

Méthode pratique de description des sols forestiers caillouteux sur substrat calcaire

E. Lucot et Michèle Gaiffe

Laboratoire de Sciences Végétales, Institut des Sciences et Techniques de l'Environnement
2, place Leclerc, 25030 Besançon

RÉSUMÉ

Le présent travail a pour objectif de quantifier par des données objectives les difficultés de développement des racines des arbres dans les milieux à forte pierrosité. L'incidence des obstacles physiques est étudiée ici sur trois espèces bien représentées en Franche-Comté, les Chênes pédonculés (*Quercus robur*) et sessiles (*Q. petraea*) et le Sapin pectiné (*Abies alba*). Il en résulte un tableau simplifié de calcul de "l'indice de pierrosité", appelé π , qui constitue un outil, d'un usage simple et rapide, de l'évaluation de la contrainte due aux cailloux pour la prospection racinaire et l'alimentation des arbres. L'indice de pierrosité π fait partie des contraintes du sol et à ce titre peut s'intégrer facilement à la liste des autres contraintes prises en compte par le "sigle" (Bruckert, 1989) de désignation morpho-édaphique des sols.

Mots clés

Quercus sp. - *Abies alba* - racine - cailloux - sol forestier.

SUMMARY

PRACTICAL METHOD TO DESCRIBE STONY FOREST SOILS ON CALCAREOUS ROCK

Water and mineral uptake in trees depends on soil volume prospected by roots. Physical (stones, cemented layers) and chemical (water table, salinity) stresses limit this volume. The aim of this work is to quantify the physical stress applied to tree root development in soil with high stone content. The incidence of physical obstacles was studied in situ on mature oaks (*Quercus robur* and *Q. sessiliflora*) and firs (*Abies alba*).

Rooting profiles were studied in a vertical semicircular excavation at 1 m from the stem. Rooting density was calculated for each 10 cm layer and expressed in percentage of total profile root surface. Complementary measurements are performed on uprooted trees.

Two shapes of stones were selected : (i) stones with a subhorizontal surface (Sh) and (ii) stones with non parallel or curved sides Si (fig. 1). In a 50 x 50 cm side excavation, all the stones were collected by 10 cm depth layers. Stone size and shape were determined (Fig. 2). These measurements allow the calculation of horizontal (LISh, LISi) and vertical surfaces (LeSh, LeSi). Physico-chemical and edaphic parameters of the studied sites (tab. 1) are representative of the mean local soils (pH 6, Ca/CEC : 80 %).

Quercus and *Abies* roots reactions were similar. The ramification depth (depth at which tap roots begin to split) in non-stony soils (fig. 3, reference) and response in presence of stones (fig. 3, contrainte forte) were identical. Variations in roots density due to stones depend on the part of the root system which was constrained (fig. 4). Three parts can be distinguished : (i) from the soil surface to the maximum root density (SM), (ii) from this maximum to the taproots ramification (MR) and (iii) the taproots ramification depth. The stress applied to the roots were quantified using the root density difference (in percents) between control rooting and constrained rooting.

According to the rooting part, some of the stoniness parameters highly related to the root density variations (tab. 2). For each parameter, two threshold values correspond to three kinds of root-stone relations (fig. 5, A, B, C). Only the part B displays a proportional relation between stones parameters and root development. These results are used to define a "stoniness index" that includes 9 degrees (tab. 4).

To evaluate the stoniness index, the stones from the 10 cm layer which seems to have a high constraint level, are measured (tab. 3). If this layer is less than 30 cm from the soil surface, the following parameters are calculated : LeSh, LIsh, LISi and eSi. The results are compared to the threshold values (tab. 3) and they give an index : π_1 or π_2 or *. The stoniness index of the soil is the most constraining index. If all indexes are *, the index is determined on the following deeper layer (tab. 3).

This method is an easy and fast way to evaluate the constraint caused to the roots by the different characteristics of the stones.

The stoniness index takes into considerations the soil constraints and can be integrated into the other constraints included in the "sigle" (Bruckert, 1989), which describes the important soil properties for tree rooting (fig. 6).

Key-words

Quercus - *Abies* - roots - stones.

RESUMEN

METODO PRACTICO DE DESCRIPCIÓN DE SUELOS FORESTALES PEDREGOSOS SOBRE CALIZA

El trabajo presentado tiene con objetivo de cuantificar con datos precisos las dificultades de desarrollo de las raíces de los arboles en los medios con fuerte pedregosidad. La incidencia de los obstáculos físicos se estudió sobre tres especies bien representadas en Franche-Comté, los encinos pedunculados (*Quercus robur*) y sesiles (*Q. petraea*) y el abeto péctineo (*Abies alba*). Resulta una tabla simplificada del calculo del "índice de pedregosidad", llamado π , que constituye un herramienta, de uso simple y rápido, de la evaluación del factor limitante debido a los cantos para la prospección de las raíces y la alimentación de los arboles. El índice de pedregosidad π hace parte de los limitantes del suelo y puede fácilmente agregarse a la lista de los otros limitantes tomados en cuenta por la "sigla" (Bruckert, 1989) de designación morfo-edafológica de los suelos.

Palabras claves

Quercus sp. - *Abies alba* - raíz - cantos - suelo forestal.

Le volume de sol prospectable par les racines apparaît comme un facteur prépondérant dans la fertilité d'une station forestière (Pritchett, 1979). Il conditionne en effet l'alimentation hydrique et minérale de la plante (Levy, 1968, Callot *et al.*, 1983, Forristall et Gessel, 1985). Le volume effectivement prospecté est limité par un certain nombre de facteurs soit chimiques (anoxie, déficience trophique, salinité), soit physiques (tassement, déstructuration, présence d'éléments grossiers), chacun de ces facteurs constituant une "contrainte" pour les racines.

