

Mercantour

Modélisation

Biogéographie

Rôle des variables climatiques dans une approche de modélisation de l'impact du changement climatique sur la distribution de trois espèces végétales dans le Mercantour (Alpes franco-italiennes)

Matthieu Vignal, Julien Andrieu

Université Nice Sophia Antipolis (UMR ESPACE)
98, bd E. Herriot, 06204 Nice Cedex
Matthieu.VIGNAL@unice.fr ; Julien.ANDRIEU@unice.fr

Ce chapitre est paru dans :
Briche E., Cantat O., Carrega P. (2017). Variabilité, changement climatique et conséquences en Méditerranée. Les Impromptus du LPED, n°3, Laboratoire Population-Environnement-Développement, UMR 151 (AMU – IRD), Marseille, 161 p.

Rôle des variables climatiques dans une approche de modélisation de l'impact du changement climatique sur la distribution de trois espèces végétales dans le Mercantour (Alpes franco-italiennes)

Le dernier rapport du GIEC (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat) fait état de nombreuses conséquences sur la biodiversité terrestre induite par l'élévation des températures. La démarche modélisatrice spatialement explicite est une façon d'établir des prévisions et d'aller au-delà de l'observation de terrain en s'émancipant des contraintes de celle-ci. Les modèles dynamiques, et les données climatiques à basse résolution spatiale, permettent de mettre en place des modèles capables de formaliser les modifications des aires de distribution des espèces végétales par la simulation des processus biologiques de ces dernières. Or, ce type de modèle ne permet pas, encore, d'établir des anticipations probables des aires de distribution futures des espèces végétales. Afin d'accorder un crédit plus important à ce type de modèle, l'objectif de cette étude est d'estimer le poids des variables climatiques dans cette approche modélisatrice. La méthode mise en place consiste, dans un premier temps, à produire des simulations cartographiques d'aires de distribution résultant de la variation des paramètres des variables climatiques. La seconde étape, analyse statistiquement ces résultats pour estimer le poids des variables climatiques. Les résultats amènent à se questionner sur l'utilisation des indices de synthèse au sein de ce type de démarche modélisatrice.

The last IPCC report (Intergovernmental Panel on Climate Change) presents numerous consequences of temperature elevations on terrestrial biodiversity. Spatial modeling is a way to forecast and to go beyond field observation by emancipating constraints thereof. Dynamic models and climate data with low spatial resolution, allow to develop models capable of formalizing the changes of plant species distribution by the simulation of their biological processes. However, this model does not still allow to establish the probable anticipations of future plant species distribution. To validate this model, the aim of this study is to estimate the weight of climate variables. The method involves, firstly, at produce cartographic simulations of distribution areas resulting from changes in climatic variables settings. The second step statistically analyzes these results to estimate the weight of climate variables. The results raise the question of the use of synthetic index.

Tests de sensibilité

Impact du changement climatique

Introduction

L'histoire de la vie sur terre est marquée par plusieurs extinctions massives dont l'une des causes principales est le changement climatique (Raup et Sepkoski, 1982). Ces changements climatiques, trop rapides, ne permettent pas aux espèces de s'adapter ou de migrer (Ramstein, 2015). Les experts du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) s'accordent à dire qu'aujourd'hui, l'homme et ses activités sont à l'origine d'un changement climatique plus rapide que les précédents, dont l'impact sur la biodiversité est à étudier (GIEC, 2014). Les Hotspots de biodiversité⁵ reconnus au niveau mondial, tel que le Bassin Méditerranéen (Myers et al, 2000), sont concernés par cette menace. Il en va de même pour les foyers de diversité en plantes dont font partie les Alpes (WWF et IUCN, 1997). Ce territoire présente de nombreux outils territoriaux permettant de protéger les espèces végétales et l'intégrité de leurs milieux. Ces outils de protection s'avèrent nécessaires mais leur efficacité face à une telle menace est à questionner. En effet, les espèces végétales dans les Alpes du Sud, sont principalement distribuées à travers le gradient bioclimatique altitudinal (Ozenda, 1985). L'évolution des températures va alors modifier la localisation géographique des seuils bioclimatiques tels que ceux de la limite létale ou des limites de l'optimum écologique, et ce, pour une espèce étudiée comme pour toutes les espèces qui sont en interaction avec celle-ci (Lenoir et al, 2008 ; Cassaza et al, 2010). Il est donc nécessaire d'étudier, d'une part, les capacités de propagation et de survie au-delà de l'aire de distribution actuelle, et d'autre part, les processus de stérilité et de mortalité (Lemée, 1978).

Au sein des nombreuses études de l'impact du changement climatique sur la biodiversité, la démarche modélisatrice spatialement explicite représente un domaine actif. C'est un outil de recherche qui permet, en outre, de s'émanciper des contraintes du terrain et d'aller au-delà des simples observations grâce à la formalisation de prédictions (Wainwright et Mulligan, 2004). Ces modèles dynamiques sont, entre autres, permis par la disponibilité de données climatiques sur des échelles globales ou macro régionales et des longues échelles temporelles. Toutefois, ces données présentent un inconvénient majeur : une mauvaise résolution spatiale. Les modèles non dynamiques postulent qu'il existe une étroite concordance entre les aires de distribution et les habitats dans l'espace et dans le temps. Ainsi, le fonctionnement de ces modèles repose sur l'application de règles de décalage de la niche écologique pour déterminer, à partir d'une « aire de distribution actuelle », des « aires de distribution futures potentielles » (Coudun, 2005 ; Garbolino, 2012). Or, selon Guisan et Thuiller (2005), cette démarche est limitée par des verrous scientifiques et la recherche doit désormais intégrer les facteurs biotiques et les processus de migration au sein de modélisations dynamiques.

Les cartes climatiques à fine résolution spatiale permettent de mettre en place, de façon plus optimale, des modèles dynamiques qui possèdent pour objectifs de formaliser la modification des aires de distribution (Vignal et Andrieu, 2016). Les modifications des aires de distribution sont le résultat de processus biologiques qui s'établissent à l'échelle des populations et qui sont régis

par des variations climatiques locales. Dans ce type de modèles, les aires de distribution actuelles sont modifiées au fil du changement climatique, à condition que les processus biotiques (mortalité et dissémination des graines) le permettent (Vignal et Andrieu, 2016). En effet, le modèle permet de simuler la production, la dispersion et la germination des graines, mais également la mortalité des espèces végétales (Vignal et Andrieu, 2016). Il apparaît d'une part, que les résultats des simulations ne présentent pas de grandes contradictions avec ceux issus des modèles non dynamiques et, d'autre part, que les simulations selon un scénario de climat stable génèrent, après une dizaine d'années, des aires de distribution significativement stables (Vignal et Andrieu, 2016). Ces résultats témoignent de la relative robustesse de l'outil.

Cependant, les paramétrages fondés sur la littérature, sans confrontation au terrain, sont une limite forte dans la fiabilité des résultats. Dès lors, ce type d'outil ne permet pas encore d'établir des anticipations probables des aires de distribution des espèces végétales. Afin d'accorder un crédit plus important aux sorties de ce modèle, la caractérisation du comportement de ce dernier, et notamment du rôle des variables climatiques, s'avère nécessaire. Le format de cet article ne permet pas de décrire de façon complète la méthode de modélisation, déjà publiée par ailleurs (Vignal et Andrieu, 2016), seul l'objectif de cette publication, à savoir estimer le rôle des variables climatiques sur les modifications des aires de distribution futures potentielles des espèces végétales étudiées, sera ici développé.

