



**HAL**  
open science

# Impact de scénarios de changement climatique sur la distribution des espèces à l'échelle de petits massifs forestiers

Philippe Dreyfus

► **To cite this version:**

Philippe Dreyfus. Impact de scénarios de changement climatique sur la distribution des espèces à l'échelle de petits massifs forestiers. *Innovations Agronomiques*, 2015, 47, pp.17-28. 10.15454/1.4622683810696702E12 . hal-04501404

**HAL Id: hal-04501404**

**<https://hal.inrae.fr/hal-04501404>**

Submitted on 12 Mar 2024

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Distributed under a Creative Commons Attribution - NonCommercial - NoDerivatives 4.0 International License

## Impact de scénarios de changement climatique sur la distribution des espèces à l'échelle de petits massifs forestiers

Dreyfus P.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Office National des Forêts, Pôle Recherche-Développement-Innovation, 1175, chemin du Lavarin, F-84000 Avignon

**Correspondance:** philippe.dreyfus@onf.fr

### Résumé

Les effets des changements climatiques sont manifestes dans divers types de formations forestières, et gestionnaires et chercheurs s'interrogent sur le degré d'adaptation des espèces à des conditions stationnelles évolutives. En montagne, la répartition des espèces varie sur de courtes distances ; les incertitudes sur leur aire future compliquent donc les décisions de gestion à l'échelle locale (forêt, petit massif), qui engagent pourtant sur le long terme. Notre étude concerne une partie de l'arrière-pays méditerranéen et l'évolution des aires potentielles des essences en place. Elle s'appuie sur des travaux antérieurs : étagement bioclimatique, tranche altitudinale pour chaque espèce. Par une analogie classique entre évolution climatique et décalage altitudinal, des aires potentielles futures sont simulées pour trois scénarios du GIEC. Les résultats confirment l'ampleur des évolutions à envisager, ainsi que leur variabilité. Cette méthode simple, critiquable sur de nombreux points, ne vise pas à prévoir des évolutions précises ou à fixer des préconisations, dans une situation climatique dont l'incertitude est de toute façon irrémédiablement irréductible : notre objectif est de sensibiliser, d'indiquer le type de données et connaissances disponibles, ou manquantes, d'envisager certaines lignes directrices pour une adaptation progressive de la gestion, ainsi que des idées d'articulation avec des actions de recherche.

**Mots-clés :** Changement climatique, Gestion forestière, Adaptation, Incertitude, Simulation, Aire de distribution.

### **Abstract: Impact of climate change scenarios on tree species distribution at the scale of a forest: a challenge for adapting management**

Climate change clearly affects various types of forest, and managers and researchers are questioning the degree of adaptation of tree species to new site conditions. In mountain areas, species distribution varies over short distances, and uncertainty about their future complicates management decisions at local scale (forest, small massif), while these decisions commit on the long term. Our study concerns a part of the Mediterranean hinterland and the evolution of potential areas of species in place. It builds on previous work: bioclimatic zonation, altitudinal range for each species. Using a conventional analogy between climate change and altitudinal shift, future potential areas are simulated for three IPCC scenarios. Our results confirmed the extent of changes to consider, and their variability. This simple method is questionable in many respects, but is not intended to predict future distribution or define recommendations, because the uncertainties on climate change seem irremediably irreducible: our goal is only to raise awareness, to indicate the type of data and knowledge available or missing, and to consider some guidelines for a gradual adaptation of the management together with some ideas about joint research activities.

**Keywords:** Climate, Forest management, Adaptation, Uncertainty, Simulation, Species distribution

## 1. Introduction et contexte

### 1.1 Climat en évolution, conséquences incertaines, décisions risquées

Il est maintenant admis que le contexte climatique est en évolution significative, avec une tendance globale de réchauffement et des évolutions moins nettes et plus variables des précipitations. L'ampleur et la vitesse de ces changements dans le futur sont inconnues et font l'objet de diverses hypothèses liées aux évolutions socio-économiques, techniques et démographiques. Le GIEC a ainsi défini des scénarios d'émission et concentration en gaz à effet de serre, ou de forçage radiatif (les SRES : B1, A1T, B2, A1B, A2, A1FI ; puis les RCP : 2.6, 4.5, 6.0, 8.5). Les climatologues en déduisent, par modélisation, des évolutions climatiques ; divers spécialistes s'en servent ensuite pour ajuster des modèles d'impact sur les systèmes, sur les activités humaines, dans tous les domaines. Chaque analyse, chaque modèle a ses imperfections : on évoque parfois une « cascade d'incertitudes », partant de l'incertitude en amont correspondant à la gamme des SRES/RCP, et s'élargissant en aval à chaque niveau de modélisation. Difficile, par conséquent, de décider en réelle connaissance de cause. La gestion forestière est l'un des domaines dans lesquels les décisions engagent sur le long terme (c'est aussi le cas pour l'urbanisme, les infrastructures lourdes, etc. mais sans doute moins en agriculture où les cycles courts permettent de changer de culture et de techniques plus rapidement).

### 1.2 Impacts forestiers, cartes climatiques et modèles de distribution

De nombreux modèles tentent de représenter l'aire actuelle et future des espèces d'arbres forestiers (et parfois leur croissance, leur production) en fonction des variables climatiques. Pour le climat futur, ils s'appuient généralement sur des cartes climatiques déduites de simulations à l'échelle du globe (Modèles Atmosphériques de Circulation Générale, GCMs, à maille de 250 km ou plus) grâce à diverses méthodes de « régionalisation » permettant d'atteindre une résolution de l'ordre de 10 km (8 km pour les données que nous avons utilisées). Cette résolution reste relativement grossière : les cartes à large échelle (régionale, nationale) indiquent des enveloppes vastes qui englobent et gommant des plages où l'espèce est absente, plages qui peuvent être d'une surface de l'ordre de celle d'une forêt ou d'une partie de forêt ; c'est notamment le cas en montagne, où des variations climatiques à courte distance (quelques hectomètres) dues au gradient thermique altitudinal déterminent des conditions dans lesquelles l'espèce cartographiée à large échelle n'est pas du tout adaptée, alors que d'autres espèces sont bien en place. Or, même pour le climat présent (ou passé récent), il ne semble pas exister (tout au moins, en France, hormis quelques zones ayant fait l'objet d'études spécifiques, ponctuelles) de modèles climatiques - et, encore moins, de cartes - donnant une distribution des variables climatiques avec une résolution de l'ordre d'une centaine de mètres. Pour avoir une idée de la répartition potentielle future des espèces, on en est ainsi réduit à combiner des évolutions climatiques prédites à l'échelle régionale avec un décalage local, à une échelle infra-forêt ou infra-massif, décalage obtenu par une analogie - grossière, mais couramment utilisée dans divers travaux scientifiques- entre évolution climatique et décalage altitudinal.

