L'ÉPICÉA COMMUN (*PICEA EXCELSA*)
SUR LES PLATEAUX CALCAIRES
DE L'EST DE LA FRANCE.
ESSAI DE PRÉVISION DE LA PRODUCTION A L'AIDE
DE DÉTERMINATIONS PÉDOLOGIQUES SIMPLES

N. DECOURT et F. LE TACON

avec la collaboration technique de Maryse BITSCH,
D. BOUCHARD, Françoise GEORGES, F. MICHAUX,
Danielle SALMON et A. TISSERAND

*Station de Sylviculture et Production,
Station de Recherches sur les Sols forestiers et la Fertilisation,
Centre national de Recherches forestières, 54 - Nancy
Institut national de la Recherche agronomique*

RESUME

Dans la région des plateaux calcaires de l'est de la France, nous avons cherché à déterminer les potentialités de l'épicéa en fonction des caractéristiques du sol.

En divers points choisis de manière à couvrir la gamme complète des sols de la région, nous avons effectué à la fois des mesures dendrométriques et des mesures des caractéristiques du sol.

En tous les points, nous avons mesuré, dans des microplacettes, un indice de productivité : la hauteur dominante à 50 ans.

Des placettes plus grandes (semi-permanentes), et moins nombreuses, ont permis de calculer la relation entre cet indice et la production totale en volume.

Nous avons vérifié que les caractéristiques dendrométriques mesurées dans les microplacettes ne différaient pas de celles mesurées dans les placettes semi-permanentes.

Selon les milieux, la production moyenne en $m^3/ha/an$ à 50 ans peut varier de 3,8 m^3 à 16 m^3 avec des extrêmes de 1,6 à 19 m^3 .

Nous avons pu établir des règles simples permettant de prévoir la production de l'épicéa en fonction de certaines caractéristiques des sols (teneur en calcaire total de l'horizon A_1 , teneur en matière organique, épaisseur de l'horizon A_1 , disponibilité en eau et profondeur de décarbonatation).

Nous avons également essayé de définir le comportement de l'épicéa vis-à-vis du calcium et du calcaire. L'épicéa n'est pas une essence calcifuge stricte. Sa production n'est pas affectée par une disponibilité élevée du sol en calcium. Par contre, elle dépend de la présence du calcaire. Ce caractère calcarifuge est très atténué par une bonne alimentation en eau. De même, la matière organique apparaît, mais à un degré moindre, comme un antidote du calcaire.

INTRODUCTION

Nous devons avoir la possibilité de prévoir la production de nos principales essences en fonction des caractéristiques du milieu, si nous voulons effectuer un choix judicieux des essences à utiliser dans la plupart des grandes régions forestières françaises.

Or, pour l'instant, nous n'avons, il faut bien le reconnaître, que des connaissances empiriques et assez vagues pour orienter ce choix.

C'est dans ce contexte général que se place cette étude de l'épicéa sur les plateaux calcaires de l'Est. Nous nous attacherons ici à déterminer les possibilités de production de l'épicéa dans cette région, et à essayer d'expliquer les variations de production en fonction de caractères du sol simples et facilement mesurables.

Nous voulons ainsi donner aux praticiens un outil commode, leur permettant de prévoir les possibilités de l'épicéa avec une précision suffisante, dans n'importe quel type de station de cette région, sans avoir à effectuer d'analyses coûteuses et complexes.

Ultérieurement nous pourrons donner, lorsque tous les résultats de l'enquête en cours auront été dépouillés, des informations plus complètes concernant l'épicéa et les autres essences utilisables.

I. — GENERALITES

1.1. — *Limites géographiques de la région étudiée*

Il s'agit d'un arc de cercle s'appuyant au sud sur le Morvan et au nord sur le massif ardennais. Cet arc de cercle englobe du sud au nord le plateau de Langres, le Châtillonnais, la côte des Bars, le Bassigny, le Xaintois, les côtes de Moselle et les côtes de Meuse. En fait, les latitudes extrêmes que nous avons atteintes sont celles de Montbard au sud et celle de Verdun au nord. A l'est, nous n'avons pas dépassé Nancy, tandis qu'à l'ouest, les stations les plus extrêmes sont situées dans les environs de Vitry-le-François.

1.2. — *Le climat*

Le climat est à caractère semi-continental. Bien que l'altitude ne soit pas très élevée puisqu'elle est comprise entre 250 et 400 m, la moyenne du mois de janvier est inférieure à 0°. Les étés sont chauds et la moyenne du mois de juillet peut atteindre et même dépasser 18°. Les précipitations sont importantes et maximales sur les sommets des plateaux. Elles sont comprises entre 750 et 1 000 mm et assez bien réparties sur toute l'année.

1.3. — *Les roches-mères*1.3.1. *Le substratum secondaire.*

Dans la région que nous avons délimitée, il existe quatre grands types de roches-mères secondaires qui sont des grès, des argiles, des marnes et des calcaires. Nous

avons exclu de cette étude toutes les roches-mères non carbonatées, c'est-à-dire tous les grès (grès rhétien et gaize cénomaniennne) et les argiles (lias inférieur, callovien et oxfordien, crétacé inférieur).

De plus, nous avons exclu tous les affleurements marneux horizontaux, où se développent des sols hydromorphes, qui font l'objet d'une étude similaire mais séparée.

Nous avons donc installé des points d'étude sur les roches-mères suivantes : marnes du Keuper supérieur, marnes bajociennes, marnes oxfordiennes, marnes séquanien, calcaires marneux du portlandien, calcaires bajocien, bathonien, argovien, rauracien, séquanien et portlandien, craie turonienne.

Quatre-vingts pour cent des affleurements calcaires étant constitués par les deux grandes formations du Jurassique moyen (bajocien et bathonien) et du Jurassique supérieur (argovien, rauracien et séquanien), la majeure partie de nos observations ont porté sur ces affleurements.

1.32. *Les formations récentes.*

Le substratum secondaire est en partie recouvert par des formations récentes tertiaires ou quaternaires qui ont une très grande importance. Nous pouvons distinguer la terra fusca, les limons, les alluvions anciennes, la grouine, les colluviums et les alluvions récentes. Nous ne parlerons pas des alluvions qui sont exclusivement occupées par l'agriculture.

La terra fusca. — Pendant une grande partie du tertiaire, les calcaires secondaires ont été dissous sur plusieurs mètres ou plusieurs dizaines de mètres. Le carbonate de calcium a été dissous et entraîné par les eaux de drainage, alors que les impuretés non solubles du calcaire, essentiellement de l'argile, se sont accumulées et sont encore en place si l'érosion ne les a pas entraînées. Ces impuretés constituent l'argile de décarbonatation. Cette argile a été soumise, après la disparition des carbonates, à plusieurs phases successives de pédogénèse en climat chaud à la fin du tertiaire et au début du quaternaire. Il y a eu rubéfaction, c'est-à-dire passage des oxydes de fer sous forme déshydratée, ce qui a donné à cet oxyde une couleur rouge. Sous l'action des climats moins chauds qui ont succédé et sous l'action du climat actuel, il y a eu en partie dérubéfaction et retour, au moins en surface, des oxydes de fer sous forme hydratée. On a donné le nom de terra fusca à cette argile de décarbonatation qui a subi l'action de très nombreuses phases de pédogénèse. Cette terra fusca recouvre tous les calcaires quels qu'ils soient.

Les limons. — Sur la terra fusca existent parfois des placages de limons éoliens quaternaires d'âge indéterminé. Très souvent, les phénomènes de solifluxion et de cryoturbation ont provoqué un mélange des limons et de la terra fusca. Il devient alors difficile de distinguer ces deux formations.

Les alluvions anciennes. — Sur les différents plateaux, il peut exister des alluvions anciennes datant de la fin du tertiaire ou du début du quaternaire. Elles sont toujours mélangées aux limons et à la terra fusca et forment des traînées sporadiques de peu d'étendue.

La grouine. — La grouine est un amas de cailloutis calcaires anguleux. On la rencontre soit sur les pentes, soit sur les plateaux. La grouine a une origine périglaciaire, mais sa genèse n'est pas bien connue.

Les colluviums. — Sur toutes les pentes, l'érosion entraîne la terra fusca qui se mélange avec le calcaire du substratum sous-jacent et redevient carbonatée. Dans les bas-fonds, il y a accumulation de ce mélange sur des épaisseurs souvent importantes.

1.4. — Problèmes forestiers des régions calcaires de l'Est

Ces formations calcaires intéressent une dizaine de départements, et d'après une étude de la Société d'Aménagement des friches de l'Est, plus de 1 500 000 ha de forêts, auxquels on peut ajouter 300 000 ha de friches. Le taux de boisement est de l'ordre de 30 à 35 %. Seuls, les Vosges gréseuses et cristallines, les landes de Gascogne et le Var ont un taux de boisement supérieur.

L'essence fondamentale de cette région est un feuillu, le hêtre qui fournit un produit de haute qualité technologique et de grande valeur. Les hêtres des plateaux calcaires de l'Est sont les plus recherchés par l'industrie française du déroulage.

95 % des hêtraies sont sous-productives en raison de leur mode de traitement en taillis sous futaie.

La conversion en futaie est à la base de la plupart des aménagements des forêts soumises.

Le problème est de déterminer, en fonction des caractéristiques du milieu, les potentialités du hêtre traité en futaie et les caractéristiques technologiques du bois.

Dans les stations où ces potentialités seraient jugées insuffisantes, on pourrait envisager d'utiliser des résineux.

De même, l'utilisation des résineux est fréquente dans le reboisement des friches, dans la reconversion des forêts pauvres en réserves où la régénération naturelle ne peut plus être obtenue, et dans de nombreuses forêts particulières où le résineux pourrait assurer un revenu à beaucoup plus court terme que le hêtre. Le recours aux résineux pour la mise en valeur des forêts pauvres en réserves n'est cependant pas inéluctable. Il semble, en effet, que les plantations de hêtre ne posent pas de problèmes techniques insurmontables.

L'emploi de résineux en zone calcaire pose de nombreux problèmes. En effet, il est admis, contrairement à ce que l'on observe pour la plupart des plantes cultivées, que les conditions optimales de croissance de la majorité des essences résineuses se situent à un pH nettement inférieur à la neutralité (pH 5 à 5,5) et que la présence de calcaire est extrêmement nuisible.

Pour ces raisons les surfaces actuellement enrésinées sont faibles et estimées par la S.A.F.E. à 200 000 ha. La rentabilité de ces boisements est peu élevée et n'incite guère à l'augmentation des surfaces enrésinées. Deux résineux seulement sont utilisés de manière importante : le Pin sylvestre qui est de plus en plus abandonné et le Pin noir d'Autriche qui, s'il assure un rendement en volume convenable, donne des produits de faible valeur (actuellement 25 F le mètre cube sur pieds en moyenne).