⁵ Un point chaud ou hotspot de biodiversité est une zone géographique contenant au moins 1 500 espèces végétales endémiques mais qui a déjà perdu au moins 70 % des espèces présentes dans leur état original. 34 points chauds de la biodiversité sont identifiés. Site du Ministère de l'Environnement, de l'Energie et de la Mer, 22 décembre 2010 (mis à jour le 25 janvier 2016). <http://www.developpement-durable.gouv.fr/Qu-est-ce-qu-un-point-chaud-de-la.html>

I. Site d'étude et espèces

I.1. Site d'étude

Le site d'étude, dans les Alpes du Sud franco-italiennes (figure 1) entre 300 et 3 200 m, est caractérisé par le contact entre le climat méditerranéen et le climat semi-continentale dans le Piémont Italien et, bien évidemment, un large étagement altitudinal des milieux de part et d'autre de ce contact. La topographie est très escarpée, tant depuis la mer jusqu'aux sommets du massif de l'Argentera-Mercantour, que de ces derniers à la plaine du Pô, ce qui crée un étagement altitudinal de forte amplitude dans un espace géographique restreint. Cette configuration biogéographique justifie l'intérêt de ce site pour une étude des aires de distribution et de leurs possibles modifications. La juxtaposition en une courte distance de trois types de climat (alpin,

continental et méditerranéen), associée à une grande diversité géologique, est responsable d'une grande richesse spécifique (Alexandre et Génin, 2011). Les évolutions tectoniques, les changements climatiques depuis le Tertiaire, et plus récemment l'hétérogénéité du paysage sont d'autres facteurs expliquant cette biodiversité (Thompson, 2005).

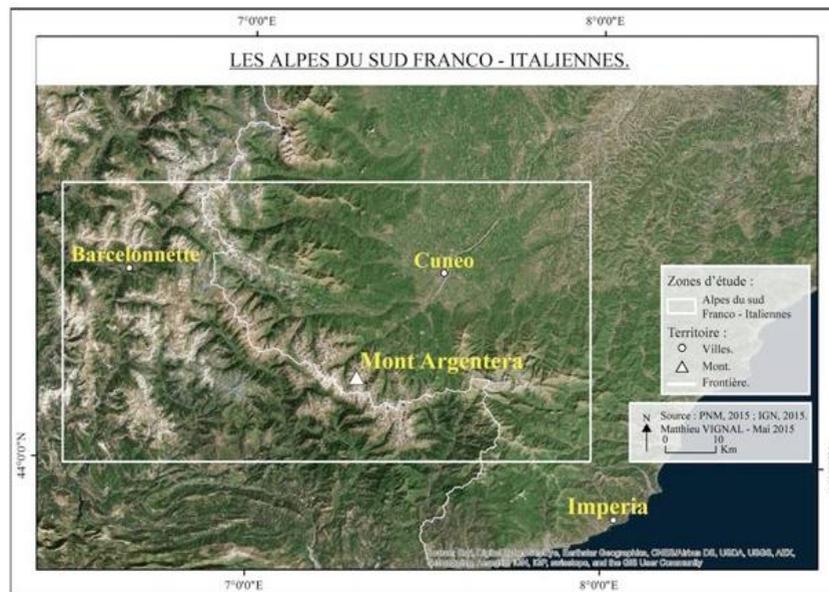


Figure 1. Zone d'étude.

I.2. Espèces

Trois espèces sont étudiées. Ce nombre se justifie par la volonté de modéliser avec précision les processus régissant les dynamiques de ces populations. Les espèces qui feront l'objet de cette étude sont :

Dryas octopetala L., 1753 (figure 2) ; (Dryade à huit pétales)

Pinus cembra L., 1753 (figure 3) ; (Pin cembro)

Pinus uncinata Mill. ex Mirb., 1805 (figure 4). (Pin à crochets)

Le choix s'est porté sur ces espèces car les limites de leurs aires de distribution, dans le massif Argentera-Mercantour, sont clairement expliquées par des seuils climatiques. En effet, *Dryas octopetala* est une espèce définie comme arctico-alpine, cependant, les relevés

SILENE montrent une distribution de 1 400 à 2 700 mètres ; *Pinus cembra* et *Pinus uncinata* sont des espèces sub-alpines, et les relevés SILENE montrent des distributions respectivement de 1 300 à 2 500 mètres, et de 1 400 à 2 400 mètres. De plus, leurs modes de dissémination des graines diffèrent (anémochores, barochores et ornithochores)⁶.



Figure 2. Dryade à huit pétales. *Dryas octopetala* L., 1753 (Remaud, 2012).



Figure 3. Pin cembro. *Pinus cembra* L. 1753 (Barthelemy, 2014).



Figure 4. Pin à crochets. *Pinus uncinata* Mill. ex Mirb., 1805 (Bigou, 2013).

⁶ Anémochore : dissémination par dispersion par le vent
Barochore : dissémination sous l'effet de leurs propres poids, par gravité.
Ornithochore : dissémination par les oiseaux.

II. Données

II.1. Données floristiques

Les relevés botaniques proviennent de la base de données SILENE Flore. Cette base de données – présente sur la région Provence-Alpes-Côte d'Azur et la région Occitanie – est gérée par le Conservatoire botanique national de Porquerolles et le Conservatoire botanique national Alpin. Les relevés proviennent de l'activité de ces conservatoires botaniques et de leurs organismes partenaires (parc nationaux, office national des forêts, etc.) mais également des botanistes amateurs et des recherches universitaires. Les Conservatoires assurent le formatage informatique et la validation taxonomique avant de les diffuser sur SILENE Flore. Les relevés présents sur cette base de données ont été réalisés entre 1860 et 2016. Il convient de préciser que la fin du XIXe siècle et la période 1985/1986 présentent un faible nombre de relevés botaniques. Ils fournissent la base de connaissance ponctuelle des présences des trois espèces.

II.2. Données écologiques

II.2.1. Données brutes

Les données écologiques brutes se composent de données climatiques, topographiques et écologiques.

D'abord, les données climatiques brutes sont issues du modèle de circulation générale ALADIN-Climat du CNRM (Centre National de Recherches Météorologiques). Ce modèle possède une résolution spatiale de 12 km sur le Sud-Est de la France. ALADIN-Climat propose des simulations du climat futur selon divers scénarios d'évolution socio-économique et démographique. À chacun des scénarios sont associées des émissions de gaz à effet de serre (GES) d'intensité différente.

Le scénario retenu est le scénario SRES⁷ A1B qui prévoit un doublement des émissions d'ici 2050 puis une stabilisation de ces derniers. Il repose sur l'hypothèse d'abord, d'une croissance économique très rapide, ensuite, de l'évolution puis de la régression de la population mondiale, et enfin, de l'apparition rapide de nouvelles technologies permettant, entre autres, une utilisation équilibrée des différentes ressources énergétiques (GIEC, 2007). C'est un scénario qualifié d'intermédiaire ou « d'équilibre », il n'est ni le plus pessimiste, ni le plus optimiste⁸.

L'objet de cet article portant sur le test d'un outil capable de simuler les processus biologiques des espèces végétales, ont été simulées ici des variations thermiques d'amplitudes supérieures aux différences entre l'actuel et les scénarios ou entre les différents scénarios. Pour cette raison, à cette étape, le choix du scénario de référence importe peu. Les résultats du modèle ne pouvant être considérés, pour le moment, comme des simulations des conséquences du changement climatique sur la distribution spatiale des espèces végétales, il n'a pas été jugé utile de sélectionner différents scénarios climatiques. En revanche, l'objectif final est bien, une fois que l'outil sera considéré satisfaisant, de lancer des simulations selon les différents scénarios les plus récents RCP, en mettant en valeur le plus vraisemblable.

Les données sur les directions et les forces des vents proviennent de la station de Millefont⁹, elles ont été récoltées à 12 h UTC (14 heures légales) et à 03 h UTC (5 heures légales) des mois de mai à août pour l'année 2014 (Météo France¹⁰). Ensuite, les données topographiques sont dérivées d'un MNT créé *ad hoc* par la concaténation de MNT de l'institut national de l'information géographique et forestière (IGN¹¹) et du Géoportale nazionale (GN¹²). Enfin, les données géologiques proviennent du programme international de surveillance géologique OneGeology.