## 2. Méthode - Informations disponibles

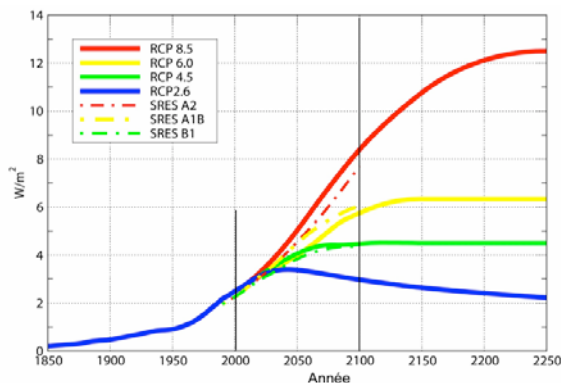
### 2.1. Zone d'étude

Notre étude a porté sur une partie de l'arrière-pays méditerranéen et des départements du Vaucluse (84) et des Alpes-de-Haute-Provence (04), avec des zooms sur quelques petits massifs : mont Ventoux, Montagne de Lure, versants de la vallée de l'Issole, Haut-Verdon. Ce choix est motivé par la disponibilité d'une étude antérieure (Ladier, 2004) portant à la fois sur l'étagement bioclimatique et sur les tranches d'altitude qui conviennent aux principales espèces présentes. Limites d'étages et limites d'espèces sont définies selon la même grandeur : une altitude compensée par l'exposition, au nord, qui « accentue » l'altitude, ou au sud, qui la « réduit ». En fait, l'étude en question a porté sur la région dite des « Préalpes sèches », qui ne couvre qu'une partie des Alpes-de-Haute-Provence (et le sud-ouest

des Hautes-Alpes) ; les résultats sont cependant extrapolables à la majeure partie de ce département, et au massif du Ventoux dans le Vaucluse. Au-delà (totalité de chaque département, altitudes inférieures à 500 ou 600 m), l'extrapolation n'est *a priori* plus valide mais reste compatible avec l'objectif de la présente étude, qui vise surtout à sensibiliser, à illustrer à la fois l'ampleur et l'incertitude des changements à envisager.

## 2.2. Scénarios et simulations climatiques utilisés

On a utilisé les 3 scénarios SRES B1, A1B et A2, plutôt que les scénarios RCP plus récents : la raison en est que le site « Drias - Les futurs du climat » (<http://www.drias-climat.fr>), source des données climatiques que nous avons utilisées, ne fournit de simulation que sur les RCP 2.6, 4.5 et 8.5, et pas sur le RCP 6.0, pourtant en position « moyenne » et à peu près en correspondance avec le SRES A1B (Figure 1), qui est le plus utilisé (avec A2) dans les études d'aires futures, en matière forestière.



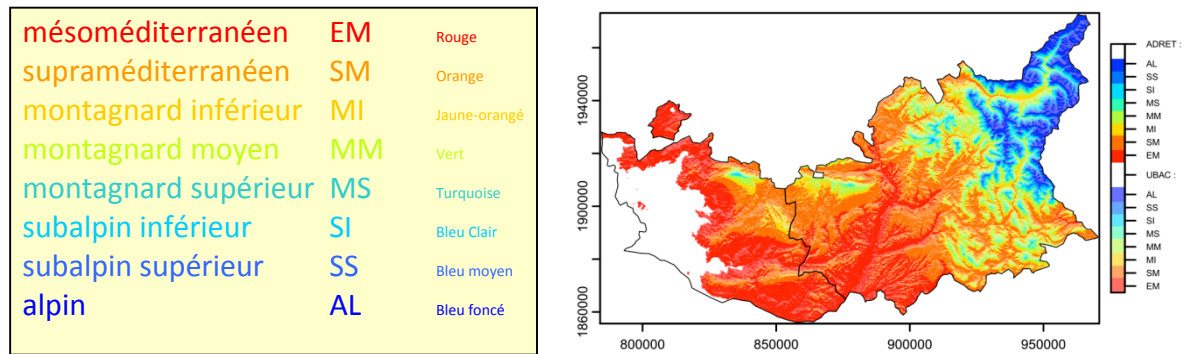
**Figure 1** : Scénarios SRES (tirets) et RCP (traits pleins).

Le scénario RCP 8.5 est un peu plus pessimiste que le scénario SRES A2, le RCP 6 est proche du SRES A1B, tandis que le RCP 4.5 est proche du SRES B1. Le seul scénario sans équivalent SRES est le RCP 2.6 qui intègre les effets d'une politique de réduction des émissions susceptible de limiter le réchauffement planétaire à 2°C en 2100. Source : site internet « Drias - Les futurs du climat » (<http://www.drias-climat.fr>)

## 2.3. Étages bioclimatiques actuels

La répartition des espèces végétales fait apparaître des seuils d'altitude, différents selon les expositions, qui déterminent des compartiments bioclimatiques, notion voisine de celle d'« étage de végétation ». Les limites d'étage sont observées *in situ* (échantillonnage selon des gradients d'altitude en versants nord et sud, dans la région des Préalpes sèches, cf. Ladier, 2004) en examinant la composition floristique sous des peuplements forestiers matures (on évite les phases pionnières, et les plantations résineuses, où la flore est influencée par des conditions de lumière différentes), en l'occurrence sous peuplements de Chêne pubescent ou Hêtre. On peut ensuite représenter les limites de ces étages par des relations linéaires dont l'ordonnée à l'origine indique en quelque sorte l'altitude moyenne de la limite, et dont la pente traduit un décalage altitudinal par rapport à cette moyenne, fonction du rayonnement, lié à l'exposition (opposition ubac/adret, mais aussi variation sur chaque versant selon que l'exposition est plus ou moins franchement nord, ou sud).

Ces relations linéaires, combinées avec un Modèle Numérique de Terrain et avec un indice de rayonnement (indice de rayonnement direct de Becker, 1982, fonction de la latitude, de la pente et de l'exposition) estimé en chaque point sur SIG (à partir du relief quantifié par le MNT, en faisant abstraction de toute couverture nuageuse), permettent de cartographier (Figure 2) les étages bioclimatiques en 2000 (date des relevés floristiques ayant servi à identifier les limites d'étage). Pour les étages subalpins et alpins, il s'agit simplement de limites en altitude topographique, car on manque de données permettant d'estimer un effet de l'exposition sur la végétation.



