

> essayer de mettre en évidence si la variation de ton qui produit ce camouflage est corrélée aux conditions de luminosité, lesquelles varient avec la latitude et la densité de végétation. Or ses résultats vont dans ce sens.

De façon générale, dans un milieu ouvert, la lumière solaire directe tend à créer une ombre qui monte haut sur le corps, avec une transition bien nette vers la zone du corps illuminée. Les animaux vivant dans un tel habitat présentent en général une contre-illumination adaptée: le dos est sombre et le cède brusquement à un ventre clair, donc sans zone de coloration intermédiaire. L'antilope d'Amérique (*Antilocapra americana*) est un cas typique de ce genre de contre-illumination. Dans les habitats fermés, en revanche, de la lumière diffuse à travers la végétation et se disperse dans toutes les directions, ce qui produit une ombre moins haute sur le corps, accompagnée d'une transition douce vers la zone éclairée. Les animaux de ce genre d'habitat tendent à présenter une contre-illumination où la transition du ventre clair au dos plus sombre est progressive, ce qui est le cas par exemple des cerfs à queue noire (*Odocoileus hemionus*) et à queue blanche (*O. virginianus*), communs dans les forêts nord-américaines.

CAMOUFLAGE PAR CONTRE-ILLUMINATION

Le simple examen visuel du spécimen de *Psittacosaurus* révélait un certain type de contre-illumination, mais lequel? Pour le déterminer avec plus de précision, nous avons cartographié la répartition de la mélanine conservée sur le fossile à l'aide d'une technique d'imagerie spéciale. Avec le concours du paléoartiste britannique Bob Nicholls, nous avons ensuite projeté la carte obtenue sur un modèle précis et en grandeur nature du dinosaure. Nous avons ainsi établi que la transition du foncé au clair se situait bas sur le ventre et la queue de *Psittacosaurus*.

Afin de préciser la fonction exacte de ce camouflage par contre-illumination, nous avons photographié les ombres formées sur une copie peinte en grise de notre modèle grandeur nature dans toute une série de conditions d'éclairage, du soleil le plus éclatant jusqu'au ciel plombé de nuages, et cela tant sous des conifères qu'en terrain dégagé. Nous avons ensuite inversé les nuances sombres et claires des photographies afin de définir les contre-illuminations adaptées à telle ou telle condition. De cette façon, nous sommes parvenus à la conclusion que le type de contre-illumination de *Psittacosaurus* était adapté à un milieu baigné par une lumière diffuse: une forêt à canopée par exemple.

Enfin, les pigments conservés dans les proies probables de certains dinosaures peuvent aussi nous renseigner sur eux. Chez les insectes, la plupart des motifs colorés sont en effet

apparus au cours de l'évolution afin de leur éviter d'être dévorés. Or les fossiles des névroptères, un grand groupe d'insectes prédateurs généralistes, en offrent un exemple fascinant. Il y a entre 170 et 150 millions d'années, les ailes de certains névroptères ont commencé à arborer des ocelles, c'est-à-dire des taches en forme d'yeux, susceptibles d'intimider un prédateur approchant très vite. Ces insectes ont été parmi les premiers à acquérir de tels caractères.

Contre quel type de prédateurs se défendaient-ils? La plupart des motifs colorés des insectes actuels sont destinés à tromper les oiseaux, leurs principaux prédateurs. Toutefois, les névroptères sont antérieurs aux oiseaux tels que nous les connaissons. On pense donc que leurs prédateurs étaient des paraviens, c'est-à-dire des membres du groupe (Paraves) de dinosaures théropodes contemporains des névroptères, qui allait donner les oiseaux (entre autres). Le registre fossile des paraviens n'indique pas clairement à quel moment la capacité de voler est apparue, mais l'apparition d'ocelles chez les névroptères constitue un indice qu'une intense pression de prédation s'est exercée sur eux, celle-ci étant probablement due à des animaux volants. Les ocelles des insectes nous renseignent donc sur la date d'apparition du vol chez les dinosaures.

La recherche sur les paléocouleurs est loin d'être close. Il reste des pigments à rechercher et à identifier dans les fossiles, notamment les caroténoïdes qui produisent les rouges et des jaunes vifs et les porphyrines qui donnent des tons verts, rouges et bleus. Occasionnellement, de tels pigments ont été découverts dans certains fossiles – notamment des caroténoïdes dans des bactéries fossiles vieilles de plusieurs milliards d'années et des porphyrines dans un moustique gorgé de sang vieux de 46 millions d'années, ou encore dans les œufs d'un oviraptorosaure datant de 66 millions d'années. Des pigments inconnus chez les organismes actuels ont aussi été découverts au sein d'organismes bien plus anciens.