En fonction de ces données, les grandes lignes de notre programme de travail seront simples. Il s'agit d'étudier, d'une part, les potentialités du hêtre dans les différentes stations et, d'autre part, celles des divers résineux utilisables. Il s'agit, en particulier, de rechercher un résineux assurant un revenu plus conséquent que celui fourni par le Pin noir, ou au moins de déterminer à partir de quels critères du milieu on

peut raisonnablement remplacer le Pin noir, qui n'a probablement pas de concurrent possible dans les stations les plus défavorables.

Comme résineux de remplacement, nous pouvons penser à l'Épicéa et au Douglas.

En ce qui concerne le Douglas, nous nous heurtons à un inconvénient majeur. En effet, il n'existe pratiquement pas de peuplements adultes de Douglas. Nous pensons cependant pouvoir tirer parti de jeunes plantations effectuées depuis une dizaine d'années.

L'épicéa, jusqu'à présent, n'a guère été utilisé dans cette région. Il y existe cependant un nombre suffisant de peuplements pour nous permettre de travailler efficacement.

L'épicéa nous ayant paru, dès le début de notre enquête, avoir des possibilités intéressantes dans de telles conditions de milieu, nous avons décidé de l'étudier en priorité. Il aurait été peut-être plus logique de débiter par le hêtre mais en raison des difficultés importantes posées par cette essence, notamment dans la mesure d'indices de production, nous avons préféré commencer par un résineux.

II. — METHODOLOGIE

2.1. — *Exposé de la méthode par enquête*

Nous avons utilisé une méthode générale de travail dont nous allons brièvement rappeler les principes.

Les potentialités de production d'une station sont en premier lieu fonction des caractéristiques climatiques. Les facteurs de climat étant très difficiles à mesurer, il est préférable de les éliminer si l'on veut pouvoir expliquer les variations de production à l'intérieur d'une région donnée. Il est donc nécessaire de choisir une région aussi homogène que possible au point de vue climatique.

A l'intérieur de la région ainsi délimitée, les possibilités de production dépendront principalement, d'une part des caractéristiques génétiques du matériel végétal utilisé et, d'autre part, des caractéristiques du sol. Il est impossible de faire la part de l'influence des facteurs génétiques. Nous admettons que la variation de production résiduelle, c'est-à-dire la variation non explicable par les caractéristiques du sol, correspond pour sa plus grande part, à la variabilité génétique.

Le premier travail à effectuer pour déterminer l'influence des facteurs du sol, qui seuls nous intéressent ici, est de choisir un certain nombre de points d'étude de façon à couvrir la gamme complète de sols ou de stations de la région choisie.

En chacun de ces points, nous effectuons trois catégories essentielles de déterminations :

— déterminations des caractéristiques du peuplement (production ou composantes de la production),

— déterminations des caractéristiques du sol,

— déterminations par analyses foliaires des caractéristiques de nutrition qui intègrent à la fois les propriétés du sol et certaines caractéristiques physiologiques de l'arbre.

A partir de ces diverses données, nous essayons de dépouiller l'action des divers facteurs du milieu sur les caractéristiques des peuplements, soit par des procédés simples faisant appel par exemple à des notions synthétiques comme le type génétique de sol, soit par des procédés beaucoup plus complexes basés sur des analyses statistiques multivariées.

Dans tout ce qui va suivre, nous n'allons utiliser que des procédés très simples d'investigation qui nous permettront malgré cette simplicité, d'aboutir à un schéma satisfaisant du comportement de l'épicéa vis-à-vis de certains facteurs du sol.

Nous n'abordons le problème de manière plus élaborée que dans un article ultérieur.

FIG. 1. — Répartition géographique des placettes
FIG. 1. — Geographic distribution of plots

2.2. — Mesures dendrométriques

On a défini un indice de productivité permettant une évaluation rapide et facile du potentiel productif des stations. Cet indice permet déjà un classement des stations, on l'évalue dans des placettes suffisamment petites pour pouvoir être considérée comme homogène (microplacettes). Le potentiel productif devra cependant être chiffré en mètre-cube. Cela peut se faire à l'aide d'une table de production valable pour la région et l'essence étudiée, ou à partir d'un certain nombre de placettes semi-permanentes.

2.2.1. — Hauteur dominante et production.

Le choix de la hauteur dominante à un âge donné, comme indice de productivité, ou indice stationnel (Site Index des auteurs anglo-saxons), s'appuie sur un très grand nombre d'observations faites dans les stations de recherches forestières pour les essences les plus diverses, et dans les conditions les plus variées (PARDÉ J., 1961).

Ce choix s'appuie sur deux observations :

— la croissance en hauteur est indépendante du traitement sylvicole, et notamment la hauteur de l'étage dominant ne dépend pas de ce traitement, sauf dans le cas d'éclaircies par le haut excessives, qui ne sont pas pratiquées du reste dans les peuplements qui nous intéressent ici ;

— la production totale en volume d'un peuplement est fonction de sa seule hauteur (loi de EICHORN élargie). Cette loi est valable pour une espèce donnée, et dans une région donnée, caractérisée par des conditions climatiques relativement homogènes (Wuchsgebiet).

La première observation semble admise par tous les chercheurs forestiers. La seconde est plus contestée. Plusieurs auteurs (ASSMANN E. et FRANZ F., 1965 ; BRADLEY R. T., CHRISTIE J., JOHNSTON D. R., 1966), admettent qu'il s'agit d'une loi approchée et qu'en fait, pour une même hauteur dominante, on peut distinguer plusieurs « niveaux de production ». De même, alors que les deux observations signalées ci-dessus impliquent que la production totale en volume ne doit pas dépendre du traitement, il semble qu'au moins pour certaines essences, cette production diminue légèrement lorsque l'intensité des éclaircies augmente. Malgré ces quelques réserves, il semble bien que la hauteur dominante à un âge donné constitue le meilleur indice de productivité dont on dispose actuellement.

Quelle définition de la hauteur dominante convient-il de choisir ? Il existe plusieurs définitions de cette hauteur. Toutes finalement reviennent à évaluer la hauteur moyenne des arbres de l'étage dominant.

Dans les tables de production françaises, comme dans celles de plusieurs pays européens, on définit généralement la hauteur dominante (HO), comme la hauteur de l'arbre de surface terrière moyenne des 100 plus gros arbres à l'hectare. Dans les microplacettes, on a évalué la hauteur dominante (HDOM), en faisant la moyenne des 5 plus gros arbres. Nous verrons (§ 3.2) que ces deux hauteurs sont très voisines, pour les peuplements qui nous intéressent, du fait sans doute de la forme de la courbe reliant la hauteur des arbres à leur circonférence, sa pente étant faible dans la zone des fortes circonférences.

On prendra donc ici, comme indice de productivité, la hauteur dominante (HO) à l'âge de 50 ans des peuplements considérés.

2.2.2. — Les placettes semi-permanentes.

Ces placettes servent de bases à l'évaluation de la production, grâce notamment à des mesures de volumes précises. Leurs modes d'installation et de calcul ont déjà été décrits en détail dans une instruction de la Station de Sylviculture et de Production du C.N.R.F. (DECOURT N., 1966), ainsi que dans diverses publications du C.N.R.F. (DECOURT N., 1965). Nous n'y reviendrons pas. Elles peuvent être utilisées pour donner des ordres de grandeur, légèrement par défaut, du volume produit (OSWALD H., 1969), ou lorsqu'elles sont en nombre suffisant, pour construire une table de production (DECOURT N., 1965, 1967, 1969).

Pour pouvoir les installer, il faut disposer de peuplements de surface suffisante (de 10 à 50 ares plus une zone d'isolement de l'ordre de 10 à 15 m). Ces peuplements ne sont pas toujours suffisamment bien répartis sur les différentes stations. De plus, si on étudie en un point les conditions pédologiques, ces conditions propres au peuplement qui entoure immédiatement ce point ne sont pas toujours homogènes dans un peuplement de l'ordre de 50 ares. Enfin, bien que relativement simples, ces placettes restent assez coûteuses à installer.

Sur les plateaux calcaires du Nord-Est, nous en avons mis en place 32. Elles complètent un ensemble plus important et mieux réparti de microplacettes.

2.23. — *Microplacettes.*

Pour les raisons rappelées ci-dessus, il est nécessaire de travailler sur la plus petite surface possible compatible avec la mesure d'un indice de production, de façon à éliminer au maximum les risques d'hétérogénéité du sol.

D'autre part, les mesures effectuées dans une placette temporaire sont longues et nécessitent de grimper à une vingtaine ou une trentaine de tiges. Enfin, il n'est pas nécessaire d'avoir accès au volume sur pieds; nous pouvons nous contenter d'utiliser la hauteur dominante comme indice de production.

Pour ces diverses raisons, nous nous sommes donc tournés vers des placettes ponctuelles (3 à 5 ares), permettant d'avoir accès indirectement à la production par la mesure de la seule hauteur dominante. Pour simplifier encore l'installation de ces placettes, nous avons choisi un nombre d'arbre constant quel que soit l'âge du peuplement, en l'occurrence 50 arbres. Ceci nous a permis d'éviter de mesurer une surface. Nous avons choisi comme définition de la hauteur dominante, la moyenne arithmétique des hauteurs des 10 % plus gros arbres (soit 5 arbres).

Par analyse de tige de l'arbre dont la hauteur était la plus proche de la hauteur dominante, nous avons reconstitué approximativement pour chaque microplacette, l'évolution de la hauteur dominante dans le temps. De nombreuses études montrent en effet, notamment dans le cas de l'*Epicéa commun*, que la densité des peuplements ne modifie pas (ou très peu) la croissance en hauteur des arbres dominants et que, de plus, la position dominante est acquise très tôt dans la vie du peuplement.

Par ce procédé, nous pouvons ramener toutes les hauteurs dominantes à un même âge et comparer ainsi sans problème toutes les microplacettes.

Nous avons finalement retenu 81 microplacettes et 32 placettes temporaires.

2.3. — *Détermination des caractéristiques pédologiques*

Avant l'installation définitive de chaque placette, nous vérifions tout d'abord à la tarière, l'homogénéité du sol. Nous faisons ensuite ouvrir deux fosses jusqu'à la profondeur maximale d'enracinement. Ce n'est qu'après vérification de l'identité des deux fosses que nous décidons de l'installation de la placette. Un des deux profils est décrit horizon par horizon. Deux échantillons sont ensuite prélevés dans chaque horizon pour la détermination des caractéristiques physiques et chimiques. Nous n'insisterons pas sur toutes ces déterminations dont nous parlerons dans un prochain article. En effet, ici, nous nous sommes volontairement limités à quelques déterminations simples : profondeur de décarbonatation, teneur en calcaire total, teneur en matière organique, disponibilité en eau. Nous n'utiliserons ici que la détermination du calcaire total (détermination en calcimètre Bernard). La détermination du calcaire actif est en effet à la fois difficile et sujette à caution dans les horizons organiques à teneur faible en calcaire actif, en raison de l'interaction de la matière organique et du calcium échangeable.