II.2.2. Données climatiques insérées dans le modèle

La première variable climatique insérée dans le modèle est un indice qui a été élaboré pour synthétiser la quantité importante de variables écologiques. Cet indice permet d'évaluer la probabilité de chaque pixel à être potentiellement occupé par une espèce. Il prend en compte des variables climatiques, géologiques et topographiques séparément tout en permettant la prise en compte de la compensation entre facteurs. Chaque facteur retenu est rééquilibré entre 0 – les seuils létaux – et 1 – l'optimum – (Vignal et Andrieu, 2016). Une pondération est établie en fonction d'un calcul d'analyse fréquentielle qui permet d'établir l'efficacité des différentes variables écologiques par le quotient de la variance entre les échantillons et la variance générale (Godron, 2012).

Ensuite, les températures minimales actuelles et futures des mois de juin et de septembre se sont avérées essentielles, elles conditionneraient l'entrée et la sortie en période végétative des espèces étudiées. Ainsi, des températures trop froides entraîneraient l'activation du processus de mortalité infantile. Enfin, des données sur le vent sont intégrées notamment grâce à l'utilisation d'une rose des vents qui expliquerait le processus de dissémination des graines.

⁷ Second Report on Emission Scenario.

⁸ Nous sommes conscients, devant un avenir aussi incertain, que les différents scénarios du GIEC sont équiprobables (GIEC, 2007). À ce titre, il est recommandé d'utiliser un éventail de scénarios permettant de réduire l'incertitude concernant l'élévation des températures (GIEC, 2007). Nous sommes également conscients que les scénarios SRES du GIEC ont depuis été remplacés par les scénarios RCP (GIEC, 2014) qui font référence à l'évolution du forçage radiatif (le scénario RCP 6.0 étant celui qui se rapproche du scénario SRES A1B). Ces derniers n'ont pas été utilisés dans cette étude, car celle-ci repose sur la création antérieure de cartes climatiques sur les températures minimales et maximales moyennes mensuelles à une résolution de 90 mètres d'après le scénario SRES A1B. Devant la charge de travail que représentait la création de nouvelles cartes climatiques, il a été décidé de conserver les anciens scénarios.

⁹ Station 06153400 de MILLEFONTS-NIVOSE (alt. : 2430m ; lat. : 44,118°N ; long. : 7,192°E), econde Report on Emission Scenario.

¹⁰ <http://www.meteofrance.com/accueil>

¹¹ <http://professionnels.ign.fr/>

¹² <http://www.pcn.minambiente.it/GN/fr/>

III. Méthode

Dans le but d'estimer le rôle des variables climatiques, la méthode se décompose en deux étapes. La première étape consiste à produire des simulations cartographiques d'aires de distribution résultant de la variation des paramètres des variables climatiques. La seconde étape analyse statistiquement ces résultats pour évaluer le poids des variables climatiques.

III.1. Tests de sensibilité des variables climatiques

Différentes méthodes permettent d'attester la validité d'un modèle, et donc de développer les connaissances sur le comportement de ce dernier (Edmonds et Meyer, 2013). Il peut s'agir de décomposer le modèle, de lancer le modèle dans des conditions différentes ou encore de réaliser des tests de sensibilités des paramètres (Edmonds et Meyer, 2013). Cette dernière méthode consiste à faire varier séparément les paramètres pour, par la suite, comparer les résultats à une simulation de référence afin de mettre en évidence les changements majeurs (Edmonds et Meyer, 2013). Au contraire des deux premières méthodes décrites ci-dessus – dont l'objectif est de caractériser le comportement général du modèle – la méthode « tests de sensibilité » sélectionnée est centrée sur le rôle de chacune des variables présentes dans le modèle. En ce sens, cette méthode est adaptée à l'évaluation du rôle des variables climatiques puisqu'elle permet d'attribuer un poids à chacune d'entre elles.

Ainsi, la première étape de la méthode consiste, d'abord, à réaliser une simulation

de référence. Les paramétrages des variables climatiques de cette simulation de référence sont mentionnés dans le tableau 2 (voir en partie 4.3.). Ils sont issus pour la biologie des espèces d'un ensemble de ressources bibliographiques, que ce soit un ouvrage (Rameau et al, 1999) ou des articles scientifiques (Fourchy, 1968 ; Wada, 1999 ; Theurillat et Guisan, 2001 ; Karlsdottir et Aradottir, 2006 ; Brodbeck et Gugerli, 2011 ; Viglas et al, 2013). Le volet climatique de cette simulation est paramétré en fonction du scénario A1B (GIEC, 2007).

Ensuite, ont été testés différents paramétrages dont les résultats sont comparés à ceux de la simulation de référence. Sur chaque paramètre climatique ont été testées deux variations significativement différentes : une variation dite minimale (Mn) et une dite maximale (Mx). Les valeurs de ces paramétrages sont visibles dans le tableau 1 (Mn et Mx). Ce sont dix simulations qui ont été réalisées, représentant des paramétrages climatiques différents. Encore une fois, il convient de rappeler que ceux-ci ne sont pas à considérer comme des « scénarios » au sens courant de la climatologie, mais bien comme des tests méthodologiques. De plus, les « scénarios » climatiques utilisés dans les différentes simulations sont, dans cette étude, mentionnés en tant qu'intervalles de température. L'utilisation d'une température moyenne est à proscrire, car elle ne rend pas compte de l'hétérogénéité spatiale des températures sur la zone étudiée (figure 5).

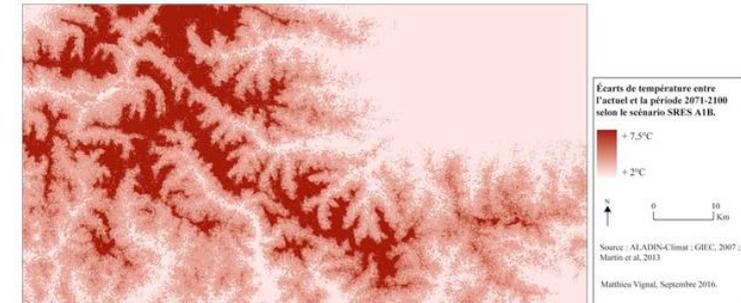


Figure 5. Écarts entre les températures minimales moyennes actuelles du mois de juin (selon la période de référence 1961-1990), et celles de la période 2071-2100 selon le scénario SRES A1B du GIEC. Données obtenues par downscaling statistique du modèle ALADIN-Climat (Martin et al, 2013).

Ainsi, les deux premières simulations établissent une élévation des températures du mois de juin comprise, respectivement, entre +0,6°C et +1,8°C (Mn), et entre +5°C et +14°C (Mx) par rapport aux températures actuelles. Cette variable, dans le modèle, conditionne la phase d'entrée en période végétative des espèces alpines limitées par le froid assez tard dans le printemps. Les simulations trois et quatre mettent en place une élévation des températures du mois de septembre, phase de sortie de période végétative, comprise, respectivement entre +0,6°C et +1,2°C (Mn), et entre +5°C et +10°C (Mx), par rapport aux températures actuelles.

Ensuite, la simulation cinq mets en place des conditions climatiques plus contraignantes pour les espèces végétales par rapport à la simulation de référence. L'indice de viabilité est augmenté de 5 (Mn), soit en équivalent température, une augmentation de 1°C par rapport aux conditions climatiques actuelles. La simulation six, établit des conditions

climatiques plus clémentes pour les espèces végétales, l'indice de viabilité est augmenté de 25 (Mx), soit en équivalent température, une augmentation comprise entre 5 et 7°C, selon la localisation, par rapport aux conditions climatiques actuelles.

Il convient de rappeler que l'augmentation de l'indice de viabilité correspondrait, en quelque sorte, en plus de l'augmentation des températures, à une réduction des autres contraintes écologiques, qu'elles soient topographiques ou géologiques. Nous sommes conscients que la modification de la géologie ou de l'altitude en une centaine d'années est un scénario improbable, c'est pourquoi nous tenons à rappeler, une nouvelle fois, le caractère méthodologique de ces simulations.

