

> *macrocarpa*) dans la partie centrale du Sud-Est où les deux espèces coexistent et où le chêne à bogue est soumis aux contraintes du changement climatique?

Concrètement, nous savons qu'un certain flux génétique existe entre les différentes espèces de chênes et que les gènes échangés diffèrent selon les espèces, l'endroit où elles se trouvent, les espèces voisines, le climat et le milieu. Nous savons également qu'une fois que les gènes passent d'une espèce à l'autre, ils peuvent se transmettre au-delà de l'aire de répartition de l'espèce en question, apparemment sous l'effet des flux de gènes et de la sélection environnementale. Ces exemples suggèrent que les flux de gènes ont pu jouer un rôle adaptatif dans l'évolution des chênes. En associant des études génomiques et écologiques, nous commençons tout juste à élucider ces processus.

Il nous reste encore à comprendre quels gènes et quels paramètres – période de floraison, milieu, distance géographique – déterminent la spéciation des chênes. Ainsi qu'à déterminer si les caractéristiques écologiques des espèces évoluent lorsqu'elles se développent ensemble ou seulement séparément. Pour l'heure, nous sommes sur le point de comprendre quels sont les gènes qui façonnent la différenciation entre espèces.

Ainsi, des travaux récents sur les chênes européens, menés à l'unité Biogeco de Bordeaux par Antoine Kremer et ses collègues, pointent des gènes impliqués dans l'aptitude à se croiser et à s'adapter à des conditions écologiques particulières telles que la tolérance à la sécheresse, au froid ou aux maladies. Mais ces résultats indiquent seulement que ces différences d'adaptation écologique varient selon les espèces, et non qu'elles guident la différenciation.

La même équipe a simulé différents scénarios de spéciation par analyse statistique pour tenter d'expliquer les variations génomiques entre quatre espèces de chênes blancs répandus en Europe (chêne sessile, *Quercus petraea*; chêne pubescent, *Q. pubescens*; chêne tauzin, *Q. pyrenaica*; chêne pédonculé, *Q. robur*), qui s'hybrident aujourd'hui quand elles coexistent. Ces chercheurs montrent que ces variations génomiques sont apparues sur des espèces formées dans des zones géographiques différentes en Europe, les flux de gènes entre espèces intervenant dans un second temps lorsque celles-ci sont entrées en contact à la fin du dernier âge glaciaire, il y a 20 000 ans. Ces données montrent que la «perméabilité» génétique a été maintenue malgré la longue séparation entre espèces, et que cette perméabilité (par hybridation avec le chêne pédonculé) a contribué à l'adaptation notamment du chêne sessile à des climats plus froids lors de sa migration vers le nord.

Et pour revenir au contexte américain, la coexistence de nombreuses espèces soulève la question de la contribution de l'hybridation à la grande diversité spécifique présente sur le nord du continent.

Comprendre quand, où et comment est apparue la diversité des chênes est fondamental pour prévoir comment ils peuvent résister et s'adapter aux transformations rapides de leur environnement. Les chênes ont rapidement recolonisé les terres à la suite du recul des glaciers continentaux il y a environ 20 000 ans.



Dans sa migration, le chêne sessile a suivi le chêne pédonculé en s'hybridant avec lui

L'hybridation y a également contribué, comme l'ont montré les études sur le couple chêne pédonculé-chêne sessile en Europe: dans sa migration postglaciaire, le chêne sessile a «suivi» le chêne pédonculé en s'hybridant avec lui.

Les connaissances que nous pouvons acquérir sur les avantages conférés par les transferts génétiques en matière d'adaptation sont essentielles pour prédire la résistance des chênes au changement climatique. Ces arbres devront notamment faire face à des maladies fongiques et à des insectes nuisibles auxquels ils n'ont jamais été confrontés. D'autant plus qu'en raison de printemps précoces, les insectes qui transportent des champignons pathogènes voient leur aire de répartition s'élargir et leur mode de reproduction se modifier. Les chênes pourraient avoir bien du mal à résister s'ils ne sont pas en mesure de faire face à ces nouvelles maladies et d'évoluer aussi rapidement que le climat change.

Notre défi pour la prochaine décennie, en tant que spécialistes de la biodiversité végétale, sera de déterminer comment la différenciation des espèces et les transferts de gènes entre elles influenceront sur l'évolution des populations de chênes et leur maintien. Si nous comprenons suffisamment bien ces processus, nous serons capables de prédire à quoi ressembleront nos forêts dans un siècle et au-delà. Nous espérons ainsi pouvoir guider la gestion forestière pour assurer la survie à long terme de ces arbres vitaux. ■

BIBLIOGRAPHIE

A. Kremer et A. L. Hipp, **Oaks : An evolutionary success story**, *New Phytologist*, vol. 226(4), pp. 987-1011, 2020.

T. Leroy et al., **Massive postglacial gene flow between European white oaks uncovered genes underlying species barriers**, *New Phytologist*, vol. 226, pp. 1183-1197, 2020.

T. Leroy et al., **Adaptive introgression as a driver of local adaptation to climate in European white oaks**, *New Phytologist*, vol. 226, pp. 1171-1182, 2020.

B. Fallon et J. Cavender-Bares, **Leaf-level trade-offs between drought avoidance and desiccation recovery drive elevation stratification in arid oaks**, *Ecosphere*, vol. 9(3), article e02149, 2018.



Voir naître des systèmes planétaires

Comment apparaît et évolue un système planétaire autour d'une étoile ? Des images en haute résolution de divers disques circumstellaires, ces amas de poussière en rotation qui subsistent autour des étoiles après leur formation, commencent à le montrer.

