

IMPORTANCE DES PROPRIÉTÉS DU SOL POUR L'ENRACINEMENT DE *PICEA EXCELSA* ET DE *PINUS SILVESTRIS* (1)

G. LEVY

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

SOMMAIRE

Une étude de corrélations, par les méthodes graphique et statistique, montre la forte influence des propriétés physiques du sol, en particulier la stabilité structurale, la densité apparente et la texture, mais aussi de certaines propriétés chimiques, sur la densité d'enracinement de l'Epicéa et du Pin sylvestre. La mesure de ces propriétés conduit à une prévision assez grossière de l'enracinement de ces deux essences. D'autre part ces corrélations permettent d'expliquer en grande partie l'enracinement rencontré dans divers ensembles de sols lorrains.

INTRODUCTION

Nous nous sommes proposés d'examiner la façon dont les propriétés du sol influençaient l'enracinement de certaines essences forestières et si possible d'établir un mode de prévision de cet enracinement.

A. — *Avantages d'un bon enracinement*

En effet, l'importance des racines apparaît considérable car elles influent à la fois sur la production forestière et sur l'évolution du sol.

(1) Ce mémoire est le condensé d'un travail qui a fait l'objet d'une thèse de docteur-ingénieur, soutenue le 29 novembre 1967 à la Faculté des Sciences de Nancy.

A courte échéance, un enracinement profond et dense, compte tenu du mode spécifique d'enracinement de l'essence considérée, améliore la fourniture en éléments nutritifs et en eau, donc la production, ainsi que la résistance aux chablis et aux fortes sécheresses.

A plus longue échéance, un enracinement convenable s'oppose à la dégradation du sol par fourniture de matière organique lors de la décomposition de racines, en favorisant le cycle biologique des bases et de l'azote et en luttant contre l'hydromorphie (par prélèvement de l'eau qui sature la macroporosité et création de zones préférentielles d'écoulement vertical). Cette dégradation du sol aurait une influence néfaste sur la production des générations futures d'arbres.

B. — Influence des propriétés du sol sur l'enracinement

Il semble bien qu'à côté d'une tendance spécifique héréditaire, l'enracinement des végétaux dépende d'une façon sensible des propriétés du sol : cela justifie notre étude. Les propriétés physiques paraissent les plus importantes mais les propriétés chimiques joueraient également un rôle.

Ainsi l'hydromorphie limite l'extension en profondeur des racines d'Épicéa (HOLSTENER-JORGENSEN, 1961) et d'Erable à sucre (FAYLE, 1965) en particulier.

Une faible porosité et un manque d'aération s'opposent au développement des racines de diverses espèces (KRAMER, 1956 ; KREUTZER, 1961 ; TAYLOR et BURNETT, 1964) ; ainsi une porosité inférieure à 40 % arrête la croissance des jeunes plants d'Épicéa mais non celle de Chêne pédonculé (LEIBUNGUT et al., 1963). Le diamètre des pores intervient (WIERSUM, 1957). Une forte densité apparente peut limiter l'enracinement des arbres (MUELLER et CLINE, 1959 ; RADYNK, 1964).

La résistance mécanique du sol s'oppose à la pénétration des racines de nombreuses plantes (HIDDING et Van den BERG, 1960 ; DUCHAUFOUR, 1953 ; KOSTLER, 1962 ; MAERTENS, 1964) ; cette résistance à la pénétration est la résultante, à chaque instant, de la densité apparente et de l'humidité du sol (TAYLOR et al., 1963-1964).

La densité des racines peut dépendre aussi de la texture du sol (HORTON, 1958 ; GRAS, 1961).

La stabilité structurale est un facteur important. GRAS (1961) a constaté que l'enracinement du Pommier dans la Sarthe était fort pour $\log_{10} I_s \leq 1,30$, moyen avec danger d'asphyxie pour $\log_{10} I_s$ compris entre 1,30 et 1,60 et nul pour $\log_{10} I_s > 1,60$.

KERN, MOLL et BRAUN (1961) ont constaté, pour des peuplements mixtes d'Épicéa, Sapin et Hêtre, que la longueur totale des racines très fines d'un profil est d'autant plus faible que le sol est plus riche en éléments nutritifs. Mais, dans un sol donné, il y a une corrélation positive entre la densité des racines très fines de chaque horizon et sa teneur en potassium ; la courbe de la variation de l'enracinement avec la profondeur s'ajuste à la courbe de la teneur en éléments nutritifs totaux et souvent aussi à la courbe du potassium.

Une fertilisation complète (N, P, K, Ca) se traduit par une augmentation du poids de racines fines d'Épicéa.

C. — *Originalité de ce travail*

Il est donc incontestable que certaines propriétés du sol déterminent en partie l'enracinement. Notre travail est original par rapport à celui des auteurs cités, par le nombre et la nature des propriétés du sol étudiées simultanément et quantitativement, par la variété des sols choisis et par les méthodes utilisées, en particulier l'emploi assez poussé des statistiques.

1. — MATÉRIEL D'ÉTUDES ET MÉTHODES UTILISÉES

A. — MATÉRIEL D'ÉTUDES

1) *Les essences*

Nous avons choisi deux essences de reboisement, l'Epicéa commun et le Pin sylvestre, qui possèdent des tendances naturelles d'enracinement apparemment différentes, bien qu'ayant, comme la plupart des résineux, un enracinement plus superficiel que la majorité des espèces feuillues : les racines d'Epicéa paraissent souvent demeurer presque uniquement à proximité de la surface du sol alors que le Pin a un pivot et des racines s'enfonçant en profondeur.

Ces deux essences paraissent réagir de façon différente aux propriétés du sol ; ainsi les racines de Pin s'accommoderaient mieux des horizons tassés que celles de l'Epicéa (MELZER, 1964). Mais les racines de l'Epicéa, réputées pourtant superficielles, s'enfonceraient assez profondément dans les sols meubles et aérés (DUCHAUFOUR, 1953 ; KOSTLER, 1962 ; LEUBUNGUT et *al.* 1963) et si elles ne trouvent pas suffisamment d'éléments nutritifs dans l'horizon humifère (KERN et *al.* 1961).

Il était nécessaire de choisir des peuplements d'âges voisins car la densité de l'enracinement dépend probablement de l'âge des arbres. Presque tous les peuplements étudiés ont entre 27 et 42 ans ; à cet âge l'enracinement définitif est déjà développé alors que la densité des arbres est encore homogène dans les peuplements.

2) *Les stations*

Pour que la variation de l'enracinement dépende le moins possible d'autres facteurs que ceux du sol, nous avons choisi des stations à climat à peu près identique. Toutes se trouvent en Lorraine et à altitude relativement basse (toujours inférieure à 500 m). Les caractéristiques climatiques, en particulier les précipitations, ne sont évidemment pas absolument analogues ; aussi le climat est-il peut-être une des causes, mais sans doute secondaire, des différences de comportement entre stations.

Les stations choisies englobent un large éventail d'étages stratigraphiques. Elles se trouvent dans les régions suivantes :

— Saint-Avold :

sur grès vosgien en station plate (plaine).

— Saint-Dié :

sur grès vosgien en station à forte pente,

sur alluvions quaternaires issues en grande partie du grès vosgien.

— Mirecourt :

à la limite grès bigarré - muschelkalk,

sur muschelkalk,

sur keuper,

sur lias.

- Nancy :
sur limons recouvrant les argiles à *Amaltheus margaritatus* du Charmouthien (arbo-
retum d'Amance),
sur Terra Fusca recouvrant le calcaire bajocien (arbo-
retum de la Sivrite).
- Verdun :
sur oxfordien et sur lusitanien.
- Commercy :
sur lusitanien.

B. — MÉTHODES UTILISÉES

Comme les propriétés d'un sol varient avec la profondeur, nous avons mesuré dans chaque horizon et même parfois à différents niveaux d'un même horizon, d'une part la densité d'enracinement, d'autre part les propriétés du sol.

1) Mesure de la densité d'enracinement

Les auteurs qui ont étudié l'enracinement des arbres ont utilisé diverses méthodes. Celle qui consiste à dégager l'ensemble d'un système racinaire à l'aide d'une lance d'arrosage nécessite des moyens matériels très importants ; de plus, elle ne saurait convenir au but fixé dans cette étude. D'autres auteurs expriment la densité d'enracinement par la longueur ou le poids de racines par unité de volume de sol ; mais la séparation des racines et du sol est souvent très longue et délicate, parfois même pratiquement impossible.

Nous avons finalement utilisé la densité d'enracinement définie ainsi : nombre de racines de diamètre $\geq 3/4$ mm de l'espèce considérée émergeant du profil dans un rectangle de 10 dm² (1 m dans le sens horizontal sur 10 cm dans le sens vertical).

Nous avons appelé *R* cette densité d'enracinement. Le rectangle est délimité à l'aide d'une ficelle maintenue par des fils métalliques enfoncés dans le profil ; le profil est soigneusement décapé à l'intérieur du rectangle sur une épaisseur d'environ 10 cm ; on dégage donc les racines, même verticales, dans une tranche de sol de 10 cm d'épaisseur. Pratiquement, nous avons utilisé des fosses pédologiques semi-circulaires autour d'un arbre dominant, à 1,10 m de sa base, à un emplacement représentatif de la station. En l'absence d'obstacle infranchissable, les fosses ont été creusées jusqu'à 1,20 m de profondeur. En terrain en pente, la fosse se trouve sur le côté de l'arbre, dans le sens de la plus forte pente. Nous nous sommes limités aux racines à diamètre $\geq 3/4$ mm, car l'espèce à laquelle appartenaient les racines plus fines n'était souvent pas identifiable par la méthode utilisée.

En vue de cette identification, nous avons coupé toutes les racines émergeant des rectangles ; au laboratoire, leur section bien plane était trempée dans de l'eau un court instant, afin de permettre aux tissus de reprendre, par gonflement, un aspect normal (en particulier par turgescence des cellules) puis mise à sécher sur papier buvard ; puis cette section était examinée à la loupe binoculaire, en général à un grossissement de 70 ; en effet, en raison du grand nombre de fragments de racines prélevés, il était nécessaire d'utiliser une méthode d'identification relativement rapide. La présence de xylème permet de différencier gymnospermes et angiospermes dicotylédones des autres végétaux ; puis, pour distinguer ces deux groupes de plantes ligneuses, on se fonde sur les caractères anatomiques suivants :

le bois des résineux est homoxylé ; les seuls organes conducteurs sont les trachéides à parois lignifiées, rigides mais peu épaisses et à grande lumière ; d'autre part, ce bois contient des canaux résinifères, nettement visibles chez l'*Epicéa* et le *Pin sylvestre* ; enfin les rayons ligneux y sont minces, ils ne comprennent en général qu'une seule épaisseur de cellules. Au contraire le bois de la grande majorité des dicotylédones est hétéroxylé ; il comprend de vrais vaisseaux à diamètre important ainsi que des fibres de soutien, à parois épaisses et faible lumière, constituant en général plus de 50 % de ce bois. Les fragments de racines peuvent être ainsi classés dans l'une des catégories : résineux et non résineux. Le diamètre était déterminé à l'aide d'un papier millimétré. Cette définition de la densité d'enracinement que nous avons choisie permet de caractériser principalement l'enracinement fin : il est évident que, dans le nombre de racines à diamètre $\geq 3/4$ mm, les grosses racines se trouvent en proportion très réduite.

Cette méthode est simple et rapide. Elle permet d'obtenir d'une part, assez rapidement, la densité d'enracinement et d'autre part, sans qu'elle soit perturbée, la terre même dans laquelle se trouvaient

les racines prélevées. Mais elle n'est pas non plus parfaite ; ainsi elle ne permet guère de considérer les racines plongeantes des arbres ; de plus, les fosses n'ayant pu être creusées, pour des raisons matérielles, tout autour de l'arbre, cela peut fournir une idée fautive des potentialités d'enracinement dans un sol en cas d'enracinement très dissymétrique. Cependant, comme elle est identique pour toutes les stations, elle permet d'obtenir des indices d'enracinement que l'on est en droit de comparer. Signalons aussi que KERN *et al.* (1961) ont établi que le comptage des racines fines émergeant d'un profil et la mesure de la longueur de ces racines extraites d'un certain volume de sol donnaient une estimation égale de l'enracinement.

