



HAL
open science

Etude des potentialités forestières pour l'Epicéa commun dans l'Est de la France à partir des données de l'IFN

Ingrid Seynave, Jean-Claude Gégout, Jean-Christophe Hervé, Jean-François Dhôte, Jacques Drapier, Eric Bruno, Gérard Dumé

► To cite this version:

Ingrid Seynave, Jean-Claude Gégout, Jean-Christophe Hervé, Jean-François Dhôte, Jacques Drapier, et al.. Etude des potentialités forestières pour l'Epicéa commun dans l'Est de la France à partir des données de l'IFN. Revue forestière française, 2004, 56 (6), pp.537-550. 10.4267/2042/5120 . hal-03449400

HAL Id: hal-03449400

<https://hal.science/hal-03449400>

Submitted on 25 Nov 2021

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.

ÉTUDE DES POTENTIALITÉS FORESTIÈRES POUR L'ÉPICÉA COMMUN DANS L'EST DE LA FRANCE À PARTIR DES DONNÉES DE L'IFN

INGRID SEYNAVE - JEAN-CLAUDE GÉGOUT - JEAN-CHRISTOPHE HERVÉ
JEAN-FRANÇOIS DHÔTE - JACQUES DRAPIER - ÉRIC BRUNO - GÉRARD DUMÉ

Depuis une trentaine d'années en France, les études sur les potentialités forestières se sont développées pour quantifier la productivité des essences par type de station (approche synthétique) ou la prédire en fonction de différents facteurs du milieu (approche analytique). La plupart ont été réalisées dans le cadre des typologies des stations ou d'études spécifiques sur l'autécologie des essences.

Quelle que soit l'approche utilisée, l'étude porte en général sur une zone relativement petite : une région naturelle pour l'approche synthétique ; un ensemble de régions naturelles pour l'approche analytique (ordre de grandeur : la région administrative). Ce choix est souvent justifié par des arguments scientifiques comme la nécessité de limiter les phénomènes de compensation de facteurs qui peuvent rendre difficile l'identification des facteurs de milieu influençant la productivité (Gilbert, 1996 ; Boisseau, 1996) ou l'utilisation du caractère indicateur de la végétation (Becker et Le Goff, 1988). L'approche synthétique comme l'approche analytique s'appuient généralement sur un nombre important de relevés (de l'ordre de 100 à 400) réalisés suivant un plan d'échantillonnage stratifié selon les facteurs écologiques, afin de couvrir toute la variabilité des conditions stationnelles. L'exhaustivité demandée explique le coût élevé de telles études de potentialités forestières.

Ces deux contraintes (zone d'étude relativement petite et coût élevé de la phase d'acquisition des données) expliquent l'insuffisance des informations sur les potentialités forestières pour les grandes essences françaises. Dans son bilan sur la typologie des stations forestières, Boisseau (1999) évoque le manque de données sur les potentialités forestières comme une des raisons à la faible utilisation des catalogues et guides des stations et signale la nécessité de réaliser les études de potentialités sur des territoires plus vastes.

Dans ce contexte, les données collectées par l'Inventaire forestier national (IFN) sont particulièrement intéressantes : elles sont collectées sur toute la France (environ 110 000 placettes à chaque cycle d'inventaire) et, depuis 1992, elles regroupent des données dendrométriques et phytoécologiques. Elles ont d'ailleurs déjà été utilisées pour l'étude des potentialités forestières des stations sur une petite région naturelle avec des résultats encourageants (Drapier, 1987).

De plus, de nouveaux outils de diagnostic des conditions stationnelles ont été développés et peuvent être utilisés en relation avec les données de l'IFN dans le cadre des études de potentialités forestières :

— données climatiques numérisées et spatialisées par la méthode AURELHY de Météo France (Bénichou et Le Breton, 1987) ;

— données topoclimatiques calculables en tout point du territoire à partir d'un modèle numérique de terrain ;

— données phytoécologiques issues du caractère indicateur des plantes, vis-à-vis du climat et du sol, quantifié à partir de la base de données EcoPlant constituée par l'ENGREF (Gégout, 2001).

À partir de l'ensemble de ces informations, l'objectif de notre étude est de déterminer les facteurs du milieu qui conditionnent la potentialité de production de l'Épicéa commun, estimée par son indice de fertilité, dans l'Est de la France. D'un point de vue méthodologique, nous désirons connaître :

— l'intérêt et les limites des différents types de données disponibles (données IFN, données climatiques spatialisées, données phytoécologiques issues d'EcoPlant) pour cette étude,

— la pertinence d'une étude des relations station-production réalisée à l'échelle d'un vaste territoire.

DONNÉES ET MÉTHODE UTILISÉES

Zone d'étude

L'Est de la France constitue la zone d'étude. Sa bordure occidentale repose sur des limites naturelles, géologique au nord (limite du Crétacé inférieur) et hydrologique au sud (Rhône et Saône) (figure 1, ci-contre). Elle recouvre toute l'aire naturelle de l'Épicéa (Alpes, Jura et Vosges) ainsi qu'une partie des zones où l'Épicéa a été introduit (Ardennes et Plaine lorraine).

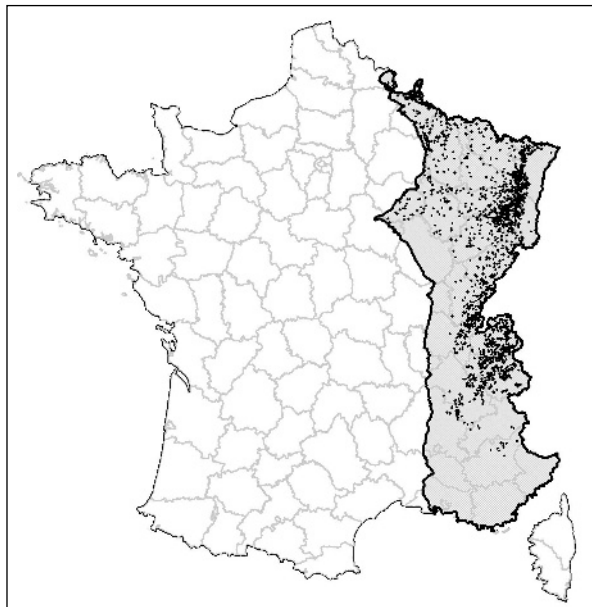


FIGURE 1
LIMITES DE LA ZONE D'ÉTUDE
ET LOCALISATION DES 2 087 PLACETTES IFN UTILISÉES

Données utilisées

Les données recueillies par l'IFN sur ses placettes ne contiennent pas d'information climatique directe et peu d'information sur les ressources nutritionnelles du sol (hormis la profondeur de décarbonatation). Pour pallier ces manques, nous avons utilisé deux sources de données complémentaires (figure 2, p. 540) :

— un SIG qui regroupe les données climatiques modélisées par le modèle AURELHY de Météo France et un modèle numérique de terrain au pas de 50 m ;

— la base de données EcoPlant qui a permis de déterminer les valeurs indicatrices des principales espèces de la flore française vis-à-vis de paramètres trophiques du sol et de paramètres climatiques.

