

Les facteurs de productivité du Pin noir d'Autriche (*Pinus nigra* Arnold. ssp. *nigricans* Host. *austriaca* Hoss. Novak) dans les Alpes du Sud

J. TIMBAL, M. TURREL * et M. DUCREY *

I.N.R.A., Laboratoire de Sylviculture et d'Ecologie

Station de Recherches forestières, Domaine de l'Hermitage, Pierroton, F 33610 Cestas

** Station de Sylviculture méditerranéenne, avenue A.-Vivaldi, F 84000 Avignon*

Résumé

A partir des données d'ordre floristique, écologique et dendrométrique recueillies sur un échantillonnage d'une centaine de placettes de pin noir d'Autriche dans le Sud-Est de la France, une analyse factorielle des correspondances a permis de mettre en évidence des liaisons statistiques entre ces trois types de variables.

Ainsi, c'est à l'étage montagnard (et, dans celui-ci, plus à la série du hêtre qu'à celle du pin sylvestre) que sont associés des sols épais et de fortes productivités.

Les liaisons entre la productivité d'une part, les facteurs bioclimatiques et écologiques d'autre part, ont été étudiées grâce à des calculs de régressions multiples. Une bonne partie de la variabilité est expliquée par les caractéristiques physiques des sols (épaisseurs de l'horizon Ao, profondeur de l'enracinement et de la roche-mère). Les facteurs bioclimatiques, en particulier l'altitude compensée, montrent ensuite qu'à l'étage montagnard (accroissement moyen à 80 ans de 7,0 m³/ha/an) ce sont les facteurs macroclimatiques qui prédominent, tandis qu'à l'étage méditerranéen (accroissement moyen à 80 ans de 5,8 m³/ha/an) ce sont les facteurs stationnels, édaphiques et mésoclimatiques, qui sont déterminants.

Mots clés : Pin noir d'Autriche, Pinus nigra nigricans, Alpes du Sud, productivité, facteurs bioclimatiques, altitude compensée, facteurs édaphiques.

1. Introduction

Créés dans le cadre des travaux de lutte contre l'érosion et de restauration des sols, entrepris à partir du Second Empire, les importants boisements de pin noir d'Autriche (*Pinus nigra* Arn. ssp. *nigricans* Host. Var *austriaca* Endl.) des Alpes du Sud sont maintenant entrés dans leur phase de maturité et donc d'exploitation.

Il en est résulté un regain d'intérêt pour cette espèce, qui se traduit par un certain nombre d'études.

La Station de Sylviculture méditerranéenne d'Avignon a ainsi établi 111 placettes, qui ont servi à l'établissement d'un tarif de cubage (BOUCHON, 1974 ; puis d'une table de production (OTTORINI & TOTH, 1975, TOTH & TURREL, 1983). Plus récem-

ment, l'un de nous (TURREL, 1979) a étudié le déterminisme écologique de la régénération naturelle du pin noir dans 30 placettes du département des Alpes de Haute-Provence.

Le but de la présente étude est de rechercher les liaisons pouvant exister entre la productivité du pin noir d'Autriche (mesurée sur le réseau de placettes évoqué ci-dessus), les grands facteurs écologiques, et les grands types de végétation naturelle.

1.1. Zone d'étude et échantillonnage

Le tableau 1 donne la répartition du nombre de placettes par département. Il montre clairement que 92 p. 100 des placettes sont situées dans les Alpes du Sud. La figure 1 en donne la répartition géographique.

TABLEAU 1

*Répartition des placettes de production par département.
Distribution of sample plots between different departments.*

Département (Code)	Nombre de placettes	P. 100 du total
Alpes de Haute-Provence (04)	53	47
Hautes-Alpes (05)	11	10
Alpes-Maritimes (06)	6	5,4
Drôme (26)	26	23,4
Gard (30)	1	0,9
Lozère (48)	8	7,2
Vaucluse (84)	6	5,4
Total	111	100

Il faut noter que ces 111 placettes ont été installées en vue de fournir un échantillonnage représentatif des anciens reboisements de pin noir dans cette région, et ne prétendent donc pas être représentatives de la variabilité écologique de cette dernière. En particulier, même si globalement le réseau de placettes couvre relativement bien l'étendue de la gamme écologique régionale, il n'en est pas de même dans le détail et, en particulier, dans l'échantillonnage des divers étages de végétation. Il y a là un biais qu'il ne faut pas perdre de vue.

Sur chacune des placettes a été recueilli un certain nombre de données d'ordre topographique, écologique, et dendrométrique. De plus, il a été effectué un relevé de la végétation spontanée, mais limité aux seules espèces ligneuses et aux principales espèces herbacées, ce qui est évidemment critiquable et a amené un autre biais, systématique.

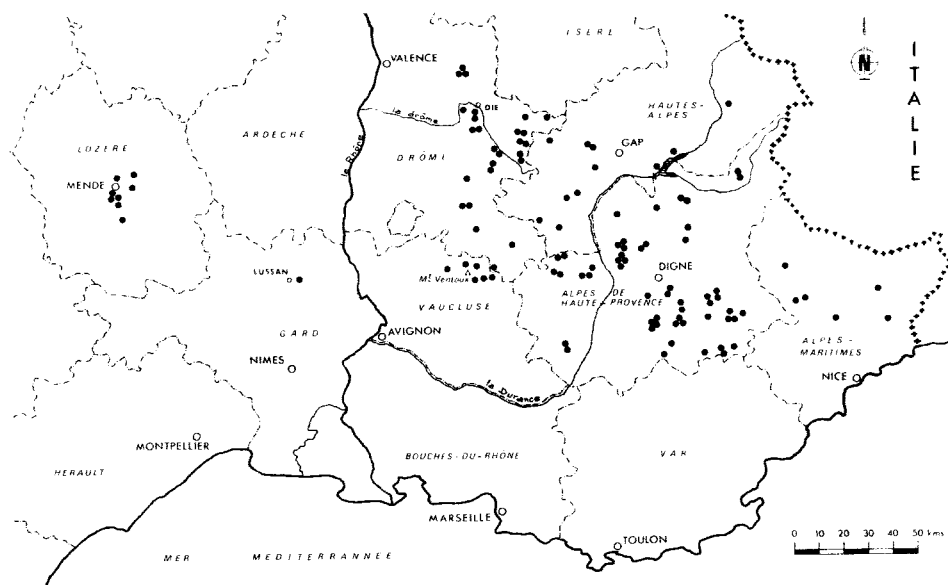


FIG. 1

Localisation géographique des 111 placettes de pin noir d'Autriche dans les différents départements des Alpes méridionales (chaque point représente une placette).

