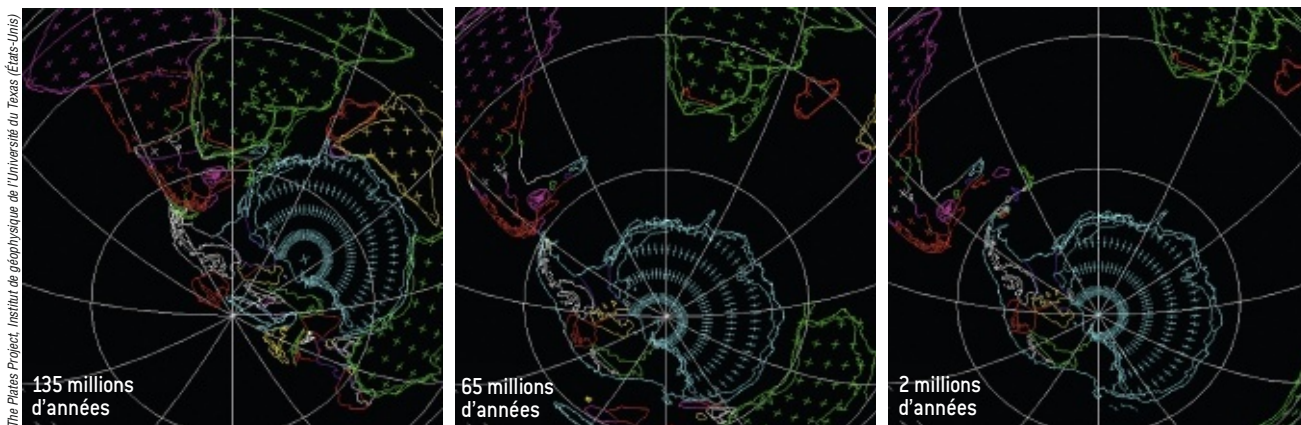
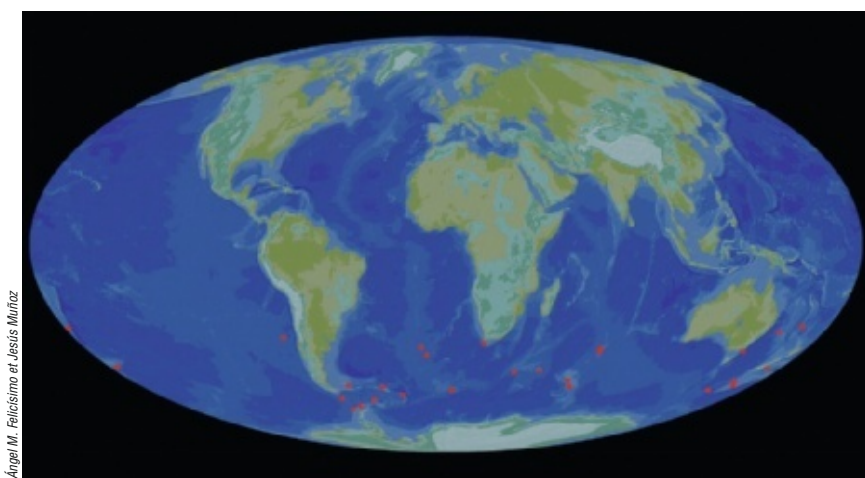




1. IL Y A 135 MILLIONS D'ANNÉES, les actuels continents de l'hémisphère Sud, réunis en un supercontinent nommé Gondwana, ont commencé à se séparer. La plaque correspondant aujourd'hui à l'Inde était réunie à Madagascar, à l'Afrique et à l'Antarctique. Ces deux derniers continents ont commencé à se séparer il y a environ 120 millions d'an-

nées. Puis ce fut le tour de l'Inde et de Madagascar, il y a quelque 85 millions d'années. Selon l'hypothèse de la vicariance, la similarité floristique de deux régions est inversement proportionnelle au temps écoulé depuis leur séparation géologique : faute d'échanges génétiques entre les populations, celles-ci évoluent de façon indépendante.



2. L'ANALYSE EFFECTUÉE PAR LES AUTEURS porte sur la répartition de plantes appartenant à quatre groupes botaniques et prend en compte 27 localités (en rouge) de l'hémisphère Sud.

séparation remonte loin dans le temps, plus la flore de ces régions a eu de possibilités d'évoluer et de se singulariser.

