



INSTITUT DE FRANCE
Académie des sciences

Comptes Rendus

Physique

Anne-Marie Lagrange and Daniel Rouan

Exoplanets: Foreword


Volume 24, Special Issue S2 (2023), p. 3-10

Online since: 17 January 2024

Part of Special Issue: Exoplanets

Guest editors: Anne-Marie Lagrange (LESIA, Observatoire de Paris, Université PSL, CNRS, Sorbonne Université, Sorbonne Paris Cité, 5 place Jules Janssen, 92195 Meudon, France.) and Daniel Rouan (LESIA, Observatoire de Paris, Université PSL, CNRS, Sorbonne Université, Sorbonne Paris Cité, 5 place Jules Janssen, 92195 Meudon, France.)

<https://doi.org/10.5802/crphys.163>

 This article is licensed under the
CREATIVE COMMONS ATTRIBUTION 4.0 INTERNATIONAL LICENSE.
<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



*The Comptes Rendus. Physique are a member of the
Mersenne Center for open scientific publishing*
www.centre-mersenne.org — e-ISSN : 1878-1535



Exoplanets / *Exoplanètes*

Exoplanets: Foreword

Exoplanètes : Avant-propos

Anne-Marie Lagrange^{Ⓢ,*,^a} and Daniel Rouan^{Ⓢ,^a}

^a LESIA, Observatoire de Paris, Université PSL, CNRS, Sorbonne Université, Sorbonne
Paris Cité, 5 place Jules Janssen, 92195 Meudon, France
E-mail: anne-marie.lagrange@obspm.fr (A.-M. Lagrange)

Manuscript received 18 July 2023, accepted 2 October 2023.

La version française suit la version anglaise

Centuries ago, Epicurus conjectured that other worlds were “unlimited in numbers” and diverse, either similar to our world, or different. Conversely, Plato or Aristotle did not believe in the existence of other worlds. It is worth noticing, however, that those famous scholars did not share a common definition of a “world”. The lack of key observational and conceptual tools made the question essentially an abstract and speculative realm, never remote from religious and philosophical concerns. In any case, the geocentric model of the world inherited from Hipparchus and Ptolemy did not invite to envision the existence of other worlds as we may think of today. This situation remained unchanged during more than 13 centuries, until Copernicus finally proposed the heliocentric vision that profoundly changed our conception of the world, and allowed the development of modern astronomy and physics. Galileo opened new windows for the observation of celestial objects, Kepler described the motion of solar system planets around the sun, Newton formalized the basics of gravitational physics. Descartes, Swedenborg, Kant, Buffon, Laplace proposed first theories of the formation of the solar system in the 18th century. At that time, the question of the existence of other worlds could finally be addressed from a scientific point of view. Observing of exoplanets remained, however, impossible for centuries because of technical limitations. Indeed, exoplanets are so faint and angularly so close to their parent stars, even for our closest neighbors, that imaging them was not possible until the present century, when innovative technologies such as adaptive optics and coronagraphy became available (see Chauvin, this special issue; Galicher, this special issue; Lacour, this special issue). This explains why, in the 1950s, astronomers started to design other ways to detect planets, that we call today indirect techniques. Instead of looking for the tiny signal sent by exoplanets, they proposed to look for signatures that planets could imprint on to their parent stars. In particular, according to Kepler’s laws, both the star and the planets move around

*Corresponding author

their common center of mass. One idea was to detect the small motion of the star in the plane of the sky induced by its planets (astrometric method; see Sozzetti, this special issue). Another idea was to detect the small variations of the star velocity, along the line of sight of an observer on Earth, induced by the orbiting planets (radial velocity method; see Moutou, this special issue; Mayor, this special issue). A third identified way to detect exoplanets was to monitor the star's light and detect the tiny variation due to a planet passing between the star and the observer (transit method). For all these methods, the imprint of the exoplanet signal is very small, which translates into highly demanding instrumental capabilities that were addressed in the next decades. It is remarkable that, despite notable false alarms, such as the announced astrometric discovery of planets around Barnard's star in the 60s, the three methods proved to be fruitful before the turn of the last century. More sophisticated ways were identified later, including the amplification of the light of a background star when crossing the source line of sight (microlensing method; see Beaulieu, this special issue). All these techniques are used today. As each of them only allows for a limited exploration of the exoplanet parameter space, all are needed to get a full picture of the diversity of exoplanetary systems.

