

**Comment prévoir un réseau écologique, une trame verte et bleue, adaptée aux déplacements d'espèces liés au changement climatique. La réflexion menée sur la côte pacifique des USA et du Canada propose une modélisation basée sur les conditions actuelles de climat et d'occupation du sol pour identifier des corridors permettant aux espèces de rejoindre une tache d'habitat un peu plus froide que celle où elles sont en minimisant les écarts de température à traverser.**

Analyse de l'article « Connectivity planning to address climate change »

T.A. NUNEZ; J. LAWLER, B. H. Mc RAE, D. J. PIERCE, M.B. KROSBY, D.M. KAVANAGH, P.H. SINGLETON, J.T. TEWKSBURY,

Conservation Biology, 2013, 27 (2) : 407-416.

lien : <http://www.skyislandalliance.org/misc/workshop2011/Nunez-et-al-2013.pdf>

DOI: 10.1111/cobi.12014

### **Intérêt de cet article pour la Trame Verte et Bleue :**

Parmi les objectifs de la Trame verte et bleue, l'adaptation de la biodiversité au changement climatique est un enjeu d'avenir important. Cependant peu de connaissances permettent pour l'instant d'identifier comment il faut concevoir les corridors pour permettre la migration des espèces vers des milieux qui leur seront favorables à l'avenir. Parmi les pistes connues, il y a la modélisation du climat futur et la simulation des besoins des espèces mais qui nécessitent beaucoup de connaissances sur les espèces et qui est porteuse de beaucoup d'incertitudes liées aux modèles climatiques. Une autre voie est de considérer que les espèces vont migrer plus au nord ou plus en altitude pour trouver des conditions plus fraîches et donc d'essayer de « forcer » les modèles d'identification des corridors pour répondre à ces attentes (idée portée par un outil de modélisation comme Circuitscape).

La méthode proposée ici est originale et intéressante car elle se base sur les conditions actuelles de climat et ne cherche pas à simuler leur évolution. Elle part de l'hypothèse que si une espèce vit dans milieu dont la température moyenne actuelle est  $X$  °C si on applique un réchauffement probable de 1°C d'ici 2080, l'espèce aura besoin d'un nouveau milieu à  $X$ °C en 2080, donc d'une zone dont la température est actuellement de  $(X-1)$  °C (puisque le milieu d'origine de l'espèce sera lui passé en 2080 à  $(X+1)$  °C. Le modèle cherche donc à relier ces deux taches qui sont actuellement à  $X$ °C et à  $(X-1)$  °C en passant par des secteurs où la température est le plus proche possible de  $X$ °C.

### **Synthèse de l'article<sup>1</sup> :**

Dans le passé, les espèces se sont déplacées sur de longues distances pour s'adapter aux modifications de climat. La rapidité du changement climatique contemporain va nécessiter des déplacements rapides des espèces au XXI<sup>ème</sup> siècle alors que des barrières dues à l'activité humaine seront rencontrées par les espèces ce qui n'était pas le cas dans les changements passés. C'est pourquoi maintenir la connectivité est la stratégie la plus recommandée pour conserver la diversité des espèces dans un contexte de changement climatique. Cependant les modèles traditionnels de connectivité ne peuvent pas identifier les zones nécessaires aux espèces pour leur permettre de suivre les impacts sur leurs habitats liés au changement climatique. C'est pourquoi cet article se concentre sur la connectivité qui permettra les mouvements vers de nouvelles zones favorables suite au changement de climat via des zones également adaptées aux espèces. Afin d'identifier les corridors, des patrons spatiaux de température et d'usage du sol sont pris en compte et non des modélisations de l'habitat spécifique des espèces. Bien que basés sur des espèces de faune terrestre non volantes, les corridors identifiés par cette méthode peuvent être pertinents aussi pour d'autres groupes.