2) Propriétés du sol

a. Propriétés déterminées sur le terrain

— Profondeur d'enracinement Pr 5 : la profondeur maximale d'enracinement dans une station est difficilement mesurable dans la pratique. C'est pourquoi nous avons employé une grandeur qu'on peut lui supposer très liée : la profondeur maximale où l'on trouve une densité d'enracinement R d'au moins 5, profondeur que nous avons appelée Pr 5.

— Teneur en cailloux : elle est exprimée en pourcentage de surface occupée par les cailloux sur la section du profil délimitée par le rectangle. C'est une estimation assez approximative.

— Hydromorphie : nous l'avons évaluée, à partir des traces laissées sur le profil, à l'aide de deux indices dont le plus important est Hy1 : c'est l'intensité de l'hydromorphie chiffrée de 0 à 6 ; suivant le nombre et la netteté de ces traces, Hy1 prend les valeurs 1, 2 ou 3 dans un horizon A2g et 4, 5 ou 6 dans un horizon Bg de pseudogley. Cela est sans doute critiquable car il s'agit de deux types d'hydromorphie différents ; mais ils se traduisent tous deux par un défaut d'aération ; le bariolage de l'horizon Bg des sols simplement marmorisés a été noté par les chiffres 1, 2 ou 3. Le deuxième indice est Hy2 ; c'est la « profondeur d'hydromorphie » ; il exprime la distance verticale (en centimètres) séparant les signes d'hydromorphie les plus proches de la surface du sol et le prélèvement considéré.

b. Propriétés déterminées au laboratoire (sur terre fine)

— Granulométrie : déterminée par densimétrie (méthode MERIAUX), sans destruction du calcaire. Pour dénommer la texture, on utilise le diagramme des textures (DUCHAUFOR, 1965). On considère comme limons les particules de 2 à 50 μ et comme sables celles de 50 à 2 000 μ .

— Densité apparente (d') et porosité totale : méthode BURGER (1922) ; en sol légèrement caillouteux, on utilise des cylindres de volume < 250 ml. Il n'a pas été possible d'effectuer cette mesure pour les horizons trop caillouteux.

— Stabilité structurale : il s'agit de la méthode mise au point par HENIN *et al.* (1960), qui consiste à déterminer trois indices : I_s , K et Σ . Afin d'éviter des confusions, nous avons désigné l'indice K par K_p .

— Eau utile : il s'agit du maximum d'eau absorbable par les plantes qu'un sol est susceptible de retenir, exprimé en pourcent de poids ; elle est à peu près égale à l'eau retenue à la capacité au champ (c) diminuée de l'eau qui correspond au point de flétrissement (f) (mesuré dans une presse à membrane). La capacité au champ a été évaluée au laboratoire dans un extracteur à basse pression ; la pression appliquée (pF variant de 1,8 à 3,0) est déterminée préalablement en fonction du pourcentage d'eau retenu à pF3 (GRAS, 1962).

— Porosités capillaire (P_c) et non capillaire (P_{nc}) : on considère P_c égal au produit de la teneur en eau à la capacité au champ par la densité apparente. On obtient P_{nc} par différence entre les porosités totale et capillaire.

— Eau utile cumulée (EUC) : il s'agit du maximum d'eau utile pouvant être stockée dans le sol au-dessus du prélèvement considéré, exprimé en millimètres de hauteur d'eau.

— Les analyses chimiques : elles ont été effectuées par les méthodes courantes décrites par DUCHAUFOR (1965) :

pH : mesuré sur un mélange sol-eau par la méthode électrométrique,

carbone et matière organique : méthode Anne,

azote total : méthode Anstett,

capacité totale d'échange : percolation à l'acétate d'ammonium et distillation au micro-kjeldahl.

calcium et potassium échangeables : percolation à l'acétate d'ammonium et dosage au photomètre à flamme,
 phosphore assimilable : méthode Duchaufour-Bonneau,
 calcaire total : calcimètre Bernard, et calcaire actif : méthode Drouineau,
 fer libre : méthode Deb,
 aluminium et hydrogène échangeables : titrimétrie.

3) Comparaison de la densité d'enracinement et des propriétés du sol

Nous effectuerons cette comparaison dans la deuxième partie à l'aide de deux méthodes :

- la méthode graphique, rapide, fournissant une représentation concrète des corrélations,
- la méthode statistique, donnant de ces corrélations des valeurs chiffrées et permettant une étude plus approfondie (coefficients de corrélation partielle, etc.).

Chaque horizon (ou plus exactement chacun des prélèvements) sera considéré comme une entité indépendante représentée par sa densité d'enracinement R et ses propriétés physiques et chimiques chiffrées. Cependant, comme il s'agit d'« observations », toutes ces variables sont aléatoires (et non pas contrôlées) ; c'est pourquoi les corrélations que l'on mettra en évidence ne pourront être interprétées automatiquement dans un sens de causalité.

2. — CORRÉLATIONS ENTRE L'ENRACINEMENT ET LES PROPRIÉTÉS DU SOL ET PRÉVISION DE L'ENRACINEMENT

A. — RELATIONS ENTRE LES PROPRIÉTÉS DU SOL ET L'ENRACINEMENT

1) Graphiques enracinement - propriétés du sol

Pour chaque propriété du sol et chacune des deux essences, nous avons établi une figure où se trouvent représentés en abscisse cette propriété et en ordonnée la densité d'enracinement R (1). Soit l'une de ces figures : R fonction de la densité apparente pour le Pin (fig. 1) ; chaque point représente un horizon. Tous les horizons étudiés quel que soit le sol sont représentés, à part les horizons A_0 et A_1 , en raison des propriétés très spéciales de la matière organique, pouvant perturber les relations densité d'enracinement - propriétés du sol. Pour cette même raison, les horizons situés sous A_1 mais où l'on pouvait craindre des infiltrations importantes de matière organique, c'est-à-dire ceux situés jusqu'à -30 à -35 cm, ont été représentés différemment des autres horizons.

Nous avons obtenu deux types de figures : certains ne montrent aucune relation observable entre R et la propriété considérée ; par contre d'autres figures s'avèrent bien plus intéressants ; elles concernent :

a. La densité apparente d' (fig. 1)

La figure établie pour le Pin montre une liaison entre ces deux variables ; en moyenne R diminue lorsque d' augmente. Cependant une droite moyenne ne serait

(1) Rappelons que nous désignons par R la densité d'enracinement définie comme le nombre de racines de diamètre $\geq 3/4$ mm de l'espèce considérée émergeant du profil dans un rectangle de 10 dm².

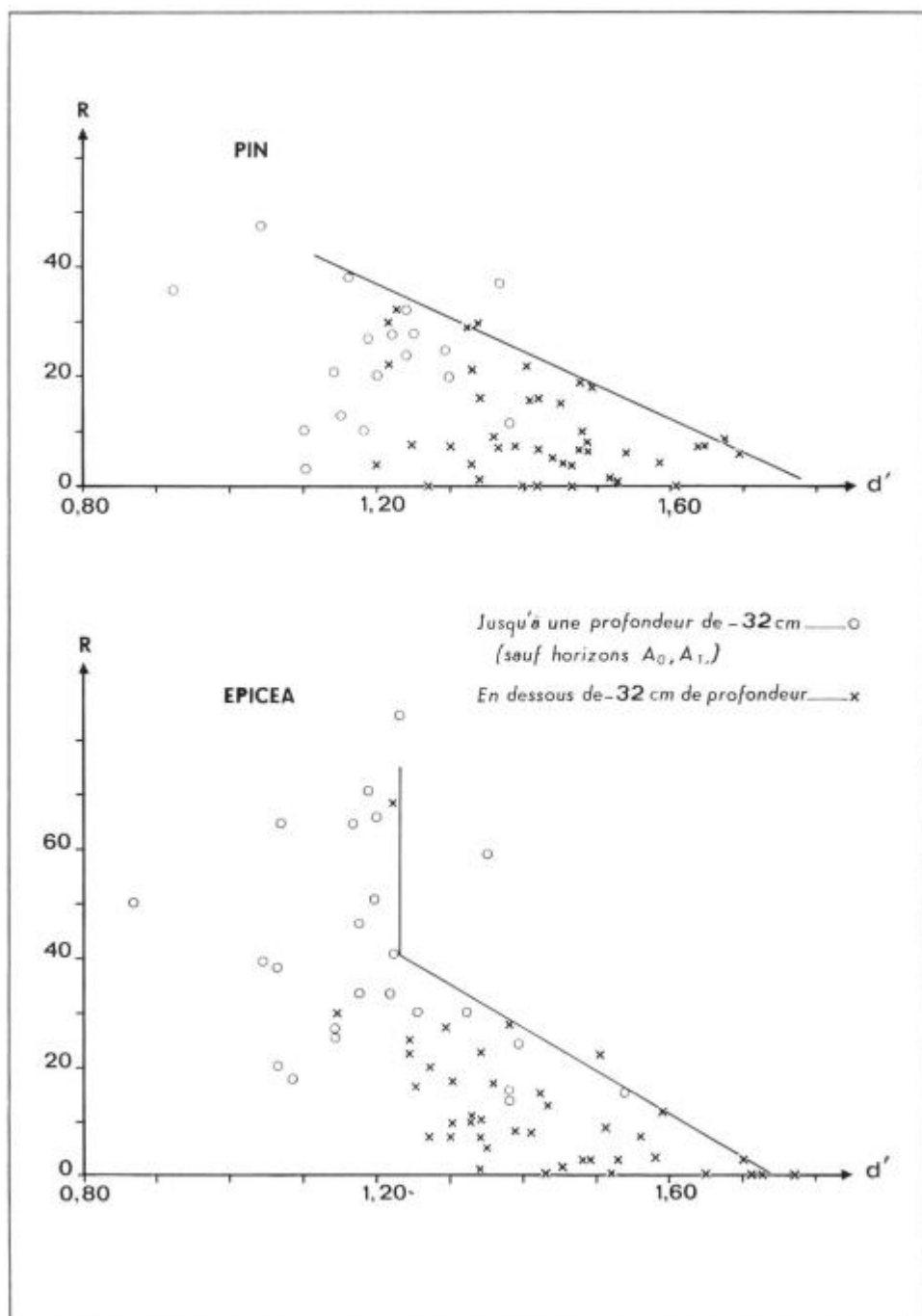


FIG. 1. — Densité d'enracinement R en fonction de la densité apparente d' .

pas très intéressante en vue d'une prévision car les points représentatifs en seraient en général trop éloignés ; cela est normal car l'enracinement ne dépend pas que de la densité apparente. Par contre, nous pouvons tracer une droite séparant la figure en deux parties, presque tous les points représentatifs étant situés sous la droite. Nous appelons cette droite « droite limite » : elle fournit la valeur maximale que peut atteindre en général R pour chaque valeur de d' : ainsi quand $d' = 1,30$, R maximal est égal à 30. Les quelques points situés au-delà de la droite limite représentent surtout des horizons situés à une profondeur inférieure à -30 à -35 cm ; il en sera d'ailleurs de même sur les figures suivantes, où nous avons également laissés quelques points, au maximum 10 %, au-delà de la droite. Nous avons pu ainsi tracer une droite limite de R en fonction de d' , pour l'Epicéa (fig. 1) : la droite limite est presque identique à celle du Pin pour $d' > 1,23$; au-dessous de cette valeur, R n'est plus limité par d' . Des droites limites ont été également tracées pour les propriétés citées ci-dessous.

b. *L'indice I_s (instabilité structurale) (fig. 2)*

Pour le Pin, il y a deux segments de droite limite. $I_s = 1,00$ constitue une valeur critique : lorsque I_s est $> 1,00$, R est ≤ 11 .

Pour l'Epicéa, il y a également deux segments de droite limite ainsi qu'une valeur critique ($I_s = 0,75$).