La matière organique a été dosée par la méthode Anne. L'évaluation de la capacité de rétention en eau utile a été effectuée par détermination de la densité apparente de l'humidité équivalente, du point de flétrissement permanent, du pourcentage de cailloux et de la profondeur maximale d'enracinement.

III. — RESULTATS

3.1. — *Table de production et liaison hauteur dominante. Production*

3.11. *Généralités.*

Nous avons admis (cf. § 2.21) que pour un large éventail d'intensités d'éclaircie, la production totale en volume d'un peuplement d'une essence donnée et dans une

région donnée est fonction de sa seule hauteur. Si l'intensité des éclaircies est suffisamment faible, c'est-à-dire si la densité du peuplement, mesurée par exemple par sa surface terrière, est suffisamment voisine de la densité correspondant au maximum de croissance, alors la production en volume est elle-même voisine du maximum possible sur la station considérée. C'est ce maximum qu'on peut relier à la hauteur dominante indépendamment de l'âge et de la fertilité de la station, c'est-à-dire finalement indépendamment du temps qu'il a fallu pour obtenir cette production.

Cette relation nous permettra de transformer les différences de hauteur constatées entre les différentes stations, en différences de production potentielle, ce qui bien sûr est d'un plus grand intérêt pratique.

Cette relation est généralement tirée d'une table de production, lorsqu'elle existe. Dans d'autres cas on peut la tirer des données fournies par un ensemble de placettes permanentes, dont les croissances, notamment en hauteur et en volume, ont été mesurées périodiquement et dont, si elles sont suivies dès l'origine, la production totale est ainsi connue.

Dans le cas où l'on ne dispose que de placettes semi-permanentes (cf. § 2.22) on peut utiliser deux types de méthodes. Des méthodes directes et des méthodes indirectes.

3.12. *Les méthodes directes.*

Les méthodes directes consistent à essayer d'obtenir, au moins pour un certain nombre de placettes, une évaluation de la production totale en ajoutant au volume mesuré sur pied, le volume des arbres enlevés en éclaircie. Ce volume est évalué, plus ou moins bien, à partir de la dimension des souches demeurant dans la placette. La méthode utilisée est décrite par ailleurs (PARDE J., 1961 ; DECOURT N., 1966). En plus d'une certaine imprécision ces méthodes ont l'inconvénient de donner des valeurs par défaut, notamment à cause de la disparition d'une partie plus ou moins importante des souches, traces des anciennes éclaircies.

Ces valeurs sont donc d'autant moins certaines que le peuplement est plus âgé et qu'il est plus clair.

Un peuplement clair notamment peut correspondre à un peuplement éclairci une seule fois et très tôt, ou bien planté à large espacement et non éclairci, et dans ce cas le volume sur pied sera voisin de la production totale ; mais il peut également correspondre à un peuplement éclairci fréquemment et assez récemment, et dans ce cas le volume sur pied sera très différent de la production totale. La « récupération » de l'éclaircie la plus récente pourra demeurer insuffisante pour permettre l'évaluation correcte de la production totale.

Dans le cas qui nous occupe ici, et malgré le faible nombre de placettes disponibles, nous avons essayé d'effectuer cette évaluation directe. Pour cela on a retenu seulement les placettes contenant de nombreux arbres et des souches, traces d'éclaircies récentes, ou au contraire pas de souches du tout, preuve d'absence d'éclaircie. La production totale a été estimée comme la somme du volume sur pied (arbres secs inclus) et du volume correspondant aux souches, quand il y en avait. Nous avons retenu également trois placettes d'âge inférieur à 40 ans et pour lesquelles le volume

total (éclaircies incluses) concernait plus de 2 000 tiges. La douzaine de placettes triées de façon objective a permis l'ajustement d'une première relation :

$$\begin{aligned}\text{Log. } V_T &= 1,041657 + 1,746031 \cdot \text{Log. } H_g & (1) \\ R &= 0,915 ; \quad s = 0,119\end{aligned}$$

R est le coefficient de corrélation et s l'écart type résiduel. Les logarithmes sont népériens.

Notons qu'une opération analogue portant sur 25 placettes d'Epicéa des basses Vosges, non situées sur terrain calcaire, a permis d'obtenir une équation non significativement différente de celle-ci.

Une liaison statistique linéaire très étroite existant d'autre part entre la hauteur moyenne H_g et la hauteur dominante H_o pour l'ensemble des placettes étudiées, on passe très facilement d'une relation en H_g à une relation en H_o . On a, en effet :

$$H_g = 5,728 + 1,12755 H_o \quad R = 0,985 ; s = 0,97 \quad (2)$$

3.13. Les méthodes indirectes.

Ces méthodes sont voisines de celles utilisées pour la construction de tables de production à l'aide de placettes semi-permanentes seulement. Ces tables de production peuvent être calculées pour des intensités d'éclaircies variées, à condition bien sûr de rester dans les conditions des observations faites dans les placettes elles-mêmes. On conçoit donc qu'en fixant cette intensité à un niveau de plus en plus faible, on puisse atteindre, par le calcul, le niveau de production maximal. En fait, il n'est pas nécessaire d'utiliser un « modèle » complet de construction de table, puisqu'il suffit de s'appuyer sur les relations fondamentales reliant la circonférence moyenne C_g à la hauteur moyenne et au nombre de tiges sur pied.

On peut, en s'appuyant sur ces relations calculer la surface terrière optimale et le volume optimal sur pied correspondant à la production totale maximale, et cela pour une hauteur donnée. On en déduit la relation existant entre cette production totale et la hauteur.

Le détail de cette méthode sera exposé par ailleurs, mais pour les 28 placettes disponibles ici, l'équation obtenue se présente ainsi :

$$V_T = 0,02001 \frac{(3,94184 + 3,85645 H_g)^2}{H_g} \quad (3)$$

La figure 2 montre que la courbe correspondant à cette équation (3) est très voisine de celle obtenue par la méthode directe, bien que la méthode utilisée ici soit totalement différente.

Notons aussi qu'elle est très voisine de celle qu'on peut tirer des données de la table de production de ZIMMERLE, table valable justement pour les peuplements d'épicéa du Württemberg, c'est-à-dire pour la région la plus voisine de la nôtre.

L'équation (3) a été retenue ainsi que la (2) pour évaluer les différences de production correspondant aux différences de hauteur dominante constatées dans les peuplements étudiés.

FIG. 2. — *Liaison production totale, hauteur moyenne*FIG. 2. — *Total yield in relation to mean-height*

3.2. — *Valeur dendrométrique des microplacettes*

3.2.1. *Position du problème et définition.*

Les « microplacettes » sont assises autour des fosses pédologiques. 32 d'entre elles sont à l'intérieur d'une placette semi-permanente. Les âges sont compris entre 33 et 107 ans, les hauteurs dominantes entre 17 et 33 m. La question posée est la suivante : *les microplacettes peuvent-elles remplacer les placettes semi-permanentes pour l'évaluation de certains paramètres descriptifs des peuplements et notamment pour l'évaluation de l'indice de productivité ?*

Pour y répondre, on a comparé un certain nombre de ces paramètres (X) mesurés dans les placettes semi-permanentes, à ces mêmes paramètres mesurés dans les micro-placettes (X'). Ces paramètres sont les suivants :

- HDOM, HDOM' : moyenne arithmétique des hauteurs des 10 % plus gros arbres,
- CM, CM' : moyenne arithmétique des circonférences de tous les arbres,
- CG, CG' : circonférence de l'arbre de surface terrière moyenne de tous les arbres,
- CDOM, CDOM' : moyenne arithmétique des circonférences des 10 % plus gros arbres,
- CO : circonférence de l'arbre de surface terrière moyenne des 10 % plus gros arbres,
- HO : hauteur de l'arbre de circonférence CO, lu sur la courbe donnant la hauteur d'un arbre en fonction de sa circonférence.

CO et HO n'ont été évaluées que dans les placettes semi-permanentes, les surfaces des microplacettes n'étant pas connues.

Notons qu'on a vérifié que les mesures faites dans les deux types de placettes étaient parfaitement comparables. On a notamment corrigé les mesures à partir des courbes d'étalonnage des dendromètres utilisés et on s'est assuré qu'il n'y avait pas de différence entre les opérateurs ayant effectué les mesures.

3.22. Méthode de comparaison.

On dispose pour chaque paramètre de 32 couples de données. La méthode qui s'impose dans ce cas, consiste à étudier les différences $d = X' - X$.

On compare le rapport $t = \frac{d - 0}{s_d}$, où s_d est l'écart-type de d , à sa valeur limite pour un seuil de probabilité donné (ici 5 %). La répartition des d doit être normale et de moyenne nulle. S'il y a une différence significative entre les X' et les X , d donne une évaluation du biais et s_d , écart-type de d , donne une évaluation de l'erreur-type commise.

La normalité a été étudiée en calculant les coefficients de PEARSON ($\sqrt{b_1}$) et de GEARY (a).

Le test t du reste connu comme très « robuste », résistant bien à de légers écarts à la normalité. Il convient particulièrement bien comme le remarque DAGNELIE (1964) à des séries de données fortement corrélées, ce qui est le cas ici.

3.23. Résultats des comparaisons.

Les résultats figurent dans le tableau 1.

On constate qu'au seuil de 5 % il n'y a pas de différences significatives entre les évaluations faites dans les « microplacettes » et les mêmes évaluations faites dans les placettes semi-permanentes. L'absence de biais est cependant liée à une forte dispersion des résultats, comme le montrent les valeurs de s_d . Cela explique que, non seulement on ne trouve pas de différence entre mesures homologues, HDOM' et HDOM ou CG' et CG par exemple, mais que bien souvent on n'en trouve pas non plus entre

mesures de paramètres différents, quoique bien sûr très analogues. C'est le cas entre CDOM' et CO et entre HDOM' et HO.

On peut cependant en conclure que, compte tenu de l'imprécision propre aux paramètres utilisés, les microplacettes sont bien représentatives des peuplements qui les entourent, peuplements dont les placettes semi-permanentes plus grandes, étaient censées donner une représentation plus correcte.

TABLEAU 1

Comparaison des paramètres mesurés dans les placettes semi-permanentes et dans les microplacettes (nombre de couples : 32)

TABLE 1

Comparisons between the parameters measured in semi-permanent-plots and in microplots (number of pairs : 32)

$d = X'-X$	d	s_d	s_d	t	a	b_1
CG'-CG	0,72	5,678	1,004	0,72 NS	0,84 NS	0,32 NS
CM'-CM	0,54	5,471	0,967	0,56 NS	0,80 NS	0,51 NS
CDOM'-CDOM ..	— 2,50	8,094	1,431	1,75 NS	0,82 NS	— 0,37 NS
CDOM'-CO	— 1,23	10,531	1,862	0,66 NS	0,79 NS	— 0,06 NS
HDOM'-HDOM ..	0,39	1,192	0,211	1,84 NS	0,79 NS	— 0,66 NS
HDOM'-HO ...	— 0,27	1,154	0,204	1,32 NS	0,84 NS	— 0,85 *

C'est le cas notamment pour l'évaluation de la hauteur de l'étage dominant (HO et HDOM), paramètre très important dans ce genre d'étude, puisqu'il sert de base à la détermination de l'indice de productivité.