Geographical position of the 111 Pinus nigra nigricans sample plots in the different departments of french southern Alps (each point represents one sample plot).

2. Exploitation globale des données par analyse multivariable

2.1. Variabilité des groupements végétaux

Une analyse factorielle des correspondances a été effectuée en ne retenant comme « variables principales », c'est-à-dire entrant en ligne de compte pour le calcul des « facteurs », que les seules variables floristiques (au nombre de 222).

L'image donnée par la projection des points représentatifs de ces variables floristiques, auxquels viennent se mêler ceux des variables non floristiques (variables dites « supplémentaires »), montre clairement l'existence de groupements végétaux bien différenciés (fig. 2).

En effet, caractérisant les valeurs positives de l'axe 1, on trouve des espèces comme *Abies alba*, *Pulsatilla alpina*, *Pirola secunda*, *Prenanthes purpurea*, *Acer pseudo-platanus*... qui sont des montagnardes, tandis qu'à l'opposé de cet axe (valeurs négatives) on trouve *Spartium junceum*, *Dorycnium suffuticosum*, *Lavandula officinalis*, *Juniperus oxycedrus*... qui sont des espèces thermophiles, méditerranéennes.

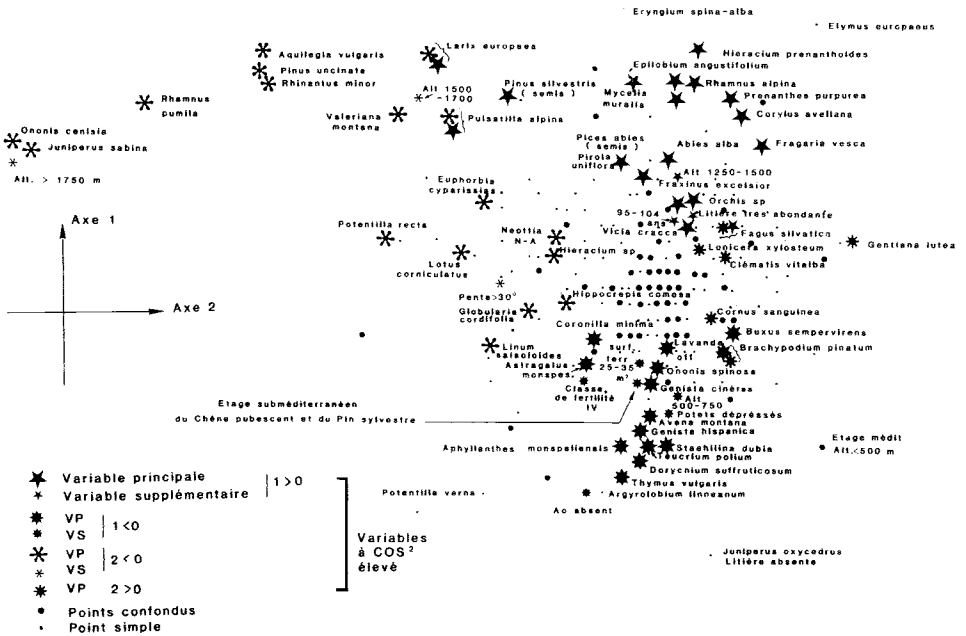


FIG. 2

Disposition des groupes de variables (principales ou supplémentaires) les plus significatives sur le plan factoriel 1-2.

Position of the most significant variables (main or supplementary) groups in factorial plan 1-2.

Remarque : L'intérêt de faire figurer par des symboles différents les variables (principales ou supplémentaires), les plus significatives selon qu'elles le sont par valeur positive ou négative sur les deux axes du plan factoriel 1-2, permet de voir d'emblée celles qui se regroupent (groupes écotoxicologiques d'espèces et facteurs écologiques déterminants).

L'axe 1 correspond donc à un gradient climatique comme le confirme la position sur ce plan factoriel, des points représentatifs des différentes classes altitudinales et des différentes séries de végétation (fig. 2).

2.2. Liaisons entre production, végétation et facteurs écologiques

Plus généralement, si on considère sur les graphiques la position des points représentatifs des variables supplémentaires d'ordre édaphique ou de production, on peut constater que, fortes altitudes (fig. 4), séries de végétation montagnardes (fig. 3) et fortes productivités (fig. 6), sont associées à la partie supérieure de l'axe 1, tandis que les basses altitudes, les séries méditerranéennes et subméditerranéennes de végétation, les sols superficiels et les classes de fertilité III et IV, sont associés aux valeurs négatives de cet axe.

