

PRN

LA MOISSON DE «PLANETS»

APRÈS DOUZE ANS D'ACTIVITÉ, **LES PÔLES NATIONAUX DE RECHERCHE PLANETS ET SWISSMAP** SE SONT TERMINÉS CETTE ANNÉE. RETOUR SUR CES PROGRAMMES CENTRÉS SUR LES EXOPLANÈTES ET LA PHYSIQUE MATHÉMATIQUE.

Dossier réalisé par Anton Vos et Vincent Monnet

Toutes les images de ce dossier (y compris celle de couverture) sont tirées de l'exposition **Exoplanètes – Art, Science & Fiction** créée en 2023 dans le cadre des 250 ans de l'Observatoire de Genève. Les posters ont été dessinés par des artistes confirmés et des étudiants de l'École supérieure de bande dessinée et d'illustration de Genève.

Cette image, «**In Search for the Lost World of Kepler-444**», a été réalisée par Richard Holzer.

Kepler-444 est un système d'étoiles triple. Son étoile primaire est une naine orange qui possède au moins cinq exoplanètes confirmées. Elle est accompagnée de deux naines rouges qui tournent l'une autour de l'autre.



LES AUTRES MONDES

PLANETS A DOPÉ LA RECHERCHE SUISSE SUR LES EXOPLANÈTES

DURANT DOUZE ANS, LE PÔLE DE RECHERCHE NATIONAL PLANETS A RÉUSSI À **FÉDÉRER DES ASTRONOMES** AUTOUR DE LA DÉTECTION ET DE LA COMPRÉHENSION DE SYSTÈMES PLANÉTAIRES QUI ONT CONNU UNE INFINITÉ DE DESTINS DIFFÉRENTS DE CELUI DU SYSTÈME SOLAIRE.



Stéphane Udry

Professeur au Département d'astronomie de la Faculté des sciences

Formation: Après des études de physique, il obtient en 1992 son doctorat à l'Université de Genève. Il poursuit avec un séjour postdoctoral de deux ans à la Rutgers University, dans le New Jersey (États-Unis).

Parcours: Il rejoint, en 1994, le groupe de Michel Mayor à l'UNIGE et, en 2007, est nommé professeur au Département d'astronomie (Faculté des sciences). Entre 2010 et 2019, il est directeur de l'Observatoire de Genève, succédant à Michel Mayor. En 2014, il devient codirecteur du Pôle de recherche national PlanetS.

Après douze ans de fonctionnement, le Pôle de recherche national (PRN) PlanetS, dédié à l'étude des planètes tournant autour d'autres étoiles que le Soleil, a fermé ses portes au printemps. L'Université de Genève et ses partenaires en ressortent confortés dans leur position de leader mondial dans cette discipline, une position acquise dès 1995 avec la découverte de la première planète extrasolaire, ou exoplanète, par Michel Mayor et Didier Queloz, alors professeur et chercheur au Département d'astronomie (Faculté des sciences), récompensée par le Prix Nobel de physique en 2019. Grâce au développement d'instruments de mesure au sol comme dans l'espace toujours plus performants, le nombre de découvertes d'autres mondes a depuis continué à croître tout comme s'est affinée la compréhension théorique de la formation de ces systèmes planétaires qui se révèlent, pour la plupart, très différents du Système solaire. La détection d'une sœur jumelle de la Terre (même taille, même type d'étoile, même distance de l'astre...) n'a cependant pas encore eu lieu à ce jour. Mais cela pourrait arriver dans la prochaine décennie avec la mise en œuvre de télescopes et de satellites encore plus précis. Entretien avec Stéphane Udry, professeur au Département d'astronomie et codirecteur du PRN PlanetS.

Campus: Le Pôle de recherche national PlanetS s'est officiellement terminé le 31 mai dernier.

Quel bilan en tirez-vous?

Stéphane Udry: Au cours des douze ans qu'a duré le programme, le nombre de professeurs actifs dans le domaine de l'astronomie en Suisse a doublé. Dans le domaine des sciences planétaires, grâce à PlanetS, notre communauté a atteint une masse critique et a développé une culture de collaboration beaucoup plus profonde qu'auparavant entre les membres des quatre instituts membres, soit les universités de Genève, de Berne et de Zurich, ainsi que l'École polytechnique fédérale de Zurich. Désormais, quand nous nous lançons dans un nouveau projet scientifique, nous cherchons d'abord à rallier des partenaires en Suisse avant de nous tourner vers l'extérieur. Nous avons aussi considérablement gagné en crédibilité. Notre

voix compte davantage auprès des décideurs et des financeurs de la recherche scientifique, tant au niveau national qu'europpéen. Nous avons d'ailleurs raffermi notre position de référence mondiale, que ce soit en matière de conception d'instruments de mesure, comme les spectrographes à haute résolution et les satellites d'observation tels que Cheops (*lire aussi l'article en page 28*), de détection et de la caractérisation des exoplanètes ou encore de modélisation de l'évolution des systèmes planétaires. De manière générale, l'attractivité des groupes membres du PRN PlanetS, et en particulier ceux de l'Observatoire de Genève, a décuplé.

Est-ce que le Prix Nobel de Michel Mayor et Didier Queloz y est pour quelque chose?

Cette distinction majeure a bien sûr contribué à notre rayonnement, surtout auprès du grand public. Pour les professionnels de la branche, ce Prix Nobel est venu confirmer la qualité de notre travail. Et c'est grâce à cette réputation, qui s'est encore accrue depuis, que des groupes étrangers, qui ne sont pas nos partenaires habituels, se tournent désormais spontanément vers nous pour obtenir notre collaboration et profiter de notre expérience.

Quels autres accomplissements durables pouvez-vous mettre sur le compte de PlanetS?

On peut citer la construction à l'Observatoire de Genève du bâtiment de l'AstroTech et surtout de la salle blanche qu'il abrite, une des plus grandes de Suisse. C'est là qu'a été assemblé le dernier spectrographe en date, Espresso, monté sur le Very Large Telescope (VLT) au Chili et qui est aujourd'hui l'instrument le plus précis au monde pour la mesure des vitesses stellaires radiales. Il a été récemment suivi par le développement du spectrographe, Ristretto, qui doit être, lui aussi, installé sur le VLT en 2030 (*lire l'encadré en page 21*). Nous planifions également dans la salle blanche d'AstroTech l'intégration de l'un des modules du futur spectrographe Andes qui doit être installé au début de la prochaine décennie sur l'Extremely Large Telescope (ELT) de 40 mètres actuellement en construction au Chili. Par ailleurs, le Pôle a



«On the Origins
of Life and Meaning»,
par Pedro Suassuna.

aussi débouché sur la création en 2021 du Centre pour la vie dans l'Univers, au sein duquel des astronomes, des physiciens, des biologistes, des chimistes, des géologues et des climatologues travaillent ensemble (*lire également l'article en page 24*). Enfin, nous avons réussi à rapprocher les spécialistes des planètes extrasolaires de ceux du Système solaire. Ce dont nous ne sommes pas peu fiers.

N'était-ce pas déjà le cas?

Avant le PRN, ces deux communautés se parlaient curieusement assez peu. Il faut dire que pour le Système solaire, il existe des mesures très précises de toutes les planètes. Grâce aux observations et aux différentes missions spatiales, on connaît la composition isotopique des voisins de la Terre et on possède une idée assez précise de leur atmosphère et

de leur structure interne. Sur les exoplanètes, par contre, nous ne disposons que d'un petit signal lumineux de l'étoile qui les héberge et dont les légères variations spectrales ou d'intensité peuvent renseigner sur la présence d'un ou de plusieurs compagnons et donner accès à une mesure de leur masse et de leur rayon. Il faut préciser aussi que le Système solaire n'est qu'un exemple unique parmi la diversité spectaculaire des systèmes extrasolaires détectés à ce jour – on en connaît désormais plus de 4500. Les modèles théoriques sur lesquels planchent les spécialistes du premier ou des seconds ne sont pas les mêmes. Dans le cadre du PRN, nous avons néanmoins financé des projets conjoints afin de faire travailler ces deux communautés ensemble. Et cette stratégie a très bien fonctionné, à l'image d'une étude portant sur la simulation de l'agglomération de poussières,

LA DOULOUREUSE NAISSANCE DE PLANETS

Les universités de Genève et de Berne ont dû s'y reprendre à trois reprises avant de décrocher un Pôle de recherche national (PRN) sur les exoplanètes.

2001: On leur reproche de faire de la science-fiction.

2009: Le projet arrive dans les 13 derniers candidats, mais sans être retenu.

2013: PlanetS passe enfin la rampe auprès de la Confédération. Le PRN est codirigé par les universités de Genève et de Berne. L'Université et l'École polytechnique fédérale de Zurich sont partenaires.



«Planets With Two Suns», par Clémence Mathenet.

c'est-à-dire la première étape de la formation des planètes, qui a obtenu des résultats probants grâce à l'apport des spécialistes du Système solaire.

La science des exoplanètes a-t-elle gagné en attractivité auprès des étudiants?

