



Écologie / Ecology

Relations entre plantes et climats en France : étalonnage de 1874 bio-indicateurs

Emmanuel Garbolino^{a,*}, Patrice De Ruffray^b, Henry Brisse^c, Gilles Grandjouan^d

^a Pôle « Cindyniques », École des mines de Paris (ENSMP), BP 207, 06904 Sophia-Antipolis, France

^b IBMP, 12, rue du Général-Zimmer, 67084 Strasbourg cedex, France

^c UMR 6116 Imep, faculté des sciences de Saint-Jérôme, université Aix-Marseille-3, av. Escadrille-Normandie-Niemen, boîte 451, 13397 Marseille cedex 20, France

^d UMR 5554 Isem, place Eugène-Bataillon, 34095 Montpellier cedex 5, France

Reçu le 12 mai 2006 ; accepté après révision le 30 octobre 2006

Disponible sur Internet le 18 janvier 2007

Présenté par Michel Thellier

Résumé

L'influence du climat sur la géographie des plantes est étudiée à partir d'un étalonnage probabiliste entre une banque de données botaniques, de 12 000 relevés, et un réseau d'observation météorologique en France de 574 postes pluvio-thermiques. L'étalonnage définit l'optimum climatique (position) et le pouvoir indicateur (concentration) de 1874 plantes pour six variables climatiques. La validation de ces relations repose sur la comparaison entre l'estimation du climat par les plantes et les valeurs mesurées dans les postes climatiques à leur voisinage. Elle montre ainsi que les plantes sont des bio-indicateurs du climat, avec une justesse moyenne de 88,5% et une stabilité moyenne de 96,5%. *Pour citer cet article : E. Garbolino et al., C. R. Biologies 330 (2007).*

© 2006 Académie des sciences. Publié par Elsevier Masson SAS. Tous droits réservés.

Abstract

Relationships between plants and climate in France: calibration of 1874 bio-indicators. The influence of climate on plants geography is studied through a probabilistic calibration between a botanical database, containing 12 000 plots, and a meteorological database composed of 574 climatic stations. The calibration measures the climatical optimum (position) and the indicator power (concentration) of 1874 plants for six climatic variables. The validation of these relations is based upon the comparison of the estimation of climate by plants and the values measured by climatic stations near the plots. This validation underlines that plants are accurate (accuracy = 88.5%) and stable (stability = 96.5%) bio-indicators of climate variables. *To cite this article: E. Garbolino et al., C. R. Biologies 330 (2007).*

© 2006 Académie des sciences. Publié par Elsevier Masson SAS. Tous droits réservés.

Mots-clés : Bio-indicateurs ; Climat ; Étalonnage ; Banque de données ; Probabilités ; Estimation du climat

Keywords : Bio-indicators ; Climate ; Calibration ; Database ; Probabilities ; Climate assessment

Abridged English version

The study of the relationships between plants and climate knows a renewed interest due to the context of

* Auteur correspondant.

Adresse e-mail : emmanuel.garbolino@ensmp.fr (E. Garbolino).

global warming and its consequences on the vegetation dynamic and distribution. However, few works are dedicated to the characterization and the quantification of the bonds between the measures of the climate and an important amount of plant taxa at the scale of a country such as France. In this paper, we propose a probabilistic calibration to measure these relationships in order to elaborate 1874 bio-indicators of climate parameters such as temperatures and precipitations.

The botanical observations come from a phytosociological database that contains more than 140 000 plots in France. In order to calibrate the relationships between plants and climate, 12 000 phytosociological plots surrounding 574 climatic stations have been selected, which corresponds to an amount of more than 250 000 observations of plants under the different types of climates in France ('Métropole'). The selected climatic variables comprise the monthly averages over 50 years of the day and night temperatures (average and extreme values), the heights of the precipitations and the number of the rainy days for each month.

The climatic characterization of a taxon is based upon a probabilistic calibration taking into account three main ecological assumptions: (i) the effect of a factor on a plant's frequency follows a unimodal trend, defining an optimum frequency of the occurrences of the plant in a part of the range of a climatic variable, (ii) the effect of a factor on a plant is gradual, but the intermittence of the plant in the range of the climatic variable is possible, (iii) a plant is a better indicator of a factor if its occurrence is concentrated in one part of the range of the climatic variable, i.e., if two plants are distributed in the same part of the range of a climatic variable, the most indicative plant is the one showing the highest frequencies at one or more levels of the range, even though the two plants may have the same optimum. Therefore, the calibration defines a position parameter of the plant in the range of the climatic variable, named 'optimum', and a dispersion parameter named 'indicator power' for each calibrated plant. These two parameters characterize the climatic behaviour of a plant by indicating its climatic position and the strength of the bond between the plant and the climatic variable. 'Optimum' and 'indicator power' are both expressed in percents in order to compare all of these climatic behaviours of the botanical taxa.

This calibration produces a list of 1874 bio-indicators of climatic variables in France. The validation of this calibration is based on the difference between the measured climate by the meteorological stations and the climate estimated by the plants surrounding these meteorological stations. The result of this validation under-

lines that plants are accurate (accuracy = 88.5%) and stable (stability = 96.5%) bio-indicators of the climatic parameters in France.

The geographic distribution of some bio-indicators coincides with the distribution of some well-described climates. For example, *Pistacia lentiscus* L. indicates a Mediterranean climate characterised by warm and dry summers and autumns and mild and relatively rainy winters. This species has been assessed as very and extremely indicative of very high to extremely high optima of temperatures for almost the full year, underlining the thermal aspect of the Mediterranean climate in any season and independent of the day and the night. *Impatiens parviflora* DC. indicates a continental climate characterised by very low optima of the temperatures in winter and average and high optima in summer. But plants can also indicate some more original climates, like the coastal climate. For example, *Ammophila arenaria* (L.) Link. is located on the Atlantic and Mediterranean French littoral. This species is very indicative of very high optima of maximum temperatures in winter. It is also very indicative to extremely indicative of extreme high optima of the minimal temperatures. This species shows a littoral bioclimate characterised by very mild night temperatures and by mild daily temperatures in winter and relatively cool temperatures in summer.

This study shows that plants can be used as accurate bio-indicators of climate. The monitoring of the distribution of these bio-indicators for the next years will provide complementary information on the influence of the global warming on plants in France.

1. Introduction

C'est au cours du Siècle des lumières que le géographe et naturaliste Alexander von Humboldt insista sur le rôle de la géographie des climats pour expliquer celle des plantes : «*La géographie des plantes, dont le nom même était presque inconnu il y a un demi-siècle, offrirait une nomenclature aride et dépourvue d'intérêt si elle ne s'éclairait pas des études météorologiques.*» [1] Il conseilla d'appuyer la recherche des relations entre les paramètres du milieu et la géographie des plantes, non seulement sur les cartes de distribution des plantes et des facteurs auxquelles elles sont soumises, mais également sur la recherche «*des éléments numériques de la géographie des plantes*» [2].

Les travaux entrepris au cours des siècles suivants se sont inspirés de ces réflexions, en intégrant progressivement les mesures du climat pour définir, par exemple, des isothermes ou des indices climatiques et en comparer leur répartition avec celle de la végétation [3–10].