Il est clair que nous finirons par nous heurter à des limites, puisque après des millions d'années de fossilisation, une partie de l'information est irrémédiablement perdue. Nous avons aussi une forte contrainte: les fossiles exceptionnels, dans lesquels le matériau organique est conservé, sont si rares et si précieux qu'il est hors de question de les détruire en y prélevant trop d'échantillons. Cependant, comme les techniques progressent, les découvertes qu'elles rendent possibles vont sans aucun doute changer notre vision du passé de plus en plus vite. Chacune de ces découvertes nous rapprochera du moment où nous verrons les dinosaures ou d'autres animaux éteints tels qu'ils étaient réellement: en couleurs! ■

BIBLIOGRAPHIE

J. Vinther et al., **3D camouflage in an Ornithischian dinosaur**, *Current Biology*, vol. 26(18), pp. 2456-2462, 2016.

J. Vinther et al., **The colour of fossil feathers**, *Biology Letters*, vol. 4(5), pp. 522-525, 2008.

EXPO



VALERIAN ET LAURELINE

en mission pour la Cité

13 JUIN 2017
14 JANVIER 2018

M PORTE DE LA VILLETTE

#ExpoValerian



ICI L'AFFICHE
AUGMENTÉE



AVEC LE SOUTIEN DE



BNP PARIBAS

EN COLLABORATION AVEC

DARGAUD

EN PARTENARIAT AVEC

MY TFI

Syfy

CNEWS Matin

SCIENCE



Le drone, sur le point de décoller, est piloté à distance par les chercheurs. Il recueillera des microorganismes en suspension dans l'air afin d'en comprendre la propagation.



L'ESSENTIEL

> De nombreux microorganismes se dispersent dans l'air, notamment des pathogènes qui affectent les cultures de céréales.

> Grâce à des drones et des modélisations complexes reproduisant les mouvements changeants des masses d'air, les auteurs déterminent comment se dispersent certaines maladies. Des pathogènes, tels ceux de la fusariose

des épis, se sont propagés dans de nombreuses régions du globe.

> À terme, les chercheurs pourront aider les agriculteurs à mieux protéger leurs champs en surveillant la dissémination des agents pathogènes.

> Des microorganismes influeraient aussi sur la météo, en favorisant, par exemple, les précipitations.

LES AUTEURS



DAVID SCHMALE
professeur
à l'université
Virginia Tech,
aux États-Unis



SHANE ROSS
maître
de conférences
à l'université
Virginia Tech

Des drones pour traquer les microbes

FUSARIOSE DES ÉPIS, ROUILLE NOIRE DU BLÉ ET AUTRES MALADIES DES CÉRÉALES RAVAGENT LES CULTURES DE CÉRÉALES DANS LE MONDE ENTIER. LA CAUSE : DES MICROORGANISMES QUI, TRANSPORTÉS PAR LES VENTS, PARCOURENT DES MILLIERS DE KILOMÈTRES. POUR LES SUIVRE, LES CHERCHEURS SORTENT LES DRONES...

L'air qui nous entoure grouille de bactéries, de virus et de champignons. À chaque inspiration, nous inhalons des milliers de ces microorganismes. Depuis plus de 150 ans, nous savons que certains d'entre eux provoquent des maladies chez les végétaux, les animaux et les humains.

Plus récemment, on a découvert que les microorganismes influent aussi sur la météo : ils facilitent par exemple la naissance de gouttes d'eau dans les nuages et provoquent des précipitations ou favorisent la formation de gel. Et ces microorganismes sont de grands voyageurs. Ils empruntent les grands flux d'air pour voler sur plusieurs centaines de kilomètres et traverser océans ou continents. Grâce à de nouveaux outils et de nouvelles techniques, les chercheurs sont capables de déterminer le lieu d'origine de ces organismes et la façon dont ils se dispersent.

Outre l'intérêt biologique de comprendre les interactions des microorganismes avec l'atmosphère, les enjeux économiques sont de taille. En effet, les agents pathogènes, vecteurs de maladies et de contaminations pour les cultures, provoquent des dégâts considérables. À l'échelle mondiale, les pertes se chiffrent en milliards d'euros chaque année.