Before the nineties, astronomers expected exoplanetary systems to be more or less similar to our solar system, with small-size, rocky planets orbiting within their inner regions, and giant planets orbiting outwards. Therefore, they mainly searched for planets similar to Jupiter, which, among the solar system planets, would induce the strongest imprint on the Sun signals if the later was seen as a neighbor star. It has been a surprise for everyone that the very first planets discovered were radically different from any of the solar system planets: two planets with masses of about 3 Earth masses were found around a pulsar and a 0.5 Jupiter-mass (min. mass) planet was detected at 0.05 au from its parent star 51 Pegasus, which is a hundred times closer than Jupiter to the Sun. The existence of planets around pulsars or very close-in gaseous giant planets (so called Hot Jupiters) had not been anticipated. A decade later, super massive giants have been imaged orbiting at hundreds of au, well beyond the orbit of our solar system planets. Such bodies were also unexpected, and called for new modeling to explain their formation processes. Studying the formation and early evolution of exoplanets, from the collapse of molecular clouds to fully built systems with planets, asteroids, comets (Lecavelier, this special issue), dust, has become a major field in exoplanetology. This fascinating area has been richly fed, in particular, by images of protoplanetary and debris disks (Boccaletti, this special issue) with high contrast imagers at various wavelengths. Finally, the interaction between Hot Jupiters and the central star (irradiation, tides, magnetic interactions; Strugarek, this special issue) has also been modeled and shown to explain some of the properties of these unexpected exoplanets.

Thirty years of intensive observations have allowed us to further explore the diversity of exoplanets, in terms of physical properties, as well as in terms of orbital properties.

The variety of exoplanets orbits is not limited to their distance to their parent stars. Exoplanets orbiting well above the star equatorial plan (the so-called miss-aligned planets), and retrograde planets have been detected. Finally, the architectures of the hundreds of multi-planetary systems discovered to date have nothing to do with that of our solar system and reveal a fascinating diversity.

The exoplanets mass, radius and densities happen to vary from one planet to the other, which indicates a diversity in exoplanets interiors. Their atmospheres, even though barely characterized so far, also reveal a diversity. The ~5000 exoplanets known today have allowed us to identify classes of planets that are not represented in the solar system. Two new classes are the Hot Jupiters and the remote super Jupiters mentioned above. Another, very intriguing one is the super-Earths and mini-Neptunes, which represent the most common type of planets in the inner systems detected so far. As their names suggest, these planets have masses between the Earth and Neptune masses, i.e. 1–17 Earth-mass; depending on their densities, they are either rocky or

metallic, with or without an extended gaseous envelope, or, alternatively, mostly gaseous. Some of them are also water-rich. Subsequent observations will help defining sub-classes among this fascinating population of exoplanets.

The variety of exoplanets physical and orbital properties has led us to admit that the processes that lead from the proto solar nebulae to our solar system planets, might not be universal. While accretion of gas on to a solid several Earth-masses core orbiting beyond the ice-line is the current paradigm to explain the formation of our solar system gas giants, disk gravitational instabilities could be working as well to form giant planets. Furthermore, the existence of Hot Jupiters, of misaligned or retrograde exoplanets, and of remote exoplanets indicates that additional dynamical processes such disk–planet or planet–planet interactions occur during or after planet formation and play a major role in building the final shape of the exoplanetary systems (Crida, this special issue). The increasing computational capabilities allows us today to simulate planetary systems formation, starting from disks composed of planet embryos, gas and dust, and considering an ever-growing number of physical processes to shape up the planets, and to account for planet–disk or planet–planet interactions. These population synthesis models generate planetary systems whose properties can ultimately be compared to the observations, to constrain formation process models. A detailed statistical comparison requires, though, knowing a large number of exoplanets around stars of given properties (mass, metallicity, age, etc).