- *Données mesurées par l'IFN*

Les données dendrométriques utilisées sont l'âge et les mesures de hauteur. Ces données permettent de calculer, à l'aide d'un modèle de croissance en hauteur dominante, l'indice de fertilité sur chaque placette IFN (hauteur dominante atteinte à un âge de référence). Le modèle de croissance en hauteur dominante utilisé a été établi à partir de données d'analyses de tiges prélevées dans le quart Nord-Est de la France (en Lorraine et dans les Vosges). Il prédit la hauteur dominante (H_0) atteinte par un peuplement en fonction de son âge dominant et d'un paramètre (R) qui traduit la vitesse de croissance du peuplement et qui dépend de la fertilité de la station : $H_0 = f(\text{âge}, R)$. Connaissant la hauteur et l'âge dominants d'un peuplement, on peut donc estimer le paramètre R et calculer la hauteur dominante atteinte par ce peuplement à un âge dominant de référence fixé, pour notre étude, à 70 ans. En moyenne, sur l'ensemble de la zone d'étude, l'âge dominant est de 66 ans et l'indice de fertilité, calculé pour un âge de référence de 70 ans, est de 27 m.

Les données écologiques recueillies par l'IFN décrivent : la topographie (altitude, position topographique, pente, exposition), la géologie, le sol (profondeur, texture, charge en cailloux, affleurements rocheux, signes d'hydromorphie, de décarbonatation...) et l'humus. Par ailleurs, un relevé floristique est effectué sur chaque placette dans un rayon de 15 m.

Pour réaliser cette étude, nous avons sélectionné, parmi les 7 027 placettes IFN situées dans la zone d'étude et où l'Épicéa est présent, les 2 087 placettes où :

- l'Épicéa est prépondérant et présent dans la strate dominante ;
- les données concernant la flore et les facteurs du milieu sont disponibles ;
- les données dendrométriques, et en particulier l'âge dominant, sont disponibles.

Cet échantillon contient 14 % de peuplements irréguliers et 32 % de peuplements mélangés. Compte tenu du protocole d'échantillonnage de l'IFN (échantillonnage pseudo-systématique stratifié par région naturelle), les 2 087 placettes sélectionnées couvrent une très large gamme de conditions stationnelles.

- *Données climatiques obtenues par SIG*

Les données climatiques modélisées par le modèle AURELHY de Météo France sont les températures moyennes annuelle et mensuelles et les précipitations mensuelles. Il s'agit de valeurs moyennes, sur 30 ans (1961-1990), estimées selon une maille kilométrique en tenant compte du relief.

Le modèle numérique de terrain a permis de calculer un indice de rayonnement et, combiné avec les informations climatiques, d'estimer l'évapotranspiration potentielle et le bilan hydrique climatique sur l'ensemble de la France au pas du kilomètre en prenant en compte la topographie locale.

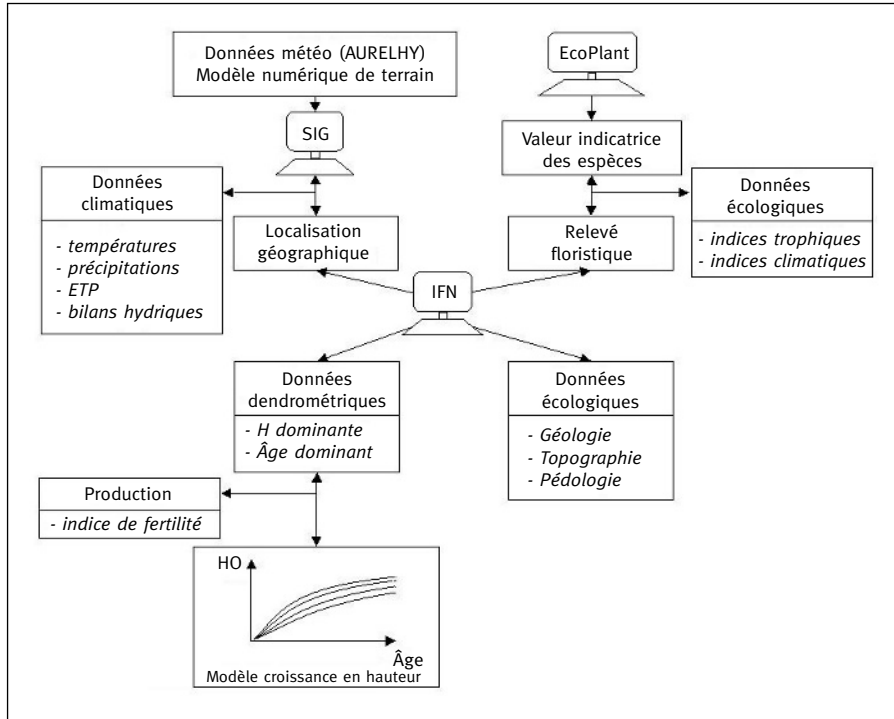
Par traitement SIG, nous avons affecté à chaque placette IFN, géoréférencée, les informations climatiques et topoclimatiques de la maille dans laquelle elle se situe.

- *Données prédites à partir de la végétation*

La base de données EcoPlant rassemble plus de 6 000 relevés phytoécologiques comprenant des analyses de sol et répartis sur toute la France. Elle est constituée, en grande partie, des "relevés types" caractéristiques des stations forestières décrites en France dans la centaine de catalogues des stations utilisant la méthode phytoécologique. EcoPlant a permis de quantifier le comportement écologique des principales espèces de la flore forestière de France et de calculer leurs

FIGURE 2

SOURCES DES DONNÉES UTILISÉES



valeurs indicatrices, c'est-à-dire leurs optimums écologiques vis-à-vis de paramètres climatiques et de paramètres trophiques du sol (Gégout *et al.*, 2002).

Nous disposons des valeurs indicatrices d'environ 700 espèces vis-à-vis de :

- 3 variables climatiques : la température moyenne annuelle, la température moyenne de janvier et l'indice de stress hydrique de De Martonne qui est un rapport entre précipitations et température ;

- 3 variables édaphiques : le pH, le taux de saturation en bases S/T (qui est le rapport entre la somme des cations nutritifs et la somme de cations nutritifs et toxiques et qui constitue un indice de la qualité de la nutrition minérale) et le rapport C/N (qui est un indice de la nutrition azotée).