**Figure 2** : Étages bioclimatiques sur la zone d'étude, en 2000. D'après les limites établies pour les Préalpes sèches (Ladier, 2004). En blanc, partie ouest du Vaucluse : zones où l'altitude compensée est négative et où l'extrapolation des limites des Préalpes sèches n'est pas faite.

#### 2.4. Distribution altitudinale actuelle des essences

Dans le cadre de l'étude citée précédemment (Ladier, 2004) et de l'élaboration d'autres catalogues de stations ou d'études de l'autécologie des principales essences forestières dans l'arrière-pays méditerranéen, la gamme des altitudes qui conviennent à chacune d'elles a pu être déterminée. Comme pour les étages bioclimatiques, ces limites sont influencées par l'exposition, le rayonnement : plutôt que l'altitude seule, on considère à nouveau l'altitude compensée (par l'exposition), calculée à partir de l'altitude topographique et de l'indice de rayonnement direct de Becker (1982).

Les valeurs limites d'altitude compensée, inférieure et supérieure, en 2000, retenues pour les espèces considérées dans la présente étude, sont les suivantes : Chêne pubescent : 400 - 1100 m ; Pin noir : 500 - 1400 m ; Pin sylvestre : 500 - 1800 m ; Hêtre : 800 - 1700 m ; Sapin pectiné : 1000 - 2100 m ; Pin à crochets : 1100 - 2400 m ; et pour deux autres espèces, très communes naturellement en contexte franchement méditerranéen : Chêne vert : 0 - 500 m et Pin d'Alep : 0 - 600 m.

Il est important de noter que ces valeurs indiquent une aire potentielle et que l'espèce peut être absente d'une partie de son aire potentielle, pour diverses raisons écologiques ou anthropiques : l'aire réelle peut être différente localement à cause de facteurs pédologiques ou de relief (confinement, masque), défavorables à l'espèce (sol superficiel, crête très exposée), ou qui lui permettent au contraire de subsister un peu au-delà de ses limites climatiques (sol profond à forte réserve maximale en eau, vallon) ; les choix de gestion forestière façonnent en partie l'aire effective ; et dans le contexte de changement climatique que nous considérons ici, rien ne dit qu'une espèce ait des capacités de migration suffisantes pour « suivre » le décalage de son aire potentielle induit par l'évolution climatique, ni que la gestion forestière puisse faciliter cette migration (hormis par plantation), si tant est que cela paraisse souhaitable selon les autres essences-objectifs candidates et selon les objectifs (production de bois et autres services écosystémiques).

#### 2.5. Méthode de « traduction » des évolutions climatiques en décalage altitudinal

Pour imparfaite et simplificatrice qu'elle soit, cette analogie est couramment utilisée dans de nombreux travaux scientifiques (voir par ex. Zimmermann et Kienast, 1999 ; Hodkinson, 2005 ; Anthelme et al., 2014). Elle se fonde sur l'existence bien connue de gradients thermiques altitudinaux. Dans notre étude, les relations linéaires définissant les limites d'étages en terme d'altitude compensée permettent d'estimer ces limites à d'autres dates si on peut attribuer à chaque point de la carte, non plus son altitude topographique réelle, mais une altitude fictive intégrant un décalage déduit de l'évolution climatique simulée.

Pour 2000, année de référence, les limites d'étages et d'espèces que nous avons utilisées sont quantifiées en altitude compensée par l'exposition, mais pas explicitement par des variables climatiques. Par conséquent, pour pouvoir simuler l'évolution des étages et des limites d'espèces à partir des scénarios d'évolution climatique, on a d'abord dû établir (sur les 223 points Drias, correspondant aux deux départements étudiés) une relation statistique entre l'altitude (pour chaque point, Drias fournit l'altitude considérée par le modèle climatique) et les variables climatiques pour 2000, date de référence à laquelle ont été déterminées ces limites sur le terrain. On a en fait établi deux relations : une à partir des points Drias situés en adret (exposition sud) et une à partir des points Drias situés en ubac (exposition nord), exposition déduite du MNT IGN à 50 m.

Pour le futur, à l'aide de ces deux relations, on a simulé sur chaque point Drias un décalage altitudinal pour chaque scénario d'évolution climatique, à partir des valeurs climatiques futures simulées par le modèle ARPEGE-Climat<sup>1</sup> de Météo France (et fournies par Drias<sup>2</sup>, pour les scénarios SRES B1, A1B, A2). Une fois les décalages calculés sur les 223 points, positionnés selon une maille de 8 km, on a interpolé ces valeurs sur une grille de résolution 50 m (interpolation simple avec pondération par l'inverse de la distance). Par sommation avec l'altitude réelle (MNT de l'IGN, à résolution de 50 m), on obtient une carte d'« altitude future », pour chaque scénario d'évolution des variables climatiques, et à chaque date choisie (2025, 2050, 2075, 2095).

## 2.6. Méthode de simulation de l'évolution de l'aire potentielle des espèces

Il s'agit de donner une idée de l'adaptation de chaque espèce aux nouvelles conditions bioclimatiques simulées selon les scénarios du GIEC. Plutôt qu'une simple réponse binaire - essence adaptée ou pas selon que le point considéré se situe à l'intérieur ou hors de la tranche altitudinale qui lui convient - on a évalué l'écart par rapport à une altitude « optimale » de l'espèce.

Pour la position géographique considérée, et pour chaque espèce, on calcule à la date souhaitée, l'écart en altitude (compensée par l'exposition) par rapport à l'optimum de l'espèce, pour l'année 2000. Si la tranche altitudinale qui convient à l'espèce est [*altINF*, *altSUP*], on considère arbitrairement que son « optimum » est à mi-chemin :  $altMédiane = (altINF + altSUP) / 2$ .

Pour un point géographique dont la nouvelle altitude compensée, à la date considérée, est *AltiComp*, on calcule l'écart relatif suivant :  $Écart = |AltiComp - altMédiane| / (altSUP - altINF)$

Entre *altINF* et *altSUP*, cet écart varie de manière continue entre 0 et 0.5 (0 pour *AltiComp* = *altMédiane*, 0.5 pour *AltiComp* = *altINF* ou *altSUP*). Si *AltiComp* est au-dessus de *altSUP* ou au-dessous de *altINF*, l'espèce est, à la date considérée, hors de la tranche altitudinale qui lui convient.

