

> *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.