Enfin, les simulations sept, huit, neuf et dix concernent des modifications de direction et de force du vent. La simulation sept correspond à un vent de sud dominant, au contraire de la

simulation huit qui correspond à un vent d'est dominant. La simulation neuf correspond à un vent faible, capable de déplacer les graines de 200 mètres à 2 kilomètres (Mn) selon l'espèce (tableau 1), et la simulation dix, correspond à un vent fort, capable de déplacer les graines jusqu'à 4 kilomètres (Mx) du lieu où elles ont été produites.

Paramètres	Dryas octopetala			Pinus cembra			Pinus uncinata		
	Rf	Mn	Mx	Rf	Mn	Mx	Rf	Mn	Mx
Simulations									
Force du vent (pixel)	10	1	20	*	*	*	2	10	20
Direction vent sud (%)	12,5	45,1	6	12,5	45,1	6	12,5	45,1	6
Direction vent nord-est (%)	6	13,6	12,5	6	13,6	12,5	6	13,6	12,5
Direction vent est (%)	5,8	6,5	45,1	5,8	6,5	45,1	5,8	6,5	45,1
Direction vent sud-est (%)	3,8	6,5	13,6	3,8	6,5	13,6	3,8	6,5	13,6
Direction vent nord (%)	45,1	12,5	6,5	45,1	12,5	6,5	45,1	12,5	6,5
Direction vent sud-ouest (%)	13,6	6	6,5	13,6	6	6,5	13,6	6	6,5
Direction vent ouest (%)	6,5	6	6	6,5	6	6	6,5	6	6
Direction vent nord-ouest (%)	6,5	3,8	3,8	6,5	3,8	3,8	6,5	3,8	3,8
Température de juin (°C)	[+2,3 ; +7,5]	[+0,6 ; +1,8]	[+5 ; +14]	[+2,3 ; +7,5]	[+0,6 ; +1,8]	[+5 ; +14]	[+2,3 ; +7,5]	[+0,6 ; +1,8]	[+5 ; +14]
Température de septembre (°C)	[+1,9 ; +5]	[+0,6 ; +1,2]	[+5 ; +10]	[+1,9 ; +5]	[+0,6 ; +1,2]	[+5 ; +10]	[+1,9 ; +5]	[+0,6 ; +1,2]	[+5 ; +10]
Indice de viabilité (indice)	+ 10	+ 5	+ 25	+ 10	+ 5	+ 25	+ 10	+ 5	+ 25

Tableau 1. Paramétrages sélectionnés pour la réalisation des tests de sensibilité. Le caractère « * » signifie que le paramètre ne s'applique pas pour l'espèce végétale, en raison de chorologie différente. Les valeurs mentionnées pour les températures de juin et de septembre ainsi que pour l'indice de viabilité sont comparées aux valeurs actuelles. Le caractère Rf correspond à la simulation de référence. Le caractère Mn correspond aux premières variations des différents paramètres. Le caractère Mx, aux deuxième variations des différents paramètres.

La première étape se termine par l'analyse des superficies et formes des aires de distribution. Pour ce faire, le modèle propose différentes sorties. Dans un premier temps, sont analysés des indices quantitatifs et spatiaux, permettant de comparer chaque sortie à la simulation dite de référence. L'indice de correspondance quantitative (C.Q.) est une simple comparaison entre le nombre de pixels – de l'aire de distribution – dans les résultats de la simulation, et ce même nombre dans les simulations de références (cf. figure 6). L'indice de correspondance spatiale (C.S.) est le coefficient de similarité « Simil » (Voiron-Canicio, 2006). Il est issu de la division entre l'intersection des deux aires de distribution et l'union de ces dernières (figure 7).

$$C.Q. = \frac{\text{Aire de distribution simulée}}{\text{Aire de distribution de la situation de référence}}$$

Figure 6. Formule de l'indice de correspondance quantitative (C.Q.).

Dans un second temps, le modèle permet l'exportation des résultats dans un format pris en compte par les logiciels d'analyses d'images et les Systèmes d'Informations Géographiques (SIG). Ces derniers permettent d'établir des cartes de comparaison entre les simulations afin de localiser spatialement les changements.

$$\text{Simil (A, B)} = \frac{\text{aire intersection (A, B)}}{\text{Aire union (A, B)}}$$

Figure 7. Formule du coefficient de similarité « Simil » (C.S.).

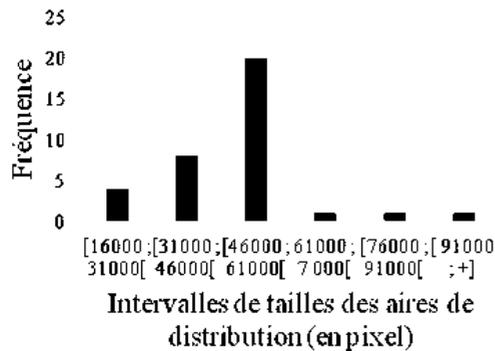
III.2. Évaluation du poids des variables climatiques

La seconde étape de la méthode concerne l'estimation du poids des variables climatiques dans le modèle. Elle s'appuie sur une méthode d'évaluation statistique applicable aux différentes espèces étudiées.

Les onze simulations réalisées sur les trois espèces étudiées permettent d'obtenir une série statistique comprenant près de 31 modalités. L'aire de distribution moyenne est calculée à partir des résultats de la simulation de référence. Le calcul d'une aire de distribution moyenne aux trois espèces étudiées est permis par leurs présences communes à l'étage subalpin. L'observation des fréquences de distribution

permet de considérer que les tailles des aires de distribution sont – relativement – symétriquement distribuées autour de la moyenne (figure 8).

Dès lors, il peut être considéré que, selon toute vraisemblance, une grande quantité de simulations permettrait de supposer que la distribution suivrait une loi normale.



L'écart-type (σ) permet de résumer la distribution des différentes modalités (Gregory, 1963). D'après la loi normale, près de 68,3% des modalités sont comprises entre $+1\sigma$ et -1σ ; près de 95,48% des modalités sont comprises entre $+2\sigma$ et -2σ et, près de 99,7% des modalités sont comprises entre $+3\sigma$ et -3σ (Gregory, 1963).

L'impact de la variation d'un paramètre climatique est d'autant plus important, que la taille de l'aire de distribution qui en résulte est éloignée de l'aire moyenne.

Ainsi, le résultat d'une simulation qui est compris dans l'intervalle $[-1\sigma ; +1\sigma]$ indique que le paramètre établi pour la variable climatique sélectionnée n'est pas à l'origine d'une modification significative de l'aire de distribution (figure 9). Au contraire, le résultat d'une simulation qui est compris dans l'intervalle $[-3\sigma ; -2\sigma]$ ou $[+2\sigma ; +3\sigma]$ indique que le paramètre établi engendre des modifications très significatives de l'aire de distribution (figure 9). Dès lors, un code à trois valeurs permet de caractériser, de manière simplifiée, le poids des variables climatiques sur les résultats du modèle. D'abord, la valeur 1 caractérise un poids faible, elle est affectée aux simulations dont le résultat est compris dans l'intervalle $[-1\sigma ; +1\sigma]$. Ensuite, la valeur 2 définit un poids moyen, elle est affectée aux

simulations dont le résultat est compris dans les intervalles $[-2\sigma ; -1\sigma]$ ou $[+1\sigma ; +2\sigma]$. Enfin, la valeur 3 caractérise un poids fort, elle est affectée aux simulations dont le résultat est compris dans les intervalles $[-3\sigma ; -2\sigma]$ ou $[+2\sigma ; +3\sigma]$ (cf. figure 9).