L'ESSENTIEL

> Le radiotélescope *Alma*, inauguré en 2011, a permis aux astronomes d'observer pour la première fois les détails au sein des disques de gaz et de poussière qui entourent les étoiles.

> Ces disques dits « circumstellaires » apprennent aux scientifiques comment les systèmes solaires lointains se sont formés et ont évolué,

tandis que certaines structures telles que des voilures ou la présence de grumeaux indiquent parfois la présence de planètes.

> De nouveaux télescopes en projet devraient dans les prochaines années faire progresser l'étude des disques circumstellaires en permettant de photographier directement les planètes qui y gravitent.

L'AUTRICE



MEREDITH MACGREGOR
maîtresse de conférences
à l'université
du Colorado à Boulder,
aux États-Unis

La semaine où j'entrais à l'école doctorale étaient publiés les premiers projets d'observation du tout nouveau radiotélescope millimétrique et submillimétrique à large base de l'Atacama, au Chili, nommé *Alma* (pour *Atacama large millimeter array*). Cet instrument révolutionnaire coordonne des dizaines d'antennes radio pour créer des images aussi détaillées que celles que produirait un unique télescope de 16 kilomètres de diamètre. Avec une telle résolution, *Alma* est capable d'observations plus profondes et détaillées, dans les longueurs d'onde millimétriques et submillimétriques, que n'importe quel télescope antérieur.

J'ai aussitôt sauté sur l'occasion de me joindre à l'un des tout premiers projets, l'étude d'un disque de débris et de poussière autour d'une étoile proche nommée AU Mic. Avant *Alma*, aucun scientifique n'avait pu voir le disque que nous voulions observer avec autant de détail. Les débris et la poussière peuvent ne pas sembler un sujet très excitant. Ce sont pourtant les ingrédients dont sont faites les planètes, et cet observatoire nous donnait l'occasion de voir le processus de formation en action.

Il nous a fallu attendre encore un an pour recueillir les résultats. De nos jours, l'astronomie se pratique souvent à distance. On ne passe plus de longues nuits dans un observatoire au sommet d'une lointaine montagne. Tout ce que nous avions à faire était de fournir une séquence informatique expliquant au télescope ce qu'il devait observer, où et quand. Ensuite, nous avons attendu patiemment (ou plutôt impatiemment) que nos observations soient programmées dans la file d'attente puis effectuées. Je me souviens encore de la boule au ventre que j'avais en attendant le téléchargement des données, et de mon émerveillement lorsque l'image est apparue sur l'écran de mon ordinateur – une longue et fine forme lumineuse dotée de trois taches brillantes : une au centre et deux de part et d'autre, à chaque extrémité.

Ce que nous avions sous les yeux, c'était un système solaire en cours de maturation. La petite tache centrale n'était autre que l'étoile, dont nous savons aujourd'hui qu'elle est le siège d'éruptions qui expédient dans l'espace des flots de particules de haute énergie. Les deux autres petites taches marquaient les bords d'un disque de débris entourant l'étoile centrale et comparable à la ceinture de Kuiper, qui gravite autour de notre Soleil. Nous pensons que cette ceinture contient les « gravats » restés après que des planètes se sont formées autour d'AU Mic, une jeune étoile naine de type M distante d'environ 32 années-lumière.

D'autres scientifiques ont récemment découvert deux planètes dans ce système : l'une de masse comparable à celle de Jupiter et l'autre à celle de Saturne, toutes deux en orbite relativement près de leur étoile. Désormais, nous avons une occasion inédite d'étudier la façon dont le matériau du disque a évolué et interagi avec ces planètes récemment formées.

Depuis cette première image, les capacités d'*Alma* n'ont cessé de s'accroître tandis que le réseau a acquis de nouvelles antennes, une résolution plus élevée et que la gamme de longueurs d'onde auxquelles il opère s'est étendue. Dans le même temps, l'étude des disques circumstellaires et de la formation des planètes a littéralement explosé. *Alma* a obtenu des images de centaines de pouponnières planétaires. Cela nous a aidés à renouveler notre compréhension de leur formation et révélé au passage toute une flopée de nouvelles planètes extrasolaires que nous n'aurions jamais découvertes autrement.

EMBRYONS DE PLANÈTES

Les étoiles se forment à partir de vastes nébuleuses de gaz et de poussière nommées nuages moléculaires. La densité typique de l'espace vide n'est que d'environ un atome par centimètre cube, mais les zones les plus épaisses au sein des nuages moléculaires peuvent afficher

Ces disques protoplanétaires dont les images ont été réalisées par le radiotélescope *Alma* ne sont autres que de jeunes systèmes solaires. Ces disques de gaz et de poussière en rotation sont les restes de la naissance d'une étoile et constituent le matériau de base pour la formation des planètes.

> des densités 10000 à 1 million de fois supérieures à cette norme. Lorsque ces grumeaux ou «cœurs protostellaires» deviennent assez denses, ils commencent à s'effondrer sous leur propre gravité pour former des étoiles. Au cours du processus, l'effet conjugué de la rotation initiale du «cœur» en effondrement et de la conservation du moment cinétique engendre naturellement un disque, qualifié de «circumstellaire», autour de la nouvelle étoile.

Lorsque les étoiles sont encore très jeunes (quelques millions d'années seulement), leur disque circumstellaire est relativement imposant. Dans la plupart des systèmes, sa masse représente typiquement 1 à 10% de celle de l'étoile centrale. Dans le cas d'une étoile comme le Soleil, cela équivaut à un disque d'une masse de l'ordre de 100 fois celle de Jupiter. Ces jeunes et massifs «frisbees» sont dits «protoplanétaires», car on pense qu'ils sont le siège d'un intense processus de formation de planètes. Les roches, les métaux et les glaces se condensent au sein du disque pour former des germes planétaires.

