HAL
open science

Flore méditerranéenne et changement climatique : la course-poursuite est engagée

M. Vennetier, C. Ripert

To cite this version:

M. Vennetier, C. Ripert. Flore méditerranéenne et changement climatique : la course-poursuite est engagée. Forêt Méditerranéenne, 2010, XXXVI (1), p. 15 - p. 24. hal-00776124

HAL Id: hal-00776124

https://hal.science/hal-00776124

Submitted on 15 Jan 2013

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.

FLORE MEDITERRANEENNE ET CHANGEMENT CLIMATIQUE
LA COURSE-POURSUITE EST ENGAGEE

Michel Vennetier* et Christian Ripert
Unité de Recherche Ecosystèmes Méditerranéens et Risques, Cemagref Aix en Provence
Adresse postale : Cemagref, CS 40061, 13182 Aix-en-Provence Cedex 5
*Auteur correspondant: michel.vennetier@cemagref.fr

Résumé

Le changement climatique modifie rapidement l'aire de répartition potentielle des plantes, et devrait se traduire par des modifications de la flore forestière à différentes échelles. Dans le sud-est de la France, la forêt méditerranéenne a subi une décennie de climat exceptionnellement chaud et sec de 1998 à 2008, faisant suite à une période de réchauffement plus limité et régulier depuis les années 70. Les variations de la flore à l'échelle locale au cours de cet épisode, qui ressemble à ce que pourrait être les conditions climatiques moyennes vers 2040, ont été simulées avec un modèle bioclimatique. Elles ont aussi été mesurées dans des placettes permanentes entre deux inventaires réalisés en 1996-97 puis en 2008. Par rapport à l'inventaire de 1997, la prédiction du modèle pour les variations de flore avec le climat moyen des 30 et 10 dernières années respectivement est de 11 % et 25 %. Le changement observé dans les placettes permanentes représente 14 %, presque entièrement au détriment des espèces exigeantes en eau (mésophiles), remplacées par des espèces xérophiles. Ce remplacement est d'autant plus rapide que les sites sont favorables: haute altitude, exposition fraîche, sols profonds, topographie concave. Il n'est pas significatif dans les sites les plus secs et les plus chauds de la zone d'étude. Cela montre que la compensation du déficit hydrique d'origine climatique par les conditions stationnelles favorables, qui permettait la survie d'espèces mésophiles, n'est plus suffisante. Un seuil critique de stress hydrique a été dépassé. Avec le climat futur, le phénomène devrait gagner progressivement des stations plus défavorables et des zones plus sèches. Il semble qu'une vingtaine d'années serait nécessaire pour que la flore atteigne l'équilibre avec le climat moyen de la dernière décennie. A l'échelle du paysage, les stratégies d'adaptation des plantes et la diversité de la mosaïque stationnelle permettent une résistance temporaire et partielle de composition végétale. Mais les 25% de changement floristique prédits par le modèle devraient être atteints avant la moitié du 21ème siècle même pour les scénarios climatiques les plus optimistes.

Abstract

Climate change quickly modifies the potential distribution area of plants, and should be result in modifications of forest flora on various scales. In southeastern France, the mediterranean forest experienced a decade of exceptionally warm and dry climate from 1998 till 2008, following a period of more limited and regular warming since the 70's. Variations of the flora on local scale during this episode, which looks like what could be the average climatic conditions by 2040, were simulated with a bioclimatic model. They were also measured in permanent plots between two censuses (1996-97 and 2008). With regard to the census of 1997, the prediction of the model for the flora turnover with the average climate of the last 30 and 10 years respectively were 11 % and 25 %. The turnover observed in the permanent plots reached 14 %, almost completely biased against water demanding species (mesophilous), replaced by drought tolerant (xerophytic) species. This change was all the more faster as sites were favorable: high elevation, cool orientation, deep soils, concave topography. It was not significant in the driest and the warmest sites of the study area. The compensation of the climatic water deficit by favorable site conditions, which have allowed the survival of mesophilous species until now, was no longer sufficient. A critical threshold of water stress was passed. With the future climate, this phenomenon should spread gradually into less favorable sites and drier areas. It seems that about twenty years would be necessary for flora to reach the balance with the average climate of the last decade. On landscape scale, plant adaptation strategies and a high diversity of the site mosaic allow a temporary and partial resistance of vegetation composition. But the 25 % of Flora change forecasted by the model should be reached before the middle of the 21st century, even with the most optimistic climatic scenario.

Mots clefs

changement climatique; sécheresse; flore; biodiversité; végétation; modèle bioclimatique; placettes permanentes; inventaire floristique

climate change; drought; flora; biodiversity; vegetation; bioclimatic model; permanent plots; flora census

1. Introduction :

Le bassin méditerranéen est particulièrement concerné par les changements climatiques. Les modèles sont unanimes pour y prédire un réchauffement plus rapide et plus important que dans d'autres régions du monde et une réduction des pluies, durant l'été surtout, mais aussi au printemps (Hesselbjerg-Christiansen et al., 2007). Cette évolution ne peut qu'accentuer le déficit en eau durant la saison de végétation, aggravant ce qui constitue déjà le principal facteur limitant pour la flore (Daget, 1977; Le Houerou, 2005).

