

CONSTRUCTION DE MODÈLES DE CROISSANCE POUR LES PEUPEMENTS RÉGULIERS À PARTIR DES DONNÉES DENDROMÉTRIQUES DE L'IFN

PHILIPPE DREYFUS - NABILA HAMZA - GÉRÔME PIGNARD

La mise au point d'outils d'aide à la décision pour la gestion des peuplements homogènes (monospécifiques, équiennes, issus de plantations ou de régénération naturelle assistée ou spontanée) se heurte pour certaines essences ou certains couples [essence, région] au manque de données permettant la mise au point de modèles de croissance.

Coûteux (mise en place, suivi, entretien), les nouveaux réseaux expérimentaux se limitent à quelques situations. De plus, l'information n'est obtenue qu'à moyen ou long terme.

Parallèlement, l'Inventaire forestier national dispose d'une base de données standardisées, régulièrement mise à jour et couvrant l'ensemble du territoire forestier et des essences, en France métropolitaine. La vocation première de ces données n'est pas la mise au point de modèles de croissance, mais ces données présentent certaines caractéristiques proches de celles issues de réseaux expérimentaux sylvicoles : mesures individuelles sur tous les arbres vivants recensés (c'est-à-dire de diamètre supérieur à 7,5 cm) en diamètre, hauteur, accroissement sur 5 ans, radial (sondage) et en hauteur, épaisseur d'écorce, âge mesuré par sondage de quelques arbres, arbres morts (dits "perdus" ou "chablis"). Elles en diffèrent principalement par la taille des placettes (7 ares au plus, cf. IFN, 1985).

Plusieurs études ont porté sur l'utilisation des données de l'IFN pour la construction de modèles de croissance de type "peuplement" (Ottorini *et al.*, 1981 ; Ottorini, 1981 ; Lorieux, 1990 ; Salas-González *et al.*, 1993).

Nous présentons ici une procédure mise au point pour la calibration de modèles de croissance de type "arbre - sans spatialisation" à partir des données individuelles de l'IFN ; les modèles "arbre" permettent une plus grande souplesse pour la simulation des effets des éclaircies et manipulent (en entrée et en sortie) une information plus riche avec la distribution des arbres par classe de diamètre (ou circonférence).

ESSENCES ÉTUDIÉES - DONNÉES UTILISÉES

Les essences choisies sont le Pin d'Alep (> 200 000 ha en région méditerranéenne française, sans modèle "arbre", ni réseau d'expérimentation sylvicole), le Pin noir (dans le Sud de la France, à l'est et à l'ouest du Rhône, soit plus de 90 000 ha), le Chêne pubescent (en taillis, plus de 320 000 ha en régions Provence-Alpes-Côte-d'Azur et Languedoc-Roussillon).

Placettes IFN

Les placettes ont été sélectionnées sur les critères suivants : peuplement régulier (futaie pour les Pins, taillis pour le Chêne), pur équienne (selon les critères de l'IFN) ; pas de coupe de moins de 5 ans ; âge ≥ 10 ans ; couvert absolu ≥ 10 % (et si âge ≥ 40 ans, couvert ≥ 50 %) ; au moins 5 arbres recensables pour l'essence considérée ; tous les cycles d'inventaire.

Elles sont au nombre de 558 pour le Pin d'Alep, 891 pour le Pin noir, 1 752 pour le Chêne pubescent.

Données dendrométriques de l'IFN

Informations relatives aux placettes : département, date d'inventaire, taillis ou futaie (pour le Chêne pubescent, les placettes classées en futaie, trop peu nombreuses, n'ont pas été retenues), information sur l'"évolution" et la "régénération sur le point (naturelle ou artificielle)" qui permet de savoir si un peuplement est issu de plantation ou de régénération naturelle.

Données concernant les arbres de chaque placette :

- pour chaque arbre vivant recensable : essence, hauteur totale (Ht), diamètre sur écorce à 1,30 m du sol ($D_{1,3}$), épaisseur d'écorce à 1,30 m du sol, accroissement radial sur 5 ans (I_{r5}) ;
- âge (quelques arbres sondés sur chaque placette) ;
- arbres perdus ou chablis depuis moins de 5 ans : circonférence sur écorce à la souche (Co) ;
- code dit de "dominance" qui permet, par exemple, de différencier d'éventuels arbres de franc pied dans un taillis.

