

Influence des conditions géopédologiques sur le système racinaire et la croissance en hauteur du Douglas dans les monts du Beaujolais

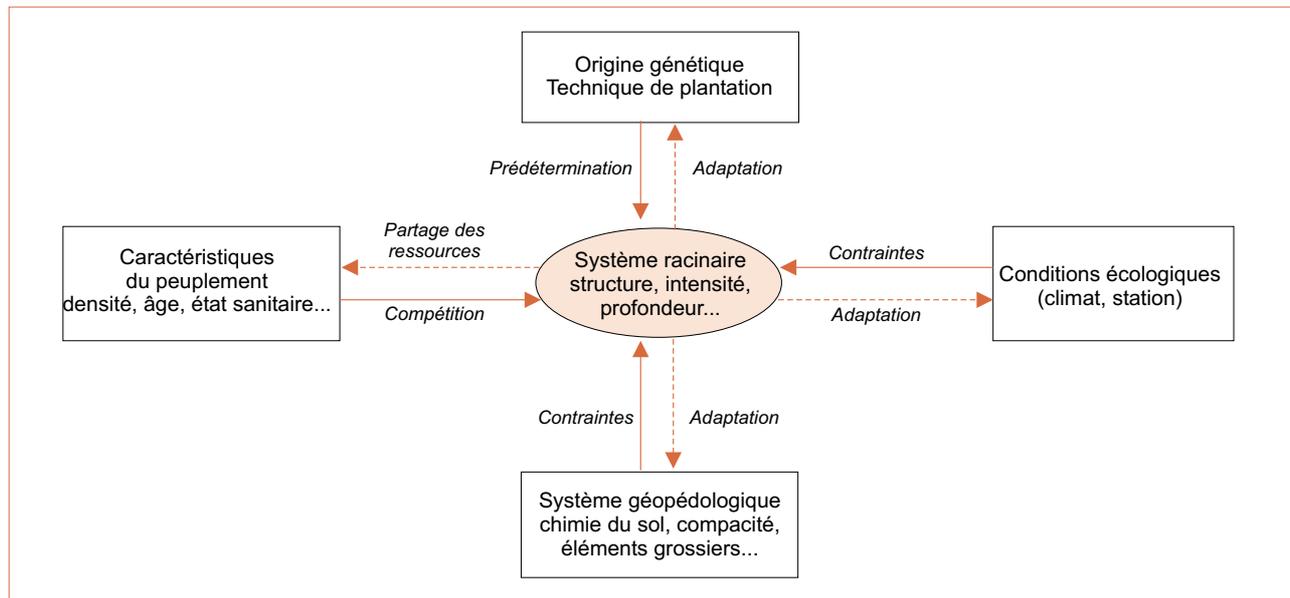
Thomas Curt, Monique Bouchaud, Eric Lucot, Christophe Bardonnet et Franck Bouquet

Le Douglas [*Pseudotsuga menziesii* (Mirb) Franco] est la principale essence de reboisement en France. Il est particulièrement utilisé dans les monts du Beaujolais où il couvre environ 14 000 ha et où il bénéficie d'une dynamique importante de la filière forêt-bois. Fort de sa réputation d'adaptation à des conditions stationnelles variées, de forte productivité et de bon état sanitaire, le Douglas a été introduit sur une large gamme de stations et de sols. On observe actuellement des variations assez importantes de production et de croissance en hauteur dans ces peuplements âgés pour la plupart de 20 à 40 ans. Ces variations semblent liées aux caractéristiques écologiques des stations, et notamment aux sols. À la demande des gestionnaires de la forêt privée qui représente 98 % des surfaces de Douglas, une étude a été menée afin de préciser les limites écologiques de cette essence et d'indiquer les sols sur lesquels elle présente une mauvaise croissance (Curt *et al.*, 1998), en vue de proposer des alternatives à sa monoculture (FOGEFOR, 1996).

Cette étude vise notamment à analyser les relations entre les conditions géopédologiques¹ qui conditionnent la croissance du Douglas dans d'autres régions (Curt *et al.*, 1996) et la morphologie de son système racinaire. En effet, l'installation de cette essence dans des stations qui lui conviennent mal et qui présentent de fortes contraintes géopédologiques semble gêner le développement de son système racinaire. Cela pourrait expliquer les différences de croissance observées en Beaujolais, mais aussi l'augmentation dans

d'autres régions des surfaces de Douglas connaissant des dépérissements liés à un stress hydrique (Charnet *et al.*, 1996 ; Direction de la Santé des Forêts, 1996), ou l'apparition de chablis (Kuiper et Coutts, 1991). En règle générale, les études autécologiques négligent l'analyse des systèmes racinaires du fait des difficultés pratiques d'observation, du temps nécessaire et du coût de telles études, surtout pour des arbres adultes (Köstler *et al.*, 1968 ; Boehm, 1979, photo 1). Du fait de sa position d'interface entre le sol et l'arbre, le système racinaire assure les fonctions essentielles d'ancrage, d'absorption hydrique et de transport des éléments minéraux à partir des ressources du sol (Callot *et al.*, 1982 ; Lucot, 1994 ; Pagès, 1995). L'étude de son organisation doit permettre de mieux comprendre la croissance en hauteur des peuplements et de donner aux sylviculteurs des informations sur les risques de mortalité, de dépérissement ou de chablis. Cette architecture racinaire est conditionnée par de nombreux facteurs : l'origine génétique de l'essence, les caractéristiques du peuplement (composition, âge, densité, sylviculture, etc.), le statut de chaque arbre au sein du peuplement, les techniques d'élevage en pépinière et de plantation, les contraintes stationnelles et géopédologiques (figure 1). L'objectif de cet article est de relier les caractéristiques des systèmes racinaires à celles des systèmes géopédologiques, et de montrer leur influence sur la croissance en hauteur pour le Douglas dans les monts du Beaujolais. Plus particulièrement, on cherche à établir des types de profils racinaires correspondant à des types de sols particuliers, à mettre en évidence les variables

Thomas Curt,
Monique Bouchaud,
Christophe Bardonnet,
Franck Bouquet
Cemagref
Division Forêt et
Agroforesterie
24, avenue des
Landais
BP 50085F
63172 Aubière
Eric Lucot
Université de
Franche-Comté
UFR Sciences et
Techniques
Laboratoire de
Biologie et
Écophysiologie
ISTE
Équipe de Sciences
Végétales EA 2280
MÉNRT
2, place Leclerc
F25030 Besançon



▲ Figure 1. – Les facteurs influant sur la morphologie et la structure du système racinaire.

géopédologiques influant sur la prospection de chaque horizon, et à prévoir la hauteur de cette essence en fonction de variables descriptives du système racinaire.

Matériel et méthodes

■ Choix des peuplements étudiés et mesure de leur croissance en hauteur

La zone d'étude correspond aux monts du Beaujolais. Il s'agit d'une région de moyenne montagne, d'altitude comprise entre 450 et 1000 m, constituée de chaînons séparés par une vallée principale et encadrés de plateaux. Le substratum géologique est constitué par des roches granitiques et métamorphiques, et par des tufs volcaniques. Les sols appartiennent en majorité à la famille des brunisols méso-saturés à oligo-saturés, mais il existe aussi des sols faiblement podzolisés (alocrisols et plus rarement podzosols humifères) et des rankosols sur les crêtes et les pentes fortes soumises à l'érosion.

Les travaux présentés ici ont été réalisés dans le cadre d'une étude sur l'autécologie du Douglas dans les monts du Beaujolais qui porte sur 165 placettes installées dans des peuplements purs de cette essence (Curt *et al.*, 1998). Le protocole de mesure de la productivité des peuplements est inspiré des travaux de Duplat (*in*. Buffet et Giraut,

1989) et a déjà été utilisé dans d'autres études autécologiques (Gilbert *et al.*, 1994 ; Curt *et al.*, 1996). Les placettes circulaires d'une surface de 6 ares sont installées au sein de peuplements purs ayant une même origine géographique probable (encadré 1). Les peuplements sont équiennes : leur âge varie au total de 20 à 55 ans, mais 73 % ont un âge compris entre 31 et 40 ans. Ils sont fermés, ce qui signifie notamment que l'on évite les trouées et les perturbations liées à la présence de chemins ou de travaux sylvicoles importants. Les densités varient de 800 à 1200 tiges par hectare. Ces forêts ont fait l'objet d'une sylviculture comparable : elles ont toutes subi une première éclaircie, voire deux éclaircies dans 10 % des cas. Ces éclaircies sélectives sont pratiquées « par le bas », c'est-à-dire qu'elles visent à éliminer les arbres dominés, malvenants ou malades. Tous les arbres étudiés sont apparemment indemnes de problèmes sanitaires majeurs. Au sein de chaque placette, nous avons mesuré la hauteur, le diamètre à 1,30 m et l'âge par carottage des 10 arbres dominants. Afin de pouvoir comparer la croissance dans tous les peuplements alors que ceux-ci présentent des arbres d'âges différents, nous avons calculé un « indice de fertilité » obtenu en ramenant la hauteur de chaque arbre à la hauteur qu'il aurait à l'âge de référence de 35 ans (ou « H35 »). Ces calculs sont effectués à l'aide de courbes hauteur-âge établies dans les monts du Beaujolais (*in*. De Champs, 1997).