À partir de ces valeurs indicatrices et du relevé floristique, nous avons estimé, sur chaque placette IFN, les 6 facteurs du milieu en faisant la moyenne des valeurs indicatrices des espèces présentes sur le relevé sans tenir compte de leur abondance. Parmi les différentes méthodes existantes, cette méthode est la plus simple et la plus souvent utilisée. Elle donne des résultats similaires à ceux obtenus par des méthodes plus complexes comme, par exemple, la moyenne des valeurs indicatrices pondérée par l'abondance des espèces (Hill et Carey, 1997 ; Schaffers et Sykora, 2000).

Méthode générale

L'objectif est d'expliquer les variations de l'indice de fertilité de l'Épicéa par des facteurs du milieu et de proposer une formule mathématique qui relie l'indice de fertilité aux variables écolo-

giques importantes pour la croissance de cette essence. L'équation de prédiction de l'indice de fertilité a été déterminée par la méthode de la régression linéaire multiple qui permet de sélectionner les variables qui ont un effet significatif sur l'indice de fertilité. Certaines variables ont été transformées afin d'établir des relations linéaires avec l'indice de fertilité (transformation en $\ln(x)$ ou $x + x^2$). Les interactions entre facteurs écologiques ont également été étudiées. Seules les variables écologiques ayant un effet sur l'indice de fertilité significatif au seuil de 99 % ont été retenues dans l'équation.

LES FACTEURS INFLUENÇANT LA CROISSANCE DE L'ÉPICÉA COMMUN

L'équation de prédiction de l'indice de fertilité

L'équation de prédiction de l'indice de fertilité de l'Épicéa prend en compte 6 variables écologiques :

- une variable liée au climat : l'altitude ;
- trois variables liées à l'eau du sol : l'indice de position topographique qui synthétise le bilan des apports et des pertes d'eau par écoulement latéral (IndiceTopo), les affleurements rocheux sur roche calcaire (AffleurementsCalcaires) et la profondeur du sol (Prof) ;
- deux variables liées au niveau trophique : le pH et le rapport C/N, tous deux estimés par la végétation.

Ces 6 variables expliquent 61 % de la variabilité de l'indice de fertilité et permettent de prédire cet indice avec une précision de l'ordre de $\pm 4,3$ m (soit un écart-type résiduel). Ce qui signifie que, pour près de 70 % des placettes IFN utilisées pour construire l'équation, l'écart entre l'indice de fertilité mesuré et l'indice de fertilité prédit à partir des 6 variables du milieu est inférieur à 4,3 m.

Les 6 facteurs ne contribuent pas de la même façon à l'explication des variations de l'indice de fertilité. Pour donner un ordre de grandeur de la contribution de chacun des facteurs, nous avons calculé la différence entre les valeurs maximale et minimale de l'indice de fertilité obtenues

TABLEAU I **Équation pour la prédiction de la productivité de l'Épicéa commun et variation de l'indice de fertilité (IF) due à chaque facteur**

L'indice de fertilité est donné à 70 ans.

L'IndiceTopo varie de 1 (pertes d'eau » apports d'eau) à 5 (pertes d'eau«apports d'eau).

Le pH et le C/N ont été calculés à partir des valeurs indicatrices de Gégout *et al.* (2002)

$IF = -4,48 \times \text{altitude}^2 + 0,52 \times \text{IndiceTopo} - 0,90 \times \text{AffleurementsCalcaires} + 0,24 \times \text{Prof} - 0,12 \times \text{pH}^2 - 0,28 \times \text{C/N} + 36,5$					
	Minimum	Moyenne	Maximum	Écart-type	Variation de IF (m)
IF (m)	4,1	27,1	41,3	6,9	–
Altitude (km)	0,125	0,740	2,100	0,440	19,7
IndiceTopo	1	3	5	1,0	2,1
AffleurementsCalcaires (1/10)	0	0,6	9	1,7	8,1
Prof (dm)	0	6,5	9	2,4	2,2
pH	3	4,8	7,3	1,2	5,3
C/N	8	19	35	5,6	7,6

en faisant varier successivement chaque facteur du modèle sur l'ensemble de sa gamme de valeurs observées (tableau I, p. 541). La comparaison des variations de l'indice de fertilité dues à chaque facteur indique que l'altitude est le facteur prépondérant et que les facteurs les moins explicatifs sont la profondeur du sol et l'indice topographique. Les autres facteurs contribuent de façon similaire à expliquer l'indice de fertilité.

Effet du climat

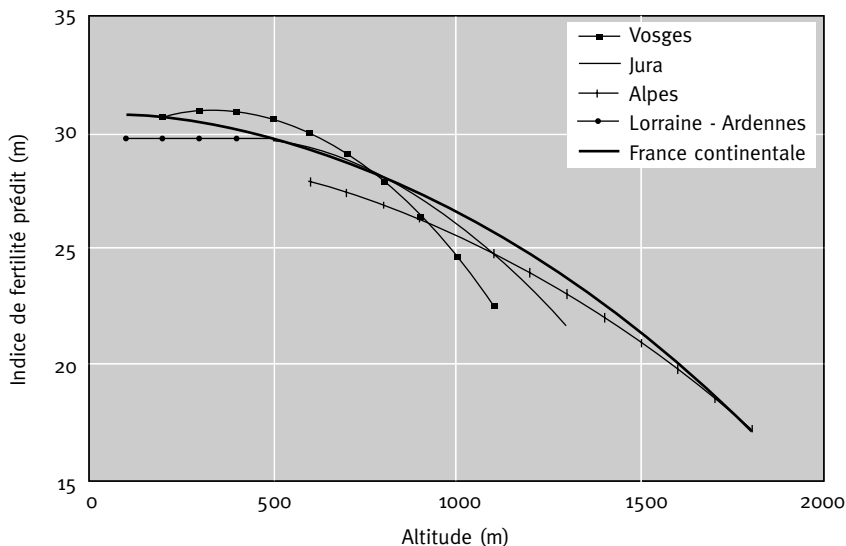
L'altitude est le facteur qui a le plus d'influence sur l'indice de fertilité (tableau I, p. 541). À elle seule, elle explique 49 % de sa variabilité. L'indice de fertilité varie peu à basse et moyenne altitude (jusqu'à environ 500 m dans les Vosges) et diminue rapidement au-delà : la fertilité baisse d'environ 1 m tous les 100 m (figure 3, ci-dessous – courbe France continentale). Oswald (1969) pour la Haute Ardèche et Keller (1978) pour les différents massifs montagneux de la Suisse obtenaient des résultats similaires.