Dans les années 1970, un catalogue des comportements climatiques et édaphiques des plantes a même été réalisé à partir d'une expertise collective d'écologistes et de géographes [11]. Toutefois, le caractère empirique de cette approche ne permet pas de quantifier les liens entre les plantes et les facteurs du milieu, puisqu'elle se borne à proposer des plantes indicatrices de classes qualitatives. Par la suite, et grâce à l'essor des banques de données en environnement, il est devenu possible d'utiliser une démarche plus stationnelle pour caractériser les liens entre plantes et climats, pour apporter davantage de précision. De récents travaux de forestiers américains [12–14] et de chercheurs français [15–17] reposent ainsi sur la juxtaposition d'observations botaniques et de mesures climatiques localisées respectivement dans des cadrats allant de 10 à 50 km de côté, selon les études. Les résultats présentent des plantes ligneuses indicatrices du climat fondées sur un modèle géométrique (principalement sur des corrélations) qui ne prend en compte, ni le caractère intermittent des observations botaniques, ni le caractère ordinal des relations entre plantes et climats.

L'objectif de cet article est donc de proposer une approche probabiliste pour quantifier les liens apparents entre plantes et mesures du climat, domaine de l'écologie qui connaît aujourd'hui un regain d'intérêt, compte tenu des problématiques associées au réchauffement climatique. L'originalité de cette méthode est qu'elle ne formule pas d'hypothèses sur la forme algébrique des relations entre les plantes et les variables du milieu. Elle étudie le rangement d'un taxon dans la gamme d'une variable du milieu, quelle que soit l'intermittence du taxon au sein de cette gamme. Elle définit un paramètre de position et de concentration du taxon dans cette gamme permettant de considérer une plante comme un indicateur de variable du milieu. Elle procède ainsi à un étalonnage probabiliste qui tient compte de la nature ordinaire des observations et des liens entre la flore et les mesures du climat, à partir de deux banques de données constituées à l'échelle de la France métropolitaine. Les résultats de cette recherche sont consignés dans un catalogue consultable sur Internet (<http://sophy.u-3mrs.fr>), comprenant 1874 taxons botaniques indicateurs des mesures du climat en France.

2. Méthodologie : un étalonnage probabiliste entre plantes et climat

2.1. Observations botaniques et mesures du climat

L'étude stationnelle des relations entre plantes et climats a nécessité d'utiliser deux bases de données environnementales rassemblant respectivement des obser-

vations botaniques et des mesures climatiques réparties sur le territoire français :

- la banque de données botaniques et écologiques « Sophy » (<http://sophy.u-3mrs.fr>) : elle montre les présences et les abondances de 4300 taxons botaniques dans plus de 140 000 relevés botaniques localisés en France [18]. Ces relevés ont été effectués par des phytosociologues et suivent un protocole relativement standardisé afin de fournir des informations comparables d'un relevé à l'autre ;
- les données climatiques de Météo France : le climat conditionne la flore par son action prolongée au cours des mois et des années, ce qui incite l'utilisation de moyennes. Les données utilisées sont constituées par des mesures mensuelles moyennes sur une période de 50 ans relatives aux valeurs moyennes et extrêmes des températures du jour (maximales) et de la nuit (minimales), aux fréquences des jours de pluie et aux valeurs cumulées des hauteurs des précipitations. Ces valeurs ont été enregistrées dans un réseau de 643 postes climatiques en France.

L'échantillonnage consiste donc à rapprocher les observations botaniques des postes climatiques. Initialement, 187 postes climatiques avaient été visités au cours de trois années successives, et des relevés floristiques y avaient été effectués [19]. L'existence actuelle des banques de données environnementales permet de s'affranchir de telles prospections par la sélection automatique des relevés autour des postes. La sélection des postes utiles pour l'étalonnage consiste à choisir un minimum de cinq relevés phytosociologiques proches d'un poste climatique. La distance entre les relevés et le poste climatique ne dépasse pas 10 km et, le plus souvent, ces relevés sont contenus dans un rayon de 5 km autour du poste. L'écart entre l'altitude du poste et celle des relevés qui lui sont proches ne dépasse pas 10% afin d'éviter de trop grands écarts climatiques entre relevés. Au total, cet échantillonnage comprend 12 000 relevés, concernant 1874 taxons dans les environs de 574 postes. Ces données constituent la base la plus détaillée, la plus complète et la plus standardisée qui ait été utilisée jusqu'à présent pour connaître les relations entre plantes et climats en France (Fig. 1).

2.2. Expression probabiliste des liens entre plantes et mesures du climat

L'étalonnage climatique des plantes repose sur trois hypothèses simples (Fig. 2) [20–23] :

- (a) l'effet d'un facteur sur la fréquence d'une plante suit une tendance unimodale caractérisée par un optimum des fréquences de la plante dans une partie de la gamme de la variable climatique ;
- (b) l'effet d'un facteur sur une plante est graduel, quelle que soit l'intermittence des fréquences de la plante dans la gamme de la variable climatique ;

- (c) une plante est d'autant plus indicatrice d'un facteur que ses fréquences sont plus concentrées dans une partie de la gamme de la variable climatique. Concrètement, si deux plantes « a » et « b » sont distribuées dans la même partie de la gamme d'une variable, la plante la plus indicatrice sera celle qui aura les fréquences les plus importantes dans un ou plusieurs rangs de la gamme, même si elles ont le même optimum.

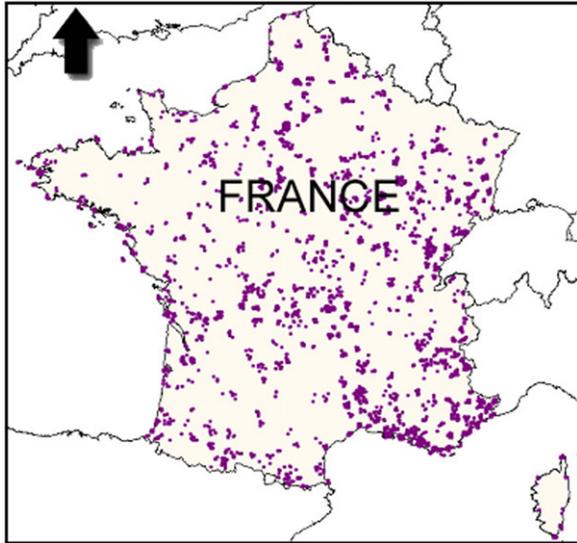


Fig. 1. Répartition des 12 000 relevés floristiques de la banque « Sophy » aux alentours des 574 postes climatiques de Météo France. Cette carte montre que les relevés sont localisés sous les principaux types de climats que connaît la France.

L'effet apparent qu'un facteur du milieu induit sur une plante s'exprime au niveau des occurrences de la plante et de ses abondances dans une localité donnée. En écologie, la localité peut être remplacée par la mesure d'un facteur du milieu, comme la température du jour, par exemple. L'écologie cherche ainsi à connaître dans quelle partie de la gamme d'une variable se trouve une plante, mais également si cette plante est concentrée dans cette même partie de la gamme. L'étalonnage définit la probabilité de concentration d'une plante dans une partie de la gamme de la variable climatique. Pour cela, l'étalonnage se fonde sur des valeurs climatiques et des abondances de plantes qui sont des données ordinales et non des données métriques : ce sont des grandeurs dont on définit le rangement et non la somme. C'est pourquoi l'étalonnage utilise de simples comptages, résumés par des probabilités, plutôt que des corrélations ou des distances géométriques généralement utilisées en écologie [24–28].