Encadré 1

L'aire d'origine

On sait que l'aire d'origine du douglas en Amérique du nord s'étend du nord de la Californie (35°N) au nord de la Colombie britannique (58°N) et de la zone côtière jusqu'à la chaîne des Cascades (1800 mètres d'altitude), sur des substrats et dans des conditions stationnelles variés. Il existe ainsi une forte variabilité des caractères génétiques dans l'aire d'origine, dont les conséquences sur la qualité du bois de Douglas ont été mises en évidence par Nepveu (1984). Les peuplements correspondant aux 165 placettes étudiées proviennent essentiellement du versant occidental de la chaîne des Cascades (Etats de Washington, et d'Orégon, Etats-Unis) à des altitudes inférieures à 450 mètres, mais la provenance exacte n'est généralement pas connue. On peut cependant faire l'hypothèse que leurs exigences autécologiques sont comparables.



■ **Méthode d'étude des systèmes géopédologiques et racinaires**

Nous avons constitué un sous-échantillon de 74 placettes choisies parmi les 165 placettes de l'étude autécologique. Elles ont été sélectionnées pour leur caractère représentatif des types de stations et des sols répertoriés dans un précédent travail (Curt, 1991), et ont fait l'objet d'une analyse détaillée du système racinaire des arbres dominants (figure 2). Sur chacune de ces placettes, l'observation des systèmes géopédologiques et racinaires est effectuée sur une fosse pédologique ouverte au tractopelle ou à la main. La fosse est installée au centre de la placette, à une distance d'un mètre du pied d'un arbre dominant. Elle est toujours ouverte à l'aval de l'arbre étudié, car on observe fréquemment sur versant une asymétrie du système racinaire entre l'amont et l'aval de l'arbre (McMinn, 1963). De même, les arbres choisis présentent un houppier relativement symétrique, ce qui limite *a priori* les risques de dissymétrie du système racinaire. Nous avons mesuré la distance entre l'arbre étudié et ses plus proches voisins, ce qui nous a permis de calculer un indice de compétition² et de tester son influence sur la surface racinaire des arbres étudiés. La fosse pédologique est ouverte en arc de cercle sur deux mètres de largeur, et centrée sur une racine charpentière repérée à la base de l'arbre (figure 2). La profondeur maximale dépend de la profondeur à laquelle le substratum rocheux en

place arrête le creusement : en pratique elle varie entre 35 et 135 cm.

Les observations sur le profil de sol sont de deux types. Dans un premier temps on étudie les principales variables géopédologiques. Pour les horizons de surface, une description complète des caractéristiques pédologiques de chaque horizon est réalisée (texture, structure, pierrosité, etc.). Les horizons profonds correspondant à la formation superficielle, à l'altérite et au substratum rocheux, sont décrits à l'aide d'un protocole utilisé préalablement dans d'autres études (Curt et Marsteau, 1997). Ce protocole est destiné à mettre en évidence les variables susceptibles de gêner la prospection racinaire (Lucot, 1994) et donc la croissance en hauteur des arbres : compacité de la formation superficielle, caractéristiques de la roche (fracturation, pendage des fractures, type de faciès rocheux, etc.).

Dans un deuxième temps, on observe le système racinaire sur toute l'épaisseur du profil pédologique et sur une largeur d'un mètre de part et d'autre d'une racine charpentière. Pour cela, on pose sur le profil une grille composée d'éléments de 10 x 10 cm (figure 3). Les racines sont comptées par tranche de 10 cm d'épaisseur en partant depuis la surface (0-10 cm, 10-20 cm, 20-30 cm, etc.), et par classes de diamètre en prenant en compte 5 classes (racines < 1 mm, 1 à 5 mm, 5 à 20 mm, 20 à 50 mm, > 50 mm). Ces

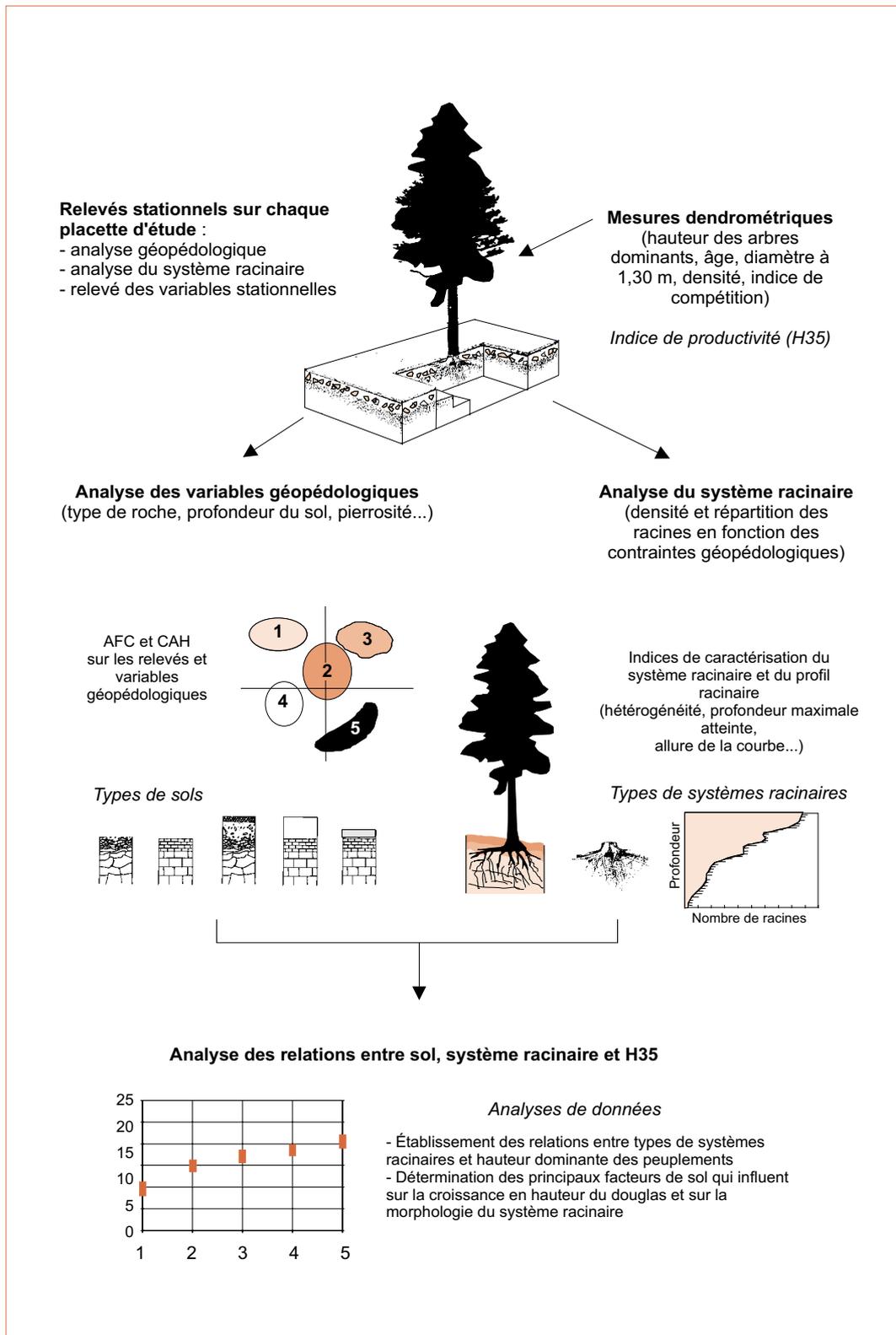
▲ Photo 1. – Les études autécologiques négligent l'analyse des systèmes racinaires du fait des difficultés pratiques d'observation.