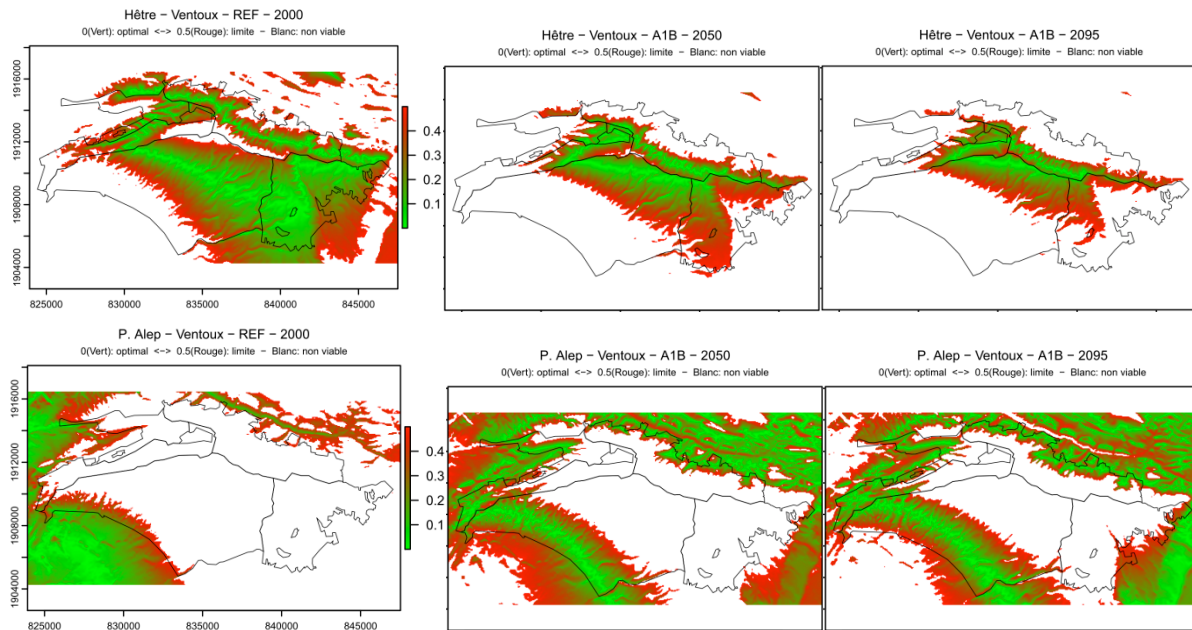
La Figure 3 présente des exemples de cartes d'un double gradient d'adaptation (de part et d'autre d'un optimum médian) entre les limites basse et haute de la tranche altitudinale (altitude compensée) de l'espèce.

On peut alors simuler, sur la zone étudiée, une carte indiquant en chaque point (pixel du MNT à 50 m) l'essence ayant l'écart le plus faible par rapport à son altitude compensée « optimale » (*altMédiane*). Les essences ainsi cartographiées sont le Chêne pubescent, les Pins noir, sylvestre, et à crochets, le Hêtre et le Sapin pectiné, ainsi que le Chêne vert, le Pin d'Alep. À noter que si une telle carte ne

<sup>1</sup> Les simulations utilisées se retrouvent sur le site *Drias - Les futurs du climat* sous l'identifiant ARPEGE-RETIC, utilisées dans les expériences dites SCRATCH08, permettant une régionalisation à une résolution de 8 km, maille des points utilisés pour notre étude.

<sup>2</sup> Les données climatiques du site Drias étant journalières, on a calculé des valeurs mensuelles de cumul de précipitations, de température minimale et maximale. De plus, les données Drias utilisées simulent une variabilité inter-annuelle et les données d'une année peuvent donc s'écarter notablement de valeurs « normales » moyennées sur 10 ans (par exemple) ; pour 2000, nous avons utilisé les moyennes des valeurs données par Drias sur la période 1991-2000 (car à partir de 2001, les scénarios futurs entrent en jeu) ; pour les dates 2025, 2050, 2075 et 2095, on a moyenné les valeurs sur la date choisie, les 5 années qui précèdent et les 4 qui suivent (10 années).

représente qu'une espèce en chaque point, deux ou plusieurs essences peuvent en fait être assez proches en terme d'écart à leur « optimum », et pourraient être considérées comme aussi bien adaptées, du point de vue climatique.



**Figure 3 :** Mont Ventoux : gradients d'adaptation bioclimatique pour 2 espèces (Hêtre en haut, Pin d'Alep en bas). Optimum : 0 (vert vif) ; Limites (haute ou basse) : 0.5 (rouge vif). En blanc : non viable, hormis compensation pédologique, topographique.

### 3. Résultats

Les résultats présentés ici portent essentiellement sur le mont Ventoux (84) et la montagne de Lure (04) ; quelques autres concernent l'ensemble des deux départements.

#### 3.1. Évolutions envisageables des étages bioclimatiques

**3.1.1 Pour le Ventoux**, par rapport à la situation de référence en 2000 (Figure 4a), on note :

- Une disparition du subalpin (inférieur) dès 2025 (Figure 4b pour A1B), même avec B1 ;
- Une disparition du montagnard supérieur dès 2050, sauf pour B1 (il subsiste en 2075, pas en 2095) ;
- Avec A2, même le montagnard moyen a quasiment disparu en 2095 (Figure 4c) ;
- En 2050, de premières altitudes compensées négatives<sup>3</sup> (en blanc sur la carte) sont apparues à l'aval du Ventoux pour A1B (Figure 4b) et A2 (mais seulement en 2095 pour B1) ;
- En 2095 (Figure 4c), elles apparaissent dans la zone du Ventoux (450-500 m d'altitude réelle) pour A2.

**3.1.2 Pour la montagne de Lure**, les tendances sont assez semblables, mais, par rapport au mont Ventoux, la zone considérée sur Lure est plus « ramassée » en altitude :

<sup>3</sup> : Une altitude compensée négative n'a pas de signification biologique ou écologique particulière ; ici, elle nous sert simplement de repère pour visualiser les évolutions présentées.



- Les altitudes maximales sont moins élevées (sommet presque 100 m plus bas que celui du Ventoux) et dès 2025, non seulement le subalpin (inférieur) a disparu comme au Ventoux, mais également le montagnard supérieur (hormis une toute petite zone avec le scénario B1) ;
- Le bas de la zone est 300 à 400 m plus haut que le bas de la zone Ventoux, et de premières altitudes compensées négatives ne sont visibles que pour 2095 avec le scénario le plus sévère (A2).