L'hypothèse de la « dispersion à longue distance » sous-entend que certaines espèces sont transportées par le vent jusqu'à des milliers de kilomètres de leur zone d'origine. Ce processus rendrait possible la colonisation de lieux très éloignés les uns des autres. Il s'applique aux espèces dont les éléments sont légers ou peuvent se propager grâce à de petits fragments – des propagules (pour une reproduction non sexuée), graines ou spores (pour une reproduction sexuée). Les végétaux aux graines lourdes ou volumineuses sont exclus de ce mode de dispersion.

Comment le vent agit-il ? Son efficacité pour relier des régions distantes dépend de sa vitesse et de sa direction. Deux lieux

éloignés peuvent être raccordés s'il existe un flux d'air intense et direct d'un de ces lieux à l'autre. Cela expliquerait la présence d'espèces communes dans des endroits qui n'ont jamais été proches géographiquement. À l'inverse, deux régions proches peuvent se retrouver isolées si aucun vent direct ne souffle de l'une vers l'autre.

La grande différence entre l'hypothèse de la vicariance et celle de la dispersion à longue distance sous l'effet du vent est d'ordre temporel. L'hypothèse de la vicariance part de l'idée que la répartition des espèces dépend, par essence, d'un processus historique s'étalant sur des millions d'années. D'après celle de la dispersion à longue distance, ce sont des mécanismes récents qui expliquent le mieux cette répartition : la similitude floristique serait étroitement liée aux schémas actuels de circulation des vents.

Selon l'« hypothèse géodésique », enfin, la ressemblance floristique entre deux lieux serait inversement proportionnelle à la distance qui les sépare. Ces distances varient en fonction de la dérive des continents, d'où une prise en compte du facteur historique. L'hypothèse géodésique ne nie pas le rôle du vent, mais elle considère pour acquis que la résultante des flux n'a pas de direction privilégiée : à plus ou moins long terme, le vent relie tout avec tout, de sorte que la probabilité de propagation d'une espèce ne dépend plus que de la distance.

Les deux premières hypothèses, celle de la vicariance et de la dispersion à longue distance, font débat depuis des décennies. La troisième est plus récente – elle date de 2001 – et ne bénéficie pas du recul nécessaire. Nous avons donc cherché à vérifier si l'une de ces hypothèses pouvait expliquer la similitude floristique observée sur un ensemble de régions de l'hémisphère Sud très éloignées les unes des autres.

Une analyse statistique

Il s'agissait d'établir scientifiquement la vraisemblance de ces hypothèses sur des bases statistiques, en confrontant les données d'observation aux données théoriques, c'est-à-dire aux résultats pressentis pour chaque hypothèse.

La zone que nous avons choisie pour notre analyse s'étend entre la côte du continent Antarctique et le 30° degré de latitude Sud. Elle représente environ 25 pour cent de la superficie de la Terre, que les océans recouvrent à 70 pour cent. Nous avons

sélectionné 27 sites pour lesquels nous disposons d'un nombre suffisant de données biologiques. Certains sont situés sur la partie continentale, mais la plupart sont constitués d'îles océaniques.

L'hémisphère Sud offre un cadre d'expérimentation privilégié, car on y trouve des zones géologiques d'âges très divers. Certaines, très anciennes, ont fait partie du Gondwana ; d'autres, plus récentes, sont nées de l'activité volcanique ou de mouvements tectoniques. Ces lieux sont également isolés, ce qui élimine toute possibilité de transport par étapes, scénario qui aurait beaucoup nui à la pertinence de notre test.

Quatre groupes de plantes testés

Nous avons choisi quatre groupes taxonomiques bien représentés dans cette zone : les mousses, les hépatiques, les lichens et les fougères (voir la figure 4). Les bryophytes (mousses et hépatiques) ainsi que les lichens ont la capacité de se disperser et se multiplier par propagules non sexués. Ce mode de reproduction asexuée facilite la colonisation, car même de minuscules propagules peuvent être viables si les conditions climatiques et la nature du sol sont, sur le lieu de destination, favorables. De plus, les propagules résistent mieux que les spores aux conditions environnementales difficiles dans lesquelles peut se produire la dispersion (basses températures et intense rayonnement ultraviolet).

Les fougères, elles, se disséminent par l'intermédiaire de spores. Ce mode de diffusion complique beaucoup la colonisation, car pour clore le cycle de reproduction, deux gamétophytes de sexe distinct doivent coïncider dans l'espace et dans le temps.

