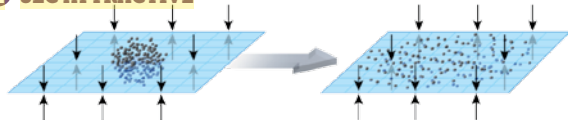


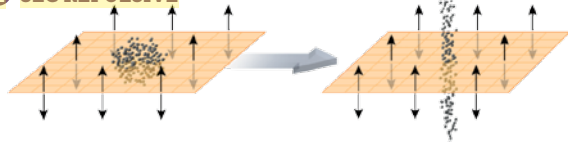
DES MURS D'AIR

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

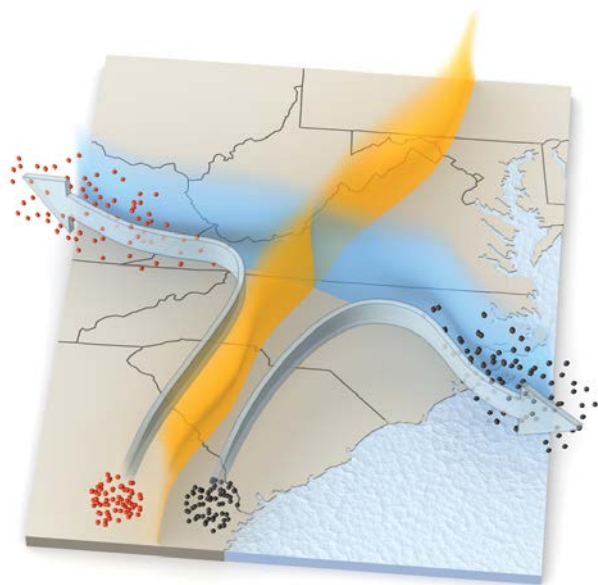


2 SLC RÉPULSIVE



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.