéries, mais c'est déjà beaucoup.

Cela signifie-t-il qu'on peut, nous humains, vivre sur Mars ?

On arrivera un jour à y habiter. Il faut d'abord maîtriser pas mal d'éléments, à commencer par les radiations qui développeraient des cancers. Sur Terre, le champ magnétique évite que des particules chargées de protons ou d'électrons nous traversent, ce qui n'est pas le cas sur Mars. Il faut régler cela avec de bonnes combinaisons.

Thomas Pesquet, lors de son retour de mission spatiale, évoquait 2 035 pour aller sur Mars...

Cela fait des décennies que l'on dit qu'on va aller sur Mars. C'est une question de moyens. On peut assez rapidement développer les technologies. Le bond qui a été fait dans les années 60 pour que les Américains aillent sur la lune a été incroyable. On peut le reproduire pour Mars, à condition d'y mettre les moyens financiers. L'atmosphère autour de Mars est très ténue en monoxyde de carbone et sa pression de l'ordre de 6 millibars. C'est 170 moins que sur la Terre. Si on vous lâche sur Mars, le sang sortirait par tous les orifices ! Mais on peut y remédier.

En combien de temps peut-on y être ?

C'est une question de billard cosmique, d'alignement des planètes. En fonction de cela, le trajet peut durer entre six et huit mois ou entre un et deux ans. Mais une fois sur place, il faut bien rester deux ans ! Il y a tellement de choses à y faire !

Propos recueillis par F.T.

Annexe C : Liste des différentes structures existantes au niveau national, de l'Union Européenne ou hors UE

France:

OCAV: Origine et conditions de l'apparition de la vie. Université PSL

http://www.univ-psl-ocav.fr/recherche/

L'OCAV fédère 8 institutions parisiennes autour des axes d'investigations suivants : Conditions d'apparition de la vie dans le système solaire et au-delà, émergence de la matière vivante, variations culturelles et représentations artistiques de la vie. OCAV est formé dans le cadre d'une IRIS, Initiative de Recherche Interdisciplinaire Stratégique et dépend fortement de l'Observatoire de Paris et rassemble des établissements de premier plan comme le Collège de France, l'Ecole Normale supérieure, l'ESCPI…

Université Grenoble Alpes: Origin of Life – Explore Life on Earth and beyond?
Organisé autour de 3 thèmes principaux : Origines de la vie sur Terre, Concept d'habitabilité hors de la Terre, Recherche de vie dans l'Univers. Regroupe 8 partenaires et une quinzaine de chercheurs permanents.

https://origin-life.univ-grenoble-alpes.fr/

Bordeaux : Un institut en cours de formation (Muriel Gargaud).

Europe :

Un certain nombre de structures nationales ont été développées pour encourager la recherche interdisciplinaire en astrobiologie :

Espagne : Le Centro de Astrobiologica couvre des thèmes de recherche allant de la chimie prébiotique à la formation de galaxies. Les départements « Molecular evolution », « Planetology and Habitability » et « instrumentation » comptent 23, 15 et 18 chercheurs permanents, respectivement. https://www.cab.inta-csic.es/en/lineasdeinvestigacion

Allemagne : Aucune structure interdisciplinaire spécifiquement dédiée à l'astrobiologie n'est recensée. Une société savante de type SFE a été proposée, ainsi que des initiatives locales plus ciblées :

https://www.dlr.de/pf/Portaldata/6/Resources//DAbG_Poster_2016_final.jpg)
https://www.cup.uni-muenchen.de/en/events-and-news/archive/2020/prebiotic-chemistry-in-the-beginning-there-was-sugar/

Certaines structures comme l'institut de planétologie inclut des équipes développant des recherches en astrobiologie couvrant les thématiques experimental habitability, Planetary Simulations/analogs, et biosignatures :

https://www.gfz-potsdam.de/en/section/geomicrobiology/topics/astrobiology-habitability-and-biosignatures/,
https://www.dlr.de/pf/en/desktopdefault.aspx/tabid-178/327_read-37562/