En entrant en collision et en se collant les uns aux autres, ces germes grossissent, jusqu'à ce que leur gravité soit suffisante pour commencer à attirer à eux le matériau environnant, un mécanisme connu sous le nom d'accrétion. Ces jeunes protoplanètes sont en orbite à l'intérieur du disque et continuent, tels des Pac-Man cosmiques, d'accumuler de la matière et de créer ainsi des espaces annulaires vides. Pratiquement toutes les étoiles âgées de moins de quelques millions d'années sont entourées de tels disques, qui hébergent très probablement toute une ménagerie de nouveaux systèmes planétaires.

La phase protoplanétaire de l'évolution des disques dure plusieurs millions d'années. Après, l'essentiel du gaz et de la poussière du disque circumstellaire initial a été évacué. La façon exacte dont ce ménage est fait et les échelles de temps nécessaires font l'objet de recherches actives, mais on pense qu'une grande partie de la poussière du disque originel peut soit migrer vers l'intérieur avant de tomber sur l'étoile centrale, soit être soufflée vers l'extérieur par d'intenses vents stellaires.

Au bout d'environ 10 millions d'années, il ne subsiste plus qu'une étoile, arrivée à maturité, entourée d'un jeune système planétaire et d'un disque de petits corps – astéroïdes et comètes. La masse totale de ce matériau, vestige de la formation des planètes, est faible: probablement de l'ordre de 10% de la masse de la Terre. Bien qu'il puisse subsister assez de matière pour former en principe de petits mondes de type terrestre ou des corps semblables à Pluton, on peut se représenter ces débris comme des fossiles, témoins abandonnés de l'époque de la formation des planètes.

La structure de ces disques est façonnée par les interactions des débris avec les planètes nouvellement formées, tandis que leur composition nous renseigne sur le matériau d'origine qui a servi à construire lesdites planètes.

Les astronomes ont observé ces disques pour la première fois après le lancement du satellite astronomique infrarouge *Iras* en 1983. Il s'agissait du premier télescope spatial conçu pour cartographier l'ensemble du ciel dans le domaine infrarouge (en l'occurrence à des longueurs d'onde comprises entre 12 et 100 micromètres). Lorsqu'*Iras* a cartographié le ciel infrarouge, les astronomes ont découvert que beaucoup d'étoiles étaient plus brillantes dans ce domaine qu'attendu. Pourquoi? Une réponse possible impliquait la présence de grandes quantités de poussière: si ces étoiles étaient entourées de disques de poussière, les grains en seraient chauffés par l'étoile et émettraient alors un rayonnement thermique dans le domaine infrarouge. Un nouveau domaine de recherche en a résulté. Pour tout dire, les quatre premiers disques de débris découverts grâce à *Iras* – Véga, Bêta Pictoris, Epsilon Eridani et Fomalhaut – sont toujours intensément étudiés aujourd'hui.

AU MOINS 20 À 25% DES ÉTOILES ONT UN DISQUE DE DÉBRIS

Jusqu'ici, l'instrumentation infrarouge utilisée pour repérer ces points chauds a permis aux astronomes de confirmer qu'au moins 20 à 25% des étoiles sont entourées d'un disque de débris. Mais étant donné ce que l'on croit savoir sur la formation des systèmes planétaires, on pourrait s'attendre à ce que ce soit en fait le cas de toutes les étoiles – après tout, l'étude statistique de l'énorme échantillon d'étoiles étudiées par la mission *Kepler* indique que toutes les étoiles de la galaxie sont probablement accompagnées d'au moins une exoplanète.

Le Système solaire lui-même a son propre agencement de ceintures de débris – la ceinture d'astéroïdes et celle de Kuiper. Pourtant, le Système solaire est très pauvre en poussière, comparé aux autres systèmes dont nous avons des images. En fait, les recensements infrarouges les plus exhaustifs n'ont pu identifier jusqu'ici que des disques dont les masses sont supérieures d'au moins un ordre de grandeur à ce que l'on observe dans le Système solaire. Cela veut-il dire que notre foyer cosmique est un endroit très particulier? Nous n'en sommes pas encore sûrs. Nous n'avons étudié jusqu'ici que les disques les plus massifs, les plus extrêmes, mais il reste à découvrir probablement bien plus de disques de faible masse qui nous aideront à mieux situer la place du Système solaire parmi ses congénères dans la galaxie.

Les astronomes ont donc commencé à soupçonner la présence de disques de poussière dès les premières observations



À haute altitude dans le désert chilien de l'Atacama, l'observatoire *Alma* coordonne les signaux de plusieurs dizaines d'antennes pour, entre autres, enregistrer des images de systèmes planétaires lointains.

infrarouges, dans les années 1980, mais ils ont longtemps ignoré à quoi ils ressemblaient. Avant les progrès de l'instrumentation réalisés dans les années 1990 et 2000, un seul système stellaire avait pu être «résolu»: Bêta Pictoris. Le télescope spatial *Hubble*, notamment, utilisait un coronographe, technique consistant à occulter la lumière de l'étoile centrale de façon à observer les objets environnants moins lumineux, pour photographier la lumière diffusée par les grains de poussière dans les disques circumstellaires. Beaucoup de ces premières images étaient indistinctes, mais, déjà, suggéraient que les disques circumstellaires avaient des structures variées et complexes. Dans le cas du disque de débris de Bêta Pictoris, les premières images de *Hubble* révélaient une voilure de la région centrale du disque; les astronomes ont supposé qu'elle serait due à une planète. Des images directes l'ont plus tard confirmé.