Pour une même valeur de I_s , R maximal est plus élevé pour l'Epicéa que pour le Pin : I_s limite donc R du Pin à des valeurs plus faibles que R de l'Epicéa.

c. *Les deux autres indices de stabilité structurale*

K_p (ou plus exactement $\log_{10} K_p$) et Σ (fig. 2) ont également donné lieu au tracé d'une droite limite pour les deux essences. De même que pour I_s , une même valeur de ces variables correspond à un R maximal plus élevé pour l'Epicéa que pour le Pin.

d. *La porosité non capillaire (Pnc) (fig. 2)*

Nous obtenons des droites limites pour les deux essences.

e. *La réserve maximale en eau utile au-dessus de chaque prélèvement (EUC)*

Les deux essences donnent lieu au tracé d'une droite limite ; mais son intérêt est assez douteux car, bien que lié à la densité apparente et à $c-f$, EUC dépend surtout de la profondeur.

Certaines propriétés du sol ne fournissent une droite limite que pour le Pin ; ainsi, R maximal du Pin est d'autant plus élevé que la teneur en sables est plus forte, que celle en limons (fig. 2), argile et phosphore (fig. 3) est plus faible et que le pH (fig. 3) et la porosité capillaire sont moins élevés.

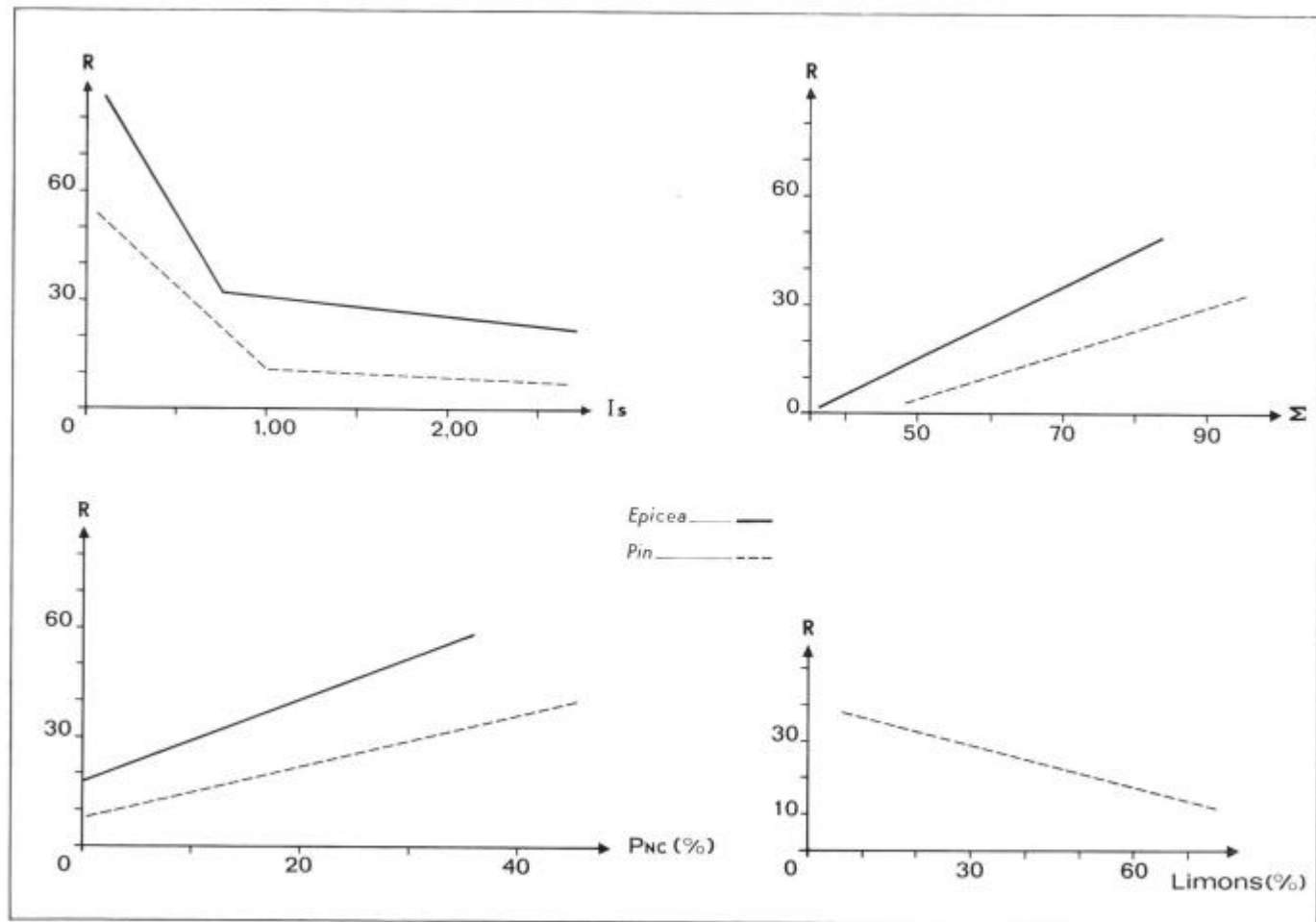


FIG. 2. — Droites limites de la densité d'enracinement R en fonction des indices I_s et Σ , de la porosité non capillaire et de la teneur en limons.

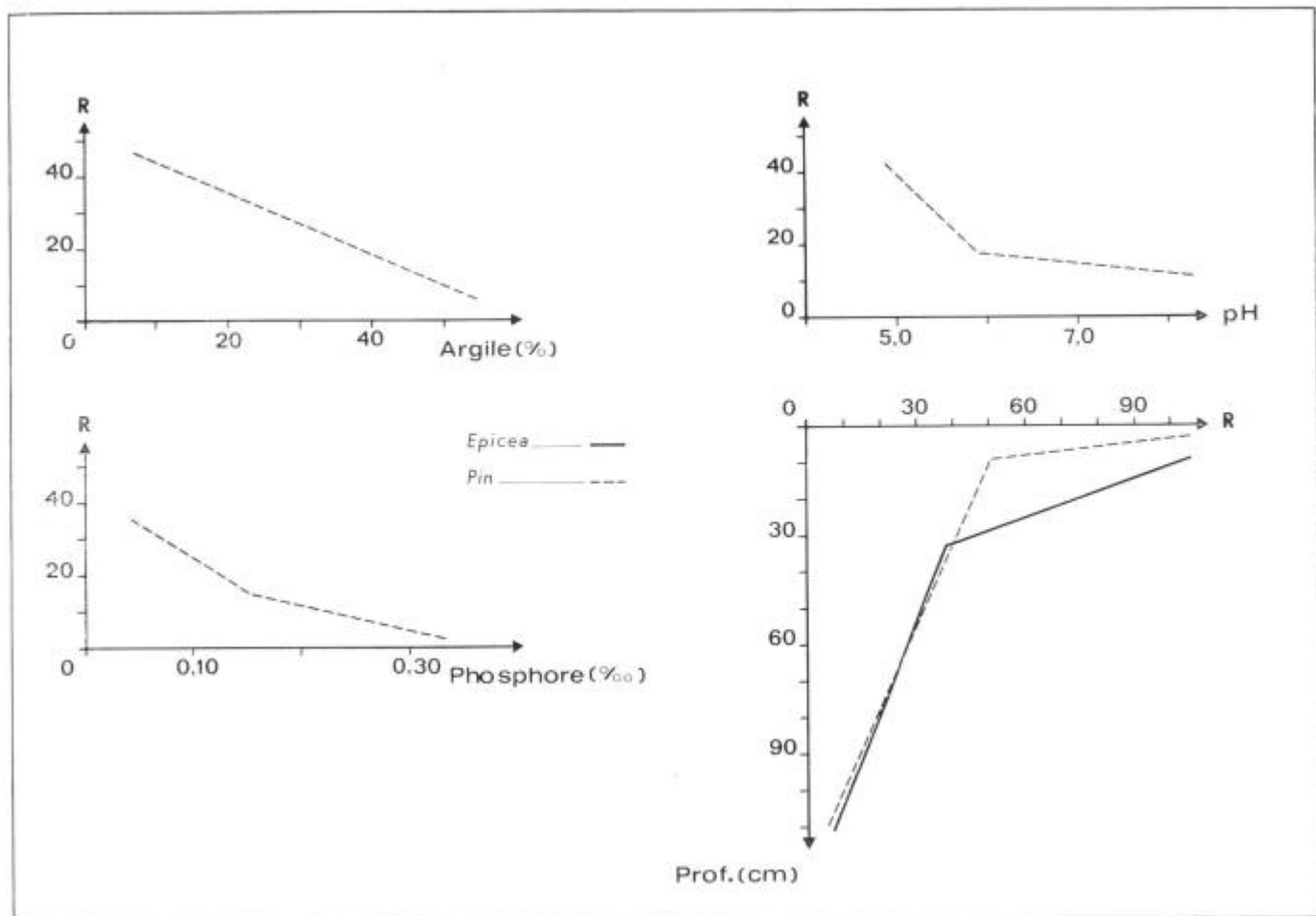


FIG. 3. — Droites limites de la densité d'enracinement R en fonction des teneurs en argile et en phosphore, du pH, et de la profondeur.

Les autres propriétés du sol ne fournissent une droite limite intéressante pour aucune des deux essences.

D'après l'ensemble de ces figures, l'enracinement du Pin apparaît plus limité que celui de l'Epicéa par les propriétés du sol.

Enfin, examinons la variation générale de R avec la profondeur du sol (fig. 3). Nous avons pu tracer une droite limite pour chaque essence. Jusqu'à -30 à -35 cm, R de l'Epicéa n'est guère limité, il peut prendre des valeurs extrêmement élevées ; ainsi dans les horizons A_1 il est en général nettement supérieur à 100. Cela n'est pas le cas pour le Pin : R de cette essence est au maximum égal à 100. En-dessous de -35 cm, les droites limites des deux essences sont presque superposables.

2) Les coefficients de corrélation entre les propriétés du sol et l'enracinement

a. Les coefficients de corrélation totale (tableau 1)

La plupart des propriétés physiques ont un coefficient de corrélation totale avec R très significatif, en général au seuil de 1‰. Remarquons que les variables qui avaient permis le tracé d'une droite limite correspondent, dans l'ensemble, à celles dont le coefficient de corrélation totale avec R , sans les horizons organiques, est très significatif, ce qui est logique.

b. Les coefficients de corrélation à profondeur et âge constants (tableau 1)

Ils s'avèrent plus intéressants que les coefficients de corrélation totale car, d'une part, la variation de la profondeur (agissant à la fois sur R et sur certaines propriétés du sol) était susceptible de faire apparaître des liaisons n'existant pas à profondeur constante ; et d'autre part R varie sans doute quelque peu avec l'âge dans l'intervalle d'âges des peuplements étudiés.

Une seule liaison demeure significative au seuil de 1‰ : celle concernant l'indice de stabilité structurale Σ pour l'Epicéa. Quelques unes sont significatives à 1‰. Ainsi, pour une profondeur identique et un même âge, l'enracinement des deux essences est favorisé par une structure stable et une faible teneur relative en calcium, celui de l'Epicéa par une densité apparente peu élevée, celui du Pin par une faible teneur en limons et en phosphore. (Il s'agit de la teneur relative en calcium, car c'est le rapport Ca^{++}/T qui a été utilisé dans l'étude statistique ; il en est d'ailleurs de même pour les autres cations).

c. Les coefficients de corrélation partielle

Les liaisons précédentes sont observables réellement dans la nature mais elles peuvent n'être que le reflet de l'action d'une troisième variable simultanément sur R et sur la propriété considérée. Les coefficients de corrélation partielle présentent l'avantage d'indiquer la liaison que l'on trouverait entre R et chaque propriété en maintenant constantes toutes les autres propriétés étudiées.

