



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 allions 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.

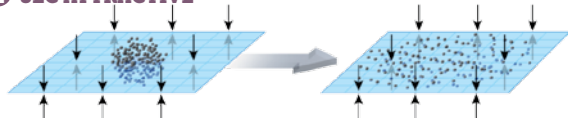
Les outils mathématiques qui décrivent ces structures lagrangiennes cohérentes relèvent de la théorie du chaos et d'une sous-discipline de la physique, celle des systèmes dynamiques non linéaires. En exploitant ces outils, il est possible de simuler les mouvements de l'air et des microorganismes qu'il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

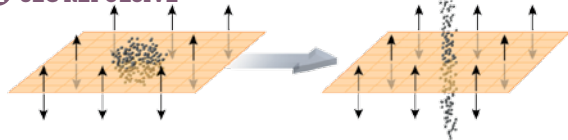
DES MURS D'AIR

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

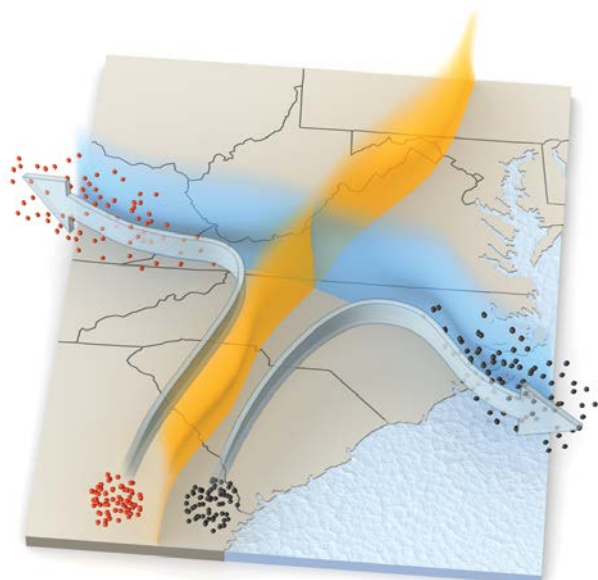


② SLC RÉPULSIVE



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