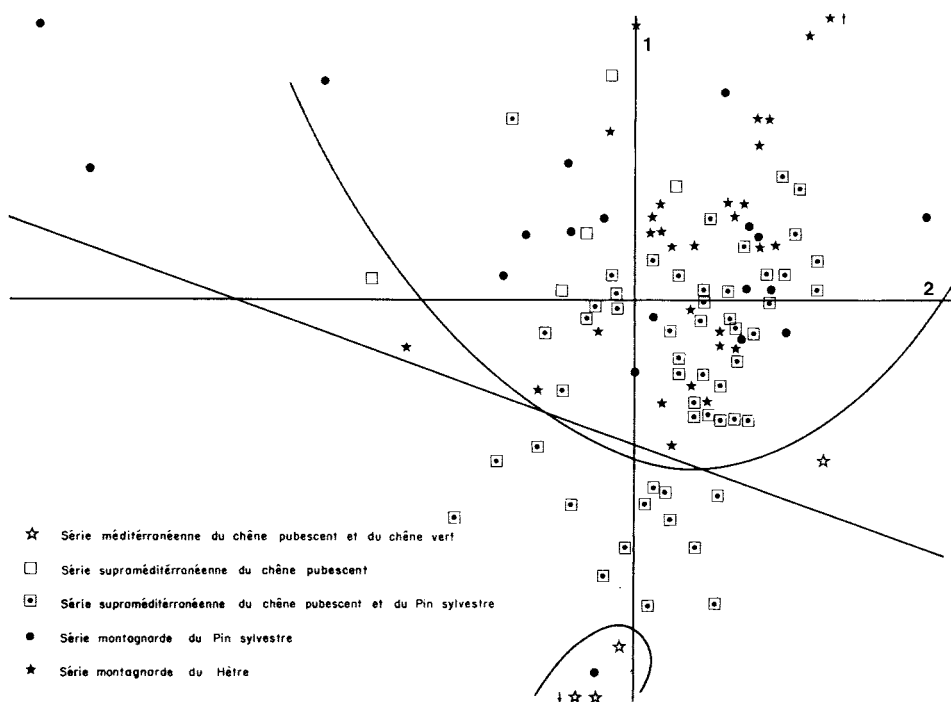


FIG. 3

Localisation des différentes séries de végétation (variables supplémentaires) dans le plan factoriel 1-2.

Position of different vegetation serials (supplementary variables) in factorial plan 1-2.

Pour tenter de préciser ces relations, nous avons affecté un symbole différent à chacune des classes de chaque facteur, et remplacé, sur le graphique du plan factoriel 1-2 relatif aux placettes, les points représentatifs par les symboles correspondants, et cela facteur par facteur.

Nous ne présentons ici (fig. 3 à 6) que quelques-uns des graphiques pour lesquels la distribution des différents symboles ne semble pas aléatoire. Il s'agit des graphiques relatifs :

- aux étages et séries de végétation : fig. 3,
- aux altitudes : fig. 4,
- à l'épaisseur du sol : fig. 5,
- à l'accroissement moyen annuel : fig. 6.

L'examen de ces graphiques permet de définir un certain nombre de liaisons statistiques entre différents groupes de variables : des variables à expliquer qui sont

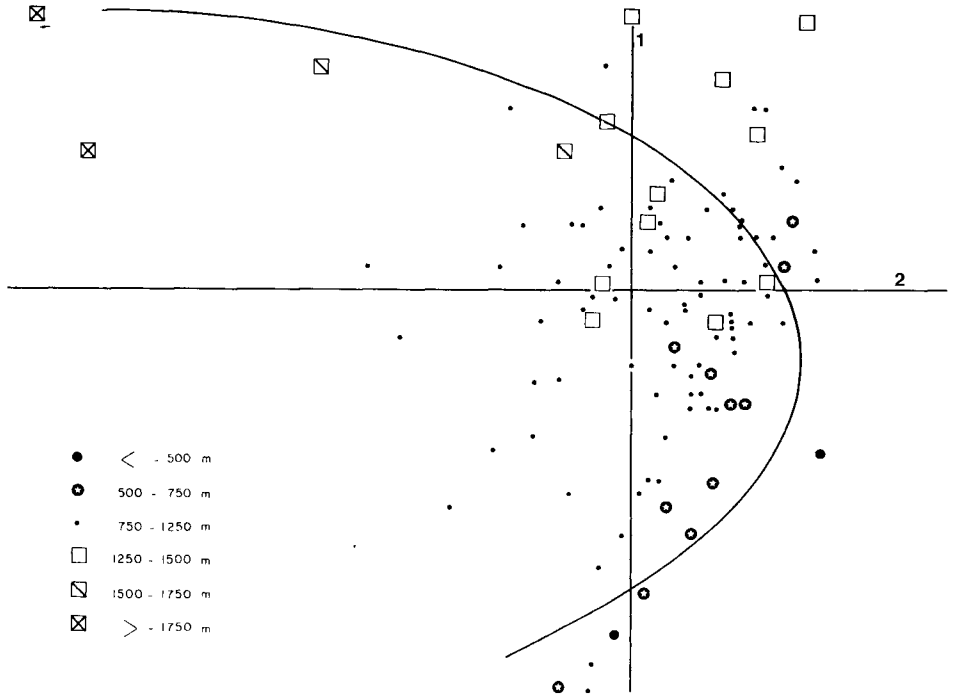


FIG. 4

Localisation des différentes classes d'altitude (variables supplémentaires) dans le plan factoriel 1-2.

Position of different altitudinal classes (supplementary variables) in factorial plan 1-2.

ici les accroissements, la surface terrière, les classes de fertilité et des variables d'ordre explicatif, bioclimatiques ou édaphiques, par l'intermédiaire de leurs propres liaisons avec les groupements végétaux mis en évidence par l'analyse multivariable.

Ces liaisons statistiques peuvent se formuler ainsi :

Il y a une très forte liaison entre les altitudes, les étages et séries de végétation et les groupements végétaux définis sur une base purement floristique.

De plus, on peut voir sur les figures 3 et 4, et plus sur celle relative aux altitudes que sur l'autre, que les symboles représentatifs des différentes classes d'altitude et des différentes séries de végétation se succèdent dans un ordre logique, le long d'une sorte de courbe parabolique, ce qui est généralement l'indice d'un « effet GUTTMAN » (BACHACOU, 1973), c'est-à-dire de la forte prédominance du premier facteur (en l'occurrence le gradient bioclimatique altitudinal) sur les autres ; le 2^e facteur ne pouvant alors être interprété indépendamment du premier.