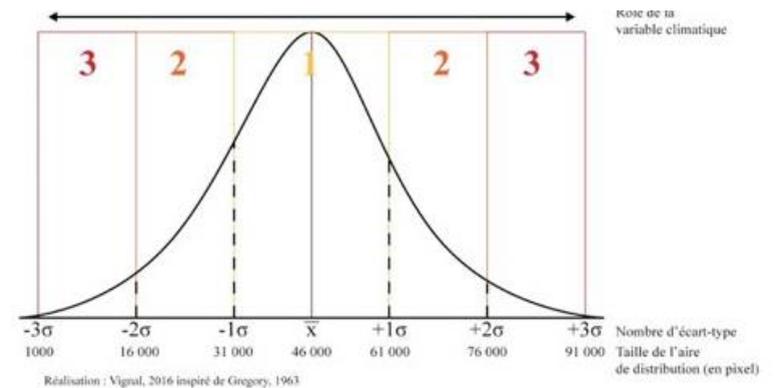


Figure 8. Distribution de la taille des aires de distribution issues des différentes simulations réalisées.

Figure 9. Justification de la mise en place d'un code à trois valeurs.

IV. Résultats

IV.1. La simulation de référence

La simulation de référence, c'est-à-dire la modélisation de l'impact du changement climatique indique que les aires de distribution de ces trois espèces se retrouveraient, en 2100, plus en altitude et plus au nord (figure 10). Les superficies de disparition de l'espèce en limite chaude d'aire de distribution seraient, selon ce paramétrage, supérieures à celles de l'apparition de l'espèce en limite froide d'aire de distribution. Les aires devraient se réduire de 33 % pour *Dryas octopetala*, 29% pour *Pinus cembra* et 27% pour *Pinus*

uncinata. La distance de réduction moyenne entre les limites d'aires actuelles et futures est de 550 m, 565 m et 655 m en 75 ans, pour respectivement, *Dryas octopetala*, *Pinus cembra* et *Pinus uncinata*. La distance de propagation moyenne est de 1,5 km, 850 m et 280 m en 75 ans, pour respectivement *Dryas octopetala*, *Pinus cembra* et *Pinus uncinata*.

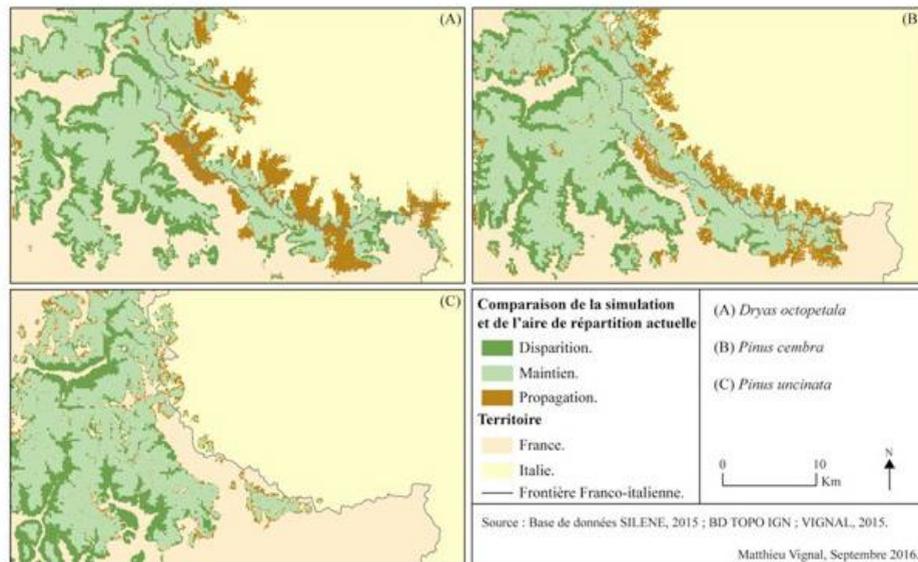


Figure 10. Comparaison de la simulation de référence et des aires de distribution actuelles des trois espèces étudiées.

IV.2. Variations des paramètres climatiques

IV.2.1. La température

La variation de la température du mois de juin est à l'origine de modifications mineures des aires de distribution. En effet, une augmentation des températures, comprises entre +0,6°C et +1,8°C (Mn) par rapport aux températures actuelles, est à l'origine d'une réduction, par rapport à la simulation de référence, des aires de distribution de 0,5%, 4,8% et 1,1% pour, respectivement, *Dryas octopetala*, *Pinus cembra* et *Pinus uncinata* (figure 11). A contrario, une augmentation des températures comprises entre +5°C et +14°C (Mx) par rapport aux températures actuelles est à l'origine d'une augmentation des aires de distribution de 0,1%, 0,3% et 0,1% pour, respectivement, *Dryas octopetala*, *Pinus uncinata*, et *Pinus cembra*.

Les aires de distribution résultantes de ces simulations se retrouveraient, en 2100, plus en altitude et plus au nord, en comparaison avec les aires de distribution actuelles (figure 11). Les zones d'extensions des aires de distribution de *Dryas octopetala* et *Pinus cembra*, se situent essentiellement côté italien (figure 11 DO et PC). Ceci pourrait être le résultat d'un biais méthodologique. En effet, l'absence de points d'observation en Italie pourrait être à l'origine d'une sous-estimation qui serait corrigée dans le temps par la simulation. L'interprétation est sensiblement la même pour les résultats des simulations qui porte sur la variation de la température du mois de septembre.

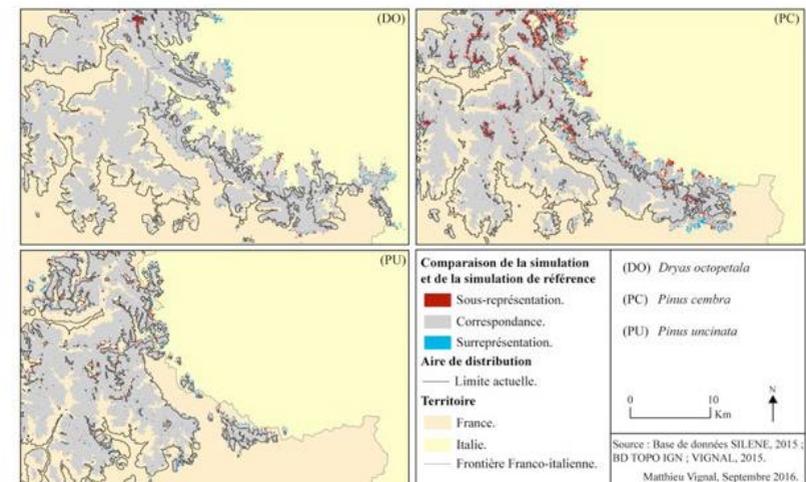


Figure 11. Variation de la température du mois de juin (Mn), comparaison à la simulation de référence. (DO) C.Q. de 0,99 et C.S. de 0,88. (PC) C.Q. de 0,95 et C.S. de 0,9. (PU) C.Q. de 0,99 et C.S. de 0,92.

La variation de la température du mois de septembre entraîne des résultats relativement identiques aux simulations précédemment évoquées. Une augmentation des températures comprises entre +0,6°C et +1,2°C (Mn), par rapport aux températures actuelles, est à l'origine d'une réduction des aires de distribution de 0,6%, 7,7% et 2% pour, respectivement, *Dryas octopetala*, *Pinus cembra* et *Pinus uncinata* (figure 12). Les modifications des aires de distribution sont mineures pour une élévation des températures comprises entre +5°C et +10°C (Mx) par rapport aux températures actuelles. Les aires de distribution augmentent de 0,1%, 1% et 0,1% pour, respectivement, *Dryas octopetala*, *Pinus cembra* et *Pinus uncinata*. Ainsi, les espaces sous-représentés dans les figures 11 et 12 sont les milieux qui ne peuvent

être colonisés par les espèces pour une augmentation des températures de l'ordre de 1°C ($\pm 0,5^\circ\text{C}$). Cependant, une augmentation des températures de 4°C ($\pm 2^\circ\text{C}$) permet à ces espèces de coloniser ces milieux. Or, une augmentation encore plus importante, de l'ordre de 8°C ($\pm 4^\circ\text{C}$), est à l'origine d'une relative stabilité des aires de distribution, en comparaison aux modifications entraînées par une augmentation des températures de 4°C ($\pm 2^\circ\text{C}$).