Le calcul du coefficient de corrélation partielle de chaque propriété du sol avec

TABLEAU 1
Variables dont le coefficient de corrélation avec la densité
d'enracinement R est significatif (1)

ÉPICÉA				PIN							
Coefficients de corrélation totale horizons organiques compris		Coefficients de corrélation totale sans les horizons organiques		Coefficients de corrélation à âge et profondeur constants (sans les horizons organiques)		Coefficients de corrélation totale horizons organiques compris		Coefficients de corrélation totale sans les horizons organiques		Coefficients de corrélation à profondeur et âge constants, sans les horizons organiques	
<u>d'</u>	(-0,81)	<u>Profondeur</u>	(-0,75)	<u>Σ</u>	(0,45)	<u>d'</u>	(-0,70)	<u>EUC</u>	(-0,70)	<u>Limons</u>	(-0,42)
<u>Σ</u>	(0,80)	<u>d'</u>	(-0,73)	<u>Al</u>	(0,38)	<u>EUC</u>	(-0,66)	<u>Σ</u>	(0,63)	<u>P₂O₅</u>	(-0,41)
<u>Mat. org.</u>	(0,78)	<u>EUC</u>	(-0,73)	<u>d'</u>	(-0,38)	<u>Mat. org.</u>	(0,65)	<u>Prof.</u>	(-0,63)	<u>P₂O₅A₁</u>	(-0,39)
<u>prof.</u>	(-0,77)	<u>Mat. org.</u>	(0,66)	<u>Ca</u>	(-0,35)	<u>Prof.</u>	(-0,62)	<u>Hy1</u>	(-0,61)	<u>Σ</u>	(0,39)
<u>EUC</u>	(-0,72)	<u>Σ</u>	(0,58)			<u>Is</u>	(-0,61)	<u>Is</u>	(-0,60)	<u>Is</u>	(-0,37)
<u>Is</u>	(-0,70)	<u>Is</u>	(-0,56)			<u>Hy1</u>	(-0,55)	<u>Mat. org.</u>	(0,54)	<u>Ca</u>	(-0,36)
<u>Kp</u>	(0,62)	<u>Hy1</u>	(-0,47)			<u>Hy2</u>	(-0,51)	<u>Hy2</u>	(-0,53)	<u>Pc</u>	(-0,35)
<u>Pc</u>	(-0,46)	<u>Hy2</u>	(-0,46)			<u>Σ</u>	(0,51)	<u>Pc</u>	(-0,52)	<u>Al</u>	(0,33)
<u>Hy2</u>	(-0,42)					<u>Kp</u>	(0,41)	<u>Kp</u>	(0,51)	<u>EUC</u>	(-0,32)
<u>Hy1</u>	(-0,41)					<u>Pc</u>	(-0,41)	<u>P₂O₅</u>	(-0,49)	<u>Hy1</u>	(-0,32)
<u>c-f</u>	(-0,33)							<u>d'</u>	(-0,47)	<u>Kp</u>	(0,31)
<u>Pr5</u>	(-0,30)							<u>argile</u>	(-0,47)	<u>argile</u>	(-0,30)
								<u>Ca</u>	(-0,41)		
								<u>P₂O₅A₁</u>	(-0,31)		
								<u>Limons</u>	(-0,28)		

(1) Les coefficients de corrélation soulignés de 2 traits sont significatifs au seuil de 1/100, ceux soulignés d'1 trait le sont au seuil de 1/10, ceux non soulignés le sont au seuil de 5 %.

R présente cependant un inconvénient : ce coefficient ne peut être significatif pour les variables très liées entre elles, comme la plupart des propriétés physiques ; en effet, dans le calcul du coefficient pour l'une de ces variables, les propriétés auxquelles elle est liée sont maintenues constantes, ce qui ne lui laisse qu'une possibilité de variation très réduite. Pour supprimer cet inconvénient, les coefficients de corrélation partielle avec R ont été calculés non seulement pour chaque propriété du sol considérée séparément, mais aussi pour différentes combinaisons de ces propriétés, combinaisons appelées composantes principales ; les différentes composantes principales sont indépendantes les unes des autres : lors du calcul des coefficients de corrélation partielle, les variables très liées entre elles ne seront pas éliminées.

Ces deux processus de calcul des coefficients de corrélation partielle sont complémentaires. Ils font apparaître la liaison entre R et certaines propriétés, en particulier (le signe + ou - indique que la liaison est positive ou négative) :

- pour l'Epicéa, en premier lieu :
 - la stabilité structurale (et les propriétés qui lui sont liées)..... +
 - le potassium de l'horizon considéré..... +

ensuite :

- le potassium de l'horizon A_1 (liaison négative avec R des autres horizons du profil)..... -
- la densité des racines autres que celles des résineux..... -
- Pr5 -

- pour le Pin :
 - le phosphore -
 - l'intensité de l'hydromorphie (Hyl)..... -
 - la matière organique +
 - la densité des racines autres que celles des résineux..... -
 - le pH -

Ces liaisons avec R sont réelles, bien que parfois non observables dans la nature (contrairement à celles mises en évidence par le calcul des coefficients de corrélation totale). Cependant, comme nous l'avons indiqué précédemment, il ne s'agit pas nécessairement de relations de causalité.

B. — PRÉVISION DE L'ENRACINEMENT

1) *Prévision à l'aide des droites limites*

a. *Détermination graphique de l'enracinement maximal possible R_d*

Pour un horizon dont nous connaissons les diverses caractéristiques physiques et chimiques, nous pouvons évaluer l'enracinement maximal possible en nous reportant aux différentes droites limites : à chaque propriété du sol, on peut faire correspondre une densité d'enracinement limite, d'où pour l'ensemble des propriétés de

l'horizon une série de valeurs dont la plus petite, Rd , est considérée comme la densité maximale possible d'enracinement dans l'horizon considéré.

En recherchant pour les différents horizons de tous les sols étudiés quelle propriété du sol y fournit cette densité maximale possible Rd , nous nous sommes aperçus que certaines propriétés interviennent bien plus souvent que d'autres. Nous constatons ainsi le rôle essentiel des propriétés physiques et en particulier de la stabilité structurale pour l'enracinement.

Le tableau 2 résume pour les principales propriétés les conditions à remplir pour obtenir certaines valeurs de R .

TABLEAU 2

Conditions nécessaires pour obtenir une densité d'enracinement R donnée

ÉP: CÉA

R	d'	Is (1)	Log 10 Kp	Σ	Profondeur (cm)
5	< 1,68	(< 4,00)	> 0,79	> 40	< 115
10	< 1,61	(< 3,50)	> 0,93	> 45	< 105
20	< 1,49	(< 3,00)	> 1,27	> 55	< 80
30	< 1,36	< 1,13	> 1,58	> 65	< 55
40	< 1,23	< 0,65	> 1,90	> 75	< 33

PIN

R	d'	Is (1)	Σ	P_2O_5 (‰)	pH
5	< 1,72	(< 4,00)	> 51	< 0,30	
10	< 1,64	< 1,50	> 59	< 0,23	< 8,5
20	< 1,48	< 0,80	> 75	< 0,13	< 5,8
30	< 1,32	< 0,60	> 91	< 0,07	< 5,4
35	< 1,24	< 0,47	> 98	< 0,05	< 5,2

(1) Les chiffres entre parenthèses sont très approximatifs, car ils proviennent d'une extrapolation.

Par exemple, R ne pourra éventuellement atteindre 30 chez le Pin que si toutes les conditions suivantes sont réunies : $d' < 1,32$, $Is < 0,60$, $\Sigma > 91$, $P_2O_5 < 0,07$ ‰, $pH < 5,4$. Ces conditions sont toutes nécessaires mais R n'atteint pas obligatoirement la valeur indiquée. D'autre part, dans un très petit nombre d'horizons, R peut atteindre la valeur indiquée même si toutes les conditions ne sont pas remplies (points situés au-delà des droites limites).

b. *Comparaison de l'enracinement maximal déduit des droites limites (Rd) et de l'enracinement observé (Ro)*

Nous avons représenté sur une figure, pour les différents prélèvements, Ro en fonction de Rd (enracinement maximal autorisé par la droite limite la plus limitante). Les droites limites fournissent R maximal et non R réel ; aussi la précision,

en vue d'une prévision de l'enracinement, est-elle assez faible. Nous obtenons pourtant ainsi une certaine idée de R réel ; par exemple, pour l'Epicéa, pour $R_d = 30$, R_o (c'est-à-dire l'enracinement réel) sera en général compris entre 6 et 30.

2) Prévision à l'aide des formules fournies par l'étude statistique

Les coefficients de corrélation partielle entre R et les propriétés du sol ont été calculés par la méthode des régressions progressives qui possède l'avantage suivant : elle fournit un certain nombre d'équations (équations de régression multiple) permettant de calculer R à l'aide d'un nombre plus ou moins élevé de propriétés du sol. La première de ces équations permet de calculer R à l'aide d'une seule propriété, celle dont le coefficient de corrélation totale avec R est le plus élevé ; dans la deuxième équation se trouve, en plus de cette première variable, une deuxième variable explicative, celle qui fournit l'information supplémentaire maximale ; et ainsi de suite jusqu'à l'équation qui donne R en fonction de toutes les variables étudiées ; c'est la plus précise, mais elle exige la mesure d'un nombre élevé de variables. De plus l'augmentation du coefficient de corrélation multiple d'une équation à la suivante est de plus en plus faible : la précision n'augmente plus guère. C'est pourquoi nous avons retenu à titre d'exemple, pour l'Epicéa, l'équation à 7 variables explicatives seulement ; la voici (les variables citées en tête sont celles dont la valeur calculée de R dépend le plus dans cette équation) (test t) :

$$\sqrt{R} = +4,16 \times \text{indice } \Sigma - 0,0382 \times \text{profondeur} + 0,0225 \times \text{Hy}2 + 4,43 \times \text{potassium} - 1,20 \times \text{cailloux} + 6,02 \times \text{matière organique} - 1,55 \times \text{densité apparente} + 2,31.$$

Le coefficient de corrélation multiple de cette équation à 7 variables explicatives est de 0,833, alors que celui de l'équation à 22 variables n'est guère supérieur (0,889).

Pour le Pin, nous avons retenu de la même façon l'équation suivante :

$$\sqrt{R} = -43,0 \times \text{phosphore} - 6,40 \times \text{potassium} - 0,921 \times \text{Ca}^{++}/T - 0,00984 \times \text{EUC} - 0,176 \times \text{Hy}1 + 1,60 \times \Sigma + 10,2 \times \text{mat organ.} + 6,13 \times (\text{c-f}) + 2,93.$$

N.B. — Dans ces équations, certaines données doivent au préalable subir une transformation : les nombres représentant un pourcentage doivent être remplacés par l'arc sinus racine carrée de leur valeur ; il s'agit de Σ , la porosité capillaire, c-f, l'argile, les limons, les cailloux, la matière organique, Ca/T , K/T , A_1/T , P_2O_5 .

Afin d'obtenir une certaine idée de la valeur de chacune de ces équations en vue d'une prévision de R , nous avons opéré de la même façon que pour la prévision à l'aide des droites limites : nous avons porté sur une figure en ordonnées la valeur de R calculé par l'équation retenue (R_c) et en abscisse la valeur de R observé (R_o).

La précision n'est pas très bonne ; ces formules fournissent seulement une idée de l'enracinement futur dans un horizon donné ; par exemple pour l'Epicéa si $R_c = 25$, R réel sera compris entre 13 et 38, mais sera tout de même le plus souvent voisin de 25.

La précision fournie dans la prévision de R par ces équations est supérieure à celle obtenue à l'aide des droites limites. Mais cette dernière méthode présente l'avantage de la simplicité. La prévision de R par ces deux méthodes ne saurait de toutes façons être parfaite : elles ne fournissent R qu'en fonction des seules propriétés de l'horizon considéré ; or les propriétés des autres horizons du profil, en particulier de ceux qui l'entourent, influent vraisemblablement sur R de cet horizon (c'est ce que nous avons appelé des « effets contacts », dont nous montrerons des exemples dans la troisième partie) ; en particulier s'il y a variation assez brusque de certaines propriétés (dans le sens défavorable) d'un horizon au suivant, nous avons vérifié que R de ce deuxième horizon est nettement inférieur à ce que laissent prévoir les propriétés du sol que ce soit par la méthode statistique ou la méthode graphique.

3. — LES ENSEMBLES DE PROFILS ET LEUR ENRACINEMENT

A. — *Le groupement des sols*

Le travail exposé dans la deuxième partie était analytique ; pour prévoir la densité d'enracinement dans un sol, il rend nécessaire la mesure d'un certain nombre de propriétés pour chacun des horizons de ce sol, ce qui est long. Une question se pose alors : ne pourrait-on obtenir rapidement une certaine idée de l'enracinement futur dans un sol, fondée sur des caractères immédiatement accessibles de ce sol, en particulier sans effectuer d'analyses de sol, ou très peu ? Il s'avère en fait que les propriétés dont R dépend le plus sont déterminées en partie par la pédogenèse mais principalement par les matériaux originels, c'est-à-dire la roche-mère ; cela se vérifie quelle que soit la profondeur ; soit par exemple l'indice Σ de stabilité structurale : les sols formés sur grès vosgien prennent les valeurs de Σ les plus élevées de tous les sols, à toute profondeur ; les sols formés sur roche-mère argileuse épaisse (muschelkalk, sinémurien) ont au contraire toujours la structure la moins stable, etc.