Le PRN a permis de développer un environnement unique pour les jeunes chercheurs qui peuvent trouver en Suisse tous les aspects des sciences planétaires. Nous avons créé en 2019 à l'Université de Genève une maîtrise universitaire en astrophysique avec une emphase spécifique sur l'exoplanétologie, la première de ce type en Suisse. L'Université de Berne, de son côté, est sur le point de lancer sa propre maîtrise universitaire, plus orientée vers l'ingénierie spatiale, qui est son point fort. L'Université de Zurich a fondé l'UZH Space Hub en 2018, dédié à la recherche dans le domaine du spatial et de l'aéronautique, tandis que l'École polytechnique fédérale de Zurich a, de son côté, engagé l'ancien numéro 2 de la NASA, Thomas Zurbuchen, pour diriger ETH Zurich Space, une structure active dans la

recherche spatiale et l'observation terrestre. Bref, chaque partenaire du PRN PlanetS a sa propre spécialité et nous échangeons nos professeurs au gré des besoins des différentes formations. Pour les candidats au doctorat, nous avons offert la possibilité d'effectuer des thèses conjointes. Le doctorant peut ainsi partager ses quatre années de thèse entre deux institutions. Une manière de tisser de nouveaux liens qui, on l'espère, perdureront. Un autre aménagement que nous aimerions conserver, et qui permet de faciliter la transition du monde académique à celui du privé, est l'*externship*. Ce dernier permet aux doctorants de passer trois mois dans une entreprise privée pour travailler sur un projet qui intéresse les deux parties et qui est financé par des fonds externes. Une dizaine ont saisi cette opportunité et 90% d'entre eux ont été engagés par l'entreprise où ils ont réalisé leur stage.

Avez-vous un exemple?

L'un de mes étudiants, Lokesh Mishra, a travaillé chez IBM à Zurich sur un projet visant à convertir en un format informatique unique tous les documents destinés à entraîner les grands modèles de langages tels que ChatGPT et consorts. Il se trouve que ce format (*docling*) a même fini par s'imposer comme la norme dans le monde entier. Lokesh Mishra a ensuite été engagé par IBM avant d'être débauché par une start-up active dans l'intelligence artificielle (Mentiora AI) dont il est devenu un des responsables AI (Chief AI Officer).

Que restera-t-il de PlanetS après sa disparition?

Il était convenu dès le départ que nous devions monter une structure qui survive à la fin du financement par le Fonds national suisse. Ce sera le Swiss Institute for Planetary Sciences (SIPS), une association tenue par les quatre partenaires fondateurs. Il sera dirigé par Ravit Helled, professeure au Département d'astrophysique à l'Université de Zurich, très active dans la modélisation de la structure interne des planètes. L'objectif du SIPS est de permettre aux chercheurs actifs dans les sciences planétaires de continuer à collaborer en partageant infrastructures, données, connaissances et expertise technique tout en formant une force politique reconnue capable d'influer sur la direction de la recherche et de lever des fonds externes. L'Université de Genève et ses trois partenaires fourniront au SIPS des ressources comme du temps de travail de chercheurs et de techniciens, du matériel et des locaux, même si ceux-ci sont dispersés dans le pays. Un budget initial de l'ordre de 120 000 francs par an permettra de maintenir le fonctionnement des plateformes mises sur pied au sein de PlanetS. Ces plateformes sont dédiées au développement technologique et à l'innovation (TIP), à la promotion des carrières académiques (Academic), au soutien de projets d'envergure

nationale à l'image de l'exploitation scientifique du satellite suisse Cheops (Flagships) et à la visualisation, l'échange et l'analyse des données sur les exoplanètes (Dace, *lire aussi l'article en page 32*). Deux autres plateformes sont dédiées à la communication et au support stratégique et scientifique.

Un nouvel engouement émerge pour des missions vers la Lune et Mars. Cette tendance, à laquelle se rallient les grandes agences spatiales, risque-t-elle de détourner des fonds de la recherche astronomique et en particulier des exoplanètes?

Aux États-Unis, peut-être, mais pas vraiment en Europe. De manière générale, le secteur du spatial est considéré comme stratégique et c'est le cas également en Suisse. Les satellites assurent des services de géolocalisation et de télécommunication absolument essentiels au fonctionnement de la société. Il convient donc d'entretenir l'image positive du spatial auprès du grand public. Cela passe certes par l'exploration, d'où l'insistance des autorités fédérales à promouvoir la candidature du Suisse Marco Sieber, sélectionné par l'Agence spatiale européenne (ESA) en novembre 2022 pour faire partie du corps européen des astronautes. Mais cela passe aussi par les résultats scientifiques de l'astronomie, en particulier en exoplanétologie, un domaine porteur et qui est plutôt de notre ressort. Autrement dit, les décisions américaines autour du programme Artemis de la NASA pour accélérer le retour sur la Lune, auquel participent l'Europe et la Suisse, ne mettront pas en péril le financement de nos activités. Ce qui nous préoccupe beaucoup plus, c'est le rapport que le groupe d'experts présidé par Serge Gaillard a soumis au Conseil fédéral en septembre 2024 et qui préconise de couper à hauteur de 10% les financements au niveau de la formation et de la recherche, incluant l'enveloppe du Fonds national suisse de la recherche et les activités spatiales en Suisse.

En matière de chasse aux exoplanètes, avez-vous mis à profit ces douze ans pour découvrir une autre Terre?

À l'heure actuelle, aucune sœur jumelle de la Terre, c'est-à-dire une exo-Terre tournant autour d'une étoile de type solaire dans ce qu'on appelle la zone habitable (dont la distance de l'astre est telle que l'eau peut se trouver à l'état liquide à la surface de la planète), n'a été découverte. Les instruments actuels ne permettent pas d'en détecter une avec certitude. Cela est dû à la faible masse d'une telle exoplanète par rapport à celle de son étoile mais aussi à la période de révolution, longue d'un an et qui exige une observation continue d'au moins cette durée. Il n'en reste pas moins que les progrès vers cet objectif sont fulgurants. Et la vision qu'ont les scientifiques des exoplanètes a radicalement changé en très peu de temps.

AU-DESSUS DU PÔLE PLANENT MICHEL MAYOR ET DIDIER QUELOZ



Comme une cerise sur le gâteau, il est tombé au beau milieu du Pôle national de recherche PlanetS. Le Prix Nobel de physique a en effet été décerné en 2019 à Michel Mayor et Didier Queloz, alors professeurs respectivement au Département d'astronomie et à l'Université de Cambridge, pour la découverte, en 1995, de la première planète extrasolaire, 51 Peg b. La nouvelle prend alors tout le monde par surprise – en vingt-quatre ans, de l'eau a coulé sous les ponts et les principaux intéressés n'y croient plus. D'ailleurs, quand la fameuse découverte est annoncée, le 6 octobre 1995 lors d'une conférence à Florence, puis dans la revue *Nature* du 23 novembre 1995, personne n'y croit non plus. Les tentatives pour détecter une planète comme Jupiter – c'est-à-dire assez grosse pour être facilement mesurable – se sont en effet toutes soldées par des échecs. Les astronomes de l'époque pensent que ces objets se trouvent loin de leur étoile et lui tournent autour en plusieurs années, à l'instar des géantes gazeuses du Système solaire. Les points de mesure sont donc très espacés dans le temps. Michel Mayor et son doctorant Didier Queloz, eux, ne cherchent

pas seulement des planètes autour d'autres Soleils mais aussi des naines brunes, des mini-étoiles trop petites pour enclencher la fusion nucléaire en leur cœur. Sans a priori sur les périodes de révolution, ils effectuent des mesures beaucoup plus rapprochées. Ce sont cette stratégie et, surtout, leur nouvel instrument équipé d'un système informatique plus performant que celui des équipes concurrentes qui assurent leur réussite. Cet instrument est le spectrographe Élodie. Entièrement fabriqué à l'Observatoire de Genève et monté sur le télescope de l'Observatoire de Haute-Provence, cet instrument est conçu pour mesurer les variations de la vitesse radiale des étoiles, ce qui permet de déterminer la présence d'une planète. Après plusieurs mois d'observation, un compagnon est enfin détecté autour de l'étoile 51 Peg. Gigantesque surprise: l'exoplanète a une masse qui vaut la moitié de celle de Jupiter, elle est 20 fois plus proche de son astre que la Terre du Soleil et elle lui tourne autour en seulement 4,2 jours. Un scénario très loin de ce qui était attendu. Dès cet instant, la chasse aux exoplanètes s'est ouverte et ne s'est plus jamais arrêtée.

Planets en chiffres

48,4 millions

le montant en francs du financement du Fonds national pour la recherche.

12 ans

la durée du programme, du 1^{er} juin 2014 au 31 mai 2026.

490

le nombre de scientifiques engagés dans le programme.

112

le nombre de doctorantes et doctorants ayant obtenu une thèse.

18 à 42%

l'évolution de la proportion des doctorantes entre 2014 et 2024.

14 à 30%

l'évolution de la proportion de femmes responsables de projet en douze ans.

1250

le nombre de publications scientifiques issues du Pôle.

1

le nombre de start-up nées durant le PRN: Spacetek, active dans la détection de gaz en temps réel.

Comment cela?

Avant que Michel Mayor et Didier Queloz n'annoncent la découverte en 1995 de la première planète extrasolaire (*lire aussi l'encadré en page 19*), la communauté scientifique était d'avis que les chances qu'il existe une autre planète comme la Terre abritant la vie dans l'Univers étaient infimes. À cette époque dominait le point de vue des biologistes selon lequel la conjonction de toutes les conditions nécessaires pour que cela soit possible était tellement improbable que la Terre pouvait très bien être un cas unique. Aujourd'hui, ce point de vue s'est totalement inversé. Le nombre d'exoplanètes connues atteint les 6000, auxquelles on peut ajouter des milliers de candidates non encore confirmées. Désormais, on pense que presque toutes les étoiles du ciel possèdent un ou plusieurs compagnons. Les étoiles orphelines existent, mais elles représentent plutôt l'exception.

Il doit bien exister parmi elles des planètes de la taille de la Terre...