Depuis une dizaine d'années, par une approche pluridisciplinaire, nous étudions les pathogènes les plus nocifs pour les céréales. L'un de nous (David Schmale) étudie l'aérobiologie, partie de la biologie qui s'intéresse à ce microcosme en suspension dans l'air, et en particulier aux microorganismes qui provoquent des maladies chez les végétaux ; l'autre (Shane Ross) développe des modèles mathématiques qui décrivent et prévoient comment les masses d'air se déplacent sur de courtes ou sur de longues distances. Nous nous sommes associés en 2006 pour retracer les chemins par lesquels ➤

Toutes les photographies sont d'Adam Ewing



> les agents pathogènes des végétaux, ou phytopathogènes, se disséminent d'un champ, d'une région ou d'un continent à l'autre.

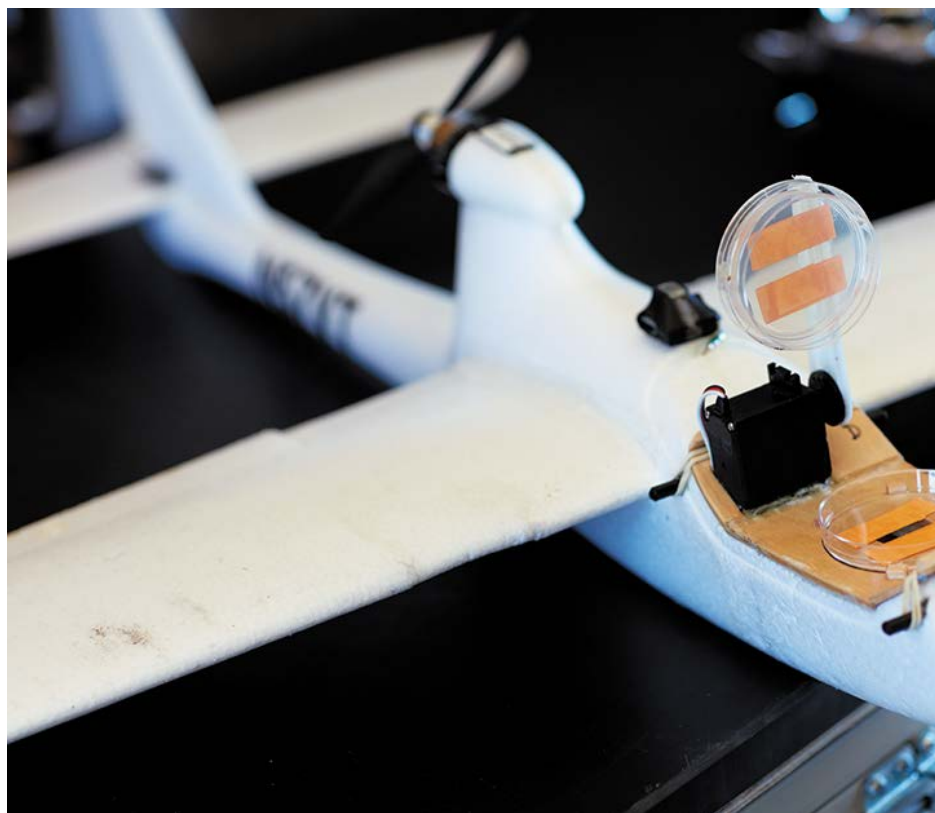
Pour y parvenir, nous avons d'abord eu l'idée de déployer une petite flotte aérienne constituée de drones. Ces aéronefs pilotés à distance sont équipés de dispositifs d'échantillonnage, afin de collecter et d'analyser les microorganismes de la basse atmosphère. Lors de chaque vol, nous récoltons une grande diversité d'organismes – dont beaucoup n'étaient pas bien étudiés ou étaient même inconnus. Grâce à ces prélèvements et à la mise au point de nouveaux outils informatiques, nous espérons reconstituer le processus de dispersion à grande échelle de ces microorganismes.

L'un des objectifs de ces travaux est de fournir aux acteurs du monde agricole des moyens de surveiller les microorganismes phytopathogènes dans l'air, de prévoir où ils pourraient se répandre, et donc d'identifier les champs à traiter ou à «mettre en quarantaine». Grâce ce type d'information, les agriculteurs pourront décider, en fonction des risques de contamination, quelles variétés de céréales planter ou quand pulvériser des produits phytosanitaires pour protéger leurs récoltes.