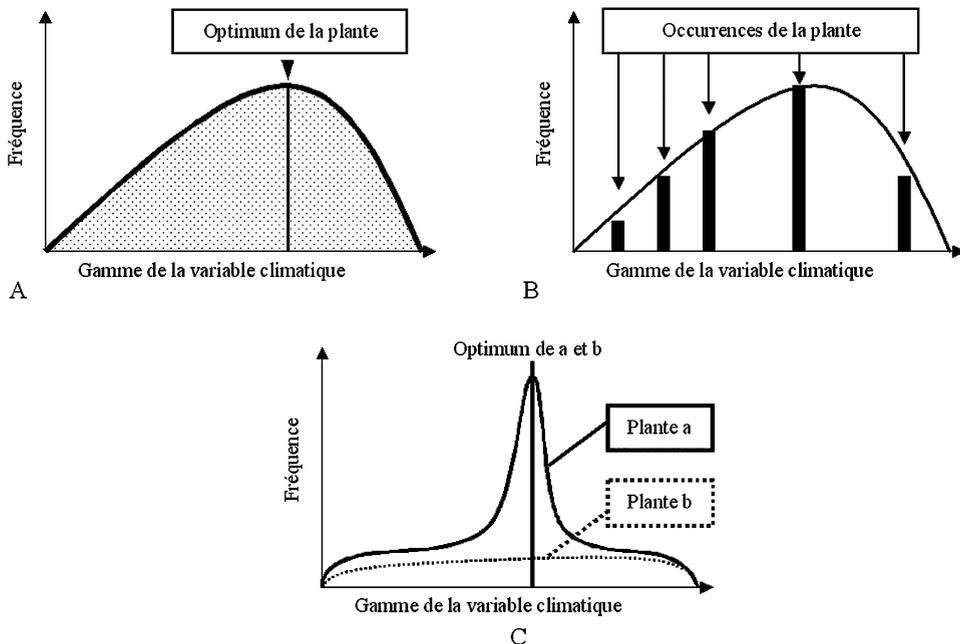


Fig. 2. Principales hypothèses ayant contribué à fonder les calculs de l'étalonnage probabiliste entre plantes et mesures du climat.

Afin de respecter la nature ordinaire des mesures du climat et de leurs liens avec la répartition des fréquences des taxons dans les gammes des variables climatiques, les mesures de chaque variable de température et de précipitations ont été transformées en rangs. Ces rangs sont ensuite considérés en classes pour lesquelles les fréquences des taxons botaniques sont affectées : il y a ainsi autant de classes que de rangs différents (de 359 à 559), pour conserver la précision des mesures du climat.

2.2.1. Proximité d'un taxon dans la gamme d'un facteur climatique

L'influence apparente d'un facteur sur une plante se manifeste par la concentration de la plante dans une partie restreinte de la gamme du facteur. À l'inverse, une influence nulle se manifeste par une répartition aléatoire de la plante un peu partout dans la gamme du facteur. Il y a concentration quand les stations de la plante sont relativement proches d'un rang du facteur qui représente le rang optimal pour la plante.

Soient S_1 la fréquence du taxon près des postes climatiques et S_2 le nombre de postes climatiques du réseau. Le nombre total de comparaisons (N_{TC}) possibles de la distribution du taxon dans les rangs d'une variable est égal à :

$$N_{TC} = S_1 \times S_2$$

Pour connaître la gamme climatique dans laquelle le taxon se trouve, l'algorithme utilise deux indices, V_1 et V_2 , qui parcourent la gamme climatique du taxon T, où V représente la valeur du rang climatique origine de T. Le calcul consiste à compter les fréquences où V est, soit intérieur, soit égal, soit extérieur à l'intervalle $[V_1; V_2]$, donnant respectivement les valeurs V_{int} , V_{eq} et V_{ext} pour chacune des comparaisons. L'hypothèse du calcul suppose que les écarts internes sont plus petits que les écarts quelconques, notamment quand ils sont externes à l'intervalle $[V_1; V_2]$. Dans ce cas, le nombre de comparaisons favorables (N_{CF}) est donné par la relation suivante :

$$N_{CF} = V_{ext} + (V_{eq}/2)$$

La proximité $PROX(T, V)$ du taxon T près de la variable V est alors exprimée par la relation :

$$PROX(T, V) = \frac{N_{CF}}{N_{TC}}$$

Elle est calculée pour chacun des rangs de la variable où le taxon est observé. La proximité permet de connaître, pour chacun des taxons, présents ou abondants, dans quelle partie de la gamme climatique ils se situent.

Toutefois, la proximité du taxon dans le rang d'une variable n'exprime l'effet du facteur sur le taxon que dans la mesure où elle est supérieure à la proximité UPROX d'un taxon ubiquiste présent dans toute la gamme et, par nature, indifférent au facteur. La distribution théorique d'un taxon ubiquiste permet de calculer son écart avec celle d'un taxon donné, ce qui représente un moyen pour caractériser plus précisément le lien entre le taxon et la variable climatique. La mesure de ce lien est appelée concentration. Cette concentration doit être nulle pour un taxon ubiquiste et non nulle pour un taxon non ubiquiste. Quand l'origine est à une extrémité de la gamme, la proximité du taxon ubiquiste vaut 0,5, car tout écart à l'origine est considéré, par le calcul, alternativement comme un écart « interne » et comme un écart « quelconque ». Mais cette proximité augmente quand on s'éloigne de l'extrémité de la gamme, d'où la relation :

$$UPROX = \frac{1}{2} + \frac{[(V - 1) \times (N_V - V)]}{[(N_V + 1) \times (N_V - 1) \times N_V]}$$

avec V le rang origine du taxon T dans la gamme du facteur climatique et N_V le nombre de rangs de la gamme.

La concentration $CTRA(T, V)$ qui résulte de l'effet apparent du facteur sur le taxon se calcule en tenant compte de la distribution du taxon $PROX(T, V)$ et de la distribution du taxon ubiquiste $UPROX(V)$ dans le rang V de la variable climatique, d'où :

$$CTRA(T, V) = \frac{[PROX(T, V) - UPROX(V)]}{[1 - UPROX(V)]}$$

La concentration est nulle pour tous les rangs d'un taxon ubiquiste, ce qui est conforme aux hypothèses concernant les relations entre les êtres vivants et leur milieu.

2.2.2. Caractérisation du comportement climatique d'un taxon

Le comportement d'un taxon T dans la gamme d'un facteur climatique se caractérise par son optimum et par son pouvoir indicateur. L'optimum est le rang du facteur où la concentration du taxon est maximale. Le pouvoir indicateur est égal à cette concentration maximale, qui est représenté par la probabilité maximale du taxon dans le rang, ce qui correspond à la force de ce lien. Ces deux paramètres sont calculés pour les 12 mois de l'année et pour chacune des six grandeurs climatiques. Ils sont exprimés en pourcentages, afin de faciliter la comparaison des comportements climatiques de l'ensemble des taxons. Ces deux paramètres sont représentés graphiquement afin de faciliter leur étude et la comparaison des comportements entre plantes (Fig. 3).