Even though ~5000 exoplanets are known today, the diversity in terms of planets physical properties, systems architectures, and parent stars properties is not fully explored. In particular, Earth-mass planets orbiting at 1 au from sun-like star and beyond cannot be detected with the RV technique today because of stellar activity that produces noise in the RV data (Meunier, this special issue). Also, the population of Jupiter-mass planets and lighter giants orbiting beyond 5–10 au (i.e. at distances of the solar system giant planets) from mature stars is very poorly constrained by the RV technique; it is furthermore hardly accessible by the transit technique, nor by direct imaging (which is today sensitive only to young planets). As a consequence, it is not possible to tell whether the solar system as a whole is rare or not. Furthermore, some planets may be detected around peculiar classes of stars only. For instance, remote Jupiters have been detected mostly around young stars (typically younger than a few hundreds of Myr), while the bulk of RV or transiting planets have been detected around mature stars. Finally, planets lighter than the Earth have been found around cool stars, but they remain out of reach of current instruments when Sun-like stars are considered. All these limitations are due to the intrinsic properties of the stars (stellar noise) and/or to instrumental limitations.

The study of exoplanets atmospheres is a fascinating domain (Charnay *et al.*, this special issue). Our knowledge is still embryonic, despite a massive use of the Hubble Space Telescope or ground based over the last decades. The spectra of close-in planets indeed happen often featureless, due to the presence of hazes or clouds. Nonetheless, molecules such as CO, H₂O, CH₄, CO₂ as well as atomic species have been detected in the atmospheres of a few (~35) close-in exoplanets with transit spectroscopy. Molecular, atomic species, and clouds have also been identified in the atmospheres of young, supermassive remote Jupiters, combining direct imaging and spectroscopy. The recently launched James Webb Space Telescope (JWST) already showed its unique capabilities to characterize exoplanet atmospheres, and is expected to revolutionize this domain.

To further explore the parameter-space of exoplanets, new infrastructures and instruments are currently developed, with increased detection sensitivities thanks to larger apertures (Extremely Large Telescopes, ELTs) or to space observations that overcome the atmosphere effects (Nancy Roman Space Telescope, PLATO). Interestingly, the detection methods remain the same as those used in the past decades. Lighter exoplanets will be found, at various distances from their parent star. Indirect detection of super Earths or even Earth analogs around solar-type stars

will finally become possible, probably when combining several instruments such as PLATO and the ELTs. Imaging such planets will require extremely demanding instruments on the ELTs or new generations of space instruments, currently under study. The use of current infrastructures, such as 10m class telescopes and even smaller telescopes will, however, remain essential for preparatory study and/or the follow ups of ELTs or space telescopes observations.

Exoplanets characterization will rely again on spectroscopy with improved sensitivity on ground based (ELTs) or space (ARIEL) infrastructures. Innovative approaches are developed to increase the characterization capabilities.

A full characterization of the atmosphere of Earth analogs around solar-type stars may require new space projects such as HWO or LIFE, currently under study for the 2040+ horizon. As rocky exoplanets orbiting stars cooler than the Sun such as K or M stars are more easily accessible, a lot of efforts are currently spent to search for and study such exoplanets. It is expected that JWST, and the ELTs in particular, will allow major progresses in the investigation of the atmospheres of such exoplanets.

One major goal of exoplanetology is to search for life on rocky planets orbiting solar-type stars at distances comparable to the Earth. In such a region, somehow misleadingly called the Habitable Zone, liquid water could be present at the surface of the planet. This is driven by the fact that, on Earth (the only example we know of life-hosting planet), we think that water is needed to allow life to appear and thrive. It has to be noticed, though, that the development of life probably depends on more conditions that we have not fully captured so far. Also, we know from geology and paleontology that life on Earth has dramatically evolved over time.

Signatures of life (Mazevet *et al.*, this special issue) can be found only indirectly, studying the properties and chemical composition of the atmospheres of exoplanets as revealed by medium to high resolution spectroscopy, and comparing these properties with those of known atmospheres (Earth, Venus, Mars) or to outputs of theoretical models. Will we ever be able to claim that life is unquestionably present on a given planet, based on the knowledge of its mass, radius and its atmosphere and on the knowledge of its parent star and its fellow planets? Or, will the existence of life be based on statistical consideration based on a large number of exoplanets? The question is open. In any case, a lot has still to be done, in the search for suitable planets, and in the development of sophisticated models that take into account complex chemistry, geological and biotic activity.