Nous avons concentré une grande partie de nos recherches sur un agent phytopathogène en particulier, *Fusarium graminearum*. Au cours des dernières décennies, ce champignon s'est dispersé plus loin et plus rapidement que jamais auparavant, en partie à cause du changement climatique et de certaines pratiques agricoles de conservation des sols, qui consistent à garder des résidus de culture dans les champs, ce qui permet à l'infection d'y prospérer d'une année à l'autre. Si le réchauffement climatique global se poursuit, de tels pathogènes étendront certainement leur zone d'influence au point de menacer l'approvisionnement alimentaire mondial en rendant impropres à la consommation de très grandes quantités de céréales.

DES TOXINES DANS VOTRE ALIMENTATION

Beaucoup de personnes ignorent à quel point les microorganismes phytopathogènes sont dévastateurs pour l'agriculture. L'une des maladies végétales, la fusariose des épis, décolore les épis de blé, d'avoine, d'orge, et d'autres céréales à petits grains. Plus grave, elle contamine les grains avec des composés toxiques, des mycotoxines. Lorsqu'elles sont ingérées en quantités suffisantes, ces mycotoxines provoquent notamment des vomissements chez les humains et le bétail. Or dans un champ contaminé, il n'est généralement pas possible de séparer les grains contenant ces toxines des grains sains. Il faut alors tester les récoltes moissonnées et les détruire si



elles contiennent des traces de toxines dépassant un certain seuil.

Dans le monde, différentes espèces de champignons du genre *Fusarium* provoquent une fusariose des épis. *Fusarium asiaticum* est depuis longtemps un problème en Chine centrale, d'où il a récemment commencé à se déplacer vers le nord. *Fusarium graminearum* est prédominant aux États-Unis, où il survit à l'hiver dans les résidus végétaux laissés au sol après la récolte de l'année précédente. Au printemps et à l'été, des structures fongiques, les périthèces, se développent sur ces résidus et libèrent des spores de *Fusarium* dans l'air. Ces spores se posent ensuite sur les anthères de blé et les soies de maïs. Elles germent et le champignon se développe dans la plante, ce qui conduit finalement à l'accumulation de mycotoxines dans les grains.

Ainsi, dans les années 1970, *Fusarium* a fait des ravages dans les cultures américaines de maïs, ce qui a provoqué une maladie chez de nombreux porcs (ces cas ont conduit à la découverte du désoxynivalénol, une mycotoxine qui entraîne chez les cochons des vomissements et les conduit à refuser de s'alimenter).

À cause du risque de contamination d'une variété de céréale à une autre, on déconseille souvent aux agriculteurs de planter du blé dans des champs immédiatement après que ces derniers ont été utilisés pour faire pousser du maïs ou d'autres céréales sensibles à la fusariose. De façon générale, la lutte contre la fusariose des



Les drones transportent des boîtes de Pétri spécialement adaptées que l'on peut ouvrir et fermer depuis le sol, de façon à pouvoir déterminer avec précision à quel endroit les microorganismes ont été collectés (ci-contre). Une spore de *Fusarium* capturée dans l'air a ensuite été isolée dans une nouvelle boîte de Pétri (ci-dessus) pour en étudier les propriétés.

épis est très onéreuse. Cette maladie a rendu la culture du blé de moins en moins rentable dans de nombreux États des États-Unis où l'on cultive traditionnellement cette céréale.

Pour mieux faire face à ces problèmes, nous avons voulu comprendre comment les microorganismes sont transportés dans l'atmosphère, parfois sur de longues distances. Dans une première étape, nous avons décidé de mesurer la distance que *F. graminearum* pouvait parcourir en 24 heures dans l'air depuis un champ infecté.

Avec le soutien du Programme américain contre la fusariose du blé et de l'orge, et du Comité des cultures céréalières de Virginie, nous avons mené une série d'expériences sur des champs de blé dans l'État de Virginie. Nous avons pris une souche particulière de *F. graminearum* dans une certaine zone et nous l'avons implantée ailleurs. Au préalable, nous l'avons caractérisée par séquençage de son ADN afin de la distinguer des autres souches déjà présentes dans les champs que nous allons étudier. Nous avons répandu des tiges de maïs infecté avec notre champignon-test sur une surface d'environ un demi-hectare. Et, à différentes distances du site initialement contaminé, nous avons placé au sol une série de boîtes de Pétri pour recueillir d'éventuelles spores de *Fusarium*.