2. Nous avons utilisé l'indice de compétition de Hegyi (1974) :

$$CI_i = \sum_{j=1}^N \frac{DBH_{sj}}{DBH_{si}L_{ij}}$$

avec DBH_{sj} : diamètre à 1,30 m de l'individu j ; DBH_{si} : diamètre à 1,30 m du compétiteur i ; L_{ij} : distance entre l'arbre central et le compétiteur (en m).

Figure 2. – Démarche de l'étude des sols et des systèmes racinaires.

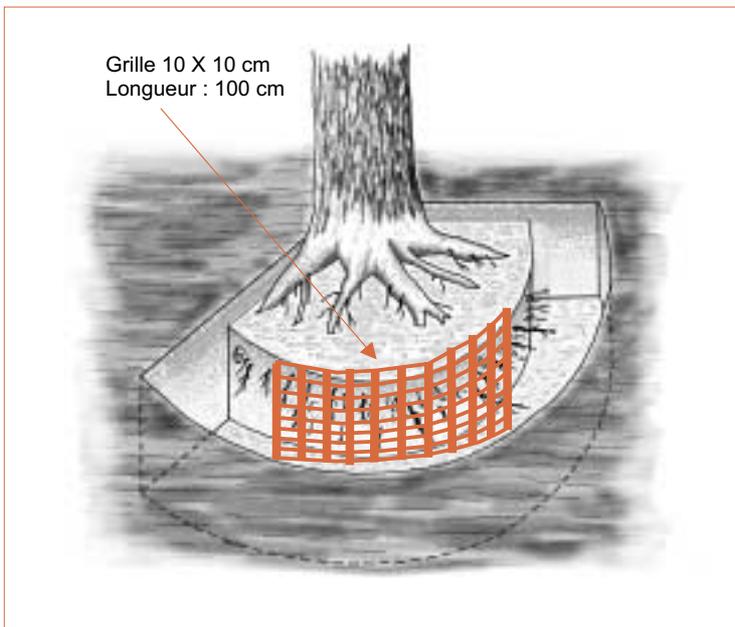


limites sont communément admises par différents auteurs (Köstler *et al.*, 1968 ; Boehm, 1979 ; Sutton et Tinus, 1983) qui avancent que chaque grand type de racine joue un rôle fonctionnel particulier pour l'arbre. L'ensemble de la zone proche de la racine charpentière est mise à nu après ces observations, afin de pouvoir repérer d'éventuelles déformations des grosses racines révélatrices de problèmes de croissance (présence d'une crosse, pivots secondaires, etc.). Nous avons ainsi constitué un fichier indiquant le nombre de racines par classes de diamètre et de profondeur pour l'ensemble des profils pédologiques étudiés.

Résultats : les relations sol - racines - croissance du Douglas

■ Constitution de groupes de systèmes racinaires et de sols

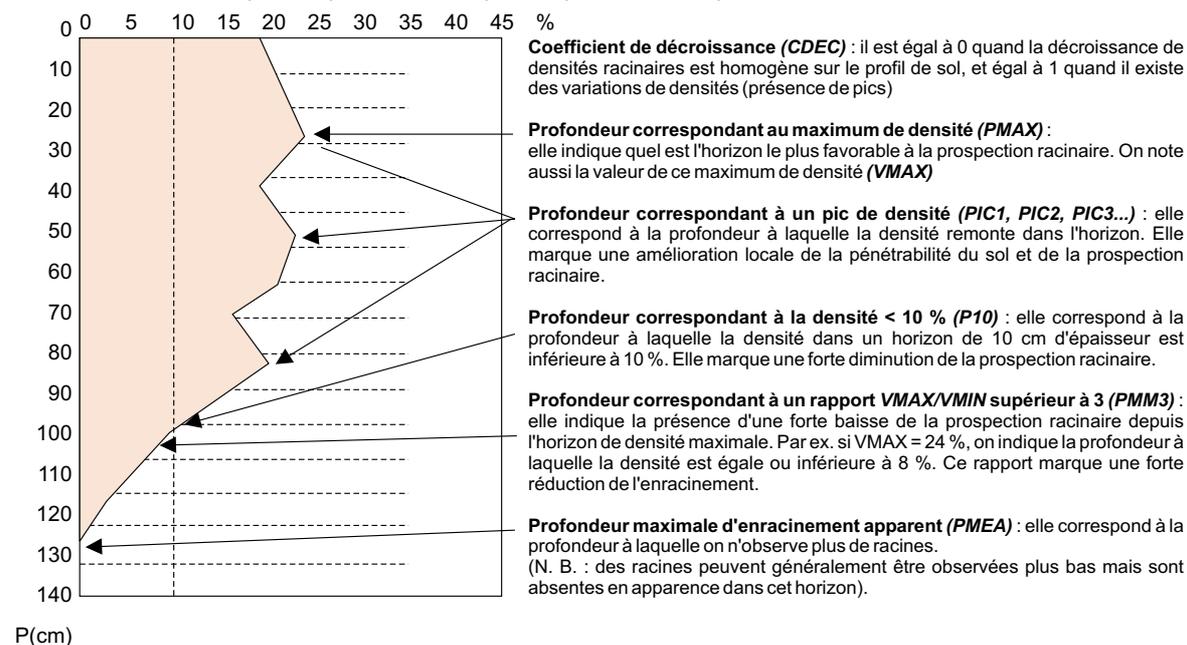
La première étape de la démarche a consisté à élaborer des groupes de systèmes racinaires présentant des profils comparables, et correspondant à types de sols relativement homogènes. Nous avons effectué pour cela des analyses multifactorielles (AFC puis CAH) conjointement sur deux séries de données :



▲ Figure 3. – Méthode pour l'observation des sols et des systèmes racinaires.

Figure 4. – Mode de calcul des principales variables descriptives du système racinaire. ▼

Le nombre de racines de tous diamètres sont comptées par horizon, sur une largeur de 100 cm et tous les 10 cm à partir de la surface. Ces valeurs absolues sont transformées en fréquence (%) de racines dans chaque horizon de 10 cm par rapport au nombre total de racines observé dans l'ensemble du profil. On peut ainsi calculer plusieurs points caractéristiques des courbes de densité racinaire.



– des indices caractéristiques de la morphologie des systèmes racinaires, détaillés sur la figure 4. Ces indices sont la profondeur maximale de l'enracinement apparent (PMEA) (Charnet *et al.*, 1996), la densité maximale de racines dans un même horizon (DMAX), la profondeur correspondant à cette densité (PMAX), la profondeur correspondant à une densité inférieure à 10 % dans un même horizon (P10), la profondeur correspondant à un rapport de densité maximale/minimale supérieur à 3, la profondeur des pics de densité (PIC1, PIC2, PIC3, PIC4), et le caractère continu ou non de l'enracinement en fonction de la profondeur (CDEC).

– les variables décrivant le système géopédologique, présentées ci-dessus, considérées dans l'AFC comme des variables supplémentaires.

Ces analyses ont permis de distinguer 7 groupes associant des types de profils racinaires à des types géopédologiques. Ces groupes sont assez bien discriminés par les analyses multifactorielles mises en œuvre ; l'inertie cumulée sur les deux premiers axes de l'AFC est de 27,1 %, ce qui peut paraître faible mais qui constitue un bon résultat en écologie sur un grand nombre de variables. On observe sur le tableau 1 qu'à chaque type de profil racinaire correspond généralement un seul type de sol présentant toujours les mêmes caractères pédologiques majeurs. Les groupes 3 à 7 correspondent chacun à deux profils de sols comparables mais présentant des variantes mineures.

L'analyse du tableau 1 montre qu'on peut distinguer en premier lieu des profils racinaires caractérisés par une profondeur maximale apparente supérieure à 100 cm (types 1 et 2) et par une décroissance assez régulière dans le premier mètre de sol, même s'il existe des pics dans le type 2. Ils correspondent à des sols sans contrainte physique ou chimique majeure (brunisolés mésosaturés et colluviosols). Le type 3 présente une prospection moins profonde et plus irrégulière, mais il regroupe des sols anciennement cultivés, ameublés en surface et enrichis. Les types 4 et 5 présentent des profils racinaires de profondeur moyenne caractérisés par une décroissance assez continue des densités de prospection avec la profondeur. Le type 5 présente un enracinement plus dense en surface que le type 4 et il décroît plus rapidement en profondeur. Ces types cor-

respondent à des sols oligotrophes (4) ou hyperoligotrophes (5) avec une pierrosité assez forte et une augmentation continue de cette pierrosité et de la compacité des horizons pédologiques. Deux types de profils sont caractérisés par leur faible profondeur (arrêt entre 30 et 60 cm) et une décroissance forte à très forte, qui peut être régulière (type 7) ou irrégulière (type 6). Ils correspondent à des sols oligotrophes ou hyperoligotrophes superficiels et pierreux (types 6 et 7). Des analyses de variance ou de régression linéaire montrent que les variables géopédologiques les plus favorables à la prospection racinaire dans un horizon donné sont une faible compacité, la présence d'éléments grossiers peu nombreux et/ou de petites dimensions (diamètre <5 cm) et la présence de matière organique. Au contraire, la densité racinaire diminue quand l'horizon est fortement compact, les éléments grossiers abondants et disposés perpendiculairement à la surface du sol, et l'horizon podzolisé.