L'effet de l'altitude est différent selon le massif montagneux : l'équation de prédiction est un peu plus performante si, conservant les mêmes variables, le coefficient de l'altitude est déterminé par massif. Le nouveau modèle explique alors 63 % des variations de l'indice de fertilité. L'équation de prédiction prenant en compte l'interaction entre altitude et région est la suivante :

$$\begin{aligned} \text{IF} = & 0,33 \times \text{IndiceTopo} - 0,89 \times \text{AffleurementsCalcaires} + 0,26 \times \text{Prof} - 0,15 \times \text{PH}^2 - 0,35 \times \text{C/N} + 37,3 \\ & + \text{Alpes} \times (- 3,71 \times \text{altitude}^2) \\ & + \text{Jura} \times (5,58 \times \text{altitude} - 8,77 \times \text{altitude}^2) \\ & + \text{Vosges} \times (10,09 \times \text{altitude} - 14,74 \times \text{altitude}^2) \end{aligned}$$

L'altitude traduit principalement un gradient thermique qui, au-delà d'une certaine altitude, devient contraignant pour la croissance de l'Épicéa. Par rapport aux autres massifs, on note dans les Alpes un effet moins fort de l'altitude sur l'indice de fertilité (figure 3, ci-dessous – courbes par région). Celui-ci peut s'expliquer de la façon suivante : à basse altitude (inférieure à 1 000 m),

FIGURE 3 VARIATION DE L'INDICE DE FERTILITÉ EN FONCTION DE L'ALTITUDE SUR L'ENSEMBLE DE LA ZONE D'ÉTUDE ET PAR RÉGION



le déficit hydrique climatique plus élevé dans les Alpes augmente la contrainte hydrique et entraîne une fertilité plus faible ; à haute altitude (supérieure à 1 000 m), une température moyenne annuelle plus élevée dans cette région limite la contrainte thermique et entraîne une fertilité supérieure.

Lorsqu'on essaie de remplacer dans l'équation l'altitude par des variables climatiques (sans modifier les autres facteurs), le meilleur modèle obtenu prend en compte la température moyenne de mars (effet positif) et la température moyenne et les précipitations du mois d'août (effets respectivement négatif et positif). Il traduit la sensibilité de l'Épicéa commun au froid au début de la saison de végétation et au stress hydrique en période estivale. Ce modèle, qui explique 55 % de la variabilité de l'indice de fertilité, est moins performant que le modèle prenant en compte l'altitude, probablement parce que les données climatiques sont modélisées à l'échelle kilométrique.

Effet de l'eau du sol

Le principal facteur lié à l'alimentation hydrique du sol est le taux de recouvrement des affleurements rocheux. L'importance de ce facteur varie selon la roche-mère :

- sur roche calcaire, pour une augmentation des affleurements rocheux de 10 % en surface, l'indice de fertilité baisse de près d'un mètre ;

- sur roche non calcaire, l'indice de fertilité diminue d'environ 15 cm lorsque les affleurements rocheux augmentent de 10 %. Le coefficient de la variable "affleurements sur roche non calcaire" étant peu significatif ($p = 0,04$), elle n'a pas été conservée dans l'équation de prédiction.

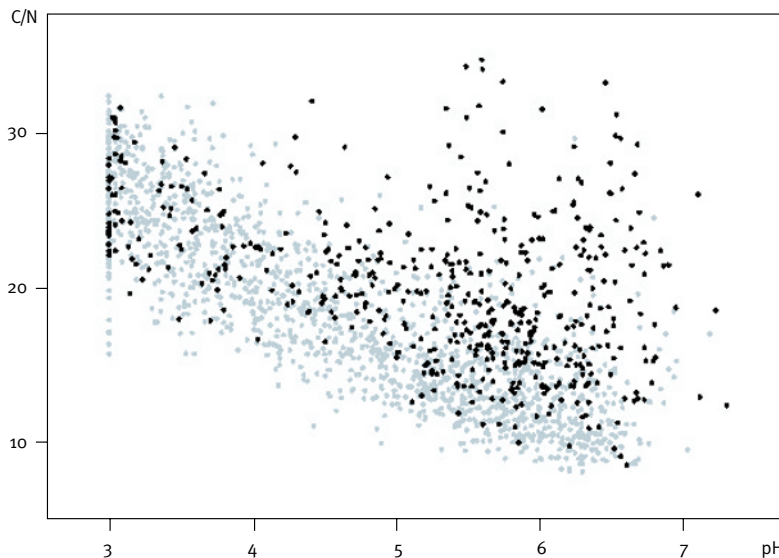
Sur sols calcaires, Lucot et Gaiffe (1995) notent que la forte pierrosité est une contrainte majeure à l'enracinement du Sapin et du Chêne en Franche-Comté. Sur roches métamorphiques, cristallines et volcaniques, Curt *et al.* (1996) n'observent pas de relation nette entre pierrosité et production de l'Épicéa. L'étude présentée ici, qui inclut des sites sur des substrats variés (roches calcaires, métamorphiques, cristallines et argileuses...), montre que l'impact de la pierrosité sur la production de l'Épicéa est très fort sur roche calcaire et négligeable sur les autres substrats. Ce résultat conforte l'hypothèse de Curt *et al.* (1996) sur l'importance de la forme et de la disposition des blocs : sur substrat calcaire, ces blocs sont souvent des dalles qui constituent une barrière à la prospection racinaire alors que, sur les autres substrats, ces blocs sont le plus souvent arrondis et remaniés. Ce résultat confirme ainsi la sensibilité de l'Épicéa à la présence d'obstacles à l'enracinement dans le sol.

La profondeur du sol contribue faiblement à l'explication de l'indice de fertilité (tableau I, p. 541). La part de la variance de l'indice de fertilité expliquée par la profondeur du sol est de 15 %. Dans les hautes Cévennes et en Auvergne, Curt *et al.* (1996) observent des R^2 compris entre 15 et 54 %. La faible contribution de la profondeur est certainement due à la difficulté de mesure de cette variable qui conduit à une mauvaise estimation du volume de sol prospecté par les racines et de la quantité d'eau disponible pour l'Épicéa.

L'indice topographique, comme la profondeur du sol, contribue assez faiblement à la prédiction de l'indice de fertilité. L'effet de ce facteur sur la production de l'Épicéa commun a été également mis en évidence par Curt *et al.* (1996). Il traduit une production plus forte en bas de versant qu'en haut de versant due principalement à une alimentation en eau par écoulement latéral et à un microclimat plus favorable.