UN RADIOTÉLESCOPE QUI EN COMBINE PLUSIEURS DIZAINES

La longueur d'onde de la lumière que nous recevons après sa réflexion sur un nuage de poussière correspond grossièrement à la taille des grains: la lumière visible ou de l'infrarouge proche provient donc de grains minuscules d'une taille de quelques micromètres au plus, tandis que l'infrarouge lointain ou les ondes millimétriques proviennent de grains comparables à ceux du sable. On pense que ces grains plus gros reflètent mieux la structure sous-jacente des disques circumstellaires.

En effet, au sein des disques se produisent continuellement des collisions à la chaîne. De grosses comètes ou des astéroïdes se percutent et sont moulus en débris de plus en plus fins. En dehors des planètes proprement dites, les objets les plus massifs au sein du disque de débris sont appelés «planétésimaux» et leurs positions résultent de leurs interactions avec les planètes

du système. Lorsque nous parvenons à localiser les planétésimaux, il est possible d'utiliser cette information pour en déduire la présence de planètes, même si nous ne pouvons pas observer ces mondes directement.

Les grains de poussière les plus minuscules sont facilement dispersés par les frottements du gaz interstellaire ou sont tout simplement soufflés par les vents de matière ou le rayonnement émis par l'étoile. Les grains plus gros, comparables au sable, sont moins touchés et offrent de meilleures chances d'observer la structure sous-jacente du disque et la présence de planètes, grâce à leur influence gravitationnelle.

En conséquence, pour étudier la structure des disques et y rechercher la signature de planètes cachées, il nous faut les observer à de grandes longueurs d'onde. Cela semble assez évident, mais il y a un piège. Le pouvoir de résolution d'un télescope est proportionnel à la longueur d'onde utilisée divisée par le diamètre de l'instrument. Ainsi, en augmentant la longueur d'onde du domaine optique vers le domaine millimétrique, il faut considérablement augmenter la taille du télescope pour conserver le même pouvoir de résolution. Le télescope *Hubble* a un diamètre de 2,4 mètres et donne une résolution de 0,13 seconde d'angle lors d'observations dans l'infrarouge proche, autour de 1 micromètre de longueur d'onde. Pour obtenir la même résolution à des longueurs d'onde de l'ordre de 1 millimètre, il faudrait augmenter le diamètre de l'instrument d'un facteur 1000, ce qui ferait plus de 2 kilomètres!

Comme il est impossible de construire des télescopes aussi énormes, on recourt à une technique appelée «interférométrie». Pour l'essentiel, au lieu d'utiliser un seul télescope de 2 kilomètres de diamètre, un interféromètre est formé d'une multitude de télescopes plus petits sur plus de 2 kilomètres de distance et combine leurs signaux pour atteindre une résolution équivalente.

Alma, qui a enregistré ses premières images dès 2011, est encore aujourd'hui l'interféromètre le plus puissant du monde. Situé à environ 5000 mètres d'altitude dans le désert chilien de l'Atacama, *Alma* est constitué de 66 antennes que l'on peut déplacer sur leurs lignes de base avec des écarts variables allant de 150 mètres à 16 kilomètres, ce qui offre la possibilité de varier les configurations, compactes ou étendues, selon la sensibilité et le zoom souhaités. Ces progrès aussi bien dans le domaine de la sensibilité que de la résolution autorisent la réalisation d'images inédites d'objets très peu lumineux. C'est ainsi qu'*Alma* a contribué à bouleverser notre compréhension des disques circumstellaires.

L'une des premières images d'*Alma* à faire le tour du monde a été prise en 2014. Il s'agissait de HL Tau, un jeune système stellaire ➤

LA CHASSE AUX PLANÈTES

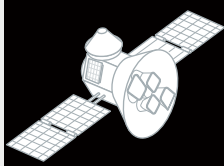
D'après les astronomes, pratiquement toutes les étoiles de la galaxie sont accompagnées de planètes, même si beaucoup, et même la plupart, restent indétectables. Chacune des stratégies utilisées pour déceler ces exoplanètes présente ses propres forces et faiblesses et souffre d'un biais favorisant la détection d'un type particulier de mondes. Les petites planètes comparables à la Terre qui parcourent de longues orbites autour de leur soleil sont particulièrement difficiles à détecter de loin, ce qui explique pourquoi très peu d'exoplanètes connues appartiennent à cette catégorie.

TRANSITS

Cette méthode de recherche des exoplanètes consiste à suivre l'évolution de la luminosité des étoiles. Chaque fois qu'une planète passe devant son soleil, on observe une brusque diminution de la luminosité de celui-ci, à condition que le plan de l'orbite soit correctement orienté, c'est-à-dire qu'il soit vu de « profil » depuis la Terre. Ces éclipses périodiques nous informent non seulement sur la présence d'une planète, mais aussi sur son diamètre et sur la taille de son orbite.

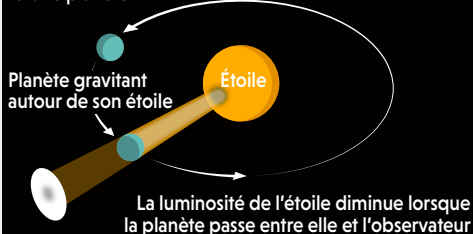
Exemple de télescope

TESS



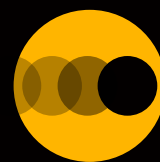
Comment ça marche

Cherche l'ombre d'une planète



Avantage

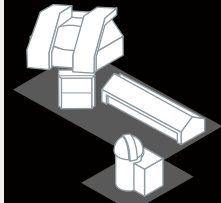
Efficace pour détecter des planètes aux périodes orbitales courtes (plus de 3 155 à ce jour)



VITESSES RADIALES

Dans cette technique, on scrute les mouvements d'une étoile dus à l'attraction gravitationnelle exercée par une éventuelle planète gravitant autour d'elle. On mesure ces mouvements à l'aide de l'effet Doppler : les fréquences de la lumière émise par l'étoile augmentent lorsque l'astre se rapproche de l'observateur (« décalage vers le bleu »), diminuent lorsqu'il s'éloigne (« décalage vers le rouge »).