■ *Relation entre système racinaire et croissance en hauteur du Douglas*

Nous avons préalablement testé par analyse de variance l'influence de la compétition aérienne, estimée par l'indice de Hegyi (1974), sur la hauteur des arbres et sur les groupes de sols et de systèmes racinaires. Dans des peuplements forestiers denses comme ceux étudiés ici, les variations de compétition entre houppiers ne semblent pas affecter la croissance en hauteur des arbres dominants, ni le développement de leur système racinaire, ce qui confirme les résultats des travaux de Boehm (1979) ou de Bréda (1990).

Les groupes de systèmes racinaires et de sols expliquent 52,6 % de la variance de la hauteur dominante du Douglas à l'âge de référence de 35 ans (H35), et les tests statistiques confirment qu'il existe une forte liaison entre ces variables (F-Ratio = 14,73 ; P-Value = 0,0000). La figure 5 montre que les types 1 et 2 correspondent aux plus fortes valeurs de H35, respectivement 30,9 m et 31,1 m. Les plus fortes croissances sont logiquement observées quand le système racinaire est profond et décroît assez régulièrement, ce qui correspond à des sols profonds et sans contrainte physique majeure, notamment à d'anciens sols cultivés avec des horizons de surface remaniés et ameublés. Le type 3 a une forte productivité (H35 = 30,4 m en moyenne) alors qu'il corres-

pond à des systèmes racinaires moins profonds et irréguliers. Cela peut s'expliquer car les sols du type 3 sont d'anciens sols agricoles ameublés et enrichis en surface. Les types 4 et 5 ont des valeurs de H35 moyennes³, respectivement de 29,2 et 28,3 m. Cela s'explique à la fois par la présence de contraintes édaphiques (sols oligotrophes pierreux ou hyper-oligotrophes) et par la présence d'un système racinaire moins profond et plus irrégulier. Ces irrégularités sont liées à la présence d'horizons pierreux ou compacts. Les types 6 et 7 correspondent aux plus faibles valeurs de H35, respectivement 27,5 et 25,3 m. La présence de fortes contraintes édaphiques (sols superficiels, pierreux et/ou hyper-oligotrophes) se traduit par un système racinaire superficiel et à décroissance très rapide. La présence d'obstacles proches de la surface (dalle rocheuse, niveau très pierreux ou horizon compact) réduit les possibilités de prospection racinaire et d'alimentation en eau et en éléments minéraux pour le Douglas.

Des analyses de données complémentaires⁴ montrent que les variables racinaires qui sont le plus fortement corrélées à H35 sont la profondeur maximale d'enracinement apparent (PMEA ; $R^2 = 0,46$), le nombre total de racines sur tout le profil (NRAC, $R^2 = 0,41$), la densité maximale de racines dans un même horizon (DMAX, $R^2 = 0,21$) et la surface des racines fines et très fines (RCL1, $R^2 = 0,51$ et RCL2, $R^2 = 0,51$). L'analyse par régression linéaire multiple avec ces quatre variables permet ainsi de prédire la valeur de H35 avec un $R^2 = 0,57$. La figure 6 montre que les valeurs prédites sont assez proches des valeurs observées, sauf pour les stations les plus pauvres caractérisées par de faibles hauteurs, pour lesquelles le modèle de régression tend à surestimer les valeurs de H35.

Il apparaît intéressant d'étudier plus précisément les relations entre les différentes classes de racines et la hauteur du Douglas. Pour cela, nous avons pris en compte la surface mesurée sur le terrain pour les grosses racines, et nous avons calculé des surfaces racinaires moyennes pour les racines fines et moyennes⁵. La surface racinaire totale, correspondant à la surface cumulée des racines de toute taille sur l'ensemble du profil, est assez fortement corrélée positivement à la hauteur des arbres mesurés ($R^2 = 0,54$). On observe sur la figure 7 que la croissance en hauteur du Douglas

augmente avec le développement de son système racinaire, en suivant une courbe de type logarithmique. Nous avons ensuite effectué une analyse par régression qui montre que la surface des racines de gros ou de moyen diamètre (classes 5-20 mm, 20-50 mm et > 50 mm) n'est pas corrélée à H35. Par contre, nous avons pu établir de bonnes liaisons entre H35 et la surface des racines fines, particulièrement celles des racines de diamètre inférieur à 1 mm ($R^2 = 0,61$). La forme logarithmique de la courbe obtenue (figure 8) montre que certains Douglas situés en conditions pédologiques très difficiles ont très peu de racines fines et une croissance très fortement ralentie par rapport aux autres ; cela correspond aux groupes 5, 6 et 7 présentés plus haut. Inversement, un fort développement de racines fines favorise une forte croissance, comme dans le cas des groupes 1 et 2. Ces résultats vont dans le sens de travaux classiques qui affirment que les racines fines sont celles qui présentent la plus forte efficacité, en conditions climatiques et hydriques normales, pour l'alimentation en eau et en éléments minéraux des arbres. Les racines moyennes et grosses auraient plutôt un rôle d'ancrage et de complément, dans le cas de forts stress hydriques notamment. Cette hypothèse est cependant contredite par certains auteurs et le rôle fonctionnel des racines en fonction de leur diamètre reste controversé (Pagès, 1995).

Discussion

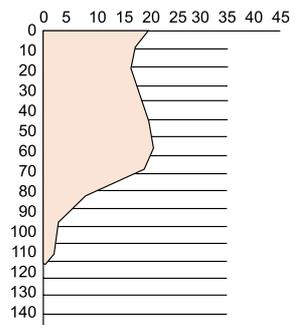
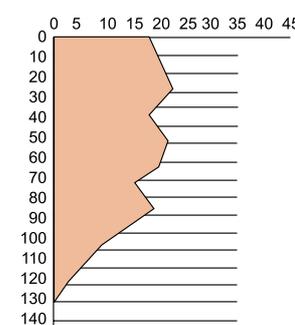
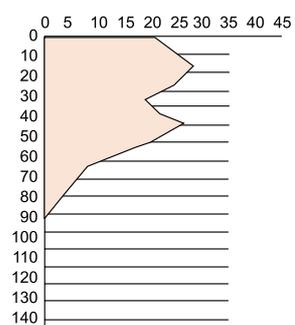
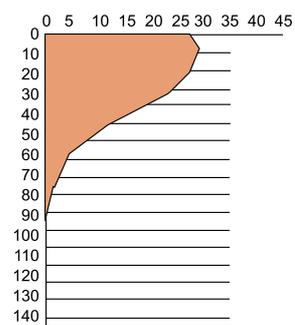
■ *L'adaptation des systèmes racinaires aux contraintes géopédologiques*

La couverture pédologique des monts du Beaujolais est assez monotone puisque la majeure partie des sols sont des brunisols oligo-saturés. Il apparaît difficile dans ces conditions de mettre en évidence une liaison entre les types génétiques de sols et la croissance en hauteur du Douglas, d'autant plus que cette essence est généralement productive et bien adaptée aux conditions stationnelles rencontrées. On observe cependant que l'approche géopédologique permet de mettre en évidence de fortes variations de structure racinaire et de productivité du Douglas, conformément à ce qui a été montré précédemment dans d'autres milieux et sur d'autres essences forestières (Lucot, 1994 ; Curt et Marsteau, 1997). Les contraintes géopédologiques engendrées par les

3. Ces valeurs sont moyennes par rapport à l'ensemble des valeurs observées, mais elles correspondent cependant à des productivités élevées d'après les tables de production du nord-est du Massif Central (Décourt, *in*. De Champs, 1997).

4. Calcul de l'inertie cumulée sur les six premiers axes de l'AFC, analyse de variance, corrélation linéaire ou non linéaire.