L'un des risques liés à ces changements climatiques est que certains végétaux ne puissent s'adapter aux modifications locales très rapides de leurs conditions de vie, particulièrement les arbres forestiers dont les cycles de reproduction sont très longs. Ils ne pourront pas tous suivre le déplacement des limites de leur aire potentielle de répartition (Badeau et al., 2005), car ils ont souvent de courtes distances de dissémination. Par ailleurs, tous les êtres vivants sont concernés, parmi eux des espèces symbiotiques ou parasites, ce qui met en danger les équilibres biologiques établis. Enfin, le décalage dans le temps des principales étapes de la phénologie (Morin et al., 2007) accroît la sensibilité des plantes aux accidents météorologiques de printemps et d'automne et modifie leur capacité reproductive.

La Provence est à l'avant garde pour l'expérimentation des scénarios climatiques du futur. De 1998 à 2008, elle a bondi de 30 à 40 ans en avant, avec un gain 1,4 °C des températures moyennes annuelles (soit autant que durant tout le 20ème siècle) et une baisse de respectivement 18 et 32 % sur les pluies de printemps et d'été. Le déficit récurrent de 50% des pluies cumulées durant le premier semestre de 2004 à 2007 a accentué les effets néfastes de la canicule de 2003. La vague de mortalité du pin sylvestre et du sapin dans le sud des Alpes ainsi que du chêne liège dans les Maures (Département Santé des Forêts, 2003-2008) en sont les illustrations les plus spectaculaires, mais toutes les espèces ont souffert, même les plus méditerranéennes comme le pin d'Alep et le chêne vert (Ouarmim, 2008).

Afin de répondre aux interrogations des forestiers méditerranéens face à l'impact du changement climatique, nous avons, de 1995 à 2007, développé un modèle bioclimatique original (Vennetier, 2007) calibré sur la flore des forêts provençales. Ce modèle montre que le bilan hydrique, incluant les effets de la température, est le facteur le plus déterminant pour la composition floristique comme pour la potentialité forestière (Ripert et al., 2005; Vennetier et al., 2003). Mais cette relation peut être renversée : si la disponibilité en eau détermine une large part de la composition et de la croissance de la flore, on peut utiliser les plantes et leur croissance comme des indices permettant d'évaluer le bilan hydrique à moyen terme.

L'étude sur laquelle se base cet article tente de montrer qu'en utilisant la relation ci-dessus dans les deux sens, notre modèle permet de simuler l'impact du changement climatique sur la composition floristique. Ses objectifs détaillés étaient :

- d'une part de quantifier précisément les variations de la flore simulées par le modèle suivant différents scénarios de changement climatique,
- et d'autre part de valider ces simulations en les comparant aux variations de flore observées sur le terrain au cours des douze dernières années, marquées par des conditions climatiques particulièrement rudes dans notre zone d'étude provençale.

2. Matériel et méthodes

2.1. Zone d'étude et échantillonnage

La zone d'étude (*Figure 1*) se situe en Provence calcaire, entre la vallée du Rhône à l'ouest, celle du Gapeau à l'est, la mer Méditerranée au sud et le Luberon au nord. Son climat est typiquement méditerranéen, avec une grande variabilité interannuelle. Il se caractérise par une sécheresse estivale de deux à quatre mois en moyenne combinée avec des températures très élevées, par des hivers frais et humides et par des pics de pluies en automne et au printemps. Les précipitations moyennes annuelles varient de 500 mm sur la côte à 1000 mm sur les crêtes les plus élevées. Elles sont généralement comprises entre 600 et 750 mm en Basse Provence, et entre 800 et 900 mm dans les massifs montagneux. La température moyenne annuelle est d'environ 13,8°C sur la zone d'étude, et varie de 15,5°C sur la côte à 9°C sur les sommets (valeurs 2007).

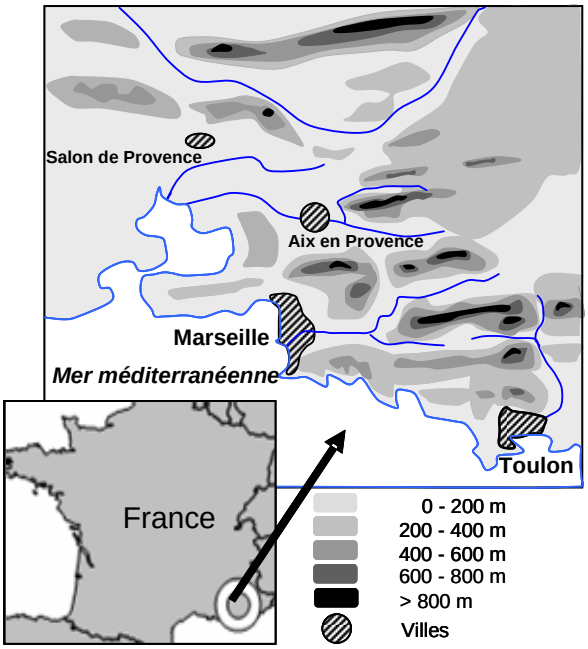

Figure 1 : zone d'étude

Les peuplements forestiers sont dominés soit par le pin d'Alep, formant des peuplements souvent irréguliers et inéquiennes, fréquemment en mélange avec le chêne vert (*Quercus ilex* L.) ou le chêne blanc (*Quercus pubescens* Willdenow), soit par des taillis de ces deux chênes.

