



HAL
open science

Productivité du frêne (*Fraxinus excelsior* L.) en région Nord-Picardie B. - Etude des relations entre la productivité et les conditions de milieu N. LE GOFF et G. LEVY

N. Le Goff, G. Levy, Y. Lefevre, L. Garros, R. Canta

► **To cite this version:**

N. Le Goff, G. Levy, Y. Lefevre, L. Garros, R. Canta. Productivité du frêne (*Fraxinus excelsior* L.) en région Nord-Picardie B. - Etude des relations entre la productivité et les conditions de milieu N. LE GOFF et G. LEVY . *Annales des sciences forestières*, 1984, 41 (2), pp.135-170. <hal-00882321>

HAL Id: hal-00882321

<https://hal.science/hal-00882321v1>

Submitted on 11 May 2020

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.



HAL Authorization

Productivité du frêne (*Fraxinus excelsior* L.) en région Nord-Picardie

B. - Etude des relations entre la productivité et les conditions de milieu

N. LE GOFF et G. LEVY *

avec la collaboration technique de Y. LEFEVRE *, L. GARROS, R. CANTA

I.N.R.A., Station de Sylviculture et de Production

** Station de Recherches sur les Sols forestiers et la Fertilisation
Centre de Recherches forestières de Nancy
Champenoux, F 54280 Seichamps*

Résumé

La mesure des caractéristiques dendrométriques, édaphiques et topographiques a été réalisée dans 50 placettes couvrant la variabilité de la région d'étude. Ce travail, contrairement aux études station-production effectuées précédemment a, en outre, nécessité la prise en compte :

- des conditions climatiques, en raison de l'étendue de la zone considérée,
- des conditions de concurrence pour les arbres qui, lorsqu'elles deviennent trop faibles (comme c'est le cas pour un certain nombre de placettes retenues), réduisent le développement en hauteur du frêne.

Pour chaque placette, l'indice de croissance retenu est la hauteur moyenne à 40 ans (H40) de 5 frênes dominants.

Un traitement particulier des données a permis d'« expliquer » plus de 80 p. 100 de la variation totale de H40 dans l'ensemble des placettes par une combinaison d'indices :

- indice d'espacement des arbres, reflétant les conditions de concurrence passées,
- 3 indices liés aux conditions d'alimentation en eau : indices climatique, topographique et de profondeur de sol.

Il apparaît ainsi que l'alimentation en eau constitue le facteur prépondérant dont dépend la productivité du frêne dans la région Nord-Picardie. Ce résultat a été confirmé par comparaison des caractéristiques de placettes situées en séquence topographique. Les propriétés chimiques du sol semblent sans importance pour la croissance du frêne, au moins dans la gamme des stations étudiées.

Sur le plan pratique, cette étude a permis de dégager des critères de prévision de la productivité pour le frêne d'une station quelconque de la région Nord-Picardie.

1. Introduction

Cet article présente les résultats d'une étude destinée à déterminer la productivité pour le frêne de stations forestières actuellement occupées par des taillis ou des taillis-sous-futaie pauvres en réserves de la région Nord-Picardie. Les motivations de cette étude ainsi que ses premiers développements ont déjà fait l'objet d'une publication (LE GOFF, 1982).

L'extension du frêne peut être envisagée très favorablement dans le cadre de la mise en valeur des taillis et taillis-sous-futaie de la moitié nord de la France, en raison de la rapidité de croissance et des qualités mécaniques de cette espèce (THILL, 1970 ; GUILLARD, 1974). Il est cependant souhaitable de limiter sa présence à des stations lui convenant bien. C'est pourquoi l'étude des variations de la croissance du frêne en fonction des conditions de milieu a été menée en région Nord-Picardie. Un travail de même nature avait été réalisé précédemment dans le Nord-Est de la France (DEVAUCHELLE & LEVY, 1977).

L'étude des relations entre la productivité du frêne et les conditions de milieu diffère des nombreux travaux réalisés sur des sujets similaires en France au cours des dernières années et qui s'appuient sur une même méthodologie de base (GARBAYE *et al.*, 1970). La méthodologie particulière utilisée dans cette étude a été suscitée par deux catégories de problèmes rencontrés : les conditions de traitement sylvicole variées des peuplements qu'il a été nécessaire de retenir, la variabilité des conditions climatiques de la région d'étude.

La productivité d'une station pour l'espèce étudiée est généralement mesurée par un indice, la hauteur moyenne à un âge donné d'arbres dominants, la croissance en hauteur étant supposée indépendante des traitements sylvicoles (DECOURT, 1973). Des études ont cependant montré que dans le cas de conditions de concurrence faible ou au contraire très forte, on pouvait observer une réduction de la croissance en hauteur des arbres (GAISER *et al.*, 1951 ; ALEXANDER *et al.*, 1967). De tels faits sont à rapprocher des observations réalisées sur les arbres réserves de taillis-sous-futaie pour lesquels un ralentissement de la croissance en hauteur s'observe lors de l'isolement suivant chaque coupe de taillis (BARTET, 1891) : ce phénomène a pu être observé dans le cas du frêne à partir des analyses de tige effectuées (LE GOFF, 1982).

Les frênes des peuplements retenus pour cette étude ont été soumis à des conditions de concurrence très variables : concurrence forte en futaie dense, plus faible en futaie claire, faible ou très faible en taillis-sous-futaie. Nous tenterons donc de rendre compte des effets supposés de la concurrence sur la croissance en hauteur de façon à distinguer les seuls effets dus aux conditions de milieu.

Dans la méthodologie de base des études de productivité, le milieu, limité aux composantes sol et topographie, est caractérisé par un ensemble de variables : facteurs physiques et chimiques du sol, pente, exposition, etc. Ces facteurs sont considérés comme indépendants entre eux lors du traitement statistique et leurs effets sur la croissance comme additifs : les relations ainsi établies ont souvent une bonne valeur de prédiction mais représentent mal la manière dont agissent vraiment les différents facteurs intervenant dans les relations (MILLIER, 1973). Un modèle plus réaliste pour rendre compte de l'action des facteurs du milieu sur la croissance a été proposé et expérimenté (JONES, 1971) : les différents facteurs sont intégrés dans le modèle en tenant compte de la façon dont ils agissent les uns sur les autres dans la nature ; le milieu peut alors être représenté par trois composantes agissant sur la croissance : alimentation en eau, régime thermique, alimentation minérale.

C'est cette dernière démarche qui a inspiré le travail dont il va être rendu compte. Certaines connaissances, mais surtout un matériel d'étude suffisant (placettes de frêne) ont cependant manqué pour pouvoir développer complètement un tel modèle. Par contre, les résultats acquis lors de l'étude faite dans le Nord-Est ont permis d'emblée de privilégier, parmi les facteurs du milieu, ceux liés à l'alimentation en

eau des arbres ; l'influence des facteurs principaux du milieu — sol, topographie, climat — sur la disponibilité en eau a alors été synthétisée à travers autant d'*indices*. Cette démarche a rendu possible la prise en compte des variations climatiques de la région d'étude, mais aussi celle des effets de la concurrence sur la croissance en hauteur du frêne. On aboutit ainsi à un nombre limité de variables explicatives finalement suffisantes pour rendre compte des variations de productivité du frêne.

L'examen des variations de la croissance en hauteur du frêne dans plusieurs ensembles de stations situées en séquence topographique à l'intérieur d'un même peuplement a permis par ailleurs de juger de l'influence respective des facteurs du sol et de la topographie sur la productivité des stations pour le frêne.

2. Matériel et méthodes de l'étude

2.1. Région d'étude

L'étude a été réalisée dans les *départements* suivants : Aisne, Nord, Pas-de-Calais, Somme et Oise.

Le *climat* moyen est de type océanique modéré. Les variations des conditions climatiques dans l'espace ne sont cependant pas négligeables. On peut noter les influences de la longitude (et en particulier de la distance à la mer), du relief, de la proximité éventuelle du Centre du Bassin Parisien. C'est ainsi que ROISIN (1967) distingue dans cette région 6 zones climatiques (fig. 1). Les placettes-échantillon de l'étude sont localisées dans 5 de ces zones : la zone à climat hyperocéanique, variante de l'Ouest, et qui correspond au Boulonnais, n'a pas été prise en compte dans ce travail. Les conditions climatiques particulières à chacune de ces 5 zones, seront analysées plus précisément pour la période de végétation (cf. 2.24. et tabl. 2).

La variabilité *géologique* est grande ; le substrat peut être d'âge primaire, secondaire ou tertiaire avec une dominante pour le Crétacé (craie sénonienne). Ce substrat est cependant, dans la majorité des cas, recouvert de limons quaternaires dont l'épaisseur est très variable.

Malgré le caractère général « plat » de cette région, la variabilité *topographique* est également importante, avec des pentes qui peuvent être localement très prononcées (cf. tabl. 3).

La gamme des *sols* rencontrés dans les placettes de l'étude est moyennement étendue. Le type pédologique dépend de la nature du substrat et du relief local :

— lorsque le calcaire affleure (craie ou calcaire grossier) : rendzines et rendzines brunifiées ; ces sols se rencontrent généralement en station de pente ;

— sur limons, selon les propriétés chimiques et l'épaisseur de ce matériau, la nature du substrat sous-jacent et la topographie (phénomènes d'érosion ou au contraire de colluvionnement) : sols bruns calcaires, calciques, eutrophes, mésotrophes ; sols bruns lessivés et sols lessivés, généralement marmorisés ou même à pseudogley ;

— sols hydromorphes : gleys et sols alluviaux à gley ; pseudogleys.

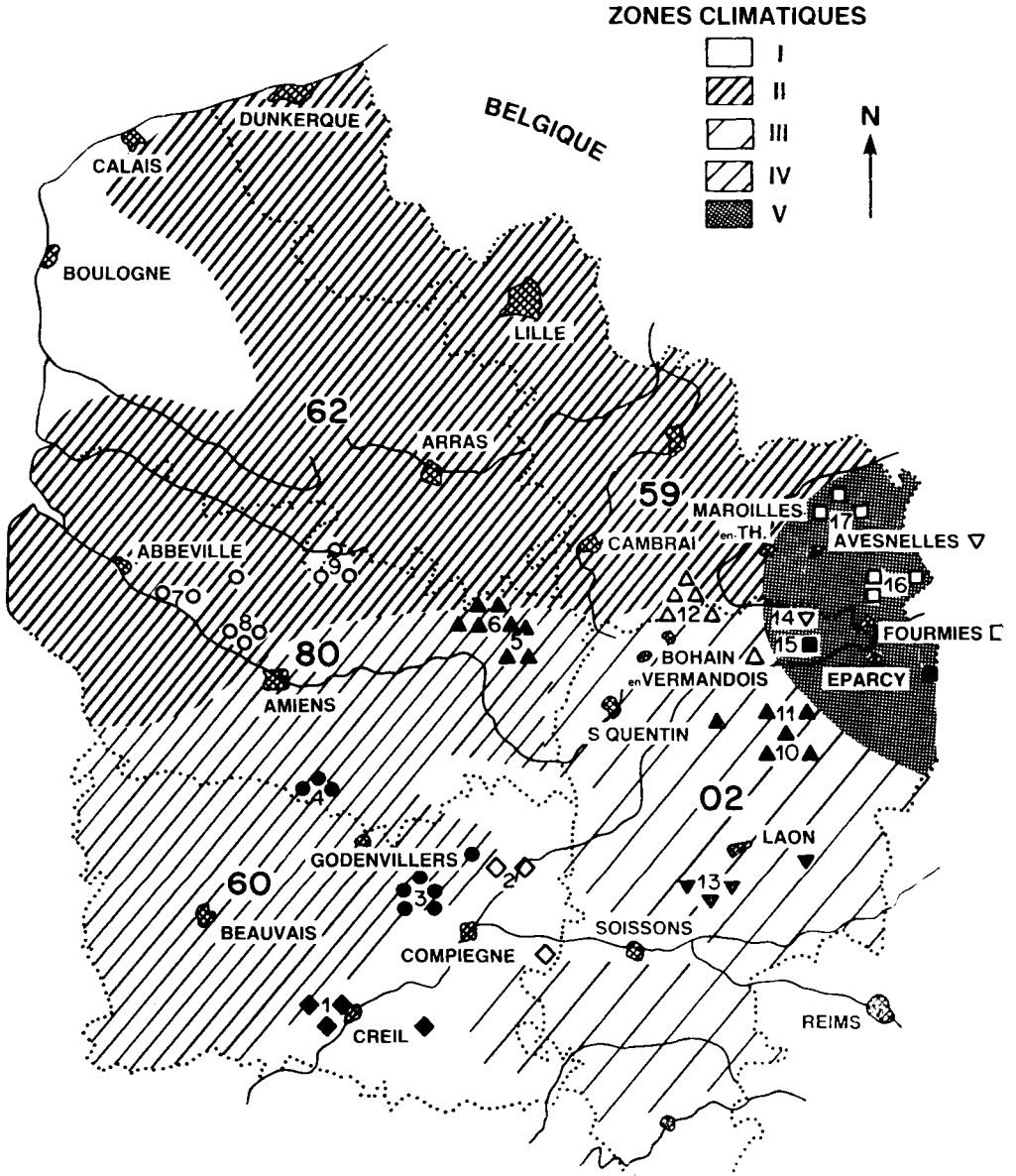


FIG. 1

Carte des zones climatiques identifiées par ROISIN (1967) en région Nord-Picardie.