Whatever the outcome of the search for life, understanding the formation and evolution of planetary systems, exploring their diversity, and understanding our origins is a fascinating goal, not only for exoplanetologists, but for all of humanity.

Version française

Il y a plusieurs dizaines de siècles, Épicure conjecture que les autres mondes sont « illimités en nombre » et divers, soit semblables à notre monde, soit différents. A l'inverse, Platon ou Aristote ne croient pas à l'existence d'autres mondes. Il convient toutefois de noter que ces savants/philosophes ne partageaient pas la même définition du terme « monde ». L'absence d'outils d'observation et de conceptualisation fait de cette question un domaine essentiellement abstrait et spéculatif, jamais éloigné des préoccupations religieuses et philosophiques. En tout état de cause, le modèle géocentrique du monde hérité d'Hipparque et de Ptolémée n'invite pas à envisager l'existence d'autres mondes tels que nous les concevons aujourd'hui. La situation reste inchangée pendant plus de 13 siècles, jusqu'à ce que Copernic mette le Soleil au centre du Monde. Cette vision profondément nouvelle, permet le développement de l'astronomie et de la physique modernes. Galilée ouvre de nouvelles fenêtres pour l'observation des objets célestes, Kepler décrit le mouvement des planètes du système solaire autour du soleil, Newton

formalise les bases de la physique gravitationnelle. Descartes, Swedenborg, Kant, Buffon, Laplace proposent les premières théories sur la formation du système solaire au 18^e siècle. À cette époque, la question de l'existence d'autres mondes peut enfin être abordée d'un point de vue scientifique.

L'observation des exoplanètes reste cependant impossible pendant des siècles en raison de limitations techniques. En effet, les exoplanètes sont si peu lumineuses et angulairement si près de leurs étoiles parentes, même pour nos voisines les plus proches, qu'il ne sera pas possible de les imager avant le siècle actuel, lorsque des technologies innovantes telles que l'optique adaptative et la coronagraphie sont devenues disponibles (voir Chauvin, ce numéro spécial; Galicher, ce numéro spécial; Lacour, ce numéro spécial). Cela explique pourquoi, dans les années 1950, les astronomes conçoivent d'autres méthodes de détection des planètes, que l'on appelle aujourd'hui des techniques indirectes. Au lieu de rechercher le très faible signal envoyé par les exoplanètes, il s'agit de détecter les signatures que les planètes peuvent imprimer à leurs étoiles parentes. En particulier, selon les lois de Kepler, l'étoile et les planètes se déplacent autour de leur centre de masse commun. L'une des idées est de détecter le petit mouvement de l'étoile dans le plan du ciel induit par la ou les planètes qu'elle abrite (méthode astrométrique; voir Sozzetti, ce numéro spécial). Une autre idée consiste à détecter les petites variations de la vitesse de l'étoile, le long de la ligne de visée d'un observateur sur Terre, induites par les planètes en orbite (méthode des vitesses radiales, notée VR dans la suite; voir Moutou, ce numéro spécial; Mayor, ce numéro spécial). Une troisième méthode consiste à surveiller la lumière de l'étoile et à détecter l'infime variation due au passage d'une planète entre l'étoile et l'observateur (méthode du transit).

Pour toutes ces méthodes, l'empreinte du signal de l'exoplanète est très faible, ce qui se traduit par des capacités instrumentales très exigeantes qui ont pu être atteintes au cours des décennies suivantes. Il est remarquable qu'en dépit de fausses alertes notables, comme la découverte astrométrique annoncée de planètes autour de l'étoile de Barnard dans les années 60, les trois méthodes se soient révélées fructueuses avant le début du siècle dernier. D'autres méthodes sont identifiées par la suite, notamment l'amplification de la lumière d'une étoile de fond lorsqu'elle croise la ligne de visée de la source (méthode des microlentilles; voir Beaulieu, ce numéro spécial). Toutes ces techniques restent utilisées aujourd'hui. Chacune d'entre elles ne permettant qu'une exploration limitée de l'espace des propriétés possibles des exoplanètes (masse, paramètres orbitaux), toutes sont nécessaires pour appréhender la diversité des systèmes exoplanétaires.