Un inventaire de la flore a été réalisé en 1996 - 98 sur 325 placettes forestières représentatives des principaux gradients écologiques: étages bioclimatiques, type de sol, altitude, exposition, topographie. Une description détaillée de l'environnement a été réalisée simultanément, incluant le climat, la géographie, la topographie, la géologie et le sol. Ces placettes sont toutes situées dans des forêts assez âgées et non perturbées récemment (pas de feu ni d'exploitation dans les 30 dernières années, pas de pâturage connu), de sortes que la flore peut être considérée comme représentative e des conditions du milieu.

2.2. Le modèle

Notre modèle est opérationnel depuis de nombreuses années (Vennetier et al., 2001). Ses bases ont été utilisées pour la réalisation du chapitre 2bis du Guide Technique du Forestier Méditerranéen (Ripert et al., 2002). Nous ne reprenons donc dans cet article que ses fonctionnalités utiles à la compréhension des résultats. Ce modèle est conçu en deux étapes : analyse floristique et modélisation.

2.2.1. Analyse floristique

Dans la première étape statistique, nous réalisons une analyse factorielle des correspondances (AFC) sur la flore des placettes notée en coefficients d'abondance-dominance de Braun-Blanquet (avec les 192 plantes présentes au moins dans trois placettes). L'ensemble des variables contribuant au bilan hydrique, projetées dans le plan principal de l'AFC, s'organise autour du premier axe de l'analyse (*Figure 2*).

On peut regrouper ces variables en 4 principaux gradients: (1) gradient climatique, du plus sec et chaud au plus humide et frais, regroupant pluies, températures, altitude et continentalité; (2) gradient de texture allant des sables aux limons et argiles, déterminant pour la réserve en eau du sol; (3) gradient d'exposition, combinant pente, exposition et confinement pour déterminer l'énergie lumineuse reçue, et allant des versant les plus frais aux plus chauds et enfin (4) gradient de topographie et de sol, regroupant la topographie à toutes les échelles (du paysage au local) et les caractéristiques pédologiques (profondeur du sol, pourcentage d'éléments grossiers, affleurements rocheux, etc... et allant des plus mauvaises aux meilleures stations forestières. Toutes les variables et les gradients qui les synthétisent ont, sur la gauche du plan, leurs modalités les plus mauvaises pour le bilan hydrique, et à droite leurs modalités les plus favorables. L'axe 1 peut donc être considéré comme un gradient synthétique de bilan hydrique, principalement, et thermique secondairement.

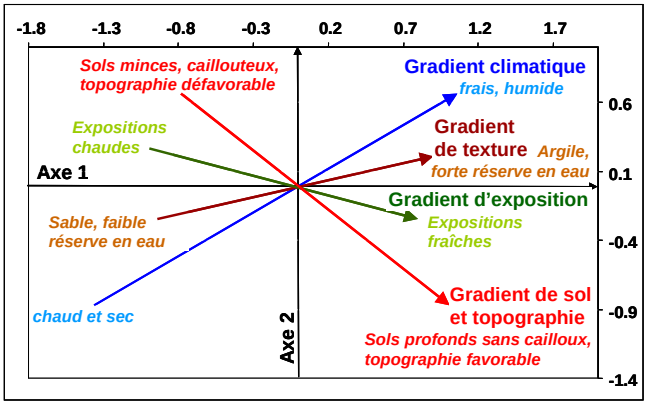

Fig. 2: Plan des deux premiers axes de l'analyse factorielle des correspondances. L'axe 1 est la résultante des gradients écologiques qui contribuent au bilan hydrique à différentes échelles : gradients climatique (de température, de pluie et d'altitude), de texture (capacité de rétention en eau du sol), d'exposition (adrets chauds/ubacs frais), de topographie (concave retenant l'eau/convexe drainant + hauts/bas de versants) et de sol (profondeur, pourcentage de cailloux et de roche). C'est donc clairement un axe de disponibilité en eau pour les végétaux.

Les plantes peuvent être représentées dans ce plan[1] et sur l'axe 1 de l'AFC. (*figure 3*). Elles sont alors triées suivant le gradient de bilan hydrique et thermique, avec à gauche les plus résistantes à la sécheresse et à la chaleur (xéro-thermophiles*), et à droite les plus exigeantes en eau et en fraîcheur (mésophiles). Sur la base des coordonnées sur cet axe, nous avons scindé les plantes en cinq groupes d'importance égale par leur nombre (48) : les super-xérophiles (xéro-), les xérophiles (xéro), les intermédiaires (int), les mésophiles (méso) et les très mésophiles (méso+). Cette classification est purement locale et relative. Certaines des plantes du groupe méso+ seraient considérées comme xéro- ou thermophiles dans des contextes plus nordiques.