Nous avons collecté et traité quatre types de données : biologiques, géologiques, éoliennes et géographiques. Les données biologiques sont constituées par des listes de présence (ou d'absence) d'espèces. Elles ont été élaborées en prenant en compte la bibliographie existante et en interrogeant les experts. À partir du nombre d'espèces communes, ou non, une matrice de similarité floristique a été élaborée pour chaque groupe taxonomique. Une telle matrice est un tableau dont chaque élément est un nombre, un indice qui représente la similarité floristique entre deux des 27 sites

considérés. La fiabilité des indices de similarité floristique dépend, entre autres, du nombre d'espèces retenues. Dans le cas de notre étude, 1851 espèces ont été prises en compte : 601 mousses, 461 hépatiques, 597 lichens et 192 fougères.

Les données géologiques correspondent au temps qui s'est écoulé depuis la séparation des deux sites sous l'effet de la dérive des continents. L'indice de similarité géologique est inversement proportionnel à ce temps. Des valeurs proches de 0 indiquent une séparation ancienne (dans notre cas, environ 135 millions d'années). Des valeurs proches de 1 témoignent d'une séparation récente. Aux îles volcaniques qui n'ont jamais fait partie du Gondwana a été attribué un temps de séparation infini (l'indice de similarité géologique est nul). Si l'hypothèse de la vicariance était confirmée, la matrice de similarité géologique serait étroitement corrélée aux matrices de similarité floristique.

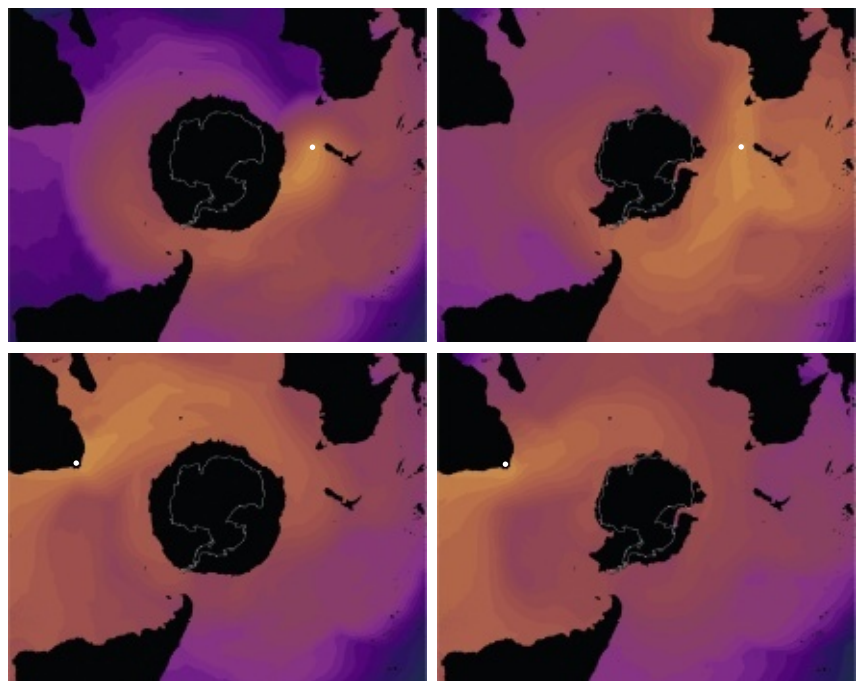
Pour tester l'hypothèse de la dispersion par le vent, il est nécessaire de calculer le degré de connectivité éolienne entre deux sites. Les données de base ont été fournies par le satellite QuikSCAT, lancé par la NASA en juin 1999 et qui a cessé de

LES AUTEURS



Ángel Manuel FELICÍSIMO travaille au Département d'expression graphique de l'Université d'Estrémadure, en Espagne.

Jesús MUÑOZ est botaniste au Jardin botanique royal de Madrid, ainsi que chercheur associé au Jardin botanique du Missouri à Saint-Louis [États-Unis].



3. DES MODÈLES DITS DE CONTRAINTÉ déterminent la résistance à vaincre, compte tenu des vents, pour aller d'un point à un autre du globe. Plus cette contrainte est faible, plus les deux points en question sont reliés par le vent (connectivité éolienne élevée). Ces images indiquent la connectivité éolienne des points de l'hémisphère Sud par rapport à un point (en blanc) correspondant aux îles Auckland (en haut) ou à l'Afrique du Sud (en bas), mi-novembre 2003 (images de gauche) et mi-janvier 2004 (images de droite). La connectivité varie entre 0 (en bleu foncé) et 1 (en orange). Le noir correspond aux régions terrestres ou recouvertes de glace.