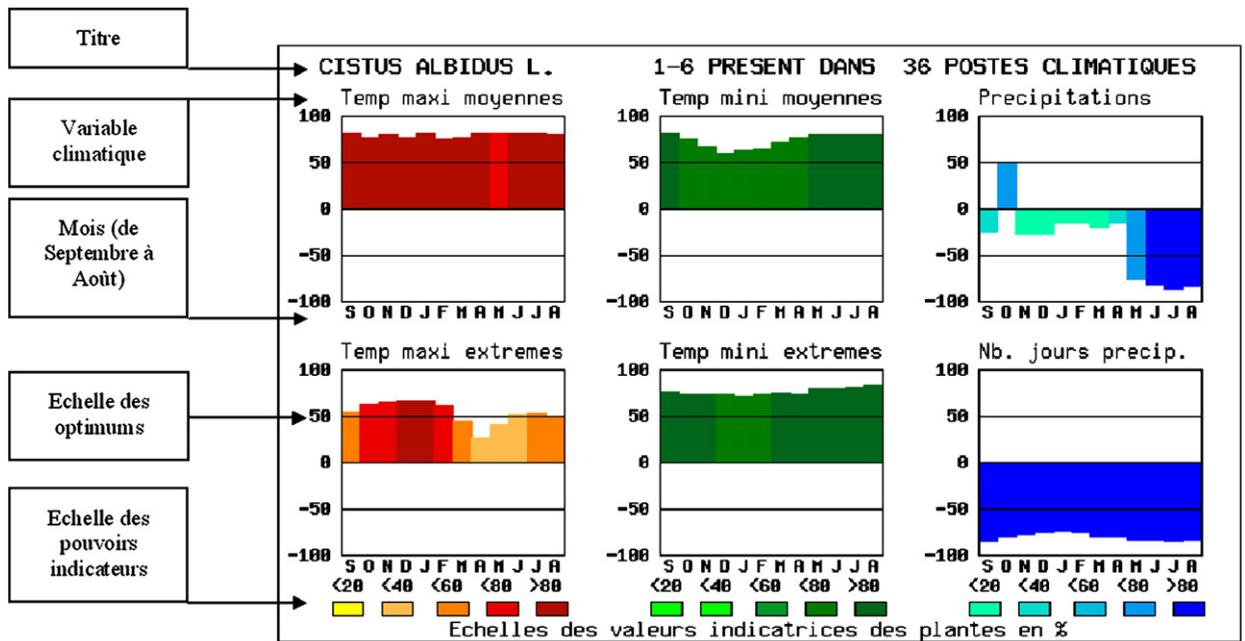


Fig. 3. Exemple d'une plante indicatrice d'un climat de type méditerranéen : le ciste blanc (*Cistus albidus* L.) est très indicateur à extrêmement indicateur des valeurs de températures supérieures à la moyenne nationale des comportements climatiques durant toute l'année, de septembre à août, aussi bien pour les températures du jour que pour celles de la nuit. Il est extrêmement indicateur de précipitations extrêmement inférieures durant l'été, de juin à août et de jour de précipitations très inférieures à extrêmement inférieures durant toute l'année. Le ciste blanc est donc un taxon très indicateur d'un climat méditerranéen.

L'échelle de l'optimum climatique d'un taxon varie de -100% à $+100\%$ sur le graphique, de telle sorte qu'une plante ubiquiste ait un optimum égal à 0% , traduisant un comportement climatique peu spécialisé en France. Ces pourcentages s'étendent ainsi sur une gamme montrant, soit des positions supérieures, soit inférieures, soit moyennes pour une plante donnée par rapport à la moyenne nationale des valeurs climatiques. Le pouvoir indicateur est exprimé à partir d'une échelle de valeurs variant de 0 à 100% afin de comparer les concentrations des taxons dans la gamme de la variable climatique. Il représente la probabilité, pour un taxon donné, d'indiquer la variable climatique dans laquelle il est cantonné. Par exemple, un pouvoir indicateur de 80% signifie que le taxon a huit chances sur dix d'indiquer la variable climatique.

Ainsi, le lien entre plante et variable du milieu est un lien quantitatif, qui s'exprime selon un gradient correspondant à la gamme de la variable. Le calcul de ce lien présente l'intérêt de considérer les plantes comme des indices quantitatifs de variables du milieu et de les utiliser, par la suite, pour estimer les valeurs de ces mesures. Toutes les plantes sont alors considérées comme indicatrices des mesures du milieu, qu'elles soient rares

ou fréquentes, leurs liens à l'égard d'une variable étant exprimés par des pourcentages.

L'étalonnage climatique des plantes fournit aussi un outil numérique capable d'estimer le climat dans une station dépourvue de poste météorologique, mais pourvue d'un inventaire floristique standardisé. Cette estimation sert de validation de cet étalonnage par la comparaison entre le climat estimé par les plantes et celui mesuré par les postes climatiques aux alentours des relevés. L'estimation utilise les paramètres d'optimum et de pouvoir indicateur des plantes pour une variable donnée. Elle tend à trouver la valeur qui maximise la position de la distribution de ces deux paramètres pour l'ensemble des taxons dans les alentours d'un poste climatique. La pertinence de l'estimation est ensuite évaluée à l'aide, d'une part, de la justesse qui correspond à la concordance entre la valeur estimée par un ensemble de taxons et celle mesurée par le poste et, d'autre part, de la stabilité, qui mesure la concordance entre les différentes estimations du même climat réalisées par deux communautés végétales voisines (Tableau 1).

Ces résultats montrent une justesse moyenne de $88,5\%$ et une stabilité moyenne de $96,5\%$, soulignant que les plantes constituent des bio-indicateurs relativement fidèles et stables des variables du climat en France.

Tableau 1
Justesse et stabilité moyenne des six variables du climat estimées par les plantes en France

Variabiles climatiques	Justesse	Stabilité
Températures maximales moyennes	89,7	96,7
Températures maximales extrêmes	87,6	96,2
Températures minimales moyennes	90,8	97,1
Températures minimales extrêmes	89,3	96,9
Précipitations	85,6	95,8
Nombre de jours de précipitations	88,2	96,6

3. Résultats : un catalogue de plantes indicatrices du climat

La France est soumise à des climats relativement contrastés, sous lesquels des formes variées de végétation sont observées, soulignant leurs liens apparents avec les ensembles climatiques. Ce constat a notamment été formulé par les botanistes tels que Flahaut [29] et Fournier [30] : « *Pas plus que la France n'a un climat unique, elle n'a une flore unique. Le moins qu'on en puisse distinguer se ramène aux quatre flores indiquées dans le sous-titre de ce volume : générale, alpine, méditerranéenne, littorale.* »

Par souci pédagogique, les premiers résultats de cet article présentent des plantes indicatrices des cinq principaux types de climats rencontrés en France [31,32] : méditerranéen, océanique, océanique dégradé (ou central), continental (ou sub-continental selon les auteurs) et montagnard. Puis sont présentés des comportements climatiques de plantes de type littoral, méditerranéo-atlantique, oro-océanique et sud-est méditerranéen. Ces exemples permettent de souligner l'originalité de certains comportements climatiques de plantes vis-à-vis des grands types de climats communément identifiés.