Les statistiques (alimentées par les spectrographes sur des télescopes terrestres, puis par la spectaculaire moisson récoltée par les satellites Kepler et Tess depuis 2009) révèlent une première surprise: les exoplanètes les plus fréquentes sont celles dont la taille se situe entre la Terre et Neptune (des super-Terre, en quelque sorte, ou des mini-Neptunes, c'est selon) et dont il n'existe aucun représentant dans le Système solaire. La catégorie des planètes telluriques plus petites (comme la Terre, Vénus, Mars ou Mercure) sont à peine moins nombreuses. Par conséquent, des exoplanètes de la taille de la Terre existent en effet à la pelle. On en a d'ailleurs découvert, et certaines dans la zone habitable qui plus est, mais en orbite autour d'étoiles beaucoup plus petites que le Soleil, des naines rouges, dont elles font le tour complet en seulement quelques jours. La détection de Terres autour de naines rouges fait d'ailleurs partie de la spécialité du satellite américain Tess, lancé en 2018 et dont les estimations sur leur rayon sont affinées par le satellite suisse Cheops.

Combien connaît-on d'exoplanètes de la taille de la Terre évoluant dans la zone habitable de leur étoile?

Une cinquantaine de candidates sont connues. On ignore la masse de la grande majorité d'entre elles et elles tournent toutes autour d'étoiles plus petites que le Soleil. Il n'y a que quelques cas prometteurs. Parmi les plus connues et

les plus intéressantes se trouve Proxima b, qui tourne en 11,2 jours autour de l'étoile la plus proche de nous, Proxima du Centaure, une naine rouge 8 fois moins massive que le Soleil située à 4,2 années-lumière d'ici. Elle a été découverte en 2016 grâce à des mesures réalisées avec Harps. On ignore si les conditions qui y règnent (dépendantes de l'activité de l'étoile, de la présence d'une atmosphère et d'un champ magnétique, d'un éventuel verrouillage gravitationnel, etc.) sont propices à la vie.

Peut-on déduire des connaissances actuelles la probabilité de trouver une Terre habitable autour d'une étoile analogue au Soleil?

Les estimations de leur taux d'occurrence sont extrêmement incertaines. Dans la littérature spécialisée, ce chiffre varie littéralement entre 0 et 100%.

Sera-t-il possible d'affiner quelque peu cette fourchette dans un avenir proche?

La prochaine mission européenne Plato, dans laquelle la Suisse et en particulier le Département d'astronomie jouent un rôle très important, est spécialement conçue pour détecter des planètes de la taille de la Terre autour d'étoiles ayant une température, une gravité et une composition chimique comparables à celles du Soleil. Le lancement du satellite est prévu pour fin mars 2027. Il suivra en continu durant plusieurs années les changements d'éclat d'environ 250 000 étoiles en quête de transit par de petites planètes. Pour confirmer la nature planétaire de ces compagnons et mesurer leur masse, il est d'ores et déjà prévu de consacrer 1000 nuits d'observation depuis le sol avec le spectrographe Harps et autant de nuits avec Espresso. Ce suivi au sol est organisé par le consortium Plato sous la responsabilité du Département d'astronomie. En parallèle, le télescope spatial Gaia de l'Agence spatiale européenne (ESA), qui a réalisé entre 2013 et 2024 un suivi de plus d'un milliard de sources lumineuses visibles dans le ciel, va publier un premier jeu de données astrométriques (mouvement des étoiles sur le ciel (*lire également en page 34*) couvrant les premiers 5,5 ans de la mission. La combinaison des résultats des deux missions va permettre une caractérisation plus complète de l'architecture des systèmes exoplanétaires avec potentiellement une compréhension plus précise du lien entre la configuration de ces systèmes et l'existence de planètes terrestres dans la zone habitable.

«**Spice Dune**»,
par Elsa Bersier.

Le désert des Neptunes chauds représente le fait que les astronomes ont découvert étonnamment peu de planètes de taille intermédiaire (c'est-à-dire entre les super-Terres et les Neptunes) évoluant dans la région proche (et donc chaude) des étoiles. La cause de cette anomalie statistique est encore débattue.



SPICE DUNE

EXPLORING THE HOT NEPTUNE DESERT

«RISTRETTO», BIENTÔT PRÊT À ÊTRE SERVI

Le futur spectrographe de haute précision Ristretto, dédié à l'observation de **Proximab** – l'exoplanète la plus proche du Système solaire à seulement 4 années-lumière de la Terre –, a franchi en décembre dernier une nouvelle étape. Plusieurs composants clés de cet instrument doivent être installés sur le Very Large Telescope au Chili en 2030 ont été testés avec succès par les ateliers du Département d'astronomie (Faculté des sciences). Les simulations de l'instrument révèlent aussi que Proximab sera détectable par Ristretto, tout comme l'éventuelle présence d'oxygène ou d'eau dans l'atmosphère de la planète, qui évolue dans la zone habitable de son étoile (là où l'eau pourrait se trouver sous forme liquide à sa surface) et dont la taille et la température rappellent celles de la Terre.

LES VITESSES RADIALES

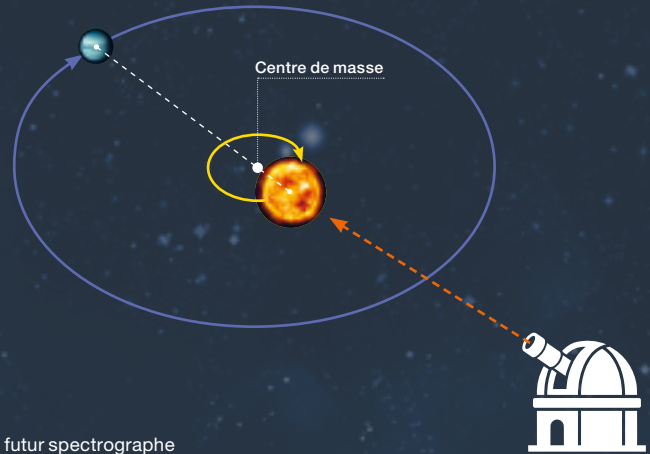
PRINCIPE

La présence d'une planète en orbite imprime à l'étoile un léger mouvement circulaire autour du «centre de masse» du système étoile-planète qui ne coïncide pas exactement avec le centre de l'astre central. Selon la configuration géométrique, l'étoile,

vue depuis la Terre, semble ainsi se rapprocher et s'éloigner sensiblement de manière périodique.

Cette variation de la vitesse radiale est captée par des spectrographes qui, à l'instar des radars sur l'autoroute,

mesurent le décalage périodique du spectre électromagnétique de l'étoile vers le rouge (éloignement) et vers le bleu (rapprochement). Cette technique permet de calculer la **masse**, la **période de révolution** et l'**orbite** de la planète.



INSTRUMENTS

La vitesse radiale est la technique historique qui a été utilisée par Michel Mayor et Didier Queloz pour découvrir en 1995 la première planète extrasolaire, 51 Peg b. Ils ont réalisé cette avancée avec le spectrographe **Élodie**, monté sur le télescope de l'Observatoire de Haute-Provence. Il mesure des vitesses radiales d'étoiles situées à des années-lumière avec une précision de 15 m/s.

Dans la continuité de ce succès, l'Observatoire de Genève développe d'autres spectrographes, conservant une position de leader mondial dans le domaine, jusqu'à aujourd'hui.

Coralie, une version améliorée d'Élodie, est installé en 1998 sur

le télescope suisse Euler à La Silla au Chili. Il fonctionne toujours.

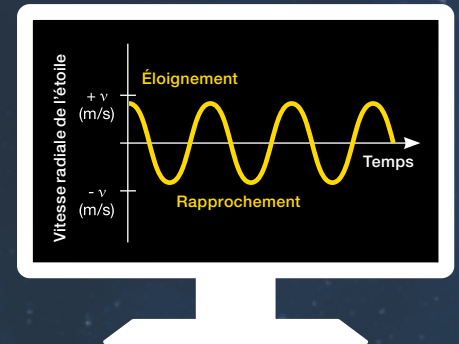
Harps représente un saut qualitatif important. Toujours construit à Genève, ce spectrographe est installé en 2003 sur le télescope de 3,6 mètres de l'ESO, à La Silla au Chili. Il atteint une précision effective de 30 cm/s. Soit 10 fois mieux que le meilleur spectrographe du moment, le **Hires**, un concurrent américain monté sur le télescope Keck à Hawaï.

En 2012, un appareil équivalent, **Harps-Nord**, est installé sur le télescope italien Galileo à La Palma dans les Canaries, pour couvrir l'hémisphère Nord.

Conçu à Genève, **Espresso** a été connecté en 2017 au Very Large Telescope (VLT), installé au sommet sur le Cerro Paranal au Chili. Cet instrument fait passer la précision à moins de 10 cm/s, ce qui correspond à la déviation induite par la Terre sur le Soleil et ouvre donc la possibilité de découvrir des Terres autour d'étoiles comme le Soleil.

Actuellement en construction, **Ristretto** sera installé sur le VLT et se consacrera à l'observation de Proxima b – l'exoplanète la plus proche du Système solaire à seulement 4 années-lumière de la Terre.

Le futur spectrographe **Andes** est, quant à lui, destiné à être installé vers 2032 sur l'Extremely Large Telescope (ELT) de l'ESO dont la construction au Chili devrait s'achever d'ici à 2028. Développé par un consortium international dont fait partie l'Université de Genève, cet instrument doit analyser la composition chimique des objets célestes et contribuer à la recherche de traces de vie sur des exoplanètes.



L'IMAGERIE DIRECTE

PRINCIPE

Dans les systèmes planétaires proches, il est possible d'observer directement des exoplanètes assez grosses et assez éloignées de leur étoile. Un télescope muni d'un coronographe

qui éclipse l'éclat de l'astre central et d'un appareil qui corrige les perturbations de l'atmosphère terrestre peut alors mesurer la lumière réfléchie par la planète ou, si celle-ci est

assez chaude, son rayonnement infrarouge propre.