Dans la même projection à une autre échelle, on peut représenter les placettes, dont la position est déterminée par leur composition floristique : mathématiquement, une placette se positionne au centre de gravité des plantes qu'elle contient. La coordonnée d'une placette sur l'axe 1 ne dépendant que de la flore, nous la considérons comme son "Indice floristique" (If). Il permet de trier les placettes, comme les plantes, dans le gradient de bilan hydrique.

[1] *Dans le plan d'une AFC plantes/placettes, les plantes sont représentées mathématiquement au centre de gravité des placettes où elles sont présentes. Les variables descriptives du milieu ne contribuent pas du tout à l'analyse, mais indirectement elles sont sous-jacentes à la position des placettes, puisque celles-ci sont représentatives des différents gradients écologiques. C'est ce qui permet l'interprétation écologique du plan en y projetant les variables descriptives (figure 2).*

2.2.2. Modélisation bioclimatique

La deuxième étape consiste construire le modèle pour prédire de façon optimale l'indice floristique des placettes à l'aide des variables descriptives du milieu. Nous avons utilisé pour ce modèle une régression PLS (Partial Least Square)[2]. Une fois calibré, le modèle donne pour chaque placette une estimation de l'indice floristique, que l'on appelle son indice bioclimatique (Ib). La modélisation permet d'expliquer 81 % des variations de la flore à l'aide de huit variables climatiques et géographiques, et de six variables décrivant la topographie locale et le sol (*annexe 1*). Cette très bonne correspondance entre les indices floristiques (If) et leur estimation par le modèle (Ib) autorise les simulations de l'impact potentiel du changement climatique, car la répartition saisonnière des pluies et la température moyenne annuelle jouent un rôle important dans le modèle. Les valeurs climatiques retenues pour la modélisation initiale de la flore de 1996-98 sont celles de la période 1961-96.

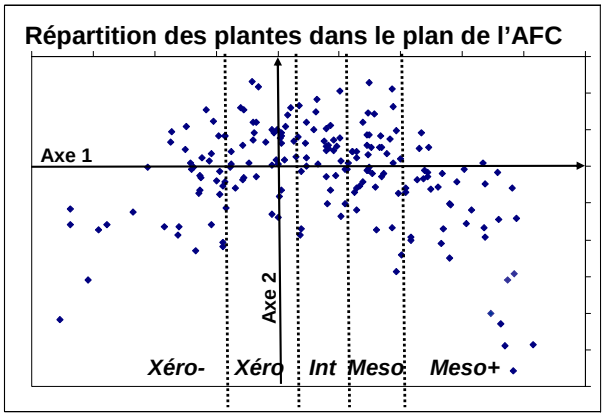

Fig. 3 : Position des plantes dans le plan des deux premiers axes de l'analyse factorielle des correspondances. La coordonnée des plantes sur l'axe 1 les trie de gauche à droite suivant une résistance décroissante aux stress hydriques et thermiques. Les placettes peuvent être positionnées dans le même plan. Leur coordonnée est retenue comme indice floristique, puisqu'elle est déterminée par leur composition végétale (mathématiquement, une placette se positionne au centre de gravité des plantes qui y sont présentes).

2.3. Simulations de l'impact des changements climatiques

La simulation se base sur les deux étapes du modèle:

Dans un premier temps, on modifie les paramètres climatiques de la zone d'étude, soit en faisant varier de façon arbitraire pluie et température, séparément puis simultanément, soit se basant sur des scénarios fournis par les météorologues, soit enfin en introduisant les données climatiques des dix dernières années. Cette modification des paramètres de calcul donne pour chaque placette un nouvel indice bioclimatique (Ib'). Si le climat devient plus chaud et plus sec, cet indice diminue et les placettes se déplacent vers la gauche de l'axe 1. Nous avons pris soin de nous en tenir à des variations climatiques modérées (maxi +2°C) pour que la grande majorité des placettes (>85%) reste dans la plage de climat qui a servi à la calibration du modèle.

Dans un deuxième temps, on modifie de façon plus ou moins importante la flore des placettes : élimination de une à trois plantes mésophiles et addition de une à trois plantes xéro-thermophiles, ou diminution variable de l'abondance-dominance des plantes mésophiles et accroissement du même ordre de celle des plantes xéro-thermophiles. On considère en effet qu'une augmentation de la température ou une diminution de la pluie accroissent le stress hydrique. Ils devraient donc faire disparaître prioritairement, dans chaque placette, les plantes les plus exigeantes en eau et les moins tolérantes à la chaleur. Les plantes les plus xéro-thermophiles, mieux adaptées aux nouvelles conditions et libérées d'une partie de la concurrence, devraient gagner du terrain. Dans le plan de l'AFC, ces placettes à flore modifiée se décalent vers la gauche par rapport à la placette d'origine, ce qui leur donne un nouvel indice floristique (If ') inférieur au précédent.

Grâce à la bonne qualité prédictive du modèle, on peut comparer les indices If' et Ib' et faire ainsi correspondre les modifications simulées du climat avec des pourcentages attendus de modification de la flore.