L'explication réside dans le fait que, dans le modèle, les températures du mois de juin et de septembre agissent uniquement sur le processus de mortalité infantile. À la suite de l'augmentation des températures de 4°C, les espèces ont déjà colonisé la majeure partie de leurs aires de viabilité,

une augmentation supplémentaire n'est pas à l'origine de nouveaux milieux colonisables pour l'espèce, puisque ces variables climatiques ne conditionnent pas le processus de germination dans le modèle. Au vu des modifications des aires de distribution, *Pinus cembra* est l'espèce dont les jeunes pousses semblent être les plus sensibles aux températures froides. Ainsi, l'augmentation des températures lui permet d'étendre son aire de distribution d'une manière plus conséquente que *Dryas octopetala* et *Pinus uncinata*.

IV.2.2. L'indice de viabilité

La variation de l'indice de viabilité permet d'observer des modifications importantes des aires de distribution des espèces végétales étudiées. La diminution de l'indice de viabilité (Mn), par rapport à la simulation de référence, se traduit par la mise en place de conditions écologiques futures plus rudes pour les espèces végétales. Dès lors, les résultats présentent des réductions des aires de distribution, par rapport à la simulation de référence, de 66 %, 45,6 % et 42,4 % pour, respectivement, *Dryas octopetala*, *Pinus cembra* et *Pinus uncinata* (figure 13). Les aires de distribution résultant de ces simulations, sont localisées, par rapport aux aires de distribution actuelles, plus en altitude et plus au nord (figure 13). Il en résulte une fragmentation de ces dernières, particulièrement pour *Dryas octopetala* (figure 13 DO).

augmentations des aires de distribution, par rapport à la simulation de référence, de 120 %, 55,8 % et 37,4 % pour, respectivement, *Dryas octopetala*, *Pinus cembra*, et *Pinus uncinata* (cf. figure 14). Les aires de distribution résultant de ces simulations, sont localisées, en plus de leurs concordances spatiales avec les aires de distribution actuelles, plus au sud et distribuées sur un gradient altitudinal plus important (figure 14).

La variation de l'indice de viabilité est ainsi à l'origine de modifications très significatives des aires de distribution. L'explication réside dans le rôle de cet indice dans le modèle. Ce dernier permet d'évaluer la probabilité de chaque pixel à être potentiellement occupé par une espèce. Une augmentation de l'indice engendre une augmentation de la probabilité du pixel à être occupé par l'espèce étudiée. Ainsi, des milieux autrefois peu adaptés, peuvent désormais réunir les conditions écologiques nécessaires à la présence potentielle des espèces étudiées. Les espèces peuvent alors coloniser l'espace d'étude de manière plus conséquente en fonction d'une part, de leur capacité de propagation, et d'autre part, de leur amplitude écologique (les interactions biotiques, notamment la compétition interspécifique, n'étant pas insérées dans ces simulations). Ces deux derniers facteurs, propres aux caractéristiques internes des espèces, expliquent les différences conséquentes entre les résultats des trois simulations (figure 14).

Inversement, l'augmentation de l'indice de viabilité (Mx) a pour effet de mettre en place des conditions écologiques plus clémentes pour les espèces végétales étudiées. Ainsi, les résultats des simulations exposent des

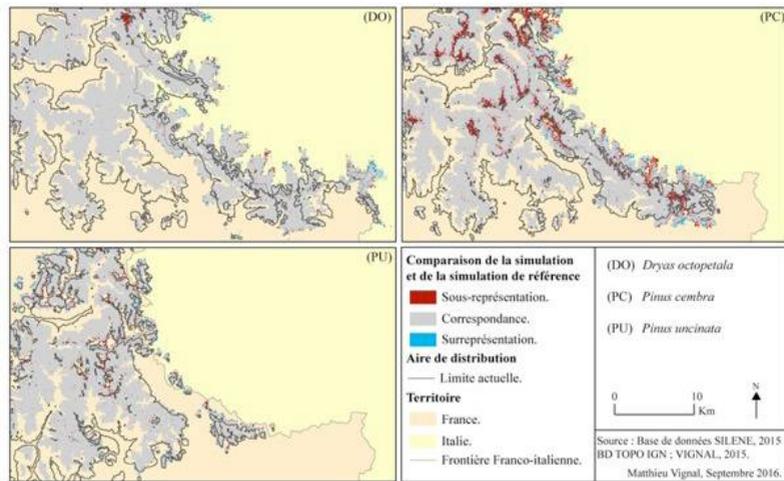


Figure 12. Variation la température du mois de septembre (Mn), comparaison à la simulation de référence. (DO) C.Q. de 0,99 et C.S. de 0,88. (PC) C.Q. de 0,92 et C.S. de 0,88. (PU) C.Q. de 0,98 et C.S. de 0,91.

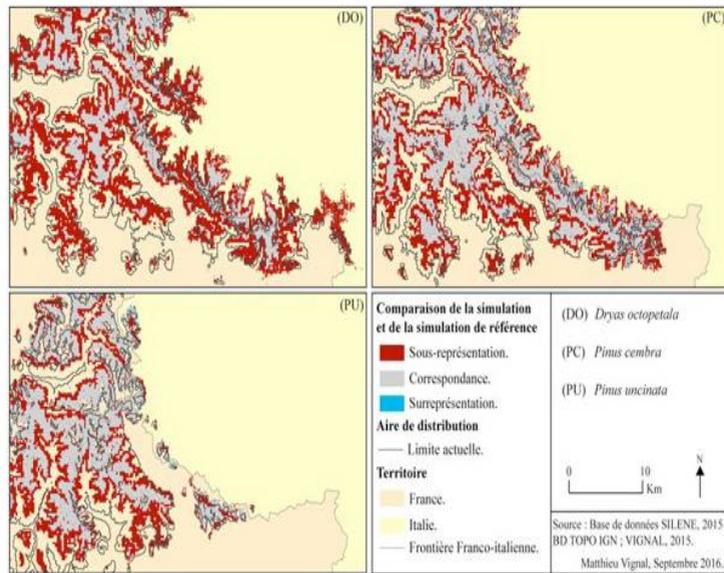


Figure 13. Variation de l'indice de viabilité (Mn), comparaison du résultat à la simulation de référence. (DO) C.Q. de 0,34 et C.S. de 0,34. (B) C.Q. de 0,54 et C.S. de 0,52. (C) C.Q. de 0,58 et C.S. de 0,55..

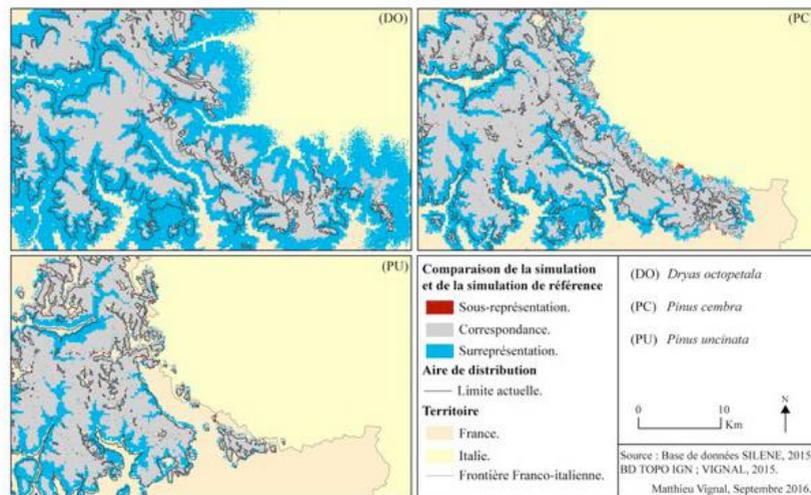


Figure 14. Variation de l'indice de viabilité (Mx), comparaison du résultat à la simulation de référence. (DO) C.Q. de 2,19 et C.S. de 0,46. (PC) C.Q. de 1,56 et C.S. de 0,62. (PU) C.Q. de 1,37 et C.S. de 0,69.