En Franche-Comté, sur les plateaux calcaires, les forestiers et les phytosociologues remarquent des écarts de production qui ne sont liés ni à la sylviculture, ni au niveau trophique, puisque les caractéristiques physico-chimiques des sols sont comprises dans une gamme de valeurs moyennes (Bailly 1986, Paget 1992). Ce serait donc le volume colonisé par les racines qui serait responsable des fluctuations de production observées, volume presque exclusivement conditionné par les éléments grossiers calcaires. Même si un certain nombre de travaux proposent des méthodes d'évaluation des caractéristiques des sols caillouteux (Hidlebaugh, 1984 ; Gras, 1994), aucun ne détermine précisément la contrainte résultante pour les racines des végétaux ligneux.

C'est pourquoi cette étude a été réalisée afin de mettre à la disposition des gestionnaires forestiers un outil pratique de description des sols et d'évaluation des niveaux de contrainte liés à la présence de cailloux. Une approche théorique des relations racine-obstacle, basée sur des travaux antérieurs en particulier ceux de Riedacker (1978), a été effectuée par une expérimentation en conditions contrôlées (Lucot, 1994) et par des mesures de terrain. La synthèse des données obtenues a permis le calcul de seuils de pierrosité, fonction des réactions des enracinements (Lucot et Gaiffe, 1995) et la mise au point d'une méthode d'étude des éléments grossiers en relation avec la contrainte qu'ils représentent pour les racines.

Un indice de contrainte, appelé π a été défini et intégré au sigle qui décrit l'ensemble des facteurs pédologiques (Bruckert, 1989). On obtient ainsi un outil de désignation du sol facile à mettre en œuvre sur le terrain et qui apporte un maximum d'informations sur les possibilités d'enracinement des arbres.

ÉTUDE DES RELATIONS RACINES-OBSTACLES : MÉTHODES

Matériel végétal

L'étude concerne l'ensemble des forêts établies sur substrat calcaire en Franche-Comté, d'où un gradient altitudinal important : de 200 m dans la vallée de la Saône à 1 000 m en bordure de la Haute-Chaine du Jura. Cet étagement a conduit à choisir des essences qui soient bien représentées dans les

peuplements et dont l'architecture racinaire, déterminée génétiquement (Atger, 1991), induit un développement vers la profondeur, même pour les racines subhorizontales, d'où une confrontation importante avec les obstacles. Les Chênes pédonculés (*Quercus robur*) et sessiles (*Q. petraea*) ont été retenus pour l'étage collinéen et le Sapin pectiné (*Abies alba*) pour l'étage montagnard.

Sites d'étude

Les sites ont été sélectionnés d'après des études pédologiques et phytosociologiques antérieures (Bailly 1986, Paget 1992), en collaboration avec l'Office National des Forêts. Plus de 200 arbres ont été observés au sein de peuplements homogènes et sains, de façon à prendre en compte les types de sol et de pierrosité les plus représentatifs des forêts franco-comtoises. Parmi les 22 arbres adultes qui ont été retenus, 3 chênes et 3 sapins ont été étudiés en sols profonds. Les autres occupent des stations qui peuvent être regroupées selon les trois types de substrats calcaires définis par Gaiffe et Bruckert (1991) :

- dalle plus ou moins fissurée, sur laquelle se développent des sols bruns à pellicules calcaires, bruns eutrophes ou légèrement lessivés ; les éléments grossiers y sont généralement aplatis. Cette situation représente le cas le plus fréquemment rencontré (2 chênes et 6 sapins) ;
- calcaire concassé, avec des sols plus humifères dont les éléments grossiers sont parallélépipédiques irréguliers, plus ou moins émoussés (2 chênes et 3 sapins) ;
- moraine autochtone, où l'on retrouve les mêmes types de sol, mais avec des éléments arrondis (3 sapins).

Tous les sols étudiés présentent un régime hydrique drainant et se situent dans les valeurs moyennes des caractéristiques physico-chimiques et édaphiques des sols régionaux (*tableau 1*) : texture limono-argileuse à argilo-limoneuse, taux de saturation en calcium avoisinant 80 %.

Dans ce travail, les éléments calcaires grossiers qui constituent la pierrosité du sol sont désignés par "cailloux", sans préjuger de leur taille.

Paramètres racinaires

Le système racinaire d'un arbre comporte globalement deux parties (Köstler *et al.*, 1968) :

- le système racinaire de surface comportant des racines subhorizontales qui prospectent le sol latéralement et assurent l'alimentation hydrique et minérale de l'arbre en conditions normales,
- un système racinaire profond dont les racines subverticales (pivots) colonisent le sol en profondeur et permettent l'ancrage et l'alimentation en période de sécheresse (Lucot *et al.*, 1995).

Les mesures prenant en considération les deux systèmes

Tableau 1 - Caractéristiques des stations étudiées. Profond. max. : profondeur maximum observée, Profond. caill. : profondeur d'apparition des cailloux, Ag max. et min. : taux d'argile maximum et minimum observés dans le profil.

Table 1 - Characteristics of studied sites. "Profond. max." : maximum deep observed, "Profond. caill." : first stones deep, "Ag max et min" : maximum and minimum clay rates.