FIGURE 4

VARIATION DU C/N EN FONCTION DU pH
En noir, les placettes où l'indice de fertilité est inférieur à 23 m



Effet du niveau trophique

Les deux facteurs C/N et pH, pris séparément, ont peu de pouvoir explicatif : la part de la variance de l'indice de fertilité expliquée par le rapport C/N est de 3 % ; celle expliquée par le pH est de 7 %. Par contre, l'effet cumulé du pH et du C/N explique près de 30 % de la variance de l'indice de fertilité. La combinaison de ces deux facteurs permet de révéler des situations relativement rares où pH et C/N sont élevés (respectivement supérieurs à 5,5 et 20) et où l'indice de fertilité de l'Épicéa est faible : inférieur à 23 m (figure 4, ci-dessus). Ces situations se rencontrent surtout dans les Alpes, sur substrat calcaire, à haute altitude et sur pente forte. Elles représentent environ 5 % des placettes de notre échantillon. Ce résultat est intéressant car il montre pour la première fois l'effet combiné négatif des forts pH et des C/N élevés sur la production de l'Épicéa commun.

CARTOGRAPHIE DES POTENTIALITÉS POUR L'ÉPICÉA

Avant de réaliser, à partir de l'ensemble des placettes IFN de la zone d'étude, la cartographie des potentialités pour l'Épicéa, nous avons spatialisé les indices de fertilité mesurés et les prédictions obtenues par le modèle afin de vérifier sa cohérence sur l'ensemble de la zone d'étude.

Comparaison indice de fertilité mesuré/prédit

La figure 5 (p. 546) représente les cartes de potentialité pour l'Épicéa commun obtenues à partir des indices de fertilité mesurés et des indices de fertilité prédits par les variables écologiques et floristiques. La comparaison de ces cartes montre la cohérence du modèle mais fait également apparaître certaines de ses limites.

La cohérence du modèle s'observe à différentes échelles :

- à l'échelle de l'ensemble de la zone d'étude, le modèle prédit le gradient de fertilité décroissante du nord au sud. Ainsi, les fertilités moyennes mesurées sont de 29,6 m dans les Vosges, 25,2 m dans le Jura et 21,1 m dans les Alpes et celles prédites sont respectivement de 29,6 m, 25,3 m et 21,3 m ;

- à une échelle régionale, le modèle reproduit correctement des phénomènes tels que le gradient de fertilité selon l'altitude dans le Jura et la différence de fertilité entre les versants Est et Ouest du Massif vosgien ;

- à une échelle locale, le modèle identifie des phénomènes très marqués, comme les très basses fertilités observées dans la pointe sud-est du Vercors. De façon plus générale, on constate que le modèle permet de prédire les zones de très faible fertilité.

Les limites du modèle sont les suivantes :

- les très bonnes fertilités, rencontrées principalement dans le Massif vosgien, ne se retrouvent pas sur la carte des potentialités prédites ;

- le modèle homogénéise les potentialités pour l'Épicéa. Ainsi, l'écart-type des indices de fertilité mesurés est de 5,1 m dans les Vosges, 6,5 dans le Jura et 7,4 dans les Alpes contre, respectivement, 3,1, 5,1 et 5,7 pour les indices de fertilité prédits. Il faut cependant noter que des valeurs très fortes ou très faibles d'indice de fertilité mesuré ponctuellement sont parfois aberrantes en raison de peuplements localement très irréguliers ou perturbés, où la hauteur et l'âge dominants n'ont pas de sens. Le modèle fournit des indices de fertilité plus cohérents pour ces sites ;

- dans la plaine lorraine (plateaux calcaires et Plateau lorrain), le modèle discrimine mal les différents niveaux de fertilité. Les facteurs pris en compte dans le modèle ne permettent que de distinguer la différence de potentialité moyenne entre les plateaux calcaires et le Plateau lorrain. Cependant, compte tenu des problèmes liés à l'Épicéa en plaine (sensibilité aux agents pathogènes, qualité médiocre du bois), le modèle présente peu d'intérêt pratique dans cette zone.

Cartographie des potentialités pour l'Épicéa à partir des données de l'IFN dans les massifs montagneux de l'Est de la France

Nous avons utilisé le modèle pour estimer l'indice de fertilité de l'Épicéa commun sur l'ensemble des placettes IFN, situées dans les trois massifs montagneux de la zone d'étude et ayant fait l'objet de relevés écologiques et floristiques. Cette estimation est réalisée sous l'hypothèse que l'on reste dans le domaine de validité du modèle, en particulier que l'estimation des indices floristiques n'est pas influencée par la composition du peuplement forestier. On obtient ainsi une carte des potentialités pour l'Épicéa. La figure 6 (p. 547) présente les cartes obtenues pour chaque massif montagneux de l'Est de la France avec une analyse des résultats du Massif alpin.

Dans les Alpes internes, les indices de fertilité prédits sont faibles, inférieurs à 25 m, hormis dans les fonds de vallée où ils peuvent atteindre 30 m. C'est la zone qui présente la potentialité moyenne la plus faible, liée à une altitude élevée, un climat plus sec et à des pH estimés par la flore élevés (le plus souvent entre 5 et 8).

Les Alpes intermédiaires constituent la zone où la potentialité moyenne est la plus forte. Dans cette zone, le facteur essentiel est l'altitude. Les autres facteurs variant relativement peu (pH acides et C/N élevés), cette zone est également celle où les potentialités sont les plus homogènes.

Dans les Alpes externes, la potentialité moyenne est intermédiaire et on observe une forte hétérogénéité locale des indices de fertilité prédits. En particulier, le modèle permet d'identifier des

FIGURE 5
CARTOGRAPHIE DES INDICES DE FERTILITÉ MESURÉS ET PRÉDITS
SUR LES 2087 PLACETTES IFN UTILISÉES POUR CONSTRUIRE LE MODÈLE