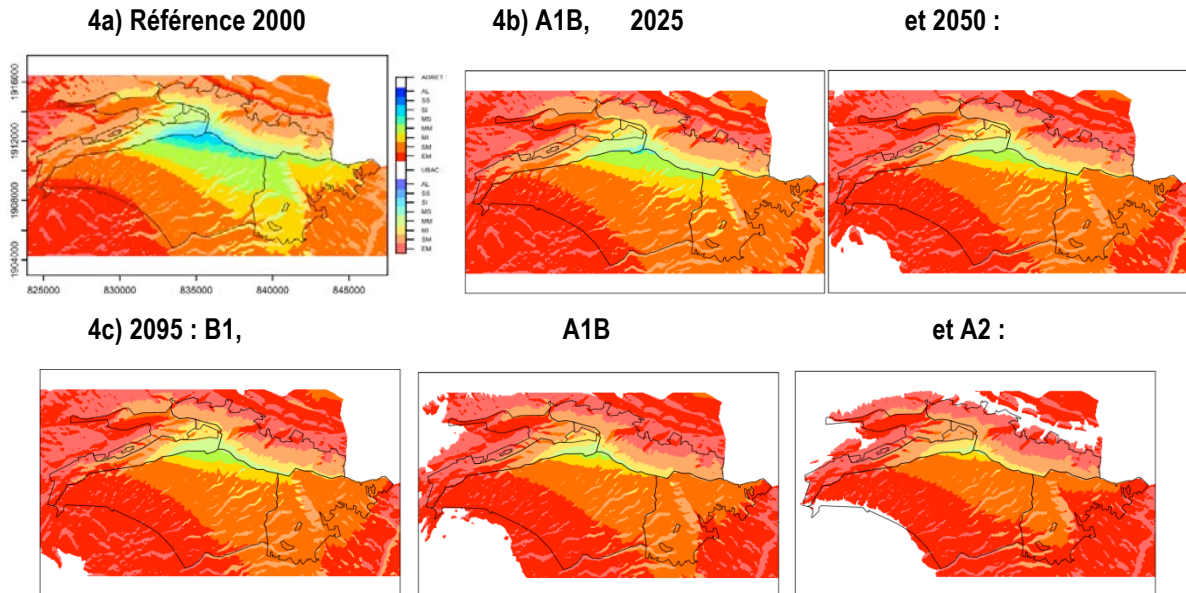


Figure 4 : Mont Ventoux : évolutions possibles des étages bioclimatiques

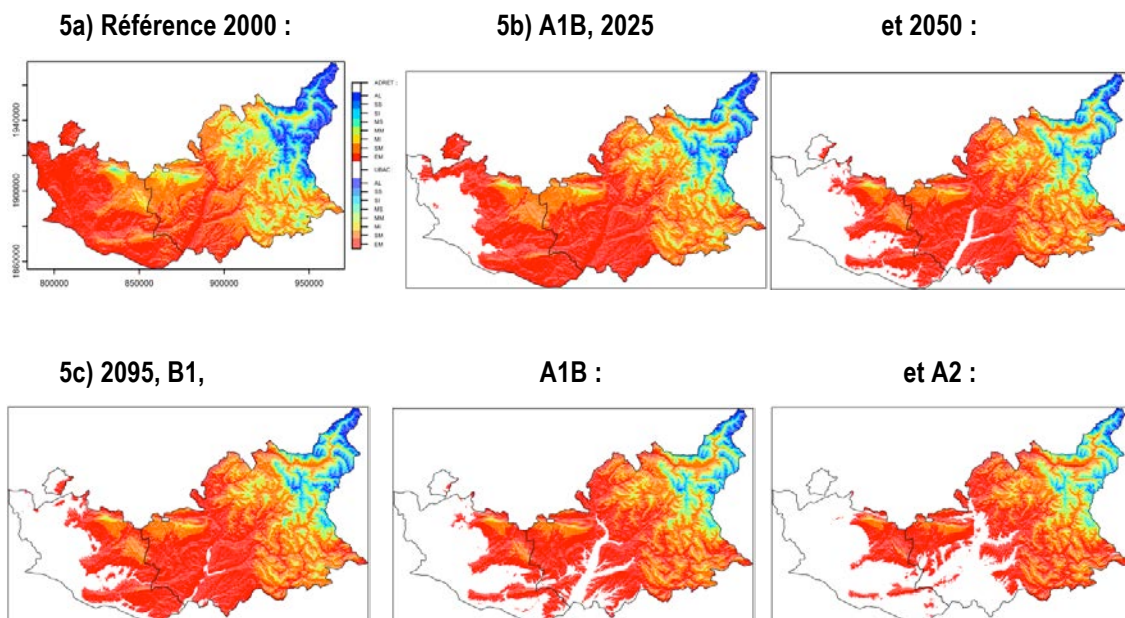


Figure 5 : Ensemble de la zone étudiée : évolutions possibles des étages bioclimatiques

### 3.1.3 Sur l'ensemble de la zone, Vaucluse et Alpes-de-Haute-Provence, on note :

- Globalement, une extension des étages les plus chauds avec maintien d'une différence nette entre les deux départements (Vaucluse plus méditerranéenne, Alpes-de-HP plus montagnardes) ;



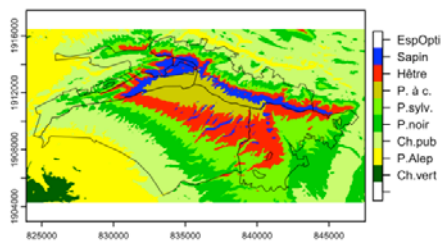
- Pour 2095, avec A2 (Figure 5c), l'étage alpin n'est pratiquement plus présent que sur les crêtes qui bordent la vallée de l'Ubaye dans l'extrême nord-est des Alpes-de-Haute-Provence ;
- De premières altitudes compensées négatives sont visibles dès 2025 sur une grande partie du Vaucluse, quel que soit le scénario ;
- Elles apparaissent dès 2050 dans les Alpes-de-HP, dans les vallées de la Durance et de l'Asse, avec A1B (Figure 5b) et A2 ; en 2095 (Figure 5c), elles y restent rares avec B1, couvrent environ un quart des Alpes-de-HP avec A2, avec une situation intermédiaire pour A1B.