Cette technique fournit des indications sur la masse et le rayon de la planète. Elle

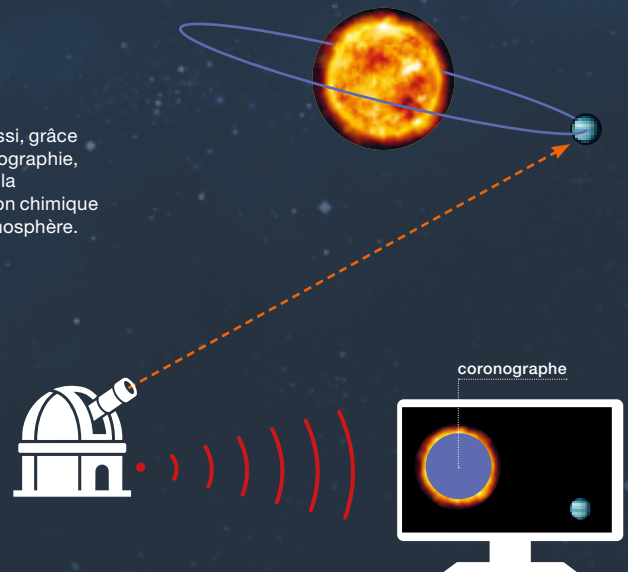
permet aussi, grâce à la spectrographie, d'analyser la composition chimique de son atmosphère.

INSTRUMENTS

La première image directe d'une exoplanète est celle d'une géante gazeuse autour de la naine brune 2M1207, prise en 2004 avec l'instrument NaCo, installé sur le VLT.

En 2016, l'instrument de seconde génération **Sphere** est installé sur le VLT. Il allie une optique adaptative extrême et un coronographe pour photographier des planètes gazeuses.

Installé sur le télescope Gemini-Sud au Chili, **GPI** est, lui aussi, optimisé pour détecter la lumière infrarouge des planètes géantes.



LES TRANSITS

PRINCIPE

Certaines exoplanètes, vues depuis la Terre, passent devant leur étoile. Il s'ensuit une (très) légère baisse de la luminosité de l'astre qui est mesurable. Cette technique n'est applicable qu'aux systèmes planétaires

qui se trouvent dans la bonne configuration géométrique (entre 0,5% et 10% des cas).

La profondeur de la chute de luminosité donne le rapport entre les surfaces des disques stellaires et planétaires.

Elle permet de calculer la période de révolution et le diamètre de la planète à condition de connaître celui de l'étoile. C'est la méthode la plus prolifique à ce jour dans la moisson des exoplanètes mais elle produit aussi un

nombre très élevé de «faux positifs». Les découvertes doivent donc être systématiquement vérifiées par d'autres techniques.

INSTRUMENTS

En 1999, le VLT, au Chili, découvre la première exoplanète par la méthode des transits, HD 209458, qui est aussi la première dont on a pu étudier l'atmosphère.

Le programme WASP, avec un instrument en Espagne et un autre en Afrique du Sud, commence sa campagne en 2006 et découvre plus de 100 exoplanètes.

Lancé en 2006, le satellite CoRoT détecte la première exoplanète tellurique (CoRoT-7b) en 2009.

En fonction de 2009 à 2018, l'observatoire spatial Kepler est à ce jour le chasseur de planètes le plus prolifique, avec plus de 2700 exoplanètes confirmées à son actif, sur plus d'un demi-million d'étoiles observées. Quelque 1900 candidats supplémentaires doivent encore être confirmés.

Le satellite TESS, lancé en 2018 et spécialisé dans la détection de Terres autour de naines rouges, a identifié près de 8000 planètes candidates dont près de 900 ont été confirmées à ce jour.

Le télescope belge Trappist, construit en 2010 au Chili, a détecté en 2015 un système planétaire (Trappist-1) d'au moins sept planètes rocheuses de dimensions similaires ou inférieures à celles de la Terre. Entre trois et six d'entre elles sont situées dans la zone habitable.

Le satellite suisse Cheops, lancé en 2019, exploite la méthode du transit pour mieux caractériser la taille et l'atmosphère des exoplanètes déjà connues et orbitant autour d'étoiles lumineuses.

Depuis 2021, les instruments du télescope spatial James Webb permettent, eux aussi, grâce à la méthode du transit, d'approfondir la connaissance de la composition de l'atmosphère des exoplanètes.

Le télescope Plato doit être lancé au début de 2027. Avec ses 24 petits télescopes, cet instrument représente l'espoir des astronomes de détecter enfin des planètes de la taille de la Terre autour d'étoiles analogues au Soleil.



INFERNAL WORLD

«Infernal World», par Sarah-Leeloo Brulhart

55 Cancri est une super-Terre, l'une des plus proches de son étoile connue à ce jour (60 fois plus proche de son étoile que la Terre du Soleil).



L'ASTROMÉTRIE

PRINCIPE

Tout comme la technique de la vitesse radiale, l'astrométrie exploite elle aussi les mouvements de l'étoile engendrés par la présence d'une

planète en orbite. Au lieu de mesurer le rapprochement et l'éloignement de l'astre, elle détecte les modifications de sa position sur la voûte

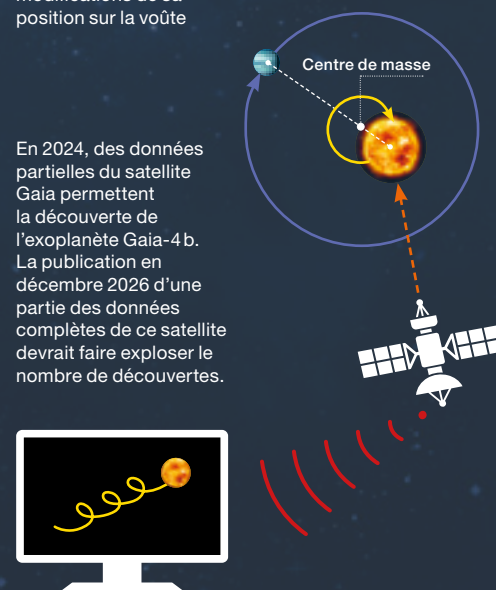
céleste. L'astrométrie permet de déterminer la masse et l'orbite des planètes.

INSTRUMENTS

En 2002, le télescope spatial Hubble utilise l'astrométrie pour caractériser Gliese 876 b, une planète déjà connue.

Dans le cadre du programme Phase, la planète HD 176051 Bb est découverte en 2010 autour d'un système binaire (deux étoiles).

En 2024, des données partielles du satellite Gaia permettent la découverte de l'exoplanète Gaia-4 b. La publication en décembre 2026 d'une partie des données complètes de ce satellite devrait faire exploser le nombre de découvertes.



RENCONTRE DU 3^E TYPE

LA VIE EST AILLEURS

DÉCOUVRIR LA VIE SUR D'AUTRES MONDES EST UNE QUÊTE VIEILLE COMME L'HUMANITÉ MAIS SEMÉE D'EMBÛCHES. LE **CENTRE POUR LA VIE DANS L'UNIVERS** A DÉCIDÉ DE RELEVER LE DÉFI.



« *Il n'est pas naturel dans un grand champ d'avoir un seul épi de blé et dans l'univers infini un seul monde vivant* », écrivait le philosophe grec Métrodore au IV^e siècle avant notre ère. Près de 2500 ans plus tard, l'humanité dispose pour la première fois de son histoire des moyens technologiques et des connaissances scientifiques pour vérifier cette ancienne prémonition de manière réaliste et non plus seulement spéculative. C'est même la principale raison d'être du Centre pour la vie dans l'Univers (CVU). Une entité née en 2021, dans le sillage du Pôle de recherche national PlanetS, qui regroupe astronomes, chimistes, physiciens, biologistes et spécialistes des sciences de la Terre sous la direction d'Émeline Bolmont, professeure associée au Département d'astronomie (Faculté des sciences), en vue de traquer le moindre indice suggérant la présence de quelque chose de vivant dans l'immensité de l'espace. Une quête minutieuse qui progresse à pas comptés tant les difficultés sont nombreuses. Point de situation.

« *Comme c'est notre seule référence, les hypothèses sur lesquelles nous travaillons au CVU sont basées sur la vie telle que nous la connaissons sur Terre*, explique Émeline Bolmont. *En première approximation, la vie sur les exoplanètes, si elle existe, devrait donc essentiellement être composée de bactéries (ou d'organismes unicellulaires approchants) parce que c'est la forme de vivant la plus simple qui a également dominé l'histoire à l'échelle de notre planète. Leur présence requiert de l'eau liquide, une source d'énergie (d'origine solaire ou géothermique) ainsi que les éléments chimiques à la base du vivant que sont le carbone, l'oxygène, l'hydrogène, l'azote, le phosphore et le soufre. On pourrait aussi se pencher sur des formes de vie totalement exotiques basées sur une chimie radicalement différente (avec du soufre à la place de l'oxygène et du*

silicium à la place du carbone, par exemple), mais la tâche est déjà assez ardue en se tenant à ce qui nous est familier. »

Voilà pour la théorie. Dans la pratique, découvrir les signaux trahissant la présence de la vie sur une exoplanète nécessite de suivre une feuille de route à la fois longue et complexe.

Candidates à la vie En premier lieu, il s'agit naturellement d'identifier le plus grand nombre possible de planètes candidates possédant les caractéristiques nécessaires pour abriter la vie. Ces exoplanètes doivent être rocheuses et situées dans ce que les scientifiques appellent la «zone habitable», soit la région autour de leur étoile qui n'est ni trop chaude ni trop froide pour que l'eau en surface puisse y demeurer à l'état liquide.

«LA VIE SUR LES EXOPLANÈTES, SI ELLE EXISTE, DEVRAIT DONC ESSENTIELLEMENT ÊTRE COMPOSÉE DE BACTÉRIES (OU D'ORGANISMES UNICELLULAIRES APPROCHANTS).»