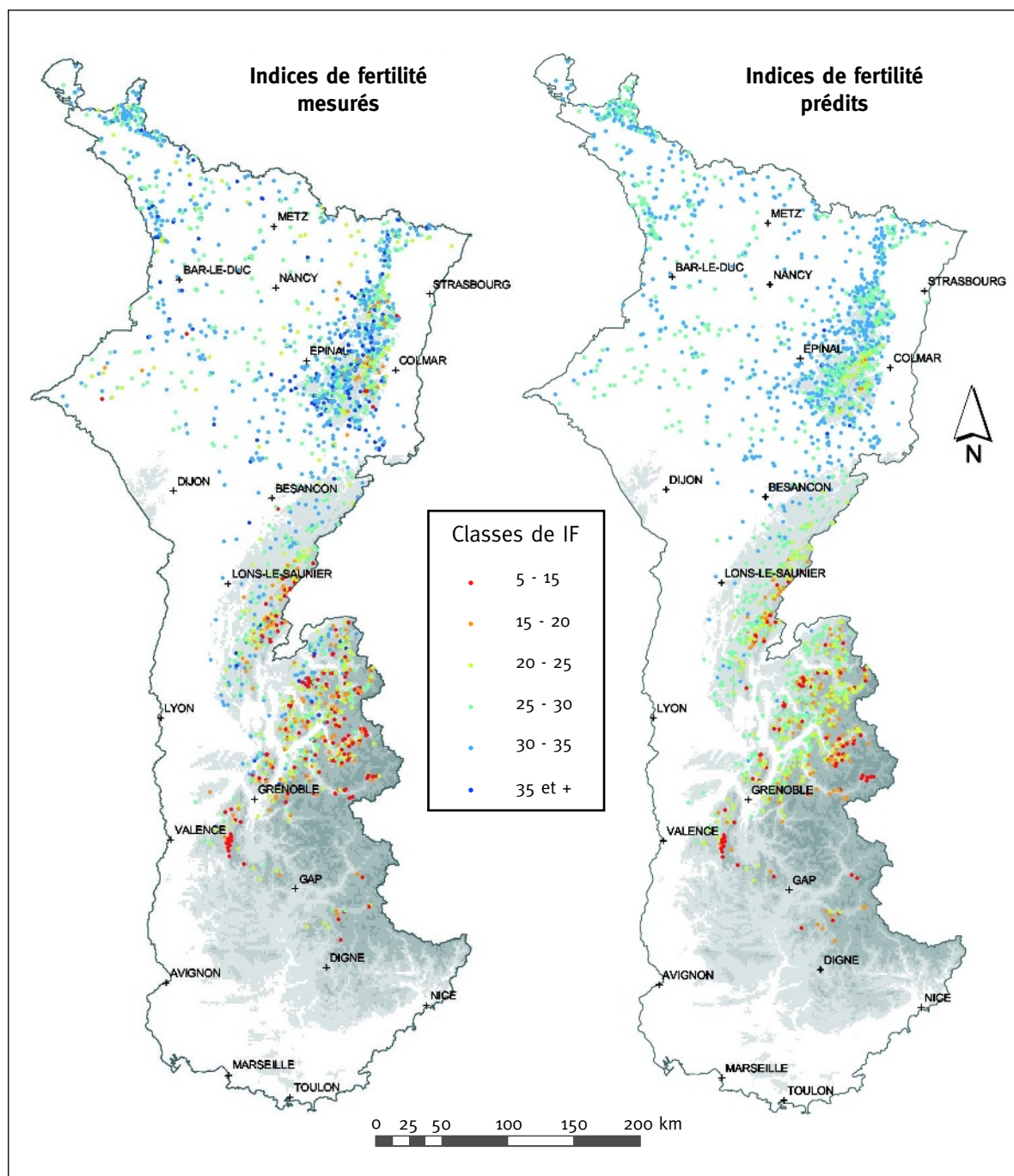
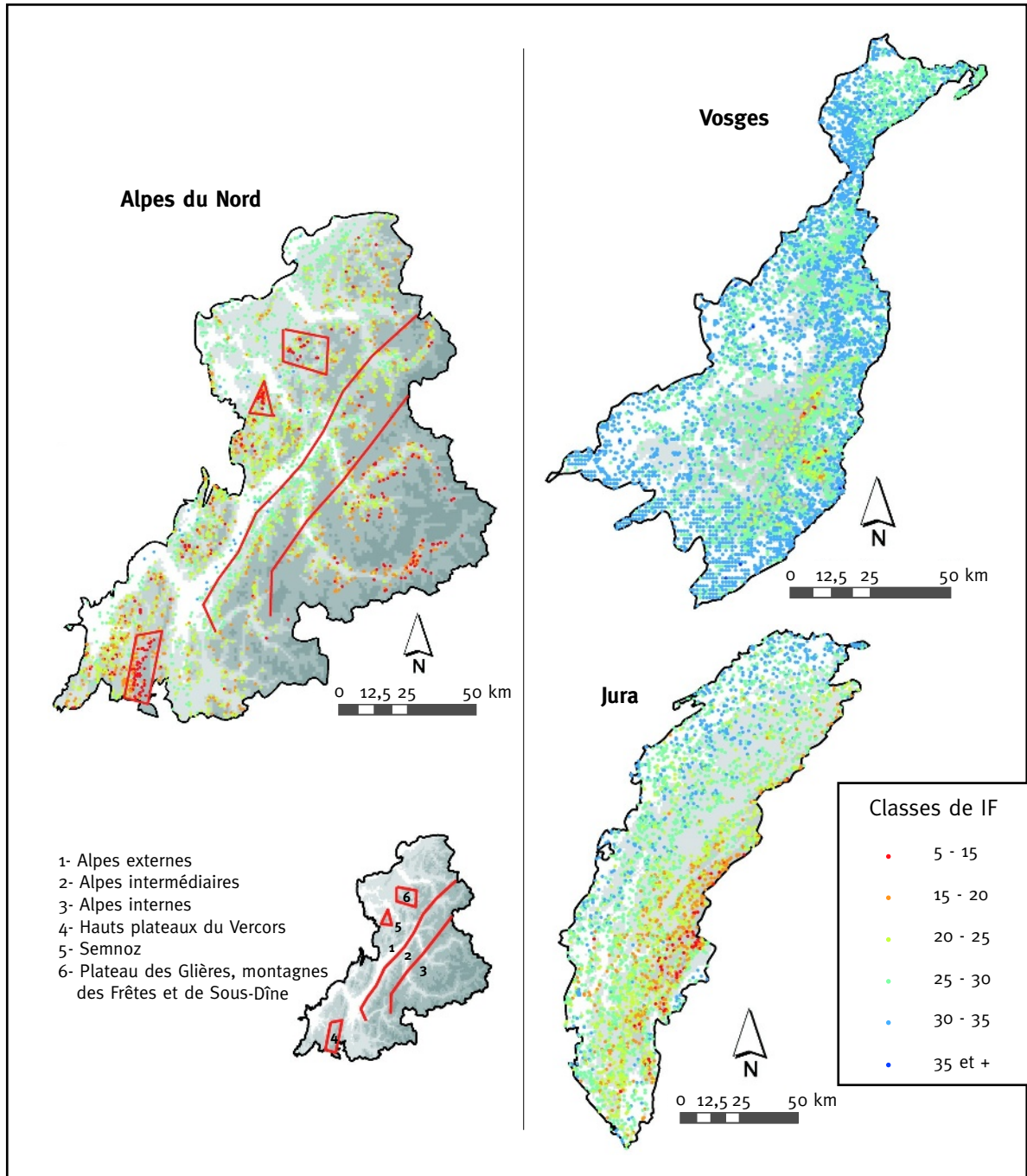