Climatic areas in Nord-Picardie region as identified by ROISIN (1967).

Situation géographique des 50 placettes de frêne dans les 5 zones climatiques retenues et postes météorologiques associés aux différents massifs forestiers (un même symbole distingue les placettes des massifs rattachés à un même poste).

(Climat parisien : zone I ; climat océanique modéré, à tendance parisienne : zone II, typique : zone III, à tendance continentale : zone IV ; climat hyperocéanique, variante submontagnarde : zone V).

Location of the 50 ash plots of the study through the 5 climatic areas considered ; different forest stands, numbered 1 to 17 (see Annex 2), have been associated with a particular weather station : plots are identified by the same symbol as the weather station associated to corresponding stand.

Bien que les pH puissent atteindre des valeurs basses (5,8), notamment sur limons acides, l'humus est pratiquement toujours de type mull, probablement en raison de l'influence de la litière du frêne à rapport C/N particulièrement faible.

Les *peuplements* dans lesquels l'étude a été réalisée (il s'agit, rappelons-le, uniquement de forêts privées) sont de faible surface et souvent localisés en bordure de plateau, sur les versants ou en bas de pente. Le peuplement type a pour origine un taillis-sous-futaie à base de chêne ou de hêtre ; la présence dans la réserve de ces taillis-sous-futaie de brins de frêne, ou à défaut des plantations, a permis dans certains cas de réaliser des bouquets ou même des peuplements plus ou moins étendus de cette essence traités en futaie claire. Quelques peuplements de futaie relativement denses, issus de plantation ou de régénération naturelle, ont cependant été rencontrés et retenus pour l'étude.

2.2. Méthodologie d'étude

2.2.1. Choix des placettes

Les placettes, établies dans les peuplements reconnus ⁽¹⁾ et contenant une bonne proportion de frênes, diffèrent des placettes habituelles à surface fixe installées lorsque l'on dispose de peuplements de futaie équiennes et purs qui permettent d'évaluer la hauteur dominante du peuplement (indice de productivité habituellement retenu). Les placettes de cette étude, de surfaces non délimitées, devaient répondre aux critères suivants :

— contenir 5 frênes dominants, apparemment sains, de stade de développement correspondant à celui d'arbres adultes, d'âge sensiblement identique et ayant fait l'objet d'un même traitement sylvicole ;

— présenter des conditions de station homogènes du point de vue du sol et de la microtopographie.

Le choix des placettes n'a pas été conduit au hasard. Tenant compte de l'importance sans doute primordiale des conditions d'alimentation en eau des arbres, des placettes constituant dans les peuplements de véritables séquences topographiques ont été recherchées en priorité (placettes situées à différents niveaux d'une même pente ou dont la forme de la pente au niveau de la placette diffère) ; des stations de profondeur de sol variable (il s'agit du sol apparemment prospectable par les racines d'après des sondages faits à la tarière pédologique) ont également été plus particulièrement recherchées. Enfin, il a été tenté de retrouver dans la mesure du possible, grâce à l'échantillonnage réalisé, le maximum de variation de ces conditions de station (liées à la disponibilité en eau), dans chacune des 5 zones climatiques de l'étude.

Cinquante placettes ont finalement été retenues et leur répartition est donnée par le tableau suivant :

(1) Ces peuplements avaient pour la plupart été reconnus par DELEPORTE (1977) à l'occasion d'un travail sur la typologie des stations à frêne et à merisier en région Nord-Picardie.

Zone climatique	Nombre de placettes
I	8
II	16
III	8
IV	11
V	7
Total	50

La situation géographique de ces 50 placettes est précisée à l'Annexe 2 (voir aussi fig. 1).

2.22. Mesures dendrométriques

Les mesures réalisées sur les 5 frênes dominants de chaque placette devaient permettre :

— en premier lieu, de déterminer l'indice de croissance en hauteur du frêne relatif à chaque placette, variable liée à la productivité en volume pour cette espèce, du moins pour des conditions sylvicoles comparables, et dont les variations avec les conditions de milieu feront l'objet du chapitre 3 ;

— en deuxième lieu, de fournir un critère fondé sur les dimensions relatives de la tige et du houppier des arbres, permettant de caractériser globalement les conditions de concurrence antérieures pour les arbres, variables suivant les traitements sylvicoles appliqués.

L'analyse de tige réalisée sur l'un des 5 arbres dans chaque placette a permis, dans la première phase du travail, d'étudier la variation des allures de croissance en hauteur du frêne (LE GOFF, 1982) ; une relation générale a pu être établie entre la hauteur, l'âge et un paramètre lié au niveau de croissance des arbres. Ce paramètre a été identifié à la hauteur atteinte à l'âge de référence de 40 ans : c'est l'indice de croissance en hauteur retenu ici (H40) et qui peut être estimé par la relation suivante (déduite de la relation générale précédente) :

$$(H40)^{1,961} = \left[\frac{1,961}{A} (H^{1,961}/1,961 + 20,34)40 \right] - 20,34 \quad (1)$$

où H40 = hauteur à 40 ans, en mètres ;

A = âge total de l'arbre, en années ;

H = hauteur totale à l'âge A, en mètres.

La mesure de la hauteur des 5 arbres de chaque placette (mesure faite au Blume-Leiss) et la détermination de l'âge de ces arbres ⁽²⁾ (par comptage des cerne annuels sur des carottes de sondages extraites à 0,50 m de haut) ont permis d'obtenir grâce à la relation (1) la hauteur estimée de ces arbres à l'âge de 40 ans ; l'indice de croissance en hauteur de la placette est la moyenne des valeurs de H40 ainsi obtenues.

(2) Quelques arbres ont été éliminés parce que d'âge trop différent des autres de la placette.

Les conditions de concurrence subies antérieurement par les arbres se traduisent par des dimensions relatives actuelles de la tige et du houppier variables : un arbre de diamètre à 1,30 m donné aura un houppier d'autant plus développé (en hauteur et en largeur) qu'il aura été moins concurrencé. Des relations proportionnelles (souvent linéaires) et caractéristiques de conditions de densité données ont pu ainsi être établies entre le diamètre de la projection au sol du houppier et le diamètre à 1,30 m des arbres (CURTIS, 1970 ; OTTORINI, 1978). En l'absence d'une telle relation pour le frêne, établie pour des conditions de densité de référence, et qui aurait permis d'en déduire une mesure de densité locale pour les arbres de chaque placette, nous avons recherché, à l'occasion de cette étude, un *indice d'espacement* des arbres : le rapport du diamètre de la projection au sol du houppier au diamètre à 1,30 m semble pouvoir jouer ce rôle, étant relativement indépendant du diamètre à 1,30 m ⁽³⁾ et caractéristique, comme le montre le tableau 1, de conditions de densité données (les valeurs de l'indice d'espacement proposé ont été déduites des relations particulières entre les 2 variables concernées apparaissant dans les 2 études citées au tableau 1).

TABLEAU 1

Valeurs du rapport du diamètre de projection au sol du houppier au diamètre à 1,30 m des arbres pour des conditions de densité (*) de peuplement données :

(A) pour l'eucalyptus (CURTIS, 1970),

(B) pour le hêtre (LE GOFF & OTTORINI, 1979).

Spacing index values for forest stand density specified conditions

(spacing index = mean ratio of crown projection area diameter to breast height diameter of stand trees) :

(A) for Eucalyptus obliqua (southern Australia),

(B) for beech (North-East of France).

Densité	Diamètre à 1,30 m (cm)			Diamètre à 1,30 m (cm)		
	12,7	50,8	76,2	20	50	80
1	27,7	24,5	24,1			
0,5	20,0	16,8	16,4	17,4	17,5	16,7
0,25	16,1	12,9	12,6			

(*) Densité mesurée par le rapport de la hauteur du houppier à la hauteur totale de l'arbre.

(A)

(*) Conditions de densité moyennes correspondant à des peuplements au traitement sylvicole semblable.

(B)

A l'aide du diamètre de projection du houppier de chacun des 5 arbres de la placette (diamètre du cercle de surface identique à celle de la projection) et de la cir-

(3) Sauf pour des arbres de petit diamètre ; les arbres de l'étude ont un diamètre compris entre 16 et 56 cm.

conférence à 1,30 m, l'indice d'espacement a pu être calculé (moyenne pour les 5 arbres du rapport du diamètre de projection du houppier au diamètre à 1,30 m).

L'indice défini ici doit seulement permettre de traduire les conditions de concurrence plus ou moins fortes subies par les arbres au cours de leur vie ; un même indice peut cependant refléter une histoire sylvicole différente pour les arbres.

2.23. *Mesure des caractéristiques stationnelles*

Une étude détaillée des facteurs du sol, de la topographie et du climat a été menée pour chaque placette de façon à analyser (et pouvoir quantifier par la suite) les composantes du milieu susceptibles d'agir sur la croissance du frêne : alimentation en eau, régime thermique, alimentation minérale.

— *Facteurs du sol* ⁽⁴⁾

Une fosse pédologique a été ouverte dans chaque placette, à 1,50 m du pied d'un des arbres dominants retenus. Le profil a été décrit.

Les analyses chimiques classiques ont été effectuées sur les horizons A1 et parfois sur des horizons minéraux et l'analyse granulométrique sur chaque horizon, ou groupe d'horizons, à texture apparemment homogène. Enfin la densité apparente a été mesurée chaque fois que possible et le test Is d'instabilité structurale a été effectué à 2 profondeurs, les mêmes pour tous les profils.

— *Facteurs topographiques*

Afin notamment d'essayer de cerner au mieux les conditions d'approvisionnement en eau, les facteurs suivants ont été appréciés pour chaque placette :

- le pourcentage de la pente au niveau de la placette ;
- le profil général de l'ensemble de la pente, en situant la placette par rapport aux pentes amont et aval ;
- la présence d'un replat ou d'une rupture de pente, d'une source ou d'un ruisseau ;
- la longueur de la projection horizontale de la pente en amont de la placette ;
- l'exposition.

— *Facteurs climatiques*

Les données relatives aux températures moyennes mensuelles et aux précipitations mensuelles ont été recueillies pour les différents postes météorologiques disponibles de la région d'étude.

Chaque placette a alors été rattachée à l'un de ces postes en considérant sa

(4) L'étude pédologique des sols est relatée plus complètement dans le mémoire de D.E.S. présenté par Y. LEFEVRE (1980) ; on y trouvera en particulier des descriptions des profils des différents types de sols rencontrés.

proximité géographique, son altitude, et les conditions de relief comparées à celles des postes météorologiques environnants. Les conditions climatiques pour la placette sont considérées identiques à celles du poste auquel elle a été rattachée.

2.24. Indices liés à l'alimentation en eau

Pour les raisons précisées plus haut, la composante du milieu privilégiée dans cette étude est celle dont dépend l'alimentation en eau des arbres. Celle-ci est conditionnée par les 3 facteurs stationnels que sont le climat, la topographie, le sol. Des indices relatifs à chacun de ces facteurs et rendant compte de façon quantitative de leur effet sur l'alimentation en eau des arbres ont été recherchés ; ces indices ont été déterminés après une analyse des éléments du sol, du climat et de la topographie susceptibles d'influer sur la disponibilité en eau pour les arbres ; des essais graphiques ont permis, par combinaisons successives de ces éléments, de construire les indices les plus liés à la croissance en hauteur des arbres.

— Indice climatique

Deux facteurs climatiques peuvent limiter la croissance des arbres : le déficit hydrique (ETP-P) pendant la saison de végétation, et le défaut d'énergie, principalement en début de saison de végétation, que nous avons représenté par la température moyenne du mois de mai.

L'évapotranspiration potentielle a été estimée par la formule empirique de Thornthwaite qui met en jeu les températures moyennes mensuelles et la durée moyenne du jour ⁽⁵⁾ : il est tenu compte de ce deuxième paramètre par un facteur correctif dont les valeurs ont été obtenues à partir d'un tableau fourni par ARLERY *et al.* (1954).

Dix stations climatiques, pour lesquelles les données de température moyenne mensuelle et de précipitations mensuelles étaient disponibles sur des périodes assez longues (entre 10 et 56 ans) ont été utilisées dans cette étude ⁽⁶⁾. Le tableau 2 résume, pour les 5 zones climatiques considérées, les caractéristiques moyennes des paramètres du climat retenus : il fait apparaître l'importance des déficits en eau climatiques des zones I et II et la fraîcheur relative du mois de mai dans les zones III et V.

(5) La formule de Thornthwaite permettant de calculer l'évapotranspiration potentielle (ETP) est la suivante :

$$ETP = 16 (i0t/I)^{0.75} \times f(\lambda) \quad (ETP \text{ en mm})$$

où :

t = température moyenne mensuelle (en °C)

I = $\sum_j^{12} i = \sum_j^{12} (t/5)^{1,514}$ (I est un indice thermique)

a = 0,016 I + 0,5

f(λ) = facteur correctif variable selon le mois et la latitude (λ).