### 3.2. Évolutions envisageables en terme d'essences les mieux adaptées

#### 3.2.1 Pour le Ventoux, par rapport à la situation de référence en 2000 (Figure 6a), on note :

- Une très nette évolution dès 2025, de plus en plus prononcée en 2050 (Figure 6b) et 2095 (Figure 6c) ;
- Avec une régression de l'aire potentielle du Pin à crochets, du Sapin, du Hêtre, des Pins sylvestre et noir, espèces dont les optimums se situent aux étages subalpin, montagnard ou dans la partie supérieure du supra-méditerranéen ;
- Une augmentation ou une relative stabilité en surface, mais avec un décalage vers le haut, de la zone où le Chêne pubescent est l'essence la mieux adaptée ;
- La zone où le Chêne vert est l'espèce la mieux adaptée « repousse » d'abord celle du Pin d'Alep, mais régresse ensuite à sa marge basse, avec l'apparition d'altitudes compensées négatives, pour lesquelles on ne sait pas quel est son degré d'adaptation.

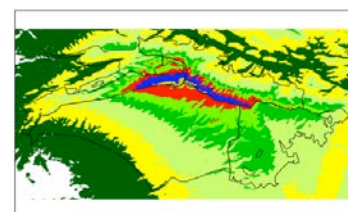
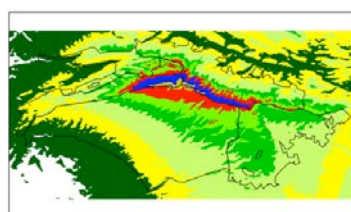
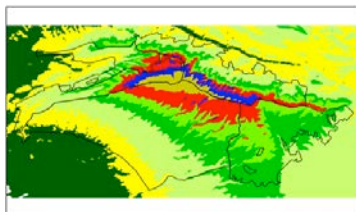
#### 6a) Référence 2000 :



#### 6b) 2050, B1,

#### A1B :

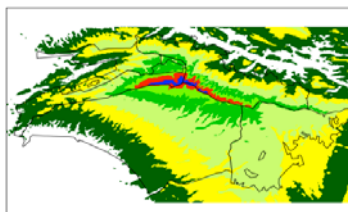
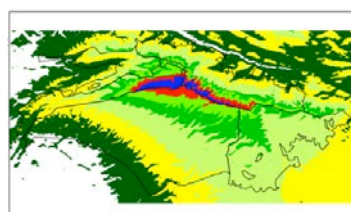
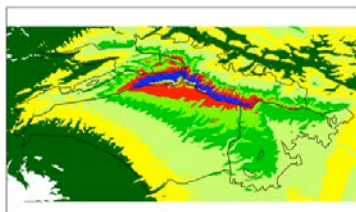
#### et A2 :



#### 6c) 2095, B1,

#### A1B :

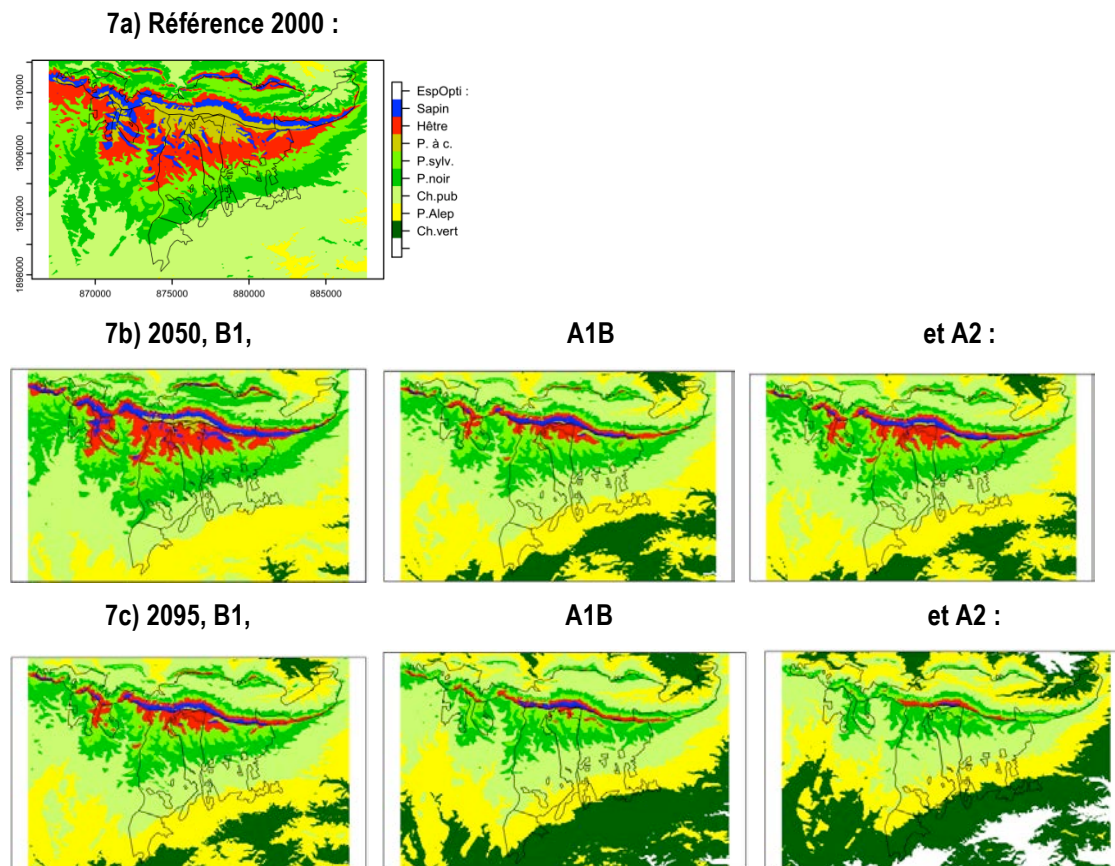
#### et A2 :



**Figure 6** : Mont Ventoux : évolutions possibles de la répartition potentielle des espèces, selon leur classement en terme d'adaptation aux conditions bioclimatiques.