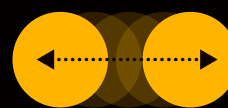
WIYN



Examen des oscillations d'une étoile



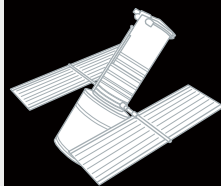
Efficace pour détecter des planètes massives aux périodes orbitales courtes (796 à ce jour)



IMAGERIE DIRECTE

Si la planète est assez lumineuse et si elle gravite loin de son étoile, nos télescopes peuvent la repérer directement. Ce n'est en général possible qu'en occultant la lumière directe de l'étoile mère – technique appelée coronagraphie – afin de révéler la lumière bien plus faible réfléchiée par la planète. Cependant, presque toutes les exoplanètes sont impossibles à photographier avec les instruments actuels.

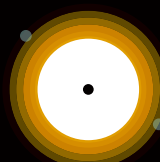
HUBBLE



Masquage de l'étoile et prise de vue



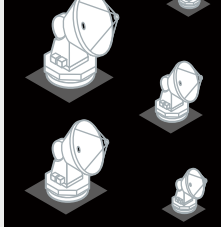
Efficace pour détecter des planètes jeunes et brillantes dont les orbites sont grandes (50 à ce jour)



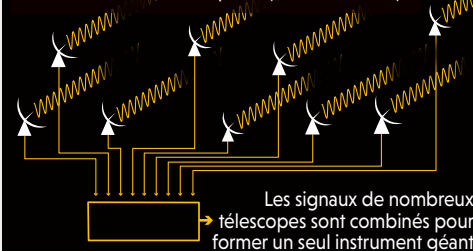
DISQUES CIRCUMSTELLAIRES

Des espaces évidés, des torsions ou des grumeaux au sein des disques de gaz et de poussière qui entourent les étoiles révèlent parfois la présence de planètes par ailleurs indétectables. Les disques apparaissent dans les grandes longueurs d'onde, ce qui implique l'usage de très grands télescopes. En pratique, les astronomes combinent les signaux de plusieurs petits télescopes répartis sur une grande distance pour former un instrument virtuel équivalent à un seul télescope de diamètre comparable à leur séparation.

ALMA



On combine les ondes captées (interférométrie)



Efficace pour détecter des planètes dont les orbites sont grandes



- > probablement âgé de moins de 100 000 ans. Sur cette photographie, ce que l'on imaginait auparavant être un disque continu apparaissait en réalité marqué d'une série d'anneaux séparés par des espaces vides. Étant donné l'extrême jeunesse de ce système, si ces régions évidées ont bien été creusées par des embryons de planètes, il faut en conclure que la formation planétaire démarre bien plus tôt qu'on ne le pensait.

DSHARP (sigle anglais pour «Projet d'observation des structures discales à haute résolution angulaire»), un recensement de 20 disques protoplanétaires, a permis une autre découverte notable en 2018 : chacun d'entre eux, sans exception, est marqué par des successions d'anneaux et de divisions semblables, et certains sont même dotés de structures spirales. Il semble donc que ces caractéristiques ne soient pas spécifiques à HL Tau, mais se retrouvent universellement dans tous les jeunes disques circumstellaires.

UN MOYEN DE DÉTECTION DE PLANÈTES EXTRASOLAIRES

L'étude de ces disques ne nous renseigne pas seulement sur les mécanismes de formation planétaire. Elle constitue un nouveau moyen de détecter des exoplanètes que nous serions incapables de déceler autrement.

Les télescopes spatiaux tels que *Kepler* et *Tess* (pour *Transiting exoplanet survey satellite*, «Satellite de recensement des transits planétaires») et d'autres programmes de recensement basés au sol ont détecté jusqu'ici des milliers d'exoplanètes. Cependant, la plupart de ces planètes sont plus massives et gravitent plus près de leur étoile mère que les planètes du Système solaire. Ces types de mondes ne sont cependant pas nécessairement les plus communs, ils nous sont simplement plus faciles à détecter.

Les deux méthodes principales de détection des exoplanètes sont la technique du transit, qui scrute les diminutions périodiques de la lumière stellaire lorsqu'une planète en orbite passe devant son étoile, et la méthode des vitesses radiales, qui déduit la présence de planètes par l'observation des petits changements de vitesse qu'elles infligent à leur étoile mère du fait de leur attraction gravitationnelle. Les deux méthodes favorisent la détection de planètes volumineuses (ou massives) et dont les orbites sont rapides, parce qu'il faut observer de multiples orbites successives avant de confirmer une détection.

Cela signifie que les astronomes qui utilisent ces méthodes ratent sans doute un grand nombre d'autres planètes. La période orbitale de Neptune, par exemple, est d'environ 165 ans : si vous étudiez le Système solaire depuis une étoile lointaine, il vous faudrait attendre très longtemps pour voir Neptune transiter devant le Soleil ne serait-ce qu'une seule fois. Les rares

planètes que nous connaissons et qui se trouvent à des distances de leur étoile de l'ordre de celle de Neptune ont été directement photographiées à l'aide de coronographes – c'est-à-dire en cachant la lumière de l'étoile centrale. Cette approche présente cependant ses propres biais, car elle favorise les systèmes jeunes dont les planètes conservent encore une partie significative de la chaleur résultant de leur formation et sont dès lors suffisamment brillantes dans l'infrarouge.