Espèce	Station	Altitude (m)	Géologie	Sol	Profond. max. (cm)	Profond. caill. (cm)	Ag min. (%)	Ag max. (%)	pH mini.	pH maxi.
CHÊNE	Fontain	355	Bathonien (J2)	B. lessivé colluvial	450	450	20	34	5,7	7,1
	Fontain	355	Bathonien (J2)	B. lessivé colluvial	440	440	17	33	5,5	7,4
	Savoieux	223	Alluvions (Fv)	B. alluvial brunifié	230	230	16	32	5,3	6,5
	Savoieux	230	Kimméridgien (J8)	B. calcique	140	25	29	35	6,1	7,0
	Chassagne	505	Argovien (J5)	B. lessivé colluvial	150	60	20	32	5,0	5,3
	Dampierre	300	Bajocien (J1)	B. eutrophe	60	5	28	35	5,5	7,2
	Echenoz	375	Bathonien (J2)	B. eutrophe	60	0	26	36	5,8	7,4
SAPIN	Sombadour	890	Bathonien (J2)	B. lessivé colluvial	240	120	23	37	4,9	5,2
	Bretonvillers	665	Argovien (J5)	B. lessivé colluvial	150	110	27	38	5,2	5,7
	Bretonvillers	665	Argovien (J5)	B. lessivé colluvial	200	110	25	36	5,3	6,1
	Bretonvillers	660	Argovien (J5)	B. calcique	70	0	30	41	6,1	7,7
	Hôpitaux N.	1 130	Kimméridgien (J8)	B. calcique humif.	40	0	35	40	6,9	7,9
	Pontarlier	955	Séquanien (J7)	B. eutrophe	25	15	32	39	6,5	7,3
	Pontarlier	955	Argovien (J5)	B. eutrophe	80	50	28	37	5,6	6,8
	Pontarlier	960	Kimméridgien (J8)	B. eutrophe	70	30	31	38	5,8	6,8
	Labergement	981	Moraine (Gm)	B. calcique humif.	80	35	39	42	6,1	7,8
	Labergement	990	Portlandien (J9)	B. eutrophe	60	10	34	40	5,9	7,4
	Labergement	980	Portlandien (J9)	B. calcique	70	10	29	39	7,1	7,6
	Labergement	990	Moraine (Gm)	B. calcique	90	10	26	32	6,7	7,5
	Doubs	970	Kimméridgien (J8)	B. eutrophe	120	20	35	42	5,8	6,7
	Levier	780	Argovien (J5)	B. eutrophe	100	35	34	42	6,0	7,4

ont été effectuées dans deux situations : sur des arbres en place et sur des arbres déracinés par le vent (chablis).

Mesures sur les arbres en place

Pour chaque arbre, un profil racinaire (Belgrand, 1983, Lucot et Bruckert, 1992) a été déterminé le long d'une coupe verticale en arc de cercle distante de 1 m du tronc, dans le prolongement d'un contrefort.

Dans chaque fosse, un profil cylindrique de 1,1 m a été aménagé, afin d'étudier le système racinaire, ce qui représente 1/6^e de celui de l'arbre. Pour chaque couche de 10 cm d'épaisseur, les racines ont été comptées par classe de diamètre (1-5 mm : classe a ; 5-20 mm : classe b ; 20-50 mm : classe c ; > 50 mm : classe d). Lorsque la section d'une racine était répartie sur plusieurs niveaux, on a pris en compte séparément la fraction de racine appartenant à chaque niveau. Le dénombrement des racines par classe de diamètre est exprimé en

surface de racines. Les valeurs de surface pour chaque classe sont cumulées par tranche de sol de 10 cm, puis exprimées en densité racinaire (surface de racine rapportée à la surface totale de racines mesurée sur tout le profil).

Ce travail ne permet pas l'accès aux racines qui ne recourent pas le profil étudié et en particulier aux pivots. Ceux-ci ont été dégagés manuellement en direction du centre de l'arbre, à partir du profil réalisé précédemment. La profondeur atteinte à leur ramification principale a été mesurée.

Mesures sur les arbres déracinés

Le sol et les cailloux qui basculent avec un arbre déraciné restent entre les racines au moins jusqu'à la ramification des pivots, ce qui permet d'appliquer un protocole identique sur arbres en place et sur chablis. L'équivalence des mesures dans les deux situations a été vérifiée (Lucot, 1994).

Grâce aux chablis, les caractéristiques du sol et de l'obs-

tacle à l'enracinement, ainsi que l'état du système racinaire sont observables très facilement avant la mise en place du profil de mesure de la densité racinaire. De plus, le dégagement des racines dans la motte du chablis ne nécessite pas de moyens mécaniques importants et l'arbre est déjà condamné à être coupé puisqu'il est déraciné.

Cependant, l'utilisation des chablis présente quelques inconvénients et nécessite de prendre des précautions : le nombre de chablis est généralement limité, leur localisation aléatoire et la chute de l'arbre peut être due à une faiblesse accidentelle du système racinaire liée à un dépérissement (Fraser, 1962). Aussi est-il nécessaire de n'utiliser que des chablis provoqués par un déséquilibre aérodynamique en rapport avec l'élanement de l'arbre, suite à une exploitation (Bardet, 1976 ; de Champs, 1987) ou par la simple poussée due au vent et au poids de la partie aérienne (Bouchon, 1987).

Étude de la pierrosité

Définition des types de forme de cailloux

Les caractéristiques morphoscopiques des cailloux et les relations racine-obstacle (Lucot, 1994) permettent de définir des types de forme selon la contrainte que chacun représente. L'obstacle de référence est défini comme un plan horizontal régulier à partir duquel on distingue (figure 1) :

- type Surface horizontale (Sh) : éléments grossiers dont la surface supérieure est plane et subhorizontale (plaquettes) ;
- type Surface inclinée (Si) : regroupe les éléments gros-

siers possédant une forme générale composée de faces planes non parallèles ou de surfaces courbes, le plus souvent autour d'un plan d'aplatissement principal, c'est-à-dire des parallélépipèdes à surfaces courbes, planes ou coniques, donc de forme pyramidale, trapézoïdale, conique ou ellipsoïdale, sphérique ou subsphérique. Ce type comprend aussi les éléments plats inclinés de plus de 15° (pendage).

Un caillou de forme plane proche du type Sh et possédant des bords arrondis appartient au type Si, si la surface plane occupe moins des deux tiers de la surface totale dans le plan principal du caillou.