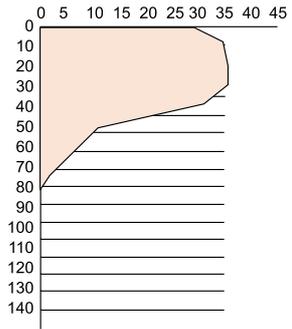
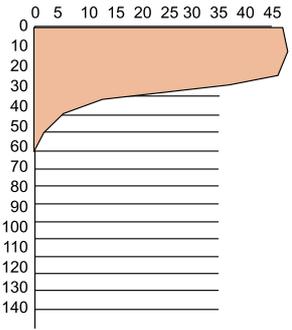
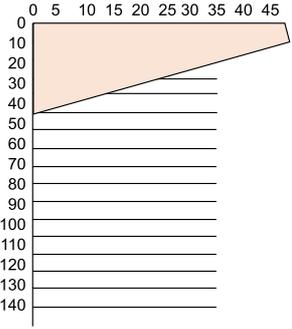
5. Classe de diamètre : RCL1 (diamètre < 1 mm) : diamètre moyen = 1 mm, surface = 1 mm² ; RCL2 (diamètre 1 à 5 mm) : dm = 2,5 mm, s = 4,91 mm² ; RCL3 (diamètre 5 à 20 mm) : dm = 12,5 mm, s = 122,7 mm² ; RCL4 (diamètre 20 à 50 mm) : dm = 35 mm, 962,1 mm². RCL5 (diamètre > 50 mm) : prise en compte du diamètre réel mesuré sur le profil de sol.

Type	Caractéristiques géopédologiques	Profils types de sol*		Profil racinaire schématique
1	<ul style="list-style-type: none"> - Brunisols méso-saturés et colluviosols - Arrêt : 91 à 120 cm - Réserve en eau > 150 mm - Pierrosité : blocs arrondis - Présence de colluvions 			
2	<ul style="list-style-type: none"> - Brunisols méso-saturés et colluviosols - Mésomull - Arrêt : > 120 cm - Roche non visible ou roche feuilletée - Présence de colluvions 			
3	<ul style="list-style-type: none"> - Altérite en place sur tufs - Sols anciennement cultivés, ameublés en surface 			
4	<ul style="list-style-type: none"> - Brunisol oligo-saturé à dysmull sur dalle disloquée, roche pourrie ou arène en place - Pierrosité : faciès broyé - Arrêt : 61-90 cm - Réserve en eau : 50 à 100 mm 			

Influence des conditions géopédologiques sur le système racinaire...

Caractéristiques morphologiques du système racinaire	Commentaires	Indice de fertilité pour le Douglas H35 moyen (effectif)
<ul style="list-style-type: none"> - Profondeur maximale enracinement > 100 cm - Densité maximale par horizon <20 % ▶ - Profondeur correspondant à un rapport d_{max}/d_{min} supérieur à 3 : > 60 cm - Profondeur correspondant à une densité inférieure à 10% : > 60 cm 	⇒ Sols et systèmes racinaires sans contrainte majeure	30,9 m (7)
<ul style="list-style-type: none"> - Profondeur maximale enracinement > 100 cm - Profondeur correspondant à la densité racinaire maximale : 20 à 30 cm ▶ - Présence d'un pic de densité au-delà de 40 cm et d'un pic au-delà de 60 cm 	⇒ Sols sans contrainte majeure ⇒ Système racinaire profond mais irrégulier	31,1 m (15)
<ul style="list-style-type: none"> - Profondeur maximale enracinement 81 à 100 cm - Densité maximale par horizon 20,1 à 30 % ▶ - Profondeur correspondant à un rapport d_{max}/d_{min} supérieur à 3 : 41 à 60 cm - Profondeur corresp. à une densité inférieure à 10 % : 40-60cm - Décroissance des densités discontinue sur le profil - Présence d'un 1^{er} pic de densité entre 10 et 20 cm et d'un 2^s pic entre 35 et 60 cm 	⇒ Système racinaire irrégulier et de profondeur moyenne	30,4 m (14)
<ul style="list-style-type: none"> - Profondeur maximale enracinement 81 à 100 cm - Profondeur correspondant à la densité maximale : < 10 cm ▶ - Décroissance des densités continue sur le profil 	⇒ Système racinaire à décroissance continue sur sol assez homogène à contraintes physiques croissantes en profondeur	29,2 m (11)

◀ Tableau 1. – Caractéristiques des groupes de sols et de systèmes racinaires. (suite pages suivantes)

Type	Caractéristiques géopédologiques	Profils types de sol*		Profil racinaire schématique
5	- Podzosol ocrique avec humus de type dysmoder ou mor - Formations gélifluées sur granite ou grès			
6	- Alocrisol sur dalle (horizontale, oblique ou verticale)			
7	- Rankosol avec eumoder sur dalle peu ou pas fracturée - Arrêt : 30 à 60 cm - Réserve utile : < 50 mm			

* Dans certains cas, on est amené à présenter deux profils de sol pour un même groupe. Ces deux profils correspondent à deux variantes d'un même type.

structures du sol et du *substratum* géologique influent sur la morphologie du système racinaire du Douglas adulte, ce qui se répercute sur sa croissance en hauteur. La principale contrainte est la présence d'un obstacle physique majeur à moins de 40 cm de profondeur : roche en place faible-

ment fracturée, dalle horizontale ou oblique, niveau très caillouteux. On note cependant que le Douglas parvient à maintenir une croissance correcte dans ces conditions dans lesquelles d'autres essences résineuses à forte valeur ajoutée comme le sapin pectiné et le mélèze réussissent moins bien.

Influence des conditions géopédologiques sur le système racinaire...

Caractéristiques morphologiques du système racinaire	Commentaires	Indice de fertilité pour le Douglas H35 moyen (effectif)
<ul style="list-style-type: none"> – Profondeur maximale enracinement 61 à 80 cm – Densité maximale par horizon : 30,1 à 35 % ▶ – Profondeur correspondant à la densité maximale : 10 à 20 cm – Présence d'un pic de densité entre 20 et 40 cm 	<ul style="list-style-type: none"> ⇒ Sols podzolisés ⇒ Système racinaire à décroissance régulière et forte 	28,3 m (11)
<ul style="list-style-type: none"> – Profondeur maximale enracinement < 60 cm – Densité max. par horizon > 35 % ▶ – Profondeur correspondant à un rapport d_{max}/d_{min} supérieur à 3 : < 40 cm – Profondeur correspondant à une densité inférieure à 10% : > 40cm 	<ul style="list-style-type: none"> ⇒ Sol faiblement podzolisé sur dalle ⇒ Système racinaire à décroissance rapide 	27,5 m (9)
<ul style="list-style-type: none"> ▶ – Profondeur maximale enracinement < 60 cm 	<ul style="list-style-type: none"> ⇒ Sols superficiels sur dalle (obstacle proche de la surface) ⇒ Système racinaire à décroissance très rapide 	25,3 m (7)

◀ Tableau 1. – (suite)
Caractéristiques des groupes de sols et de systèmes racinaires.

Sa croissance reste assez forte sur des sols superficiels dans lesquels les éléments grossiers sont de petite dimension, ou sur un *substratum* rocheux proche de la surface mais fortement fissuré. Le système racinaire du Douglas apparaît ainsi sensible à la présence d'horizons compacts comme

l'ont montré Schotts *et al.* (1956) ou Berben (1973) ; sur les substrats les plus superficiels, le travail du sol permet d'augmenter le volume prospectable par les racines et pourrait avoir un effet bénéfique sur sa croissance en hauteur, comme cela a été montré sur de jeunes planta-

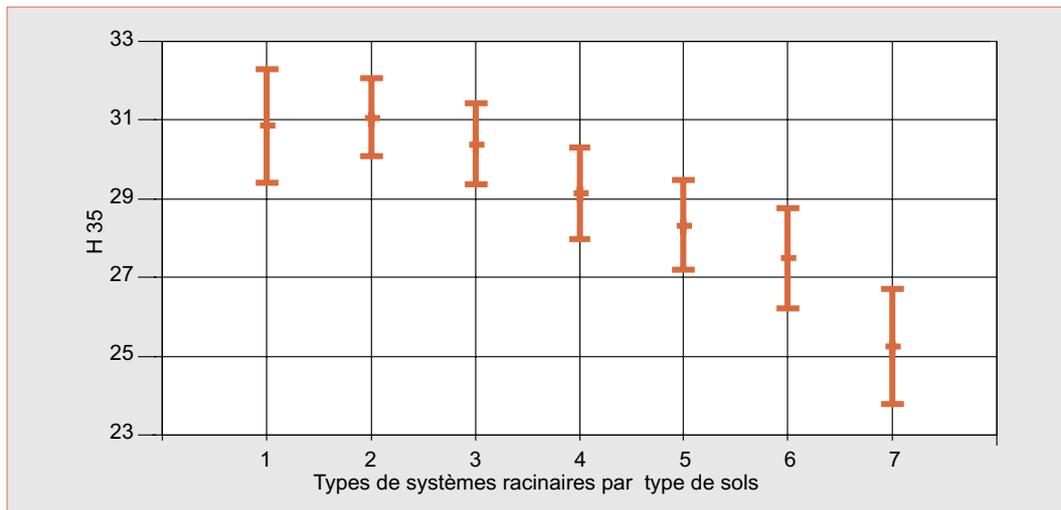


Figure 5. – Relation entre groupes systèmes racinaires par type de sols et hauteur dominante du Douglas à 35 ans.