Pour remplacer l'architecture de notre Système solaire dans son contexte et savoir s'il est typique ou plutôt exceptionnel au sein des systèmes de la galaxie, il nous faut détecter des planètes géantes à de grandes distances de leur étoile au sein de systèmes anciens. Désormais, grâce à *Alma*, cela est réalisable en utilisant l'image résolue de la structure des disques circumstellaires. C'est là un puissant complément aux autres méthodes de détection des planètes extrasolaires.

Nous pouvons ainsi détecter des mondes comparables à Neptune, par exemple, en étudiant certains traits distincts – des grumeaux ou des asymétries particulières – de disques qui ont été sculptés par les planètes en orbite. Dans le Système solaire, la classique ceinture de Kuiper est assez étroite à cause de l'influence gravitationnelle de Neptune. On pense qu'au début de l'évolution du système, Neptune s'est initialement formée plus près du Soleil avant de migrer vers l'extérieur en repoussant les matériaux restants sur son passage, créant ainsi la ceinture de Kuiper que nous connaissons aujourd'hui. Si nous observons des structures comparables dans les disques extrasolaires de débris, il sera possible d'en déduire la présence d'analogues de Neptune quand bien même nous ne les voyons pas.

Nous pouvons également en apprendre davantage sur les planètes que nous connaissons déjà en observant les disques qu'elles habitent. Le système de l'étoile HR 8799 comprend quatre planètes géantes gazeuses que l'on a pu photographier directement et dont les orbites se trouvent entre les analogues de notre ceinture d'astéroïdes et de notre ceinture de Kuiper. L'interférométrie millimétrique nous permet de discerner la structure de la ceinture extérieure du système, son analogue de la ceinture de Kuiper, et de déterminer la position de son bord interne.

En supposant que sa planète la plus extérieure soit celle qui est responsable du creusement du disque, cette information nous donne une estimation de la masse probable de ladite planète : autour de six masses joviennes. L'exploit peut ne pas sembler impressionnant, mais c'est en fait bien plus précis que les meilleures estimations précédentes fondées sur des modèles théoriques du refroidissement et de

>

> la diminution de la luminosité, dans l'infrarouge, des planètes après leur formation. À partir de la structure du disque, nous fournissons donc une importante vérification indépendante de ces modèles.

Par ailleurs, l'observation par *Alma* de disques protoplanétaires plus jeunes révèle des trésors de structures très détaillées. Les anneaux et les divisions qui les séparent semblent présents dans pratiquement tous les systèmes. Si tous ces espaces évidés sont creusés par des planètes, on doit conclure à l'existence d'une vaste population de planètes de glaces géantes qui nous avait échappé jusqu'ici. Cependant, relier directement la structure des jeunes systèmes à la présence de planètes n'est pas chose aisée, parce que d'autres phénomènes compliquent les efforts de modélisation.

Les systèmes plus vieux et plus évolués sont plus faciles à interpréter, bien que jusqu'ici très peu de ces disques de débris plus anciens aient exhibé de tels anneaux multiples. Récemment, dans le disque de débris de l'étoile HD 15115, nous avons découvert un nouvel espace vide situé approximativement au niveau de l'orbite de Pluton dans notre système. Les modèles dynamiques suggèrent que cette

division est le fait d'une planète de glace géante de masse légèrement inférieure à celle de Saturne. Je soupçonne qu'à mesure que s'accumuleront les images en haute résolution de ces systèmes matures, nous verrons apparaître un nombre croissant de ces structures induites par la présence de planètes.

LA COMPOSITION CHIMIQUE DES DISQUES SE DÉVOILE

Au-delà de la structure des disques circumstellaires, nous pouvons également étudier leur composition. Puisque ces disques sont à la fois les réservoirs à partir desquels se forment les planètes et les registres fossiles de ce processus, leur composition est intimement reliée à celle des planètes de ces systèmes et à l'histoire de leur formation. Beaucoup de molécules rencontrées communément dans la nature émettent un rayonnement de longueur d'onde millimétrique dû aux oscillations de leurs liaisons chimiques. Les scientifiques ont détecté des dizaines de molécules organiques (monoxyde de carbone, formaldéhyde, méthanol et ammoniac, parmi bien d'autres) dans les grands réservoirs de gaz présents au sein des disques protoplanétaires.

UNE BATTERIE D'INSTRUMENTS VARIÉS

L'Observatoire européen austral (l'ESO), qui participe aussi à *Alma*, possède d'autres instruments dédiés à l'étude des disques circumstellaires et à l'imagerie directe des jeunes exoplanètes. Les quatre grands instruments de 8 mètres de diamètre du *VLT* (*Very Large Telescope*), installé au sommet du Cerro Paranal, au Chili, peuvent eux aussi être combinés pour fonctionner comme un interféromètre ; mais, surtout, certains sont dotés d'un système d'optique adaptative (un réseau de petits vérins hydrauliques qui déforment les miroirs en temps réel pour compenser les distorsions dues à la turbulence atmosphérique), ce qui leur confère une résolution

proche de celle qu'ils auraient s'ils opéraient dans le vide de l'espace.

L'instrument Naco, installé dès 2001 sur le télescope numéro 4 du *VLT*, est responsable de la photographie directe de la planète Bêta Pictoris b, en orbite autour de son étoile à la même distance que Saturne du Soleil, planète qui a ensuite été abondamment étudiée par l'instrument *Sphere*, installé sur le télescope numéro 3 à partir de 2014. Signalons aussi qu'une autre planète a été détectée en 2019 plus près de cette étoile par la méthode des vitesses radiales.