Ángel M. Felicísimo et Jesús Muñoz



4. QUATRE GROUPES BOTANIQUES ont servi de base à l'étude des auteurs sur la répartition des espèces végétales : les fougères [a], les hépatiques [b], les lichens [c] et les mousses [d]. Les fougères se propagent par des spores, les hépatiques, lichens et mousses se disséminent surtout par l'intermédiaire de petits fragments végétaux nommés propagules.

✓ BIBLIOGRAPHIE

Á. M. Felicísimo *et al.*, **FORCLIM**, *Bosques y cambio global*, Programa CYTED, Madrid, Bubok Publishing S. L., 2011.

Á. M. Felicísimo *et al.*, *Ocean surface winds drive dynamics of transoceanic aerial movements*, *PLoS ONE*, vol. 3[8], e2928, 2008.

J. Muñoz *et al.*, *Wind as a long-distance dispersal vehicle in the southern hemisphere*, *Science*, vol. 304, pp. 1144-1147, 2004.

A. C. M. Stoffelen, *Scatterometry*, Electronic Theses and Dissertations, Université d'Utrecht, 1998. <http://igitur-archive.library.uu.nl/dissertations/01840669/inhoud.htm>

J. M. Bullock *et al.*, *Dispersal Ecology*, Blackwell, 2002.

Mission *QuikSCAT* de la NASA/JPL : <http://winds.jpl.nasa.gov>

fonctionner en 2009. *QuikSCAT* embarquait le capteur *SeaWinds*, qui mesurait l'intensité et la direction des vents océaniques. Depuis son orbite, à 803 kilomètres d'altitude, ce diffusomètre émettait des impulsions de micro-ondes à une cadence élevée (voir l'encadré page 45). Plus la vitesse du vent est grande, plus la mer est agitée et rugueuse. Or une surface rugueuse diffuse davantage les signaux micro-ondes qu'une surface lisse. L'intensité de l'écho reçu par *SeaWinds*, qui dépend donc de la rugosité de la surface marine, permet alors d'estimer la vitesse du vent.

Ces données, traitées par le Laboratoire de propulsion spatiale (JPL) de la NASA, sont mises gratuitement à la disposition de la communauté scientifique sur Internet. Les données étant recueillies quotidiennement, la résolution temporelle est excellente. La résolution spatiale est de 25 kilomètres. En raison des trajectoires du satellite, certaines zones océaniques en forme de fuseau, orientées Nord-Sud, ne sont pas couvertes. Mais cet inconvénient peut être surmonté en combinant les données de plusieurs jours consécutifs.

Nous avons utilisé toutes les données éoliennes disponibles au moment de

notre étude, c'est-à-dire presque quatre années d'informations quotidiennes, de juin 1999 à mars 2003. Nous avons ensuite continué la collecte et ajouté des données tous les six mois.

Les données éoliennes ne permettent pas de calculer directement les valeurs de connectivité entre les lieux étudiés. Il faut pour ce faire calculer des modèles de contrainte anisotrope. De quoi s'agit-il ?

Un modèle de contrainte se présente sous la forme d'une carte où à chaque point est associée une valeur exprimant la contrainte ou la résistance à vaincre pour aller d'un point fixé au point considéré (voir la figure 3). En l'absence de vent, la contrainte est isotrope : l'effort est indépendant de la direction du mouvement. En présence de vent, elle est anisotrope et dépend de la vitesse et de la direction du vent en chaque point, ainsi que de leurs variations au fil du temps. L'effort total est égal à la somme des efforts correspondant à chacun des petits tronçons qui composent le parcours. Il peut être supérieur ou inférieur à la situation de contrainte isotrope, correspondant à l'absence de vent : le vent peut en effet s'opposer au mouvement ou le faciliter.

Évaluer la connectivité éolienne

Sur ce principe, nous avons estimé le degré de connectivité éolienne entre les lieux étudiés. Nous avons calculé les modèles de contrainte entre chacun des 27 sites d'origine possibles et le reste des localités. Pour ce faire, nous avons utilisé un système d'information géographique, en répétant l'analyse à dix jours d'intervalle durant près de quatre ans. Nous avons ainsi obtenu 139 ensembles de 27 modèles de contraintes, chacun de ces modèles indiquant, pour la décade considérée, le degré de connectivité éolienne entre chacune des 27 localités et les 26 autres.

À partir de la série temporelle constituée par les 139 ensembles, nous avons construit une matrice qui rassemble les valeurs maximales de connectivité observées pour chaque paire de sites, pour la période allant de 1999 à 2003. Enfin, nous avons calculé les distances géographiques entre les 27 localités de l'étude. Ces données ne posent pas de difficultés particulières, elles sont déterminées par des formules géodésiques simples et bien connues.