Nous avons retrouvé des spores provenant de notre souche-test à presque un kilomètre de l'endroit où elles avaient été libérées. Mais

certaines spores ont peut-être voyagé bien plus loin : en effet, nous n'avions installé des boîtes de Pétri que dans un périmètre de un kilomètre de rayon.

Au lieu de continuer simplement à disperser des boîtes de Pétri sur le sol de plus en plus loin pour rechercher nos spores de *Fusarium*, nous avons décidé de rechercher des microorganismes dans l'air au-dessus des champs que nous étions en train d'étudier. Si les spores se dispersent assez haut, elles entrent dans des systèmes d'écoulements aériens complexes dont la dynamique est modélisée par les météorologues et qui peuvent les transporter très loin.

Nous avons entamé la recherche de microorganismes dans l'air en modifiant un certain nombre de drones. Nous les avons équipés de dispositifs d'échantillonnage pour recueillir et analyser en vol des microorganismes. Nous avons ainsi collecté certaines des spores de *F. graminearum* qui flottaient au-dessus de nos têtes en Virginie. L'analyse des données recueillies a montré que certains de ces champignons étaient en suspension dans l'air depuis plusieurs heures – assez longtemps pour être mis en mouvement par des systèmes atmosphériques de grande échelle, qui s'étendent sur des centaines de kilomètres.

DES MASSES D'AIR QUI SE HEURTENT À DES MURS

Il était donc crucial de bien comprendre la dynamique des masses d'air. Des travaux récents en mécanique des fluides et en météorologie ont mis en évidence le rôle primordial de « murs d'air » pour suivre la propagation de particules en suspension et ainsi déterminer la distance parcourue par ces champignons et l'endroit où ils risquent de se déposer. Techniquement, ces murs d'air invisibles et temporaires portent le nom de structures lagrangiennes cohérentes (SLC). Ils apparaissent quand différents flux d'air (ou tout autre fluide, d'ailleurs) entrent en collision ou circulent autour d'un obstacle, tel qu'une montagne ou l'aile d'un avion. Il se forme alors des lignes de séparation invisibles que ne franchissent pas les masses d'air, mais qu'elles vont suivre en emportant les microorganismes.

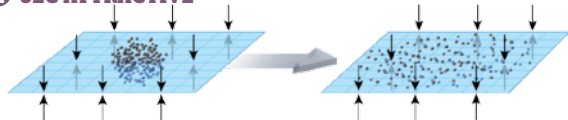
Les outils mathématiques qui décrivent ces structures lagrangiennes cohérentes relèvent de la théorie du chaos et d'une sous-discipline de la physique, celle des systèmes dynamiques non linéaires. En exploitant ces outils, il est possible de simuler les mouvements de l'air et des microorganismes qu'il transporte.

Ces murs d'air temporaires régissent aussi pour une bonne part la météo du quotidien. En outre, il a été montré comment les SLC guident ➤

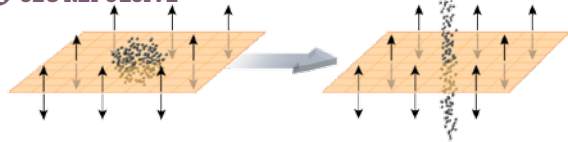
DES MURS D'AIR

L'écoulement de l'air, ou de tout autre fluide, crée certaines configurations (le jet-stream en est un exemple) dont la forme est influencée par des « murs » invisibles et temporaires, constitués par le fluide et nommés structures lagrangiennes cohérentes (SLC). Ces structures entrent dans deux catégories principales : les murs qui attirent les masses d'air (et toutes les particules qu'ils contiennent) et les murs qui repoussent les éléments d'air voisins. Les mathématiques qui régissent ces structures (représentées ci-dessous en bleu et en orange) déterminent si un ensemble de particules – des spores de champignons par exemple – se disperse le long de la surface du mur ou s'il forme une colonne de chaque côté de la SLC ②.