Prélèvements

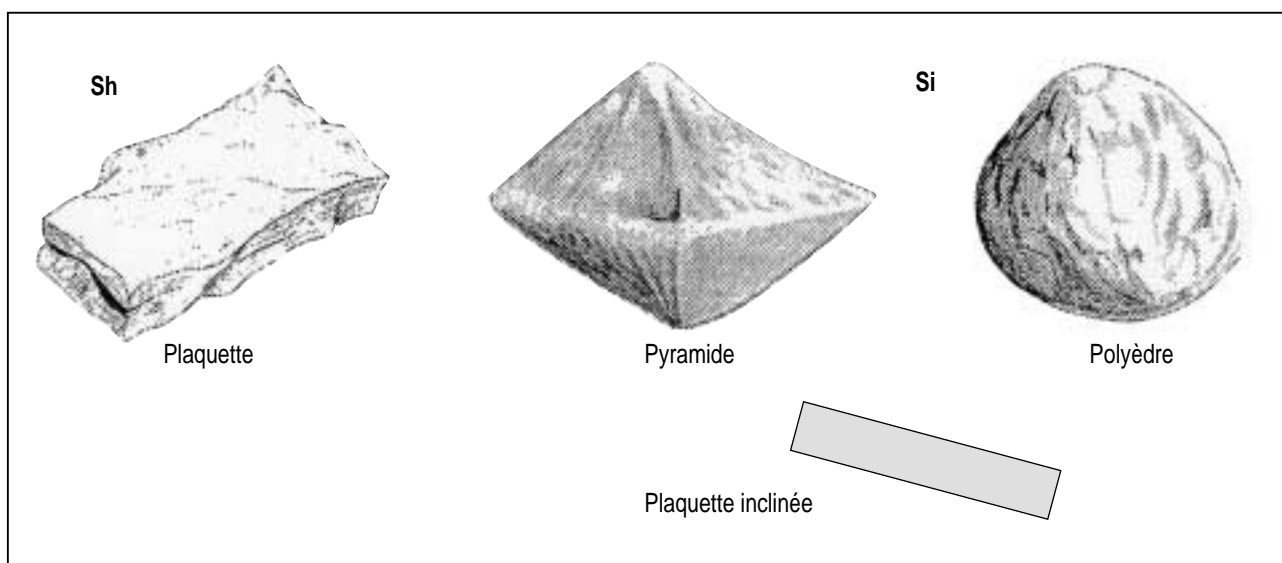
Une fosse de 50 x 50 cm de côté a été ouverte à proximité de chaque arbre et les cailloux ont été prélevés par volumes de 10 cm d'épaisseur (25 dm³). La surface de prélèvement (0,25 m²) permet une bonne estimation des éléments les plus couramment rencontrés. Pratiquement, une surface plus grande implique des manipulations trop importantes, compte-tenu du nombre de sols étudiés (16) et de la quantité de cailloux présents dans chaque sol (80 à 350 kg/m²) ; en revanche, en présence de blocs ou de dalles de taille supérieure à 50 cm, la surface de prélèvement est étendue à 1 m².

L'épaisseur du niveau de prélèvement (10 cm) est adaptée à l'épaisseur des cailloux rencontrés (1 à 8 cm dans la grande majorité) et aux variations de pierrosité observées. De plus, cette épaisseur correspond à celle utilisée pour le maillage de repérage des racines, ce qui facilite les comparaisons.

Les cailloux sont comptabilisés dans le niveau où ils déve-

Figure 1 -Types de formes des éléments grossiers : type surface horizontale (Sh) et type surface inclinée (Si).

Figure 1 - Shape types of stones : type with horizontal surface (Sh) and type with inclined surface (Si).



loppent leur plus grande surface dans le plan horizontal. La profondeur totale de prélèvement est au moins égale à celle atteinte par les racines verticales, au niveau de leur ramification principale.

Mesures métriques et observations

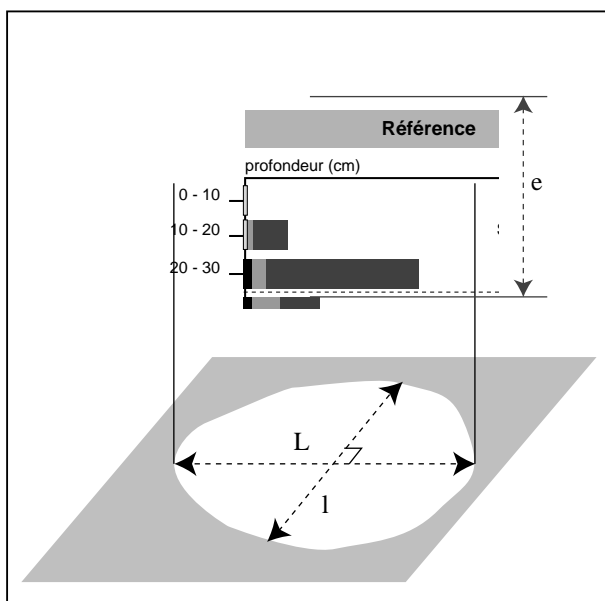
Les dimensions de chaque caillou ont été mesurées (Cailleux et Tricart, 1959), (*figure 2*) : la plus grande dimension (L), la seconde plus grande dimension (l), perpendiculaire à L et la plus grande épaisseur (e), perpendiculaire au plan Ll . Chaque caillou mesuré a été classé dans un type de forme. Le volume des éléments grossiers de chaque niveau a été mesuré par déplacement d'un volume d'eau. L'utilisation du volume permet de s'affranchir des variations de densité, qui peuvent être importantes, en particulier sur substrat glaciaire.

Calculs

Outre les trois dimensions L , l et e déjà définies, sont pris en compte la surface horizontale calculée ($L \times l$, cm^2), la surface verticale calculée ($L \times e$, cm^2), le nombre de cailloux, le volume total des cailloux (%). Par niveau de 10 cm et pour cha-

Figure 2 - Projection du plan principal d'un caillou et dimensions mesurées : L : plus grande dimension ; l : plus grande dimension perpendiculaire à L ; e : plus grande épaisseur perpendiculaire au plan Ll .

Figure 2 - Principal projection plane from a stone and measured sizes : L : larger dimension ; l : larger dimension perpendicular to L ; e : larger thickness perpendicular to Ll plane.



cun des paramètres, sont calculées des valeurs moyennes, des valeurs moyennes par type de forme (sauf volume), des valeurs cumulées (sommées des valeurs de tous les cailloux) et des valeurs cumulées par type de forme (sauf volume).

Les paramètres de la pierrosité qui influencent les paramètres racinaires ont été sélectionnés et hiérarchisés par régressions multiples pas à pas. Leurs seuils d'influence sur les racines ont été déterminés par régressions polynomiales.