CONSTRUCTION D'UN MODÈLE DE CROISSANCE "ARBRE - SANS SPATIALISATION" À PARTIR DES DONNÉES IFN

Pré-traitement des données

À partir des données individuelles de l'IFN, il s'agit de calculer les caractéristiques de chaque placette, de s'assurer de leur cohérence, de calculer et de tester certaines variables au niveau "arbre".

– Âge : on élimine la placette si l'écart entre l'âge minimum et l'âge maximum dépasse 20 % ; il s'agit d'une restriction supplémentaire par rapport au critère de l'IFN (pour une essence de lumière, le peuplement est considéré comme équienne si l'écart entre les âges mesurés est inférieur à 15 ans). On utilise ensuite l'âge maximum (supposé le plus proche de l'âge dominant).

– Écorce : une relation linéaire unique (établie sur l'ensemble des arbres, toutes placettes confondues) permet d'estimer le diamètre sous écorce, obtenu en retirant deux fois la mesure d'épaisseur de l'écorce au diamètre mesuré sur écorce, en fonction de ce dernier.

– Pour les arbres morts, on estime leur diamètre sur et sous écorce à 1,30 m, ainsi que leur diamètre sous écorce à $t - 5$ (c'est-à-dire 5 ans avant la mesure, au début de la période d'accroissement considérée) en fonction de la circonférence de leur souche, à partir d'une régression entre ces grandeurs établie pour les arbres vivants (pour chaque placette) ; on fait donc l'hypothèse que ces relations n'évoluent pas de manière significative dans la période de 5 ans.

– Pour $t - 5$ (5 ans avant la mesure), sont calculés : le nombre de tiges et, en valeurs sous écorce, le diamètre dominant, le diamètre moyen, la surface terrière. Ces calculs prennent en compte les arbres morts au cours de la période, et qui étaient donc vivants à $t - 5$ (d'où un

léger biais du fait que certains de ces arbres ont poussé sur une partie de la période considérée). Il est tenu compte des pondérations liées aux rayons de 6 m (arbres de diamètre < 22,5 cm), 9 m (22,5 cm < diamètre < 37,5 cm) et 15 m (37,5 cm < diamètre) des 3 placettes concentriques ; à noter que les arbres morts sont pris sur la grande placette quelle que soit leur taille (souche).

— Pour t (âge de la mesure), sont calculés (cette fois sans les arbres morts) : le nombre de tiges et, à la fois sous et sur écorce, le diamètre dominant, le diamètre moyen, la surface terrière.

— On applique les corrections proposées par Salas-González *et al.* (1993) : sur le diamètre dominant pour tenir compte de la petite taille des placettes (par rapport à des parcelles en gestion), sur le nombre de tiges et la surface terrière pour tenir compte du seuil de recensabilité. À noter que ces corrections ont été établies pour des peuplements de Pin maritime, situation sensiblement différente (essence, structure des peuplements) de celles qui nous intéressent ici.

— La hauteur dominante de la placette est estimée à partir du diamètre dominant sur écorce (corrigé) par régression sur les couples [hauteur, diamètre] de l'inventaire non pondéré (pour ne pas donner un poids trop grand aux petits arbres) ; le modèle utilisé a deux paramètres : hauteur (en mètres) = $1,30 + p_1 \times [1 - \exp(-p_2 \times \text{diamètre})]$.

On élimine, avant l'analyse proprement dite, les arbres dont l'accroissement sur le rayon à hauteur de poitrine et sur 5 ans (lr_5) est jugé aberrant : ceux dont lr_5 s'écarte de plus de deux écarts-types d'une régression linéaire entre lr_5 et le diamètre mesuré.

De même, quelques placettes dont l'une ou l'autre des grandeurs dendrométriques paraît aberrante (en particulier, après les corrections de biais) sont rejetées.