(6) L'annexe 1 fournit, pour les 10 postes météorologiques retenus, tous les renseignements pour le calcul des données de base (température moyenne mensuelle, précipitations mensuelles).

TABLEAU 2

Valeurs moyennes (*) des paramètres climatiques retenus pour l'étude dans les 5 zones climatiques :

ETP : évapotranspiration potentielle totale des mois de mai à septembre,
P : précipitations totales des mois de mai à septembre.

Mean values for the climatic variables considered in the study :

ETP : potential evapotranspiration for the growing season, May to September,
P : total precipitation for the growing season, May to September.

Zone climatique	Paramètres climatiques caractérisant la période mai-septembre			Température moyenne du mois de mai (°C)
	ETP (mm)	P (mm)	ETP — P (mm)	
I	490	290	200	12,9
II	477	283	194	12,3
III	476	310	156	11,9
IV	486	305	181	12,7
V	466	341	125	11,8

(*) Détails à l'Annexe 1.

— Indice topographique

La topographie est considérée ici à travers son effet sur la répartition au sol de l'eau provenant des précipitations. La prise en compte de cette répartition a consisté dans la plupart des études de relations station-productivité menées jusqu'à présent, à définir la topographie par 2 facteurs considérés simultanément : la position sur la pente — haut de pente, bas de pente, ... — et l'inclinaison de la pente (MYERS & VAN DEUSEN, 1960 ; LOUCKS, 1962).

Pour le frêne dans le Nord-Est de la France, la projection de la longueur de pente en amont de la station s'est révélée comme l'un des facteurs explicatifs des variations de productivité. Il est rapidement apparu qu'en région Nord-Picardie, il n'en serait pas de même ; en effet, les peuplements sont de surface limitée et les pentes souvent peu longues ; de plus, ces pentes sont souvent interrompues par des chemins forestiers, routes, ... Aussi a-t-on considéré pour cette étude que la répartition de l'eau des précipitations était la résultante entre les apports latéraux et les pertes latérales : cette résultante peut dépendre de l'inclinaison de la pente, de son profil et de la position sur la pente pour une station donnée.

Il est alors possible de synthétiser les différents effets de la topographie sur la répartition de l'eau par un indice qui quantifie le bilan des apports et des pertes d'eau ; de tels indices ont été élaborés par BOWERSOX & WARD (1972), GRANNEY (1977).

Nous avons finalement retenu pour les placettes 4 niveaux d'indice topographique de valeur échelonnée de 1 à 5 (fig. 2) :

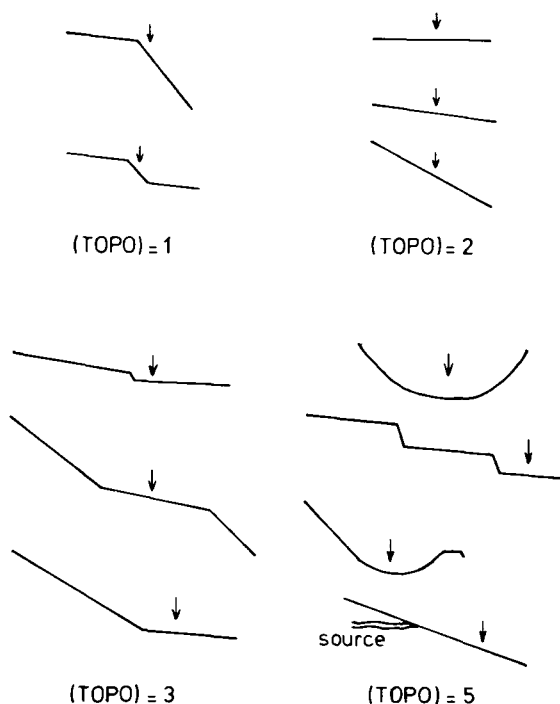


FIG. 2

Schéma des différents profils topographiques des stations et valeurs correspondantes de l'indice topographique (TOPO) caractérisant le bilan des apports et des pertes d'eau par approvisionnement latéral

(le bilan est d'autant plus favorable que la valeur de l'indice est élevée).

Slope shape-position classification for typical topographic features recognized in Nord-Picardie region : the topographic index (TOPO) measures the result of the difference between inflow and outflow the index taking higher values when this difference is thought to increase.

— 1^{er} niveau = valeur 1 de l'indice : pertes latérales d'eau supérieures aux apports latéraux ;

— 2^e niveau = valeur 2 de l'indice : apports latéraux nuls ou égaux aux pertes par drainage latéral ;

— 3^e niveau = valeur 3 de l'indice : la circulation latérale de l'eau se ralentit au niveau de la placette ; le bilan est donc positif ;

— 4^e niveau = valeur 5 de l'indice : approvisionnement en eau exceptionnel.

La valeur 5 a été retenue de préférence à la valeur 4 pour ce dernier niveau car les placettes correspondantes se différencient nettement de toutes les autres quant aux conditions dans lesquelles s'effectue l'approvisionnement latéral en eau.

— *Indice de profondeur de sol*

L'alimentation en eau des arbres dépend du volume de sol prospecté, et en particulier de la profondeur d'enracinement, mais aussi de la densité des racines notamment dans les couches profondes. Il s'agissait donc de définir un indice lié, même de façon approximative, à ce volume prospecté mais ne prenant en compte, dans un but de prévision, que des éléments caractérisant le sol.

Le problème est complexe ; en effet, on ne connaît pas le volume de sol effectivement exploité lorsque, et c'est généralement le cas des horizons profonds, la densité d'enracinement est faible ou même très faible ; d'autre part, plusieurs facteurs différents sont susceptibles de s'opposer à la pénétration des racines ; et enfin le développement de l'enracinement peut être plus ou moins freiné selon les caractéristiques du facteur en cause (par exemple, selon le pourcentage réel de cailloux). Un tel indice de volume de sol prospecté ne peut donc être qu'assez approximatif et relativement subjectif.

Différents essais ont conduit à retenir finalement comme indice de profondeur de sol la profondeur, en centimètres, d'apparition de l'un des éléments suivants limitant le développement racinaire (ou du plus superficiel lorsque plusieurs d'entre eux coexistent) :

- teneur en cailloux supérieure à 50 p. 100 ;
- hydromorphie à développement assez prononcé ;
- texture argileuse lourde (teneur en argile supérieure ou égale à 45 p. 100) ;
- horizon fortement tassé.

En cas d'absence de l'ensemble de ces éléments, l'indice de profondeur de sol retenu est de 150 cm ; il semble en effet qu'une profondeur de sol supérieure à cette valeur ne s'accompagne pas de performances de croissance supérieures pour le frêne.

2.25. *Les variables de l'étude*

Le chapitre suivant analysera plus particulièrement les variations de l'indice de croissance en hauteur du frêne avec l'ensemble des caractéristiques du milieu. Cet ensemble comporte tout d'abord les indices d'alimentation en eau relatifs aux facteurs du climat, de la topographie et du sol, tels qu'ils viennent d'être définis ; un certain nombre d'autres variables relatives à ces facteurs a été également considéré dans l'analyse pour un éventuel complément d'explication des variations de croissance du frêne. Enfin, des données supplémentaires caractérisant la richesse en différents éléments minéraux du sol ont complété le lot des variables de l'étude. Le tableau 3 présente, pour l'ensemble de celles-ci, les caractéristiques de distribution des valeurs obtenues dans les 50 placettes : valeur moyenne, écart-type, valeurs minimale et maximale.

TABLEAU 3

Caractéristiques de la distribution des valeurs observées de l'indice de croissance en hauteur du frêne (H40) et des variables sylvicoles et de milieu considérées dans les 50 placettes d'étude.

Mean and range of height growth index (H40) and independant variables concerning sylvicultural and site conditions on the 50 sample plots.

Variables de l'étude	Unité de mesure	Valeurs observées			
		Moyenne	Ecart-type	Minimum	Maximum
<i>Indice de croissance en hauteur</i>					
Hauteur totale des frênes à 40 ans (H40)	mètres	20,09	3,26	9,65	25,90
<i>Variables sylvicoles</i>					
Age des arbres	ans	60	11	31	99
Indice d'espacement (diamètre de projection du houppier/diamètre à 1,30 m)	—	19,66	1,97	15,90	24,63
<i>Variables climatiques</i>					
Précipitations (mai à sept.) (P)	mm	306	29,7	262	367
Evapotranspiration potentielle [mai à sept. (ETP)]	mm	476	10,0	464	501
ETP — P	mm	172	31,8	113	224
Température moyenne du mois de mai	°C	12,3	0,4	11,5	13,3
<i>Variables topographiques</i>					
Indice topographique	—	2,36	0,96	1	5
Longueur de pente	mètres	270	202	0	1 000
Inclinaison de la pente	%	8,9	9,3	0	46
<i>Variables pédologiques</i>					
Indice de profondeur sol	cm	80,3	43,7	18	150
Epaisseur de l'horizon A1	cm	13,3	6,6	4	41
Instabilité structurale					
Is 1 (de 24 à 32 cm) (1) ..	—	1,65	0,89	0,33	4,60
Is 2 (de 40 à 48 cm) (2) ..	—	3,21	1,78	0,88	7,85
pH de l'horizon A1 (1)	—	5,89	1,44	3,80	7,70
Ca CO ₃ de l'horizon A1 (3) ..	%	15,24	18,67	0,70	56,30
C/N de l'horizon A1 (2)	—	11,4	1,21	9,2	13,9
Eléments minéraux de l'horizon A1					
Calcium (1)	m.e./100 g	18,46	16,41	1,90	62,80
Magnésium (1)	m.e./100 g	1,31	0,77	0,43	4,64
Potassium (1)	m.e./100 g	0,49	0,17	0,22	1,19
Taux de saturation (1)	%	74	31,10	20	100
Phosphore (2)	% ₀ P ₂ O ₅	0,20	0,14	0,05	0,57

(1) Pour 42 placettes.

(2) Pour 33 placettes.

(3) Pour les 17 placettes dont l'horizon A1 contient du calcaire.

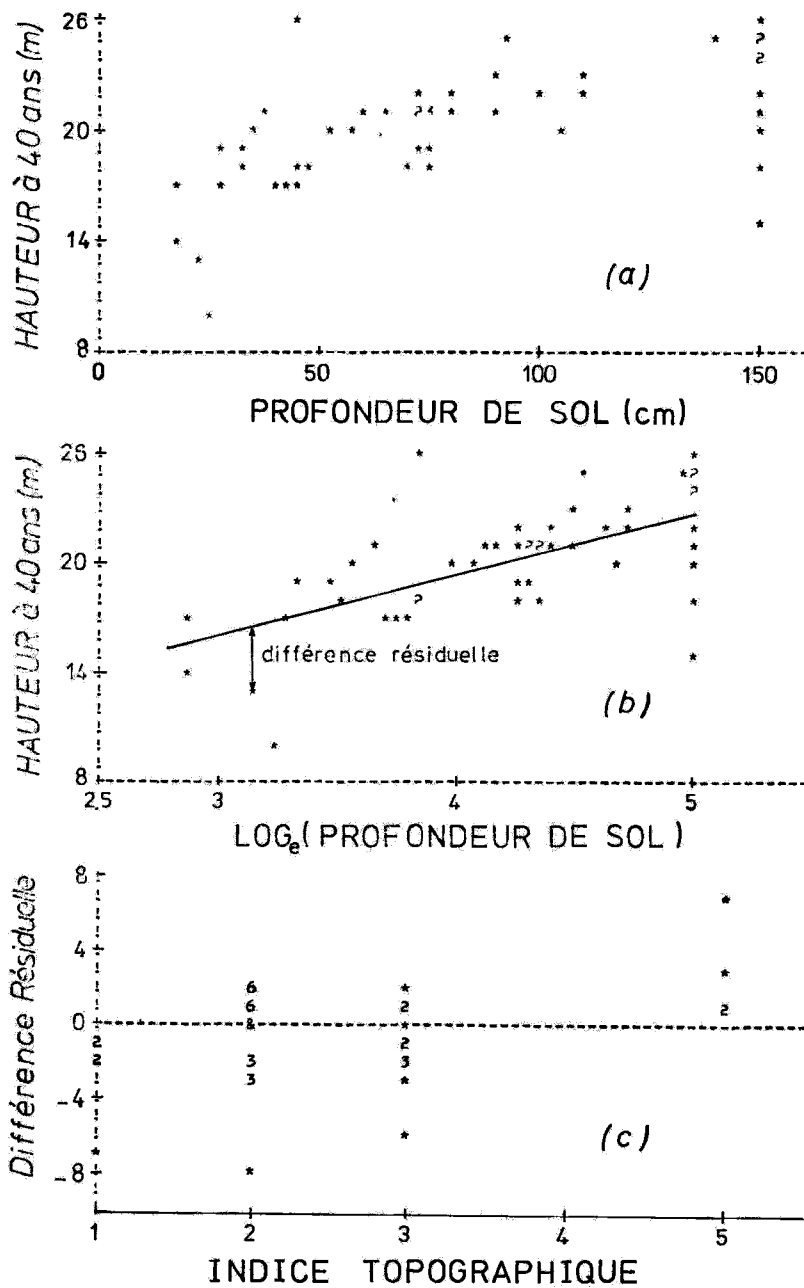


FIG. 3

3. Analyse des données et résultats

3.1. Méthodes d'analyse des données. Variables explicatives de l'indice de croissance

La façon dont H40 dépend des variables prises en compte dans l'analyse n'est pas connue ; cette recherche doit être conduite méthodiquement. Les principes retenus ici sont ceux exposés par OTTORINI (1981, pages 489-490).