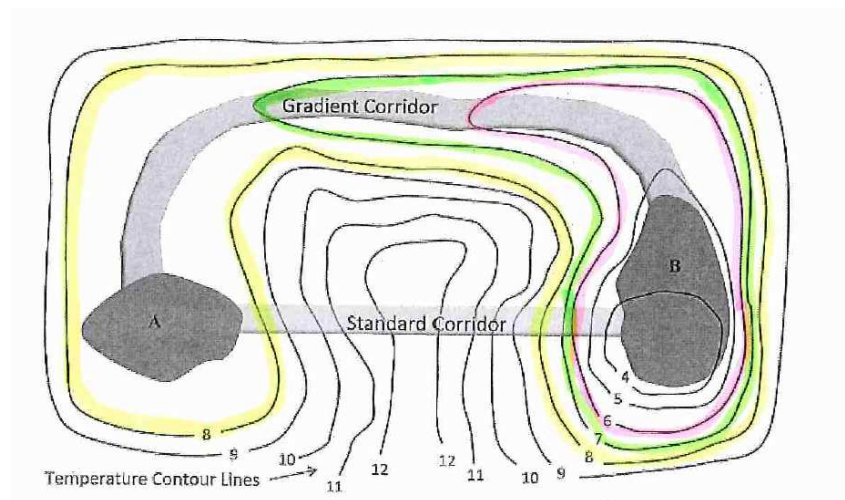
Le modèle de connectivité développé afin de tenir compte du changement climatique se base sur plusieurs suppositions :

- que la distribution des espèces dépend de la température,
- que le gradient spatial de température va être maintenu dans ses orientations géographiques au cours du changement climatique (c'est-à-dire qu'il fera toujours plus frais en altitude en altitude qu'en plaine par exemple),
- que les espèces contraintes par les barrières créées par l'homme sont plus répandues dans



- les grandes régions naturelles
- si des taches naturelles de différentes températures sont reliées le long de gradients climatiques, les espèces y vivant peuvent se déplacer vers les zones de climat proche et continuer à occuper le même espace de température. Il est donc supposé que dans ces taches des conditions d'habitat favorable existent (composition du sol, humidité).
- que les espèces ont un meilleur succès de dispersion dans les zones les moins modifiées par les humains et à travers des secteurs où la transition de température est la plus faible d'une tache à l'autre.

Pour appliquer ce modèle, des paires de taches de forte naturalité sont identifiées afin que si elles sont connectées, elles puissent permettre aux espèces de migrer de taches réchauffées vers des taches plus fraîches. Des corridors sont ensuite définis entre ces paires de taches par une modélisation de coût-distance qui évite les écarts importants de température ainsi que des zones de forte perturbation anthropique. Les corridors vont aussi ne pas traverser directement des zones de forte variation de température mais « suivre » des lignes de températures proches (voir figure : le corridor standard passe d'une tache A à 8°C à une tache B à 5°C en passant par des milieux jusqu'à 12 °C alors que le corridor selon le gradient de température passe de A à B en traversant une zone à 7 et 6 °C.



## Méthode

### La zone d'étude :

Elle est située de l'Etat de Washington, l'Idaho et l'Oregon aux USA et jusqu'à la Colombie Britannique au Canada (bordure de l'océan pacifique). Elle couvre un fort gradient de température et d'humidité ainsi que d'utilisation du sol.

Sur cette zone des modèles climatiques prévoient une augmentation moyenne de température de 3,0°C d'ici 2080 et une augmentation des précipitations de 1 à 2 %.

### Les surfaces de résistance pour les températures et la naturalité du paysage :

Dans cette région, le gradient des températures moyennes annuelles est retenu car il est fortement corrélé à d'autres paramètres plus pertinents d'un point de vue écologique comme le degré jour de croissance, la température moyenne du mois le plus froid et déficit hydrique. Le modèle de température est décliné à l'échelle de 1 km<sup>2</sup> avec comme base la période 1971-2000.

L'index d'intégrité paysagère (naturalité) est utilisé comme une mesure de la résistance induite par l'usage du sol par l'homme aux flux écologiques. Il est calculé sur des pixels de 100 m de côté et est basé sur des données de couverture du sol, de densité de population humaine et proximité de chaque pixel à une route. La valeur maximum de résistance pour le milieu le plus défavorable aux déplacements des espèces est fixé à 100.