Nous avons donc groupé les sols étudiés en des ensembles fondés sur le type de roche-mère. Nous avons groupé dans un même ensemble des roches-mères qui peuvent être d'âges différents mais dont les propriétés sont voisines. Quant à la pédogenèse, elle permettra parfois d'expliquer les différences d'enracinement des divers sols au sein d'un même ensemble.

L'enracinement dans tous les sols d'un même ensemble possède un certain nombre de caractéristiques communes. Il suffira donc de pouvoir rattacher un sol quelconque à l'un de ces ensembles pour obtenir immédiatement une idée de son type d'enracinement ; cela n'est évidemment valable que dans la région où l'on a effectué l'étude.

La densité d'enracinement diminue en général dans un sol quelconque avec la profondeur ; c'est pourquoi il sera nécessaire de la caractériser, non seulement par sa valeur réelle, mais surtout par sa valeur relative par rapport à la densité d'enracinement des autres sols pour une profondeur à peu près identique.

B. — *Sols formés sur roche-mère argileuse épaisse*

Il s'agit des sols formés sur muschelkalk (et à la limite grès bigarré-muschelkalk) et de ceux formés sur lias argileux. Ces roches-mères ont une texture très fine ; elles comprennent plusieurs couleurs en mélange : gris-verdâtre, lie de vin, rouille, parfois en couches horizontales.

Les sols étudiés sont des sols bruns lessivés marmorisés ou des pseudogleys ; leur texture est argileuse en profondeur, limoneuse ou argileuse en surface. Les sols proprement dits sont souvent peu profonds, la roche-mère peu altérée apparaissant parfois dès -40 cm.

L'enracinement de l'horizon A₁ dans tous les ensembles de sols est toujours élevé pour l'Epicéa ; pour le Pin, il dépend en général de la densité de la végétation secondaire. Donc, l'enracinement de l'horizon A₁ ne pourra être caractéristique des divers ensembles de sols ; c'est pourquoi nous ne nous y arrêtons pas.

La densité d'enracinement relative de la station-type pour les sols formés sur roche-mère argileuse épaisse est indiquée sur le tableau 3 (1).

TABLEAU 3

Densités relatives d'enracinement des sols formés sur roche-mère argileuse épaisse

	A ₁	A ₁ /A _{2g}	Bg	Cg
Epicéa.....	1	1	7	7
Pin.....	3	3	5	6

Ainsi, pour les deux essences, seuls les horizons contenant suffisamment de matière organique ont une densité d'enracinement supérieure à la moyenne : horizon A₁ et horizon A_{2g} à infiltrations de matière organique. Cela se traduit, surtout pour l'Epicéa, par un enracinement presque uniquement situé dans les horizons de surface, jusqu'à -20 ou -25 cm au maximum ; ailleurs, il est très faible (sauf dans le cas rare où la roche-mère est suffisamment profonde).

L'examen des droites limites montre que c'est l'indice Σ de stabilité structurale qui constitue la variable limitant le plus l'enracinement dans la plupart des horizons pour cet ensemble de sols (parfois aussi l'indice K_p pour l'Epicéa).

Effectivement Σ prend des valeurs extrêmement faibles dans les horizons non organiques, ce qui explique leur très faible enracinement. Par la seule mesure de Σ et à l'aide de la droite limite correspondante, on obtiendra souvent une bonne prévision de l'enracinement des différents horizons d'un sol quelconque de cet ensemble.

(1) 7 classes de densité relative d'enracinement (c'est-à-dire par rapport aux autres sols de la même essence dans la même catégorie de profondeur) :

1 = très élevé 2 = élevé 3 = assez élevé 4 = moyen 5 = assez faible 6 = faible
7 = très faible.

Cependant, dans les 20 premiers centimètres de sol, l'enracinement est souvent supérieur à ce que laisse prévoir Σ : les propriétés particulières de la matière organique en constituent probablement la cause première.

C. — Sols formés sur terra fusca

C'est une roche-mère complexe (argiles de décalcification mélangées à des limons éoliens) formée sur certains affleurements calcaires ; les stations étudiées se trouvent sur calcaire bajocien.

Dans ces stations, les sols sont des sols bruns lessivés ou des sols lessivés, parfois légèrement marmorisés en profondeur. La texture est équilibrée à limoneuse en A_1 et A_2 , argileuse en B.

TABLEAU 4

Densités relatives d'enracinement des sols formés sur terra fusca

	A_1	A_2	B 1 ^{re} partie	B 2 ^e partie
Epicéa.....	1	4	6	4-5
Pin	6	3	6	5

En valeur relative (tableau 4), l'enracinement est en moyenne assez mauvais pour les deux essences. C'est en A_2 (jusqu'à -35 cm) qu'il est le meilleur (infiltrations de matière organique), surtout pour le Pin. Il est inférieur à la moyenne en B, en particulier dans la partie supérieure de cet horizon.

C'est l'indice I_s d'instabilité structurale qui est la variable limitant le plus l'enracinement (avec parfois le phosphore pour le Pin) ; effectivement, tout comme l'enracinement, I_s prend des valeurs moyennes en A_2 et assez défavorables dans l'horizon B, principalement dans la partie supérieure de cet horizon (les deux autres indices de stabilité structurale ont d'ailleurs une variation comparable à celle de I_s). La mesure de I_s fournit, à l'aide de la droite limite correspondante, une bonne prévision de R pour l'horizon A_2 ; pour B, mais principalement dans la partie supérieure de cet horizon, R réel est assez nettement inférieure à ce que laisse prévoir la mesure de I_s : cela est peut-être dû à un « effet-contact », provoqué par le net changement de propriétés physiques entre A_2 et B.

D. — Sols à calcaire actif

Ces sols sont formés sur différents étages de jurassique supérieur, auxquels nous avons adjoint le keuper. Les stations étudiées sont situées sur roche-mère en place ou sur éboulis.

Les sols sont en général peu profonds. Sur jurassique supérieur, ce sont des sols bruns calcaires, parfois des sols bruns calcimorphes. Il y a souvent de nombreux cailloux dans le profil. Sur keuper, ce sont des sols calcaires vertisoliques ; ils ont

également de nombreux (mais petits) cailloux à partir d'une faible profondeur. La texture de tous ces sols est argileuse dans tout le profil (parfois équilibrée en profondeur).

L'enracinement dépend beaucoup du nombre et de la répartition des cailloux : il est de très bon à très mauvais. Lorsque les cailloux ne sont pas trop nombreux et que leur pourcentage ne varie pas trop brusquement, la densité relative d'enracinement est moyenne dans tout le profil pour les deux essences ; lorsqu'ils sont très nombreux, cette densité est évidemment faible. Au contraire, dans un horizon situé immédiatement avant une forte augmentation du pourcentage de cailloux, elle est assez élevée.

La variable la plus limitante pour l'enracinement du Pin sur tous ces sols est le pH, mais il n'est guère plus limitant que la stabilité structurale. La mesure du pH fournit, à l'aide de la droite limite correspondante, une bonne prévision de *R* du Pin lorsque les cailloux ne sont pas très abondants.

Pour l'Epicéa, la variable la plus limitante est en général l'indice Σ ou la profondeur elle-même. Les valeurs de Σ sont assez variables, car elles dépendent de la proportion de petits fragments calcaires contenus dans la terre fine ; cependant, ses valeurs les plus fréquentes sont moyennes, ce qui correspond souvent à l'enracinement.

E. — Sols formés sur limons

La roche-mère des stations étudiées est formée de limons éoliens recouvrant les argiles à Amaltheus du Charmouthien. Ces argiles influent probablement sur les propriétés de la partie inférieure des profils.

Les sols sont des pseudogleys ou des sols bruns lessivés à pseudogley. Leur texture, limoneuse en *A*₁, *A*₂ et *A*_{2g}, c'est-à-dire jusqu'à -40 cm, devient argileuse en *Bg*.

TABLEAU 5

Densités relatives d'enracinement des sols formés sur limons

	<i>A</i> ₁	<i>A</i> ₂ ou <i>A</i> _{2g}	<i>A</i> _{2g} / <i>Bg</i>	<i>Bg</i> ₁	<i>Bg</i> ₂
Epicéa	5	4	3	3	1
Pin	2	6	6	4	

En valeur relative (tableau 5), on constate qu'à part l'horizon *A*₁, particulier, l'Epicéa a un enracinement moyen ou supérieur à la moyenne et le Pin un enracinement moyen ou inférieur à la moyenne. En particulier, malgré une hydromorphie poussée, l'Epicéa s'enracine assez fortement sur une relativement grande profondeur. Cependant, il faut signaler que les propriétés du sol (en particulier stabilité structurale) des stations d'Epicéa étudiées sont un peu plus favorables que celles des stations de Pin.

Par examen des droites limites, on s'aperçoit que la variable la plus limitante de l'enracinement est le plus souvent l'indice *I*_s pour les deux essences (et parfois

le phosphore pour le Pin et la profondeur pour l'Epicéa). A l'aide de ces variables, principalement Is, on aboutit en général à une bonne prévision de l'enracinement.

L'enracinement de l'une des stations étudiées (Epicéas) excellent dans tout le profil, est même supérieur à ce que laissent prévoir les droites limites pour certains horizons ; à ce sujet, il est bon de préciser le fait suivant : les graines à l'origine des arbres de cette station venaient d'un bouquet d'Epicéas ayant résisté à une sécheresse très importante en 1893 en Haute-Saône ; il est donc possible que l'enracinement particulièrement bon de cette station soit une conséquence du facteur « race » : c'est peut-être un enracinement de ce type, dense et profond, qui a permis aux Epicéas de résister à la sécheresse de 1893.

F. — Sols formés sur roche-mère provenant au moins en partie du grès vosgien

Dans ces sols, la texture est sableuse ou équilibrée mais il y a toujours au moins 50 % de sables. La structure est en général stable. Cet ensemble de sols peut se diviser en trois sous-ensembles.

1) Sols formés sur grès vosgien en station plate (plaine)

Il s'agit des sols de la région de Saint-Avoid. Ce sont en général des sols bruns lessivés à pseudogley ou des sols lessivés à pseudogley (l'un des sols étudiés est un sol brun oligotrophe). La texture est en général sableuse.

TABLEAU 6

Densités relatives d'enracinement des sols formés sur grès vosgien en station plate

	A ₁	A ₁ /A ₂	A ₂ 1 ^{re} partie	A ₂ 2 ^e partie	Bg1	Pg2
Epicéa	1		1	1	7	1
Pin	Très variable	4	3	3	4	3

Jusqu'à la partie inférieure de A₂, qui est très épais, c'est-à-dire jusqu'à environ -65 cm, l'enracinement relatif (tableau 6) est en général moyen ou supérieur à la moyenne pour les deux essences ; il est en particulier très élevé pour l'Epicéa : c'est dans ce sous-ensemble que l'on trouve les meilleurs enracinements d'Epicéa de toutes les stations étudiées. Dans la partie supérieure de l'horizon Bg1 se trouve très souvent une couche très fortement concrétionnée qui, bien que peu épaisse, forme un obstacle important à la pénétration des racines ; l'enracinement est alors faible en Bg1, mais cela n'empêche cependant pas un certain enracinement en Bg2, dans les zones décolorées du plancher du pseudogley.

La variable la plus limitante de l'enracinement est la densité apparente pour les deux essences (avec parfois la profondeur pour l'Epicéa et le phosphore pour le Pin) ; en effet, ce ne peut être la stabilité structurale, qui est très bonne, au moins en A₂. La densité apparente, souvent assez faible en A₂ (ce qui permet des densités

élevées d'enracinement), devient très élevée en Bg. En raison de la variation très brusque des propriétés physiques du sol entre A₂ et Bg, il peut se produire parfois un « effet-contact » : enracinement plus faible que ne le laisseraient prévoir les propriétés du sol en Bg et plus élevé dans la partie inférieure de A₂.

