



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.

Pour résumer, nous avons obtenu sept matrices mesurant la similarité entre les 27 localités étudiées. Quatre matrices traduisent la similitude floristique (une matrice pour chacun des quatre groupes botaniques considérés). Une cinquième correspond à la similitude géologique, sur laquelle s'appuie l'hypothèse de la vicariance. Une sixième matrice synthétise la connectivité éolienne sur la période allant de 1999 à 2003 (en liaison avec l'hypothèse de dispersion à grande distance par le vent). Enfin, une septième matrice exprime la proximité géographique entre les 27 sites (en liaison avec l'hypothèse géodésique).

L'étape suivante de notre analyse a consisté à mesurer la corrélation, ou degré d'association, entre les matrices de simila-

rité floristique et celles qui correspondent à chacune des trois hypothèses proposées pour expliquer la répartition des végétaux.

Cette corrélation a été mesurée à l'aide d'une technique statistique comportant deux étapes (nommées positionnement multidimensionnel et analyse procustéenne). Sans entrer dans les détails, l'analyse statistique fournit *in fine* une valeur P comprise entre 0 et 1 qui mesure le caractère aléatoire du lien entre les deux matrices comparées. Autrement dit, plus la valeur de P est petite, plus les deux matrices en question sont corrélées. Par exemple, une valeur $P = 0,005$ signifie que la probabilité que la corrélation observée entre les deux matrices soit due au hasard, et non à un lien réel, est de 0,5 pour cent.

Cette analyse a été appliquée pour comparer les matrices de similarité floristique avec celle des temps de séparation géologique, celle de la connectivité éolienne maximale et celle des distances géographiques.

Les résultats montrent que l'hypothèse de la dispersion à longue distance par les vents est la plus vraisemblable. En effet, la corrélation de la similarité floristique avec la connectivité éolienne est toujours supérieure à la corrélation avec les temps de séparation géologique ou avec les distances géographiques. C'est seulement dans le cas des fougères que la distance géographique montre une signification statistique équivalente (voir l'encadré page 46).

COMMENT MESURER LES VENTS OCÉANIQUES

Un diffusomètre est un radar qui permet de mesurer le vent en envoyant des impulsions électromagnétiques micro-ondes sur la surface de la mer et en enregistrant l'intensité de l'écho qui revient. La diffusion des ondes par la mer dépend

de la rugosité de sa surface, elle-même liée à la vitesse du vent. Ainsi, l'intensité de l'écho capté, qui dépend de cette rugosité, permet d'estimer la vitesse du vent à l'instant où est effectuée la mesure.



Le satellite QuikSCAT

Un laboratoire spatial

Les données diffusométriques ont été fournies par le satellite QuikSCAT lancé par la NASA le 19 juin 1999. Il embarquait SeaWinds, un capteur qui mesurait la vitesse et la direction du vent à la surface des océans. Ce type de données met en évidence les interactions entre l'atmosphère et la mer, les courants océaniques et les phénomènes météorologiques cycliques tels que El Niño.

Grâce à son antenne parabolique tournante, SeaWinds balayait l'océan en envoyant des impulsions électromagnétiques de 13,4 gigahertz [dans le domaine des micro-ondes], à une cadence de 189 impulsions par seconde et avec une puissance de 110 watts.

Les vaguelettes engendrées par le vent à la surface de la mer réfléchissent l'onde radar en la diffusant. De la mesure de cette rétrodiffusion sont déduites la vitesse et la direction du vent en surface. Les vents sont estimés avec une incertitude de 2 mètres par seconde pour la vitesse et de 20 degrés pour la direction ; la résolution spatiale est de 25 kilomètres.

Plus la vitesse du vent est élevée, plus la rugosité de la surface de la mer est importante et moins l'écho reçu par le capteur sur le satellite est intense.

Écho renvoyé par la surface de la mer

Impulsion micro-onde émise

Les nuages n'arrêtent pas les micro-ondes. Le diffusomètre peut donc opérer dans des conditions météorologiques très diverses et à n'importe quel moment de la journée ou de la nuit.