① SLC ATTRACTIVE

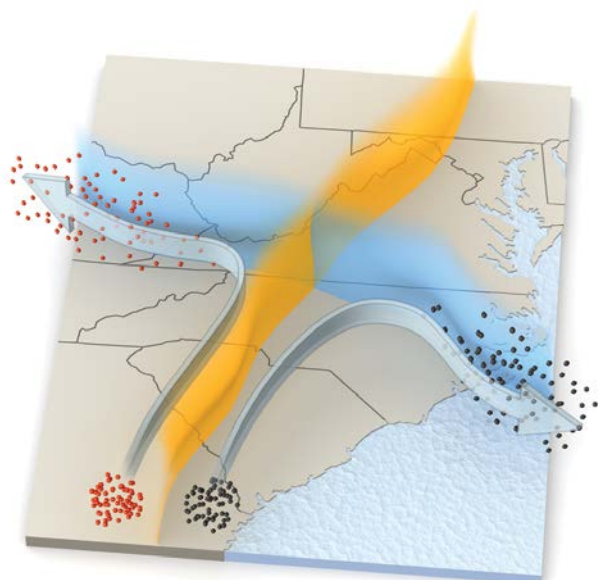


② SLC RÉPULSIVE



LES SLC CRÉENT DIFFÉRENTS MOTIFS DE FLUX D'AIR

L'intersection d'une SLC attractive (en bleu) et d'une SLC répulsive (en orange) crée un flux d'air particulier nommé point-selle. Dans l'exemple ci-dessous, deux groupes de particules, initialement assez proches l'un de l'autre mais de part et d'autre de la SLC répulsive, longent ce mur sans le traverser. En atteignant le point-selle, les particules se dispersent dans des directions opposées et se retrouvent à des centaines de kilomètres les unes des autres. Cette dynamique met en évidence le besoin de comprendre le rôle des SLC pour anticiper la dissémination de microorganismes transportés dans l'air.



> les vents qui alimentent des ouragans. À une échelle plus modeste, ces structures déterminent comment des agents phytopathogènes se dispersent en traversant une vallée et pourquoi, parfois, ils se posent sur une exploitation agricole particulière et pas sur la propriété voisine. En suivant l'évolution temporelle et spatiale des SLC, nous avons commencé à déterminer d'où les menaces microbiennes proviennent et vers quels endroits elles se dirigent. Quand nos programmes gagneront en fiabilité, les agriculteurs trouveront aussi utile de consulter nos prévisions microbiennes que les bulletins météorologiques!

DES AUTOROUTES ATMOSPHÉRIQUES

Les champignons du genre *Fusarium* sont loin d'être la seule menace pour les cultures et tous ces pathogènes font fi des frontières. Une souche du champignon responsable de la rouille noire du blé (Ug99) s'est répandue sur le continent africain et au Moyen-Orient à partir de son lieu d'origine en Ouganda à la fin des années 1990. Les cultivateurs en Australie et en Amérique du Nord s'inquiètent de son arrivée possible chez eux *via* des courants atmosphériques puissants et réguliers qui traversent, respectivement, l'océan Indien et l'océan Atlantique.

En 2004, la rouille du soja est arrivée aux États-Unis depuis l'Amérique du Sud, portée par l'ouragan Ivan. Depuis, elle passe l'hiver dans le sud des États-Unis et se déplace, à chaque saison de pousse, dans le Nord-Est et le Midwest, *via* des « autoroutes » aériennes. Plusieurs acteurs du monde agricole ont même créé un réseau de surveillance, à l'échelle nationale, de la propagation saisonnière de cet agent pathogène.

Pourtant, une grande partie de ces microorganismes ne devraient pas survivre pendant ces longs voyages dans l'atmosphère. Notamment, une exposition prolongée au rayonnement ultraviolet du Soleil devrait leur être fatale. Comment survivent-ils? En se fixant sur des particules de poussière, ils sont protégés de la lumière nocive.

Dale Griffin, de l'USGS (l'Institut américain d'études géologiques), et d'autres chercheurs ont étudié plusieurs de ces grandes voies de transport de la poussière reliant les différents continents. De fait, on estime que des centaines de millions de tonnes de poussière saharienne – et les microorganismes l'accompagnant – atterrissent en Floride chaque année. Hormis le fait qu'ils donnent lieu à des jours brumeux et à des couchers de soleil magnifiques, ces nuages de poussière provoqueraient de graves dégâts écologiques dans leur sillage.