2) *Sols formés sur grès vosgien en station à forte pente (à une certaine altitude)*

Les sols étudiés se trouvent dans la région de Saint-Dié. Ce sont des sols bruns oligotrophes et des sols podzoliques. La texture est sableuse dans tout le profil.

Nous n'avons étudié que des peuplements de Pin dans ce sous-ensemble, de même que dans le suivant.

TABLEAU 7

Densités relatives d'enracinement des sols formés sur grès vosgien en station à forte pente

	(B) (ou A ₂) 1 ^{re} partie	(B) ou B Fe 1 ^{re} partie	(B) ou B Fe C 2 ^e partie
Pin	4 (ou 2)	2	2

L'enracinement relatif (tableau 7) est en général élevé, surtout en profondeur. Les meilleurs enracinements de Pin de toutes les stations étudiées se trouvent dans ce sous-ensemble.

La variable la plus limitante de l'enracinement est en général, comme pour le sous-ensemble précédent, la densité apparente (avec parfois le phosphore) : ce ne peut être la stabilité structurale, qui est très élevée. En fait, la densité apparente, qui prend des valeurs moyennes à assez faibles dans tout le profil, y permet un bon enracinement.

Cependant, les propriétés physiques et l'enracinement des sols à podzolisation plus poussée que la plupart des sols étudiés peuvent être nettement plus défavorables, en particulier dans l'horizon A₂.

3) *Sols formés sur alluvions anciennes composées en partie de produits de démantèlement du grès vosgien*

Les sols étudiés, sur lesquels ne se trouvent que des peuplements de Pin, sont situés dans la région de Saint-Dié. Ce sont des sols bruns lessivés à pseudogley. Leur texture est équilibrée, mais ils contiennent environ 50 % de sables.

TABLEAU 8

Densités relatives d'enracinement des sols formés sur alluvions anciennes issues du grès

	A ₁	A ₂ 1 ^{re} partie	A ₂ ou A _{2g} 2 ^e partie	Bg1	Bg2
Pin	variable	1	2	6	4

L'enracinement relatif (tableau 8) est assez fort en moyenne. Il est élevé en A₂ et A_{2g}, c'est-à-dire jusqu'à -40 cm. Il est faible en Bg1 (jusqu'à -65 cm), et en Bg2 la présence de zones décolorées permet un certain enracinement, non négligeable compte tenu de la profondeur.

La variable la plus limitante de l'enracinement est l'indice Is pour la grande majorité des horizons (le phosphore pour les autres). Is (et la stabilité structurale en général), bien qu'un peu moins favorable que pour les deux sous-ensembles précédents, permet un enracinement nettement supérieur à la moyenne en A₂. Il se produit un « effet contact » : en raison d'une assez brusque détérioration des propriétés physiques, l'enracinement de la partie inférieure de A_{2g} est supérieur, et celui de Bg est inférieur, à ce que laissent prévoir les propriétés du sol.

G. — Conclusion

En conclusion de cette étude des ensembles de sols, nous pouvons tenter d'établir un classement. Les sols en moyenne les mieux enracinés sont dans un ordre décroissant, pour l'Epicéa, ceux formés sur : grès vosgien, limons, roche-mère calcaire, Terra-Fusca, roche-mère argileuse épaisse.

Pour le Pin, le classement est à peu près identique, à part pour les sols formés sur limons, dont l'enracinement relatif est moins bon que dans le cas de l'Epicéa.

4. — DISCUSSION ET CONCLUSIONS GÉNÉRALES

A. — LIAISONS ENTRE LES PROPRIÉTÉS DU SOL ET L'ENRACINEMENT

1) Propriétés importantes pour l'enracinement des 2 essences

a. La stabilité structurale

Elle apparaît d'une manière générale comme la propriété la plus importante.

Il a été possible de tracer des droites limites de l'enracinement en fonction de chacun des trois indices de la stabilité structurale. L'examen graphique montre que Is, Kp et Σ font partie des variables qui limitent le plus l'enracinement de l'Epicéa ; il en est de même pour Is et Σ en ce qui concerne celui du Pin. Chaque valeur de ces indices limite l'enracinement du Pin à des valeurs inférieures à celles de l'Epicéa.

Il y a presque toujours une bonne correspondance entre la stabilité structurale et l'enracinement de chacun des ensembles de sols étudiés, pour les deux essences ; par exemple, sur grès vosgien, où la structure est en général stable ou très stable, les deux essences sont bien enracinées ; sur roche-mère argileuse épaisse, où elle est très instable dans tout le profil, les enracinements sont en général très superficiels. Effectivement, la stabilité structurale joue un rôle essentiel dans la limitation de l'enracinement ; lorsqu'elle n'est pas particulièrement élevée, ce qui se produit en général dans les sols à texture autre que sableuse, elle constitue le plus souvent

le facteur limitant principal de l'enracinement. Très souvent alors les trois indices apparaissent tous presque aussi limitants ; cependant, l'un d'eux peut s'avérer un peu plus limitant (autrement dit, la valeur maximale possible de R déduite des droites limites est un peu plus faible si l'on utilise cet indice que si l'on considère les deux autres indices) ; il s'agit de :

— I_s : pour les deux essences sur Terra Fusca (R moyen en A2, assez faible ensuite) et sur limons (R assez bon pour l'Epicéa, faible pour le Pin) ;

pour le Pin sur alluvions anciennes issues du grès vosgien (R assez bon).

— Σ : pour les deux essences sur roche-mère argileuse épaisse (enracinement superficiel) ;

pour l'Epicéa dans les sols à calcaire actif (R moyen).

La composante principale représentant la structure et sa stabilité a un coefficient de corrélation partielle avec R significatif (et positif) pour l'Epicéa, ce qui indique une liaison bien réelle. Σ a un coefficient de corrélation avec R à profondeur et âge constants significatif pour les deux essences. Enfin, le coefficient de corrélation totale des trois indices avec R est significatif.

b. La densité apparente

Les droites limites de l'enracinement en fonction de d' sont également parmi les plus importantes pour les deux essences.

La densité apparente constitue le facteur limitant principal de l'enracinement dans les sols à structure stable ou très stable, ce qui est en général le cas des sols à texture sableuse (sols formés sur grès vosgien) ; l'enracinement de ces sols est presque toujours profond et relativement dense.

La densité apparente intervient avec un coefficient négatif dans la composante principale qui exprime la structure et sa stabilité et dont le coefficient de corrélation partielle avec R de l'Epicéa est significatif. Son coefficient de corrélation avec R à profondeur et âge constants est significatif pour l'Epicéa mais non pour le Pin, alors que son coefficient de corrélation totale avec R est significatif pour les deux essences. Sa liaison avec l'enracinement apparaît donc un peu moins forte que celle de la stabilité structurale, au moins pour le Pin.

c. La texture

Il a été possible de tracer pour les sables (liaison positive), les limons et l'argile (liaisons négatives), une droite limite de l'enracinement du Pin ; cela n'a pas été possible pour l'Epicéa. Ces droites limites ne constituent le facteur limitant principal de R du Pin pour aucun des ensembles de sols. Ces variables interviennent néanmoins : lorsque la texture est sableuse, la densité apparente est en général le facteur limitant principal de l'enracinement ; sinon c'est le plus souvent la stabilité structurale.

Quoi qu'il en soit, lorsque la texture est sableuse, l'enracinement des 2 essences est le plus souvent fort et profond. Dans les sols à texture équilibrée à limoneuse,

puis argileuse, l'enracinement est souvent presque entièrement localisé dans la partie supérieure des profils. Cependant, si l'on considère l'ensemble des sols étudiés, il s'avère que les limons ont un effet défavorable sur l'enracinement ; cela est mis en évidence par l'étude statistique (et confirme la droite limite tracée pour le Pin) : en particulier le coefficient de corrélation à profondeur et âge constants des limons avec R du Pin est négatif et très significatif.

d. *La matière organique*

Sa liaison positive avec R apparaît par les coefficients significatifs suivants : coefficients de corrélation totale pour les deux essences, partielle pour le Pin, et coefficient de corrélation partielle de la composante principale représentant la structure et sa stabilité pour l'Epicéa.

La matière organique paraît donc avoir un rôle propre favorable de l'enracinement, indépendamment de son influence sur diverses propriétés physiques, principalement pour le Pin.

e. *Racines d'espèce autre que de résineux*

La densité de ces racines est liée négativement (coefficient de corrélation partielle significatif) à l'enracinement du Pin et de l'Epicéa. Cela montre l'existence d'une concurrence interspécifique pour l'enracinement.

f. *Les rapports Ca^{++}/T et Al^{+++}/T*

Pour les deux essences, leur coefficient de corrélation avec R à profondeur et âge constants est significatif (positif pour Al^{+++}/T , négatif pour Ca^{++}/T).

La liaison positive entre Al^{+++}/T et R peut surprendre car plusieurs auteurs ont constaté une influence défavorable de l'aluminium sur l'enracinement. Mais il s'agit ici du rapport Al^{+++}/T , qui est dans une certaine mesure complémentaire de Ca^{++}/T , lié négativement à R . Ces deux liaisons sont peut-être en partie le reflet de l'action néfaste d'un déséquilibre provoqué chez certains résineux par un excès relatif d'ions Ca^{++} dans le sol.

2) *Propriétés intervenant pour l'Epicéa seulement*

a. *Le potassium*

Son coefficient de corrélation partielle avec R est positif et significatif ; il en est de même de la composante principale dans laquelle le potassium joue le rôle essentiel. Cela indique une liaison réelle, bien que masquée (coefficient de corrélation totale non significatif).

Par contre, la teneur en potassium de l'horizon A_1 est liée négativement (coefficient de corrélation partielle significatif) à R des autres horizons.

Rappelons, en ce qui concerne la première de ces liaisons, que KERN et al (1961) ont également trouvé une corrélation positive entre le potassium et l'enracinement de l'Epicéa dans les différents horizons du sol ; en ce qui concerne la seconde, ils

ont montré que l'Epicéa ne s'enracinait profondément que s'il n'y avait pas suffisamment d'éléments nutritifs dans les horizons superficiels.

b. *Pr 5*

(profondeur maximale où l'on trouve une densité de racines d'au moins 5).

Ses coefficients de corrélation partielle et totale avec *R* de l'Epicéa sont négatifs et significatifs : l'enracinement est d'autant plus faible dans la partie supérieure des profils qu'il est plus étendu en profondeur (ou vice-versa).

3) *Propriétés n'intervenant que pour le Pin*

a. *Le phosphore*

Il apparaît très souvent lié à *R* du Pin et cette liaison est négative : l'examen des graphiques montre que la valeur maximale possible de *R* obtenue après mesure de la teneur en phosphore est parfois la plus faible de toutes pour les sols formés sur Terra Fusca, limons et grès vosgien ; tous les coefficients de corrélation (partielle, à âge et profondeur constants et totale) sont significatifs. Cette liaison négative, pourtant bien établie, surprend. Dans de nombreux cas au contraire, il a été montré que la fertilisation phosphatée favorisait le développement des racines des jeunes plants. Il se peut que la réaction d'un jeune plant et celle d'un arbre adulte soient différentes.

b. *Le pH*

La droite limite de *R* du Pin en fonction du pH (liaison négative) est importante. Le pH constitue le facteur limitant principal de l'enracinement du Pin dans les sols à calcaire actif (*R* moyen si les cailloux ne sont pas trop nombreux) ; cependant, il n'y est guère plus limitant que les propriétés physiques (autrement dit, la valeur maximale possible de *R* déduite des droites limites est un peu plus faible si l'on utilise le pH que si l'on considère les propriétés physiques). D'autre part, le coefficient de corrélation partielle du pH avec *R* du Pin est négatif et significatif. Tout cela confirme le caractère calcifuge que l'on prête au Pin sylvestre.