Une illustration de ces principes est donnée par la figure 3 où la dépendance de H40 vis-à-vis de l'indice de profondeur de sol (PSOL) et vis-à-vis de l'indice topographique (TOPO) a pu être précisée au cours de 3 étapes successives : reconnaissance de la forme de dépendance de H40 vis-à-vis de PSOL (fig. 3 a), vérification de cette forme de dépendance par transformation de la variable (PSOL) justifiant l'ajustement d'une relation linéaire provisoire entre H40 et la variable transformée, logarithme (PSOL) (fig. 3 b), reconnaissance de la forme de dépendance (linéaire) de H40 vis-à-vis de l'indice topographique à partir de l'examen des valeurs résiduelles provenant de l'ajustement provisoire précédent (fig. 3 c).

Le processus de reconnaissance de la forme de dépendance de H40 vis-à-vis des autres variables explicatives entrant dans la relation finale (2) ne sera pas détaillé ici de même que ne seront pas reproduits les graphiques (du même type que ceux décrits plus haut) ayant permis de s'assurer de l'indépendance de H40 vis-à-vis des autres variables retenues dans l'analyse.

La troisième variable explicative qui est apparue est l'indice d'espacement DC/D130. Il est lié linéairement à H40 par sa forme quadratique ; de plus, l'examen du diagramme de dispersion des points $[(DC/D130)^2, H40]$ a permis de révéler que les points situés au-dessous de la courbe représentative de la relation provisoire ajustée entre ces deux variables correspondaient à des placettes d'âge plus élevé que ceux situés au-dessus et que l'écart des valeurs observées de H40 par rapport aux valeurs estimées par la relation provisoire croissait avec DC/D130, suggérant ainsi une interaction entre l'âge et l'indice d'espacement.

FIG. 3

Illustration de la procédure utilisée pour l'analyse des variations de l'indice de croissance en hauteur du frêne (hauteur à 40 ans) en fonction des variables sylvicoles et de milieu retenues pour l'analyse :

Data analysis procedure used — illustration — in the investigation of the site and silvicultural variables dependence of ash height growth index (H40) :

- (a) distribution des valeurs de H40 suivant l'indice de profondeur de sol (PSOL) ;
scatter plot of H40 values against soil depth index (PSOL) ;
- (b) distribution des valeurs de H40 après transformation de la variable PSOL et ajustement d'une relation linéaire provisoire entre H40 et Log PSOL ;
scatter plot of H40 values against transformed PSOL variable ; provisional linear relationship fitted between H40 and Log PSOL ;
- (c) distribution des valeurs résiduelles issues de l'estimation de H40 par la relation provisoire précédente suivant l'indice topographique (cf. 2.24.).
scatter plot of residual differences between observed and estimated values of H40 by the preceding relation against topographic index (TOPO).

La dernière variable dont il a été possible d'établir une liaison avec H40 est l'évapotranspiration potentielle ; la forme quadratique retenue, après centrage de l'ETP par rapport à la moyenne des valeurs observées, montre plus qu'une liaison purement statistique avec H40 ; elle révèle un effet négatif sur la croissance des ETP faibles et des ETP trop fortes ; une interprétation plus complète de ces effets sera donnée au chapitre suivant.

3.2. Expression de l'indice de croissance en hauteur du frêne

Les différentes transformations effectuées sur les variables explicatives ont donc permis de se ramener à une forme linéaire ; l'ajustement des paramètres de la relation liant H40 à ces variables a pu alors être effectué par la méthode la plus simple, celle des moindres carrés. Après un tel ajustement, DRAPER & SMITH (1966) recommandent de procéder à un examen des valeurs résiduelles de l'estimation (ici valeurs observées de H40 - valeurs estimées de H40) en fonction des valeurs estimées (ici H40 estimé) : cet examen n'a pas révélé d'hétérogénéité de la dispersion des valeurs résiduelles avec les valeurs estimées, ni de biais (surestimation ou sous-estimation pour certaines valeurs de H40).

L'expression finale de l'indice de croissance en hauteur H40 du frêne est donnée ci-dessous :

$$H40 = K1 + K2 (DC/D130)^2 AGE + K3 \log(PSOL) + K4 (TOPO) + K5 (ETP - \overline{ETP}) + K6 (ETP - \overline{ETP})^2 \quad (2)$$

avec les estimations suivantes :

$$\begin{aligned} \widehat{K1} &= 15,22 & \widehat{K2} &= -2,366 \cdot 10^{-4} & \widehat{K3} &= 4,65122 \\ \widehat{K4} &= 1,020 & \widehat{K5} &= 7,66 \cdot 10^{-2} & \widehat{K6} &= -5,19 \cdot 10^{-3} \end{aligned}$$

et les unités suivantes pour les variables :

- H40 : hauteur à 40 ans (en mètres) ;
- DC/D130 : rapport du diamètre du houppier (en cm) au diamètre à 1,30 m (en cm) ;
- AGE : (en années) ;
- log(PSOL) : logarithme décimal de l'indice de profondeur de sol exprimé en centimètres ;
- TOPO : indice topographique (sans unité) ;
- ETP : évapotranspiration potentielle des mois de mai à septembre (en mm) ;
- \overline{ETP} : valeur moyenne de l'ETP considérée ci-dessus pour l'ensemble des placettes (= 476,34 mm).

Le coefficient de corrélation multiple associé à la relation (2) est égal à 0,90 et l'écart-type résiduel est de 1,5 mètre. Les valeurs résiduelles de l'estimation ont leurs caractéristiques données par le tableau suivant :

Valeurs	H40 observé — H40 estimé (mètres)
Minimum	— 3,058
Maximum	+ 3,419
Comprises entre — 1,5 m et + 1,5 m	36 placettes (sur 50)

3.3. Effet et importance relative des variables explicatives

A ce stade de l'analyse des données, il est intéressant de pouvoir mesurer la contribution propre de chacune des variables explicatives entrant dans la relation (2) en présence de l'ensemble des autres variables explicatives et de pouvoir contrôler de la même façon la forme de dépendance retenue pour chacune d'elles au cours du processus par étapes utilisé pour aboutir à la relation (2) : l'examen des résidus partiels d'estimation, définis par LARSEN & Mc CLEARY (1972), permet ces deux contrôles. Dans le cas de la régression linéaire multiple, les résidus partiels relatifs à une variable explicative donnée représentent les valeurs prises par la variable dépendante, corrigées des effets des autres variables explicatives : le diagramme de dispersion de ces résidus relativement à la variable considérée (dont l'effet sur la

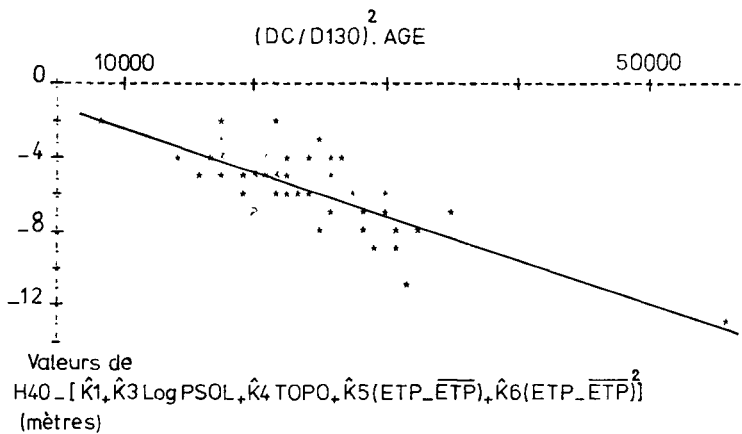


FIG. 4

Représentation graphique (par la pente de la droite de régression) d'un paramètre estimé, destiné à mettre en évidence la contribution du facteur sylvicole (indice d'espacement combiné à l'âge) dans l'estimation de l'indice de croissance en hauteur du frêne [paramètre K2 de la relation (2) dans le texte].

Graph intended to attest for the effect of tree-spacing conditions (spacing index combined with age of trees) in the estimation of mean height reached at age 40 by dominant ash trees and given by equation (2) : the slope of the regression line equals the estimated parameter K2, standing for this effect.

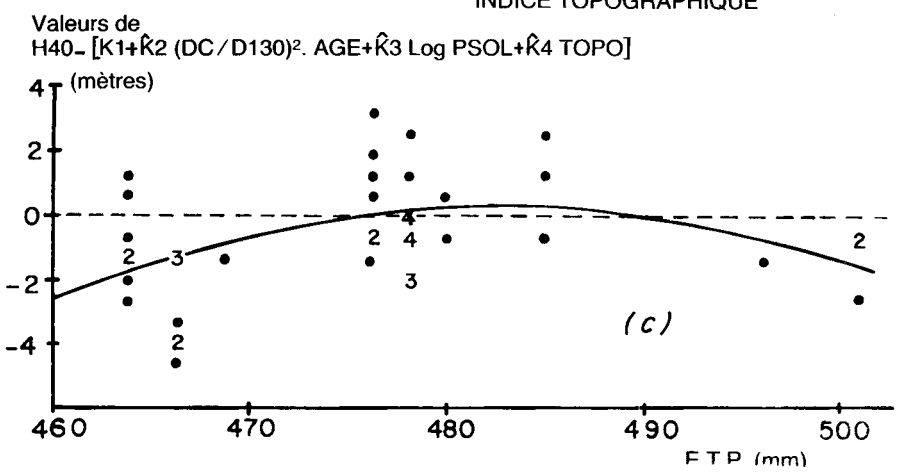
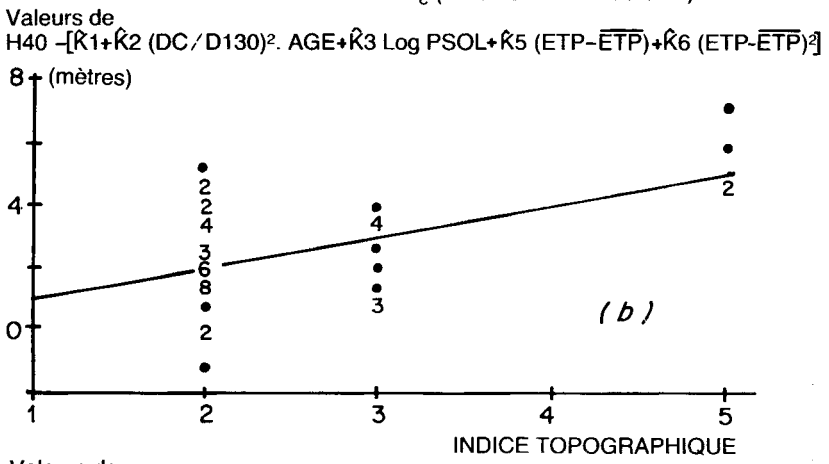
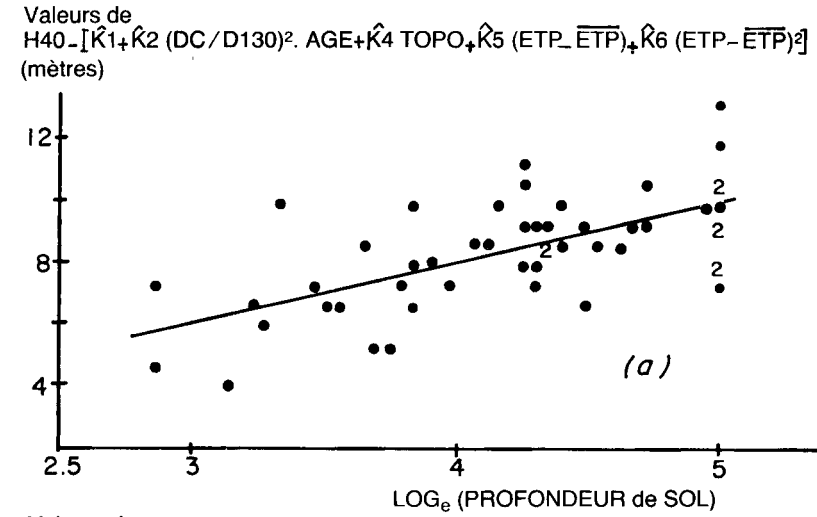


FIG. 5

variable dépendante n'a pas été pris en compte) doit traduire la même forme de dépendance que celle retenue dans la régression linéaire. Ainsi, si l'on porte sur un graphique les résidus partiels d'estimation en ordonnée et la variable dont on veut considérer l'effet propre en abscisse, sous la forme de dépendance dans la régression linéaire établie, les points représentatifs pour l'ensemble des observations doivent se disperser autour d'une droite de pente égale au coefficient estimé dans la régression pour la variable considérée (7). Ce fait est bien vérifié sur les figures 4, 5 a et 5 b : les droites tracées sont de pentes respectives \widehat{K}_2 , \widehat{K}_3 , \widehat{K}_4 . La figure 5 c présente les résidus partiels d'estimation relatifs aux variables (ETP-ETP) et (ETP-ETP)² portés en fonction de la variable ETP ; l'effet mis en évidence, lors de l'analyse des données, peut ainsi être confirmé : la courbe tracée (portion de parabole) est définie par la relation :

$$H40 - [\widehat{K}_1 + \widehat{K}_2(DC/D130)^2 \cdot AGE + \widehat{K}_3 \log PSOL + \widehat{K}_4 TOPO] = \\ \widehat{K}_5(ETP-ETP) + \widehat{K}_6(ETP-ETP)^2$$

La forme de dépendance des variables entrant dans la relation (2) a pu être ainsi confirmée : l'effet propre à chaque variable apparaît d'ailleurs plus clairement qu'à l'examen des résidus habituels (comparer les figures 3 b et 5 a par exemple). Les diagrammes de dispersion des figures 4 et 5 permettent de plus de vérifier l'homogénéité de la variance des résidus d'estimation relativement à chaque variable explicative.