**3.2.2 Pour la montagne de Lure** (Figure 7) les simulations conduisent à des observations assez semblables, avec deux particularités notables :

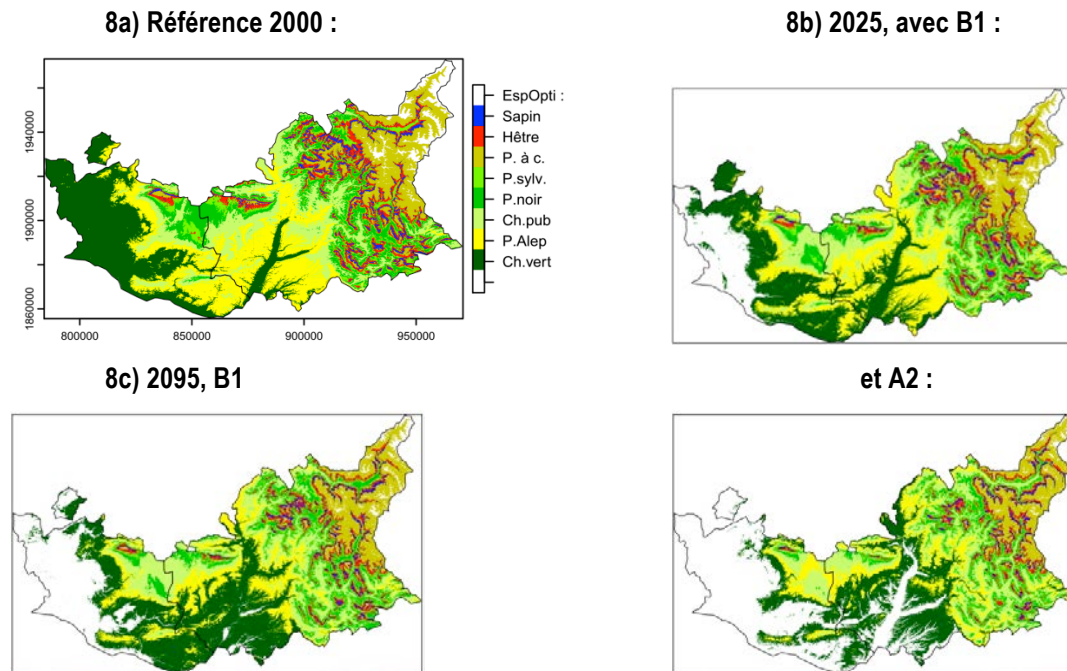
- Pour 2050, le scénario A1B induirait une régression des aires des espèces montagnardes plus forte qu'avec le scénario A2 pourtant un peu plus sévère en moyenne : ceci montre que la traduction climatique, régionalisée, des différents scénarios comporte une certaine variabilité spatiale et en tendance temporelle ; ici, le scénario A2, selon la traduction climatique utilisée, plus sévère que A1B en général, apparaît au contraire moins contraignant que A1B sur Lure à l'échéance 2050 ... mais « redevient » plus sévère à la fin du siècle (ces observations valent aussi pour l'évolution des étages bioclimatiques) ;
- La régression des aires des espèces les plus montagnardes est plus forte qu'au Ventoux, du fait d'une altitude maximale plus faible, offrant moins de surfaces de « refuge ».



**Figure 7 :** Montagne de Lure : évolutions possibles de la répartition potentielle des espèces, selon leur classement en terme d'adaptation aux conditions bioclimatiques.

**3.2.3 Sur l'ensemble de la zone, Vaucluse et Alpes-de-Haute-Provence,** on notera simplement que :

- L'évolution est déjà sensible dès 2025, même avec le scénario le moins sévère (B1, Figure 8b) ;
- À l'échéance de la fin du siècle, les deux tendances majeures, de recul des aires des montagnardes et de « méditerranéisation » par une progression potentielle du Pin d'Alep et du Chêne vert, s'expriment avec une ampleur bien différente selon les scénarios (Figure 8c)



**Figure 8** : Ensemble de la zone étudiée : évolutions possibles de la répartition potentielle des espèces, selon leur classement en terme d'adaptation aux conditions bioclimatiques

## 4. Discussion et conclusion

### 4.1. Les limites de la simulation de la répartition des espèces

Ces limites sont nombreuses, de diverses natures et d'importances variées. En voici quelques-unes :

(1) Les modèles d'aire de distribution potentielle, même ceux qui sont de nature plus mécaniste que statistique, s'appuient sur les aires actuelles, dont les limites ne sont pas uniquement le résultat d'influences climatiques, ni même stationnelles (incluant substrat géologique, sol, topographie locale) : ces limites peuvent être liées aux possibilités de migration de l'espèce (éloignement des peuplements sources, vitesse de recolonisation post-glaciaire), aux limitations d'ordre sanitaire (ravageurs, maladies, grands herbivores), aux exclusions compétitives (une espèce mieux adaptée localement ou plus vigoureuse peut en éliminer une autre), aux actions anthropiques (plantations, gestion forestière privilégiant l'espèce offrant les meilleures croissance, survie, capacités de régénération naturelle, ou correspondant mieux aux attentes en termes de services écosystémiques, notamment de bois produits).

(2) La méthode utilisée dans notre étude s'appuie sur certaines hypothèses discutables :

- Les limites bioclimatiques utilisées peuvent être entachées des mêmes faiblesses que celles listées pour les modèles d'aire potentielle à l'échelle régionale ou nationale, avec un déterminisme qui ne serait pas exclusivement climatique ;
- L'analogie « évolution climatique - décalage altitudinale » a ses limites, notamment parce que le lien entre précipitations et relief est beaucoup moins net que les gradients thermiques altitudinaux ; or, nous avons relié statistiquement l'altitude à diverses variables climatiques, dont les précipitations ; en outre, il n'est pas certain que ce lien statistique reste cohérent avec les conditions futures.

(3) Quant à l'aire de distribution réelle, elle dépendra de bien d'autres facteurs : autres facteurs stationnels (sol, notamment, voir, par ex. Bertrand et al., 2012) ; capacité de migration ; marge d'adaptation génétique au fil de la sélection par les contraintes climatiques et fonction des modes de gestion, plus ou moins favorables au renouvellement rapide des générations et au brassage génétique

qu'il permet ; interactions avec les pathogènes, ravageurs, grands herbivores, eux-mêmes influencés par les changements climatiques. Nous avons mentionné, et considéré dans notre étude, uniquement l'évolution climatique tendancielle, en faisant abstraction de la variabilité inter-annuelle : on peut penser que les modèles d'aire actuelle ou les limites bioclimatiques que nous avons utilisées intègrent d'une certaine manière l'effet de ces fluctuations dans le passé récent, puisque ces approches prennent en compte la distribution actuelle réelle des espèces, mais on doit être prudent sur les tentatives de prévision en fonction de climats futurs présentant une augmentation de fréquence des événements extrêmes (fortes sécheresses, par ex.) et/ou une sévérité plus grande de ces événements.