3.1. Plantes indicatrices des principaux types de climats en France

Pistacia lentiscus L. (Fig. 4) est cantonné dans une région de climat méditerranéen. Il est proche de 35 postes climatiques. Il est extrêmement indicateur de températures maximales moyennes extrêmement supérieures à la moyenne nationale en automne et en hiver, de précipitations extrêmement inférieures en été et d'un nombre de jours de pluie extrêmement inférieur durant presque toute l'année. Il est aussi indicateur de températures minimales extrêmement supérieures pendant toute l'année. Le lentisque indique un climat de type méditerranéen, avec une sécheresse estivale et des températures de jour comme de nuit bien supérieures à la moyenne nationale des comportements climatiques. Il

montre aussi un régime orageux des précipitations, car il indique très peu de jours de précipitations pendant l'année, y compris pendant la période où elles se manifestent le plus (octobre), ce qui est caractéristique du climat méditerranéen.

Erica ciliaris L. (Fig. 4) est présent dans la moitié ouest de la France et reste plus fréquent et abondant près du littoral atlantique. Il est présent autour de 21 postes climatiques. Il est très indicateur de températures maximales moyennes supérieures en hiver et minimales très supérieures durant cette saison. Il montre un régime océanique pour les températures et pour les précipitations. Il est très indicateur d'un nombre de jours de pluie très supérieur en automne et en hiver, traduisant le régime régulier des précipitations en climat océanique.

Peucedanum gallicum Latourette (Fig. 4) est localisé dans une zone centrale de la France, autour de 20 postes climatiques. Il montre un régime légèrement continental pour les températures maximales et les précipitations. Il est extrêmement indicateur de températures moyennes pendant toute l'année. Il est indicateur de précipitations inférieures en automne et en hiver et moyennes au printemps et en été. Il s'agit d'un taxon indiquant un climat océanique subissant une influence continentale encore peu marquée. Il est indicateur d'un climat de type central.

Impatiens parviflora DC (Fig. 5) est principalement localisé au nord-est de la France, près de six postes climatiques. Il montre un régime continental marqué pour les températures maximales et les précipitations. Il est très indicateur de températures maximales très inférieures en hiver et de précipitations supérieures en été. Il est indicateur d'un nombre de jours de pluie très supérieur au printemps et en été, et moyen en automne et en hiver. Il s'agit d'un taxon de comportement climatique typiquement continental.

Alchimilla alpina L. (Fig. 5) est un taxon de montagne présent dans les Alpes, le Massif central, les Pyrénées et les montagnes de la Corse. Il est localisé autour de 17 postes climatiques. Il est très indicateur d'extrêmement indicateur de températures extrêmement inférieures durant toute l'année. Il montre des précipitations moyennes en hiver et supérieures pendant le reste de l'année, elles-mêmes réparties sur un nombre inférieur à moyen de jours de pluie. Ce taxon indique un climat de montagne où les températures sont nettement inférieures par rapport à la moyenne nationale et où les précipitations, souvent orageuses, sont importantes au printemps et en été.

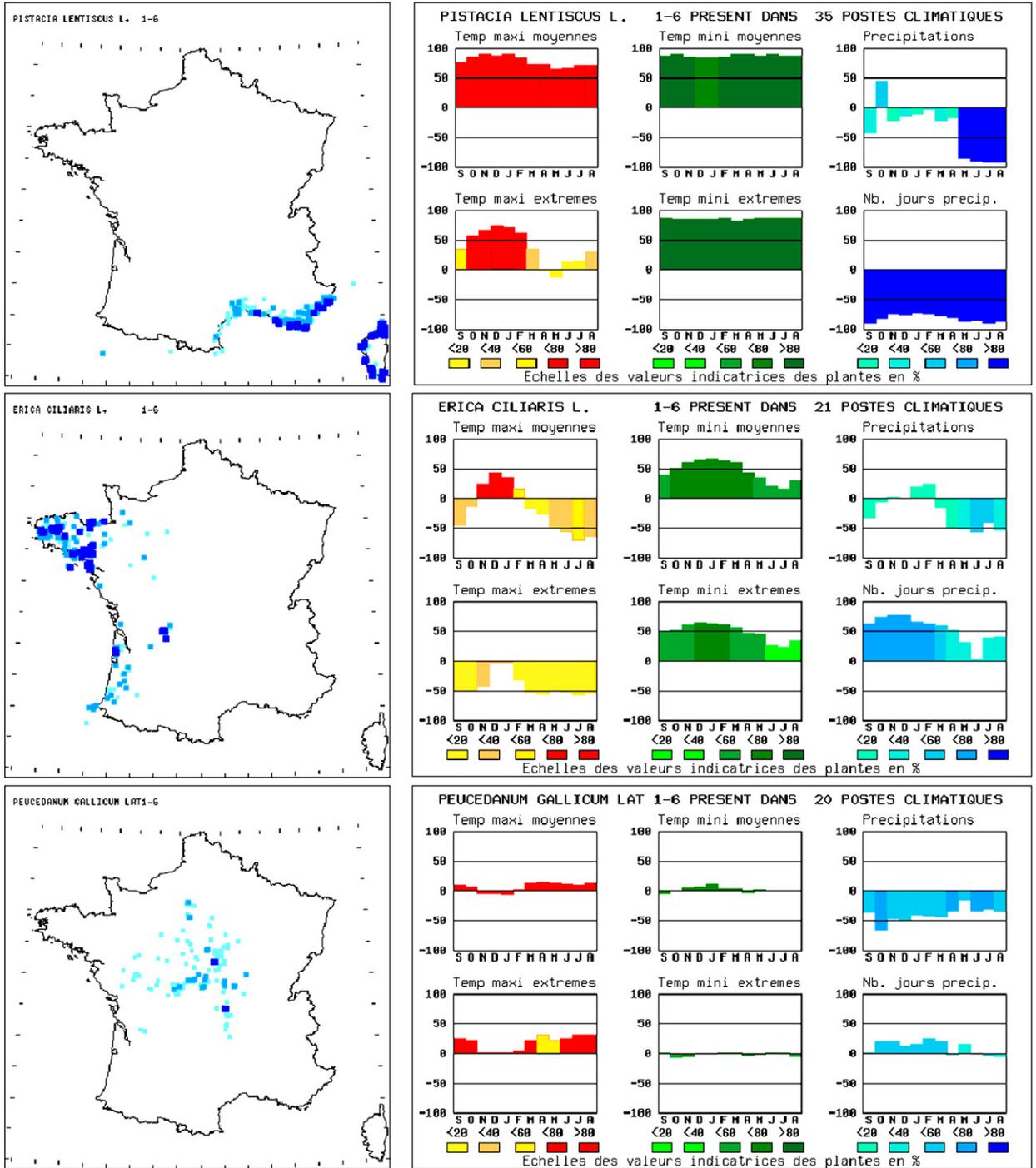


Fig. 4. Exemples de plantes indicatrices de trois principaux types de climats en France : méditerranéen, océanique et océanique dégradé. Les gradients de couleurs des cartes correspondent au regroupement des abondances-dominances en trois classes : en bleu clair, les abondances faibles ; en bleu moyen, les abondances moyennes ; en bleu marine, les abondances fortes.