Royaume-Uni : le UK Centre for Astrobiology est une structure de l'Université d'Edimburgh, regroupant 17 chercheurs permanents autour des thèmes « microbiology, paleobiology, planetary sciences, space engineering and missions, and space policy and philosophy » :

https://www.astrobiology.ac.uk/

Italie : Le Italian National Project of Astrobiology est en cours de formation. Ce projet est à l'échelle nationale (10 institutions) et centré sur les questions d'origine et d'évolution de la matière organique, la synthèse prébiotique, les limites de la vie en conditions extrême et l'habitabilité, et les biomarqueurs dans le système solaire et les exoplanètes :

https://www.liebertpub.com/doi/full/10.1089/ast.2020.2247

European Astrobiology Institute (EAI) : Un consortium d'institutions regroupant des institutions de recherche nationales et européennes aussi bien que des groupes affiliés au sein d'une institution. L'**Institut Origines** de Marseille sera affilié à l'EAI :

https://europeanastrobiology.eu/

États-Unis :

Au niveau local, plusieurs universités d'État ont créé des « instituts d'astrobiologie » visant à favoriser la collaboration entre les départements dont les thématiques de recherche sont connectées à l'astrobiologie (chimie/biochimie, planétologie du système solaire et des exoplanètes, biologie) et à offrir des programmes de formation orientés astrobiologie. Les exemples incluent les universités de Washington, du Colorado, d'Hawaii, d'Arizona et le Carl Sagan Institute de Cornell University. Ces programmes engagent quelques dizaines de chercheurs permanents chacun.

https://uhnai.ifa.hawaii.edu/
https://lasp.colorado.edu/home/life/about/
http://depts.washington.edu/astrobio
https://astrobiology.arizona.edu/
http://carlsaganinstitute.cornell.edu/

Le SETI Institute est un institut de recherche financé sur projets regroupant une centaine de chercheurs, et depuis sa création centrée autour de la recherche de signes de vie extraterrestre, a diversifié ses thèmes de recherches pour inclure tous les sujets connectés à l'astrobiologie et aux thèmes des « origines ».

Au niveau fédéral, le NASA Astrobiology Institute a été arrêté en 2019 au profit d'une approche plus décentralisée : les Research Coordination Networks (RCN), chacun avec leur thème (Ocean Worlds, Life Detection…). La NASA estime que le NAI a favorisé à la création d'une communauté Astrobiologie, tandis que les RCN sont l'étape suivante pour organiser une communauté établie et pérenne. La NASA propose également les ICAR (Interdisciplinary Consortia for Astrobiology Research), un financement sur projet d'équipes interdisciplinaires.

https://astrobiology.nasa.gov/nai/
https://astrobiology.nasa.gov/about/faq/#Coordinating%20Astrobiology%20Research
https://astrobiology.nasa.gov/research/astrobiology-at-nasa/icar/

Les centres individuels de la NASA (Goddard, Ames, JPL) ont également travaillé à promouvoir la recherche interdisciplinaire en leur sein autour des thèmes de l'astrobiologie. Les consortiums de recherches établis à Goddard sont directement connectés aux RCNs.

https://astrobiology.gsfc.nasa.gov/
https://science.jpl.nasa.gov/PlanetaryScience/OceanWorlds/index.cfm
https://www.nasa.gov/ames/spacescience-and-astrobiology

Japon

Le Astrobiology Center du National Institutes of Natural Sciences est un institut inter-université (18 chercheurs permanents) avec pour but de développer l'astrobiology en se concentrant sur la recherche d'exoplanète. Il inclut 3 sections: Exoplanet Exploration Project Office, Exo-Life Search Project Office, Astrobiology Instrument Development Office.

http://abc-nins.jp/en/

Le Earth-Life Science Institute (ELSI) est un institute indépendant basé au Tokyo Institute of Technology, centré sur les thèmes de formation de la terre et origine et évolution de la vie.

http://www.elsi.jp/en

Annexe D : Unités d'Enseignement actuellement enseignées et dont les thèmes recouvrent ceux de l'Institut Origines

Il convient d'abord de préciser que les Enseignant-Chercheurs participant à la construction de l'Institut Origines effectuent une grande partie de leurs services d'enseignements dans les disciplines fondamentales que sont la physique, la chimie, la biologie, la géologie, ou bien la philosophie dans tout le cycle Licence. En parallèle, plusieurs UE sont enseignées au niveau Licence, avec un contenu directement en relation avec les champs thématiques couverts par l'Institut Origines. Les enseignements niveau Master devenant spécialisés, la plupart d'entre eux se retrouvent en phase avec le contenu thématique de l'Institut Origines.