Il est à signaler que le coefficient de corrélation partielle du pH avec *R* de l'Epicéa est négatif et presque significatif (au seuil de 5 %).

c. *L'hydromorphie*

Les coefficients de corrélation partielle, à profondeur et âge constants et totale entre l'intensité de l'hydromorphie (*Hy1*) et l'enracinement du Pin sont négatifs et significatifs, alors que pour l'Epicéa seul le coefficient de corrélation totale (le moins intéressant) est significatif. Ainsi l'hydromorphie apparaît plus néfaste à l'enracinement du Pin qu'à celui de l'Epicéa. (En ce qui concerne l'indice *Hy2*, l'étude statistique fournit des renseignements assez contradictoires et difficiles à interpréter).

B. — INFLUENCE DE LA PÉDOGENÈSE SUR L'ENRACINEMENT

Toutes ces propriétés dont dépend l'enracinement sont surtout déterminées par la roche-mère. Cependant, la pédogenèse influence parfois d'une façon importante l'enracinement par l'intermédiaire de plusieurs processus.

1) *L'altération*

Lorsque certaines roches-mères sont peu altérées et apparaissent ainsi à une faible profondeur, l'enracinement est limité en profondeur. Cela se produit :

- évidemment si la roche-mère est solide, calcaire par exemple ;
- mais aussi pour les roches-mères argileuses épaisses apparaissant non loin de la surface : l'enracinement est alors superficiel.

2) *La décarbonatation*

Comme un pH élevé peut limiter l'enracinement du Pin, la décarbonatation favorise sans doute le développement des racines de cette essence.

3) *Le lessivage*

Les propriétés physiques, en particulier la stabilité de la structure, des sols qui ont subi un lessivage deviennent nettement plus défavorables dans l'horizon illuvial : l'enracinement est en général bien meilleur dans les horizons A₂ que les horizons B de ces sols, même compte tenu de la profondeur.

4) *La podzolisation*

Quand elle est assez peu poussée, l'enracinement ne dépend pas de la pédogenèse : il est aussi bon (et il en est de même de la stabilité de la structure) sur sol podzolique assez peu évolué que sur sol brun oligotrophe formé sur même roche-mère (grès vosgien).

Par contre, si la podzolisation est plus avancée (c'est le cas d'une station que nous avons étudiée), la stabilité structurale de l'horizon A₂ peut devenir très basse, ce qui conduit à un enracinement très faible.

5) *L'hydromorphie*

Une nappe temporaire est certainement néfaste à l'enracinement car elle peut provoquer l'asphyxie des racines. D'autre part, il peut y avoir formation, par l'hydromorphie, d'une couche concrétionnée formant obstacle à l'enracinement (par exemple dans les sols de Saint-Avold sur grès vosgien). Enfin, dans les horizons Bg des sols

hydromorphes se trouvent souvent des zones décolorées plus ou moins verticales, permettant un écoulement préférentiel de l'eau ; l'enracinement de l'horizon Bg y est localisé, il est pratiquement nul dans les autres parties de cet horizon.

C. — COMPARAISON DES ENRACINEMENTS DE L'ÉPICÉA ET DU PIN SYLVESTRE

Les résultats de cette comparaison sont en partie en opposition avec l'opinion traditionnelle suivant laquelle l'enracinement de l'Épicéa serait presque uniquement superficiel contrairement à celui du Pin. En fait, dans pratiquement toutes les stations où nous avons pu comparer l'enracinement des deux essences, on constate que :

— l'enracinement de l'Épicéa est le plus souvent très nettement supérieur à celui du Pin dans la partie supérieure des profils (jusqu'à -30 à -35 cm en moyenne) ; cela est dû sans doute en partie à la concurrence exercée pour l'enracinement du Pin par les racines de la végétation secondaire, bien plus abondante en général que sous Épicéa ; mais même en l'absence de végétation secondaire la densité d'enracinement du Pin n'est jamais aussi considérable dans l'horizon A₁ que celle de l'Épicéa ;

— au-dessous de cette profondeur, l'enracinement des deux essences est plus comparable, mais celui de l'Épicéa est encore en général le plus élevé, jusqu'à -60 à -70 cm en moyenne ;

— enfin, dans la partie inférieure des profils les enrachinements des deux essences, faibles, prennent en général des valeurs proches l'une de l'autre.

On ne peut cependant tirer de conclusion pour les sols formés sur grès vosgien à une certaine altitude : seuls des peuplements de Pin y ont été étudiés, et leur enrachinement y est fort.

Il est bon de préciser que, par la méthode utilisée, c'est surtout la densité de l'enracinement fin que nous avons mesurée. C'est probablement le très fort enrachinement des horizons de surface sous Épicéa, comprenant en particulier la presque totalité des racines grossières, qui abuse les observateurs et les conduit à sous-estimer l'enracinement plus profond, composé presque uniquement de racines fines, et évidemment beaucoup moins dense. Au contraire, les racines du Pin sont beaucoup moins denses en surface, et ses racines charpentières s'enfoncent plus profondément ; la densité d'enracinement du Pin en profondeur paraît ainsi plus forte que celle de l'Épicéa, ce qui n'est en réalité pas le cas.

Le fait que l'Épicéa soit très plastique, qu'il fournisse une production convenable même en sol apparemment défavorable, contrairement au Pin, est peut-être en partie la conséquence du fait qu'alors qu'il possède souvent des racines fines assez profondes, au moins aussi nombreuses que celles du Pin, son enrachinement dans les horizons superficiels est presque toujours très élevé, bien supérieur à celui du Pin.

Il est cependant nécessaire de souligner que la méthode utilisée ne permet pas de tenir compte des racines verticales situées à proximité du tronc, probablement bien plus importantes pour le Pin que pour l'Épicéa.

D. — CONCLUSIONS PRATIQUES

1) *Choix de l'essence*

La valeur de l'enracinement constitue l'une des considérations qui devraient aboutir au choix de l'essence pour un reboisement. Dans la très grande majorité des cas, cet examen serait favorable à l'Epicéa par rapport au Pin sylvestre ; ce choix de l'Epicéa est d'ailleurs souvent effectif en raison de sa plus forte production en bois. Cependant d'autres considérations, parfois plus défavorables à l'Epicéa, doivent intervenir dans ce choix : risques de chablis, microclimat (les stations trop sèches peuvent être dangereuses pour l'Epicéa), etc. De plus, il serait intéressant de comparer à celui de l'Epicéa l'enracinement de certains résineux exotiques très productifs.

2) *Prévision de l'enracinement*

La mesure de certaines propriétés du sol permet, à l'aide des droites limites correspondantes, de déduire l'enracinement maximum possible de l'horizon considéré ; on obtient ainsi une certaine idée de l'enracinement futur. La mesure d'une ou deux propriétés sera même suffisante si l'on parvient à rattacher le sol (d'après sa roche-mère) à l'un des ensembles de sols étudiés. D'ailleurs, le seul fait de savoir à quel ensemble déterminé par la roche-mère et la pédogenèse appartient un sol peut fournir une idée de son type d'enracinement.

D'autre part, l'analyse de régression progressive a fourni des équations qui permettent de calculer R à l'aide d'un nombre plus ou moins élevé de propriétés du sol.

Ces méthodes sont toutefois peu précises.

3) *Amélioration de l'enracinement*

Le calcul des coefficients de corrélation partielle nous a fait connaître les propriétés du sol liées à l'enracinement quelle que soit la valeur prise par les autres propriétés ; pour certaines d'entre elles, il s'agit peut-être d'une relation de causalité. C'est pourquoi on peut envisager la possibilité, en agissant sur ces propriétés, d'améliorer l'enracinement ; l'efficacité de ces méthodes devraient être testée dans une expérimentation préalable.

Les mesures pouvant s'avérer ainsi les plus efficaces consisteraient à :

— pour l'Epicéa :

améliorer la structure et sa stabilité sur une assez grande épaisseur de sol ;

fertiliser en profondeur, en particulier par l'apport d'engrais potassiques, en raison de la liaison positive de l'enracinement avec le potassium de l'horizon considéré et négative avec le potassium de l'horizon A_1 et la profondeur d'enracinement Pr 5 ;

— pour le Pin :

drainer les sols hydromorphes ;

combattre la végétation secondaire tout en favorisant le maintien d'un certain taux de matière organique dans le sol.

Ce travail concerne surtout l'enracinement fin. Il serait utilement complété par une étude des racines charpentières très importantes également (ancrage de l'arbre, amélioration de la perméabilité par création de canaux de drainage) ; cette étude s'avère cependant plus difficile, matériellement, à réaliser (nécessité de travaux de terrassements).

Reçu pour publication en avril 1968

REMERCIEMENTS

Nous nous devons de remercier tout particulièrement Messieurs les Professeurs DUCHAUFOUR et MANGENOT pour leurs conseils judicieux, Monsieur BONNEAU, Directeur de la Station de Recherches sur les sols forestiers (CNRF), qui a apporté une aide constante à la réalisation de ce travail, Monsieur TOMASSONE, Chargé de Recherches à la Station de Biométrie du CNRF, pour avoir conseillé efficacement et programmé les analyses statistiques, ainsi que les Chefs des Centres de Gestion de l'Office national des Forêts de Commercy, Epinal-Plaine, Nancy, Saint-Avold, Saint-Dié et Verdun-Est qui nous ont guidé dans le choix des stations et procuré l'aide pratique indispensable à l'accomplissement de ce travail.

SUMMARY

IMPORTANCE OF SOIL PROPERTIES FOR THE ROOTING OF PICEA EXCELSA AND PINUS SILVESTRIS

The rooting density of Norway Spruce and of Scotch Pine (rated by counting the number of roots emerging from the soil profile in rectangles 1 meter wide and 10 cm high) and the soil properties have been measured in each horizon of different soils in Lorraine. The correlations between rooting density and each property have been studied by two methods :

— the graphic method has permitted to draw « limit straight lines » of rooting for several soil properties (fig. 1, 2, 3) ; so, the maximal rooting density for the two species is the lower as structure is less stable, bulk density higher, and macroporosity lower : moreover rooting density of Pine is the lower as sand content is low and as clay, silt and phosphorus contents, pH value and capillary porosity are higher.

— the statistic method has confirmed the total correlation of most of soil physical properties with the rooting of both species (table 1) ; it has also shown partial correlations of Spruce rooting with structural stability and potassium content (positive correlations) and of Pine rooting with phosphorus content, intensity of hydromorphy, pH value (negative correlations) and with organic matter content (positive correlation).

The graphic (with the use of limit straight lines) and statistic (with the use of equations given by progressive regression analysis) methods allow to forecast the rooting density of a soil, knowing the values of some properties of this soil ; but this forecasting is not accurate.

The soils studied form five groups according to the parent material and corresponding with rooting types. The best rooted soils for Spruce are, in decreasing order, those developed on Vosgian

sandstone, loams, limestone, terra-fusca, thick clayey material (muschelkalk, lias) ; for Pine, the order is almost the same, except for the soils developed on loam, in which rooting is less good than for Spruce.

In comparable sites, the Spruce rooting is nearly always much denser than that of Pine in the upper part of profiles (down to 35 cm) and slightly denser than it down to 70 cm ; then, the rooting density of both species, low, are often almost equal.

ZUSAMMENFASSUNG

DER EINFLUSS DER BODENEIGENSCHAFTEN AUF DIE BEWURZELUNG VON FICHTE

(*Picea abies* L.) UND KIEFER (*Pinus sylvestris* L.)

Die Bewurzelungsdichte von Fichte und Kiefer wurde horizontweise durch Auszählung in einem Rechteck von 100 cm Länge und 10 cm Höhe in genau beschriebenen Bodenaufschlüssen auf verschiedenen Standorten Lothringens ermittelt.

Die Korrelationen zwischen Bewurzelungsdichte und jedem einzelnen Bodenmerkmal wurden nach zwei verschiedenen Methoden untersucht. Eine graphische Methode erlaube die Festlegung der « Grenzgeraden » der Bewurzelung für verschiedene Bodenmerkmale (Abb. 1, 2 und 3). Die maximal mögliche Bewurzelungsdichte der beiden Holzarten ist umso geringer je labiler die Bodenstruktur, je höher die Dichte und je schwächer die nichtkapillare Porosität des Bodens.