Ces instruments sont des coronographes – ils masquent l'étoile centrale pour mieux rendre visible son environnement. Ils peuvent aussi exploiter le fait que la lumière directe de l'étoile est essentiellement non polarisée, tandis que la lumière réfléchie l'est partiellement, afin d'augmenter le contraste des disques circumstellaires et d'éventuelles exoplanètes.

Naco et *Sphere*, tout comme leurs cousins principalement américains les Gemini Planet Finder (GPI),

installés sur le Cerro Pachón, au Chili, ainsi qu'à Hawaii, opèrent à des longueurs d'onde plus courtes qu'*Alma*, dans le domaine optique ou du très proche infrarouge. Ces courtes longueurs d'onde donnent difficilement accès aux gros grains millimétriques étudiés ici par Meredith MacGregor. (Signalons toutefois qu'*Alma* a aussi détecté une planète dans le disque de HD 163 296, non par l'étude de ces poussières, mais par celles des mouvements du gaz.) Cependant, alliées à une optique adaptative de très haute performance, ces courtes longueurs d'onde confèrent à *Sphere*, par exemple, une résolution de l'ordre de 0,02 seconde d'arc, six fois supérieure à celle de *Hubble* et à la limite du mieux que puisse faire *Alma* dans sa configuration la plus étendue. Ces instruments sont aussi susceptibles de fournir des spectres des objets étudiés, donnant ainsi accès à leur composition.

GPI a obtenu l'image directe des quatre planètes (elles aussi évoquées ici par Meredith MacGregor) autour

de l'étoile HR 8799. Quant à *Sphere*, outre l'étude de Bêta Pictoris b, on lui doit la découverte par imagerie directe des planètes géantes autour de l'étoile HIP 65426 (en 2017), PDS 70 (en 2018) ainsi que TYC 8998-760-1 (en 2020). Des dizaines de disques circumstellaires ont également été résolus par *Sphere* et, dans le cas du système PDS 70, le *VLT* observe actuellement une seconde planète à l'aide de l'instrument *Muse* (*Multi unit spectroscopic explorer*, ou « explorateur spectroscopique multiple »). *Sphere* vient également de découvrir de spectaculaires arches se déplaçant dans le système AU Mic et dont l'origine reste mal comprise.

Ainsi, l'étude de la formation et de l'évolution des systèmes planétaires repose sur l'exploitation d'une gamme très polyvalente d'instruments variés.

ANNE-MARIE LAGRANGE
Institut de planétologie et d'astrophysique de Grenoble

Nos recherches ont aussi soulevé une nouvelle énigme. On pensait traditionnellement que les disques de débris étaient pauvres en gaz parce que le gaz originel devait être soufflé en à peine quelques millions d'années. Or *Alma* a montré que bien des disques de débris contiennent du dioxyde de carbone gazeux. On peut interpréter cela comme le résultat de collisions de comètes au sein du disque qui, à mesure qu'elles sont broyées en débris de plus en plus petits, libèrent de la glace carbonique, sublimée par la suite en gaz. Quelques systèmes défient cependant cette explication, parce qu'ils contiennent de telles quantités de gaz qu'il faudrait des taux de collisions cométaires invraisemblables pour les produire.

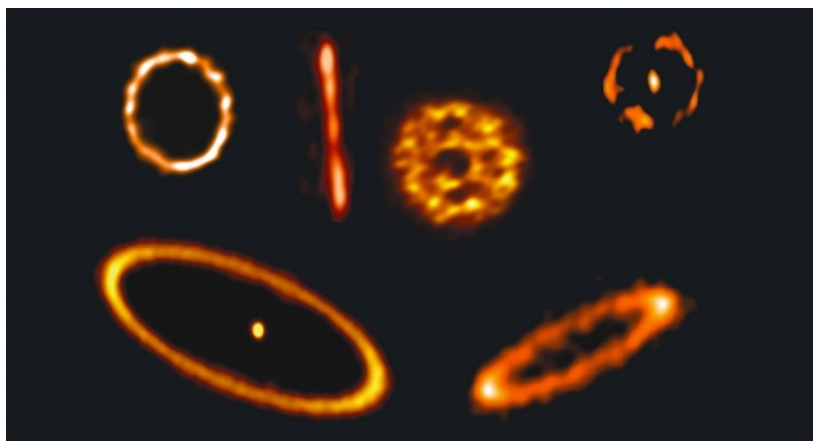
Cette découverte pose une question : est-il possible qu'une partie du gaz originel se maintienne au sein de ces disques non pas pendant quelques millions d'années mais pendant des dizaines de millions d'années ? Pour le moment, nous n'avons pas de réponse.

FUTURS ÉCLAIRAGES À D'AUTRES LONGUEURS D'ONDE

J'ai démarré ma thèse au moment où *Alma* ouvrait les yeux pour la première fois sur le ciel ; et je prends aujourd'hui mon premier poste universitaire alors qu'on assiste à une fascinante transition vers l'astronomie multi-longueurs d'onde. *Alma* a contribué à bouleverser notre compréhension des disques circumstellaires en révélant des complexités de structure et de composition chimique que l'on ne pouvait que deviner il y a quelques décennies. Mais *Alma* ne peut répondre à toutes les questions que nous nous posons.

Tous les disques de débris que j'ai mentionnés ici sont comparables à notre ceinture de Kuiper : de froids anneaux de poussière dans la banlieue extérieure de leurs systèmes solaires. Jusqu'ici, les astronomes ont bataillé en vain pour réaliser des images de ceintures comparables cette fois à notre ceinture d'astéroïdes : nous les décelons seulement sous la forme d'un excès d'infrarouges près de l'étoile mère, exactement comme aux jours anciens du satellite *Iras*.