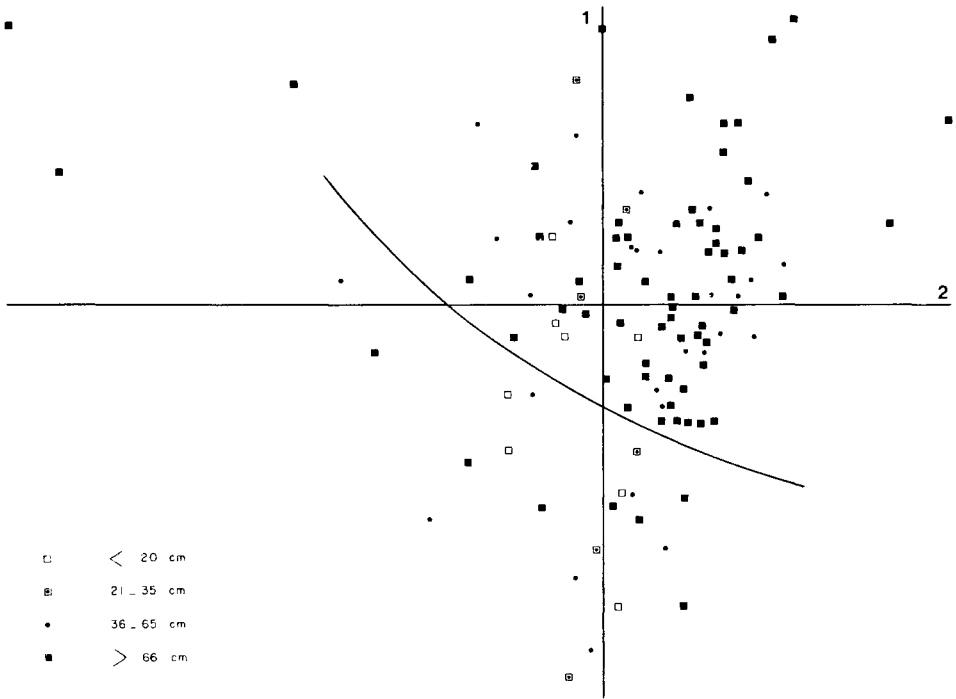


FIG. 5

Localisation des différentes classes de profondeur de l'horizon C (variables supplémentaires) dans le plan factoriel 1-2.

Position of different classes of C horizon depth (supplementary variables) in factorial plan 1-2.

En outre, sur la figure 3, relative aux étages et séries de végétation, on constate qu'on peut isoler, au sens large par une droite, d'une manière plus étroite par une courbe, le « domaine montagnard », dans le deuxième quadrant du plan factoriel, correspondant à des valeurs positives sur les deux axes. Ce point mérite d'être souligné car on constate que ce même secteur du plan factoriel, s'individualise aussi sur les graphiques relatifs aux autres variables explicatives ou à expliquer, ce qui confirme les liaisons statistiques qui les unissent.

Il y a une très forte liaison entre l'épaisseur du A_0 et la profondeur du sol d'une part, et, d'autre part, entre ces caractères édaphiques et l'altitude (et les étages montagnards), comme si l'érosion des sols avait été plus forte à basse altitude qu'à l'étage montagnard, ce qui peut paraître contradictoire avec la topographie, mais ce qui est en accord avec ce que l'on sait de la sensibilité et de la fragilité des végétations méditerranéennes.

Il y a aussi une très forte liaison entre la productivité du pin noir et la profondeur du sol ou l'épaisseur du A_0 d'une part, et entre cette productivité et les étages et séries de végétation d'autre part : c'est dans l'étage montagnard que la productivité

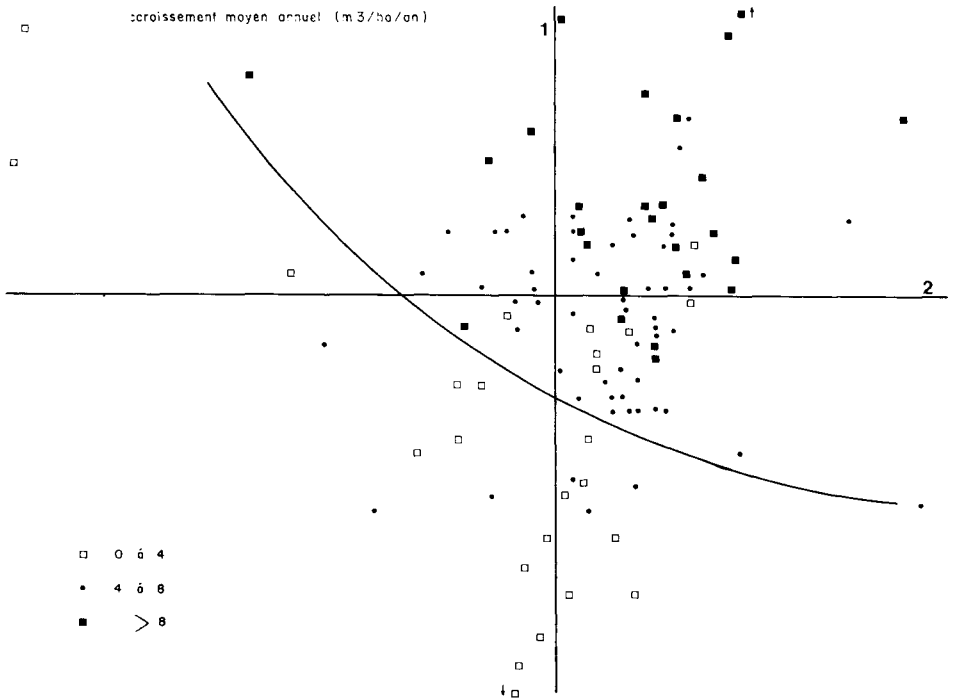


FIG. 6

Localisation des différentes classes d'accroissement moyen annuel (variables supplémentaires) dans le plan factoriel 1-2.

Position of different increment classes (supplementary variables) in factorial plan 1-2.

du pin noir est la meilleure ; dans les étages méditerranéen et supraméditerranéen, qu'elle est la moins bonne en moyenne, mais avec alors une forte variabilité. Mais c'est aussi dans les étages montagnards que les sols sont en moyenne les meilleurs (plus profonds, plus humifères...), ce qui fait qu'il est difficile de dire quel est le facteur essentiel : le climat ou le sol ; bien que ce soit là, en grande partie, un faux problème, dans la mesure où la genèse des sols et leur sensibilité à l'érosion, sont elles-mêmes dépendantes, directement, ou indirectement par l'intermédiaire de la végétation spontanée, du climat.