Avant les années 90, les astronomes s'attendaient à ce que les systèmes exoplanétaires soient plus ou moins similaires à notre système solaire, avec des planètes rocheuses de petite taille en orbite dans leurs régions internes, et des planètes géantes en orbite à l'extérieur. C'est pourquoi ils ont principalement recherché des planètes similaires à Jupiter, qui, parmi les planètes du système solaire, induirait l'empreinte la plus forte sur les signaux du Soleil si ce dernier était considéré comme une étoile voisine. Cependant, les toutes premières planètes découvertes dans les années 90 sont radicalement différentes des planètes du système solaire : deux planètes d'une masse d'environ 3 masses terrestres sont découvertes autour d'un pulsar et une planète d'une masse de 0,5 Jupiter (masse minimale) est détectée autour de 51 Pegasus à 0,05 unité astronomique (UA), soit cent fois plus proche que Jupiter du Soleil. L'existence de planètes autour de pulsars ou de planètes géantes gazeuses très proches (appelées Jupiters chauds) n'avait pas été anticipée. Dix ans plus tard, des géantes super massives sont imagées en orbite à des centaines d'UA, bien au-delà de l'orbite des planètes connues de notre système solaire. Une formation in situ de ces planètes proches et lointaines n'est pas envisageable par les processus qui ont mené, pense-t-on, à la formation des géantes du système solaire. L'étude de la formation et de l'évolution précoce des exoplanètes, depuis l'effondrement des nuages moléculaires jusqu'aux systèmes entièrement construits avec des planètes, des astéroïdes, des comètes (Lecavelier, ce

numéro spécial), des poussières, est ainsi devenue un domaine majeur de l'exoplanétologie. Ce domaine fascinant a été richement alimenté, en particulier, par des images de disques protoplanétaires et de disques de débris (Boccaletti, ce numéro spécial) avec des imageurs à haut contraste à différentes longueurs d'onde. Enfin, l'interaction entre les Jupiters chauds et l'étoile centrale (irradiation, marées, interactions magnétiques; Strugarek, ce numéro spécial) a également été modélisée et a permis d'expliquer certaines des propriétés de ces exoplanètes inattendues.

Trente années d'observations intensives nous ont permis d'explorer plus avant la diversité des exoplanètes, tant en termes de propriétés physiques que de propriétés orbitales.

La variété des orbites des exoplanètes n'est pas limitée à la distance qui les sépare de leur étoile mère. Des exoplanètes orbitant bien au-dessus du plan équatorial de l'étoile (les planètes mal alignées) et des planètes rétrogrades ont été détectées. Enfin, les architectures des centaines de systèmes multi-planétaires découverts à ce jour n'ont rien à voir avec celle de notre système solaire et révèlent une diversité fascinante.

La masse, le rayon et la densité des exoplanètes varient d'une planète à l'autre, ce qui indique une diversité de structures internes des exoplanètes. Leurs atmosphères, bien que peu explorées encore, révèlent également une grande diversité.

Les quelque 5000 exoplanètes connues aujourd'hui nous ont permis d'identifier des classes de planètes qui ne sont pas représentées dans le système solaire. Deux nouvelles classes sont les Jupiters chauds et les super Jupiters éloignés mentionnés ci-dessus. Une autre, très intrigante, est celle des super-Terres et des mini-Neptunes, qui représentent le type de planètes le plus courant dans les systèmes internes détectés jusqu'à présent. Comme leur nom l'indique, ces planètes ont une masse comprise entre celle de la Terre et celle de Neptune, c'est-à-dire entre 1 et 17 masses terrestres; en fonction de leur densité, elles sont soit rocheuses, soit métalliques, avec ou sans enveloppe gazeuse étendue, ou encore essentiellement gazeuses. Certaines d'entre elles sont également riches en eau. Des observations ultérieures permettront de définir des sous-classes parmi cette population fascinante d'exoplanètes.