RÉSULTATS

Paramètres de l'enracinement

Pour les chênes et le sapin, les profils de densité racinaire étudiés en conditions non contraignantes présentent des variations semblables au long des profils (*figure 3, référence*), avec une augmentation forte et un maximum dans les 30 premiers centimètres. La décroissance est ensuite importante, les valeurs de densité étant faibles pour le système profond, excepté à la profondeur de ramification des pivots (R). Cette profondeur est identique pour les deux genres.

La présence d'une contrainte (*figure 3, contrainte forte*) se traduit par une modification de la distribution des racines : une concentration au niveau du système de surface et une profondeur de ramification des pivots plus proche de la surface.

La variation de la densité racinaire est fonction de la partie du système racinaire considérée, d'où la nécessité d'effectuer les comparaisons enracinement - pierrosité en individualisant chaque partie (*figure 3*) :

- de la surface à la profondeur du maximum de densité : partie SM. En sol non contraignant, le maximum se situe à une profondeur moyenne de 30 cm ;
- du maximum de densité à la profondeur de ramification des pivots : partie MR, qui s'étend en sol non contraignant entre 30 et 80 cm ;
- la profondeur de contrainte pour les pivots a été caractérisée par leur profondeur de ramification (R), qui, en fonction de la contrainte, peut apparaître entre 30 et 90 cm.

Ces subdivisions ont été précisées par le calcul de la différence moyenne mesurée entre chacun des 16 systèmes contraints et sa référence, par niveau de 10 cm (*figure 4*). Les trois parties sont significativement différentes pour $p = 0,05$. La partie SM (0 - 30 cm) présente des différences proches de 50 % avec les références. La partie MR est déterminée par des valeurs d'environ 15 % entre 30 et 60 cm de profondeur, au lieu d'une distribution entre 30 et 80 cm hors contrainte. La tranche 60 - 90 cm est affectée de variations de 3 à 6 %, valeurs qui sont caractéristiques des niveaux de ramification des pivots (R).

Paramètres de la pierrosité

Figure 3 - Profils de densité racinaire mesurés sur des chênes et sapins adultes dans deux situations de contrainte : nulle (référence) et forte. Les profils sont subdivisés en trois parties : de la surface du sol au maximum de densité (SM), du maximum de densité à la profondeur de ramification (MR) et la profondeur de ramification (R).

Figure 3 - Oaks and firs root density measured on soils without stones (référence) and stony soils (contrainte forte). The profiles are divided in three parts : (i) from soil surface to maximum of density (Sm), (ii) from this maximum to taproot ramification (MR) and (ii) the taproot ramification depth (R).

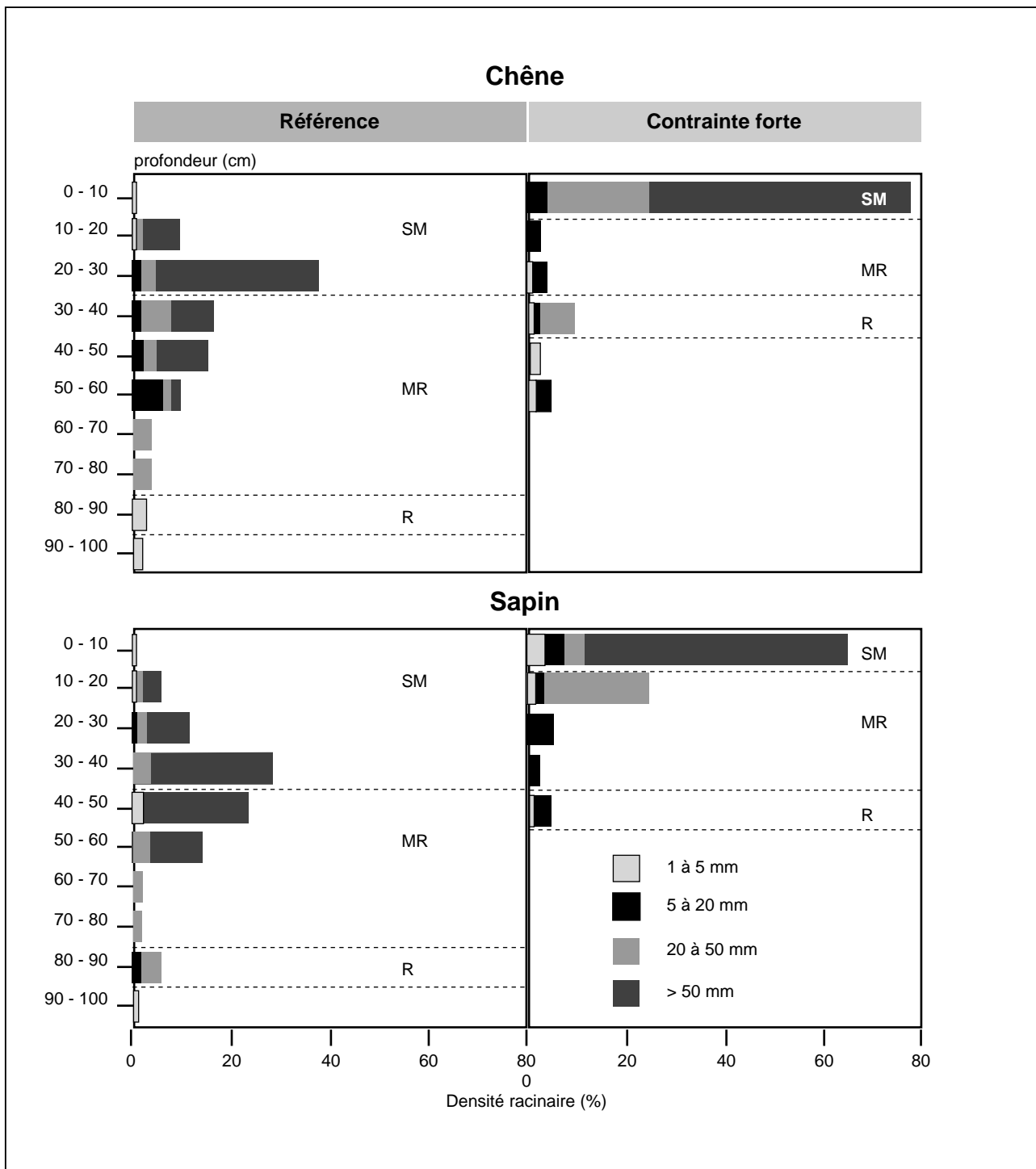
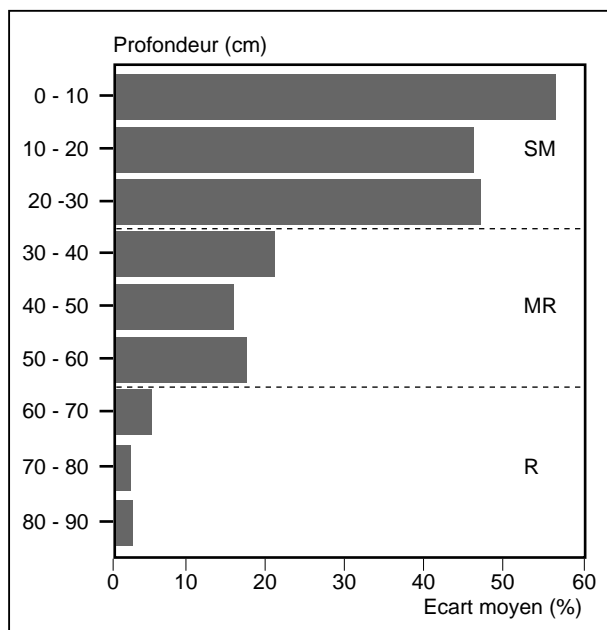