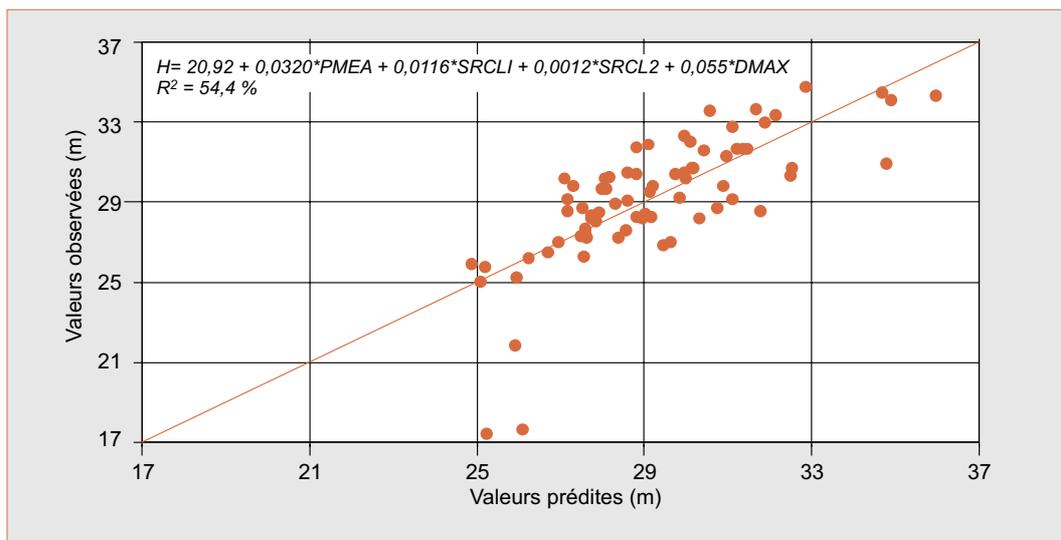


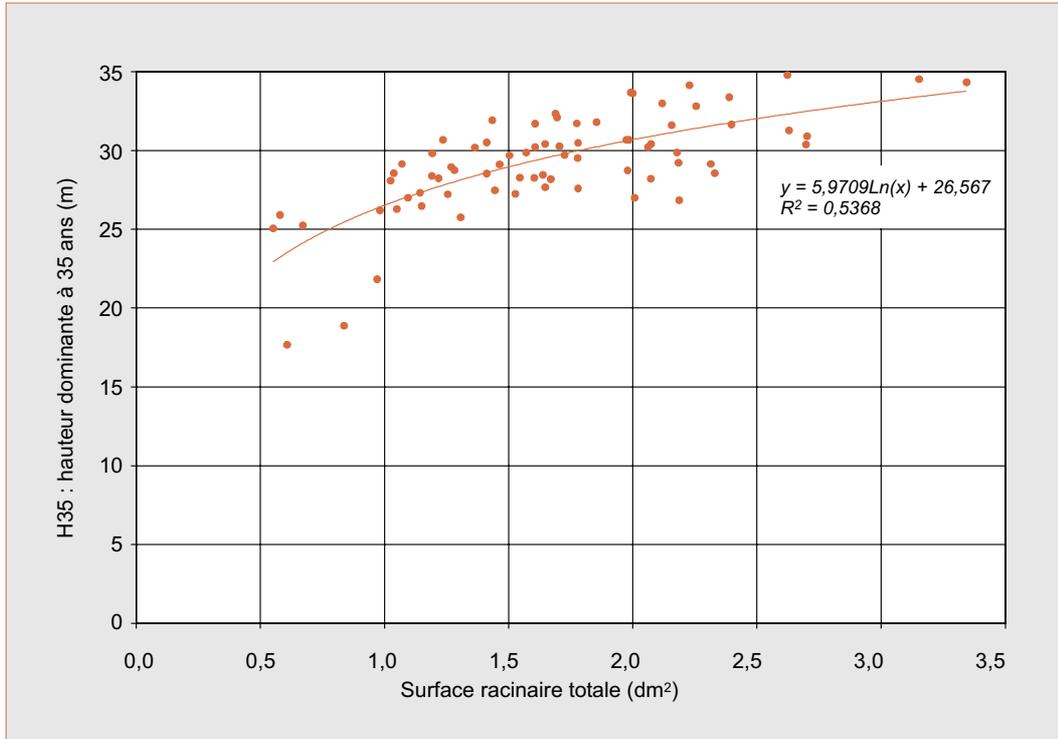
Figure 6. – Régression linéaire multiple entre variables racinaires et hauteur du Douglas (H35).

tions (Berben, 1973 ; De Champs *et al.*, 1975-77).

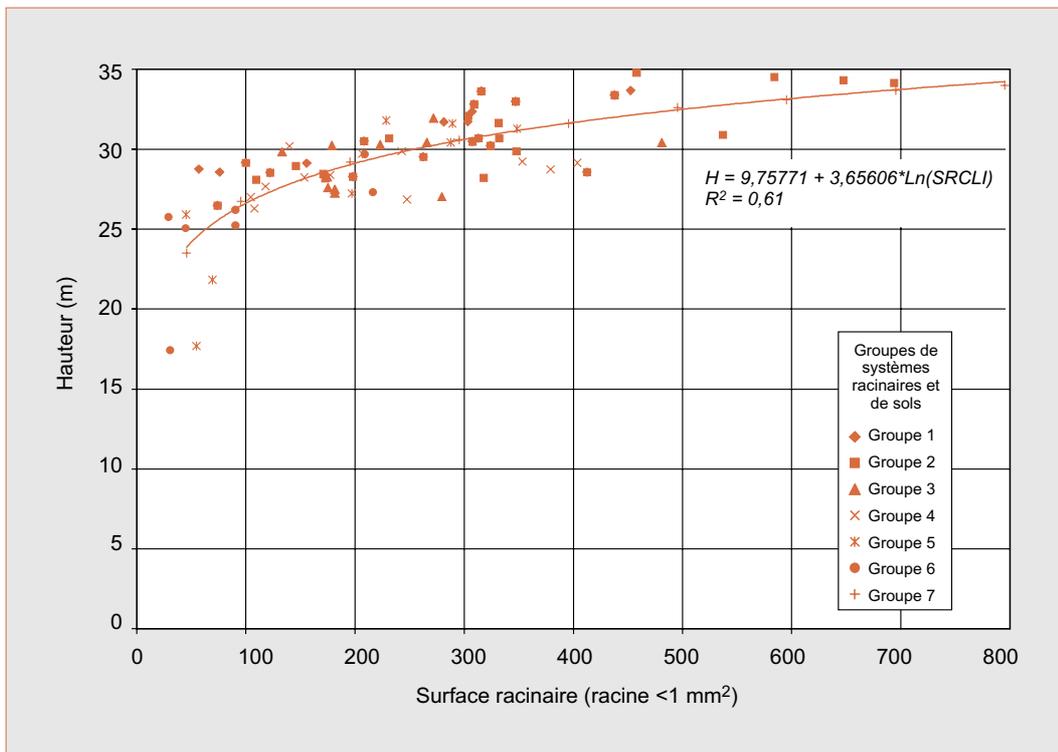
■ Morphologie du système racinaire et croissance en hauteur du Douglas

L'analyse de la bibliographie montre que les travaux portant sur le système racinaire du Douglas sont assez peu nombreux. Ils concernent surtout la morphologie racinaire d'arbres jeunes étudiés en pépinière ou en conditions naturelles non contraignantes, ou au contraire des situations extrêmes comme en présence d'une nappe d'eau ou dans des peuplements dépérissants. Cela s'explique par des difficultés techniques exposées ci-des-

sous. La morphologie du système racinaire du Douglas jeune est connue grâce aux travaux de McMinn (1963), Köstler *et al.* (1968), Eis (1974), De Champs *et al.* (1975-77). Il est dense et superficiel, même en condition de sols non contraignantes, ce qui conduit à lui attribuer une réputation de « paresseux » (De Champs, 1997). Les profondeurs maximales enregistrées sont de l'ordre de 3 mètres à 70 ans, et semblent rester constantes sur des arbres très vieux (*in.* Stone et Kalisz, 1991). Il devient plus compact et puissant chez l'arbre adulte, mais reste mal connu (Kuiper et Coutts, 1991). Nos résultats sur des Douglas de 20 à 55 ans montrent que son système racinaire



◀ Figure 7. – Relation entre la surface racinaire totale sur fosse et la hauteur dominante du Douglas à 35 ans.