La structure générale (5 relations) des modèles mis au point pour ces trois essences à partir des données IFN est la suivante :

	Variable expliquée	Variables explicatives
(1)	Hauteur dominante du peuplement	Âge, indice de fertilité stationnelle
(2)	Accroissement individuel en diamètre	$D_{1,3}/D_{dom}$, G/ha
(3)	Probabilité de mortalité	$D_{1,3}/D_{dom}$, G/ha
(4)	Hauteur individuelle	$D_{1,3}$, G/ha, H_{dom} , D_{dom}
(5)	Volume individuel	$D_{1,3}$, Ht

Avec: $D_{1,3}$: diamètre individuel (à 1,30 m, sous écorce) au début de la période d'accroissement ;
 D_{dom} : diamètre dominant du peuplement (à 1,30 m, sous écorce) au début de la période d'accroissement ;
 H_{dom} : hauteur dominante du peuplement au début de la période d'accroissement ;
Ht : hauteur individuelle ;
G/ha : surface terrière du peuplement (à 1,30 m, sous écorce) au début de la période d'accroissement.

$D_{1,3}/D_{dom}$ est une expression (il en existe d'autres) du statut concurrentiel de l'arbre au sein du peuplement ; G/ha est une expression (parmi d'autres) du niveau global de concurrence dans le peuplement.

Les relations (2), (3) et (4) ont été établies à partir des données de l'IFN.

La relation (5) (tarif de cubage) peut être trouvée dans les résultats départementaux de l'IFN ou à d'autres sources.

Pour la relation (1) [hauteur dominante - âge - fertilité stationnelle], nous avons utilisé des relations établies par analyse de tiges (Couhert et Duplat, 1993, pour le Pin d'Alep ; Toth et Turrel, 1983, pour le Pin noir ; Duché, 1983, pour le Chêne pubescent) plutôt que d'établir une relation à partir des accroissements en hauteur (L5) de l'IFN : mesurés depuis le sol, y compris en peuplements denses et âgés, ils sont jugés insuffisamment fiables pour cette utilisation, particulièrement pour un résineux polycyclique (Pin d'Alep), un feuillu comme le Chêne pubescent, et même pour le Pin noir, monocyclique (d'Épenoux, 1992). Dans le cas où une telle relation n'existe pas pour l'essence ou la région considérée, des méthodes utilisant conjointement les données écologiques de l'IFN et les mesures de hauteur et âge sont envisageables.

Relation d'accroissement individuel en diamètre

La relation établie décrit un accroissement sous écorce. Pour l'utilisation opérationnelle du modèle dans un contexte de gestion forestière, on utilise la relation entre diamètres sur et sous écorce (à 1,30 m du sol).

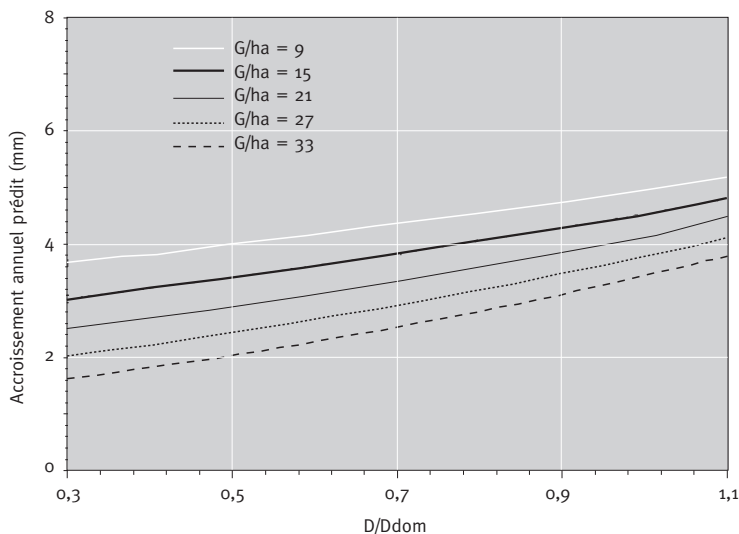
L'analyse statistique des données montre que cet accroissement dépend (figure 1, ci-dessous) :

- d'un potentiel de croissance, lui-même fonction de la fertilité stationnelle et de l'âge du peuplement, exprimé par l'accroissement en hauteur dominante du peuplement au cours de la période d'accroissement considérée ; à noter que cet accroissement n'est pas mesuré (L5 non utilisée) mais estimé à partir de l'âge, de la durée de l'accroissement (5 ans) et de l'indice de fertilité stationnelle (obtenu à partir du couple [hauteur dominante - âge] au moment de l'inventaire et de la relation [hauteur dominante - âge - fertilité stationnelle]) ;
- de la densité du peuplement exprimée par la surface terrière G/ha (sous écorce) en début d'accroissement ;
- du statut de l'arbre exprimé par le rapport $D_{1,3}/D_{dom}$ en début d'accroissement.