On pourra donc s'appuyer sur un ensemble de microplacettes pour effectuer un classement des stations. Mieux, on pourra, à l'aide de la hauteur dominante évaluée dans ces microplacettes, entrer dans la table de production et ainsi chiffrer en mètre cube par hectare le potentiel productif de ces stations.

Ce résultat n'est, bien sûr, valable que dans le cas de plantations d'épicéa homogènes, relativement denses, sur les plateaux calcaires du Nord-Est. Cependant, il peut inciter à développer, tout en la vérifiant, la méthode d'enquête à base de microplacettes, pour d'autres types de peuplements et dans d'autres régions.

3.3. — Détermination des groupes de sols

Si nous n'utilisons pas de techniques d'analyses statistiques multivariées pour mettre en évidence l'influence des caractéristiques du sol sur la croissance, la seule manière de procéder est de classer les sols par ensemble et de rechercher si la production est significativement différente d'un ensemble à l'autre. C'est ce dernier procédé que nous avons utilisé. Pour classer les sols des diverses microplacettes, nous avons le choix entre deux possibilités. Nous pouvions soit utiliser une classification par type génétique, soit une classification faisant intervenir d'autres critères. Nous avons préféré

éviter la classification génétique. En effet, les critères qui peuvent être utilisés dans ce type de classification ne sont pas toujours en liaison avec la fertilité. D'autre part, la classification des sols calcaires est assez délicate et est susceptible d'être modifiée.

Enfin, certaines placettes ont été installées sur des sols anciennement cultivés qui s'intègrent assez mal dans une classification génétique basée sur les propriétés des sols naturels.

Nous avons donc préféré utiliser une classification basée sur les critères simples définis précédemment, c'est-à-dire profondeur de décarbonatation, teneur en calcaire total, teneur en matière organique, possibilités d'alimentation en eau, présence ou absence d'un horizon (B). Il existe néanmoins une certaine analogie entre les ensembles que nous avons ainsi constitués et la classification génétique des sols développés sur roche-mère calcaire.

Deux grands ensembles de sols peuvent être facilement distingués suivant la présence ou l'absence de calcaire dès la surface.

L'ensemble 1 est caractérisé par l'existence de calcaire dès les premiers centimètres. Les sols de l'ensemble 2 sont caractérisés par l'absence de calcaire sur au moins une partie de leur profil.

Nous avons subdivisé chacun de ces grands ensembles en quatre sous-ensembles.

Sous-ensemble 11.

Ce sous-ensemble est caractérisé par les cinq critères suivants :

- teneur en calcaire total toujours supérieure à 10 % dès la surface (teneur moyenne des horizons A₁, de l'ordre de 30 %) ;
- horizon A₁ ayant moins de 14 % de matière organique (teneur moyenne de 9 %) ;
- horizon A₁ de faible épaisseur ; l'épaisseur de sol où la matière organique est supérieure à 5 %, n'excède jamais 15 cm (moyenne 11 cm) ;
- existence d'un horizon (B) en général épais ;
- réserve en eau utile relativement importante, supérieure à 100 mm sauf dans un cas (moyenne 150 mm).

Ces sols sont tous des sols bruns calcaires développés soit sur craie, soit sur marne, soit sur grouine, soit sur mélange de terra fusca et de calcaire. Ils ont tous été déboisés à une période récente, ce qui explique leur faible teneur en matière organique.

Sous-ensemble 12.

Le sous-ensemble 12 est également caractérisé par cinq critères :

- teneur en calcaire total toujours supérieure à 10 % dès la surface (teneur moyenne en calcaire total des horizons A₁ égale à 26 %) ;
- horizon A₁ ayant toujours plus de 14 % de matière organique (teneur moyenne 18 %) ;
- horizon A₁ très épais ; l'épaisseur de sol où la teneur en matière organique est inférieure à 5 %, est toujours supérieure à 20 cm (moyenne 36 cm) ;
- absence d'horizon (B), le profil est de type A/C.

L'horizon A_1 , très épais, repose directement sur la roche-mère. Deux sols appartenant à un groupe présentent néanmoins un début de brunification (horizon B de quelques centimètres).

— Les réserves en eau utile sont faibles, sauf pour les sols développés sur calcaire marneux. Dans l'ensemble, les réserves en eau utile sont inférieures à 100 mm (moyenne 90 mm).

Ce groupe, ainsi défini, correspond presque exactement aux rendzines humifères de la classification génétique. Tous les profils y sont de ce type sauf dans les deux ou trois où nous avons observé un début de brunification.

Sous-ensemble 13.

Le sous-ensemble 13 est caractérisé par les critères suivants :

- la teneur en calcaire total est toujours inférieure à 10 % en surface (teneur moyenne en calcaire total des horizons A_1 égale à 3 %) ;
- si la teneur en matière organique des horizons A_1 est relativement élevée (15 % en moyenne) par contre l'épaisseur de sol où la teneur en matière organique est supérieure à 5 % est de 15 cm en moyenne, donc nettement moins que dans le sous-groupe précédent ;
- il existe toujours un horizon (B) ;
- les réserves en eau utile sont variables ; elles peuvent être inférieures à 50 mm ou dépasser 150 mm (moyenne 120 mm).

Ce sous-ensemble est assez hétérogène au point de vue génétique et comprend des rendzines brunifiées humifères, des rendzines brunifiées et des sols bruns calcaires. La caractéristique essentielle commune à tous ces sols rassemblés dans ce sous-ensemble est la faible teneur en calcaire total des horizons supérieurs (teneur comprise entre 1 et 9 %).

Sous-ensemble 14.

La caractéristique essentielle de ce sous-ensemble de sol concerne les possibilités d'alimentation en eau.

- La capacité de rétention en eau utile ne descend en général pas au-dessous de 100 mm et est en moyenne de 160 mm.
- En plus de cette capacité de rétention en eau utile élevée, tous ces sols bénéficient d'apports d'eau supplémentaires en raison de leur position topographique. Ils sont tous situés dans des cuvettes ou des bas-fonds sur un colluvium épais. En plus des eaux de pluie, ces sols sont alimentés par les eaux de ruissellements. Même pendant les périodes sèches, il n'y a jamais de déficit en eau.

De plus, le drainage est excellent en raison du substratum sous-jacent calcaire qui est très filtrant. Nous n'avons observé que très rarement des traces d'hydromorphie dans ces profils.

Ces sols sont évidemment tous carbonatés dès la surface. Mais la teneur en calcaire des horizons A_1 est assez variable. Elle oscille entre 1 et 30 % et est en moyenne de 16 %.

Au point de vue génétique, ces sols sont hétérogènes ; ce sont soit des sols bruns calcaires colluviaux, soit des rendzines colluviales, soit des rendzines brunifiées colluviales.

Ensemble 2.

Tous les sols de l'ensemble 2 sont caractérisés, comme nous l'avons déjà dit, par l'absence de calcaire dans au moins la partie supérieure du profil. Nous avons subdivisé cet ensemble en tenant compte uniquement de la profondeur de décarbonatation :

- *Sous-ensemble 21* : sols décarbonatés sur moins de 15 cm.
- *Sous-ensemble 22* : sols décarbonatés sur plus de 15 cm et moins de 40 cm.
- *Sous-ensemble 23* : sols décarbonatés sur plus de 40 cm et moins de 100 cm.
- *Sous-ensemble 24* : sols décarbonatés sur plus de 100 cm.

Ces sols forment une série continue dont certaines propriétés varient dans le même sens que la profondeur de décarbonatation. Par exemple le pH est en moyenne dans les horizons A_1 de 6,8 pour le sous-ensemble 21, de 5,8 pour le sous-ensemble 22, de 5,7 pour le sous-ensemble 23 et de 5,2 pour le dernier sous-ensemble.

Il en est de même pour le taux de saturation des horizons A_1 qui est respectivement, pour ces quatre sous-ensembles de 100 %, 74 %, 75 % et 67 %.

La teneur en calcium échangeable de ces mêmes horizons A_1 suit évidemment la même variation puisqu'elle est dans l'ordre, en milliéquivalent pour 100 g de 45 25,5 18 et 14,8 (moyenne).

La capacité de rétention en eau utile augmente avec la profondeur de décarbonatation. Elle est en moyenne à peine supérieure à 100 mm pour les sous-ensembles 21 et 22 ; elle est supérieure en moyenne à 150 mm dans le sous-ensemble 23 et à 200 mm dans le sous-ensemble 24.

Il existe certaines distorsions entre nos sous-ensembles et la classification génétique des sols. Mais nous pouvons dire approximativement que lorsque nous passons du sous-ensemble 21 au sous ensemble 24, nous passons des rendzines brunifiées aux sols bruns calciques, puis aux sols bruns eutrophes, puis aux sols bruns lessivés et enfin aux sols lessivés.

3.4. — Potentialité des différents groupes de sols

A l'aide de la relation hauteur dominante-production totale établie précédemment, nous pouvons déterminer les potentialités des différents ensembles de sols. Nous obtenons ainsi la production moyenne, la production maximale et la production minimale observées sur chacun des ensembles ou sous-ensembles de sols.

Nous avons utilisé, pour le calcul de ces potentialités, les hauteurs dominantes déterminées dans les microplacettes.

Rappelons que les potentialités ainsi obtenues sont des potentialités maximales possibles, c'est-à-dire valables dans des peuplements parfaitement pleins et ayant fait l'objet d'une sylviculture appropriée, correspondant au rendement maximal en volume bois-fort tige ⁽¹⁾.

(1) Volume de la tige sur écorce, avec découpe au diamètre 7 cm.