2.4. Validation par un nouvel inventaire

Cinquante des placettes de l'étude initiale, représentatives des principaux gradients écologiques, ont été réinventoriées au printemps 2008 par la même équipe en respectant strictement les mêmes protocoles. Les deux inventaires ont été comparés en séparant les cinq classes de plantes triées par ordre de bilan hydrique. Afin d'éviter les variations de flore qui pourraient être dues à des dates différentes d'inventaires, nous avons utilisé d'une part l'inventaire total de la flore et, d'autre part, l'inventaire des plantes pérennes et reconnaissables en toutes saisons. Nous avons aussi comparé la basse Provence et l'arrière pays, et les placettes mésophiles et xéro-thermophiles, la séparation de celles-ci se faisant sur leur rang de classement sur l'axe 1.

3. Résultats

3.1. Données sur la flore de la zone d'étude

La flore d'une placette comporte en moyenne 27 plantes (10 à 54, écart-type = 7,5), dont en moyenne 21 (8 à 35, écart-type =7.3) sont reconnaissables en toutes saisons, chiffres inchangés entre les deux inventaires. Mais il y a en fait d'autant plus de plantes que l'indice

[2] *La régression PLS, basée sur une analyse multifactorielle, permet de réaliser de façon fiable des régressions multiples avec un grand nombre de variables, des variables corrélées entre elles et peu d'observations, ce que ne permettent pas les méthodes classiques de régression multiple.*

floristique augmente (r^2=0.22, p <5%), et donc que le bilan hydrique est plus favorable, ce nombre moyen passant de 21 à 34 de gauche à droite de l'axe 1 pour l'ensemble des plantes et de 11 à 25 pour les plantes reconnaissables en toutes saison. Un changement d'une plante dans la composition floristique de chaque placette (en plus ou en moins) correspond donc à une variation moyenne de 3,7% de la flore totale (3,0 à 4,8%). Une variation de 6 plantes (suppression de 3 méso+, addition de 3 xéro-).correspond à une variation moyenne de 23% (18 à 28%). La modification de deux points du coefficient d'abondance-dominance d'une plante xéro- ou méso+ dans une placette est équivalente en moyenne, en terme de variation d'indice If, à la suppression ou à l'ajout d'une plante de ces catégories à la liste des plantes de cette placette.

3.2. *Correspondance entre variations de flore et de climat*

Dans la *figure 4*, les modifications du climat et les modifications de la flore donnant des variations égales respectivement des indices Ib et If sont mis en correspondance.

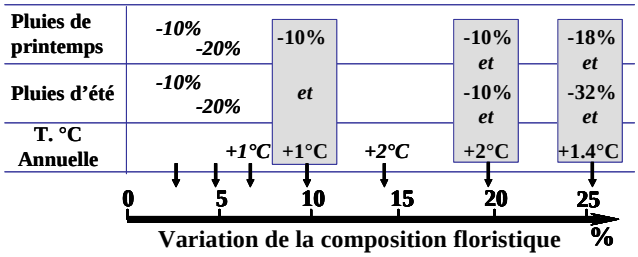

Fig. 4 : Modification attendues de la flore (en pourcentage des espèces présentes à l'origine) en fonction des changements simulés du climat. Nous avons simulé soit une réduction des pluies seule (-10 à -20% au printemps ou en été), soit une augmentation des températures moyennes annuelles seules (+1 ou + 2 °C) soit une combinaison de variations de pluies et température (cadres gris). Le dernier cadre à droite correspond au climat moyen des années 1998-2007 comparé aux années 1998-2007 comparé aux années 1961-96 ayant servi à calibrer le modèle initial.

A droite de la figure, le changement climatique donnant la plus forte variation floristique correspond au climat des dix dernières années comparé à celui de la période 1961-96. Il conduit à un changement de près d'un quart de la flore, soit 6 à 7 plantes sur 27. Les variations de températures on un effet très rapide puisque la hausse de respectivement 1 et 2°C aboutit à une variation de 7 et 14% de la flore. La réduction de 20 % des pluies de printemps ou des pluies d'été ne modifie que d'une plante la composition floristique, soit moins de 5 %, mais son effet est largement accru en combinaison avec une hausse de température.

3.3. *Validation par l'observation*

Que l'on considère toutes les plantes ou seulement celles qui sont reconnaissables en toutes saisons, les résultats sont semblables pour toutes les analyses, montrant qu'ils ne dépendent pas de la méthode ou la date des inventaires. En dehors de la *figure 5*, nous ne représentons donc que les résultats basés sur l'ensemble de la flore.

Seulement 20 % des plantes les plus résistantes au stress hydrique et thermique (xéro-) ont disparu en 2008 de placettes où elles étaient présentes en 1996-98, contre près de 50 % des plantes les plus exigeantes en eau (méso+), (*figure 5*). A l'inverse, près de 40 % des plantes xéro et xéro+ ont gagné du terrain contre 10 % seulement des plantes méso+. Dans le groupe méso, on note un déséquilibre de 20 % au profit des disparitions. Dans les groupes xéro et intermédiaire, les changements ont été assez équilibrés, certaines espèces d'un même groupe remplaçant celles qui disparaissaient. Les apparitions et disparitions d'espèces ne se sont donc pas le fait du hasard, mais ont été surtout marquées dans les groupes de bilans hydriques extrêmes.