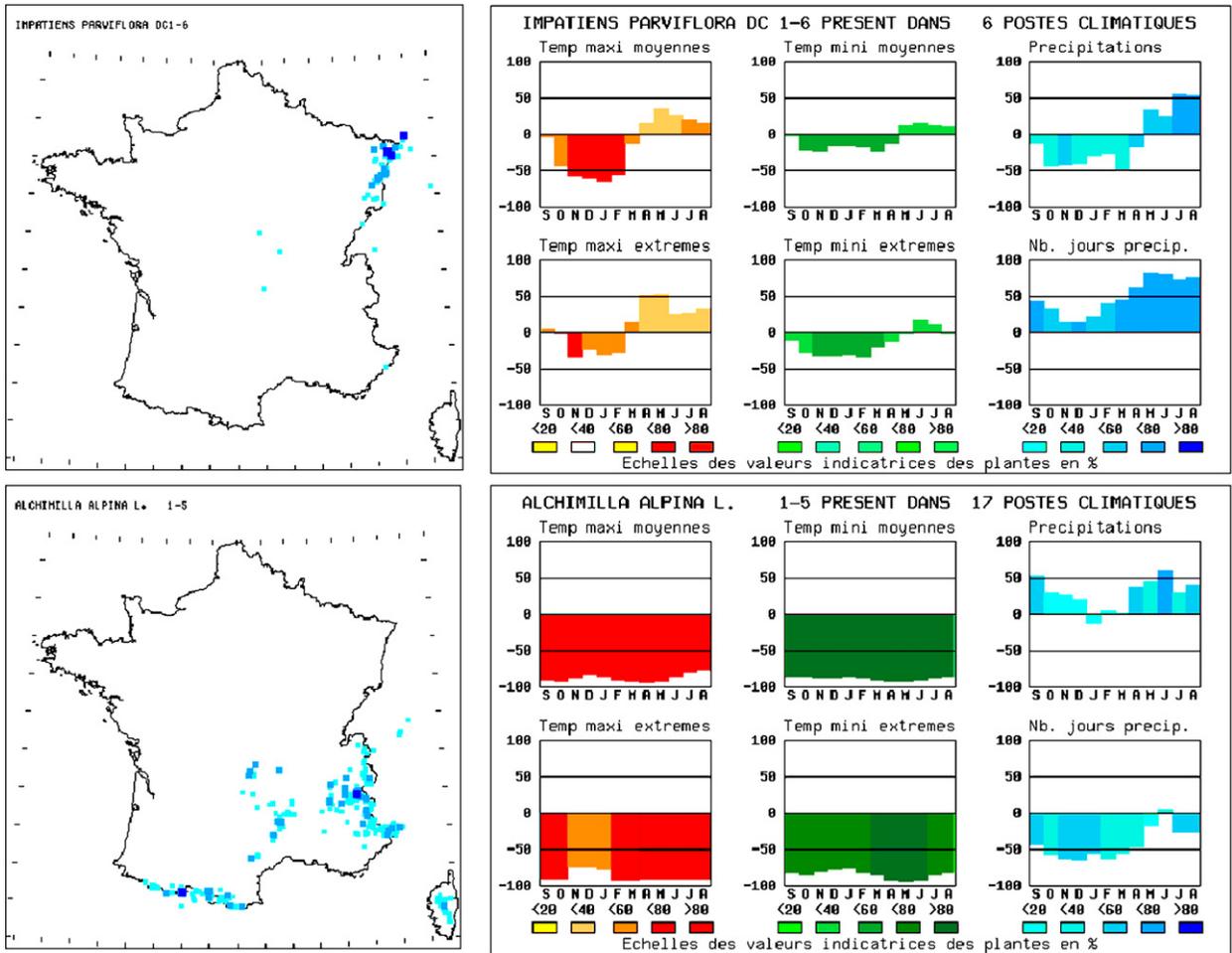


Fig. 5. Exemples de plantes indicatrices de deux principaux types de climats en France : continental et montagnard.

3.2. Originalité de certains comportements climatiques

L'étalonnage climatique de la flore permet de connaître le climat sous lequel un taxon croît. Ces taxons ne sont pas forcément répartis sous des climats bien tranchés, comme ceux présentés précédemment, mais leur aire de répartition montre qu'ils peuvent être inféodés à des climats plus originaux, rattachés à des sous-unités ou regroupements de grands types bioclimatiques.

Pinus pinaster Soland (Fig. 6) est présent dans la zone méditerranéo-atlantique. Il est cantonné autour de 72 postes climatiques. Il indique des températures supérieures à très supérieures pendant toute l'année. Il montre des précipitations inférieures en été et moyennes à supérieures pendant le reste de l'année. Il montre un nombre de jours de pluie inférieur au printemps et en été et moyen en automne et en hiver. Le pin maritime indique des températures douces durant toute l'année

et une saison relativement sèche en été, mais nettement moins marquée que pour un taxon strictement méditerranéen. *Pinus pinaster* Soland. est indicateur d'un climat méditerranéo-atlantique.

Euphorbia spinosa L. (Fig. 6) est un taxon des collines et des moyennes montagnes de la région est-méditerranéenne. Il est localisé autour de 17 postes climatiques. Il est indicateur à très indicateur de températures maximales moyennes et minimales extrêmes très supérieures pendant toute l'année. Il montre des températures minimales moyennes supérieures au printemps, en été, en automne et moyennes en hiver, révélant une certaine fraîcheur de la nuit en altitude. Comme tout taxon méditerranéen, il indique une saison estivale où les précipitations sont très inférieures, mais comme il colonise surtout les collines et les basses montagnes du Sud-Est; il indique aussi des précipitations importantes au printemps et en automne. C'est un taxon extrêmement indicateur d'un nombre de jours de pluie