L'examen des résidus partiels permet également de juger de l'influence respective de chaque variable explicative sur la variation de la variable dépendante, ici H40. L'amplitude de variation de H40 pour l'intervalle des valeurs observées des différentes variables explicatives peut être obtenue par la lecture des ordonnées correspondantes (minimale et maximale) des points des droites (ou courbes) de régression sur les figures 4 et 5 ; le tableau suivant donne ainsi l'amplitude de variation de H40 relativement aux facteurs de variation mis en évidence :

(7) Une procédure analogue a été développée par J.-M. OTTORINI (1981) dans le cas d'une régression non linéaire, avec une présentation formelle des résidus partiels et de leur propriété associée énoncée ici.

FIG. 5

Représentation graphique, par la pente de la droite de régression (fig. 5 a et 5 b) et par la courbe de régression (fig. 5 c), de paramètres estimés, destinés à mettre en évidence la contribution des facteurs du milieu dans l'estimation de l'indice de croissance en hauteur du frêne : paramètres K3 et K4 de la relation (2) du texte représentés par les pentes des droites des figures 5 a et 5 b, paramètres K5 et K6 de la relation (2) définissant les caractéristiques de la parabole tracée à la figure 5 c (portion de courbe limitée à l'intervalle des valeurs observées pour l'ETP).

Graph intended to attest for the effect of the site factors in the estimation of mean height reached at age 40 by dominant ash trees and given by equation (2) : the slopes of the regression lines of fig. 5 a and fig. 5 b equal respectively the estimated parameters K3 and K4 standing for the effect of soil depth and topographic feature ; the parabolic regression line of fig. 5 c is defined by the estimated parameters K5 and K6 of equation (2).

Facteur de variation de H40	Variable correspondante [relation (2)]	Amplitude de variation de H40 pour chaque facteur
Indice d'espacement et âge des arbres	$(DC/D130)^2 \times AGE$	11,3 mètres
Indice de profondeur de sol ..	log PSOL	4,3 mètres
Indice topographique	TOPO	4,0 mètres
Evapotranspiration potentielle	$(ETP - \overline{ETP})$, $(ETP - \overline{ETP})^2$	2,0 mètres

Le facteur principal de variation de H40 est donc celui lié aux conditions d'espacement des arbres au cours de leur croissance, l'amplitude de variation de H40 pour ce facteur atteignant plus de 11 mètres, 6,5 mètres seulement cependant si l'on exclut une placette marginale aux arbres âgés et ayant poussé isolément (point représentatif situé en bas à droite sur la figure 4). Les facteurs du milieu représentent une amplitude de variation de H40 de plus de 10 mètres, indice de profondeur de sol et indice topographique y contribuant de façon primordiale. Les facteurs du milieu à eux seuls, une fois pris en compte l'effet dû aux conditions de concurrence passées des arbres, expliquent 63 p. 100 de la variabilité de l'indice de croissance en hauteur du frêne (résultat obtenu par comparaison de la variance résiduelle d'estimation à l'issue de la régression de H40 avec l'ensemble des variables explicatives à la variance résiduelle au premier palier de la régression multiple, la variable $(DC/D130)^2 \times AGE$ étant introduite en premier).

4. Interprétation des résultats ; rôle de l'alimentation en eau

4.1. Facteurs de la croissance en hauteur du frêne

4.1.1. Les facteurs sylvicoles

La figure 6 présente la relation particulière mise en évidence entre l'indice de croissance en hauteur du frêne, l'indice d'espacement ($DC/D130$) et l'âge des arbres ; pour la représenter, les facteurs du milieu entrant dans la relation (2) ont été considérés constants, l'indice de profondeur de sol étant choisi égal à 150 cm, l'indice topographique égal à 2 et l'évapotranspiration potentielle égale à 476,34 mm [valeur moyenne observée pour les placettes : \overline{ETP} dans la relation (2)].

L'indice de croissance en hauteur du frêne apparaît ainsi d'autant plus bas, pour des arbres d'âge donné, que l'indice d'espacement a une valeur élevée : on retrouve là l'effet mis en évidence pour d'autres espèces (dont le chêne) de l'effet défavorable d'un espacement trop grand sur la croissance en hauteur. Cet effet apparaît d'autant plus marqué que l'âge des arbres est élevé, c'est-à-dire que les arbres se sont trouvés plus longtemps avec un espacement important.

D'après la figure 6, il semblerait que, pour que la croissance en hauteur ne soit pas affectée par l'espacement des arbres, l'indice DC/D130 doit être de toute façon inférieur à 16.

En réalité, la variable DC/D130 caractérisant les dimensions relatives actuelles de la tige et du houppier, intègre imparfaitement les conditions sylvicoles passées pour les arbres, en particulier ici celles liées à leur espace vital qui a pu évoluer au cours du temps : cette variable reste cependant un indice traduisant globalement des conditions d'espace vital plus ou moins grand réservé aux arbres au cours de leur croissance passée.

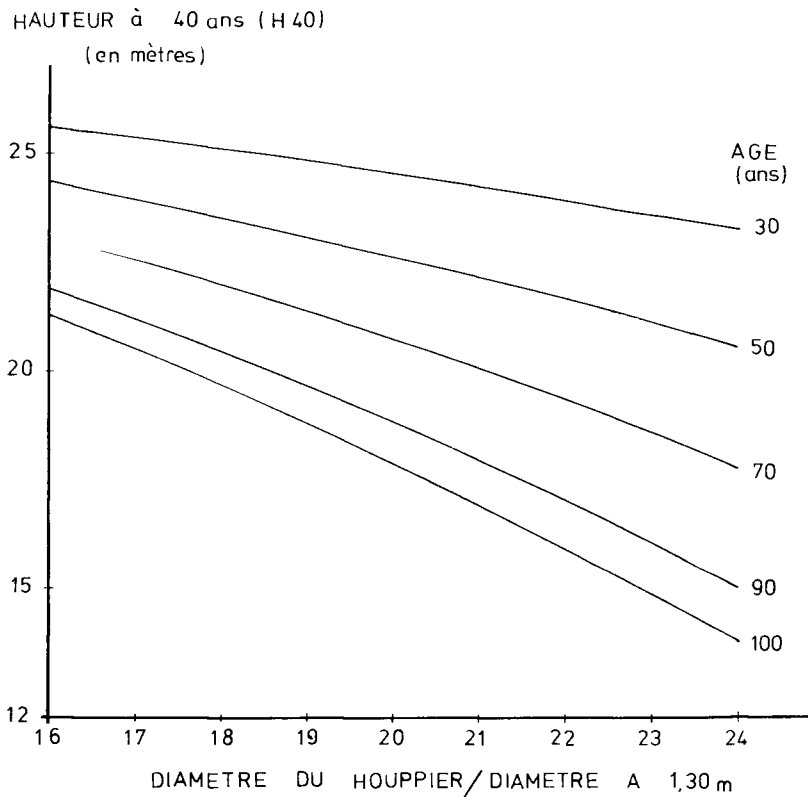


FIG. 6

Effet sur l'indice de croissance en hauteur du frêne des conditions sylvicoles passées appréciées du point de vue de l'espacement relatif, au cours de la croissance des arbres et mesuré par le rapport du diamètre du houppier au diamètre à 1,30 m atteint à un âge donné : les courbes sont issues de la relation (2) du texte dans laquelle on a fixé les variables de milieu (PSOL = 150 ; TOPO = 2 ; $ETP = \overline{ETP} = 476,34$).

Relationship between mean height reached at age 40 by dominant ash trees (H40) and spacing index (mean ratio of diameter of crown projection area to breast height diameter) depending on age of these dominant trees : curves obtained from equation (2) with site factors fixed (PSOL = 150 cm, TOPO = 2, $ETP = \overline{ETP} = 476,34$ mm).

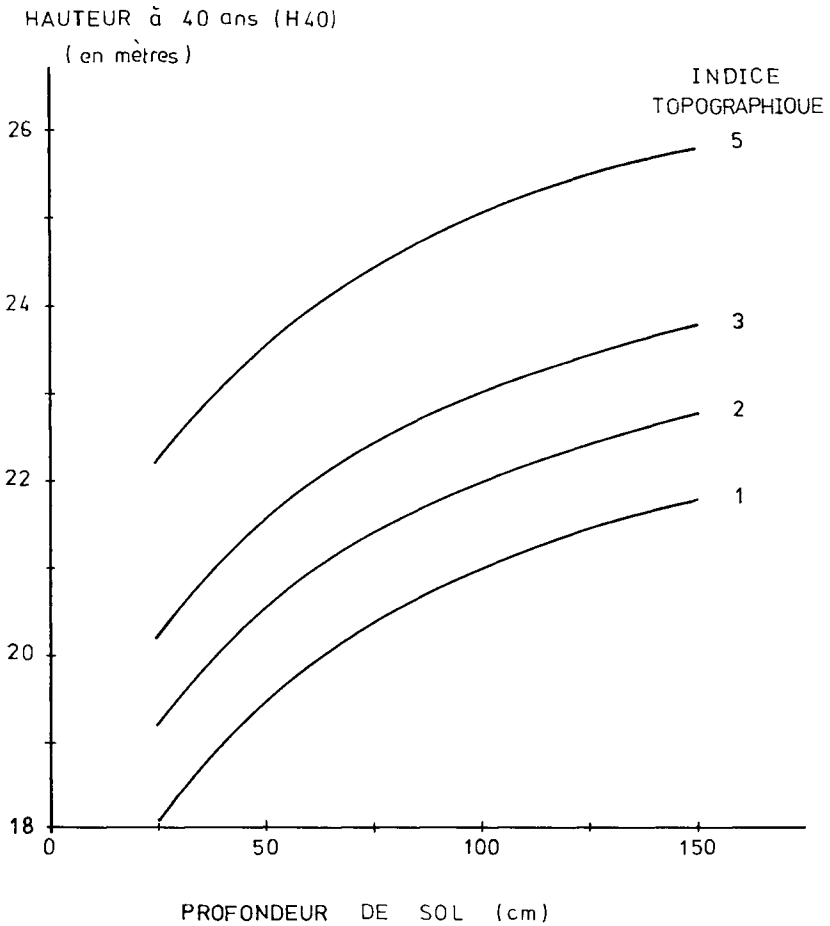


FIG. 7

Relation entre l'indice de croissance en hauteur du frêne, l'indice de profondeur de sol et l'indice topographique : les courbes sont issues de la relation (2) du texte dans laquelle on a fixé les variables liées aux conditions d'espacement des arbres au cours de leur croissance ($DC/D130 = 18$ à l'âge de 60 ans) et celle liée aux conditions climatiques ($ETP = \overline{ETP} = 476,34$).

Relationship between mean height reached at age 40 by dominant Ash trees (H40) and principal synthetic site factors, soil depth index and topographic index : curves obtained from equation (2) with climatic conditions fixed ($ETP = \overline{ETP} = 476,34$ mm) and specified tree-spacing conditions ($DC/D150 = 18$ at age 60).

4.12. Les facteurs du milieu

Parmi les facteurs du milieu, il a été montré précédemment que c'est l'indice de profondeur de sol qui influait le plus sur la croissance en hauteur du frêne ; l'effet de cette variable est d'autant plus important que l'on se situe dans des sols peu profonds (fig. 7). Ce résultat semble assez général et explique la transformation loga-

rithmique souvent effectuée, comme ici, sur cette variable pour rendre compte de sa relation avec la productivité (EINSPAHR *et al.*, 1951 ; MYERS *et al.*, 1960 ; SPRACKLING, 1973).

La liaison positive de l'indice topographique avec H40 (fig. 7) confirme la validité des critères choisis pour représenter l'approvisionnement latéral en eau des placettes. Les variables complémentaires caractérisant la topographie incluses dans l'analyse (longueur de pente, inclinaison de la pente) ne se sont pas révélées déterminantes pour expliquer les variations de productivité du frêne.