Les astronomes possèdent aujourd'hui les instruments capables de répondre à ces questions. La technique de détection dite des vitesses radiales (*lire en page 22*) permet de déterminer la masse, la période de révolution et l'orbite d'une exoplanète et donc de savoir si celle-ci se trouve à la bonne distance de son étoile. Quant à la méthode des transits (*lire aussi en page 23*), elle fournit, en plus, la taille de la planète.

La combinaison des deux techniques permet donc d'estimer la densité du compagnon stellaire et de distinguer les planètes rocheuses (comme la Terre) des boules de gaz (comme Neptune, par exemple), impropres à la vie.

Le problème, c'est que le fait qu'une planète se trouve dans la zone habitable ne garantit pas qu'elle y reste indéfiniment. Le fait qu'une planète possède une orbite très excentrique, qui la fasse passer alternativement par des régions viables puis d'autres trop chaudes et/ou trop froides, peut ainsi compliquer l'apparition de la vie. Par ailleurs, certaines planètes peuvent migrer hors de la



Émeline Bolmont

Professeure associée au Département d'astronomie de la Faculté des sciences

Formation: Après une licence et un Master en physique à l'École normale supérieure de Lyon, elle effectue une thèse de doctorat en astrophysique à l'Université de Bordeaux.

Parcours: En 2014, elle participe à la découverte de Kepler-186f, première exoplanète de taille comparable à la Terre identifiée dans la zone habitable de son étoile, puis effectue un séjour postdoctoral à l'Université de Namur et un autre au CEA Paris-Saclay. Elle rejoint l'UNIGE en 2018 en tant que professeure assistante et participe à la fondation du Centre pour la vie dans l'Univers qu'elle dirige depuis 2021. Elle est promue au rang de professeure associée en 2025.

LE SYSTÈME SOLAIRE N'A PAS DIT SON DERNIER MOT

Même si ce n'est pas le cœur de cible du Centre pour la vie dans l'Univers (CVU), il n'est pas exclu qu'il existe des formes de vie à l'intérieur même du système solaire et donc à des distances bien plus raisonnables. «On sait aujourd'hui qu'il y a eu autrefois de l'eau sur Mars, précise Émeline Bolmont, professeure associée au Département d'astronomie (Faculté des

sciences) et directrice du CVU. Il est donc possible que cette planète ait aussi abrité une forme de vie et qu'on puisse en retrouver des traces fossilisées. Il n'est pas inimaginable que la vie, qu'on sait extrêmement résiliente, ait pu se maintenir jusqu'à aujourd'hui quelque part en profondeur.» Trancher la question, c'est précisément l'objectif du rover Rosalind Franklin, que l'Agence

spatiale européenne était sur le point de lancer à l'aide d'une fusée russe Soyouz au moment où la guerre en Ukraine a débuté. Retardé, le projet est toujours d'actualité. D'autres missions visent, de leur côté, à sonder l'eau liquide enfouie sous l'épaisse couche de glace qui couvre certains satellites des géantes gazeuses du Système solaire.

Un drone va ainsi être prochainement lancé à la surface de Titan, une lune de Saturne, tandis que l'idée a été émise d'envoyer un robot pour se faufiler dans les conduits naturels se trouvant sur Europe ou pour explorer les geysers d'Encelade, deux compagnons de Jupiter.

«CE QUI MARCHE POUR LA TERRE NE PEUT PAS ÊTRE EXTRAPOLÉ SANS AUTRE AUX PLANÈTES EXTRASOLAIRES.»

zone habitable tandis que certaines étoiles voient leur luminosité changer avec le temps (sur des centaines de millions d'années), modifiant de ce fait les limites propices à la vie. Dans tous les cas, même si leur orbite était stable et à la bonne distance, certaines planètes pourraient rester piégées dans un état glaciaire faute de posséder assez de CO₂ dans leur atmosphère pour créer un effet de serre suffisant permettant à l'eau de rester liquide en surface.

«On le voit, il n'existe pas une zone habitable, mais une multitude, note Émeline Bolmont. Et se trouver à l'intérieur ne signifie pas automatiquement la présence de vie ou même d'eau à la surface d'une planète. Celle-ci dépend aussi de caractéristiques propres à la planète (vitesse de rotation, masse, composition et pression de son atmosphère). Mars est, par exemple, dans ce cas de figure. D'où l'intérêt de disposer d'informations supplémentaires sur ces exoplanètes qui nous intéressent, et en particulier sur leur atmosphère.»

Dans ce domaine, les progrès récents de la spectroscopie ont permis des avancées significatives et toute une série de nouveaux instruments devraient ouvrir de nouvelles perspectives à la communauté scientifique.

Placé en orbite en 2021, le télescope spatial James Webb a déjà fourni des résultats probants pour l'analyse de la composition chimique de l'atmosphère de grosses planètes gazeuses et chaudes. Il est toutefois moins efficace pour étudier les planètes plus petites et tempérées qui intéressent en priorité les équipes du CVU.

Nouveaux instruments Émeline Bolmont a toutefois bon espoir que la situation s'améliore dans un avenir relativement proche. Piloté par son collègue Christophe Lovis, professeur au Département d'astronomie, le spectromètre de haute précision Ristretto, développé à l'Observatoire de Genève, devrait en effet être installé sur le Very Large Telescope, dans le désert d'Atacama, et entrer en fonction au début de la décennie suivante. Andes, son «successeur» de très haute précision à la conception duquel les astronomes genevois ont également contribué, sera quant à lui déployé sur l'Extremely Large Telescope (ELT), actuellement en construction au Chili à partir de 2035, suivi, en 2040, si tout va bien, par le Planet Camera and Spectrograph (PCS), qui sera monté sur le même télescope. *«Ces nouveaux outils, avec lesquels il sera possible de séparer la lumière de l'étoile de celle de la planète, devraient nous permettre de contraindre la composition chimique de l'atmosphère de toute une série de petites exoplanètes, explique la*

chercheuse. Les composés – ou biosignatures – les plus cohérents avec la présence de la vie et que nous recherchons en priorité sont l'eau, l'oxygène, le méthane et la combinaison de ces deux derniers, par exemple.»

Le «glint» Émeline Bolmont et ses collègues spéculent également sur la possibilité de détecter directement la présence d'océans. L'idée consiste à exploiter sur ces mondes lointains un phénomène optique particulier, appelé le «glint» ou «réflexion spéculaire» en français, qui a été capté par les photographies de la Terre prises depuis la Station spatiale internationale – mais que l'on peut aussi apercevoir sur la surface d'un lac depuis la Terre. Sur les clichés de l'ISS, on remarque que, sous certains angles, en particulier lorsque la lumière est rasante, les océans génèrent une réflexion beaucoup plus importante qu'à l'accoutumée. La détection de cet éclat particulier sur certaines exoplanètes pourrait apporter la preuve de la présence d'eau liquide à leur surface.

«Mathilde Houelle, une étudiante faisant partie de mon équipe, travaille actuellement sur la simulation des climats potentiels qu'on pourrait observer avec cette technique, précise la chercheuse. Pour que nos futures observations soient pertinentes, il faut en effet s'assurer autant que possible qu'au moment où le glint est visible, il n'y a pas de nuages sur notre trajectoire ou de glace à l'endroit ciblé.»

Bien que décisive, la présence d'une atmosphère, de même que celle d'eau liquide, n'est toujours pas un critère suffisant pour assurer l'émergence de la vie. D'autres éléments entrent également en ligne de compte.

En vrac, il est nécessaire que la planète possède une atmosphère relativement stable à même de protéger des radiations trop énergétiques (comme les ultraviolets C,



LÀ OÙ TOUT A COMMENCÉ

Au sein de la communauté scientifique, deux grandes écoles s'opposent pour expliquer les origines de la vie sur notre planète. L'une estime que la vie est apparue au fond des océans à côté de sources hydrothermales très chaudes. L'autre suggère que cela s'est produit dans des lacs peu profonds et alcalins. En d'autres termes, la question qui se pose est de savoir s'il y a eu des océans très tôt à la surface de la Terre – ce qui tendrait à valider la première hypothèse – ou si l'eau s'est accumulée au fur et à mesure, auquel cas, au moment où la vie est apparue, ce serait plutôt au sein d'étendues moins profondes.

Le projet mené par Luca Caricchi, professeur au Département des sciences de la Terre de la Faculté des sciences et membre du Centre pour la vie dans l'Univers, pourrait apporter des éléments de réponse. L'idée des scientifiques genevois consiste à rechercher des cristaux de zircon dans les roches les plus anciennes de la surface terrestre, qui se trouvent notamment au Canada et en Australie. Ces minéraux extrêmement résistants et insensibles aux changements peuvent contenir des inclusions d'apatite, minéral dont l'analyse permet d'avoir une idée de la composition chimique de l'atmosphère au moment où le cristal s'est formé et par ricochet sur la quantité d'eau qui était disponible à la surface de la Terre primitive.

par exemple), des minéraux susceptibles de catalyser les réactions chimiques, un champ magnétique jouant le rôle de bouclier contre les rayons cosmiques ou encore un système de plaques tectoniques dont l'activité favoriserait la stabilité du climat en régulant la quantité de CO₂ présente dans l'atmosphère.

Fausse piste Même dans le cas, pour l'heure hautement hypothétique, où la communauté scientifique parviendrait à mettre la main sur une candidate répondant à l'ensemble des critères précités, il faudrait raison garder tant il est vrai que les fausses pistes sont nombreuses.