Figure 4 - Ecart de densité racinaire moyen calculé entre chacun des 16 systèmes contraints et l'enracinement de référence correspondant. L'écart moyen est exprimé en pourcentage de référence.

Figure 4 - Mean root density calculated between constraint root system and control rooting (16 root systems). The mean deviation given in percentage of the control.



Les données prises en compte ici reposent sur l'étude de 16 systèmes racinaires, soit un total de 158 niveaux de 10 cm d'épaisseur pour lesquels il est possible de mettre en relation la pierrosité et l'enracinement. La gamme des cas différents que nous avons pris en compte donne une distribution continue des valeurs des paramètres de pierrosité mesurés. Chaque niveau de 10 cm a été considéré comme un individu indépendant, puisque les stations présentent chacune un système racinaire et un cas de pierrosité particulier pour un ou plusieurs paramètres. Pour le système racinaire, un seul paramètre est pris en compte selon la profondeur : différence entre densité avec contrainte et densité de référence (parties SM et MR) ou profondeur de ramification.

Les niveaux d'échantillonnage ont été regroupés par portion de système racinaire concerné : SM, MR et profondeur de ramification des pivots R. Des analyses ont été effectuées dans un premier temps en séparant les deux espèces de Chênes et le Sapin, mais la similitude des réactions des trois espèces d'une part et l'intérêt de disposer d'un nombre suffisant d'échantillons nous ont conduits à regrouper les données de tous les arbres étudiés.

L'analyse a été effectuée en trois étapes. La première a eu pour objectif de sélectionner les paramètres de la pierrosité les mieux corrélés à l'enracinement, grâce à des régressions multiples. La deuxième a permis de repérer dans l'échelle de pierrosité, les zones où il existe une relation significative entre

Tableau 2 - Valeurs seuils des paramètres de la pierrosité corrélés à l'enracinement. Mesures effectuées sur des cailloux extraits de 25 dm³ de sol (50x50x10 cm).

Table 2 - Threshold values of stone parameters correlate with root. The stones are extracted from 25 dm³ of soil (50x50x10 cm).

Profondeur cm	Portion d'enracinement concernée	Forme	Paramètre	Valeurs seuils
0 - 30	SM	Sh	Le	700 - 1 600 cm ²
		Si	e	250 - 900 cm ²
30 - 60	MR	Sh	e	30 - 250 cm
		Si	Le	150 - 1 700 cm ²
	ou R	Sh	L1	40 - 350 cm
		Si	e	500 - 4 500 cm ²
60 - 90	R	Sh	L1	70 - 400 cm
		Si	e	1 000 - 3 000 cm ²
		Sh	nombre	500 - 1 100 cm ²
		Si	e	70 - 75 cailloux
		Sh	e	30 - 220 cm
		Si	Le	500 - 900 cm ²
		Sh	L1	1 100 - 1 700 cm ²
		Si	nombre	75 - 130 cailloux
		Sh	e	220 - 300 cm
		Si	Le	900 - 1 200 cm ²

l'enracinement et la pierrosité. Ceci a été réalisé par le calcul de régressions simples polynomiales. Dans une troisième phase, les régressions multiples ont été recalculées en ne retenant que les paramètres de la pierrosité significativement en relation avec l'enracinement et en excluant les individus extrêmes repérés dans la deuxième étape de l'analyse.

Les variations de la différence de densité racinaire, mesurées dans les portions SM (*tableau 2*), peuvent être liées à quatre paramètres quantifiant la pierrosité ($p = 0,05$) : la somme des surfaces verticales L_v et la somme des surfaces horizontales L_h des éléments de type Sh et la somme des épaisseurs e et la somme des surfaces verticales des éléments

de type Si.