TABLEAU 2
Caractéristiques des sous-ensembles de sols

TABLE 2
Characteristics of the sub-classes of soils

Sous-ensemble	Types génétiques	Profondeur de décarbonatation	CO ₂ Ca total de A ₁ en %			pH de A ₁			eau utile en mm. moyenne	S/T de A ₁ moyenne	m.o. de A ₁ en % moyenne	épaisseur de A ₁ moyenne	Ca++ de A ₁ en mg/100 g moyenne
			moyenne	min.	max.	moyenne	min.	max.					
11	Sols bruns calcaires	0	31,7	10	50	7,9	7,6	8,3	147	100	9,0	11	—
12	Rendzines brunifiées	0	25,7	10	53,5	7,8	7,5	8,1	89	100	17,8	36	—
13	Rendzines brunifiées R. brunifiées humifères. Sols bruns calcaires	0	3,1	0,1	10	7,3	7,0	7,7	121	100	15,6	15	—
14	Sols bruns calcaires colluviaux. Rendzines colluviales ...	0	16	1	33	7,5	6,8	7,9	150 + apports latéraux	100	15,02	17,7	—
21	Rendzines brunifiées décarbonatées	comprise entre 0 et 15 cm	0	0	0	6,2	5,8	6,8	—	97,8	—	—	45,4
22	Sols bruns calciques Sols bruns eutrophes	comprise entre 15 et 40 cm	0	0	0	5,8	4,7	6,9	109	73,5	—	—	25,5
23	Sols bruns eutrophes. Sols lessivés ou brun lessivés ..	comprise entre 40 et 100 cm	0	0	0	5,7	5,3	6,4	198	73,0	—	—	18,06
24	Sols bruns lessivés, Sols lessivés	supérieure à 100 cm	0	0	0	5,2	4,5	6,0	238	57,80	—	—	14,8

FIG. 3. — Variations de hauteur dominante en fonction des caractéristiques du sol

FIG. 3. — Dominant height variations in relation to characteristics of soil

Dans la pratique sylvicole réelle les productions obtenues sont sensiblement inférieures aux productions potentielles maximales, pour deux raisons :

— d'abord, parce que l'éclaircie pratiquée est généralement suffisamment forte pour provoquer une légère baisse de production (inférieure à 10 % pour les éclaircies courantes) ;

— ensuite et surtout, parce que les placettes semi-permanentes, et *a fortiori*, les microplacettes, sont installées dans des peuplement très homogènes, sans trouées, où la productivité est maximale pour la station et la sylviculture pratiquée. Sur une plus grande surface, et compte tenu également des pertes diverses et des bois non commercialisables, il faut sans doute diminuer encore les chiffres avancés d'environ 15 % pour se ramener à des volumes réellement récoltés.

Nous prendrons cependant la production potentielle maximale comme niveau de référence objectif de la productivité des stations.

La variation de production potentielle à 50 ans est considérable dans la région où nous avons travaillé. Elle peut aller, en effet, de 1,6 m³ à plus de 19 m³ par hectare et par an à 50 ans.

Nous allons maintenant essayer de voir dans quelle mesure nous pouvons expliquer ces variations de production en fonction des caractéristiques du sol.

IV. — DISCUSSION ET APPLICATION DES RESULTATS

4.1. — Valeur discriminante des différents groupes de sols

Nous avons reporté sur un graphique les variations de hauteur dominante observées pour chacun des sous-ensembles de sols. Chaque sous-ensemble est représenté par la moyenne des hauteurs dominantes à 50 ans et par un intervalle limité par les valeurs extrêmes observées des hauteurs dominantes.

Nous avons effectué une analyse de la variance à un facteur contrôlé pour comparer l'ensemble des moyennes des hauteurs dominantes observées sur chaque ensemble de sol. Puis nous avons comparé les moyennes des hauteurs dominantes, deux à deux, à l'aide du test *t*.

Nous avons huit ensembles de sols et quatre-vingt-deux microplacettes. Les microplacettes sont assez bien réparties puisque nous en avons à peu près une dizaine par sous-ensemble, sauf pour le sous-ensemble 21. Nous avons éliminé deux microplacettes aberrantes, dont nous reparlerons ultérieurement, dans le sous-ensemble 24.

Par l'analyse de la variance, nous obtenons une valeur de *F* très élevée.

Les différences des moyennes des hauteurs dominantes sont donc dans l'ensemble significatives et le pouvoir discriminant des sous-ensembles de sols que nous avons définis est important.

En comparant les sous-ensembles deux à deux à l'intérieur de chaque ensemble, nous constatons que les moyennes diffèrent toujours significativement sauf entre les sous-ensembles 12 et 13. D'autre part, les moyennes ne diffèrent significativement entre les ensembles 23 et 24 que si nous ne tenons pas compte des deux placettes aberrantes.

Si, dans l'ensemble, la discrimination que nous obtenons est très satisfaisante, il faut toutefois remarquer que cette discrimination n'est jamais absolue, sauf lorsque nous comparons les sous-ensembles extrêmes, par exemple les sous-ensembles 11 et 24. Lorsque nous passons d'un sous-ensemble à un sous-ensemble à production moyenne immédiatement supérieure, il y a toujours un chevauchement important.

Ce chevauchement est dû, d'une part, à la variation génétique et, d'autre part, à l'action des facteurs écologiques que nous n'avons pas pris en compte dans la détermination des ensembles et sous-ensembles de sols.

A partir du classement ainsi obtenu, il est possible de tirer un certain nombre de renseignements sur l'action des facteurs du sol.

4.2. — *Influence des caractéristiques du sol sur le comportement de l'épicéa*

En moyenne, la production de l'épicéa en sol entièrement carbonaté est très significativement inférieure à sa production en sol décarbonaté ($7 \text{ m}^3/\text{ha}/\text{an}$ à 50 ans contre $12,3 \text{ m}^3/\text{ha}/\text{an}$). D'une manière générale la présence de calcaire dès la surface provoque donc une chute de production importante. Il faut néanmoins faire immédiatement remarquer que des productions élevées peuvent être obtenues en présence de calcaire dès la surface. Nous avons, en effet, pu observer des productions approchant $18 \text{ m}^3/\text{ha}/\text{an}$ à 50 ans sur sol carbonaté. L'étude de la figure 3 va nous permettre de préciser le comportement de l'épicéa vis-à-vis du calcaire.

Les productions les plus faibles sont observées sur les sols du sous-ensemble 11 qui ont tous des teneurs en calcaire total dépassant 10 % dès la surface, et des teneurs faibles en matière organique. D'autre part, dans ce type de sol, les peuplements sont assez bien classés en fonction de la teneur en calcaire total de A_1 . Les productions les plus faibles, qui sont de l'ordre de $1,6$ à $3 \text{ m}^3/\text{ha}/\text{an}$ à 50 ans, sont observées sur des sols ayant plus de 35 % de calcaire total dès la surface. A l'opposé, les productions les plus élevées ($6 \text{ m}^3/\text{ha}/\text{an}/50$ ans) sont obtenues avec des sols ayant de 10 à 20 % de calcaire total dès la surface.

Les sols du sous-ensemble 12 ont des teneurs en calcaire total aussi élevées que ceux du sous-ensemble 11 (différences non significatives). D'autre part, en moyenne, la capacité de rétention en eau utile y est nettement plus faible. On devrait s'attendre à y observer une production plus faible ou aussi faible. Or, il n'en est rien et c'est l'inverse qui se produit. Il faut donc admettre qu'un autre facteur vient compenser la forte teneur en calcaire total et la faible capacité de rétention en eau utile. Nous pouvons admettre que ce rôle de compensation est joué par la matière organique dont la teneur est considérable dans ces sols (rendzines humifères et rendzines brunifiées très humifères). Il est difficile de savoir comment cette matière organique peut agir. Il semble qu'elle puisse diminuer l'activité du calcaire par des processus physiques : les particules calcaires sont enrobées par de la matière organique et sont ainsi en partie isolées du système racinaire de l'arbre. On peut penser que cette « protection » est d'autant mieux assurée que la structure du sol est mieux développée. Or, dans les rendzines qui constituent ce sous-groupe de sols, la structure est particulièrement bien développée.

La matière organique doit également agir chimiquement. La matière organique

TABLEAU 3
Potentialités des différents ensembles et sous-ensembles de sols

TABLE 3
Potentiality of the different classes and sub-classes of soils

Ensembles et sous-ensembles de sols	Hauteur dominante à 50 ans des ensembles et sous-ensembles de sols			Production potentielle à 50 ans en m ³ par hectare et par an des ensembles et sous-ensembles de sols (production moyenne depuis l'origine)		
	Moyenne des hauteurs dominantes	Hauteur dominante maximale	Hauteur dominante minimale	Moyenne des productions	Production maximale	Production minimale
1	19,16	28,10	10,90	7,0	17,8	1,6
2	24,29	29,60	18,10	12,3	19,6	6,15
11	15,08	18,40	10,90	3,8	6,4	1,6
12	18,33	22,80	13,80	6,4	10,6	3,05
13	18,87	24,20	14,50	6,8	12,2	3,5
14	23,89	28,10	19,10	11,9	17,8	7,0
21	18,90	20,10	18,10	6,8	7,9	6,15
22	23,09	26,07	20,60	11,0	14,6	8,4
23	25,88	27,40	23,40	14,4	16,4	11,3
24	27,09	29,60	24,60	16,0	19,6	12,7

fraîche arrivant au sol est extrêmement acide (pH 3,5). Il est évident que les groupements COOH neutralisent une partie des carbonates et contribuent à abaisser le pH.

La variation de production à l'intérieur de ce sous-ensemble est importante puisqu'elle va de 3 à 10 m³/ha/an (moyenne 6,40). Nous avons essayé de rechercher si cette variation était explicable. Malheureusement, il semble bien que cela ne soit pas possible. Ce sous-ensemble est, semble-t-il, constitué de peuplements génétiquement différents, dont certains ont une production anormalement élevée. Si nous essayons de classer les sols en fonction de leur réserve en eau utile, nous observons que toutes les productions basses sont obtenues sur des sols ayant des réserves en eau utile de l'ordre de 50 mm et que les productions les plus élevées sont obtenues soit sur des sols ayant des réserves en eau utile supérieures à 100 mm (rendzines développées sur calcaire marneux), soit sur des sols ayant des réserves en eau utile faible. Ce sont ces peuplements situés sur sols à réserve en eau utile faible et ayant une production élevée (8 à 10 m³) qui sont anormaux. Ces peuplements doivent être constitués d'origine particulièrement résistante au calcaire et à la sécheresse.

Les sols du sous-ensemble 13, qui ont une teneur en calcaire total inférieure à 10 % en surface, ont une production supérieure en moyenne à celle des sous-ensembles 11 et 12. Cette production varie de 3,5 m³ à 12,20 m³/ha/an et est en moyenne de 6,80 m³. Néanmoins, les moyennes des sous-ensembles 12 et 13 ne diffèrent pas significativement, probablement en raison des peuplements anormaux à production élevée du sous-ensemble 12.

En jouant sur la teneur en calcaire total et les réserves en eau utile, il est possible d'expliquer une partie de la variation. Les productions les plus faibles sont observées sur des sols ayant plus de 3 % de calcaire total dès la surface et moins de 100 mm de réserve en eau utile. Les productions les plus élevées sont observées sur sols ayant moins de 3 % de calcaire total et plus de 100 mm de réserve en eau utile.

Les sols du sous-ensemble 14 sont caractérisés par des possibilités d'alimentation en eau optimales en raison de leur position topographique et par une teneur élevée en calcaire total.

Or, la production que l'on y observe est très nettement supérieure à celle que nous avons observée sur tous les autres sols carbonatés, même ceux qui sont peu carbonatés (sous-ensemble 13).