Ainsi, plusieurs travaux récents suggèrent que les pathogènes responsables de la maladie du corail dans les Caraïbes – l'aspergillose des

gorgones (ou éventails de mer) en particulier – auraient été transportés dans de la poussière venue d'Afrique. Cela reste à confirmer, mais la désertification croissante du nord-ouest de l'Afrique accroît ce danger potentiel. En effet, de plus en plus de terres semi-arides se transforment en poussière, qui peut alors véhiculer un plus grand nombre de microorganismes.



Les microorganismes aériens favoriseraient des épisodes de grêle, de neige ou de pluie



Ces microbes ne font pas que propager des maladies en voyageant dans le ciel. Certains chercheurs suggèrent qu'ils influeraient aussi localement sur le temps en favorisant des épisodes de grêle, de neige ou de pluie. En règle générale, la formation d'un flocon de neige ou d'une goutte de pluie commence par la constitution de minuscules cristaux. Des gouttes d'eau ou des flocons se forment alors autour de ces microcristaux en fonction de certaines conditions, notamment la présence de particules, comme de la suie. Avec ces particules, l'eau gèle à des températures plus élevées que d'habitude (sans perturbation, l'eau pure peut rester liquide jusqu'à environ -38°C par le phénomène de surfusion).

CES MICROORGANISMES QUI FONT PLEUVOIR

En 1982, David Sands, de l'université d'État du Montana, et ses collègues ont avancé l'idée selon laquelle des microorganismes – à savoir la bactérie *Pseudomonas syringae* – pouvaient aussi servir de noyaux pour les cristaux de glace dans l'atmosphère. Dans des travaux ultérieurs, les chercheurs ont esquissé un mécanisme possible: certaines souches de *Pseudomonas syringae* produisent une protéine particulière à leur surface qui piège les molécules d'eau de telle façon qu'elles commencent à créer un réseau cristallin.

Au niveau du sol, les souches qui produisent ces protéines dites glaciogènes peuvent causer des dommages aux céréales en induisant un épisode de gel. Dans l'atmosphère, où la température est bien inférieure à 0°C , si une

quantité suffisante de ces bactéries et de leurs protéines glaciogènes est présente, un épisode de pluie ou de neige pourrait en découler.

Depuis les travaux précurseurs de David Sands, les chercheurs ont trouvé beaucoup de *Pseudomonas syringae* dans des échantillons de pluie et de neige. Il reste difficile de démontrer si ces microorganismes sont responsables du déclenchement des précipitations ou s'ils ne font que «suivre le mouvement». Des responsables de stations de ski n'ont pas attendu une réponse à cette question: un grand nombre d'entre eux utilisent des agents de nucléation de la glace vendus dans le commerce, qui contiennent des cellules de *Pseudomonas syringae*, pour fabriquer de la neige artificielle durant les journées d'hiver trop douces.

L'hypothèse de David Sands nous a incités à chercher d'autres microorganismes dans l'atmosphère qui déclencheraient des précipitations. David Schmale et ses collègues ont montré que les microorganismes associés à des précipitations sont beaucoup plus divers qu'on ne le pensait. En Virginie, Boris Vinatzer et David Schmale ont collecté de nombreux types de bactéries et de champignons dans l'atmosphère et dans des précipitations, qui pourraient servir d'agents de nucléation de la glace, au moins d'après des résultats en laboratoire. Et ces microorganismes qui «font la pluie» varieraient d'une région à une autre.

En combinant les informations sur la biodiversité locale, sur le mouvement des microorganismes dans l'air et sur les mécanismes de nucléation, nous pourrions mieux anticiper certains épisodes de précipitation. Et, au-delà de l'aspect prédictif, nous pourrions finalement utiliser certains de ces microorganismes pour faire pleuvoir dans les régions arides ou frappées de sécheresse.

Jusqu'à présent, nous nous sommes surtout intéressés aux processus qui se déroulent au-dessus de la terre ferme. En combinant nos résultats sur les microorganismes contenus dans les gouttelettes d'eau et nos calculs sur les structures lagrangiennes cohérentes, nous voulons décrire ce qui se passe dans l'air au-dessus de la surface des lacs, des rivières et des océans.