Nous énumérons ci-dessous une liste non exhaustive d'UE actuellement enseignées et en relations directes avec les thématiques du projet d'institut :

Cycle Licence

- **L1** portail Pasteur https://formations.univ-amu.fr/ME3SPO-PRSPO1P3.html
  Biochimie - Molécules de la vie (S16BI1I1); Terre habitable (S16ST1I6)
- **L2-L3 SVT** https://formations.univ-amu.fr/ME3SVT-PRSVT3AE.html
  Géophysique interne (S12ST3T4); Géodynamique interne et planétologie (S12ST5T1); Paléontologie évolutive (S12ST6T2); Histoire de la Terre et du climat (S12ST6T3) ; Océan, Atmosphère, Climat (S12OS3O3) ; Géophysique de l'Environnement (S12ST609B)
- **L3 SV** https://formations.univ-amu.fr/ME3SSV.html
  Origine de la Vie & Evolution Moléculaire (S01BI5E7)
- **L1-L3 Chimie** https://formations.univ-amu.fr/ME3SCH-PRSCH3AA.html
  Spectroscopie (SCH3U06J) ; Techniques spectroscopiques et séparatives (SCH4U03A, SCH4U03L, SCH6U02J) ; Démarche expérimentale (SCH6U23J) ; Spectroscopie, microscopie et imagerie (SSV3U07C) ; Spectroscopie (SCH3U06L) ; Spectroscopie, microscopie et imagerie (SSV3U07L) ; Astrochimie et Exobiologie (SCH6U30J).

Cycle Master

- **Master STPE** https://formations.univ-amu.fr/ME5LST-PRLST5AA.html
  Cycle du carbone / carbonates / climat (CYCLECCC) ; Traceurs et chronomètres de l'environnement (TRACEURCHRONO1)
- **Master BEE** https://formations.univ-amu.fr/ME5LBE-PRLBE5AA.html
  De l'évolution à la diversité du vivant (EVOLDIV)
- **Master Sciences de la Mer** https://formations.univ-amu.fr/ME5LSM.html
  Paléocéanographie et paléoclimatologie (OPB211)
- **Master Bio-Géosciences** https://formations.univ-amu.fr/ME5SGS-PRSGS5AA.html
  Histoire de la Vie, Formation du système solaire, Terre Précambrienne
- **Master Microbiologie** Parcours Microbiologie Intégrative et Fondamentale (MIF) https://formations.univ-amu.fr/ME5SMM-PRSMM5AA.html
  Lien entre énergie et émergence de la vie
- **Master Prépa CAPES-Agreg** https://sciences.univ-amu.fr/formation_2018-2022/master_bio_geosciences
- **Master Philosophie** https://formations.univ-amu.fr/ME5HPH-PRHPH5AA.html
  Doctrines philosophiques de l'Antiquité 1 (HPH AU04A) ; Méthodologie de l'enquête philosophique 1 (HPH AU01) ; Métaphysique et histoire de la métaphysique 1 (HPH AU05) ; Méthodologie de l'enquête philosophique 2 (HPH BU01) ; Doctrines

philosophiques de l'Antiquité 2 (HPH C01A) ; Métaphysique et histoire de la métaphysique 2 (HPH DU03).

- **Master Chimie** https://formations.univ-amu.fr/ME5SCH.html
  Approches Expérimentales (SCHBU35J), Spectrométries vibrationnelles et microscopies (SCHU74J), Mise en situation chimie analytique (SCHCU76J), Techniques chromatographiques avancées (SCHBU36J), Stratégies analytiques (SAECO7AJ), Spectroscopies optiques (SCHBU37J), Spectrométrie de masse et méthodes de couplages (SCHCU71J)
- **Master Physique** https://physique-sciences.univ-amu.fr/master-physique/parcours-physique
  Planetary Systems (S59PH3P42), Galaxy and Cosmology (S59PH3P43), Etoiles et Exoplanètes (S59PH2M06BIS), Observations Astronomiques (S59PH4P11)

Ecoles Doctorales concernées par la proposition d'institut :

- ED 62 : *Sciences de la vie et de la santé*
- ED 251 *Sciences de l'environnement*
- ED 352 : *Physique et Sciences de la Matière*
- ED 250 : *Sciences Chimiques*
- ED 536 : *Agrosciences et sciences*
- ED 536 : *Cognition, langage, éducation*