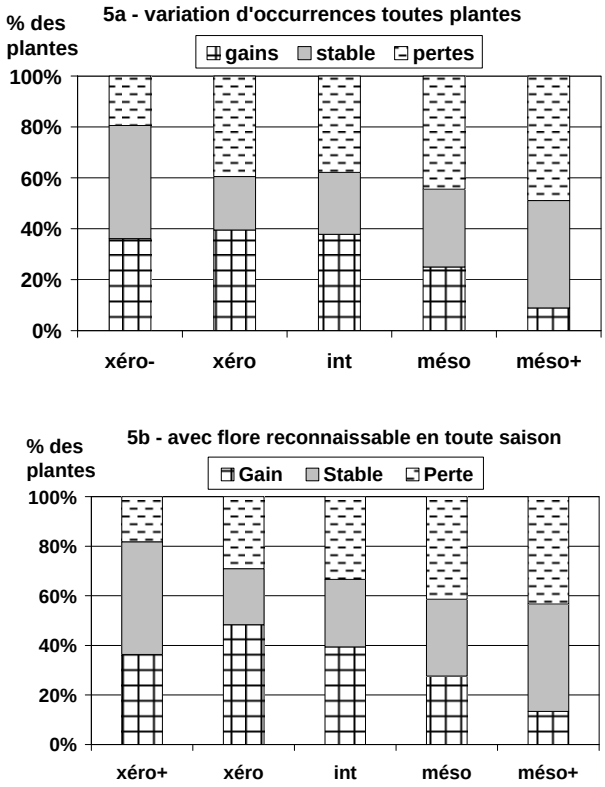

Fig. 5. Variations, entre 1996-98 et 2008, de l'occurrence des plantes, en fonction de leur résistance au stress hydrique et thermique, en pourcentage du nombre de plantes par classe. Une plante a gagné (respectivement perdu) si elle est présente en 2008 dans plus (respectivement dans moins) de placettes qu'en 1996-98. Il n'y a pas de différence significative que l'on considère l'ensemble des plantes (5a) ou uniquement les plantes reconnaissables en toute saison (5b).

Les coefficients de Braun-Blanquet, donc l'abondance et le recouvrement des plantes, varient encore plus que leur occurrence (*Figure 6*). Sur 50 placettes, les classes xéro- et xéro gagnent ensemble 70 occurrences, soit en moyenne 1,4 plantes par placette, mais près de 120 points, soit près de 2,5 indices de

Braun-Blanquet. Cela signifie que, non seulement des plantes xérophiles nouvelles sont apparues dans les placettes, mais que certaines, déjà présentes, ont aussi gagné en recouvrement. Les plantes méso+ et méso ont perdu ensemble 70 occurrences et autant en coefficients : les pertes de recouvrement sont donc expliquée en totalité par les pertes de présence. Globalement, la variation qualitative de la flore (variation positives et négatives dans les groupes extrêmes) atteint près de trois plantes par placette soit 8 à 13 % en dix ans. Si l'on ajoute les variations de recouvrement non expliquées par l'occurrence, à raison de ½ plante par point de coefficient d'abondance dominance, on arrive à une variation totale de 10 à 15% de la flore.

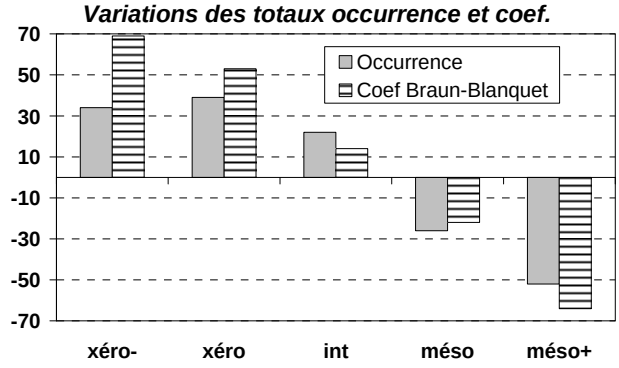

Fig. 6 : Variations, entre 1996-97 et 2008, des sommes des occurrences et des sommes des coefficients de Braun-Blanquet par classes de plantes sur les 50 placettes réinventoriées en 2008. Une occurrence correspond à une plante dans une placette.

Mais cette transformation qualitative ne s'est pas produite uniformément dans la zone d'étude. La *figure 7* montre que les variations d'indice floristique sont faibles et ont été globalement équilibrées dans les placettes originellement chaudes et sèches.