A l'intérieur d'un même étage de végétation, les séries de végétation à pin sylvestre sont « moins productives » que les séries qui n'en comportent pas.

Ainsi, à l'étage supraméditerranéen, dans les placettes situées dans la série du chêne pubescent, le pin noir a une productivité moyenne supérieure à celle qu'il présente dans la série mixte du chêne pubescent et du pin sylvestre. De même, à l'étage montagnard, la série du hêtre est-elle beaucoup plus « productive » que celle du pin sylvestre.

Cela est en accord avec ce que l'on sait classiquement sur l'écologie de ces séries ; celles à pin sylvestre correspondant à un climat beaucoup plus sec que leurs homologues à hêtre ; les facteurs édaphiques pouvant compenser plus ou moins, ou au contraire aggraver, les différences pluviométriques naturelles.

2.3. *Premières conclusions*

Il est probable que les liaisons statistiques entre la productivité du pin noir, la végétation naturelle, l'altitude et les sols, eussent été meilleures si, d'une part, l'échantillonnage avait pu être plus important et surtout mieux équilibré, afin d'être mieux représentatif de la variabilité écologique de la région, et, d'autre part, si l'analyse factorielle des correspondances avait pu se baser sur des relevés complets de végétation. On aurait sans doute alors pu mettre en évidence des espèces (ou des groupes d'espèces) indicatrices, fortement discriminantes, par leur présence et (ou) leur absence, des fortes productivités et des facteurs écologiques qui les sous-tendent.

Malgré ces biais, et malgré l'incertitude relative au rôle réel des facteurs édaphiques, ces premières données résultant d'une approche globale des problèmes, suggèrent fortement que la productivité du pin noir dans les Alpes du Sud est principalement sous la dépendance des facteurs bioclimatiques.

On vérifierait donc, dans ce cas particulier du pin noir dans les Alpes du Sud, une règle beaucoup plus générale, déjà mise en évidence chez beaucoup d'espèces forestières et dans beaucoup de régions.

3. *Etude directe des liaisons entre la productivité du pin noir et les facteurs climatiques*

Pour tenter d'aller plus loin dans l'étude des liaisons entre la productivité du pin noir et les facteurs climatiques, et de lever l'ambiguïté relative à l'incidence exacte des facteurs édaphiques, nous avons appliqué un programme de régressions multiples et progressives entre, d'une part la variable à expliquer : la productivité et, d'autre part, des variables explicatives climatiques.

3.1. *Les données climatiques prises en compte*

Ce sont :

- l'altitude compensée (en m), en abrégé A_c ,
- la distance altitudinale à la crête (en m), en abrégé Δ_c ,
- la distance à la Méditerranée (en km), en abrégé D_m ,
- la distance à l'Atlantique (en km), en abrégé D_a .

M. BECKER (1979, 1982) a mis clairement en évidence, l'intérêt des notions d'« indice de rayonnement » (I_r), d'« altitude compensée » (A_c), et de « distance altitudinale à la crête » (Δ_c), pour l'étude des liaisons, dans les régions de moyenne montagne, entre la productivité d'une essence forestière et les facteurs climatiques.

L'altitude compensée (A_c), est l'altitude réelle (A_r) corrigée en fonction de l'indice de rayonnement de la station correspondante. L'indice de rayonnement (I_r)

est un indice combinant pente et exposition (M. BECKER, 1979 a) en un lieu donné. Il permet de comparer le régime héliothermique de plusieurs stations de même altitude, mais de situations topographiques différentes. Il ne dépend que de la pente, de l'exposition, et de la hauteur de l'horizon dans cette exposition. M. BECKER (1979 b, 1982) a calculé que pour les Vosges alsaciennes Ar et Ac étaient liés par la formule :

$$Ac = Ar + 440 (1 - Ir)$$

N'ayant pas de données suffisantes pour vérifier la validité de cette formule dans les Alpes du Sud, nous l'avons appliquée telle quelle, apportant certainement ainsi un biais systématique.

La distance altitudinale à la crête (Δc), est la différence qui existe entre l'altitude (réelle ou mieux, compensée) d'une station et l'altitude de la crête qui « abrite » cette station des vents dominants apportant la pluie : plus cette distance est faible, moins l'« effet protecteur » de la crête jouera, et plus les précipitations seront importantes (et vice versa). Elle se mesure sur une carte topographique.

Distance à la mer. Dans la zone des montagnes périméditerranéennes où sont situées les placettes de pin noir étudiées, les précipitations viennent en général du Sud (vent « marin »), c'est-à-dire de la Méditerranée, soit de l'Ouest (de l'Atlantique) sans qu'il soit le plus souvent possible, faute de renseignements précis, de déterminer leur part respective au long d'une année, pour une station donnée.

Ainsi, pour chaque placette, nous avons mesuré (grossièrement sur une carte à petite échelle), les « distances à l'Atlantique » (Da), et les « distances à la Méditerranée » (Dm), en kilomètres, en tant qu'indicateurs, indirects et très grossiers, du régime pluviométrique stationnel.

Il est bien évident que de toutes ces notions : altitude compensée, distance altitudinale à la crête, et distance à la mer, c'est celle d'altitude compensée qui a le plus de réalité biologique. Les autres sont, ou plutôt, veulent être, des indicateurs grossiers et indirects des régimes climatiques. On ne saurait donc les mettre sur le même plan et il faudra en tenir compte dans l'interprétation des résultats.

3.2. Résultats des calculs de corrélations multiples

Nous avons rassemblé dans le tableau 2 les résultats obtenus avec 6 échantillonnages différents : l'ensemble des placettes (du moins l'ensemble de celles pour lesquelles nous possédions des données complètes, soit 106), et plusieurs types de sous-ensembles.

Ces résultats concernent essentiellement l'ordre des variables explicatives et le signe de leur corrélation.

L'analyse globale (multivariable) nous ayant montré l'importance de l'altitude et des étages de végétation, nous avons considéré des sous-ensembles de placettes correspondant à cette partition.

Pour les placettes de « basse altitude » (43 placettes d'altitude compensée inférieure ou égale à 1 000 m, ou 60 placettes situées dans les étages méditerranéen ou supraméditerranéen à chêne pubescent), c'est l'altitude compensée qui vient en tête, et de façon positive, pour expliquer la production du pin noir.