FIGURE 1

ACCROISSEMENT INDIVIDUEL EN DIAMÈTRE, MODÉLISÉ À PARTIR DES DONNÉES DE L'IFN, POUR LE PIN D'ALEP

Valeurs simulées par un accroissement annuel en hauteur dominante fixé à 0,25 m (diamètres et surface terrière sous écorce)



Relation de mortalité

On considère la mortalité “régulière” (par concurrence, chablis ou problème sanitaire isolé). L’élimination des situations de mortalité massive est faite soit indirectement par les critères de sélection des placettes, soit par la détection dans le jeu de données de valeurs s’écartant fortement du niveau moyen de mortalité régulière. Les probabilités observées sont calculées, par catégorie de diamètre, comme le rapport du nombre d’arbres morts dans les 5 ans au nombre d’arbres vivants à $t - 5$.

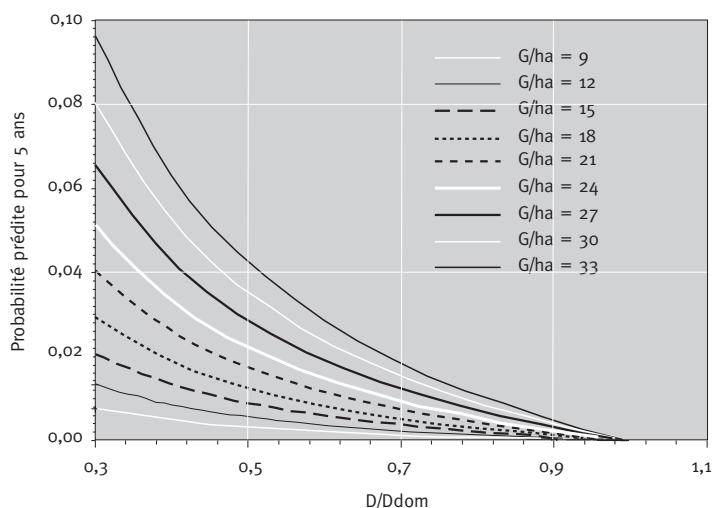
La probabilité de mort d’un arbre au cours de la période est exprimée en fonction (figure 2) :

- de la densité du peuplement exprimée par la surface terrière en début d’accroissement (sous écorce), qui quantifie une pression globale de compétition dans le peuplement ;
- du statut de l’arbre exprimé par le rapport $D_{1,3}/D_{dom}$ en début d’accroissement.

Le modèle décrit une probabilité de mort d’un arbre d’autant plus forte que son statut est plus défavorable. À statut égal, cette probabilité est d’autant plus forte que la pression globale de compétition (exprimée par la surface terrière du peuplement) est plus intense.

FIGURE 2

**PROBABILITÉ DE MORTALITÉ SUR 5 ANS,
MODÉLISÉE À PARTIR DES DONNÉES DE L’IFN, POUR LE PIN D’ALEP**
(diamètres et surface terrière sous écorce)



Relation hauteur-diamètre

Puisque que l’on a choisi de ne pas utiliser les accroissements en hauteur, il n’est pas possible d’établir directement une relation d’accroissement en hauteur. En pareille situation (classique même dans les réseaux expérimentaux, en particulier pour des feuillus), il reste la possibilité d’établir une relation statique entre hauteur et diamètre (ou circonférence) valable pour toutes les classes du peuplement. Ceci est facilité par le fait que l’IFN mesure la hauteur (et le diamètre) de tous les arbres recensables sur une placette.

Comme pour les autres relations du modèle de croissance, diverses formes de relation peuvent être choisies en fonction de leurs propriétés (passage par le point [hauteur dominante, diamètre

dominant], cf. par exemple Omule *et al.*, 1991 ; forte cohérence de l'évolution en fonction de l'âge, cf. par exemple Dhôte *et al.*, 1994 ; prise en compte d'un effet de la densité du peuplement, etc.) ou de l'essence considérée.