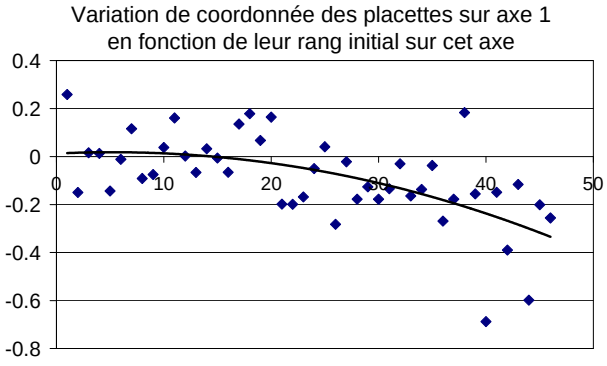

Figure 7 : variation de l'indice floristique des placettes sur l'axe 1 de 1998 à 2008 en fonction de leur rang sur cet axe, donc en fonction de leur bilan hydrique. La flore des placettes mésophiles a régressé tandis que celle des placettes xéro-thermophiles est restée plus stable.

Les pertes d'indice floristique se sont produites surtout dans les placettes mésophiles, c'est-à-dire soit dans l'arrière-pays dans des situations stationnelles moyennes à bonnes, soit en basse Provence dans les stations les plus favorables (stations très fraîches en versants nord, sur bons sols, et dans les fonds de vallons).

Les changements quantitatifs de la flore sont plus importants que ne le montre le bilan qualitatif. Il y a eu en valeur absolue une variation de 5 plantes par placettes soit 15 à 24% si l'on considère la flore totale, et de 4.4 plantes reconnaissables en toutes saisons, soit 17 à 40%).

4. Discussion

A cause des multiples perturbations subies depuis des milliers d'années, la flore méditerranéenne actuelle n'est pas stable. Même dans les zones forestières suffisamment anciennes que nous avons étudiées, elle présente une évolution vers un écosystème plus mature (Tatoni et al., 1994) qui devrait favoriser les espèces plutôt sciaphiles et mésophiles, au détriment des espèces pionnières opportunistes généralement xérophiles et héliophiles. Or c'est exactement l'inverse qui s'est produit sur les dix dernières années dans notre échantillon, ce qui conforte l'hypothèse d'un impact fort du changement climatique.

En ce qui concerne l'ampleur du changement floristique observé, Archaux et al. (2006) notent qu'une variation de 5 à 10 % est courante entre deux inventaires successifs en absence de modification de l'environnement. Elle correspond à la dynamique locale du système, alimentée par la concurrence entre végétaux, les interactions avec les parasites et maladies, les aléas de la reproduction liés aux fluctuations interannuelles normale du climat. Mais dans ce cas, cette variation est aléatoire et ne peut pas être liée à un gradient écologique ou climatique. Or les changements que nous avons observés au sein des groupes de plantes sont très clairement orientés par le bilan hydrique et thermique. Les plantes mésophiles sont largement perdantes tandis que les thermo-xérophiles gagnent significativement du terrain. En fait, le taux très élevé de variation globale de la flore des placettes (15-24%) provient de la superposition des variations aléatoires normales, dans lesquelles les plantes d'un même groupe se remplacent mutuellement, de la dynamique de maturation, et des variations orientées par le climat.

Le fait que les plantes des groupes méso+ et xéro- soient les plus concernées par les variations de flore valide le protocole de manipulation de la composition floristique que nous avons utilisé pour la simulation de l'impact du changement climatique à l'aide de notre modèle (addition ou suppression de plantes extrêmes dans chaque placette).

Le taux de variations qualitatif de la flore lié au climat (10-15%) est inférieur à celui qui est prédit par le modèle (25%) sur la base du climat des 10 dernières années (2008-98). Cela indique que la flore possède, heureusement, une certaine inertie face aux changements d'environnement. Les espèces mésophiles peuvent survivre dans des zones favorables comme les vallons frais, les versants nord en pente forte, les zones abritées par des falaises, près de résurgences ou sur des sols très profonds. Elles peuvent regagner du terrain en

se disséminant depuis ces refuges à chaque année favorable. Elles peuvent aussi se maintenir longtemps dans la banque de graines du sol et germer à la première occasion. Leur disparition définitive ne peut donc se produire à grande échelle que sur le moyen ou long terme.

A l'opposé, la flore xéro-thermophile est déjà largement disséminée dans les zones de climat frais et humide, profitant de sols superficiels, de versants très chauds, de falaises et crêtes rocheuses. Elles restent aussi présentes dans des sites plus favorables pour des raisons historiques, la grande majorité du territoire ayant été surexploité par l'homme jusqu'au siècle dernier. Elles peuvent ainsi facilement s'étendre depuis ces bases avancées dans les espaces libérés par les plantes mésophiles, expliquant leur dynamique rapide observée dans cette étude.