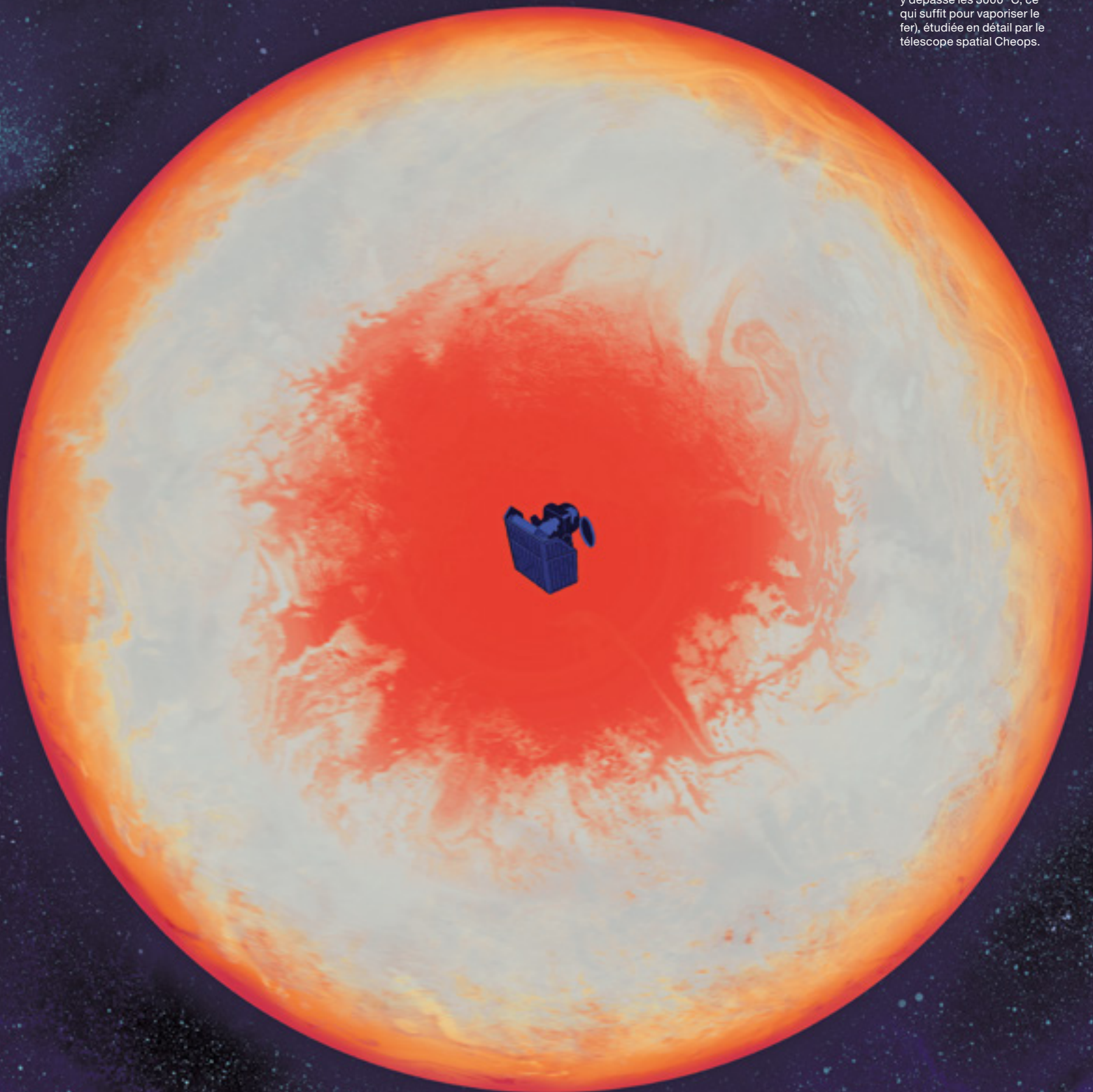
«Le problème, c'est que ce qui marche pour la Terre ne peut pas être extrapolé sans autre aux planètes extrasolaires», avertit Émeline Bolmont. On connaît par exemple des mécanismes

qui peuvent aboutir à l'accumulation d'oxygène ou de méthane dans une atmosphère mais qui n'ont rien à voir avec la vie. À chaque pas que nous ferons en avant, il faudra donc se demander si ce résultat peut être expliqué par un autre phénomène que la présence de la vie. Et si c'est la seule explication qui semble plausible, avant de crier victoire, il sera encore nécessaire de procéder à toute une série d'observations très fines en vue d'identifier des effets saisonniers ou de quantifier le nombre de biomarqueurs se trouvant dans l'atmosphère de la planète concernée.»

Quant à se rendre un jour sur place pour en avoir le cœur net, cela reste totalement illusoire sachant que l'exoplanète la plus proche de la Terre, Proxima du Centaure b, est située à la bagatelle de 4 années-lumière, soit un trajet de plusieurs milliers d'années avec les technologies dont nous disposons à l'heure actuelle.

**«Cheops' Journey
Begins on a Hot
WASP-189 b Day»,
par Frederik Peeters.**

WASP-189 b est une
exoplanète de type Jupiter
ultra-chaud (la température
y dépasse les 3000 °C, ce
qui suffit pour vaporiser le
fer), étudiée en détail par le
téléscope spatial Cheops.



SATELLITE

CHEOPS, UNE STAR SUISSE AU MILIEU DES ÉTOILES

LE PREMIER SATELLITE SUISSE D'OBSERVATION ASTRONOMIQUE A REÇU L'AUTORISATION DE POURSUIVRE SA MISSION ENCORE TROIS ANS. L'OCCASION DE REVENIR SUR SON **IMPRESSIONNANT TABLEAU DE CHASSE**.



David Ehrenreich

Professeur associé au Département d'astronomie de la Faculté des sciences

Formation: Après un diplôme d'ingénieur à l'École polytechnique (France) en 2002, il obtient en 2007 son doctorat en astrophysique à l'Université Paris 6. Il poursuit notamment avec un séjour postdoctoral à l'Institut de planétologie et d'astrophysique de Grenoble.

Parcours: En 2012, il rejoint le Département d'astronomie (Faculté des sciences), au sein de l'équipe travaillant sur les exoplanètes. Il est nommé professeur associé en 2017 et, en 2019, il devient coresponsable de l'équipe scientifique chargée d'exploiter les observations du télescope spatial suisse Cheops.

En juin dernier, le satellite suisse Cheops, en orbite depuis 2019, a obtenu de l'Agence spatiale européenne (ESA) une deuxième prolongation de sa mission qui devrait par conséquent se poursuivre au moins jusqu'en 2029. Construit à l'Université de Berne et doté d'un centre des opérations scientifiques à l'Université de Genève, le petit télescope spatial voit ainsi la qualité de ses services scientifiques récompensée. Ce qui réjouit bien entendu David Ehrenreich, professeur associé au Département d'astronomie (Faculté des sciences) et responsable de l'équipe internationale de plus d'une centaine de scientifiques qui analysent les données de la mission.

«Cheops a été conçu pour observer et détailler des exoplanètes qui ont déjà été détectées par ailleurs, explique-t-il. Il s'agit de déterminer à quoi elles peuvent ressembler et de quoi elles sont composées. La technique utilisée est celle des transits (lire aussi l'infographie en page 23), qui nous fournit le diamètre de l'objet. Si l'on connaît déjà sa masse grâce à la technique dite de la vitesse radiale, nous pouvons donc calculer sa masse volumique et en déduire s'il s'agit d'une planète gazeuse ou rocheuse, composée de roche, de métal ou des deux, etc.»

Évoluant dans l'espace pour s'affranchir des perturbations de l'atmosphère terrestre, Cheops possède la précision nécessaire pour avoir accès à de petites planètes en orbite autour d'étoiles brillantes. Grâce à son grand miroir, l'appareil est capable de détecter une variation de luminosité d'une étoile aussi faible que quelques parties par millions (ppm ou 0,0001%). Une acuité suffisante pour détecter un objet de la taille de la Terre passant devant une étoile comme le Soleil (une telle éclipse ferait baisser l'éclat de l'astre de 80 ppm). Une prouesse appréciable pour la première mission de classe S de l'ESA, c'est-à-dire petite et rapidement mise en œuvre.

Précision diabolique La Suisse ayant mené le projet, les scientifiques des institutions helvétiques, en particulier celles impliquées dans le Pôle de recherche national PlanetS, ont pu bénéficier d'un très grand nombre d'heures d'observation et d'un accès privilégié aux données produites. Et ils ont rapidement constaté que la précision diabolique de Cheops permettait de réaliser de belles découvertes.

«Le satellite a ainsi réussi à mesurer la lumière réfléchie par l'atmosphère de géantes gazeuses très chaudes et proches de leur

étoile et à déterminer la présence de nuages, expose David Ehrenreich. Bien sûr, ces nuages ne sont pas composés de vapeur d'eau mais plutôt d'oxyde de fer, de soufre, de goudron ou autre.»

Dans le cas de WASP-76b, planète sur laquelle l'équipe genevoise avait par ailleurs montré qu'il pouvait pleuvoir du fer liquide, Cheops a observé qu'une zone assez localisée réfléchit davantage de lumière. Une explication possible est que les gouttelettes de fer en suspension dans l'atmosphère de la planète créent une «gloire». Il s'agit d'un phénomène optique connu sur Terre comme un halo aux couleurs de l'arc-en-ciel lié à la réflexion dans une direction privilégiée de la lumière sur de fines gouttelettes d'eau.

Ballon de rugby Dans un autre cas, celui de WASP-103b, c'est la forme de la courbe montrant la légère diminution de luminosité de l'étoile lors du transit de la planète qui a attiré l'attention des scientifiques. De petites irrégularités aux extrémités indiquent que l'exoplanète pourrait être déformée et ressembler davantage à un ballon de rugby qu'à une sphère. En l'occurrence, WASP-103b est une géante gazeuse très proche de son étoile subissant des forces de marées puissantes. *«Nous sommes là à la limite des possibilités de Cheops, note David Ehrenreich. Nous avons*

CHEOPS POSSÈDE UNE ACUITÉ SUFFISANTE POUR DÉTECTER UN OBJET DE LA TAILLE DE LA TERRE PASSANT DEVANT UNE ÉTOILE COMME LE SOLEIL.