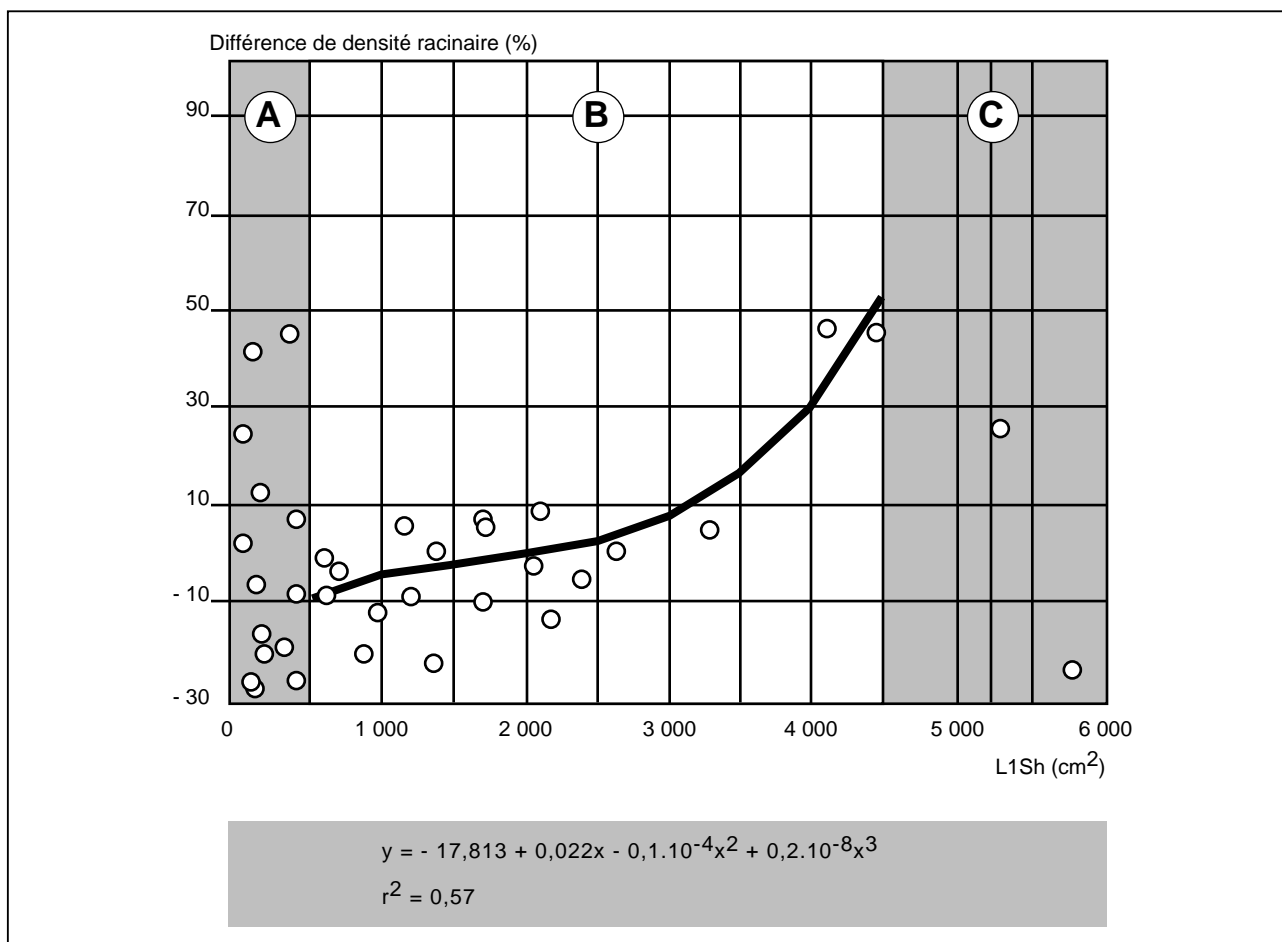
Pour la portion MR (*tableau 2*), les paramètres impliqués sont : la somme des épaisseurs e et la somme des surfaces horizontales L_h des éléments de type Sh ainsi que la somme des épaisseurs e et la somme des surfaces verticales des éléments de type Si.

La profondeur de ramification des pivots R (*tableau 2*) est liée à la somme des surfaces horizontales et au nombre d'éléments du type Sh et à la somme des épaisseurs e et la somme des surfaces verticales des éléments de type Si.

Seuils de contrainte

Figure 5 - Relation entre la différence de densité racinaire et les surfaces cumulées L_1 des cailloux à surface horizontale (Sh) pour la partie d'enracinement MR. Il n'apparaît pas de relation significative ($p = 0,05$) entre les deux variables dans les zones A et C, alors qu'une relation polynomiale est significative dans la zone B.

Figure 5 - Relationship between the difference of root density and the amount surface L_1 from stones with horizontal surface (Sh) on rooting part MR. There is no significant relation ($p = 0,05$) between the two parameters in A and C areas. A polynomial relation is significant in area



Chacune des distributions de la différence "système contraint-système de référence" en fonction de chacun des six paramètres retenus pour les trois portions des systèmes racinaires SM, MR et R, montre trois zones. La première zone (A, *figure 5, eSi*) présente des valeurs de contrainte trop faibles pour être significativement responsables des variations de densité racinaire.

La deuxième (B, *figure 5, eSi*) fait apparaître une relation proportionnelle entre les deux facteurs. Plus la contrainte est forte, plus la différence avec l'enracinement de référence est élevée.

Dans la troisième zone (C, *figure 5, eSi*), après un seuil, la relation n'est plus significative. Quelle que soit l'intensité de la contrainte, la densité racinaire est fortement modifiée, mais sans relation proportionnelle avec la pierrosité.

DÉFINITION D'UN INDICE DE PIERROSITÉ

Comme le montre la *figure 4*, les contraintes provoquent des modifications très importantes de la distribution des racines lorsqu'elles s'exercent sur le système de surface. La concentration des racines près de la surface augmente non seulement la concurrence entre les racines (McMinn, 1963), mais rend aussi ces dernières plus vulnérables aux effets de la dessiccation. Or le système de surface assure l'alimentation de

l'arbre en conditions hydriques moyennes, tandis que le système profond prend le relais en période de déficit hydrique (Lucot *et al.*, 1995). Les contraintes qui apparaissent entre 0 et 30 cm sont donc les plus pénalisantes pour l'alimentation de l'arbre (*cadre 1, tableau 2*). Entre 30 et 60 cm la contrainte concerne les racines subhorizontales (*cadre 2, tableau 2*) et les pivots (*cadre 3, tableau 2*). Entre 60 et 90 cm, seuls les pivots sont concernés et ils ont à leur disposition au moins 60 cm de sol pour se développer. A cette profondeur, les cailloux représentent une contrainte faible (*cadre 4, tableau 2*).