DISCUSSION – CONCLUSION

Pour toute espèce suffisamment représentée en peuplements réguliers purs équiennes (au sens des critères de l'IFN), la méthode mise au point permet d'aboutir à un modèle de croissance de type "arbre - sans spatialisations", dans la mesure où une relation entre hauteur dominante, âge et fertilité stationnelle est disponible par ailleurs (ainsi qu'un tarif de cubage à deux entrées, qui peut être établi par l'IFN).

Faute d'un jeu de données indépendant, une évaluation précise des modèles ainsi mis au point n'est pas possible ; les simulations réalisées [modèle calibré pour le Pin d'Alep, intégré au logiciel CAPSIS[®] (Dreyfus et Bonnet, 1995)] démontrent un comportement qualitatif et des ordres de grandeur raisonnables et cohérents (à noter par ailleurs que Chevrou, 1992, propose une méthode qui pourrait servir pour une validation globale).

Les données de l'IFN permettent aussi d'établir des modèles de type "peuplement" avec dissociation au niveau "arbre" : dans ce cas, en ce qui concerne la croissance radiale, on établit une relation décrivant l'évolution de la surface terrière de l'ensemble du peuplement (par exemple, en fonction de la surface terrière et de la hauteur dominante en début de période d'accroissement, et de l'accroissement en hauteur dominante) puis on répartit l'accroissement sur la distribution des diamètres à partir d'une relation prenant en compte le statut de chaque arbre (défini par son diamètre). Pour la mortalité, on modélise l'effectif total des arbres morts dans une période donnée (ici 5 ans), puis cet effectif total prédit est réparti sur les classes selon diverses procédures, avec une priorité plus ou moins stricte sur les petits diamètres.

En plus de l'intérêt de ces méthodes pour la constitution d'outils d'aide à la gestion forestière, le fait d'utiliser des données très standardisées facilite des comparaisons :

- entre espèces : caractéristiques spécifiques de croissance (soit paramètres des relations, soit croissances simulées) et de sensibilité à la compétition, selon la fertilité stationnelle ;

- entre régions : nous avons testé l'aptitude des données de l'IFN à rendre compte de différences régionales ; certaines relations (dont la relation de croissance en diamètre) peuvent être plus sensibles que d'autres aux variations régionales ; les différences restent à interpréter ; dans le cas étudié [Pin noir d'Autriche, principalement côté Est du Rhône (Alpes du Sud, Drôme...) et côté Ouest (essentiellement pour la Lozère)], on se heurte cependant au manque de relation [hauteur dominante - âge - fertilité stationnelle] pour l'un des domaines géographiques pris en compte.

Plusieurs questions importantes (dont certaines déjà abordées dans des travaux antérieurs, cf. Salas-González *et al.*, 1993 ; Houllier, 1986) restent à étudier ; citons en particulier :

- la quantification des biais éventuels sur certaines mesures (âge, I_{r5}) ;
- l'incidence de la taille des placettes pour une utilisation à l'échelle de parcelles forestières en gestion ;
- l'amélioration des méthodes de correction des biais liés au seuil de recensabilité ou à la petite taille des placettes ; application au cas des plantations et au cas des régénérations naturelles ; différences selon les essences ou structures de peuplement ;

— l'établissement d'une jonction avec des modèles portant sur les stades "jeunes", c'est-à-dire les peuplements où les arbres sont pour la plupart sous le seuil de recensabilité de l'IFN.

À noter que certaines de ces questions se posent surtout pour une utilisation en gestion forestière mais pas pour une utilisation éventuelle par l'IFN pour ses besoins propres (actualisation inter-cycles).

Malgré le caractère assez générique de la méthode présentée ici, son application ne peut être entièrement automatisée car la forme de chacune des relations peut nécessiter quelques adaptations à l'essence (allure de la réponse à des niveaux variés de compétition) même si la structure générale du modèle et les variables et facteurs pris en compte sont conservés.

D'autre part, la sélection des placettes et des arbres nécessite une très bonne connaissance des méthodes de l'Inventaire, de la signification des codifications, et des évolutions — même mineures — des protocoles (mesure ou codification) d'un cycle ou d'un département à l'autre.

Si sa mise en œuvre devait être étendue (à d'autres essences méditerranéennes ou à d'autres contextes) ou si elle devait être améliorée, il importerait donc que l'IFN puisse y être impliqué.