FIGURE 6
 CARTOGRAPHIE DES POTENTIALITÉS POUR L'ÉPICÉA COMMUN
 DANS LES TROIS MASSIFS DE L'EST DE LA FRANCE



zones, relativement peu étendues, où la fertilité est très faible. On voit ainsi apparaître nettement les hauts plateaux du Vercors, le sommet du Semnoz dans le massif des Bauges et la zone du plateau des Glières et des montagnes des Frêtes et de Sous-Dîne dans les Bornes. Ces zones, de très faible potentialité, se caractérisent par des altitudes élevées et des roches calcaires cohérentes affleurantes ou proches de la surface qui, dans le modèle, contribuent fortement à baisser l'indice de fertilité.

Cette première analyse de la cartographie des potentialités pour l'Épicéa commun confirme le bon comportement général du modèle. À ce stade, il serait intéressant de préciser le domaine de validité du modèle, notamment l'impact du couvert forestier (essence et ombrage) sur la prédiction des indices floristiques et donc sur l'estimation de l'indice de fertilité. Compte tenu des résultats obtenus par Augusto *et al.* (2003), qui montrent que les caractéristiques géographiques et géologiques du site ont plus d'influence sur la végétation et la chimie des sols que les essences, cet impact devrait être relativement faible.

DISCUSSION ET CONCLUSIONS

La méthode utilisée dans cette étude a permis d'identifier les principaux facteurs influençant la productivité de l'Épicéa commun. Ces facteurs (climat, eau du sol et niveau trophique) ont été identifiés par d'autres auteurs (Bary-Lenger *et al.*, 1995 ; Curt *et al.*, 1996 ; Oswald, 1969). Cependant, cette étude a montré la pertinence de descripteurs peu ou pas étudiés auparavant : l'effet des affleurements rocheux particulièrement fort sur substrat calcaire et l'effet cumulé du pH et du C/N qui discrimine des sites particuliers où ces deux variables sont élevées. Par ailleurs, l'introduction de variables climatiques dans l'équation en remplacement de l'altitude a permis de mieux expliciter l'effet de cette variable.

L'écart-type résiduel du modèle obtenu (supérieur d'environ 2 m à celui obtenu dans d'autres études) peut sembler important. Cependant une partie de cet écart-type peut être imputée au type de données utilisées. La précision des données IFN, prélevées dans un cadre opérationnel, est en effet souvent inférieure à celle des études "classiques" de potentialités et les peuplements échantillonnés par l'IFN ont des structures, des compositions et des origines plus variées.

Les résultats obtenus montrent la complémentarité des bases de données utilisées : la base de l'IFN permet de couvrir une très large gamme de conditions stationnelles et de production ; EcoPlant complète les données mesurées par l'IFN en ajoutant en particulier des informations sur les conditions trophiques ; le SIG, en apportant des informations climatiques directement liées à la croissance, permet de mieux expliciter l'effet de l'altitude sur la production.

L'étude présentée ici porte sur un très vaste territoire. Nous avons par ailleurs construit un modèle pour chaque région de ce territoire (Ardennes, Lorraine, Vosges, Jura et Alpes). La comparaison de ces modèles révèle que les paramètres écologiques importants pour la productivité de l'Épicéa sont les mêmes dans les différentes régions et que la précision des modèles régionaux est équivalente à celle du modèle construit pour l'ensemble de la zone d'étude (gain entre 5 et 30 cm selon la région). Le choix d'une taille importante de la zone d'étude s'avère donc pertinent.

La démarche méthodologique testée (choix d'une zone d'étude vaste, utilisation des placettes IFN et combinaison de plusieurs sources de données) a montré son intérêt dans le cas de l'Épicéa : elle a permis de construire, à partir de données existantes, un modèle de prédiction de l'indice de fertilité satisfaisant et valide sur un vaste territoire. Cette démarche peut être

appliquée à l'étude d'autres essences sociales et dans d'autres régions. Elle pourrait permettre, à terme, de disposer des informations sur les potentialités forestières des principales essences forestières françaises sur l'ensemble de leur aire de répartition.

Ingrid SEYNAVE – Jean-Claude GÉGOUT – Jean-François DHÔTE
 Laboratoire d'Étude des Ressources Forêts-Bois
 UMR INRA/ENGREF
 ÉCOLE NATIONALE DU GÉNIE RURAL, DES EAUX ET DES FORÊTS
 14, rue Girardet – CS 4216
 F-54042 NANCY CÉDEX
 (seynave@engref.fr) (gegout@engref.fr) (dhote@nancy-engref.inra.fr)

Jean-Christophe HERVÉ
 Laboratoire d'Étude des Ressources Forêts-Bois
 UMR INRA/ENGREF
 actuellement
 INVENTAIRE FORESTIER NATIONAL
 Échelon de Nancy
 14, rue Girardet – CS 4216
 F-54042 NANCY CÉDEX
 (jcherve@nancy.ifn.fr)

Jacques DRAPIER
 INVENTAIRE FORESTIER NATIONAL
 Échelon de Nancy
 14, rue Girardet – CS 4216
 F-54042 NANCY CÉDEX
 (jdrapier@nancy.ifn.fr)

Éric BRUNO
 INVENTAIRE FORESTIER NATIONAL
 Échelon de Montpellier
 Place des Arcades, BP 1001
 Maurin
 F-34971 LATTES CÉDEX
 (ebruno@montpellier.ifn.fr)

Gérard DUMÉ
 INVENTAIRE FORESTIER NATIONAL
 Château des Barres
 F-45290 NOGENT-SUR-VERNISSON
 (gdume@ifn.fr)

Remerciements

Ce travail a été réalisé dans le cadre d'un projet de recherche/développement commun à l'INRA, l'IFN et l'ENGREF, afin de tester la faisabilité d'une étude des potentialités forestières faite sur un vaste territoire et à partir des données de l'IFN.

Nous tenons à remercier Christian Piedallu qui a réalisé tous les traitements SIG nécessaires à ce travail.