#### 4.2. Des pistes pour l'adaptation de la gestion et le lien avec la recherche

Malgré ces limites et les incertitudes climatiques, on peut considérer les éléments suivants :

- La tendance au réchauffement est tangible et sans doute durable ; potentiellement, les essences à caractère plus méditerranéen devraient donc progresser vers l'amont au détriment des espèces à caractère plus montagnard, dans une grande partie de l'arrière-pays méditerranéen, et ceci plus ou moins rapidement selon le climat, leur capacité de dissémination et de colonisation, et selon l'aide, ou au contraire la gêne, que pourront induire les décisions d'aménagement forestier et les choix sylvicoles.
- Pour anticiper cette évolution inéluctable, il est important, dans la partie haute de leur répartition actuelle sur chaque forêt ou petit massif, de préserver et de favoriser les espèces que l'on souhaite voir migrer vers l'amont : la station, en évolution, peut leur convenir davantage dans les décennies à venir, en terme de viabilité, de régénération et de production potentielle, par une levée de la limitation par le froid, ou du fait du recul d'espèces concurrentes montagnardes, de moins en moins bien adaptées ; ces peuplements en avant d'un front de colonisation peuvent être de précieuses sources de graines, et de gènes.
- Il paraît utile d'élargir le panel d'essences par une migration assistée d'essences en place (plantations plus en amont), et par l'introduction de nouvelles espèces (ou de nouvelles provenances d'espèces déjà introduites) *a priori* mieux adaptées aux conditions climatiques futures, sur la base d'informations sur les conditions climatiques de leur aire d'origine, ou de modélisation d'aires climatiques potentielles sur un ensemble géographique rassemblant aire d'origine et aire d'introduction (ex. modèle IKS, de H. Le Bouler, en cours de finalisation à l'ONF). Ces nouvelles introductions pourraient faire l'objet de programmes d'expérimentation conjoints des organismes de recherche et de R&D ; le suivi associé, fin et rigoureux, limiterait cependant l'ampleur d'un tel réseau en termes d'essences prises en compte et de situations stationnelles échantillonnées.
- Une autre option consisterait à réaliser des plantations d'espèces candidates dans un cadre de gestion opérationnelle, en y consacrant des moyens significatifs, sans suivi scientifique (mais avec localisation précise, et consignation des opérations : espèces, provenances, techniques et conditions de plantation) ; on pourrait ainsi démultiplier ces tests dans des conditions diversifiées. L'articulation avec les programmes de recherche pourrait comporter deux éléments : (1) la fourniture par les équipes de recherche ou de R&D de listes d'espèces candidates déclinées par grands contextes stationnels (par ex., montagnes sèches méditerranéennes, climat à forte influence océanique, ou continentale, combinaisons avec les grands types de substrat, calcaire, cristallin ...) ; (2) la possibilité pour les chercheurs d'étudier certains de ces sites, choisis en fonction de leurs résultats (constatés *de visu* par les gestionnaires, sans mesures, hormis les comptages habituels destinés à évaluer le succès de toute plantation), afin d'affiner les modèles. Cette option rappelle les reboisements de Restauration des Terrains en Montagne (RTM) (fin du 19<sup>e</sup> siècle, début du 20<sup>e</sup>) : les archives montrent que de nombreuses espèces ont été essayées au départ, et que celles qui ont été plantées par la suite, et que l'on voit encore aujourd'hui, sont celles qui n'ont pas été éliminées



par les conditions stationnelles. De nos jours, on a l'avantage de pouvoir s'appuyer sur des modèles d'aires de distribution potentielles (à décliner selon la gamme des scénarios du GIEC) et sur les connaissances acquises depuis l'époque RTM.

### **Conclusion : un outil pédagogique, incitatif, plus que prédictif**

La méthode mise au point pour cette étude permet d'estimer des aires potentielles pour les espèces d'arbres forestiers dans un contexte montagnard, où leur répartition varie sur des distances qui sont courtes par rapport à la résolution des modèles d'aire de distribution régionale ou nationale. Cette estimation à échelle plus fine répond davantage aux questions des gestionnaires en charge des plans d'aménagement et du choix d'essences objectifs, au sein d'une forêt ou d'un petit massif.

Cette approche se heurte cependant aux mêmes limites que les modèles régionaux : la difficulté de relier les limites actuelles des espèces à des paramètres climatiques explicites, et, surtout, une incertitude sur l'évolution climatique en cours, qui conditionne fortement les aires futures et ne permet pas d'utiliser les modèles de manière réellement prédictive. Les simulations aident cependant à entrevoir l'ampleur et la variabilité des changements à envisager, et à dégager quelques lignes de conduite pour une adaptation de la gestion. Compte tenu des incertitudes climatiques, elles devraient également inciter à des tests de grande ampleur, dans le cadre de la gestion, en lien avec la recherche.

### **Références bibliographiques**

Anthelme F., Cavieres L.A., Dangles O., 2014. Facilitation among plants in alpine environments in the face of climate change. *Frontiers in Plant Science* 5, 387

Becker M., 1982. Influence relative du climat et du sol sur les potentialités forestières en moyenne montagne. Exemple des sapinières à féтуque (*Festuca silvatica* Vill.) dans les Vosges alsaciennes, *Ann. Sci. For.* 39, 1-31

Bertrand R., Perez V., Gégout J.-C., 2012. Disregarding the edaphic dimension in species distribution models leads to the omission of crucial spatial information under climate change: the case of *Quercus pubescens* in France. *Global Change Biology* 18, 2648-2660.

Hodkinson I.D., 2005. Terrestrial insects along elevation gradients: Species and community responses to altitude. *Biological Reviews of the Cambridge Philosophical Society* 80, 489-513.

Ladier J., 2004. *Les stations forestières des Préalpes sèches ; définition, répartition, dynamique, fertilité*. Office National des Forêts, DT Méditerranée, Cellule Régionale d'Appui Technique, 124 p. Document accessible sur le site de l'Inventaire forestier national (IGN) à <http://inventaire-forestier.ign.fr>, Activités thématiques, Typologie des stations forestières.

Zimmermann N.E., Kienast F., 1999. Predictive mapping of alpine grasslands in Switzerland: species versus community approach. *J. Veg. Sci.* 10, 469-482.

Cet article est publié sous la licence Creative Commons (CC BY-NC-ND 3.0)



<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/fr/>

Pour la citation et la reproduction de cet article, mentionner obligatoirement le titre de l'article, le nom de tous les auteurs, la mention de sa publication dans la revue « Innovations Agronomiques », la date de sa publication, et son URL)