L'influence du climat sur la croissance en hauteur du frêne apparaît de façon complexe sous la forme de la liaison établie entre H40 et l'évapotranspiration potentielle totale de la saison de végétation (mois de mai à septembre) ; cette liaison montre l'effet défavorable de valeurs trop fortes ou trop faibles de ETP (fig. 5 c) ; elle regroupe en fait l'effet de deux composantes du climat, une composante thermique et une composante hydrique (cf. 2.24). La croissance en hauteur dépend de la température pendant la période où elle s'effectue et de la précocité du débourrement qui détermine la longueur de cette période ; la température moyenne du mois de mai peut jouer ce double rôle d'indice thermique, le frêne débourrant relativement tard au printemps et la température moyenne du mois de mai étant très bien corrélée à celle de la période de croissance en hauteur (mai à fin juillet) ⁽⁸⁾. La croissance en hauteur dépend par ailleurs de la satisfaction des besoins en eau des arbres : l'indice climatique (ETP-P) peut en rendre compte. Or la figure 8 montre que les variables caractérisant ces composantes thermique et hydrique du climat sont très liées à ETP, mais qu'elles varient en sens inverse ; l'effet favorable dû aux températures plus élevées doit être ainsi inversé lorsque le déficit hydrique climatique atteint une certaine valeur : d'après la figure 5 c, cela se produirait pour une valeur de l'ETP proche de 485 mm.

Aucune liaison n'a pu être mise en évidence entre les résidus d'estimation de la relation (2) et les variables du tableau 3 non retenues dans cette relation. Cela signifie en particulier que, dans la gamme des stations étudiées, la productivité du frêne n'est pas liée aux propriétés chimiques du sol. Certaines des variables liées à ces propriétés présentaient pourtant un coefficient de corrélation totale relativement élevé avec l'indice H40 ; il en est ainsi de CaCO_3 , Ca^{++} , épaisseur de l'horizon A1 (corrélation négative), indice d'instabilité structurale (corrélation positive). Ces variables sont en réalité très liées entre elles et à la profondeur de sol, qui est souvent limitée, dans les stations étudiées, par le substrat calcaire. On ne peut cependant conclure que les propriétés chimiques du sol, et en particulier celles dont dépend la nutrition minérale, sont sans importance pour la croissance du frêne. Il faut, en effet, replacer nos résultats dans le cadre écologique étudié ; rappelons ainsi que l'humus de nos placettes appartient pratiquement toujours au type mull, mais celui-ci est grandement favorisé par la litière du frêne (DUCHAUFOUR, 1977), les pH pouvant atteindre cependant des valeurs basses (3,8 : cf. tabl. 3).

(8) La croissance en hauteur du frêne serait en effet terminée à la fin du mois de juillet : c'est ce qui a pu être observé dans l'expérience menée par AUSSENAC & LEVY (1983) près de Nancy. La correspondance entre la température moyenne du mois de mai et celle de la période de mai à juillet en Nord-Picardie peut être observée à partir des données des postes météorologiques (cf. Annexe 1) ; la relation qui les lie est la suivante : $y = 3,42 + 0,931 x$ ($r = 0,93$) ; où y : température moyenne de mai à juillet ; x : température moyenne de mai.

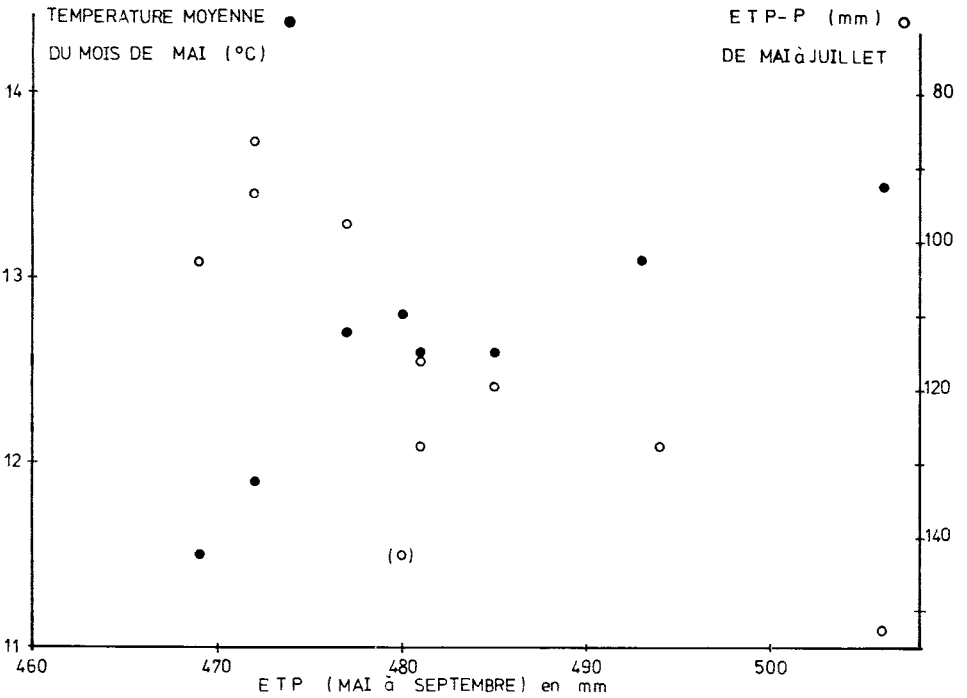


FIG. 8

Diagramme montrant les relations antagonistes existant entre l'évapotranspiration potentielle et, d'une part la température moyenne du mois de mai, d'autre part le déficit hydrique climatique (ETP-P).

Graph intended to show opposite trends between growth season potential evapotranspiration and mean temperature of May (thermic index) on one hand, deficit of water from climate (potential evapotranspiration minus precipitation for presumed height growth season), on the other hand.

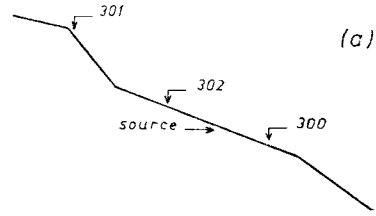
La part réelle des facteurs du milieu (température et surtout alimentation en eau) dans les variations de croissance du frêne est sans doute plus forte que celle mise en évidence ; en effet, les indices retenus sont grossiers et ne représentent qu'imparfaitement les conditions réelles de l'alimentation en eau des arbres et de l'énergie disponible. Mais il était difficile d'aller plus loin dans le cadre d'une étude station-production à l'échelle d'une grande région.

4.2. Alimentation en eau et productivité du frêne

4.2.1. Etude de 3 chaînes de stations

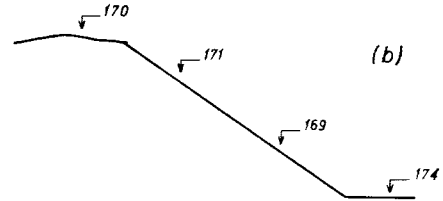
L'approvisionnement en eau au niveau de la placette représenté par l'indice topographique, et le volume de sol exploité par les racines représenté par l'indice de profondeur de sol, conditionnent l'alimentation en eau des arbres, composante du

Chaîne de L'ALLMANT



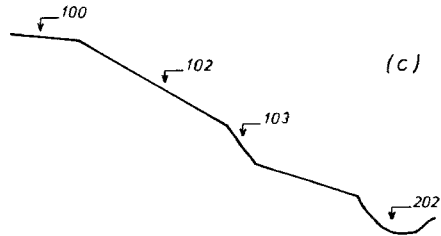
Numéro des Stations	301	302	300
Indice de Croissance en Hauteur (H40) (mètres)	18,3	20,4	24,7
Indice Topographique	1	3	5
Indice de Profondeur de Sol (cm)	46	58	150

Chaîne de BUSIGNY



Numéro des Stations	170	171	169	174
Indice de Croissance en Hauteur (H40) (mètres)	20,7	23,8	22,5	24,8
Indice Topographique	2	2	2	5
Indice de Profondeur de Sol (cm)	74	150	90	93

Chaîne de BAUGY



Numéro des Stations	100	102	103	202
Indice de Croissance en Hauteur (H40) (mètres)	25,6	22,9	18,6	25,9
Indice Topographique	2	2	1	5
Indice de Profondeur de Sol (cm)	150	110	75	46

FIG. 9

Profils topographiques des 3 chaînes de stations étudiées montrant les variations de l'indice de croissance en hauteur du frêne (H40) avec l'indice topographique et l'indice de profondeur du sol (les valeurs de H40 ne sont pas comparables d'une chaîne à l'autre).

Topographic features for the 3 plot sequences studied; height growth index (H40), for each plot sequence, appears a function of both topographic index and soil depth index (H40 values must not be compared from one sequence to another, other factors, particular sylvicultural ones, determining height growth of ash).

milieu primordiale pour la productivité des stations vis-à-vis du frêne. Pour illustrer l'importance effective de chacun de ces deux facteurs, nous avons considéré un certain nombre de placettes situées en séquence topographique dans un même massif forestier (fig. 9) ; les autres facteurs de variation de l'indice de croissance en hauteur du frêne peuvent alors être considérés constants pour les stations d'une même chaîne (climat général, microclimat, type de sylviculture, âge des arbres), l'indice H40 jouant alors le rôle d'un véritable indice de productivité du frêne.

— *Chaîne de l'Allemant* (Station climatique 43 : cf. Annexe 1)

Les deux indices (topographique et de profondeur de sol) varient dans le même sens pour les trois placettes de cette chaîne (cf. fig. 9 a). Aussi, constate-t-on sans surprise que la productivité du frêne est liée d'une façon extrêmement nette à chacun de ces deux indices.

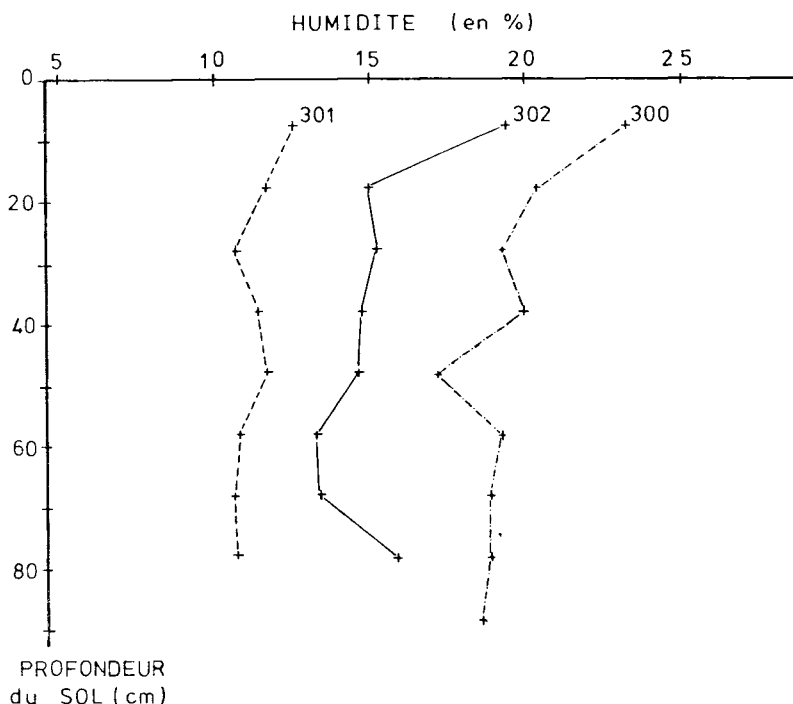


FIG. 10

Profils hydriques des sols des 3 stations de la chaîne topographique de l'Allemant au 18-9-1979 (cf. aussi fig. 9 a).

Soil hydric profiles for the 3 plots of the topographic sequence of « Allemant » forest stand (see fig. 9 a).

Des profils hydriques effectués le 18-9-1979, à titre indicatif, permettent de se faire une idée des potentialités comparées d'alimentation en eau dans les trois placettes en période de relative sécheresse (fig. 10). La productivité augmente avec les

teneurs en eau du sol à la date de la mesure. Il en est, selon toute vraisemblance, de même si l'on considère les réserves en eau utiles des sols (bien que celles-ci n'aient pu être calculées exactement par défaut de certaines valeurs de densité apparente).

— *Chaîne de Busigny* (Station climatique 42)

La placette 174 possède un indice topographique de 5, très supérieur à celui des trois autres placettes ; aussi est-ce logiquement que sa productivité est la plus élevée, même si la profondeur de son sol est inférieure à celle de la placette 171 (cf. fig. 9 b).

Pour les trois placettes à indice topographique égal à 2, la productivité varie, et c'est également logique, dans le même sens que la profondeur de sol.

Nous ne représenterons pas pour cette chaîne (ni pour la suivante) les profils hydriques effectués comme pour la chaîne de l'Allemant au 18-9-1979. En effet, contrairement à cette dernière, indices topographique et de profondeur de sol ne varient pas toujours dans le même sens lorsque l'on passe d'une placette à une autre d'une même chaîne ; dans ces conditions, des mesures effectuées à d'autres périodes l'ont montré, la réserve en eau utile d'un profil par rapport à un autre dépend quelque peu des antécédents climatiques et en particulier pluviométriques (temps écoulé depuis la dernière pluie, intensité de celle-ci, ...) : la mesure du profil hydrique à une seule date est alors insuffisante pour permettre d'évaluer les potentialités relatives d'alimentation en eau dans les différentes placettes d'une même chaîne.