4.2.3. Le vent et les espèces anémochores

Dans cette partie, sont présentés les résultats concernant la variation de la force et de la direction du vent. *De facto*, seules les espèces ayant une chorologie anémochore (*Dryas octopetala* et *Pinus uncinata*) sont abordées.

La variation du paramètre qui conditionne la force du vent est à l'origine de modifications importantes au sein des aires de distribution. Pour *Dryas octopetala*, un vent faible entraîne une réduction de 45 % de son aire de distribution (figure 15 DO - 1). Le changement climatique est alors trop rapide pour son mode de dissémination qui ne lui permet pas de se propager. En comparaison à l'aire de distribution actuelle, aucune propagation notamment vers l'Italie n'est observée (cf. figure 15 DO - 1). Pour *Pinus uncinata*, un vent important est à l'origine d'une augmentation de 26,8 % de son aire de distribution, notamment au-delà de la frontière

italienne, soit une distance de propagation moyenne de 1,8 km en 75 ans (figure 15 PU - 1). Cette capacité de propagation importante lui permet de coloniser des milieux, autrefois inaccessibles, notamment ceux des sommets du massif Argentera-Mercantour. La comparaison avec l'aire de distribution actuelle permet de visualiser cette propagation (figure 15 PU - 1).

La variation du paramètre qui conditionne la direction du vent permet d'observer des résultats qui diffèrent peu de ceux de la simulation de référence. En effet, l'aire de distribution de *Dryas octopetala* a augmenté de 0,7 % (figure 15 DO - 2), et celle de *Pinus uncinata*, diminué de 0,1 %. C'est un vent d'est qui a été paramétré pour cette simulation, l'augmentation de l'aire de distribution de *Dryas octopetala* se fait donc en direction de l'ouest, et les distances de propagation moyenne sont de 1,6 km et 290 m en 75 ans, pour respectivement *Dryas octopetala* et *Pinus uncinata*.

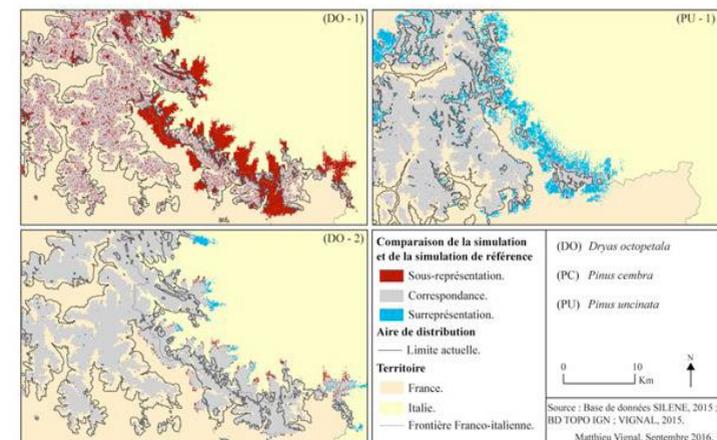


Figure 15. Variation de la force du vent (1) et la direction du vent (2), comparaison à la simulation de référence. (DO - 1) C.Q. de 0,55 et C.S. de 0,51. (DO - 2) C.Q. de 1,27 et C.S. de 0,77. (PU - 1) C.Q. de 1,01 et C.S. de 0,87.

V. Discussion

4.3. Poids des variables climatiques

Les différentes simulations permettent de hiérarchiser les variables climatiques en fonction de leurs poids dans cette approche de modélisation de l'impact du changement climatique sur les aires de distribution des trois espèces étudiées.

Les résultats montrent que seule une variable possède un poids important sur les résultats du modèle, il s'agit de l'indice de viabilité (tableau 2). Ce résultat n'a rien de surprenant dans le sens où l'indice de viabilité synthétise l'ensemble des conditions écologiques de la zone d'étude. Une variation de cet indice simule des modifications importantes des milieux présents dans la zone étudiée. Ce résultat questionne alors l'utilisation d'indice dans une approche modélisatrice de l'impact du changement climatique. En effet, les résultats dépendent de manière trop

importante de l'indice et de ses variations. Dès lors, il apparaît judicieux de limiter l'utilisation de ce type d'indice, ou du moins, de limiter le poids de ce dernier dans le modèle, notamment par l'utilisation d'une multitude d'indices. Cette sensibilité des modèles dynamiques aux variables implémentés dans le modèle et à leurs paramétrages est mentionnée par Bommel (2009). Il précise, ainsi, la nécessité de la phase exploratoire d'un modèle (sensibilité et robustesse) qui, à terme, entraîne souvent un retour sur la conception du modèle.

D'après la méthode employée, les autres variables climatiques possèdent uniquement un poids faible sur les résultats du modèle, à l'exception de la force du vent pour *Dryas octopetala* qui possède un poids relativement important sur les résultats. Cela s'explique par sa chorologie (anémochore), le vent étant son vecteur principal de propagation.

Les tests de sensibilité des paramètres climatiques réalisés dans cette étude consistent à faire varier les paramètres, un seul à la fois. La variation de l'ensemble des paramètres climatiques à chaque nouveau paramétrage pourrait être à l'origine de résultats différents de ceux exposés dans cette étude. Le modèle possède un nombre important de variables climatiques, et donc une infinité de combinaisons possibles de paramétrages. La réalisation de tels tests permettrait de connaître toutes les possibilités qu'offrent le modèle et ainsi, de comprendre au mieux son comportement, ainsi que le poids des variables climatiques dans les résultats de ce dernier. Or, caractériser l'ensemble de ces possibilités nécessite des moyens techniques conséquents.

La méthode mise en place pour estimer le poids des variables climatiques pourrait être appliquée à chaque espèce afin de faire ressortir leurs particularités. La méthode consisterait, pour chaque espèce, à prendre en compte les résultats des simulations et de considérer la moyenne de ces dernières. Or, dans cette étude, seulement onze simulations – par espèce – ont été réalisées, ne permettant pas de justifier statistiquement une telle méthode.

Les résultats de cette étude permettent de révéler le poids important de l'indice de viabilité dans le modèle. Celui-ci conditionne, à lui seul, les résultats du modèle. Il possède un poids important sur les résultats car il conditionne à la fois les processus de production et germination des graines mais également le processus de mortalité. Soit trois processus majeurs du modèle au contraire de la température ou du vent qui conditionnent,

uniquement, un processus (respectivement, le processus de mortalité infantile et le processus de dissémination). Bien que son principal avantage soit de réduire le nombre de variables implémentées dans le modèle, il apparaît nécessaire de limiter l'utilisation de tels indices afin de redistribuer le poids important de ce dernier au sein d'un ensemble de variables.

Il convient de préciser, de nouveau, que les résultats présentés dans cette étude ont uniquement pour objectif d'estimer le poids des variables climatiques. Le modèle ne représente pas encore un outil d'anticipation probable des conséquences du changement climatique sur les aires de distribution des espèces végétales. À travers ces différentes simulations, le modèle a montré une certaine robustesse dans la mesure où la variation des paramètres engendre les résultats escomptés, ce qui témoigne d'une bonne connaissance du comportement du modèle et permet ainsi de lui accorder un crédit plus important (Edmonds et Meyer, 2013). Néanmoins, les variables en entrée du modèle doivent être retravaillées afin d'équilibrer les poids entre ces dernières. Bien entendu, la calibration du modèle doit également reposer sur des observations de terrain. En effet, cet article présente l'une des premières étapes d'une recherche scientifique plus ambitieuse dont l'objectif, à terme, est de produire un outil original, appliqué et reproductible de modélisation, donc d'anticipation de l'impact du changement climatique sur les aires de distribution des espèces végétales.