La variété des propriétés physiques et orbitales des exoplanètes nous a amenés à admettre que les processus qui conduisent des nébuleuses protosolaires aux planètes de notre système solaire ne sont peut-être aussi divers. Alors que l'accrétion de gaz sur un noyau solide de plusieurs masses terrestres en orbite au-delà de la ligne de démarcation dite ligne des glaces est le paradigme actuel pour expliquer la formation des géantes gazeuses de notre système solaire, des instabilités gravitationnelles dans le disque protoplanétaire pourraient également être à l'origine de la formation de planètes géantes. En outre, l'existence de Jupiters chauds, d'exoplanètes non alignées ou rétrogrades et d'exoplanètes lointaines indique que des processus dynamiques supplémentaires tels que des interactions disque-planète ou planète-planète se produisent pendant ou après la formation de la planète et jouent un rôle majeur dans la construction de l'architecture finale des systèmes exoplanétaires (Crida, ce numéro spécial). L'augmentation des capacités de calcul nous permet aujourd'hui de simuler la formation de systèmes planétaires, en partant de disques composés d'embryons de planètes, de gaz et de poussières, en tenant compte d'un nombre toujours croissant de processus physiques pour rendre compte des interactions planète-disque ou planète-planète. Ces modèles de synthèse de population génèrent des systèmes planétaires dont les propriétés peuvent finalement être comparées aux observations, afin de contraindre les modèles de processus de formation. Une comparaison statistique détaillée nécessite cependant de connaître un très grand nombre d'exoplanètes autour d'étoiles ayant des propriétés données (masse, métallicité, âge, etc.).

Bien que près de 5500 exoplanètes soient connues aujourd'hui, la diversité en termes de propriétés physiques des planètes, d'architectures des systèmes et de propriétés des étoiles parentes n'est pas entièrement explorée. En particulier, les planètes de masse terrestre orbitant

à 1 au d'une étoile semblable au soleil et au-delà ne peuvent pas être détectées aujourd'hui avec la technique de VR en raison de l'activité stellaire qui produit du bruit dans ce type de données de VR (Meunier, ce numéro spécial). De même, la population de planètes de masse Jupiter et de géantes plus légères orbitant au-delà de 5–10 au (c'est-à-dire à des distances de planètes géantes du système solaire) des étoiles matures est très mal contrainte par la technique VR; elle est en outre difficilement accessible par la technique du transit, ou par l'imagerie directe (qui n'est aujourd'hui sensible qu'aux jeunes planètes). En conséquence, il n'est pas possible de dire aujourd'hui si le système solaire dans son ensemble est rare ou non. En outre, certaines planètes ne peuvent être détectées qu'autour de classes particulières d'étoiles. Par exemple, les Jupiters éloignés ont été détectés principalement autour d'étoiles jeunes (typiquement plus jeunes que quelques centaines de millions d'années), alors que la plupart des planètes VR ou des planètes en transit ont été détectées autour d'étoiles matures. Enfin, des planètes plus légères que la Terre ont été trouvées autour d'étoiles froides, mais de telles planètes qui orbiteraient cette fois autour d'étoiles semblables au Soleil restent hors de portée des instruments actuels. Toutes ces limitations sont dues aux propriétés intrinsèques des étoiles (bruit stellaire) et/ou aux limitations instrumentales.

L'étude des atmosphères des exoplanètes est un domaine fascinant (Charnay *et al.*, ce numéro spécial). Nos connaissances sont encore embryonnaires, malgré une utilisation massive du télescope spatial Hubble ou d'observatoires au sol au cours des dernières décennies. Les spectres des planètes proches sont en effet souvent dépourvus de caractéristiques, en raison de la présence de brumes ou de nuages. Néanmoins, des molécules telles que CO, H₂O, CH₄, CO₂ ainsi que des espèces atomiques ont été détectées dans les atmosphères de quelques (~35) exoplanètes proches grâce à la spectroscopie de transit. Des espèces moléculaires, atomiques et des nuages ont également été identifiés dans l'atmosphère de jeunes Jupiters supermassifs éloignés, en combinant l'imagerie directe et la spectroscopie. Le télescope spatial James Webb (JWST), récemment lancé, a déjà montré ses capacités uniques à caractériser les atmosphères des exoplanètes et devrait révolutionner ce domaine.