— *Chaîne de Baugy* (Station climatique 21)

Les conditions d'alimentation en eau au niveau de la placette 202 sont très favorables, beaucoup plus que pour les autres placettes de la chaîne (indice 5 au lieu de 2 ou 1) ; cela permet à la placette 202 d'avoir la plus forte productivité (à égalité cependant avec la placette 100) malgré sa faible profondeur de sol (fig. 9 c). A noter qu'une légère pente perpendiculaire à la ligne de plus grande pente explique l'absence de phénomènes d'hydromorphie au niveau de cette placette 202.

Parmi les autres placettes de la chaîne, la placette 103 est incontestablement la plus défavorisée, si l'on en juge par les deux indices (topographique et de profondeur de sol) ; la productivité du frêne y est donc, on le constate sans surprise, nettement la plus faible. Les placettes 100 et 102 sont affectées du même indice topographique ; la « profondeur de sol » supérieure dans la placette 100 entraîne logiquement une meilleure productivité.

L'examen de ces trois chaînes topographiques a donc permis de vérifier, les choses étant égales par ailleurs, que la productivité du frêne était bien directement liée aux conditions stationnelles d'alimentation en eau. Les facteurs du sol et de la topographie, dont celles-ci dépendent, y prennent tous deux une part importante.

Enfin, et malgré les réserves émises plus haut concernant les profils hydriques, on peut constater que le taux d'humidité dans les cinq premiers centimètres de sol varie d'une placette à l'autre dans le même sens que l'indice topographique, dans chacune des trois chaînes ; cela confirme que les quatre niveaux retenus pour l'indice topographique traduisent bien les différences d'approvisionnement latéral en eau (fig. 11). De plus, on retrouve un étagement des taux d'humidité, pour un indice

topographique donné, en fonction de l'ETP moyenne des stations climatiques des trois chaînes : la chaîne de l'Allemant (ETP = 501) s'oppose de ce point de vue aux deux autres d'ETP voisines (Busigny : ETP = 480 ; Baugy : ETP = 476).

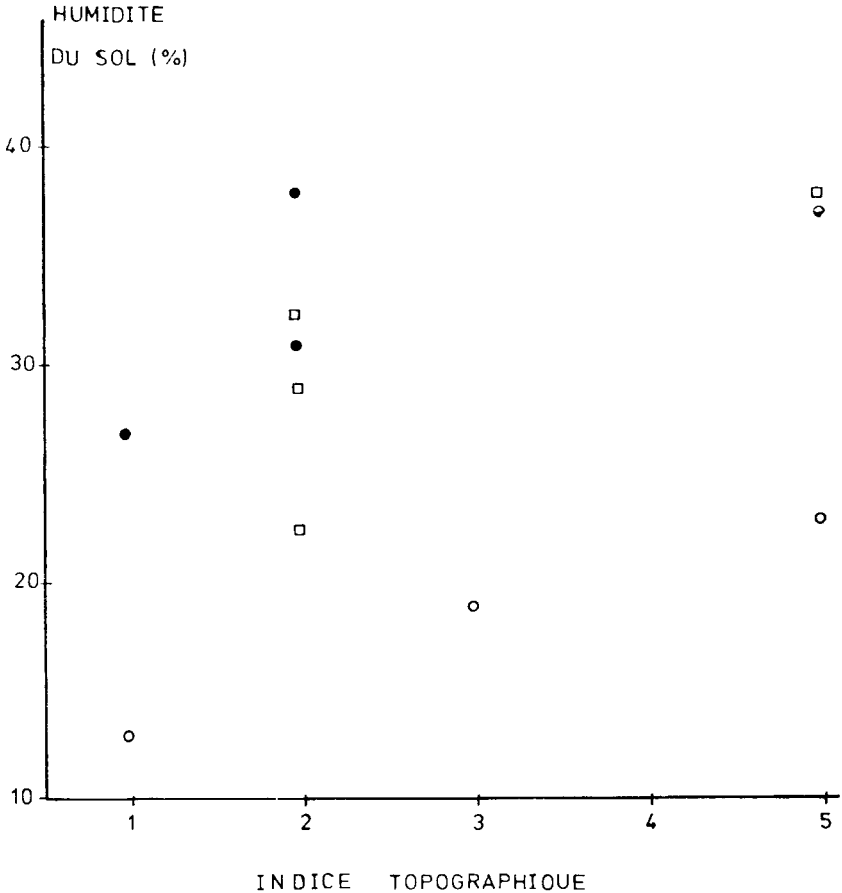


FIG. 11

Variations du taux d'humidité dans les 5 premiers centimètres de sol (mesuré au 18-9-1979) en fonction de l'indice topographique pour les placettes des 3 chaînes de stations étudiées : Allemant (●), Busigny (▲), Baugy (+).

Humidity percent variations for the first 5 cm of soil (observed on September 18, 1979) plotted against topographic index for the plots of the 3 topographic sequences studied (see fig. 9).

4.22. Comparaison avec les résultats obtenus dans le Nord-Est de la France

Dans l'étude des conditions de productivité du frêne dans le Nord-Est (DEVAUCHELLE, 1974 ; DEVAUCHELLE & LEVY, 1977), certains facteurs retenus ici n'avaient pas été considérés : climat, dont la variabilité géographique était moindre dans le

cadre des placettes retenues, conditions sylvicoles des peuplements, moins hétérogènes qu'en Nord-Picardie, les peuplements étant souvent issus de plantations et en général assez fermés.

Le résultat essentiel des deux études est le même : l'alimentation en eau joue le rôle fondamental dans la productivité du frêne. La nutrition minérale des arbres n'intervient pas, du moins dans le cadre de l'éventail des placettes échantillonnées.

Parmi les critères retenus pour représenter l'alimentation en eau et qui apparaissent très liés à la productivité, certains sont communs aux deux régions. Il existe ainsi une classe représentant un approvisionnement en eau particulièrement favorable (classe 3 dans le Nord-Est, 5 en Nord-Picardie). L'hydromorphie est prise également en compte, bien qu'un peu différemment (classe 4 dans le Nord-Est, indice de profondeur de sol en Nord-Picardie).

Par contre, la longueur de la projection horizontale de la pente en amont de la placette, critère important dans le Nord-Est, ne s'est pas avéré d'un emploi intéressant en Nord-Picardie, probablement pour les raisons mentionnées plus haut (cf. 2.24.) ; l'approvisionnement latéral est ainsi mieux représenté dans cette région par les variations du profil topographique sur de courtes distances (cf. 2.24.).

La texture apparaît dans les deux études, avec une influence défavorable d'une « argile lourde » (p. 100 argile \geq 45 p. 100), mais son rôle dans l'explication globale de la productivité est moindre en Nord-Picardie, où les limons sont très répandus et en moyenne bien plus épais, les textures fortement argileuses n'apparaissant que rarement à moins d'un mètre de profondeur (2 placettes).

Enfin, un facteur lié à l'épaisseur du sol, tel l'« indice de profondeur de sol » retenu dans le Nord-Picardie comme représentatif du volume de sol prospecté, et très lié à la productivité, n'apparaît pas sous cette forme dans le Nord-Est, du moins dans l'explication globale, peut-être en raison de l'échantillonnage des placettes dans cette région : celles dont le sol calcimagnésique était superficiel se trouvaient généralement dans des conditions d'approvisionnement préférentiel en eau (présence d'une source par exemple).

5. Conclusion

L'étude de la productivité des stations forestières pour le frêne posait d'emblée des problèmes nouveaux par rapport à ceux rencontrés dans les études classiques (dites de station-production) menées jusqu'à maintenant : on pouvait en effet s'attendre à ce que la croissance en hauteur du frêne soit influencée par des conditions sylvicoles particulières rencontrées pour cette essence (rarement en peuplement pur de futaie) et par les conditions climatiques variables dans la région d'étude. Il était, de plus, important de cerner au mieux les facteurs susceptibles d'influer directement sur la croissance en hauteur du frêne, car ceux que l'on soupçonnait jouer un rôle important résultaient en fait de la combinaison de plusieurs facteurs primaires.

Des indices ont ainsi été construits, caractérisant les conditions sylvicoles, à savoir l'espace vital relatif des arbres (indice d'espacement) et la composante du milieu

jugée la plus influente, au vu de résultats antérieurs, l'alimentation en eau (indices climatique, topographique et de profondeur de sol). Un traitement particulier des données correspondantes a permis de montrer que ces quatre indices seuls permettaient de rendre compte de plus de 80 p. 100 des variations de l'indice de croissance en hauteur du frêne ; la liaison particulière avec chacun d'eux a pu être précisée et leur importance relative quantifiée ; le moindre développement en hauteur du frêne lié à un accroissement de son espace vital a pu ainsi être confirmé. Les différents phénomènes pris en compte dans l'explication des variations de la croissance en hauteur du frêne sont cependant traduits imparfaitement à travers ces différents indices. Des études plus approfondies seraient nécessaires pour mieux préciser en particulier les conditions de disponibilité en eau des stations en fonction : des caractéristiques des différents facteurs pouvant limiter la profondeur ou la densité de l'enracinement, des conditions topographiques précises et de la demande en eau climatique ; des indices plus réalistes, tenant compte également des interactions de ces différents facteurs, pourraient alors être proposés.

Cette étude a néanmoins permis de montrer que l'alimentation en eau des arbres constituait le facteur prépondérant dont dépend la productivité du frêne en région Nord-Picardie. Ce résultat est en parfait accord avec les conclusions du travail effectué précédemment dans le Nord-Est de la France, ce qui confirme son caractère général, du moins pour l'ensemble des zones climatiques et écologiques prises en compte dans ces deux études.

On sait que l'alimentation en eau constitue globalement le facteur limitant principal de la production forestière, même sous des climats plus nordiques que celui de la France (cf. HOLSTENER - JORGENSEN & HOLMSGAAARD, 1975). La quantité d'eau nécessaire à une bonne croissance dépend cependant de l'espèce considérée ; on peut ainsi distinguer des espèces hygrophiles (dont le frêne), mésophiles et xérophiles (DUCHAUFOUR, 1970). Un essai réalisé en grandes cuves enterrées (AUSSENAC & LEVY, 1985) a ainsi montré que, lorsque l'approvisionnement en eau était interrompu, le frêne épuisait les réserves du sol beaucoup plus rapidement que le chêne, car sa régulation stomatique n'intervenait d'une façon très marquée que pour des déficits hydriques bien plus importants que dans le cas de cette dernière espèce ; la croissance du frêne était ainsi plus affectée que celle du chêne pendant une même période de sécheresse. Le fait que l'approvisionnement en eau soit ainsi tellement important pour le frêne, explique que les propriétés chimiques du sol semblent sans importance pour sa croissance ; ce dernier résultat s'explique d'ailleurs d'autant mieux que la litière du frêne, par son caractère « améliorant », favorise la nutrition minérale des végétaux en induisant généralement la formation d'un humus de type mull à rapport C/N particulièrement faible (tabl. 3).

Conclusions pratiques

Cette étude a permis de dégager des critères de prévision de la productivité du frêne dans une station quelconque de la région Nord-Picardie grâce à la détermination de certains indices : indice de profondeur de sol (lié à l'épaisseur de sol susceptible d'être colonisée par les racines), indice topographique (lié aux conditions stationnelles d'approvisionnement en eau), évapotranspiration potentielle de la saison de végétation (liée au régime thermique et aux déficits en eau climatiques). Les deux premiers indices seront faciles à déterminer par les gestionnaires forestiers ; quant au troi-

sième, il suffira de rattacher la station d'étude à la station climatique voulue parmi celles distinguées en région Nord-Picardie. L'indice de productivité I_p de la station concernée sera obtenu en appliquant l'équation suivante :

$$I_p = \widehat{K3} \log(\text{PSOL}) + \widehat{K4}(\text{TOPO}) + \widehat{K5}(\text{ETP-ETP}) + \widehat{K6}(\text{ETP-ETP})^2 \quad (3)$$

tirée de l'équation (2) par élimination du facteur constant $K1$ et du facteur lié à l'espacement des arbres. Cet indice mesure la productivité *relative* des différentes stations pour le frêne.

La hauteur moyenne atteinte par des arbres dominants sur ces stations à l'âge de 40 ans peut également être obtenue, pour des conditions sylvicoles données ; dans le cas d'une futaie relativement dense, elle pourra être estimée en ajoutant 10,6 ⁽⁹⁾ à la valeur obtenue pour l'indice I_p .

Par ailleurs, les indices de l'équation (3) devraient pouvoir être réutilisés avec efficacité pour l'étude des variations de productivité d'autres essences feuillues de qualité susceptibles d'être favorisées dans le cadre de la valorisation des taillis et taillis-sous-futaie pauvres de cette région.

Sur un plan plus général, le frêne pourra être favorisé en priorité dans les stations à approvisionnement en eau particulièrement favorable (fonds de vallon, présence de source en amont, ...). Son introduction peut également être recommandée lorsque les conditions topographiques locales entraînent des arrivées latérales d'eau supérieures ou éventuellement égales aux départs latéraux, à condition qu'aucun obstacle (forte proportion de cailloux, hydromorphie marquée, sol fortement tassé ou à texture très argileuse) ne limite la profondeur d'enracinement jusqu'à un mètre ou mieux, 1,50 m. Dans les stations moins favorables quant aux potentialités d'alimentation en eau des arbres, c'est le chêne, en particulier, qui devra être favorisé.