◀ Figure 8. – Relation entre la surface racinaire des racines fines et la hauteur dominante du Douglas à 35 ans.

est puissant et assez profond. Une incertitude demeure quant à l'origine génétique exacte des peuplements étudiés, ce qui peut avoir une influence sur le développement architectural du système racinaire (Pagès, 1995), et il serait intéressant de travailler sur des peuplements plus homogènes. De même, faute d'informations suffisamment précises à l'échelle de chaque arbre étudié, il n'a pas été possible de prendre en compte les effets des antécédents et de la technique de plantation sur le développement de l'arbre et de son système racinaire. Ces facteurs peuvent avoir des répercussions sur les arbres adultes : c'est le cas par exemple pour des crosses racinaires liées à la plantation.

Nos résultats montrent que la hauteur des arbres est fortement liée aux caractéristiques morphologiques du système racinaire, et notamment à la surface des racines les plus fines qui semblent assurer l'essentiel de la nutrition dans ces conditions de sol et de milieu. Ces travaux complètent les observations de De Champs *et al.* (1975-77) sur de jeunes Douglas âgés de 5 à 10 ans plantés sur des sols granitiques du Limousin et du Tarn, qui ont montré que l'augmentation de la surface racinaire est fortement corrélée avec l'augmentation moyenne de la hauteur et du volume des arbres. De même, Kuiper et Coutts (1991) montrent qu'il existe une forte relation positive entre le diamètre du tronc à 1,30 m et la section des racines structurales de Douglas adultes. On peut donc recommander au sylviculteur d'installer préférentiellement le Douglas sur des sols présentant un premier horizon meuble sur une profondeur égale ou supérieure à 30 ou 40 cm.

■ *Intérêt et limites des méthodes d'analyse des systèmes racinaires*

De nombreux auteurs privilégient les études sur des systèmes racinaires après excavation complète de ceux-ci (Sanantonio *et al.*, 1977 ; Boehm, 1979 ; Eis, 1974 ; Kuiper et Coutts, 1991). Cette technique est la plus précise, même si elle peut détruire une partie du système racinaire. Elle permet de visualiser l'ensemble du système et d'effectuer des mesures exhaustives directes (nombre de racines, surface, etc.) ou indirectes (calcul de biomasse, etc.). Les observations *in situ* sur fosse pédologique présentent un avantage : elles permettent d'observer les racines en place sans perturbation trop importante, et d'effectuer une ana-

lyse conjointe du système géopédologique ; il est ainsi possible d'observer directement les effets des contraintes du sol sur l'enracinement. Malgré son caractère contraignant (Lucot, 1994), cette méthode présente l'avantage d'être non destructive pour l'arbre et assez facilement reproductible : l'analyse menée dans le cadre de cette étude sur 74 sols et systèmes racinaires a nécessité de l'ordre de 20 hommes-jour, alors que Eis (1974) estime à 100 hommes-jour le travail d'excavation et d'analyse complète du système racinaire d'un seul arbre adulte. Afin d'améliorer la technique de relevés sur fosse pédologique et d'en valider les résultats, il nous apparaît intéressant de tester à l'avenir plusieurs éléments du protocole :

– l'effet de la largeur de la zone de comptage et de sa position par rapport à l'arbre : les comptages ont été effectués sur une tranche de 1 mètre de largeur de part et d'autre d'une racine charpentière. Nous avons fait l'hypothèse que la surface analysée est représentative de la structure de l'ensemble de l'enracinement sur tout le pourtour de l'arbre. Il serait intéressant de comparer les comptages racinaires obtenus en suivant ce protocole avec le nombre total de racines sur le pourtour de l'arbre. La distance de 1 mètre par rapport au tronc a été choisie car elle correspond, d'après la littérature et nos propres observations, à la distance à partir de laquelle les racines charpentières se ramifient en règle générale. Il serait intéressant de comparer les résultats de comptages effectués en faisant varier la distance par rapport à l'arbre

– le comptage des racines fines *in situ* est souvent sujet à caution : il est parfois difficile de compter les racines de diamètre inférieur à 1 mm sous des peuplements fermés et sombres. Les valeurs relevées pourraient être comparées avec des mesures sur des échantillons de sols après tamisage et extraction de toutes les racines, comme cela est pratiqué par certains auteurs (Boehm, 1979 ; Bréda, 1990).

La profondeur maximale apparente atteinte par les racines (PMEA) est conditionnée en pratique par les capacités physiques de creusement de la fosse pédologique. Cette méthode nous a permis de montrer de fortes liaisons statistiques entre les caractéristiques du système racinaire et la croissance du Douglas, ce qui peut s'expliquer par le fait que l'essentiel du système racinaire est situé

dans les deux premiers mètres de sol et que les racines colonisant les horizons pédologiques de « surface » assurent l'essentiel de l'alimentation en eau et en nutriments. Il est cependant très probable que cette technique conduit à sous-estimer la profondeur maximale réellement atteinte par les racines des Douglas adultes, qui est par exemple de 3 mètres à 70 ans dans les conditions étudiées par Stone et Kalisz (1991). Nos observations ne nous ont pas permis de prendre en compte les racines prospectant les horizons profonds du sol et le *substratum* géologique, qui peuvent jouer un rôle important dans l'alimentation en eau sur certains sols et dans des conditions de stress hydrique prolongé (Badot *et al.*, 1994 ; Lucot, 1994). Des mesures à plus grande profondeur devraient permettre de prendre en compte ce système racinaire profond dans la typologie et de le mettre en relation avec la croissance en hauteur des peuplements.

Conclusion

Les recherches *in situ* sur les relations entre le système géopédologique et le système racinaire des arbres apportent aux gestionnaires et aux chercheurs des éléments pour mieux comprendre l'adaptation des essences forestières aux conditions stationnelles et pour prévoir les risques de problèmes sanitaires ou de mortalité à terme. Elles restent cependant assez rares, surtout sur des arbres adultes, du fait des contraintes matérielles de temps, de coût et de difficulté technique. La mise en œuvre d'une telle technique nous a permis d'établir une typologie des systèmes racinaires de Douglas adultes en fonction des conditions géopédologiques variées existant dans les monts

du Beaujolais. On distingue ainsi sept types de systèmes racinaires correspondant à des conditions géopédologiques bien typées. Ces types ont été obtenus à l'aide de critères simples décrivant la morphologie du système racinaire et des caractéristiques physiques et chimiques des sols et du *substratum* géologique. Il existe de fortes liaisons statistiques entre ces groupes et la croissance en hauteur du Douglas. Nous avons mis en évidence les principales contraintes géopédologiques qui influent sur le développement racinaire du Douglas et sur sa croissance en hauteur, de même que le rôle essentiel des racines fines. Des travaux complémentaires seraient nécessaires, mais on peut recommander aux sylviculteurs d'introduire le Douglas avec prudence sur les sols les plus superficiels qui subissent de fortes contraintes hydriques. Cela est surtout vrai dans le cas des peuplements relativement âgés en retard d'éclaircie subissant une forte concurrence aérienne et souterraine. Cela pourrait expliquer l'augmentation des surfaces connaissant des dépérissements probablement liés à un stress hydrique (Charnet *et al.*, 1996 ; Direction de la Santé des Forêts, 1996) et entraîne des risques importants de chablis (Kuiper et Coutts, 1991). Cette étude a ouvert des perspectives :

- comparer les résultats obtenus ici avec des observations menées sur des peuplements proches de l'âge d'exploitation (70-80 ans) et sur des peuplements dépérissant afin de mettre en évidence des liaisons entre sol, système racinaire et état sanitaire ;
- étudier l'influence des variables chimiques du sol sur le système racinaire et la croissance du Douglas. □

Remerciements

Nous remercions M. le directeur du Centre régional de la propriété forestière Rhône-Alpes, ainsi que les ingénieurs et techniciens qui nous ont apporté une aide précieuse pour le choix des peuplements étudiés.