CHEOPS EN CHIFFRES

Le satellite suisse
est lancé le
18 décembre 2019

Les observations
scientifiques
ont commencé
en mars 2020

Le nombre de jours
d'observation a
dépassé les 2300

Cheops a fait
35 000 fois le tour
de la Terre

Le télescope a
effectué près de
16 000 observations
sur un millier d'étoiles
brillantes, relativement
proches de la Terre.

Il a étudié plus de
1000 exoplanètes
puisque de nombreux
systèmes planétaires
comptent plusieurs
compagnons.

d'ailleurs dû combiner les données de notre satellite avec celles du télescope spatial Hubble – qui est toujours en fonction –, puis avec celles du télescope spatial James Webb (JWST), qui est plus récent et beaucoup plus gros. C'est d'ailleurs grâce à des résultats comme celui-ci que nous avons obtenu du temps d'observation sur le JWST. C'est une chance exceptionnelle tant l'accès à cet appareil est compétitif.»

Et que dire du système LHS 1903, qui ne colle pas avec les scénarios habituels de formation des planètes? En général, la configuration des planètes suit une logique similaire à celle du Système solaire. À l'intérieur, le rayonnement stellaire est puissant et emporte les enveloppes gazeuses. C'est donc là que se trouvent les planètes telluriques. Au-delà de la «limite des glaces», les atmosphères épaisses peuvent survivre et c'est là qu'évoluent les objets moins denses, dont les géantes gazeuses. Autour de LHS 1903 gravitent quatre planètes. Les trois plus proches de l'étoile ont une taille intermédiaire entre celle de la Terre et de Neptune (des super-Terre ou des sub-Neptunes). Le quatrième compagnon, caractérisé par Cheops, est le plus éloigné, mais aussi, contre toute attente, le plus dense, c'est-à-dire qu'il est probablement de nature rocheuse.

«L'étoile centrale est une naine rouge très ancienne, suggère David Ehrenreich. Peut-être que les planètes se sont formées tardivement et qu'il n'y avait plus de gaz à disposition pour s'accréter autour d'elle.»



Détective La mission de Cheops consiste à pointer son miroir vers des planètes découvertes au préalable par d'autres télescopes. Il s'avère à l'usage qu'une bonne moitié des cibles du satellite suisse sont proposées par le télescope spatial TESS. Lancé un an et demi avant Cheops par la NASA, cet instrument mesure lui aussi des transits (avec une précision inférieure au satellite suisse) dans le but de réaliser le plus de découvertes possibles. L'équipe scientifique qui dirige Cheops vient ensuite inspecter la moisson, affine les données des candidats les plus intéressants et s'octroie le luxe de jouer les Sherlock Holmes.

«Nous avons lancé un programme que nous avons appelé "Déetective Cheops", précise David Ehrenreich. Le télescope TESS ne reste en effet qu'un mois sur un système donné. Il

«Singin' in the Iron Rain an Evening on WASP-76 b»,
par Frederik Peeters.

WASP-76 b est une exoplanète de la taille de Jupiter, dont la face exposée à son étoile est si chaude que les métaux sont vaporisés. Ils se condensent à nouveau en gouttelettes et pleuvent dès qu'ils pénètrent dans l'hémisphère plongé dans la nuit.



risque donc fort de manquer les planètes dont le temps de révolution est plus long ou de ne les voir passer qu'une seule fois devant leur étoile, ce qui laisse planer un doute sur leur véritable nature.»

Et dans des systèmes multiples, qui comptent plusieurs exoplanètes, il devient très compliqué de déterminer leur nombre exact et de les identifier précisément – une connaissance néanmoins capitale si l'on veut comprendre les mécanismes de formation des systèmes planétaires.

«Avec Cheops, on a le loisir d'étudier l'hypothèse d'une ou plusieurs planètes supplémentaires, de calculer quand elles devraient passer devant l'étoile, de pointer le télescope pile au bon moment et, bingo, de découvrir l'objet, poursuit David Ehrenreich. On l'a fait à plusieurs occasions.»

Le premier système multiple comprenant plusieurs planètes telluriques très resserrées autour de leur étoile est celui de la naine rouge Trappist-1, avec ses sept compagnons de la taille de la Terre, dont un se trouve dans la zone habitable. Par la suite, la plupart des autres systèmes de ce type (une douzaine en tout) ont été révélés dans leur entièreté par Cheops, d'après des indices laissés par TESS. Ces systèmes rares sont souvent en résonance, c'est-à-dire que les temps de révolution des planètes représentent des fractions simples (2/3, 3/5...) les uns par rapport aux autres. Cette mécanique céleste délicate est le fruit d'une stabilité qu'aucun événement cosmique n'est venu perturber depuis des éons. Les systèmes multiples sont précieux pour la compréhension des mécanismes de formation et la caractérisation plus poussée de la composition de l'éventuelle atmosphère de ces objets.

Compagnon de compagnon Un défi supplémentaire que Cheops pourrait relever est la détection non seulement d'une planète autour d'une autre étoile que le Soleil, mais en plus d'une lune en orbite autour de cette exoplanète. Le signal de ce compagnon de compagnon a de fortes chances d'être très faible. Mais pas impossible à voir. Un des candidats pour réaliser cette prouesse est Nu² Lupi d. Il s'agit d'une planète dont le rayon est 2,4 fois celui de la Terre et qui est en orbite avec deux autres compagnons autour d'une étoile très brillante, visible à l'œil nu dans la constellation du Loup. L'ensemble a été découvert grâce à la technique de la vitesse radiale par le spectroscopie

genevois de haute précision Harps (installé sur le télescope de l'ESO au Chili). TESS l'a eu dans son viseur à son tour et a pu capter le transit de deux des trois planètes. Manquait toutefois la troisième, dont la révolution dure plus de cent jours. L'équipe de Cheops décide alors de tenter sa chance à son tour.

«Ne connaissant pas l'éphéméride précise de la troisième planète, il nous aurait fallu un mois d'observation continue pour être sûrs de l'attraper, se rappelle David Ehrenreich. Ce qui est beaucoup trop. Nous nous sommes donc concentrés sur les deux planètes internes. Et c'est au moment de mesurer un des transits que, soudain, la lumière de l'étoile a baissé davantage durant un long moment. C'était la troisième planète qui nous a fait une véritable photobombe.»

Connaissant désormais les horaires, les scientifiques ont évidemment décidé de réobserver Nu² Lupi d à son prochain passage en se disant en plus que, si cette planète devait par hasard posséder une lune, elle pourrait bien apparaître dans le signal. Les calculs montrent que pour être détectée par Cheops, sa taille devrait être au moins celle de Mars – qui n'est que 30% plus grande que Ganymède, une des lunes de Jupiter. Pour l'instant, les scientifiques ont cru reconnaître des indices positifs mais aucun n'a, pour l'instant, survécu à des analyses plus poussées.

En attendant, Cheops poursuit donc sa mission pour trois années supplémentaires, ce qui coïncidera avec le lancement en 2027 de Plato. Ce satellite européen ultra-performant muni de 24 petits télescopes est chargé, lui aussi, de balayer le ciel et de détecter des transits autour d'un maximum d'étoiles (avec l'espoir assumé de découvrir une exo-Terre autour d'un exo-Soleil). Au lieu d'être simplement supplanté, Cheops continuera son travail, aidé en cela par sa flexibilité, et pourra même collaborer avec Plato en jouant le rôle de la 25^e caméra afin d'améliorer la précision des mesures dans les marges du champ de vision du télescope spatial européen.

Si cette tâche est couronnée de succès, peut-être que cela vaudra à Cheops une troisième prolongation de mission en 2029, en attendant que démarre le projet de l'éventuel deuxième satellite suisse, un spectrographe, conçu en collaboration avec l'Autriche, fonctionnant dans l'ultraviolet et baptisé Waltzer.

PLATEFORME

DACE, LA COLONNE VERTÉBRALE DE PLANETS

CRÉÉE GRÂCE AUX FONDS DU PÔLE DE RECHERCHE NATIONAL, LA PLATEFORME DACE PERMET DE **CENTRALISER DES DONNÉES UNIFORMISÉES SUR LES EXOPLANÈTES** ET D'EN FACILITER L'ANALYSE PAR LES SCIENTIFIQUES.



Damien Ségransan

Professeur associé au Département d'astronomie de la Faculté des sciences

Formation: Après des études à l'Université de Grenoble I, il y obtient en 2001 un doctorat en sciences, mention astrophysique. Il rejoint ensuite le Département d'astronomie de l'UNIGE comme chercheur postdoctoral.

Parcours: Il y poursuit ses recherches dans le domaine des exoplanètes et des objets de très faible masse. En 2012, il est nommé collaborateur scientifique, en 2014 maître d'enseignement et de recherche et en 2021 professeur associé au Département d'astronomie.

C'est un rêve d'astronome devenu réalité. Derrière un nom quelque peu austère, DACE (Data & Analysis Center for Exoplanets) se cache un trésor de données issues de l'observation des planètes extrasolaires. Leur richesse – inestimable – tient au fait qu'elles ont été triées, vérifiées, réduites, uniformisées, en un mot, archi-préparées pour l'analyse scientifique, tout en étant facilement manipulables grâce à des applications web et à une interface limpide, rapide et fluide, spécialement développées pour l'occasion. En seulement quelques minutes – moyennant pour les non-initiés la lecture préalable d'un mode d'emploi –, il est possible de choisir une étoile du ciel en entrant son nom, de visualiser la courbe périodique de sa vitesse radiale et d'identifier à partir de celle-ci la présence possible, en quelques clics, d'une ou de plusieurs planètes en orbite (la confirmation formelle de la nature planétaire de l'objet demande bien sûr une analyse plus poussée). Le citoyen lambda amateur d'astronomie – l'accès à une grande partie des données est ouvert – peut ainsi se familiariser avec l'étude des exoplanètes. Le scientifique professionnel, lui, peut aller plus loin grâce à des outils d'analyse avancés et à la modélisation théorique des systèmes planétaires et stellaires, également à disposition sur le site.