Nous avons déjà commencé à collecter des microorganismes au-dessus de l'eau en utilisant des flottes de bateaux sans pilote et des drones aériens. La situation à décrire est plus complexe mathématiquement, car les équations doivent tenir compte du mélange de l'air chargé en microorganismes et de l'eau provenant des embruns, de vagues déferlantes et même des éclaboussures de la pluie. Cependant, comme l'eau recouvre environ 70 % de la planète, nous sommes certains que ce que nous trouverons nous révélera de nouveaux éléments fascinants sur la façon dont les microorganismes parcourent le globe. ■

BIBLIOGRAPHIE

D. G. Schmale III et S. D. Ross, **Highways in the sky : Scales of atmospheric transport of plant pathogens**, *Annual Review of Phytopathology*, vol. 53, pp. 591-611, 2015.

L. E. Ogden, **Life in the clouds**, *BioScience*, vol. 64(10), pp. 861-867, 2014.

T. Peacock et G. Haller, **L'ordre caché des écoulements chaotiques**, *Pour la Science*, n° 434, décembre 2013.

Aristote contemplant le buste d'Homère (1653). Cette peinture de Rembrandt rassemble deux des grands Anciens auxquels la plupart des Modernes se réfèrent encore au XVII^e siècle.



L'ESSENTIEL

> On a longtemps vu le XVII^e siècle comme celui d'une grande révolution scientifique qui aurait donné naissance à la science moderne.

> Mais depuis quelques années, les historiens des sciences commencent à prendre en compte l'omniprésence de l'Antiquité dans le discours des savants de l'époque.

> Entre Modernes convaincus, tel Descartes, et Modernes respectueux des Anciens, la querelle est âpre non seulement en art et en littérature, mais aussi en sciences.

> Nombre de savants que l'on croyait porteurs de la révolution se révèlent très hésitants à larguer les amarres ancestrales.

L'AUTEUR



PASCAL DURIS
professeur
en épistémologie
et histoire des sciences
à l'université
de Bordeaux

Pas si Modernes...

Y A-T-IL EU UNE RÉVOLUTION SCIENTIFIQUE AU XVII^e SIÈCLE ?
HORMIS DESCARTES ET SES PARTISANS, AUCUN SAVANT DE L'ÉPOQUE
NE PERCEVAIT SON ŒUVRE COMME TELLE, BIEN AU CONTRAIRE.
L'ÉMANCIPATION DES MODERNES VIS-À-VIS DU POIDS
DES ANCIENS S'EST FAITE AU PRIX D'UNE LONGUE BATAILLE.

Au XVII^e siècle, le nombre d'ouvrages scientifiques proclamant la nouveauté de leur contenu est impressionnant : *Astronomia nova* (1609), de Johannes Kepler, *Novum Organum* (1620), de Francis Bacon, *Nouvelles conjectures sur la digestion* (1636), de Marin Cureau de La Chambre, *Discours et démonstrations mathématiques concernant deux sciences nouvelles* (1638), de Galilée, *Expériences nouvelles touchant le vuide* (1647), de Blaise Pascal, *Opuscula anatomica nova* (1649), de Jean Riolan, *Methodus plantarum nova* (1682), de John Ray, *Traité de plusieurs nouvelles machines et inventions extraordinaires sur différents sujets* (1698), de Denis Papin, et tant d'autres. Pendant longtemps, les historiens des sciences ont ainsi vu le XVII^e siècle comme celui de la nouveauté scientifique, celui qui voit l'émergence en Europe occidentale de la science moderne, c'est-à-dire d'une science expérimentale et quantitative, se libérant de l'autorité des Anciens et de la Bible, et guidée par la raison, à la fois graine et fruit d'une révolution scientifique sans précédent.

Pour Alexandre Koyré – le premier d'entre eux, dans les années 1930, à proposer cette notion de révolution scientifique –, celle-ci, caractérisée par une « mathématisation de la nature », s'étend des travaux de Copernic à ceux de Newton. Copernic et Galilée ont détruit le cosmos géocentrique grec et anthropocentrique médiéval. Et avec Descartes et Newton, l'espace s'est géométrisé.

UNE RÉVOLUTION SCIENTIFIQUE ?

Il est difficile de contester l'émergence, à cette époque, de nouvelles représentations du monde et de l'homme. Pourtant, quand on examine les écrits des savants du Grand Siècle, on constate qu'aucun, à l'exception de Descartes et de ses partisans – et dans une moindre mesure Bacon et Galilée – ne pense son œuvre ou celle de ses contemporains en termes de rupture. Leibniz en désapprouve même entièrement l'idée le 15 avril 1673, dans une lettre au père Huet : « Comme si on avait besoin d'une grande reconstruction, à en croire Bacon, ou d'une table rase, à en »