Die statistische Methode (progressive Mehrfachregression) bestätigte die Gesamtkorrelation der meisten physikalischen Bodeneigenschaften mit der Bewurzelung der beiden Holzarten (Tab. 1) ; sie zeigte gleichfalls die partielle Korrelation der Bewurzelung mit der Strukturstabilität und dem Kaligehalt bei der Fichte (positive Korrelation). Bei der Kiefer ergaben sich Teilkorrelationen der Bewurzelung mit dem Phosphorgehalt, der Intensität der Hydromorphie, dem pH-Wert (negative Korrelationen) und dem Humusgehalt (positive Korrelation).

Sowohl die graphische als auch die statistische Methode erlauben eine Schätzung der Bewurzelungsdichte durch die Messung bestimmter Bodenmerkmale ; die erreichbare Genauigkeit ist jedoch gering.

Die untersuchten Böden wurden nach dem Grundgestein in fünf verschiedene Gruppen zusammengefasst, welche den Bewurzelungsklassen gut entsprechen. Für die Fichte ergibt sich folgende Reihung des bodenbildenden Grundgesteines bei abnehmender Bewurzelungsdichte :

Buntsandstein (grès vosgien), Lehm, Kalkstein, Terra fusca, mächtige Tonschichten des Muschelkalk und Lias ; dieselbe Reihung gilt auch annähernd für die Kiefer mit Ausnahme der auf Lehm gebildeten Böden, welche im Gegensatz zur Fichte, eine geringere Durchwurzelung aufweisen.

Auf vergleichbaren Standorten ist die Bewurzelungsdichte der Fichte im oberen Teil des Bodenprofils (bis 35 cm Tiefe) jener der Kiefer im allgemeinen überlegen, dies ist auch meist noch bis 70 cm Tiefe der fall, während in grösserer Tiefe die bereits geringe Bewurzelungsdichte bei beiden Holzarten annähernd gleich ist.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- BLANCHET R., STUDER R., CHAUMONT C., 1962. — Propriétés physico-chimiques des sols et alimentation potassique des plantes. *Ann. agron.*, **13**, (3), 175-201.
- BONNEAU M., 1961. — Evaluation au laboratoire de la capacité au champ en fonction de la texture. *Bull. A.F.E.S.*, numéro spécial (8), 16-26.
- BONNEAU M., 1963. — L'importance des propriétés physiques du sol dans la production forestière. *Rev. forest. fr.*, (1), 19-31.
- BONNEAU M., DUCHAUFOR Ph., 1960. — Méthode de description des profils de sols. *Stn. Rech. exper. forest.*, Nancy, N° 6, 4 p.
- BOUCHET R.-J., 1963. — Evapotranspiration réelle, evapotranspiration potentielle et production agricole. *Ann. agron.*, **14**, (5), 743-824.
- CAILLEUX A., TAYLOR G., 1958. — *Code expolaire*. Edit. Boubée, Paris.
- CAMEFORT H., PANIEL J., 1962. — *Morphologie et anatomie des végétaux vasculaires*. 371 p. G. Doin et Cie, Paris.

- COMBEAU A., MONNIER G., 1961. — Méthode d'étude de la stabilité structurale. Application aux sols tropicaux. *Sols afr.*, **6**, (1), 4-32.
- DAY W.-R., 1962. — Notes on the development of the root system with Sitka spruce. *Scot. For.*, **16**, (2), 72-83.
- DUCHAUFOR Ph., 1953. — Régénération de l'Épicéa et Pédologie. *Rev. forest. fr.*, (4), 257-268.
- DUCHAUFOR Ph., 1957. — *Pédologie. Tableaux descriptifs et analytiques des sols*. 87 p. Ecole nationale. Eaux Forêts, Nancy.
- DUCHAUFOR Ph., 1965. — *Précis de Pédologie*. 481 p. Masson et Cie, Paris.
- EHWALD E., GRUNERT F., SCHULZ W., VETTERLEIN E., 1961. — Zur Ökologie von Kiefern-Buchen - mischbeständen. *Arch. Forstw.*, **10**, (4-6), 397-416.
- FAYLE D.C.F., 1965. — Rooting habit of sugar maple and yellow birch. *Dept. forest.*, Canada, public. N° 1120, 31 p.
- FEHRENBACHER J.B., JOHNSON P.-R., ODELL R.-T. et al., 1960. — Root penetration and development of some farm crops as related to soil physical and chemical properties. *Trans. 7th internation. Congr. Soil Sci.*, **3**, 243-252.
- FIEDLER H.-J., HUNGER W., ZANT R., 1963. — Untersuchungen über die Bodendurchwurzelung der Fichte. *Arch. Forstw.*, **12**, (2), 1214.
- FOX R.-L., LIPPS R.-C., 1960. — Distribution and activity of roots in relation to soil properties. *Trans. 7th internation. Congr. Soil Sci.*, **3**, 260-267.
- GRAS R., 1961. — Relations entre les propriétés physiques du sol et la croissance du Pommier dans la Sarthe. *Ann. agron.*, **12**, (2), 207-248.
- GRAS R., 1962. — Quelques observations sur les relations entre les propriétés physiques du sol et la croissance du Pêcher dans la vallée du Rhône, entre Vienne et Valence. *Ann. agron.*, **13**, (2), 141-174.
- HENIN S., FEODOROFF A., GRAS R., MONNIER G., 1960. — *Le profil cultural. Principes de physique du sol*. 320 p. Soc. d'éditions des Ing. Agric., Paris.
- HENIN S., GRAS R., 1962. — Vigueur des arbres fruitiers et épaisseur de sol exploitée par les racines. *C.R. Acad. Sci.*, **255**, 1775-1777.
- HENIN S., MONNIER G., COMBEAU A., 1958. — Méthode pour l'étude de la stabilité structurale des sols. *Ann. agron.*, **1**, 71-90.
- HESLOP R.E.F., 1959. — Root and shoot development of scots pine. *Arbor. Aberd.*, **3**, (3), 4-5.
- HIDDING A.-P., VAN DEN BERG C., 1960. — The relation between pore volume and the formation of root systems in soils with sandy layers. *Trans 7th internation. Congr. Soil Sci.*, **1**, 369-373.
- HOCHTANNER G., SEITSCHER O., 1964. — Wuchsleistungen von kiefernbeständen auf meliorierungsflächen nach den bodenwöhler verfahren. *Forstw. CentBl.*, **83**, (1-2), 1-23.
- HOFFMANN G., 1966. — Verlauf der Tiefendurchwurzelung und Feinwurzelbildung bei einigen Baumarten. *Arch. Forstw.*, **15**, (8), 825-856.
- HOSTENER-JORGENSEN H., 1961. — An investigation of the influences of various tree-species and the ages of the stands on the level of the groundwater-table in forest tree stands at Bregentved. *Det forstlige Forsogsvaesen i Danmark*, **27**, 233-480.
- HORTON J.W., 1958. — Rooting habits of lodgepole pine. *Tech. Note, Forest Res. Div.*, Ottawa, **67**, 3-26.
- KALELA E.K., 1950. — On the horizontal roots in pine and spruce stand I. *Acta forest. Fennica*, **57**, (2), 79 p.
- KAUFMAN C.M., 1945. — Root growth of jackpine on several sites in cloquet forest, Minnesotas. *Ecologie*, **26**, 10-23.
- KERN K.G., MOLL W., BRAUN H.J., 1961. — Wurzeluntersuchungen in Rein- und Mischbeständen des Hochschwarzwaldes. *Allg. Forstztg u. Jagdztg.*, **132**, (10), 241-260.
- KOSTLER J.N., 1962. — Untersuchungen zur Wurzelbildung. *Allg. Forstztg*, **17**, (28), 413-417.
- KOWALKOWSKI A., CZARNOTA K., 1962. — (Recherches sur l'enracinement du chêne, du hêtre, du pin et de l'épicéa dans les sols du district forestier de Debina) (en polonais). *Soil Sci. Annual (Varsovie)*, **12**, 237-255.

- KRAMER P.J., 1956. — Roots as absorbing organs. In *Encyclopedia of plant physiology*, 3, 188-214. Springer-Verlag, Berlin.
- KREUTZER K., 1961. — Wurzelbildung junger Waldbäume auf Pseudogleyböden. *Forstw. CentBl.*, 80, (11-12), 356-392.
- LEIBUNDGUT H., DAFIS S.P., RICHARD F., 1963. — Untersuchungen über das Wurzelwachstum verschiedener Baumarten. *J. Forest. Suisse*, 11, 621-646.
- LEVY G., 1967. — Influence de certaines propriétés du sol sur la densité d'enracinement de l'*Epicéa commun* (*Picea excelsa* Link) et du *Pin sylvestre* (*Pinus sylvestris* L.), 127 p. Thèse Fac. Sci. Nancy.
- LEYTON L., ROUSSEAU L.Z., 1958. — Root growth of tree seedlings in relation to aeration. *Physiol. of forest trees*, 23, 467-475.
- MCMINN R.G., 1963. — Characteristics of Douglas-fir root systems. *Canad. J. Bot.*, 41, (1), 105-122.
- MCQUEEN D.R., 1966. — La répartition quantitative des racines absorbantes de *Pin sylvestre* et de *Hêtre* d'une série évolutive naturelle en Margeride (Massif Central), 163 p. Centre d'études phytosociologiques et écologiques, Montpellier.
- MAERTENS C., 1964. — Influence des propriétés physiques des sols sur le développement racinaire et conséquences sur l'alimentation hydrique et azotée des cultures. *Sci. Sol*, 1^{er} semestre, 31-42.
- MAERTENS C., 1964. — La résistance mécanique des sols à la pénétration : ses facteurs et son influence sur l'enracinement. *Ann. agron.*, 15, (5), 539-554.
- MELZER E.W., 1964. — Die Wurzelbildung der Holzarten auf den meliorierten Standorten der oberforsterei Adorf (Vogtland). *Arch. Forstw.*, 13, (4), 407-438.
- MELZER E.W., 1964. — Vergleich der Wurzelbildung zwischen meliorierten und nichtmeliorierten Standorten der oberforsterei Adorf/Vogtland. *Arch. Forstw.*, 13, (6), 615-625.
- MERIAUX S., 1954. — Contribution à l'étude de l'analyse granulométrique. *Ann. agron.*, N° 1 et N° 2, 118 p.
- MUELLER O.P., CLINE M.G., 1959. — Effects of mechanical soil barriers and soil wetness on rooting of trees and soil mixing by blow-down in central New York. *Soil Sci.*, 88, 107-111.
- PAAVILAINEN, 1966. — On the effect of drainage on root systems of Scots Pine on peat soils. *Commun. Inst. For. Fenn.*, 61.
- PERIGAUD S., 1965. — Action de la résistance mécanique et du manque d'oxygène sur le développement des racines. *C.R. Acad. Agric.*, 51, 1209, 220.
- RADYNS A.F., 1964. — (Développement of the Apple-tree root system within the profiles of three Soil grounds). *J. Sov. Soil Sci.*, (2), 79-82.
- SCHWARTZ D., 1963. — *Méthodes statistiques à l'usage des médecins et des biologistes*. Editions médicales Flammarion, Paris, 290 p.
- TAYLOR H.M., GARDNER H.R., 1963. — Penetration of cotton seedling tap roots as influenced by bulk density moisture content and strength of soil. *Soil Sci.*, 96, (3), 153-156.
- TAYLOR H.M., BURNETT E., 1964. — Influence of soil strength on the root growth habits of plants. *Soil Sci.*, 98, (3), 174-180.
- TOMASSONE R., 1965. — *Analyse de régression progressive*, 8 p. C.N.R.F., Stn. de Biom., Nancy.
- TOMASSONE R., 1965. — *L'analyse des composantes principales*. 11 p., C.N.R.F., Stn. Biom., Nancy.
- VEIHMEYER, HENDRICKSON, 1948. — Soil density and root penetration. *Soil Sci.*, 65, 487-493.
- VESSEAU A., 1960. — *Méthodes statistiques en biologie et en agronomie*. Libr. Baillière et Fils, Paris, 538.
- WAGENKNECHT E., 1960. — Beiträge zur Kenntnis der Wurzelbildung verschiedener Bestockungen. *Mitt. St. Forstwy. Bayerns*, (31), 252-274.
- WIERSUM L.K., 1957. — The relationship of the size and structural rigidity of pores to their penetration by roots. *Plant and Soil*, 9, 75-85.