TABLEAU 2

*Corrélations multiples entre la productivité du pin noir d'Autriche et les facteurs bioclimatiques.
Multiple correlations between Pinus nigra nigricans productivity and bioclimatic factors.*

Echantillonnage	Variables explicatives de la Productivité (P)			Coefficient de corrélation multiple
	Rang	Nature	Signe	
106 placettes (totalité)	1 ^{er}	Altitude compensée	+	0,323
	2 ^e	Distance à la Méditerranée	+	
	3 ^e	Distance altitudinale à la crête	—	
	4 ^e	Distance à l'Atlantique	+	
43 placettes à une altitude compensée < 1 000 m	1 ^{er}	Altitude compensée	+	0,404
	2 ^e	Distance à l'Atlantique	—	
	3 ^e	Distance altitudinale à la crête	—	
	4 ^e	Distance à la Méditerranée	+	
60 placettes des étages supraméditerranéens à Chêne pubescent	1 ^{er}	Altitude compensée	+	0,367
	2 ^e	Distance à la Méditerranée	+	
	3 ^e	Distance altitudinale à la crête	—	
	4 ^e	Distance à l'Atlantique	—	
63 placettes à une altitude compensée \cong 1 000 m	1 ^{er}	Distance à la Méditerranée	+	0,323
	2 ^e	Distance altitudinale à la crête	—	
	3 ^e	Distance à l'Atlantique	+	
	4 ^e	Altitude compensée	+	
46 placettes de l'étage montagnard à hêtre ou pin sylvestre	1 ^{er}	Distance à la Méditerranée	+	0,274
	2 ^e	Distance à l'Atlantique	+	
	3 ^e	Distance altitudinale à la crête	—	
	4 ^e	Altitude compensée	+	
25 placettes à une altitude compensée \cong 1 200 m	1 ^{er}	Distance à l'Atlantique	—	0,462
	2 ^e	Distance altitudinale à la crête	—	
	3 ^e	Distance à la Méditerranée	+	
	4 ^e	Altitude compensée	—	

Cela veut dire qu'à cette tranche altitudinale, à ces étages inférieurs où l'influence du climat méditerranéen est prépondérante, la productivité du pin noir, d'une part croît avec l'altitude, et, d'autre part, est liée aux conditions topographiques stationnelles (intégrées dans la notion d'altitude compensée), et, par voie de conséquence, à l'édaphisme.

Pour les placettes d'« altitude élevée » (63 placettes d'altitude compensée supérieure à 1 000 m, ou 25 placettes d'altitude compensée supérieure à 1 200 m, ou 46 placettes de l'étage montagnard à hêtre ou à pin sylvestre), c'est la distance à la mer (plus celle à la Méditerranée, positivement, que celle à l'Atlantique, négativement) qui devient le facteur principal.

Dans ces cas, il est peut-être aussi important de constater que l'altitude compensée ne vient alors qu'en dernière position.

On peut interpréter ce fait en disant que les facteurs stationnels d'altitude, de pente et d'exposition, c'est-à-dire les composantes du climat local, deviennent alors sans importance devant le climat régional qui fournit à la végétation suffisamment d'eau, en toutes circonstances (climat de plus en plus « océanique » avec l'altitude ?).

Pour la totalité des placettes (106), c'est l'altitude compensée qui vient en tête, ce qui est en accord avec la prépondérance des placettes de « basse altitude » dans l'échantillonnage global.

3.3. Conclusions sur l'influence des facteurs climatiques

Ces calculs montrent que les échantillonnages réalisés sur la base des étages de végétation donnent des résultats intéressants sur la productivité du pin noir dans les Alpes du Sud. Cela n'étonnera pas ceux qui reconnaissent le caractère indicateur des unités conceptuelles que sont les groupements végétaux.

Il eut été intéressant d'essayer d'affiner plus encore ces rapports entre productivité forestière et groupements végétaux, en considérant des unités plus précises : non plus des étages de végétation, mais les séries de végétation ou, mieux encore, les associations végétales qui les composent, malheureusement ces unités auraient eu des effectifs trop faibles.

Ces résultats suggèrent qu'à « basse altitude » ($\sim < 1\ 000$ m), c'est-à-dire aux étages supraméditerranéen et, *a fortiori*, méditerranéen, ce sont les facteurs stationnels (altitude, pente, exposition, mais aussi sol) qui sont prépondérants pour expliquer la productivité du pin noir. Cela est sans doute en relation avec une origine essentiellement méditerranéenne des précipitations, dont l'irrégularité est un des caractères essentiels.

Au contraire, aux altitudes plus « élevées » ($> 1\ 000 - 1\ 200$ m), c'est-à-dire à l'étage montagnard, les facteurs stationnels, synthétisés ici par la notion d'altitude compensée, cèdent le pas aux facteurs macroclimatiques. Cela est conforme avec le caractère plutôt océanique des hautes montagnes méditerranéennes françaises, où les phytocénoses à base de hêtre, sapin, pin sylvestre... de caractère médioeuropéen, font suite à des phytocénoses à chêne vert et chêne pubescent de caractères méditerranéens.

4. Etude des liaisons entre la productivité du pin noir et différents facteurs écologiques

Il est intéressant d'utiliser les variables écologiques ayant servi dans l'analyse des correspondances pour expliquer la variabilité de la productivité du pin noir exprimée, d'une part par l'accroissement moyen annuel ramené à 80 ans en utilisant les classes de fertilité de la table de production (il varie de 1,4 à 13,2 m³/ha/an) et, d'autre part, par la hauteur dominante elle aussi raménée à 80 ans par le même procédé (elle varie de 10,7 à 25,2 m).