Les différences de variations floristiques ente les placettes en fonction de leur position initiale sur l'axe 1 (*Figure 7*) permettent une interprétation plus détaillée de l'impact du changement climatique. Les dépérissements d'espèces se sont produits en majorité dans les stations les plus favorables (sols profonds, bas de versants et thalwegs, versants nord) ce qui semble contre-intuitif. En fait, la survie des plantes mésophiles dans ces stations était jusqu'alors liée à la compensation des déficits hydriques climatiques et à l'atténuation des excès de températures par les réserves en eau du sol et les effets favorables de la topographie. Or, depuis 1998, des seuils critiques de déficit hydrique et de canicule ont été dépassés de façon répétée. La compensation par les facteurs stationnels n'est plus suffisante. Un bon exemple est donné par le dépérissement du pin sylvestre qui a débuté en 2004, suite à la canicule et sécheresse de 2003, sur les versants exposés au nord, à relativement haute altitude et sur des sols corrects (Département Santé des Forêts, 2003-2008). Dans les zones initialement xéro-thermophiles, et sur les mauvais sols, la végétation était déjà sélectionnée par le déficit hydrique se produisant régulièrement. Elle a donc mieux encaissé les dix dernières années. Une certaine compensation a pu se produire pour les espèces intermédiaires ou légèrement mésophiles entre les effets négatifs du climat et la maturation des peuplements vieillissants.

5. Conclusion

La résilience de la flore aux changements climatiques a des limites que montrent les variations de composition floristique observées sur les 10 dernières années en Provence. Les epsèces mésophiles perdent rapidement du terrain. Les mortalités massives de pin sylvestre et sapin dans le sud-est de la France confirment la menace qui pèse sur les espèces exigeantes en eau. La course-poursuite entre le climat et la flore est donc déjà bien engagée.

Les fortes variations de flore simulées par notre modèle, soit 25% de la composition actuelle, ont toutes les chances de se produire dans un délai de quelques dizaines d'années au plus si les tendances climatiques actuelles se confirment.

Remerciements

Merci aux nombreux techniciens et stagiaires dont Roland Estève, Olivier Chandioux et Willy Martin qui ont contribué aux inventaires de la flore et descriptions de placettes.

Références

Archaux F. ; Gosselin F. ; Berges L. ; Chevalier R. (2006) Effects of sampling time, species richness and observer on the exhaustiveness of plant censuses. Journal of Vegetation Science, vol. 17, p. 299-306.

Badeau V. ; Dupouey J.L. ; Cluzeau C. ; Drapier J. (2005) Aires potentielles de répartition des essences forestières d'ici 2100. Forêt Entreprise, vol. Dossier " la forêt face aux changements climatiques ", n° 162, p. 25-29.

Daget P. (1977) Le bioclimat méditerranéen : caractères généraux, modes de caractérisation. Vegetatio, n° 34 p. 1-20.

Département Santé Des Forêts (2003-2008) Plusieurs rapports (actualisation permanente) sur l'état de santé des forêts après la canicule de 2003 peuvent être trouvés sur le site WEB du département santé des forêts du Ministère de l'Agriculture. http://www.agriculture.gouv.fr/spip/ressources.themes.foretbois.santedesforets_r314.html.

Hesselbjerg-Christiansen J. ; Hewitson B. (2007) Regional Climate Projection. In: *IPCC (2007) Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller eds., Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 996 p.*

Le Houerou H.N. (2005) Atlas des diagrammes climatiques des stations de la zone isoclimatique méditerranéennes. Le Houerou ed., Montpellier, 220 p.

Morin X. ; Chuine I. (2007) Impacts du changement climatique sur la phénologie des essences forestières et les risques de gel précoce. In: *La forêt face aux changements climatiques*, ECOFOR - QUAE, Paris, 15 - 16 décembre 2005, p. sous presse.

Ouarmim S. (2008) *Impact des sècheresses extrêmes sur la croissance du Pin d'Alep Pinus halepensis Mill.* Mémoire de Master 2R, Cemagref, Université Paul Cézanne, Aix en Provence, 43 p.

Ripert C. ; Vennetier M. (2002) Guide Technique du Forestier Méditerranéen Français. Chapitre 2 bis : Evaluation des potentialités forestières. Cemagref Edition, Aix en Provence, 61 p.

Ripert C. ; Vennetier M. (2005) Evaluer la potentialité forestière d'un site sans observer la flore, présentation d'une méthode développée en région méditerranéenne calcaire. RDV Techniques, n° 8, p. 15-22.

Tatoni T. ; Roche P. (1994) Comparison of Old-Field and Forest Revegetation Dynamics in Provence. Journal of Vegetation Science, vol. 5, n° 3, p. 295-302.

Vennetier M. (2007) *Un nouveau modèle bioclimatique pour la forêt méditerranéenne. Application à l'étude de l'impact du changement climatique sur la végétation et à l'évaluation de la productivité forestière.* Thèse de doctorat, UR Ecosystèmes méditerranéens et risques, Cemagref / Université Paul Cézanne (Aix-Marseille III) Aix en Provence, 284 p.

Vennetier M. ; Ripert C. ; Maille E. (2001) *Etude des potentialités forestières de la Provence calcaire. Evaluation à petite échelle sur de grandes surfaces. Rapport final et version résumée.* Cemagref, Aix en Provence, 106 p.

Vennetier M. ; Ripert C. ; Maille E. ; (2003) Etude des potentialités forestières de la Provence calcaire ouest : Evaluation à petite échelle sur de grandes surfaces. Forêt méditerranéenne, vol. XXIV, n° 1, p. 32-36