Pour explorer davantage l'espace des paramètres des exoplanètes, de nouvelles infrastructures et de nouveaux instruments sont actuellement développés, avec des sensibilités de détection accrues grâce à des ouvertures plus grandes (Extremely Large Telescopes ou ELT) ou à des observations spatiales qui ne subissent pas les effets de l'atmosphère (télescope spatial Nancy Roman, PLATO). Il est intéressant de noter que les méthodes de détection restent les mêmes que celles utilisées au cours des dernières décennies. Des exoplanètes plus légères seront trouvées, à différentes distances de leur étoile mère. La détection indirecte de super-Terres autour d'étoiles de type solaire deviendra enfin possible, probablement en combinant plusieurs instruments tels que PLATO et les télescopes au sol. L'imagerie de telles planètes nécessitera des instruments extrêmement exigeants sur les ELT ou de nouvelles générations d'instruments spatiaux actuellement à l'étude. L'utilisation des infrastructures actuelles, telles que les télescopes de la classe des 10 m et même des télescopes plus petits, restera cependant essentielle pour les études préparatoires et/ou le suivi des observations des télescopes géants au sol ou des télescopes spatiaux.

La caractérisation des exoplanètes reposera à nouveau sur la spectroscopie avec une sensibilité améliorée sur les infrastructures terrestres (ELTs) ou spatiales (ARIEL). Des approches innovantes sont développées pour augmenter ces capacités.

Une caractérisation complète de l'atmosphère des jumelles de la Terre (planètes rocheuses en orbite autour d'étoiles de type solaire à des distances comparables à celle de la Terre) pourrait nécessiter de nouveaux projets spatiaux tels que l'Habitable World Observatory (HWO, NASA) ou LIFE (ESA), actuellement à l'étude pour l'horizon 2040+. Les exoplanètes rocheuses en orbite autour d'étoiles plus froides que le Soleil, telles que les étoiles K ou M, étant plus facilement

accessibles, beaucoup d'efforts sont actuellement consacrés à la recherche et à l'étude de ces exoplanètes. On s'attend à ce que le JWST et les ELT permettent des avancées majeures dans l'étude de l'atmosphère de ces exoplanètes.

L'un des principaux objectifs de l'exoplanétologie est la recherche de la vie sur des jumelles de la Terre. Dans une région autour d'une étoile, appelée, à tort, zone habitable, de l'eau liquide pourrait être présente à la surface de la planète. Ce terme s'explique par le fait que, sur la Terre (le seul exemple que nous connaissions de planète abritant la vie), nous pensons que l'eau liquide est nécessaire pour permettre à la vie d'apparaître et de se développer. La recherche de planètes dans de telles régions est l'objet de recherches intensives. Il convient toutefois de noter que le développement de la vie dépend probablement d'autres conditions que nous n'avons pas encore totalement appréhendées. Par ailleurs, la géologie et la paléontologie nous apprennent que la vie sur Terre a évolué de façon importante au fil du temps.

Les signes de vie (Mazevet *et al.*, ce numéro spécial) ne peuvent être trouvés qu'indirectement, en étudiant les propriétés et la composition chimique des atmosphères des exoplanètes telles qu'elles sont révélées par la spectroscopie à moyenne et haute résolution, et en comparant ces propriétés avec celles des atmosphères connues (Terre, Vénus, Mars) ou avec les résultats des modèles théoriques. Pourrons-nous un jour affirmer que la vie est incontestablement présente sur une planète donnée, sur la base de la connaissance de sa masse, de son rayon et de son atmosphère, ainsi que de la connaissance de son étoile parente et de ses autres planètes? Ou bien l'existence de la vie reposera-t-elle sur des résultats statistiques basées sur un grand nombre d'exoplanètes? La question est ouverte. Quoi qu'il en soit, beaucoup reste à faire dans la recherche des systèmes et des planètes adéquates et dans le développement de modèles sophistiqués qui tiennent compte de la complexité de la chimie et de l'activité géologique et biotique.

Quelle que soit l'issue de la recherche de la vie, comprendre la formation et l'évolution des systèmes planétaires, explorer leur diversité et comprendre nos origines est un objectif fascinant, non seulement pour les exoplanétologues, mais pour l'ensemble de l'humanité.