«Mettre en place une plateforme comme DACE, c'est très difficile, particulièrement en termes de coûts», explique Damien Ségransan, professeur associé au Département d'astronomie (Faculté des sciences) et responsable de DACE. *Nous avons pu le faire dans le cadre de PlanetS, le Pôle national de recherche codirigé par l'Université de Genève de 2014 à 2026. Il nous a assuré le financement pour engager des informaticiens, des data scientists ainsi que pour se procurer le matériel nécessaire.*

La motivation principale de DACE était de fournir des données fiables et de les centraliser afin qu'elles puissent être facilement comparées, échangées et analysées à l'aide d'outils informatiques. Cette structure a été conçue pour faciliter les collaborations entre scientifiques qui, jusque-là, avaient tendance à mener leurs analyses dans leur coin

avec des fichiers de tous les formats possibles et imaginables, souvent incompatibles entre eux. Le défi a été relevé avec succès puisqu'aujourd'hui, DACE est devenue la plateforme de données sur les planètes extrasolaires la plus utilisée en Europe. Plus de 1000 scientifiques du monde entier ont ouvert un compte dont 300 sont considérés comme actifs. Près d'un pétaoctet (1 million de gigaoctets) de données sont stockées dans une quinzaine de serveurs rangés dans une armoire.

Service public «La plateforme, véritable colonne vertébrale de PlanetS, était d'abord destinée aux membres du PRN», précise Damien Ségransan. *Nous l'avons ensuite ouverte à nos collaborateurs extérieurs et finalement à toute la communauté des astronomes. Les codes informatiques des outils d'analyse sont publics, tout comme les données sur les exoplanètes, du moins après un certain temps, en fonction des accords que nous avons avec les différents instruments internationaux qui nous fournissent les données brutes. En d'autres termes, la plateforme, financée par les contribuables, est un service public, accessible à tout un chacun. Et depuis la fin du PRN, elle est devenue une infrastructure à part entière de l'Université de Genève, qui finance deux postes pour pérenniser son fonctionnement.* Car la plateforme ne cesse de grandir. Chaque jour, de nouveaux résultats de mesures sont acheminés vers DACE où ils sont vérifiés et formatés. Les chiffres proviennent principalement de spectrographes (qui mesurent la vitesse radiale des étoiles) conçus et fabriqués à l'Observatoire de Genève: Coralie (installé sur le télescope suisse Euler à La Silla au Chili), Harps et Harps-Nord (respectivement montés sur des télescopes à La Silla au Chili et à La Palma, aux Canaries) ou encore Espresso, (connecté au Very Large Telescope, au Paranal, Chili). DACE collecte également les données de Cheops, le satellite suisse, qui étudie les exoplanètes plus en détail grâce à la technique dite du transit. Par ailleurs, de plus en plus de groupes américains et européens, sans lien avec le PRN, demandent à DACE d'uniformiser leurs données. «Ça commence à prendre», constate Damien Ségransan.

Chasseur de planètes Les outils informatiques mis à disposition sur le site permettent de se prendre, l'espace de quelques instants, pour un astronome chasseur d'exoplanètes et de mieux comprendre ce métier. En choisissant une étoile de la base de données, on accède immédiatement aux mesures temporelles réalisées avec différents spectrographes sur cet astre. Ce sont des points plus ou moins rapprochés (en fonction du nombre de mesures effectuées) formant une courbe dont on remarque en général rapidement le caractère périodique, traduisant les petits rapprochements et éloignements successifs de l'étoile sous l'effet gravitationnel d'une ou de plusieurs planètes en orbite. Grâce à un autre graphique en dessous, montrant la répartition du signal en fonction de sa fréquence (périodogramme), il est possible de choisir la fréquence qui a le plus de probabilités de correspondre à une première planète et de soustraire sa contribution au signal. On obtient alors sa masse minimale, sa période et certains paramètres orbitaux. On peut ensuite répéter l'opération avec une éventuelle deuxième planète ayant une autre période orbitale pas forcément visible au premier coup d'œil. Et ainsi de suite jusqu'à épuisement des planètes ou jusqu'au moment où il ne devient plus possible de distinguer le mouvement d'une éventuelle planète supplémentaire du bruit de fond.

«Un pic dans le périodogramme indique une périodicité dans les mesures de vitesse radiale, précise Damien Ségransan. Il peut aussi provenir de l'activité stellaire, de l'échantillonnage temporel, d'alias ou d'effets instrumentaux. Il faut donc ajuster un modèle, examiner les résidus et comparer plusieurs hypothèses. DACE facilite grandement cette analyse, mais ne transforme pas automatiquement un pic en planète confirmée.»

La plateforme comprend d'ailleurs un onglet consacré précisément aux modèles théoriques, qui constitue la spécialité de l'Université de Berne, qui a codirigé le PRN PlanetS. Elle recèle également une section dédiée au Système solaire et en particulier au Soleil. Ce dernier, grâce à sa proximité, permet d'étudier en détail tout ce qui peut perturber son éclat. Sa surface est en effet sans cesse secouée par une activité importante (taches solaires, convection, granulation, oscillations stellaires...). Les connaissances acquises sur le comportement du Soleil peuvent ensuite être transposées aux étoiles lointaines afin de développer des modèles permettant de mieux distinguer, dans le signal qui parvient aux astronomes, la composante qui

LE DÉFI A ÉTÉ RELEVÉ AVEC SUCCÈS PUISQUE «DACE» EST DEVENUE LA PLATEFORME DE DONNÉES SUR LES PLANÈTES EXTRASOLAIRES LA PLUS UTILISÉE EN EUROPE.

est produite par le bouillonnement propre de l'astre de celle, infime, qui provient de la présence d'un compagnon planétaire. Tous les moyens sont bons en effet pour chercher à optimiser ce rapport entre le signal utile et le bruit puisque les instruments d'observation traquent des planètes toujours plus petites autour d'étoiles relativement grandes comme le Soleil et sur des périodes de plus en plus longues.

Qualité suisse Enfin, la plateforme DACE héberge également son propre catalogue d'exoplanètes, alimenté et entretenu par François Bouchy, professeur au Département d'astronomie, et son équipe. La liste compte actuellement un peu moins d'un millier de planètes (958). C'est peu comparé aux près de 6500 qu'exhibent d'autres atlas plus inclusifs, tels que celui de la NASA ou exoplanet.eu. Pour Damien Ségransan, la quantité, c'est probablement intéressant pour la science statistique et la communication auprès du grand public. Mais l'objectif de DACE, c'est davantage la qualité des données et en particulier leur homogénéité et leur fiabilité.

«Notre catalogue possède un périmètre scientifique plus spécialisé que les autres, explique-t-il. Nous vérifions chaque mesure et nous effectuons des choix car certaines fois, différents articles traitant du même objet se contredisent. Les informations que nous publions sont donc sélectionnées, documentées et homogénéisées. Elles permettent notamment aux théoriciens, qui cherchent à comprendre les mécanismes de formation des systèmes planétaires, de se baser sur des données solides. Alors, c'est vrai, nous ne possédons pas toutes les données existantes sur les planètes extrasolaires. Mais celles que nous avons sont de qualité suisse.»

GAIA, CHASSEUSE D'EXOPLANÈTES

Le 2 décembre prochain, la mission spatiale astrométrique Gaia de l'Agence spatiale européenne (ESA) publiera la première moitié des données qu'elle a récoltées au cours de son périple qui a duré de 2013 à 2025. Ce ne sont pas moins de soixante-six mois de mesures de plus d'un milliard de sources lumineuses distribuées sur toute la voûte céleste qui seront ainsi mises à la disposition des scientifiques.

Ce catalogue, qui est amené à être complété fin 2030, comprend les caractéristiques (position précise, distance, intensité lumineuse, etc.) de la moindre étoile, galaxie ou encore astéroïde jusqu'à une magnitude de 20 ou 21 (ce qui est très faible).

Les mesures de Gaia sont si précises qu'elles permettront de découvrir des planètes autour de certaines étoiles. En effet, la présence d'un

compagnon, même invisible, provoque un mouvement régulier de l'étoile qui se traduit par une oscillation régulière de sa position sur la voûte céleste que le satellite peut détecter.

Damien Ségransan, professeur associé au Département d'astronomie (Faculté des sciences), et son équipe contribuent à la mise à disposition des astronomes des données concernant les étoiles potentiellement accompagnées d'exoplanètes ou de naines brunes (des astres plus massifs qu'une planète mais pas assez pour déclencher la fusion nucléaire de l'hydrogène comme le fait une étoile).

«Sur les 5,8 millions de sources situées dans une sphère de 200 parsecs autour de la Terre, nous avons identifié plus de 150 000 systèmes qui devront désormais être analysés par des équipes du monde entier», explique-t-il.

Les planètes, ou autres compagnons, que Gaia permettra de découvrir seront plutôt massives, au moins autant que Jupiter. Dénicher des objets plus légers avec cette technique ne sera possible qu'avec les étoiles plus proches de la Terre. Mais cette population d'exoplanètes géantes et gazeuses a aussi son intérêt dans la compréhension de la formation des systèmes planétaires en général. Et les statistiques sur les exoplanètes devraient exploser de manière spectaculaire.

«Exploring the Boundless HR8799 b»,
par Talie Humeau.

HR8799 b est une exoplanète géante gazeuse, dont la masse est entre 5 et 7 fois celle de Jupiter. Elle met 465,8 ans pour effectuer une orbite complète. C'est la première exoplanète à avoir été découverte par la technique dite de la détection directe.