Pour obtenir des images des régions internes des systèmes extrasolaires, il nous faut accéder à des longueurs d'onde plus courtes, correspondant à des grains de poussière plus chauds. Le télescope spatial *James-Webb* (*JWST*) devrait être lancé en 2021 et nous espérons qu'il prendra les premières photos de ces analogues de notre ceinture d'astéroïdes. De surcroît, le *JWST* fonctionnera à des longueurs d'onde qui correspondent aux émissions des silicates (des minéraux comme l'olivine ou les pyroxènes, que l'on retrouve également sur Terre), ce qui devrait nous renseigner directement sur la composition des grains des disques.



Plus loin dans le futur, les très grands télescopes de la prochaine génération, actuellement en construction, devraient recueillir leurs premières lumières entre le milieu et la fin des années 2020. Ces télescopes auront des diamètres supérieurs à 24 mètres, soit une surface collectrice plus de cinq fois supérieure à celle des plus grands télescopes au sol actuels, et ils pourront peut-être photographier directement les planètes dont nous ne pouvons pour le moment que déduire la présence à partir de l'observation des disques.

L'enquête décennale sur l'astronomie et l'astrophysique – une étude impliquant toute la discipline destinée à guider les futurs investissements aux États-Unis – est en cours. Quatre missions phares de la Nasa sont à l'étude dans ce cadre, dont les retombées pour les sciences planétaires pourraient être considérables dans les années 2030 et au-delà.

Le télescope spatial *Origins*, un observatoire infrarouge cryogénique, devrait déceler la façon dont l'eau contenue dans les nébuleuses où se forment les étoiles est finalement transférée au sein des disques circumstellaires, fournir un échantillon statistiquement significatif de la population de disques de faible masse (indiquant ainsi si notre système est particulier ou au contraire banal), et bien d'autres choses. D'autres candidats comme *Luvoir* (*Grand recenseur ultraviolet/optique/infrarouge*) et *Habex* (*Observatoire des exoplanètes habitables*) sont des missions destinées à produire des images directes susceptibles de caractériser de nombreuses exoplanètes, parmi lesquelles certaines pourraient être semblables à la Terre.

Quelle que soit celle de ces missions qui sera finalement choisie, il y a une chose dont je suis sûr : notre compréhension du Système solaire, de sa formation et de sa place au sein d'un univers peuplé de systèmes planétaires change tous les jours. Quant à la boule au ventre que l'on ressent à chaque fois que l'on attend de découvrir à quoi ressemblent les dernières observations, cette impression ne disparaît jamais. ■

Les disques de débris, ici photographiés par *Alma*, constituent un stade plus tardif de l'évolution des disques protoplanétaires, une fois que l'étoile et ses planètes se sont formées. Ces ceintures brillantes de débris sont comparables à la ceinture de Kuiper du Système solaire.

BIBLIOGRAPHIE

R. Miranda et R. R. Rafikov, **On the planetary interpretation of multiple gaps and rings in protoplanetary disks seen by ALMA**, *Astrophysical Journal Letters*, vol. 878(1), article L9, 2019.

ALMA Partnership et al., **The 2014 ALMA long baseline campaign : First results from high angular resolution observations toward the HL Tau region**, *Astrophysical Journal Letters*, vol. 808(1), article L3, 2015.

M. A. MacGregor et al., **Millimeter emission structure in the first ALMA image of the AU Mic debris disk**, *Astrophysical Journal Letters*, vol. 762(2), article L21, 2013.

Quand les agriculteurs se sont imposés en Europe

Laura Spinney

Lorsque les premiers éleveurs-cultivateurs ont gagné l'Europe au Néolithique, ils ont forcément rencontré des populations de chasseurs-cueilleurs. Quelles ont été leurs interactions ?

Il y a 8000 ans, l'Europe était en plein «âge moyen de la pierre», c'est-à-dire en plein Mésolithique européen, qui va du X^e au V^e millénaire avant notre ère. Les Européens étaient alors tous des chasseurs-cueilleurs, qui nomadisaient par petits clans dans les immenses et luxuriantes forêts couvrant le continent. Les outils de silex qu'ils utilisaient pour récolter des plantes, couper du bois, pêcher du poisson ou encore chasser le cerf et l'aurochs (l'ancêtre disparu des bovidés domestiques actuels) nous sont connus par leurs habitats. Les quelques squelettes que l'on y a retrouvés évoquent des gens robustes et plutôt grands; leurs gènes indiquent qu'ils avaient souvent la peau et les cheveux bruns, et les yeux bleus.

Seulement 3000 ans plus tard, des champs de blé et de lentilles parsemaient la forêt, et la transition vers l'«âge de la pierre nouvelle», c'est-à-dire vers le Néolithique (V^e au III^e millénaire pour l'Europe occidentale) battait son plein. Les Mésolithiques, qui subsistaient par la chasse et la cueillette, et les Néolithiques, qui subsistaient par l'agriculture et l'élevage, ont très longtemps coexisté. Pour autant, l'introduction en Europe de l'économie de production a créé une rupture dans le registre archéologique, mise en évidence par la découverte dès le XIX^e siècle d'os d'animaux domestiques, de poteries contenant des restes de céréales et de nécropoles. L'arrivée du nouveau système économique signifiait l'apparition de nouveaux régimes alimentaires, d'un nouvel usage des terres, de nouvelles relations avec la nature et, corrélativement, d'une nouvelle vie sociale. Cette évolution a culminé à la fin du Néolithique avec l'adoption de la métallurgie.

Les préhistoriens se sont demandé pendant plus d'un siècle si le Néolithique a été apporté en Europe par des migrations, ou s'il s'y est seulement diffusé à partir de son aire d'origine >