Afin de croiser les données climatiques et les données de naturalité, ces dernières sont agrégées pour former des cellules d'1 km<sup>2</sup> (affectées de la valeur moyenne de l'ensemble des cellules initiales). En fait ce n'est pas un index de naturalité qui est utilisé mais son inverse, l'index de résistance au mouvement.

Après avoir testé différentes valeurs maximales d'index de résistance, en regardant si les corridors produits évitent bien les zones urbaines, agricoles et à forte densité de routes, la valeur maximum de résistance de

100 a été retenue comme la plus pertinente pour identifier le réseau de corridors.

#### Identifier et relier les taches :

348 taches ont été identifiées<sup>2</sup> comme points focaux de la planification de la connectivité. Ces taches ont été délimitées en identifiant toutes les zones contiguës de plus de 4047 ha constituées de couvert naturel, non traversées par une route importante et avec un score d'intégrité paysagère important pour la région. Toutes les paires de taches qui sont distantes de moins de 50 km et pour lesquelles la moyenne annuelle de la zone la plus froide de la tache diffère d'au moins 1°C de la zone la plus froide de l'autre, sont reliées.

La température la plus froide de la tache est en effet jugée une variable plus pertinente comme règle de liaison entre taches que la température moyenne de la tache. Elle permet en effet de mieux vérifier que la tache continuera à assurer des conditions de température favorables aux espèces. Le choix est fait de ne relier que des taches différant d'un moins 1°C entre zones les plus froides afin d'être certain que le corridor identifié pourra assurer une zone thermiquement favorable pour les espèces. La variation mesurée de 0,76 °C de réchauffement au cours du XX<sup>ème</sup> siècle a déjà provoqué des mouvements d'espèces (faune et flore), ce seuil de 1°C est donc peut être un peu élevé.

La distance euclidienne<sup>3</sup> de bord à bord de tache de 50 km est retenue car dans la région d'étude elle permet la liaison de toutes taches avec au moins une autre en satisfaisant aux conditions de différence de température. Chaque tache est reliée à ses 3 plus proches voisins en utilisant la distance de coût définie ci-dessous (et non la distance euclidienne).

#### Cartographier les corridors :

La modélisation coût-distance est utilisée pour cartographier les corridors avec comme donnée d'entrée, avec une valeur de coût de résistance associée à chaque cellule du territoire. Les corridors sont cartographiés de manière à maintenir un changement unidirectionnel de température entre taches, c'est pourquoi à la fois l'intégrité du paysage et le gradient de température sont utilisés. En étape intermédiaire une modélisation est faite sans prendre en compte l'usage du sol afin de montrer ce que seraient les corridors si l'on prenait uniquement en compte le gradient de température.

Le coût-distance standard est appliqué de la même manière quelque soit le sens dans lequel le pixel est traversé (il est dit isotrope). Ceci est approprié pour prendre en compte l'effet de l'usage du sol mais pas pour prendre en compte un déplacement orienté dans une direction précise par le changement climatique. C'est pourquoi un coût distance directionnel (anisotropique) est ajouté dans cette étude. La valeur du coût d'une cellule est donc différente selon le sens dans lequel la cellule est traversée depuis l'un de ses 8 voisins. Pour cela, il est nécessaire de transformer une valeur de température en une unité de coût-distance-température. Après des tests de plusieurs valeurs<sup>4</sup>, l'unité de coût-distance-température de 50 km/1°C a été retenue car avec cette valeur le corridor modélisé prend bien en compte un changement unidirectionnel de température et sa longueur est moins de trois fois plus longue que le corridor direct (s'il était calculé avec une distance euclidienne).

La distance combinée utilisée est donc l'addition entre la distance isotropique (reliée à l'index d'intégrité paysagère qui agit de la même manière dans tous les sens) et la distance anisotropique (reliée au coût-distance-température). Ceci permet de prendre en compte à la fois les impacts des activités humaines (et donc d'éviter les secteurs urbanisés et agricoles) et la nécessité de rejoindre avec le moins de variation possible une zone à température plus fraîche.