Simulations	Variables climatiques	<i>Dryas octopetala</i>	<i>Pinus cembra</i>	<i>Pinus uncinata</i>
1	Température juin	1	1	1
2	Température juin	1	1	1
3	Température septembre	1	1	1
4	Température septembre	1	1	1
5	Indice de viabilité	2	2	2
6	Indice de viabilité	3	2	1
7	Direction vent	1	1	1
8	Direction vent	1	1	1
9	Force vent	2	*	1
10	Force vent	1	*	1

Tableau 2. Poids des variables climatiques dans une approche modélisatrice de l'impact du changement climatique sur les aires de distribution des trois espèces étudiées. Évaluation selon un code à trois valeurs.

Conclusion

Les méthodes de descente d'échelles statistiques par régression environnementale permettent d'obtenir des données climatiques à fine échelle spatiale. Ces dernières s'avèrent très utiles dans la formalisation d'un modèle original capable de simuler les processus biologiques (production, dissémination, germination, mortalité) des espèces végétales. Au sein de ce type de modèle, le rôle des variables climatiques peut être détaillé par l'intermédiaire de tests de sensibilité appliqués à ces paramètres. Ces derniers ont révélé le poids important des indices synthétiques dans ce type de démarche modélisatrice. En effet, les résultats dépendent de manière trop importante de l'indice de viabilité et de ses variations. Dès lors, il apparaît judicieux de limiter l'utilisation de ce type d'indice, ou du moins de limiter le poids de ces derniers dans le modèle, notamment par l'utilisation d'une multitude d'indices ou de variables. Il est prévu de poursuivre l'étude en intégrant au modèle les observations de terrain sur la population (variation dans l'espace de la densité et des pyramides des âges) et les processus biotiques (production de graine, survie). Ce qui est ici modélisé est, une étape de plus dans la question des parts respectives de la migration et de l'adaptation/accommodation des plantes face au réchauffement climatique. De plus en plus d'études révèlent une adaptation supérieure aux premières prévisions ce qui, à l'heure actuelle apparaît comme une bonne chose en termes de protection de la biodiversité. Cependant au

fur et à mesure que la température augmente sans migration conséquente des espèces, c'est la dette climatique de celles-ci qui augmente (Bertrand, 2011). Si cette tendance se confirme, c'est alors un effet latent de celle-ci que la géographie devra chercher à anticiper.

Alexandre F., Genin A., 2011 : *Géographie de la végétation terrestre ; Modèles hérités, perspectives, concepts et méthodes*. Edition Armand Colin, 302p.

Bertrand R., Lenoir J., Piedallu C., Riofrio-Dillon G., De Ruffray P., Vidal C., Pierrat J. C. & Gegout J. C., 2011 : Changes in plant community composition lag behind climate warming in lowland forests. *Nature*, 479, 517-520.

Bommel P., 2009 : *Définition d'un cadre méthodologique pour la conception de modèles multi-agents adaptée à la gestion des ressources renouvelables*. Informatique, I2S, Université Montpellier 2, 312p.

Brodbeck S., Gugerli F., 2010 : Sombre sentinelle des chemins : Un roi dans les Alpes, 33-37.

Casazza G., Zappa E., Mariotti M. G., Medail F., Minuto L., 2010 : Distribution pattern and richness of endemic plant species in Maritime and Ligurian alps. *Boll. Mus. Ist Biol. Univ. Genova*, 72.

Coudun C., 2005 : *Approche quantitative de la réponse écologique des espèces végétales forestières à l'échelle de la France*. Ecology, environment, ENGREF AgroParisTech, 129p.

Edmonds B., Meyer R., 2013 : *Simulating Social Complexity*. Springer, 754p.

Fourhcy P., 1968 : Notes sur le Pin cembro (*Pinus cembra* L.) dans les Alpes françaises. *Revue Forestière Française*, 2, 77 – 94.

Garbolino E., 2012 : Modélisation de la répartition future de la végétation en Corse. InfoDFCI. CEMAGREF éditions, 65, 1p.

GIEC, 2007 : Changements Climatiques 2007 : *Rapport de Synthèse*. IPCC, Geneva, Switzerland, 104p.

GIEC, 2014 : Changements climatiques 2014 : *Rapport de synthèse*. IPCC, Geneva, Switzerland, 151p.

Godron M., 2012 : *Ecologie et évolution du monde vivant*. Editions de l'Harmattan, 609p.

Gregory S., 1963 : *Statistical Methods and the Geographer*. Longman Group United, 256p.

Guisan A., Thuiller W., 2005 : Predicting species distribution: offering more than simple habitat models. *Ecology Letters*, 8, 993-1009.

Karlsdottir L., Aradotti A., 2006 : Propagation of *Dryas octopetala* L. and *Alchemilla alpina* L. by direct seeding and planting of stem cuttings. *Icel. Agric. Sci.*, 19, 25-32.

Lemee G., 1978 : *Précis d'écologie végétale*. Masson, 304p.

Lenoir J., Gegout J.-C., Marquet P. A., Ruffray P., Brisse H., 2008 : A significant upward shift in plant species optimum elevation during the 20th century. *Science*, 320, 1768-1771.

Martin N., Carrega P., Adnes C., 2013 : Downscaling statistique des températures et des précipitations 2071-2100 du modèle ALADIN-Climat pour les scénarios A1B, A2 et B1 dans les Alpes-Maritimes. *Actes du XXVIe colloque de l'Association Internationale de Climatologie*, Cotonou, Bénin, 8p.

Myers N., Mittermeier A. R., Mittermeier G. C., Fonseca A. B. G., Kent J., 2000 : Biodiversity hotspots for conservation priorities. *Nature*, 403, 853-858.

Ozenda P., 1985 : *La végétation de la chaîne alpine dans l'espace montagnard européen*. Masson, 321p.

Rameau J.-C., Mansion D., Dume G., 1999 : *Flore forestière française Tome 2, Montagne*. Institut Pour Le Développement Forestier, 2421p.

Ramstein G., 2015 : *Voyage à travers les climats de la terre*. Odile Jacob sciences, 342p.

Raup M. D., Sepkoski J. J., 1982 : Mass extinctions in the Marine Fossil Record. *Science*, 215, 4539, 1501-1503.

Theurillat J.-P., Guisan A., 2001 : *Potential impact of climate change on vegetation in the European Alps : A review*. Kluwer Academic Publishers, 33p.

Thompson J., 2005 : *Plant evolution in the mediterranean*. Oxford university press, 304p.

Viglas J. N., Brown C. D., Johnstone J. F., 2013 : Age and size effects on seed productivity of northern black spruce. *Canadian Journal of Forest Research*, 43, 534-543.

Vignal M., Andrieu J., 2016 : Modélisation de l'impact du changement climatique sur trois aires de distribution végétales dans le Mercantour. En attente de publication aux ouvrages PUPS, 21p.

Voiron-canicio C., 2006 : *Modélisation spatio-morphologique de l'urbanisation du littoral languedocien*. UMR Espace, 15p.

Wada N., 1999 : *Factors affecting the seed-setting success of Dryas octopetala in front of Broggerbreen (Brogger Glacier) in the high Arctic, Ny-Alesund, Svalbard.* Norsk-Polarinstitut, 8p.

Wainwright J., Mulligan M., 2004 : *Environmental modelling, finding simplicity in complexity.* John Wiley & Sons, Ltd, 408p.

WWF, IUCN, 1997 : *Centres of Plant Diversity: a guide and strategy for their conservation.* Cambridge, World Wide Fund for Nature and IUCN, 368p.