4.1. *Les variables écologiques prises en compte*

Ce sont celles qui ont été mesurées ou estimées lors de l'installation des placettes de production ayant servi à construire la table de production :

- altitude réelle (entre 275 m et 1 920 m),
- pente,
- indice de rayonnement : ses fortes valeurs indiquent des stations plus sèches et plus chaudes exposées au sud,
- variables pédologiques, relevées au centre de la placette ; il s'agit de l'épaisseur de l'horizon A0 et de l'horizon A1, de la profondeur de sol explorée par les racines et enfin de la profondeur de la roche-mère,
- étage de végétation, noté de 1 à 6 du plus méditerranéen au plus montagnard ; les placettes de l'étage méditerranéen ont en moyenne un accroissement moyen à 80 ans de 5,8 m³/ha/an contre 7,0 m³/ha/an pour les placettes de l'étage montagnard,
- pluviométrie : elle a seulement pu être estimée pour les placettes des Alpes de Haute-Provence et, dans ce cas, elle n'intervient pas de manière significative dans les régressions.

4.2. *Résultats des régressions progressives*

L'analyse de régressions progressives a été effectuée sur différentes sous-populations de placettes ainsi que l'indique le tableau 3. Les résultats montrent que, globalement, l'explication de la productivité est meilleure avec les variables stationnelles qu'avec les seules variables bioclimatiques (coefficients de corrélations multiples de 0,6 contre 0,4 dans le cas précédent).

Les meilleurs résultats sont obtenus avec le groupe des 53 placettes des Alpes de Haute-Provence ($r = 0,720$ pour l'accroissement moyen annuel à 80 ans). Ils sont moins bons pour les Alpes du Sud ($r = 0,638$) et deviennent encore plus médiocres si on ajoute les placettes du Gard et de la Lozère et donc que l'on considère les 111 placettes ($r = 0,585$).

La séparation des 111 placettes entre l'étage méditerranéen et l'étage montagnard donne des résultats plutôt médiocres comme c'était déjà le cas avec les variables bioclimatiques.

Dans tous les cas ce sont les variables pédologiques (épaisseur de l'horizon A0, profondeur d'enracinement et de la roche-mère) qui interviennent en premier et de manière significativement positive dans les régressions progressives. Les autres variables peuvent avoir éventuellement un effet significatif, qui peut être différent d'une sous-population à l'autre et il est difficile d'en donner une interprétation générale.

TABLEAU 3

Régressions progressives entre la productivité du pin noir d'Autriche et les variables écologiques indiquées dans leur ordre d'apparition.

Progressive regressions between Pinus nigra nigricans productivity and ecological factors.

	Accroissement moyen annuel à 80 ans			Hauteur dominante à 80 ans			
102 placettes des Alpes du Sud	Prof. des racines	*	+	Epaisseur Ao	**	+	
	Epaisseur Ao	**	+	Prof. de la roche-mère	*	+	
	Pente			Age	*	—	
	Altitude	*	+	Indice de rayonnement			
	Prof. de la roche-mère			Profondeur des racines			
	Age						
	Etage végétation						
	r = 0,638			r = 0,588			
53 placettes des Alpes de Haute- Provence (04)	Prof. des racines			Prof. de la roche-mère	**	+	
	Prof. de la roche-mère	*	+	Indice de rayonnement	*	—	
	Indice de rayonnement .	*	—	Epaisseur Ao	*	+	
	Epaisseur Ao	*	+	Age	*	—	
	Age						
	Altitude						
		r = 0,720			r = 0,663		
65 placettes étage méditerranéen	Prof. des racines	*	+	Epaisseur Ao	**	+	
	Epaisseur Ao	**	+	Age			
	Age			Pente			
	Altitude			Indice de rayonnement			
	Pente			Profondeur des racines			
		r = 0,564			r = 0,541		
	46 placettes étage montagnard	Prof. de la roche-mère	*	+	Epaisseur Ao	*	+
Pente		*	—	Prof. de la roche-mère	*	+	
Epaisseur Ao		*	+	Indice de rayonnement			
Altitude				Altitude			
		r = 0,572			r = 0,581		

r : coefficient de corrélations multiples, * : variable significative au seuil de 5 p. 100, ** : variable significative au seuil de 1 p. 100, +/— : signe de l'effet de la variable considérée.

4.3. Conclusion sur l'analyse des facteurs écologiques

Cette analyse met en évidence le rôle des facteurs pédologiques dans l'explication de la productivité du pin noir et en particulier celui de la profondeur de sol exploitable par les racines, qui traduit bien sûr la fertilité de la station mais surtout la capacité de rétention en eau, ce qui est particulièrement important sous climat méditerranéen. La composition chimique des sols n'a pas été étudiée mais la prise en compte de la nature des substrats (calcaire, schistes, marnes, grès...) n'apporte pas, dans notre cas, d'informations supplémentaires.

L'influence du sol est d'autant plus marquée que la sous-population de placettes est bien localisée géographiquement : cas des Alpes de Haute-Provence, c'est-à-dire que les facteurs macroclimatiques sont les plus voisins. Ceci est concordant avec les résultats du chapitre précédent qui montrent que quand on prend des placettes réparties sur l'ensemble de la zone étudiée (placettes de l'étage montagnard), ce sont les facteurs macroclimatiques qui sont prépondérants.

5. Conclusions générales

Malgré l'imprécision et le caractère incomplet de nombreuses données sur lesquelles elles s'appuient, ces deux méthodes d'investigations mises en œuvre pour étudier le déterminisme écologique de la productivité du pin noir d'Autriche dans les Alpes du Sud, ont donné cependant des résultats intéressants et complémentaires.

Permettant d'appréhender simultanément et de combiner un très grand nombre de variables diverses, l'analyse factorielle des correspondances a permis de mettre en évidence des liaisons entre la végétation naturelle, l'altitude, les facteurs édaphiques, et la productivité du pin noir : aux fortes altitudes (étage montagnard du hêtre ou du pin sylvestre) sont associés des sols épais et de fortes productivités, et inversement.

L'étude des corrélations (régressions progressives) entre cette productivité et des indicateurs bioclimatiques a permis de montrer qu'à « basse altitude », c'est-à-dire, grosso-modo, à l'étage du chêne pubescent, les facteurs stationnels semblaient prédominer, tandis qu'aux altitudes plus élevées (étage montagnard), ils paraissent céder la place aux facteurs macroclimatiques, avec cependant une productivité meilleure dans la série du hêtre que dans celle du pin sylvestre.