### **Résultats**

Le réseau de corridors cartographié selon les gradients majeurs de température le long de la côte nord ouest pacifique comporte des corridors de changement unidirectionnel de température et évite des zones densément utilisés par l'homme. Les corridors entre des taches plus chaudes et des taches plus froides sont orientés dans une large gamme de directions. Ceci reflète l'orientation est-ouest et nord-sud des chaînes de montagne de la région et l'effet important de la topographie comparativement à la latitude sur le gradient de température de la zone d'étude. Afin de tester la robustesse des résultats, les différentes valeurs de résistance du milieu (intégrité paysagère) et de coût-distance-température ont été appliquées sans que la grande direction des gradients de température ne soit modifiée.

Dans le test de modéliser les corridors uniquement sur la base des températures, les corridors dessinés sont

---

<sup>2</sup> Par le Washington Wildlife Habitat Connectivity Workin Group (<http://waconnected.org/about-the-working-group/>)

<sup>3</sup> Distance au plus droit, dite à vol d'oiseau.

<sup>4</sup> On été testés : 10, 25, 50,100 et 200 km/1°C.

plus étroits et contraints dans les zones de montagne qu'en plaine et en plaine ils passent souvent dans des zones urbanisées et agricoles. Ce schéma suggère que dans la zone d'étude, les espèces dont les déplacements sont limités par les activités humaines ne seraient pas capables de migrer vers des zones favorables par les corridors directs.

## Discussion

Le modèle proposé connecte des zones dont la température est favorable actuellement pour certaines espèces avec les zones dont les températures leur seront favorables dans le futur. Cette approche est menée à un grain assez grossier à l'échelle de gradients de température alors qu'en général ces approches en planification de la conservation sont menées à l'échelle de la communauté avec des patrons basés sur la géophysique ou des effets anthropiques. Les approches à échelle plus fines, centrées sur les espèces projettent des enveloppes bioclimatiques pour quelques espèces. Cette approche peut être intéressante pour des espèces d'intérêt écologique majeur mais elle est soumise à des incertitudes liées aux scénarios d'émission de gaz à effet de serre et aux modèles climatiques globaux qui permettent de modéliser les changements de climat ainsi qu'aux incertitudes liées aux modèles de distribution des espèces et à leur capacité de déplacement. Il est en outre difficile de combiner les modélisations résultant d'une approche espèce par espèce en un réseau unique du fait des besoins spécifiques très variés selon les espèces.

L'approche à grain plus grossier est comparativement plus simple et plus généralisable même si elle est moins précise pour les espèces individuelles. L'approche proposée identifie des corridors de zones naturelles traversant des gradients de température. Ce concept est facile à comprendre mais n'est pas relié à des prévisions de déplacements spécifiques d'espèces. Bien que cette simplification n'élimine pas les incertitudes, elle évite de multiplier les incertitudes occasionnées par l'utilisation de plusieurs modèles successifs (scénario d'émission de gaz à effet de serre, modèle général de climat puis modèle centré espèce).

D'autres approches se sont aussi intéressées à ces enjeux sans utiliser de modélisation spécifique du climat :

- modélisation de goulots d'étranglement pour certaines espèces aux besoins spécifiques (notamment ayant besoin de zones humides) ;
- délimitation de bandes de zones naturelles d'1 km de large entre des zones d'altitude différente afin d'assurer les mouvements des processus écosystémiques dans le contexte du changement climatique ;
- modélisation des zones connectées présentant des caractéristiques similaires dérivées de données de topographie, de sol ... qui définit des connections entre zones pouvant être occupées ou traversées par les espèces pour s'adapter au changement climatique. Cette modélisation ne prend pas explicitement en compte le gradient de climat mais elle est totalement complémentaire de celle proposée car elle prend en compte le substrat, la topographie locale et la géologie.

L'utilité de l'approche proposée dépend des effets des simplifications faites lors des suppositions initiales. C'est pourquoi celles-ci sont rediscutées ici.

*La distribution des espèces dépend de la température* : ceci est validé par des études paléo-écologiques et des observations des réponses des espèces aux changements climatiques récentes (arbres, plantes, insectes, mammifères...). Cependant des microclimats locaux au niveau de zones de bord de cours d'eau, de couvert arboré ou de particularités topographiques (canyons) peuvent permettre à des espèces de rester sur place ou de bouger dans ces zones sans suivre les gradients climatiques. De plus, certaines espèces sont capables d'évoluer en réponse à des modifications de leur milieu de vie.