BIBLIOGRAPHIE

- AUGUSTO (L.), DUPOUEY (J.-L.), RANGER (J.). — Effects of tree species on understorey vegetation and environmental conditions in temperate forests. — *Annals of Forest Sciences*, vol. 60, 2003, pp. 823-831.
- BARY-LENGER (A.), BOINON (M.), GUNS (A.). — Comment prédire la productivité de l'Épicéa commun (*Picea abies* Karst.) dans les forêts ardennaises. — *Silva Belgica*, vol. 102, n° 6, 1995, pp. 9-16.
- BECKER (M.), LE GOFF (N.). — Diagnostic stationnel et potentiel de production. — *Revue forestière française*, vol. XL, n° spécial "Diagnostics en forêt", 1988, pp. 29-43.
- BÉNICHOU (P.), LE BRETON (O.). — Prise en compte de la topographie pour la cartographie des champs pluviométriques statistiques. — *La Météorologie*, 7^e série, n° 19, 1987, pp. 23-34.
- BOISSEAU (B.). — Bilan de la typologie des stations forestières – Rapport de la convention DERF n° 01.30.03/98. — CEMAGREF, 1999. — 35 p.
- BOISSEAU (B.). — Écologie du Pin pignon et du Pin brutia : détermination d'un indice de fertilité fonction du milieu. — *Revue forestière française*, vol. XLVIII, n° 4, 1996, pp. 321-335.
- CURT (T.), DOLE (S.), MARMEYS (G.). — Alimentation en eau et production forestière. Application d'indicateurs simples pour les résineux dans le Massif central. — *Étude et Gestion des Sols*, vol. 3, n° 2, 1996, pp. 81-96.

- DRAPIER (J.). — Étude de la potentialité forestière des stations par l'Inventaire forestier national. Les plateaux calcaires de Haute-Marne. — *Revue forestière française*, vol. XXXIX, n° 5, 1987, pp. 425-435.
- GÉGOUT (J.-C.). — Création d'une base de données phytoécologiques pour déterminer l'autécologie des espèces de la flore forestière de France. — *Revue forestière française*, vol. LIII, n° 3-4, 2001, pp. 397-403.
- GÉGOUT (J.-C.), COUDUN (C.), BRISSE (H.), BERGÈS (L.). — Comportement écologique des espèces forestières vis-à-vis du climat et du sol en France. Application à l'évaluation des charges critiques d'acidité et d'azote. — Convention de recherche ADEME/ENGREF n° 9962003, rapport final, 2002. — 51 p.
- GILBERT (J.-M.). — Relier milieu et production des essences forestières : comparaison de deux approches. — *Ingénieries - EAT*, n° 8, 1996, pp. 31-39.
- HILL (M.O.), CAREY (P.D.). — Prediction of yield in the Rothamsted Park Grass Experiment by Ellenberg indicator values. — *Journal of Vegetation Science*, vol. 8, 1997, pp. 579-586.
- KELLER (W.). — Einfacher Ertragskundlicher Bonitätsschlüssel für Waldbestände in der Schweiz. — *Mitteilungen Eidgenössische Anstalt für das Forstliche Versuchswesen*, vol. 54, 1978, pp. 1-98.
- LUCOT (E.), GAIFFE (M.). — Méthode pratique de description des sols forestiers caillouteux sur substrat calcaire. — *Étude et Gestion des Sols*, vol. 2, n° 2, 1995, pp. 91-104.
- OSWALD (H.). — Conditions forestières et potentialité de l'Épicéa en Haute Ardèche. — *Annales des Sciences forestières*, vol. 26, n° 2, 1969, pp. 183-224.
- SCHAFFERS (A.P.), SYKORA (K.V.). — Reliability of Ellenberg indicator values for moisture, nitrogen and soil reaction : a comparison with field measurements. — *Journal of Vegetation Science*, vol. 11, 2000, pp. 225-244.

ÉTUDE DES POTENTIALITÉS FORESTIÈRES POUR L'ÉPICÉA COMMUN DANS L'EST DE LA FRANCE À PARTIR DES DONNÉES DE L'IFN (Résumé)

Une étude a été menée sur la production de l'Épicéa commun à l'échelle de l'Est de la France afin de tester la possibilité d'utiliser les données de l'Inventaire forestier national pour la construction d'indices de fertilité en fonction de différents paramètres du milieu. La méthodologie mise en place utilise la combinaison de plusieurs sources de données : les données dendrométriques et écologiques de l'IFN (2 087 placettes IFN ont été utilisées), les données climatiques estimées par la méthode AURELHY de Météo France, un modèle numérique de terrain et des valeurs indicatrices des espèces issues de la base de données phytoécologiques EcoPlant de l'ENGREF. Le modèle de prédiction de l'indice de fertilité comprend l'altitude, trois variables liées à la disponibilité en eau du sol et deux variables trophiques bioindiquées par la végétation. L'altitude est la principale variable qui agit sur l'indice de fertilité de l'Épicéa : assez stable pour les faibles altitudes, la hauteur dominante de l'Épicéa diminue d'autant plus fortement que l'altitude s'accroît. L'effet positif de la profondeur du sol et du bilan entre apport et départ d'eau lié à la position topographique des placettes confirme les résultats déjà observés précédemment. Nous avons mis en évidence un effet négatif sur la croissance en hauteur de l'Épicéa des affleurements rocheux calcaires et surtout des situations mal connues à fort pH et C/N élevé. Finalement, les données de l'IFN, complétées par des informations climatiques et trophiques, constituent un outil performant pour expliquer la production de l'Épicéa.

FORESTRY POTENTIAL OF NORWAY SPRUCE IN EASTERN FRANCE – AN INVESTIGATION BASED ON NFI DATA (Abstract)

Norway spruce growth was investigated on the scale of eastern France to examine the feasibility of using the National Forest Inventory (NFI) data for establishing fertility indices as a function of various environmental parameters. The methodology used calls on a combination of several different data sources : the NFI dendrometric and ecological data (2087 NFI plots were studied), climate data collected with the Météo France AURELHY method, a digital model for the field and indicator values for species derived from ENGREF's EcoPlant base of phytoecological data. The predictive model for the fertility index considers elevation, 3 variables connected with soil water availability and 2 trophic variables that are bioindicated by vegetation. Elevation is the most powerful variable as regards the fertility index of spruce – at low elevations, dominant height of spruce is fairly stable and tends to drop as elevation increases. The positive effect of soil and the balance between incoming and outgoing water deriving from the topographic position of the plot confirm previously recorded results. We ascertained that limestone outcrop negatively affects height growth of spruce. This is even more marked in the case of poorly investigated sites where the pH and C/N ratio are high. Finally, the NFI data, supplemented with climate and trophic information, provide an effective tool for explaining spruce growth.