Résumé

Cet article présente les résultats d'une étude du système racinaire de Douglas adultes observé *in situ* sur fosses pédologiques dans 74 peuplements purs des monts du Beaujolais. Ces travaux mettent en évidence le fait que la morphologie du système racinaire du Douglas est adaptée aux contraintes géopédologiques engendrées par les structures du sol et du substratum géologique, ce qui conditionne sa croissance en hauteur. Des analyses multifactorielles (AFC et CAH) menées sur les variables descriptives de la morphologie du système racinaire des 74 arbres dominants étudiés et sur celles décrivant les systèmes géopédologiques ont permis d'établir sept groupes présentant des caractéristiques homogènes. Ces groupes expliquent 52,6 % de la variance de l'indice de fertilité du peuplement. La croissance en hauteur du Douglas est généralement forte dans cette région mais elle est nettement réduite quand le système racinaire subit de fortes contraintes dans les horizons peu profonds. Les meilleures croissances correspondent à des systèmes racinaires profonds et à décroissance régulière. Une régression linéaire multiple ($R^2 = 0,57$) a été établie entre l'indice de production du peuplement et les variables racinaires qui influent le plus fortement sur la croissance du Douglas : la profondeur maximale apparente de l'enracinement, la densité maximale de racines dans un même horizon, la surface racinaire correspondant aux racines fines (diamètre < 5 mm). Des analyses complémentaires montrent en effet que la croissance en hauteur des arbres est fortement liée à la surface occupée par les racines les plus fines, de diamètre inférieur à 1 mm, qui assurent l'essentiel de la nutrition minérale et hydrique du Douglas. Ces observations doivent permettre de mieux choisir les stations et les sols les plus favorables à l'implantation de cette essence, et mettent en évidence des risques de mauvaise croissance, de problèmes sanitaires ou d'échec sur certains sols.

Abstract

Relationships between geopedological systems and rooting system. Influence on height growth for Douglas-fir in the monts du Beaujolais (France).

This paper deals with a study of mature Douglas-fir root systems in 74 pure and even-aged forest stands of middle mountain areas (mounts of Beaujolais). Root systems were studied *in situ* using trenches opened in soils at 1 meter distance from the stem of dominant trees. The results stress that geopedological constraints due to substratum and soil structures have a strong influence on root systems morphology, and on height growth of forest stands. Multivariate analysis (CA and HCA) were led on root systems variables and geopedological variables. Seven homogeneous groups were identified. They explain 52,6 % of variance of dominant height. Douglas fir height growth is correct or strong for all stands but distinctly reduced when root system is superficial and jammed in surface soil horizons. Highest growth correspond to deep and regular root system profiles. A multiple linear regression was carried out between dominant height and major root system variables ($R^2 = 0,57$ %) : estimated maximal rooting depth, maximal root density per horizon, fine roots surface (diameter < 5 mm). Height growth is strongly correlated ($R^2 = 0,61$) to surface of finest roots (diameter < 1 mm) which provide the main part of water and nutrients. These observations aim at choosing better sites and soils for settling Douglas fir, and at stressing risks of failure, pests or diseases.

Bibliographie

- BADOT, P.-M., LUCOT, E., BRUCKERT, S., 1994. *L'humidité du sol en profondeur constitue, en milieu de journée, la principale source de variation du potentiel hydrique foliaire de peuplements de Chêne (Quercus sp.)*, C. R. Acad. Sci., 317, 341-345.
- BERBEN, J.-C., 1973. Influence de la densité du sol et des précipitations sur la croissance et le développement racinaire de quelques espèces forestières, *Bull. Soc. Roy. For. Belg.*, 1973 : 377-401.
- BCEHM, W., 1979. *Methods of studying root systems*, Springer Verlag, Berlin, 188 p.
- BRÉDA, N., 1990. Modifications du fonctionnement hydrique d'un perchis de chêne sessile par une sécheresse édaphique, *DEA Biol. Forest.*, Univ. Nancy 1, 90 p.
- BUFFET, M., GIRAULT, D. (coord.), 1989. *Station forestière, production et qualité des bois : éléments méthodologiques*, Cemagref, 150 p.
- CALLOT, G., CHAMAYOU, H., MAERSTENS, C., SALSAC, L., 1982. *Mieux comprendre les interactions sol-racine, Incidence sur la nutrition minérale*, INRA, Paris, 35 p.
- CHARNET, F., PAILLASSA, E., DUMÉ, G., 1996. *Étude des dommages causés par les sécheresses de 1989, 1990 et 1991 aux peuplements de Douglas dans le Centre-Ouest*, Rapport IDF, Orléans, 96 p.
- CURT, T., 1991. *Typologie forestière de la bordure Est du Massif Central*, Cemagref, Riom, 150 p.
- CURT, T., BOUCHAUD, M., AGRECH, G., PLAISSE, L., 1996. *Relations station-production pour le Douglas et l'épicéa commun en Limousin*, Cemagref, Clermont-Ferrand, 99 p.
- CURT, T., MARSTEAU, C., 1997. *Systèmes géopédologiques et production forestière sur substratum carbonaté et gréseux en région méditerranéenne, l'exemple des chênes verts et pubescents dans les garrigues du Gard*, Étude et Gestion des Sols, 4, 4, 1997 : 1-17.
- CURT, T., BOUCHAUD, M., BARDONNET, C., BOUQUET, F., LUCOT, E., 1998. *Étude des relations station-production pour le Douglas dans les monts du Beaujolais*, Rapport Cemagref, Clermont-Ferrand, 100 p.
- DE CHAMPS, J., MARIEN, J.-N., DUFOUR, J., 1975-1977. Étude de l'enracinement en place de jeunes Douglas. *Ann. Afocel*, 1975:251-357, 1976 :163-216, 1977 :163-218.
- DE CHAMPS, J. (coord.), 1997. *Le Douglas*. Afocel, Paris, 416 p.
- DIRECTION DE LA SANTÉ DES FORÊTS (DSF), 1996. *La santé des forêts en France*, DSF, Paris, 100 p.
- EIS, S., 1974. Root system morphology of western hemlock, western redcedar and Douglas-fir, *Canadian Journal For. Ressource* 2 : 111-120.
- FOGEFOR, 1996. *Quelle alternative à la monoculture du Douglas dans les monts du Beaujolais et du Lyonnais ? Feuillus, autres résineux ?* FOGEFOR Rhône, 50 p. + annexes.
- GILBERT, J.M., CHEVALIER, R., VALLÉE, B., 1994. *Étude des relations station-production du Douglas dans le pays d'Othe*, Cemagref, Nogent, 69 p.
- HEGYI, F., 1974. A simulation model for managing jack-pine stands. In. *Growth model for tree and simulation*, J. Fries ed., *R. Coll. For. Res. Note* 30, 74-90.
- KÖSTLER, J.N., BRUCKNER, E., BIBELRIEHTER, H., 1968. *Die Wurzeln der Waldbaume*, Verlag Paul Parey, Hamburg, 284 p.
- KUIPER, L.C., COUTTS, M.P., 1991. Spatial disposition and extension of the structural root system of Douglas-fir, *For. Ecol. Manage.*, 47 (1992), 111-125.
- LUCOT, E., 1994. *Rôle de la fissuration des roches et de la pierrosité des sols sur la prospection racinaire et l'alimentation hydrique : application au fonctionnement des écosystèmes forestiers*, Thèse Pédologie, Univ. Besançon, 170 p.
- McMINN, R.G., 1963. Characteristics of Douglas-fir root system, *Can J. Bot.*, 41 :105-122.

NEPVEU, G., 1984. Variabilité génétique de la qualité du bois chez le douglas et l'épicéa, *Revue Forestière Française*, 1984 : 4, 30^o-312.

PAGÈS, L., 1995. *Architecture racinaire : analyse et modélisation*, in. Séminaire " La racine et le système racinaire ", INRA Orléans, 1-13.

SANANTONIO, D., HERMANN, R.K., OVERTON, W.S., 1977. Root biomass studies in forest ecosystems, *Pedobiologia*, Bd. 17 : 1-31.

SCHOTTS, F.E., LLOYD, W.J., DEARDDORFF, C.E., 1956. Some soil characteristics which affect root penetration and timber site quality of Douglas-fir in western Washington, *Soil Sci. Soc. Proc.* 20 :101-105.

STONE, E.L., KALISZ, P.J., 1991. On the maximum extent of tree roots, *For. Ecol. Manage.* 46 :59-102.

SUTTON, R.F., TINUS, R.W., 1983. Root and root system terminology, *Forest. Sci. Monogr.* 24, 137 p.