Philippe DREYFUS
Unité de Recherches forestières méditerranéennes
INRA
Avenue A. Vivaldi
F-84000 AVIGNON
(dreyfus@avignon.inra.fr)

Nabila HAMZA – Gérôme PIGNARD
Cellule Évaluation de la Ressource
INVENTAIRE FORESTIER NATIONAL
Place des Arcades
BP 1001 MAURIN
F-34971 LATTES CEDEX
(nhamza@ifn.fr)
(gpignard@ifn.fr)

Cette étude a été financée en partie par le ministère de l'Agriculture et de la Pêche dans le cadre des conventions DERF/INRA n° 01.40.07/97 et n° 01.40.27/98 "Modélisation : croissance, branchaison, qualité des bois et intégration logicielle".

BIBLIOGRAPHIE

- CHEVROU (R.B.). — Utilisation de la loi tronquée : calcul de l'évolution globale des peuplements forestiers. — *Revue forestière française*, vol. XLIV, n° 2, 1992, pp. 155-170.
- COUHERT (B.), DUPLAT (P.). — Le Pin d'Alep dans la région Provence-Alpes-Côte-d'Azur. Propositions pour une sylviculture et un modèle de production. — *Bulletin technique de l'Office national des Forêts*, n° 25, 1993, pp. 3-22.
- DHÔTE (J.-F.), DE HERCÉ (É.). — Un modèle hyperbolique pour l'ajustement de faisceaux de courbes hauteur-diamètre. — *Canadian Journal of Forest Research*, vol. 24, 1994, pp. 1782-1790.
- DREYFUS (Ph.), BONNET (F.-R.). — CAPSIS, logiciel de simulation de conduites sylvicoles. — *Revue forestière française*, vol. XLVII, n° spécial "Modélisation de la croissance des arbres forestiers et de la qualité des bois", 1995, pp. 111-115.
- DUCHÉ (Y.). — Établissement de classes de croissance des peuplements de Chêne pubescent en Provence. Analyse de leurs facteurs explicatifs. — Aix-en-Provence : Cemagref, 1983. — 106 p. + annexes (73 p.) (Mémoire de 3^e année ENITEF).

- d'ÉPENOUX (F.). — Relations milieu-production, application au Pin noir d'Autriche dans les Alpes externes méridionales. — Université J. Fourier - Grenoble I ; Aix-en-Provence : Cemagref, 1992 (Thèse de Doctorat).
- HOULLIER (F.). — Échantillonnage et modélisation de la dynamique des peuplements forestiers - Application au cas de l'Inventaire forestier national. — Université Claude Bernard, Lyon I – Laboratoire de Biométrie, 1986. — 267 p. + annexes (Thèse de Doctorat).
- INVENTAIRE FORESTIER NATIONAL (IFN). — But et méthodes de l'IFN. — Paris : Ministère de l'Agriculture – Inventaire forestier national, 1985. — 65 p.
- LORIEUX (M.). — Essai de modélisation de la croissance de l'Épicéa commun du Nord-Est de la France à partir des données de l'Inventaire forestier national. — Université Claude Bernard, Lyon I – Laboratoire de Biométrie, 1990. — 39 p. (DEA).
- OMULE (S.A.Y.), MacDONALD (R.N.). — Simultaneous curve fitting for repeated height-diameter measurements. — *Canadian Journal of Forest Research*, vol. 21, 1991, pp. 1418-1422.
- OTTORINI (J.-M.), NYS (C.). — Application des données de l'Inventaire forestier national à l'étude de la production du Pin sylvestre en Margeride. A. Étude de la croissance en hauteur. — *Annales des Sciences forestières*, vol. 38, 1981, pp. 223-236.
- OTTORINI (J.-M.). — Application des données de l'Inventaire forestier national à l'étude de la production du Pin sylvestre en Margeride. B. Étude de la production totale en volume. — *Annales des Sciences forestières*, vol. 38, 1981, pp. 487-502.
- SALAS-GONZÁLEZ (R.), HOULLIER (F.), LEMOINE (B.), PIERRAT (J.-C.). — Représentativité locale des placettes d'inventaire en vue de l'estimation de variables dendrométriques de peuplement. — *Annales des Sciences forestières*, vol. 50, 1993, pp. 469-485.
- TOTH (J.), TURREL (M.). — La Productivité du Pin noir d'Autriche dans le Sud-Est de la France. — *Revue forestière française*, vol. XXXV, n° 2, 1983, pp. 111-121.