La température moyenne annuelle utilisée ici n'est pas forcément le facteur limitant pour les espèces. Ainsi en milieu boréal ou d'altitude, le nombre de degré jour ou la température moyenne du mois le plus froid prédisent mieux la répartition des plantes. Au contraire en climat plus chaud, le déficit hydrique peut être le facteur le plus important. Cependant le modèle proposé est souple et peut être utilisé de manière similaire avec d'autres paramètres climatiques si besoin, dans la mesure où ces paramètres peuvent être cartographiés comme une variable continue.

*Le gradient spatial de température va être maintenu dans ses orientations géographiques au cours du changement climatique* : cette supposition est majeure dans la mise en place du modèle<sup>5</sup>, elle repose sur le fait que les gradients de température et d'humidité sur des distances allant de quelques kilomètres à une

---

<sup>5</sup> Elle est également utilisée dans les modèles d'enveloppe de climat.

centaine de kilomètres sont largement contrôlés par des facteurs topographiques et géomorphologiques. Comme ces variables ne vont pas être modifiées du fait du changement climatique, il n'y a pas de raison que les gradients changent à cette échelle. Cependant, cette supposition est souvent faite pour des échelles plus locales alors que pour des échelles inférieures au kilomètre il a été montré que des découplages atmosphériques locaux peuvent perturber les gradients dans des paysages climatiques complexes. A l'échelle supérieure à plusieurs centaines de kilomètres, les gradients peuvent également devenir instables en raison de modification de patrons de circulation globale. Le changement d'usage des sols (par modification de l'albedo, partie de la lumière reçue que diffuse le sol) ou la variation des niveaux d'aérosol peuvent aussi modifier les gradients locaux ou globaux (comme le régime de la mousson). Malgré ces considérations, comme les corridors modélisés ne dépassent pas la dizaine de kilomètres (et très rarement la centaine), ces possibles variations de gradient sont peu problématiques.

*Les espèces se déplacent vers les zones de climat proche de leur habitat initial* : cette supposition limite la portée du modèle proposé aux espèces limitées par le climat dans leur capacité de dispersion et de capacité à coloniser. Il est donc moins pertinent pour des espèces limitées par leur capacité de dispersion propre et des besoins spécifiques en termes d'habitat. Pour ces espèces, d'autres stratégies de conservation sont mieux adaptées que la définition de corridors comme par exemple la migration assistée.

*Les espèces ont un meilleur succès de dispersion dans les zones les moins modifiées par les humains* : même si du fait de cette supposition les espèces les plus dérangées par les activités humaines sont mieux prises en compte, la souplesse du modèle permet en modifiant les cartes coût-distance de prendre en considération des espèces qui seraient par exemple capable de traverser un paysage agricole en diminuant la valeur de coût de cette occupation du sol.

Malgré l'intérêt de cette approche, elle présente les limites suivantes :

Comme pour de nombreuses approches de modélisation, fixer les paramètres du modèle est toujours pour partie subjectif notamment ici pour le seuil de température retenu pour relier deux taches et les valeurs de coût-distance pour les différentes occupations du sol. Pour pallier cette subjectivité, les phases de tests de gammes de valeurs a permis de sélectionner les valeurs qui semblent donner les corridors respectant les hypothèses posées.

La méthode, comme elle ne se base pas du tout sur la qualité des habitats, ne permet pas de mettre en avant des milieux connus pour leur importance dans les déplacements d'espèces : les zones de bord de cours d'eau, les milieux humides et aquatiques pour les migrations longue distance... Ces niveaux de connectivité doivent être abordés par d'autres méthodes.

La prochaine étape de cette recherche sera d'adapter ce modèle à des régions spécifiques ou groupes d'organismes en ajoutant des variables climatiques différentes. Il sera intéressant aussi de comparer le réseau de corridors produit avec celui issu de modélisation d'enveloppes climatiques espèces par espèces et de modèles de dispersion individus centrés.