Ces résultats sont en accord avec ce que l'on sait déjà de l'écologie et de la position altitudinale des peuplements de pin noir dans leur aire naturelle dans le Sud de l'Europe : à savoir leur caractère oroméditerranéen et la position de leurs séries, au sommet de l'étage supraméditerranéen des chênes à feuilles caduques (chêne pubescent essentiellement), et à la base des séries montagnardes, plus méditerranéennes, du pin sylvestre, du hêtre et du sapin.

Les différences de productivité constatées à altitude égale, entre les séries du hêtre et celle du pin sylvestre sont également conformes avec ce que l'on sait sur l'écologie de ces deux séries ; celle du pin sylvestre correspondant à une pluviosité plus faible que celle du hêtre, différence qui est à la base de la distinction classique entre Alpes externes humides et Alpes internes sèches. Cette différence de comportement du pin noir constitue donc un argument en faveur d'un déterminisme de la productivité chez le pin noir plus lié au climat (pluviosité) qu'à la nature du sol.

Les différences de productivité sont cependant difficiles à mettre en évidence uniquement par des variables bioclimatiques car elles sont masquées par la variabilité des caractéristiques physiques des sols. C'est en fin de compte la disponibilité en eau du sol plus encore que la pluviosité qui régit la production du pin noir.

Sur le plan méthodologique ces résultats conduisent aux deux réflexions suivantes :

— d'abord, ils montrent, une fois de plus, tout l'intérêt qu'il y a dans ce genre

d'étude sur les relations entre la productivité d'une essence forestière et les facteurs écologiques, à établir l'échantillonnage sur la base d'unités fournies par l'étude de la végétation spontanée : étages de végétation, ou, mieux encore car plus précises, associations végétales ;

— ensuite, ils révèlent la difficulté qu'il y a à vraiment caractériser le milieu, que ce soit au niveau stationnel (sol, microclimat) ou à un niveau plus régional (microclimat, régime climatique) par des paramètres écologiques et surtout à hiérarchiser l'effet de ces différents paramètres en fonction de leur échelle d'action.

D'un point de vue pratique, on retiendra la bonne productivité générale du pin noir dans l'étage montagnard, et surtout dans la série du hêtre, alors que dans les étages supraméditerranéens, à chêne pubescent (avec ou sans pin sylvestre), elle est beaucoup plus variable, et cela en fonction des conditions stationnelles de mésoclimat et de sol, qu'il est donc fondamental de prendre alors en compte.

Cela est encore plus vrai dans l'étage méditerranéen, où, on le sait par ailleurs, le pin noir se révèle très sensible à toutes sortes de ravageurs, ce qui est le signe d'une mauvaise adaptation écologique (BOUCHON & TOTH, 1971).

Il en résulte que pour le boisement à basse altitude, surtout si on cherche la productivité, il y a intérêt, soit à utiliser d'autres espèces (le cèdre par exemple), soit à rechercher des provenances de pin noir mieux adaptées.

Reçu le 24 novembre 1982.

Accepté le 25 novembre 1984.

Summary

Pinus nigra nigricans productivity factors in Southern Alps of France

From floristical, ecological and dendrometrical data gathered on about hundred *Pinus nigra nigricans* sampling plots, in South East of France, a multivariate analysis allowed to analyse their statistical links.

Thus, mountain stage (and inside it, more in the beech serial than in the Scot Pine one) is associated with deep soils and high productivity. The use of « compensated altitude » notion (M. BECKER, 1979) and of multiple regression allowed to go further into the statistical links between productivity and bioclimate factors : at mountain stage, macroclimate factors are towering whereas at submediterranean stage (pubescent oak stage) the site factors (mesoclimatic and soil factors) are the most important, which explains the bigger variability of *Pinus nigra nigricans* productivity at this stage.

Key words : *Pinus nigra nigricans*, *Southern Alps*, *forest productivity*, *bioclimatic factor*, *compensated altitude*, *soil factor*.

Références bibliographiques

- BACHACOU J., 1973. L'« effet GUTTMANN » dans l'analyse des données phytosociologiques. Document C.N.R.F. Station de Biométrie, 1973, 30 p.
- BECKER M., 1979 a. Indices de climat lumineux combinant pente et exposition. *Bull. Ecol.*, 1979, 10 (2), 125-137.

- BECKER M., 1979 b. Les facteurs climatiques et la croissance du sapin dans les Vosges alsaciennes - Intérêt d'une notion nouvelle : l'altitude compensée. *C.R. Acad. Agric.*, 1979, **65**, 1307-1313.
- BECKER M., 1982. — Influence relative du climat et du sol sur les potentialités forestières en moyenne montagne - Exemple des sapinières à Fétuque (*Festuca silvatica* Vill.) dans les Vosges alsaciennes. *Ann. Sci. Forest.*, 1982, **39** (1), 1-31.
- BOUCHON J., TOTH J., 1971. — Etude préliminaire sur les pertes de production des pinèdes soumises aux attaques de la processionnaire du Pin : *Thaumetopoea pityocampa* Schiff. *Ann. Sci. For.*, 1971, **28** (3), 323-340.
- BOUCHON J., 1974. Les tarifs de cubage, E.N.G.R.E.F. Nancy, 57 p.
- C.N.R.S. Carte de la végétation de la France au 1/200 000, feuille n° 60 : GAP et feuille 67 : Digne.
- OTTORINI J.M., TOTH J., 1975. — Tables de production pour le pin noir d'Autriche dans le Sud-Est de la France. Doc. C.N.R.F. Station Sylviculture et Production n° 75 FM/04, 5 p.
- TURREL M., 1979. — La régénération naturelle du pin noir dans le Sud-Est de la France. Etude de quelques peuplements des Alpes de Haute-Provence. Doc. à diffusion limitée de la Station de Sylviculture méditerranéenne N° 79/2, 29 p.
- TOTH J., TURREL M., 1983. La productivité du pin noir d'Autriche dans le Sud-Est de la France. *Revue Forestière Française*, **XXXV** (2), 111-121.