La production est, en moyenne, de 11,90 m³ et oscille entre 7 m³ et 17,80 m³/ha/an. Cette fois, ce sont les possibilités d'alimentation en eau qui viennent compenser l'action du calcaire. A partir du moment où l'alimentation en eau est assurée de façon optimale toute l'année, la présence de calcaire, même en quantité élevée, ne devient plus que très secondaire. Et pourtant lorsque le sol est à sa capacité de rétention, le pH des sols calcaires est plus élevé que lorsque la disponibilité en eau diminue (WHITNEY, GARDNER, HAAS). Le pH doit donc, sur l'ensemble de l'année, être plus élevé pour les sols du sous-ensemble 14 que pour les sols des autres sous-ensembles.

Mais, apparemment, tous ces inconvénients chimiques ne jouent plus beaucoup. Avec 17 % de calcaire total dès la surface et plus de 10 % de calcaire total, la production peut atteindre 16 m³/ha/an.

Néanmoins, l'action du calcaire ne disparaît pas complètement. A l'intérieur du sous-ensemble 14, on peut effectuer un classement en fonction de la teneur en calcaire

total. Les productions les plus faibles sont obtenues pour des teneurs en calcaire total supérieures à 18 %. D'autre part, la moyenne des productions du sous-ensemble 14 est significativement inférieure à celle du sous-ensemble 24 (sols entièrement décarbonatés) bien que la disponibilité en eau y soit plus favorable.

En sols décarbonatés, en partie ou totalement, la production est en moyenne significativement supérieure à celle observée sur sols carbonatés, comme nous l'avons déjà dit. Mais il y a une zone de recouvrement très importante. Si l'on exclut le cas des sols colluviaux, on remarque que la production peut être supérieure ou égale sur des sols des sous-ensembles 12 et 13 à celle observée sur certains sols décarbonatés, même sur une profondeur assez importante (15 à 40 cm, sous-ensemble 22).

A l'intérieur des sols décarbonatés, le classement que nous avons obtenu en fonction de la profondeur de décarbonatation est très satisfaisant. La production croît quand la profondeur de décarbonatation augmente et devient maximale sur les sols entièrement carbonatés. Les meilleurs peuplements que nous ayons rencontrés sont situés sur ce type de sol (maximum observé : 19,60 m³/ha/an à 50 ans). Toutes les moyennes des sous-ensembles 21, 22, 23 et 24 diffèrent significativement, si l'on fait abstraction des deux peuplements anormaux du sous-ensemble 24.

Nous avons utilisé la profondeur de décarbonatation car c'est un critère très facile à mesurer. En fait, ce n'est pas uniquement la profondeur de décarbonatation qui explique l'augmentation de la production. Nous avons vu que tout un ensemble de facteurs était lié à cette profondeur de décarbonatation : diminution de la teneur en calcium échangeable, du taux de saturation, baisse du pH et surtout augmentation de la capacité de rétention en eau utile et de la profondeur totale du sol.

Il est évident que tous ces facteurs qui sont liés les uns aux autres ont une action ; mais il est impossible de déterminer, dans le cadre de cet article, la part de chacun de ces facteurs.

Néanmoins, nous avons vu dans le groupe des sols carbonatés que les possibilités d'alimentation en eau avait une importance considérable. On peut donc penser que dans le groupe des sols décarbonatés, il en est de même et que la capacité de rétention en eau utile qui augmente considérablement quand la profondeur de décarbonatation et la profondeur totale du sol augmentent, a un rôle prépondérant.

4.3. — *Discussion sur le caractère calcifuge de l'épicéa*

De ces observations, il est possible de définir le comportement de l'épicéa vis-à-vis du calcaire et du calcium et de définir ainsi son caractère calcifuge. Le terme calcifuge qu'on applique à la plupart des essences résineuses est en effet extrêmement vague.

Il y a tout d'abord une confusion certaine entre réaction du végétal vis-à-vis de la teneur du sol en calcium et réaction du végétal vis-à-vis de la teneur en calcaire du sol. Dans les sols non carbonatés, il existe toujours du calcium sous forme échangeable en quantité plus ou moins grande, alors qu'il n'existe pas de calcium sous forme de carbonate. Dans les sols carbonatés au contraire, il y a coexistence des deux formes et présence de calcium toujours en quantité importante. Examinons tout d'abord le comportement de l'épicéa sur les sols entièrement décarbonatés, c'est-à-dire sur les

sols de l'ensemble 24. Dans ces sols, la teneur en calcium échangeable varie en A_1 de 4 m.e./100 g à 20 m.e./100 g, et le taux de saturation de 13 à 90 %.

Si la teneur en calcium échangeable n'est jamais faible dans ces sols, par contre elle peut être très élevée. Or, dans cet ensemble de sols, la production est toujours à un haut niveau (moyenne 16 m³/ha/an à 50 ans) et manifestement n'est aucunement en relation avec la teneur en calcium échangeable ou le taux de saturation. En effet, 18 m.e. de calcium en A_1 et un taux de saturation de 90 % ne sont pas incompatibles avec des productions dépassant 17 m³/ha/an à 50 ans.

La conclusion est claire : la croissance de l'épicéa n'est nullement entravée en l'absence de carbonate, par des teneurs élevées du sol en calcium.

Si nous examinons le comportement de l'épicéa sur l'ensemble des sols décarbonatés (ensemble 2, sous-ensembles 21, 22, 23, et 24), la conclusion peut, *a priori*, être différente. La production chute lorsque la profondeur de décarbonatation diminue. Or, le taux de saturation croît ainsi que la teneur en calcium échangeable. Cependant ces augmentations ne sont pas considérables (Ca^{++} passe en moyenne de 15 m.e. à 45 m.e. ou de 15 à 25 m.e. si on fait abstraction du sous-ensemble 21 et le taux de saturation de 57 à 100 %).

Il faut plutôt rechercher la cause de la chute de production dans la diminution de la profondeur utile, ou tout au moins de celle où les racines trouvent leurs conditions optimales. Or, cette profondeur utile augmente avec l'épaisseur de la partie décarbonatée.

De toutes façons, cette production reste encore très conséquente quelle que soit la teneur en calcium échangeable ou le taux de saturation. Nous ne modifierons donc pas la conclusion à laquelle nous avons abouti sur l'indifférence de l'épicéa vis-à-vis des teneurs élevées en calcium échangeable en l'absence de carbonate.

Examinons maintenant ce qui se passe lorsqu'il y a présence de carbonate dans tout le profil. Globalement, nous l'avons déjà dit, la production est plus faible que lorsqu'il n'y a pas de carbonate dès la surface. D'autre part, la chute de production est proportionnelle à la quantité de carbonate présente dans le sol, lorsque l'alimentation en eau est comparable et dépend uniquement de l'apport direct par les eaux de pluie.

Ce fait est très intéressant car il montre qu'il y a un effet propre des carbonates et non de l'ion calcium seul. Mais, à ce stade, l'explication devient difficile. En effet, dans l'eau, nous avons les réactions suivantes :

à température constante et à pression de CO_2 constante, la quantité de carbonate dissocié dans les solutions du sol est indépendante de la teneur en CO_3Ca , lorsque l'équilibre est réalisé. Par exemple, à 18° et avec une pression de CO_2 de 3×10^{-4} atmosphères, la solubilité de CO_3Ca est de 60 mg par litre.

Dans ces conditions, pour un horizon ayant une humidité équivalente de 40 %, une teneur de CO_3Ca de 0,024 % est suffisante quelle que soit la teneur en eau du sol pour que soit atteinte la concentration maximale des solutions du sol en Ca^{++} .

Toutes ces conditions restant égales si on augmente la teneur en CO_3Ca du sol, la concentration des solutions du sol en ion Ca^{++} provenant de la dissociation des carbonates n'augmente pas et correspond au maximum à 0,048 m.e./100 g de sol.

Dans les sols saturés, mais décarbonatés, la teneur en Ca^{++} échangeable varie entre 40 et 50 m.e./100 g de sol. Mais ce qu'il faut comparer au Ca^{++} provenant de la dissociation des carbonates, c'est la fraction du calcium échangeable des sols décarbonatés mais saturés passant dans les solutions du sol (calcium des solutions externes) et restant en équilibre avec le calcium fixé dans le complexe absorbant (calcium des solutions internes).

Cet équilibre est régi par les lois de DONNAN, mais il est difficile de connaître en sol saturé, mais décarbonaté, le rapport entre le Ca^{++} des solutions externes et celui des solutions internes.

Pour que la présence de carbonates dans le sol contribue à augmenter la disponibilité en Ca^{++} des solutions du sol de façon notable, comparativement à celles des sols décarbonatés saturés, il faudrait que ce rapport soit au moins de l'ordre de 1 à 1 000. Nous tenterons d'aborder cette question dans un prochain travail.

De toute façon, nous devons retenir que la concentration maximale en Ca^{++} des solutions du sol est atteinte dès qu'il existe une quantité très faible de CO_3Ca dans le milieu (moins de 0,10 %), et que cette concentration n'augmente plus lorsque la teneur en CO_3Ca augmente, toutes choses restant égales par ailleurs.

S'il y a chute de production en sol carbonaté, il faut en attribuer la cause à la présence de carbonate et non à une augmentation de disponibilité en ion de calcium.

De plus, c'est la forme la plus dissociée du carbonate de calcium (c'est-à-dire CO_3Ca) qui doit provoquer la chute de croissance. En effet, la forme dissociée ($\text{CO}_3\text{---Ca}^{++}$) qui passe immédiatement sous forme de bicarbonate ($\text{CO}_2\text{H---})_2\text{Ca}^{++}$ est également constante (à t et PCO_2 constante) dans les solutions du sol quelle que soit la teneur en CO_3Ca . La présence d'ion bicarbonaté dans le sol ne peut donc expliquer la chute de production de l'épicéa quand la teneur en calcaire du sol augmente. C'est, par conséquent, la forme carbonatée elle-même qui est en cause. Il est difficile de savoir comment elle peut agir sur la croissance de l'épicéa et nous préférons ne pas aborder ce problème pour l'instant.

Lorsque la demande en eau de l'épicéa est toujours satisfaite quelle que soit la période de l'année (eau de pluie et apports latéraux), les données du problème changent complètement ; quelle que soit la teneur en carbonate du sol, la production est élevée. L'influence du calcaire, si elle ne disparaît pas complètement, est considérablement atténuée et n'est plus que très secondaire. Physiologiquement, il est très difficile d'entrevoir par quel mécanisme une disponibilité élevée en eau peut compenser presque totalement l'action du carbonate de calcium.

En conclusion, nous pouvons donc dire que l'épicéa n'est pas un calcifuge au sens strict du terme. En effet, sa croissance n'est pas affectée par une disponibilité élevée du sol en calcium. Par contre, le carbonate de calcium provoque une chute de production d'autant plus importante que sa teneur est plus élevée dans le sol. Mais ce caractère « calcarifuge » est extrêmement atténué quand l'alimentation en eau n'est jamais déficitaire.

4.4. — *Prévision de la production et limite d'utilisation de l'épicéa*

A partir de diverses données que nous avons recueillies, il est possible de prévoir dans une certaine mesure la production que l'on peut attendre de l'épicéa en fonction des caractéristiques du sol.