Remerciements

1. Les mesures et observations nécessaires à cette étude ont été possibles grâce à l'agrément des particuliers, propriétaires des forêts privées concernées.

2. L'analyse approfondie des profils de sols et de la micro-topographie menée par Y. LEFEVRE dans le cadre de cette étude, a permis de définir les indices adaptés pour caractériser la disponibilité en eau des stations.

3. Les données climatiques des différents postes météorologiques de la région ont été fournies obligeamment par les services concernés de la Météorologie Nationale.

4. Le traitement statistique des données a largement bénéficié de la programmathèque « Amance 81 » installée sur l'ordinateur Mini 6 de la Station de Biométrie du C.R.F. de Nancy, ainsi que d'un programme informatique élaboré par J.-M. OTTORINI permettant des analyses graphiques rapides sur le mode conversationnel.

5. La réalisation des figures et tableaux de cet article est due en grande partie à L. GARROS, technicien à la Station de Sylviculture et de Production du C.R.F. de Nancy.

(9) Valeur prise par $\widehat{K1} + \widehat{K2}(\text{DC}/\text{D130})^2 \times \text{AGE}$ pour un indice d'espacement des arbres $\text{DC}/\text{D130}$ égal à 18 à l'âge de 60 ans.

6. Enfin, F. DE MONTARD de la Station d'Agronomie de Clermont-Ferrand et P. DELABRAZE de la Station de Sylviculture méditerranéenne d'Avignon, lecteurs de cet article, ont contribué à éclaircir certains points mais aussi à nous conforter par l'intérêt qu'ils ont porté à ce travail.

Summary

Productivity of ash in Nord-Picardie region

B - Site/productivity relationships

The measure of dendrometric, edaphic and topographic variables has been conducted for 50 plots covering the range of site conditions in Nord-Picardie region. Factors, not considered habitually in site/productivity studies, had to be investigated :

- climatic conditions, in consideration of the extent of the region,
- competition conditions for trees which can reduce height development when they are too low (this is the case here for trees in stands treated as coppice-with-standards or as « low density » high forests).

Height growth index, the dependent variable for each plot, is the mean height reached at age 40 by dominant ash trees (H40).

A particular data analysis treatment allowed to explain more than 80 p. 100 of the total variation of H40 among the plots. Independent variables entering the relation consist of several indexes :

- a tree spacing index, acting as past competition measure,
- 3 indexes of site water availability : climatic index, topographic index and soil depth index.

Water availability for trees appears the critical factor of ash productivity in Nord-Picardie region. Comparison of site characteristics with H40 values for topographic sequences of plots confirmed this result. Ash productivity of sites seems independent of soil chemical properties, at least for the range of sites studied.

On a practical point of view, this study provides predictive variables to determine ash productivity for any forest site in Nord-Picardie region.

Reçu pour publication en mars 1985.

Références bibliographiques

- ALEXANDER Robert R., TACKLE David, DAHMS Walter G., 1967. *Site indexes for Lodgepole Pine, with corrections for stand density : methodology*. U.S. Forest Service Research Paper RM-29.
- ARLERY R., GARNIER M., LANGLOIS R., 1954. Application des méthodes de Thornthwaite à l'esquisse d'une description agronomique du climat de la France. *La Météorologie*, **36**, 345-367.
- AUSSENAC G., LEVY G., 1983. Influence du dessèchement du sol sur le comportement hydrique et la croissance du chêne pédonculé et du frêne cultivés en cases de végétation. *Ann. Sci. For.*, **40** (3), 251-264.
- BARTETE, 1891. — Recherches sur le mode d'accroissement des chênes de taillis-sous-futaie. *Rev. Eaux et Forêts*, sept. 1891, 393-405.
- BOWERSOX T.W., WARD W.W., 1972. Prediction of oak site index in the ridge and valley region of Pennsylvania. *For. Sci.*, **18** (3), 192-195.
- CURTIN R.A., 1970. Dynamics of tree and crown structure in *Eucalyptus obliqua*. *For. Sci.*, **16** (3), 321-328.
- CURTIS R.O., 1970. Stand density measures : an interpretation. *For. Sci.*, **16** (4), 403-414.
- DECOURT N., 1973. — Production primaire, production utile : méthodes d'évaluation, indices de productivité. *Ann. Sci. For.*, **30** (3), 219-238.

- DELEPORTE P., 1977. *Essai d'une typologie des stations à frêne et à merisier en Nord-Picardie*. Mémoire de 3^e année, E.N.I.T.E.F., Nogent-sur-Vernisson.
- DEVAUCHELLE R., 1974. *Le frêne dans l'Est de la France. Influence des conditions de station sur sa croissance et certaines de ses caractéristiques*. Mémoire de 3^e année, E.N.I.T.E.F., Nogent-sur-Vernisson.
- DEVAUCHELLE R., LEVY G., 1977. Propriétés stationnelles et croissance du frêne dans l'Est de la France. *Ann. Sci. For.*, **34** (3), 231-244.
- DRAPER N.R., SMITH H., 1966. — *Applied regression analysis*. John Wiley and Sons, New York.
- DUCHAUFOUR P., 1970. *Précis de pédologie*. Masson et C^{ie}, Paris, 481 p.
- DUCHAUFOUR P., 1977. *Pédologie. I. - Pédogénèse et classification*. Masson et C^{ie}, Paris, 477 p.
- EINSPAHR D., MC COMB A.L., 1951. Site index of oaks in relation to soil and topography in Northeastern Iowa. *J. For.*, **49**, 719-723.
- GAISER N., MERZ Robert W., 1951. Stand density as a factor in estimating white oak site index. *J. For.*, août.
- GARBAYE J., LEROY Ph., LE TACON F., LEVY G., 1970. Réflexions sur une méthode d'études des relations entre facteurs écologiques et caractéristiques des peuplements. *Ann. Sci. For.*, **27** (3), 303-321.
- GRANEY D.L., 1977. *Site index predictions for red oaks and white oak in the Boston mountains of Arkansas*. U.S.D.A. Forest Service Research Paper SO-139.
- GUILLARD J., 1974. Comment se situe le bois dans la compétition entre matériaux ? *Rev. For. Fr.*, **4**, 316-318.
- HOLSTENER-JORGENSEN H., HOLMSGAARD E., 1975. Fertilisation and irrigation of young Norway spruce on sandy soil. *Forstl. Forsogsv. Danm.*, **34**, 263-270.
- JONES John R., 1971. *An experiment in modeling Rocky Mountain forest ecosystems*. U.S.D.A. Forest Service Research Paper RM-75.
- LARSEN W.A., MC CLEARY S.J., 1972. The use of partial residual plots in regression analysis. *Technometrics*, **14** (3), 781-790.
- LEFEVRE Y., 1980. *Le frêne dans la région Nord-Picardie : étude de stations, liaisons avec la productivité*. Mémoire de D.E.S. de pédologie présenté à l'Université de Nancy I.
- LE GOFF N., 1982. Productivité du frêne en région Nord-Picardie. A. - Courbes de croissance en hauteur. *Ann. Sci. For.*, 1982, **39** (3), 259-288.
- LE GOFF N., OTTORINI J.-M., 1979. Normes de densité pour les hêtraies du Nord-Est et du Nord-Ouest de la France. *Ann. Sci. For.*, 1979, **36** (4), 281-298.
- LOUCKS O.L., 1962. Ordinating forest communities by means of environmental scalars and phytosociological indices. *Ecol. Monogr.*, **32**, 137-166.
- MILLIER C., 1973. Méthodologie mathématique des études des liaisons station-production. *Ann. Sci. For.*, 1973, **30** (3), 351-366.
- MYERS C.A., VAN DEUSEN J.L., 1960. Site index of ponderosa pine in the Black Hills from soil and topography. *J. For.*, **58**, 548-585.
- OTTORINI J.-M., 1978. Aspects de la notion de densité et croissance des arbres en peuplement. *Ann. Sci. For.*, **35** (4), 299-320.
- OTTORINI J.-M., NYS C., 1981. Application des données de l'Inventaire Forestier National à l'étude de la production du pin sylvestre en Margeride. A. - Etude de la croissance en hauteur. *Ann. Sci. For.*, 1981, **38** (2), 223-236.
- OTTORINI J.-M., 1981. Application des données de l'Inventaire Forestier National à l'étude de la production du pin sylvestre en Margeride. B. - Etude de la production totale en volume. *Ann. Sci. For.*, 1981, **38** (4), 487-502.
- ROISIN P., 1967. *Contribution à l'étude du domaine phytoécologique atlantique et des hêtraies atlantiques d'Europe*. Thèse Fac. Sci. Agron., Gembloux, 3 t.
- SPRACKLING J.A., 1973. *Soil-topographic site index for Engelmann spruce on granitic soils in Northern Colorado and Southern Wyoming*. U.S.D.A. For. Serv. Res. Note RM-239.
- THILL A., 1970. *Le frêne et sa culture*. Les Presses agronomiques de Gembloux, Editions Duculot, Gembloux, 85 p.

Annexe 1

Les 10 stations climatiques définies en région Nord-Picardie

Zone climatique	Station (*) climatique	Températures moyennes mensuelles		Précipitations mensuelles	
		Poste météorologique	Période de référence	Poste météorologique	Période de référence
I	11	Creil (60)	1955-1977	Creil	1955-1977
	12	Compiègne (60)	1965-1978	Compiègne	1965-1978
II	21	Godenvillers (60)	1964-1977	Godenvillers	1951-1977
III	31	Abbeville (80)	1946-1977	Abbeville	1921-1977
IV	41	Saint-Quentin (02)	1946-1977	Saint-Quentin	1946-1977
	42	Saint-Quentin (02)	1946-1977	Bohain (02)	1946-1977
	43	Laon (02)	1953-1977	Laon	1952-1977
V	51	Maroilles (59)	1967-1977	Avesnelles (59)	1962-1977
	52	Eparcy (02)	1963-1977	Eparcy	1951-1977
	53	Eparcy (02)	1963-1977	Fourmies (59)	1962-1977

(*) Une station climatique peut être définie par les données de 2 postes météorologiques différents dans le cas où l'un des paramètres manque au poste choisi comme référence pour une ou plusieurs placettes d'étude (cf. figure 1 pour l'affectation des postes aux placettes).

Températures moyennes mensuelles et précipitations mensuelles des 10 stations climatiques

Zone climatique	Station climatique	Températures moyennes (*) mensuelles (°C)					Précipitations mensuelles (*) (mm)					
		Mai	Juin	Juillet	Août	Sept.	Mai	Juin	Juillet	Août	Sept.	Total
I	11	12,6	15,7	17,7	17,3	15,0	58	60	64	60	59	301
	12	13,1	16,3	18,0	17,9	15,0	64	55	55	44	56	274
II	21	12,8	15,3	17,1	17,1	14,2	54	57	46	55	54	266
	31	12,7	15,0	16,8	17,1	14,9	55	62	79	76	78	340
IV	41	12,6	15,4	17,2	17,1	14,1	54	62	58	64	66	304
	42	12,6	15,4	17,2	17,1	14,1	57	66	63	72	61	319
	43	13,5	16,5	18,6	17,8	15,4	55	53	57	65	58	288
V	51	11,5	14,4	16,9	16,6	13,4	61	66	63	65	62	317
	52	11,9	15,0	16,7	16,4	13,6	64	69	69	75	75	352
	53	11,9	15,0	16,7	16,4	13,3	64	71	75	82	74	366

(*) D'après les données de la Météorologie Nationale.

Annexe 2

Situation géographique des placettes de frêne de l'étude en région Nord-Picardie

Région climatique	Station climatique		N° du massif fig. 1	Situation du massif	Département	N° des placettes
	N°	Symbole fig. 1				
I	11	◆	1	Bois à Cires-lès-Mello	60	105, 107, 108
	12	◇	2	Bois à Chiry-Ourscamps	60	89, 90
	21	●	3	Bois à Baugy	60	100, 101, 102, 202, 103
II	21	●	4	Bois à Coullemelle	80	93, 95, 96
	41	▲	5	Bois à Templeux-la-Fosse	80	50, 51, 52
	41	▲	6	Bois des Vaux à Mois-lains	80	65, 72, 73, 74, 75
III	31	○	7	Entre-deux-Bois à Long	80	38, 390
	31	○	8	Bois Jean-Marc à Vignacourt	80	35, 37, 360
	31	○	9	Bois à Vauchelles-les-Authie	80	69, 70, 71
IV	41	▲	10	Bois de la Tombelle	02	29, 30, 290
	41	▲	11	Bois de la Cailleuse à Lemée	02	120, 121
	42	△	12	Bois Proyard à Busigny	59	169, 170, 171, 173, 174
V	43	▼	13	Bois à l'Allemant	02	300, 301, 302
	51	▽	14	Massif du Nouvion	02	1
	52	■	15	Bois de Leschelles	02	150
	53	□	16	Forêt de Trelon	59	13, 14, 15
	53	□	17	Bois de la Garde de Beugnies à Semousies	59	23, 24, 25