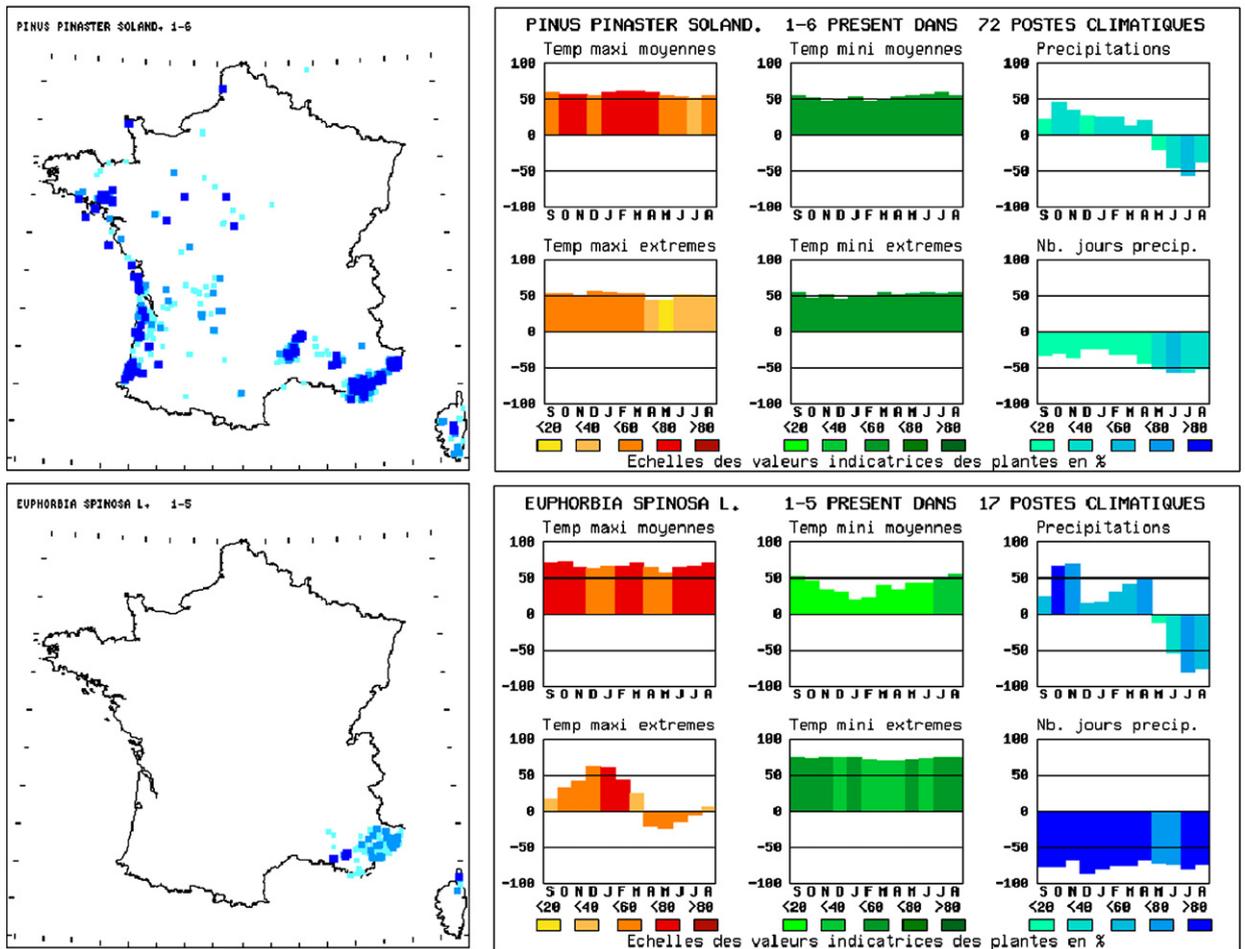


Fig. 6. Exemples de plantes indicatrices de climats méditerranéo-atlantique et sud-est méditerranéen.

très inférieur pendant toute l'année, soulignant un mode orageux. L'euphorbe épineuse montre des nuances orophiles du climat méditerranéen, car il indique des positions de température légèrement inférieures à celles de taxons situés dans des zones moins élevées, surtout pour les températures minimales moyennes. Il présente aussi un régime de précipitations ayant un premier maximum en automne et un second au printemps, caractéristique du Sud-Est méditerranéen.

Potentilla montana Brotero (Fig. 7) est essentiellement réparti dans le quart sud-ouest et le piémont des Pyrénées, jusqu'à 1000 m, autour de 17 postes climatiques. Il est indicateur de températures maximales moyennes supérieures durant toute l'année, ce qui montre sa localisation plutôt sud-ouest. Il indique aussi des températures minimales supérieures en hiver et moyennes durant le reste de l'année, ce qui souligne une tendance océanique douce. Il montre aussi un régime océanique pour les précipitations, mais avec un

nombre de jours de pluie moyen pendant toute l'année. Ce taxon présente un climat océanique altéré par des influences orophiles : il indique un climat oro-océanique du Sud.

Ammophila arenaria (L.) Link (Fig. 7) est réparti sur l'ensemble du littoral français. Il est cantonné près de 20 postes climatiques. Il est indicateur à très indicateur de températures maximales très supérieures en automne et en hiver et de précipitations très inférieures en été. Il est très indicateur à extrêmement indicateur de températures minimales très supérieures pendant toute l'année. Ce taxon montre à la fois une composante océanique dans l'expression de ses températures maximales, et une composante méditerranéenne, influençant l'expression de ses températures minimales et le nombre de jours de pluie. Il souligne ainsi l'importance des masses maritimes garantissant la douceur des températures de la nuit durant toute l'année, mais aussi atténuant les températures du jour en été.

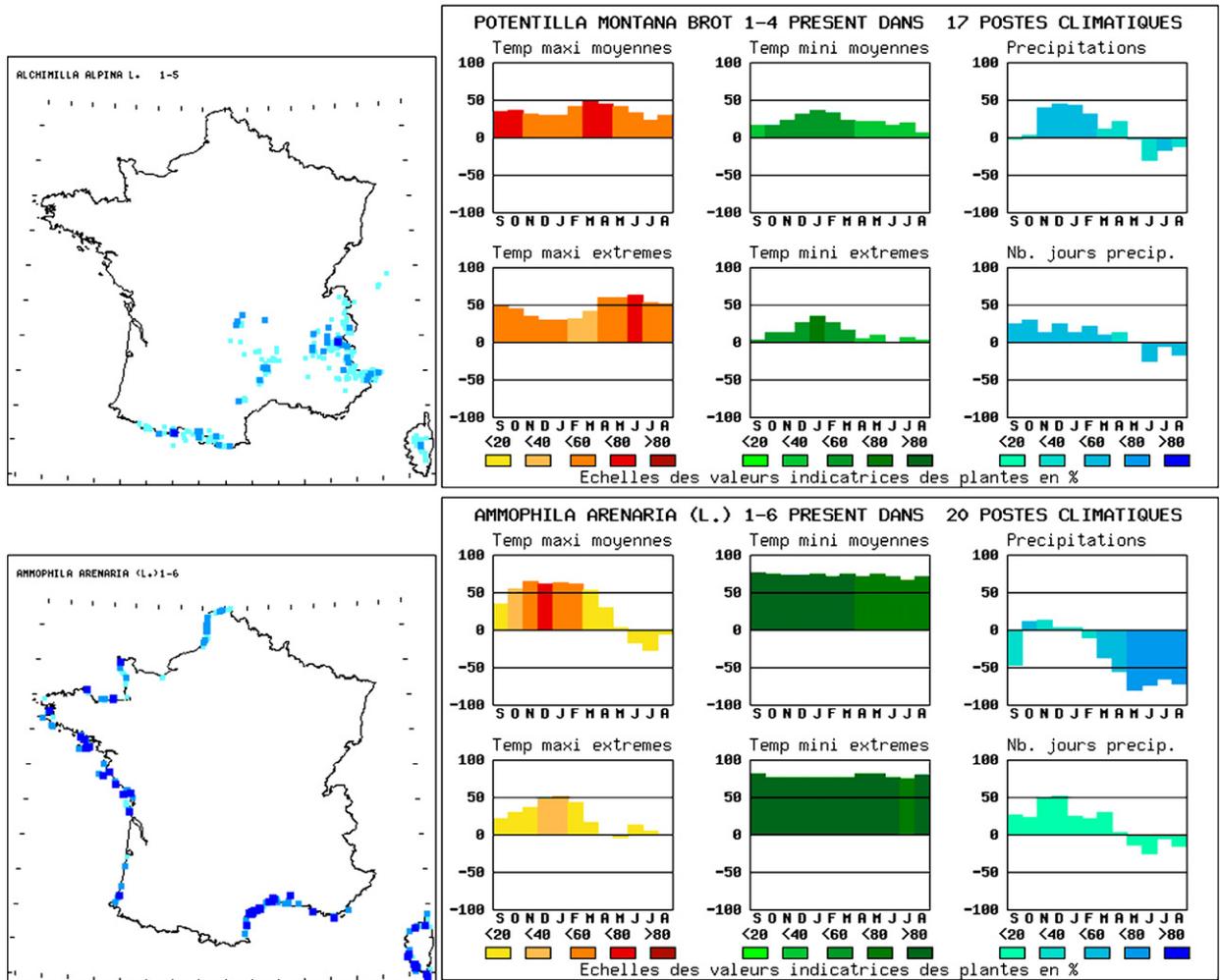


Fig. 7. Exemples de plantes indicatrices de climats oro-océanique et littoral.