Mais il est bien évident que nous ne pouvons donner que des fourchettes de production car nous n'avons pas tenu compte de toutes les caractéristiques du sol, ni des conditions microclimatiques, ni de la variation génétique. Cette variation génétique apporte une part d'imprécision non négligeable dans cette étude. Par exemple, nous n'avons pas tenu compte des deux peuplements particulièrement aberrants qui représentent 3 % de l'échantillon total. Si nous admettons que les fourchettes que nous allons donner sont valables avec un risque d'erreur de 5 %, nous ne sommes certainement pas loin de la vérité.

D'autre part, l'enquête que nous avons menée a été effectuée sur un matériel génétique quelconque. Or, actuellement, les reboiseurs disposent d'un matériel amélioré. Il est donc probable que, dans l'ensemble, nous sous-estimons les possibilités de l'épicéa.

Les chiffres de production que nous allons maintenant donner sont des productions potentielles maximales possibles. Elles sont exprimées en production moyenne en $m^3/ha/an$ à 50 ans.

En conditions normales d'alimentation en eau, c'est-à-dire en alimentation s'effectuant uniquement à partir des eaux de pluie arrivant directement au sol, si la teneur en calcaire total est supérieure à 10 % dès la surface et le taux de matière organique faible (moins de 14 % de matière organique en A_1 et A_1 d'épaisseur inférieure à 15 cm), la production sera inférieure à $6,2 m^3$. Dans les mêmes conditions lorsque la teneur en calcaire total est comprise entre 10 et 20 %, nous avons observé une production variant entre 6,2 et $5 m^3$. Si elle est comprise entre 20 et 35 %, la production oscille entre 5 et $3 m^3$. Enfin, si elle est supérieure à 35 %, elle oscille entre 1,6 et $3 m^3$.

Dans les mêmes conditions d'alimentation en eau si la teneur en calcaire total est encore supérieure à 10 % dès la surface, mais si cette fois le taux de matière organique est important (matière organique A_1 supérieure à 14 %, épaisseur de A_1 supérieure à 20 cm), la production sera inférieure à $10,6 m^3$ et oscillera entre 3 et $10,6 m^3$.

Nous ne pouvons améliorer cette fourchette en raison des grosses variations génétiques observées. Disons néanmoins que si la capacité de rétention en eau utile est faible (moins de 100 mm), les productions se situeront vers le bas de la fourchette, et si elle est élevée (plus de 100 mm), les productions se situeront vers le haut de la fourchette. Néanmoins, nous avons observé des productions élevées (8 à $10,6 m^3$) en sol n'ayant que 50 mm de capacité de rétention en eau utile ! Nous sommes certainement en présence de peuplements particulièrement bien adaptés à la sécheresse et à une teneur élevée en calcaire.

Toujours dans les mêmes conditions d'alimentation en eau, si la teneur en calcaire total est inférieure à 10 % dès la surface, la production oscillera entre $3,5 m^3$ et $12,2 m^3$. Si cette teneur en calcaire total est inférieure à 3 % et la capacité de

réten-tion en eau utile supérieure à 100 mm, la production oscillera entre 6 m³ et 12,2 m³.

En conditions favorables d'alimentation en eau, quelle que soit la teneur en calcaire total, la production oscillera entre 7 et 17,80 m³. Si la teneur en calcaire total est inférieure à 18 %, la production ne sera pas inférieure à 12 m³.

Si le sol est décarbonaté, même sur quelques centimètres, la production sera supérieure à 6 m³. Si la profondeur de décarbonatation est supérieure à 15 cm, la production sera au moins de 8 m³. Elle oscillera de 11,3 à 16,4 m³ si la profondeur de décarbonatation est comprise entre 40 et 100 mm ; enfin, elle oscillera de 13 à 16 m³ si la profondeur de décarbonatation est supérieure à 100 cm.

Pour être honnête, il faut dire que, dans le cas d'utilisation de races particulièrement peu productives, la production pourra ne pas être supérieure à 7,5 m³ même si la profondeur de décarbonatation est supérieure à 40 cm (cas des deux peuplements aberrants). En principe, ce cas ne doit pas se produire si un minimum d'attention est porté à l'origine de la graine.

Un problème important est maintenant posé : dans quelles conditions est-il préférable de ne pas utiliser l'épicéa ?

Il est bien évident que tout dépend du seuil de production que l'on veut se fixer.

Si l'on se fixe impérativement une production minimale de 10 m³/ha/an à 50 ans, le problème est très simple : il ne faudra reboiser que les sols décarbonatés sur plus de 40 cm, ou les sols colluviaux des bas-fonds ayant moins de 20 % de calcaire total dès la surface. En respectant ces critères, on ne prend aucun risque.

Si nous nous montrons un peu moins exigeants, par exemple si nous admettons qu'une production minimale de 8 m³ est suffisante on ajoutera aux sols précédents, tous les sols décarbonatés entre 15 et 40 cm.

Si nous nous fixons maintenant un seuil minimal de 6 m³, nous ne prendrons aucun risque en utilisant tous les sols décarbonatés, quelle que soit leur profondeur de décarbonatation, tous les sols colluviaux, quelle que soit leur teneur en calcaire total, et tous les sols ayant moins de 3 % de calcaire total dès la surface et plus de 100 mm de réserve en eau utile.

Une production supérieure à 6 m³ n'est pas impossible à obtenir, nous l'avons déjà vu, sur des sols beaucoup moins favorables, comme ceux du sous-ensemble 12. Mais il y a un risque certain de descendre au-dessous de 6 m³ sur ce type de sol. Néanmoins, sur des rendzines à forte capacité de rétention en eau utile, comme celles qui se développent à partir des calcaires marneux du portlandien, nous sommes pratiquement assurés que la production dépassera 6 m³.

Enfin, si le seuil minimal de production est fixé à 3 m³, il suffira de n'éliminer que les sols ayant plus de 35 % de calcaire total dès la surface et une teneur faible en matière organique (épaisseur de l'horizon A₁ inférieure à 15 cm et teneur en matière organique de l'horizon A₁ inférieure à 14 %).

Les seuils que pourront se fixer les reboiseurs dépendront de multiples facteurs et le problème sera complètement différent suivant l'importance des surfaces à gérer. Certains risques peuvent être inacceptables si nous devons prendre une décision pour une parcelle de faible surface ou au contraire négligeables, à conditions de sols équivalentes, dans le cas d'aménagement d'importants massifs.

RESUME ET CONCLUSION

Dans la région des plateaux calcaires de l'est de la France, nous avons cherché à déterminer les potentialités de l'épicéa en fonction des caractéristiques du sol. La méthode générale utilisée consiste à choisir à l'intérieur de la zone de travail que nous avons délimitée, un nombre suffisant de points d'étude de façon à couvrir la gamme complète de sols existant dans cette région. En chacun de ces points, nous avons effectué, d'une part, des mesures dendrométriques et, d'autre part, des mesures des caractéristiques du sol. Nous nous sommes, ici, volontairement limités à des critères du sol et à des procédés d'interprétation suffisamment simples pour fournir au sylviculteur un outil commode lui permettant de prévoir les possibilités de l'épicéa avec une précision suffisante dans n'importe quel type de station.

La méthode suivie a consisté à installer un nombre suffisant de placettes très petites (microplacettes), recouvrant tout l'éventail des conditions de milieu possible, dans lesquelles on a évalué un indice de productivité : la hauteur dominante à 50 ans. Des placettes plus grandes (placettes semi-permanentes) et moins nombreuses ont permis simultanément de calculer une relation entre cet indice de productivité et la production totale en volume. On a vérifié, à cette occasion, que dans les peuplements en cause, l'évaluation de caractères dendrométriques habituels (hauteur dominante, circonférence moyenne, etc.) dans les microplacettes ne présentait pas d'erreur systématique par rapport à la même évaluation dans les placettes semi-permanentes, fait intéressant pour ce genre d'étude, s'il peut être généralisé à d'autres conditions.

Pour déterminer l'influence des caractéristiques du sol sur la production, nous avons classé les sols en ensembles et sous-ensembles en fonction de critères très simples : teneur en calcaire total de l'horizon A_1 , teneur en matière organique, épaisseur de l'horizon A_1 , disponibilité en eau et profondeur de décarbonatation. Une analyse de la variance à un facteur contrôlé a permis de comparer l'ensemble des moyennes des hauteurs dominantes observées dans chaque ensemble ou sous-ensemble de sol. Puis nous avons comparé les moyennes des hauteurs dominantes deux à deux à l'aide de tests t . Les chiffres de production que nous donnons sont exprimés en $m^3/ha/an$ et correspondent à des productions moyennes de bois-fort à 50 ans depuis l'origine.

Sans entrer dans le détail des résultats, exposés dans ce travail, on doit souligner leur importance pratique.

On peut, par exemple, grâce à eux, établir des tableaux donnant des règles simples pour le reboisement de ces plateaux calcaires du Nord-Est.

Selon les milieux, la production moyenne en $m^3/ha/an$ à 50 ans peut varier de 3,8 m^3 à 16 m^3 avec des extrêmes de 1,6 à 19 m^3 . C'est dire l'importance d'une étude sérieuse du milieu avant reboisement. Le présent travail permet de faire cette étude, aux moindres frais, à partir de caractères faciles à mesurer. C'était, du reste, le but fixé.

Nous avons également essayé de définir le caractère « calcifuge » de l'épicéa. Il apparaît que l'épicéa n'est pas un calcifuge au sens strict du terme. En effet, sa croissance n'est pas affectée par une disponibilité élevée du sol en calcium. Par contre, le carbonate de calcium provoque une chute de production d'autant plus importante que sa teneur est plus élevée dans la partie supérieure du sol. Mais ce caractère « calca-

ritage» est extrêmement atténué quand l'alimentation en eau est assurée de façon optimale.

Exemple de tableau simple permettant de prévoir une production minimale de l'épicéa

Seuils de production minimale (m ³ /ha/an à 50 ans)	Alimentation en eau normale (eaux de pluies seules)	Apports d'eau supplémentaires (Bas-fonds)
* 10 m ³	Sols décarbonatés sur plus de 40 cm.	Sols ayant moins de 20 % de calcaire total en surface.
8 m ³	Sols décarbonatés sur moins de 40 cm et plus de 15 cm.	Sols ayant moins de 20 % de calcaire total en surface.
6 m ³	Tous les sols décarbonatés ainsi que les sols carbonatés ayant moins de 3 % de calcaire total en surface et plus de 100 mm de réserve en eau utile.	Tous les sols quelle que soit leur teneur en calcaire total.
3 m ³	Tous les sols sauf les sols carbonatés ayant plus de 35 % de calcaire total dès la surface et pauvres en matière organique (moins de 14 % de matière organique) et horizon A ₁ inférieur à 15 cm.	Tous les sols quelle que soit leur teneur en calcaire total.
* Sauf en cas de très mauvaises provenances.		