4. Conclusion et perspectives

L'étalonnage climatique de la flore française réalisé à partir de banques de données regroupant 1874 taxons et 574 postes climatiques permet de proposer des bio-indicateurs du climat, dont la stabilité et la justesse moyenne des estimations climatiques est respectivement de 96,5% et 88,5% : ces résultats permettent ainsi de considérer les plantes comme des indicateurs stables et justes du climat. L'étalonnage fournit alors un véritable catalogue de plantes indicatrices des mesures du climat en France, montrant à la fois des exemples de plantes inféodées à des climats bien tranchés, comme par exemple le climat méditerranéen ou le climat montagnard, mais également des plantes indicatrices de climats plus originaux, tels que le climat méditerranéo-atlantique ou encore le climat littoral. Le suivi de la

répartition de ces taxons bio-indicateurs du climat en France au cours des prochaines années pourra fournir des informations complémentaires concernant l'effet du réchauffement global sur la végétation.

Références

- [1] A. Humboldt, *Cosmos. Essai d'une description physique du monde* (1845), Tome 1, Éditions Utz, 2000.
- [2] M. Dettelbach, *La science omnivore d'Alexander von Humboldt*, *La Recherche* 302 (1997) 90–95.
- [3] F.I. Woodward, *Climate and plant distribution*, *Cambridge Studies in Ecology*, Cambridge University Press, 1987.
- [4] P. Ozenda, La température, facteur de répartition de la végétation en montagne, in : *Colloque sur les régions écologiques du globe*, Paris, juillet 1954, 1955, pp. 51–68.
- [5] L. Emberger, *Une classification biogéographique des climats*. Recueil des travaux des laboratoires de botanique, de géologie

- et zoologie de la faculté des sciences de l'université de Montpellier, bot. 7, 1955, pp. 3–43.
- [6] L. Emberger, Travaux de botanique et d'écologie choisis et présentés par les soins d'un groupe de ses amis et élèves à l'occasion de son jubilé scientifique, publié avec le concours du CNRS, Masson et C^{ie}, Paris, 1971.
- [7] P. Drude, Manuel de géographie botanique, Paris, Librairie des sciences naturelles Paul Klincksieck, 1897.
- [8] P. Birot, Les formations végétales du globe, Sedes, 1965.
- [9] J. Blondel, Biogéographie. Approche écologique et évolutive, collection Écologie n° 27, Masson, Paris, 1995.
- [10] P. Ozenda, J.-L. Borel, An ecological map of Europe: why and how?, C. R. Acad. Sci. Paris, Ser. III 323 (2000) 983–994.
- [11] H. Ellenberg, Zeigerwerte der Gefäßplanzer Mitteleuropas, Scripta Geobotanica, Göttingen, Band 9, 1974.
- [12] R.S. Thompson, K.H. Anderson, P.J. Bartlein, USGS Climate-Vegetation Atlas of North America, Online version <http://greenwood.cr.usgs.gov/pub/ppapers/p1650-a/>, 1999.
- [13] L.R. Iverson, A.M. Prasad, B.J. Hale, E.K. Sutherland, Atlas of Current and Potential Future distributions of Common Trees of the Eastern United States, United States Department of Agriculture, Forest Service, Northeastern Research Station, General Technical Report NE-265, 1999.
- [14] L.R. Iverson, A. Prasad, M.W. Schwartz, Modeling potential future individual tree-species distributions in the eastern United States under a climate change scenario: a case study with *Pinus virginiana*, Ecol. Model. 115 (1999) 77–93.
- [15] W. Thuiller, BIOMOD – optimizing predictions of species distributions and projecting potential future shifts under global change, Glob. Change Biol. 9 (2003) 1353–1362.
- [16] V. Badeau, J.-L. Dupouey, C. Cluzeau, J. Drapier, C. Le Bas, Modélisation et cartographie de l'aire climatique potentielle des grandes essences forestières françaises, Rapport final du projet CARBOFOR – Séquestration de carbone dans les grands écosystèmes forestiers de France, Tâche D1, Ecofor, 2004.
- [17] W. Thuiller, S. Lavorel, M.T. Sykes, M.B. Araújo, Using niche-based modelling to assess the impact of climate change on tree functional diversity in Europe, Diversity and Distribution 12 (2006) 49–60.
- [18] H. Brisse, P. De Ruffray, G. Grandjouan, M. Hoff, European vegetation survey. La banque de données phytosociologiques « SOPHY », Ann. Bot. (Rome) LIII (1995) 191–223.
- [19] H. Brisse, G. Grandjouan, Étalonnage et classification climatique de 450 plantes en France, in : R. Tüxen (Ed.), Vegetation und Klimat, 1977, pp. 535–607.
- [20] E. Garbolino, Les plantes indicatrices du climat en France et leur télédétection, thèse, vol. 1, université de Nice–Sophia Antipolis, 2001.
- [21] E. Garbolino, Relationships between plants and climate calibrated by using botanical and meteorological databases at the scale of France. Perspectives for the estimation of plants distribution in the context of global climate change, Linnean Society of London, Looking back to the future, a two-day symposium on the use of long term databases for the prediction of ecological change, 2003.
- [22] G. Grandjouan, Transposition géométrique ou simulation probabiliste. Choix d'un modèle statistique des relations écologiques en milieu naturel, Actes des journées du programme Environnement, Vie et Sociétés, session A (1996) 71–76.
- [23] G. Grandjouan, Expression probabiliste des relations écologiques en milieu naturel, Océanis 24 (3) (1998) 175–197.
- [24] L. Mucina, E. Van Der Maarel, Twenty years of numerical Syntaxonomy, Vegetatio 81 (1989) 1–15.
- [25] M. Gounot, Méthodes d'étude quantitative de la végétation, Masson et C^{ie}, Paris, 1969.
- [26] P. Daget, M. Godron, Analyse fréquentielle de l'écologie des espèces dans les communautés, collection d'Écologie n° 18, Masson, Paris, 1982.
- [27] A. Lacoste, M. Roux, L'analyse multidimensionnelle en phytosociologie et en écologie. Application à des données de l'étage subalpin des Alpes maritimes, 1 – L'analyse des données floristiques, Oecol. Plant. 7 (1) (1972) 353–369.
- [28] A. Lacoste, M. Roux, L'analyse multidimensionnelle en phytosociologie et en écologie. Application à des données de l'étage subalpin des Alpes maritimes, 2 – L'analyse des données écologiques et l'analyse globale, Oecol. Plant. 7 (2) (1972) 125–146.
- [29] P. Fournier, Les quatre flores de France, Éditions Lechevalier, 1947.
- [30] C. Flahaut, in : H. Coste, Flore descriptive et illustrée de la France, 3 vols, A. Blanchard éd., 1906.
- [31] J. Kessler, A. Chambraud, Météo de la France. Tous les climats localité par localité, Jean-Claude Lattès, Paris, 1990.
- [32] Y. Veyret, La France : milieux physiques et environnement, cursus géographie, Armand Colin, Paris, 2000.