L'eau paraît jouer un rôle de compensation vis-à-vis de l'action néfaste du calcaire. Il en est de même, mais à un degré bien moindre, de la matière organique du sol.

Reçu pour publication en juillet 1970.

REMERCIEMENTS

Que soient remerciés ici :

— L'office national des Forêts et en particulier : MM. AUBOUIN, BALANGER, BONNAIRE, GUEDET, LEBLANC, LEGROUX, MARICHAL, MICHON, PÉTIN, RÉMY, RONEZ, ROUBINET, RUPP et TISSERANT, ainsi que tous les Chefs de district et Agents techniques qui nous ont apporté leur aide.

— Les Houillères du Bassin de Lorraine et en particulier, M. SENDEL.

— Les propriétaires qui nous ont autorisé à installer des placettes chez eux.

— Tous ceux qui ont collaboré avec nous : Techniciens, Calculateurs Dessinateurs et Secrétaires.

SUMMARY

NORWAY-SPRUCE ON CALCAREOUS TABLE-LANDS IN THE EAST OF FRANCE.

TRY OF YIELD FORECASTING IN RELATION TO SIMPLE CHARACTERISTICS OF SOILS.

In the East of France, on calcareous table lands we tried to determine potential productivity of Norway spruce in relation to soil characteristics.

Enough testing stands were choosed in such a way to cover all the types of soils, which could be found in the area, we were studying.

In each stand we measured all together dendrometric and soils characteristics.

In this work we used only simple soils criteria and easy interpretation proceedings, so as to give to foresters an easy method for providing, with enough accuracy potential productivity of Norway spruce in any type of soils.

To keep all the environmental conditions in mind, we established a great number of very small sample plots (microplots = microplacettes), in which we measured only site index : 50 years old stand dominant-height, determined by stem analysis.

With less numerous but wider plots (semi-permanent sample plots) we calculated the relation between site index and total crop yield.

No significative difference was found between characteristics that we measured in microplots (dominant height, mean circumference...) and in semi-permanent sample plots.

This result would present a great interest, if it could be generalized in other conditions.

To determine the soils characteristics influence on yield of Norway spruce we ranged soils in classes and subclasses with very simple criteria : content of calcium carbonate in A_1 Horizon, percentage of organic matter, depth of A_1 Horizon, water disponibility, and decarbonation depth.

Using an analysis of variance we compared dominant height averages, in each class or subclass of soils.

Then we inspected the differences between pairs of means (t-test).

Mean increments which are mean annual volume increments from beginning to age 50 (volume o.b. to top diameter of 7 centimeters), are given in cubic meters per hectare per annum ($m^3/ha/an$).

The results have a great practical importance. It is not possible to give all the details in this summary. But we can give for instance a table of simple rules, which can be used for afforestation.

Example of a simple table giving yield-forecasting of Norway spruce

Minimum mean annual increment ($m^3/ha/an$ at age 50)	Supply water only from rain	Supplementary water (bottom-land)
10 m^3	Decarbonated soils (depth of decarbonation more than 40 cm).	Soils having less than 20 % of calcium carbonate from the very surface.
8 m^3	Decarbonated soils (depth of decarbonation less than 40 cm more than 20 cm).	Soils having less than 20 % of calcium carbonate from the very surface.
6 m^3	The all decarbonated soils and carbonated soils having less than 3 % of calcium carbonate in A_1 horizon and more than 100 mm of available water holding capacity.	The all soils whatever the calcium carbonate percentage may be.
3 m^3	The all soils except the carbonated soils having more than 35 % of calcium carbonate from the very surface and in organic matter (less than 15 % of organic matter and depth of A_1 horizon less than 15 cm).	The all soils whatever the calcium carbonate percentage may be.

* Very bad seeds provenance excepted.

According to different environmental conditions the mean annual volume increment ($m^3/ha/an$) for 50 years old stands fluctuates from $3,8 m^3$ to $16 m^3$, with limits from $1,6$ to $19 m^3$.

So can be shown the extreme importance of surroundings study before afforestation.

This work allows that study, at little cost, with easy measurable characteristics.

We also tried to give a definition of the « calcifuge » character of Norway spruce. It is appearing that Norway spruce is not really « calcifuge ». Its growth does not decrease when the disponibility of calcium reaches a high level in soil. On the other hand its growth decreases when the content of calcium carbonate increases in soil. But this « calcarifuge », character is extremely reduced when water supply is optimal. Water seems to compensate the negative action of calcium carbonate. Organic matter seems also to play the same effect, but in a really lower away.

ZUSAMMENFASSUNG

DIE FICHTE AUF DEN KALKPLATEAUS IN OSTFRANKREICH. VERSUCH EINER WUCHS- LEISTUNGSSCHÄTZUNG AUF GRUND EINFACHER BODENMERKMALE.

Im Raume der Kalkplateaus in Ostfrankreich wurde versucht die potentielle Wuchsleistung der Fichte in Abhängigkeit von verschiedenen Bodenmerkmalen darzustellen.

Auf einer entsprechenden Anzahl von Kleinprobestellen (microplacettes) die über sämtliche im Arbeitsgebiet vorkommende Bodentypen verteilt sind, wurden sowohl die Bestandesmerkmale, insbesondere die Oberhöhe im Alter 50 (Stammanalyse), als auch Bodenmerkmale gemessen.

DGZ 50 Untergrenze	Zusätzliches Wasserangebot (Muldenlagen)	Normale Wasserversorgung (nur Niederschlagswasser)
10 fm *	Böden mit weniger als 20 % Gesamtkalkgehalt im Oberbo- den	Böden über 40 cm entkalkt
8 fm	d°	Böden zwischen 15 und 40 cm entkalkt
6 fm	Alle Böden	Alle entkalkten Böden sowie Böden mit weniger als 3 % Gesamtkalkgehalt im Oberbo- den und einer nutzbaren Was- serkapazität von über 100 mm
3 fm	Alle Böden	Alle Böden mit Ausnahme von Kalkböden mit über 35 % Kalkgehalt im Oberboden und weniger als 14 % Humus, Mächtigkeit des A ₁ - Hori- zontes unter 15 cm

* Mit Ausnahme von sehr schlechten Herkunftten.

Eine geringere Anzahl jedoch grösserer Probeflächen (placettes semi-permanentes) erlaubte zusätzlich die Ermittlung der Beziehung zwischen Gesamtwuchsleistung und Oberhöhe. Ein Vergleich der in den beiden Profelflächentypen erhobenen Bestandesmerkmale erbrachte keine statistisch gesicherten Unterschiede und ermöglichte daher eine wesentliche Rationalisierung der Aussenarbeiten.

Bei der Auswertung wurde darauf bedacht genommen nur sehr einfache und leicht erkennbare Bodenmerkmale wie z. B. Mächtigkeit, Kalkgehalt und Gehalt an organischer Substanz im Horizont A₁, Entkalkungstiefe und verfügbares Wasser zur Gesamtwuchsleistungsschätzung heranzuziehen, sodass die Ergebnisse für die Praxis unmittelbar Verwendung finden können. In der folgenden Tabelle sind die wesentlichsten Ergebnisse zusammengefasst. Die Wuchsleistungszahlen (DGZ 50) entsprechen der jeweiligen Mindestwuchsleistung der vier Gruppen. Je nach Standort ergaben sich mittlere DGZ 50 Werte von 3,8 fm bis 16,0 fm (Extreme: 1,6 fm und 19,0 fm).

Desweiteren wurde das Verhalten der Fichte bei verschiedenem Kalzium und Kalkgehalten untersucht. Die Fichte kann nicht als eine ausgesprochen kalkfeindliche Holzart bezeichnet werden und ihre Wuchsleistung wird durch einen hohen Kalziumgehalt im Boden nicht beeinflusst. Im Gegensatz dazu wird das Wachstum der Fichte durch den Kalkgehalt im Oberboden bestimmt. Die wuchshemmende Wirkung des Kalkes wird bei einer optimalen Wasserversorgung weitgehend abgeschwächt; dies ist bis zu einem gewissen Grad auch bei einem höheren Humusgehalt der Fall.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- ASSMANN E., FRANZ F., 1965. Vorläufige Fichten Ertragstafel für Bayern. *Forstw. Cbl.*, **84**, Jg. 1965 (1/2), 1-68 Hamburg.
- BRADLEY A. T., CHRISTIE J., JOHNSTON D. R., 1966. Forest management tables. *Forestry Commission Booklet*, **16**, 218.
- DAGNELIE P., 1964. *Cours de statistique mathématique*, Vol. II, Institut agronomique de Gembloux.
- DECOURT N., 1965. Le Pin sylvestre et le Pin laricio de Corse en Sologne. Tables de production provisoires. *Ann. Sci. Forest.*, **22** (2), 259-318.
- DECOURT N., 1967. Le Douglas dans le N.-E. du Massif Central. Tables de production provisoires. *Ann. Sci. Forest.*, **24** (1), 45-84.
- DECOURT N., 1966. *Instruction pour l'assiette et les mensurations des placettes temporaires et semi-permanentes*. Station Sylv. et Prod. C.N.R.F.
- DECOURT N., LEMOINE B., 1969. Le Pin maritime dans le Sud-Ouest de la France. Tables de production provisoires. *Ann. Sci. Forest.*, **26** (1), 3-44.
- DROUINEAU G., 1943. Méthode rapide d'appréciation du pouvoir chlorosant des sols calcaires. *Ann. agron.*, **1**, 16-18.
- DUCHAUFOR Ph., 1950. Recherches sur l'évolution des sols calcaires en Lorraine. *Ann. E.N.E.F.*, **XII** (1), 98-153.
- DUCHAUFOR Ph., 1965. *Précis de Pédologie*, Masson et C^{ie}, 482 pages.
- DUCHAUFOR Ph., 1968. *L'évolution des sols. Essai sur la dynamique des profils*, Masson et C^{ie}, Paris, 94 pages.
- GARBAYE J., LEROY Ph., LE TACON F., LÉVY G., 1970. Réflexions sur une méthode d'étude des relations entre caractéristiques des sols et caractéristiques des peuplements. *Ann. Sci. Forest.* (sous presse).
- LE TACON F., NYS C., 1970. Les sols du Massif de Haye et leur influence sur le comportement des réserves de hêtre en taillis sous futaie. *Rev. forest. fr.* (sous presse).
- LÉVY G., 1968. Importance des propriétés du sol sur l'enracinement de *Picea excelsa* et de *Pinus sylvestris*. *Ann. Sci. Forest.*, **25** (3), 157-188.
- OSWALD H., 1969. Conditions forestières et potentialité de l'Épicéa en Haute-Ardèche. *Ann. Sci. Forest.*, **26** (2) 183-224.
- PARDE J., 1961. *Dendrométrie*, Imp. Louis Jean, Gap.
- ZIMMERLE H., 1947. Beiträge zur Biologie der Fichte in Württemberg Mitteilungen der Württembergischen forstlichen versuchsanstalt Band, 8.