Ces différents cas de figure nous permettent de définir un "indice de contrainte à l'enracinement" ou encore "indice de pierrosité" appelé π . Cet indice varie de 1 à 9 (*tableau 3*) en fonction des considérations précédentes. Il rend compte des difficultés de progression des racines et des entraves physiologiques à leur développement : alimentation en eau et en éléments minéraux. Des mesures effectuées sur des cultures de chênes pédonculés en conditions contrôlées (Lucot, 1994) confirment les mesures de terrain en montrant que la production de biomasse est reliée négativement aux paramètres des cailloux. L'effet stimulant de la présence de cailloux, signalé pour certains végétaux herbacés ou ligneux (Gras, 1994), n'a été constaté en culture (Lucot, 1994) que pour les éléments plats de petite taille (5 cm). Sur le terrain, la présence de cailloux semble ne se traduire que par des conséquences

Tableau 3 - Définition de l'indice de pierrosité à partir des valeurs seuils des paramètres mesurés (*tableau 2*).

Table 3 - Definition of stoniness index with stones parameters threshold values (*table 2*).

Profondeur	Forme	Paramètre	unité	Valeurs seuils				
0 - 30 cm	Sh	Le	cm ²	*	700	π_2	1 600	π_1
		LI	cm ²		250		900	
	Si	e	cm		30		250	
		LI	cm ²		150		1 700	
30 - 60 cm	Sh	e	cm	*	40	π_4	350	π_3
		LI	cm ²		500		4 500	
	Si	e	cm		70		400	
		Le	cm ²		1 000		3 000	
	Sh	LI	cm ²	*	500	π_6	1 100	π_5
		nombre			40		75	
	Si	e	cm		30		220	
		Le	cm ²		500		900	
60 - 90 cm	Sh	LI	cm ²	π_9	1 100	π_8	1 700	π_7
		nombre			75		130	
	Si	e	cm		220		300	
		Le	cm ²		900		1 200	

négatives sur la production de bois (Bailly 1986, Paget 1992) mais les mesures reflètent aussi l'influence d'autres facteurs (climat, sylviculture).

DÉTERMINATION DE L'INDICE SUR LE TERRAIN

Choix de l'emplacement

Avant l'implantation de l'étude, s'assurer par quelques sondages à la tarière que les cailloux apparaissent à une profondeur homogène. Si ce n'est pas le cas (calcaires avec poches de sol profond), l'importance relative des zones à sol superficiel et à sol profond doit être évaluée avant d'opter pour 1 ou 2 fosses d'étude.

Prélèvements et mesure des cailloux

Une fosse carrée de 50 x 50 cm est ouverte jusqu'à la profondeur à laquelle on rencontre un lit de cailloux qui semble a priori constituer un obstacle important pour les racines. Compte-tenu des résultats mentionnés dans les paragraphes précédents (et sauf objectif particulier), on ne calcule généralement pas l'indice π si ce niveau apparaît au-delà de 60 cm.

A la profondeur choisie, les éléments grossiers sont prélevés sur une profondeur de 10 cm. Chaque caillou est classé dans un type de forme et mesuré (précision du centimètre). Ses dimensions (L, l, e) sont notées selon le modèle du *tableau 4*.

Tableau 4 - Mesures des cailloux effectués sur le terrain (une fiche par type de forme, une ligne par caillou).

Table 4 - *In situ measurement on stones (a table per shape type, a line per stone)*.

STATION :					
Type de forme :	O	Sh		O	Si
	L	l	e	LI	Le
Somme					
Nombre total de cailloux					

Détermination de l'indice de contrainte

Selon la profondeur à laquelle se situe le niveau retenu pour l'étude, les calculs à effectuer sont différents. Nous traiterons séparément les deux cas possibles : niveau compris entre la surface et 30 cm ou niveau compris entre 30 et 60 cm.

Niveau situé entre la surface et 30 cm

Pour les cailloux Sh on calcule les produits $L \times e$ et leur somme (surface totale dans le plan vertical ou $LeSh$) et les produits $L \times l$ et leur somme (surface totale dans le plan horizontal ou $LlSh$)

Pour les cailloux Si on calcule la somme des épaisseurs e (eSi) et les produits $L \times l$ comme ci-dessus (lSi).

Chacun des résultats obtenus, comparé aux valeurs-seuils (*tableau 3*) permet d'obtenir un indice (π_1, π_2 ou *). On ne retient que le plus contraignant. Si les quatre indices obtenus sont notés ", on recommence l'étude à un niveau plus profond (quand la pierrosité augmente avec la profondeur).

Niveau situé entre 30 et 60 cm

Dans ce cas, on peut être amené à faire une démarche en deux étapes successives.

Dans la première, on effectue pour les cailloux Sh le calcul de la somme des épaisseurs e (eSh) ainsi que les produits $L \times l$ et leur somme ($LlSh$). Pour les cailloux Si, sont calculés la somme des épaisseurs e (eSi) ainsi que les produits $L \times e$ et leur somme ($LeSi$). Si les quatre valeurs obtenues situent la contrainte dans la zone notée ", cela signifie que cette contrainte ne s'exerce pas sur le système de surface mais surtout sur le niveau de ramification des pivots.

On passe alors (deuxième étape) à la zone inférieure du *tableau* en utilisant les mêmes paramètres, sauf l'épaisseur eSh , remplacée par le nombre de cailloux de forme Sh.

A chaque étape, on ne retient que l'indice π le plus contraignant.

Niveau situé au delà de 60 cm

A partir de 60 cm de profondeur, la présence d'un obstacle à l'enracinement a des conséquences réduites sur le développement racinaire et l'alimentation de l'arbre. Il n'est pas indispensable de faire une étude fine de la pierrosité. Si toutefois cela s'avère utile, on suit la même démarche que ci-dessus, avec les paramètres correspondants (*tableau 3*).

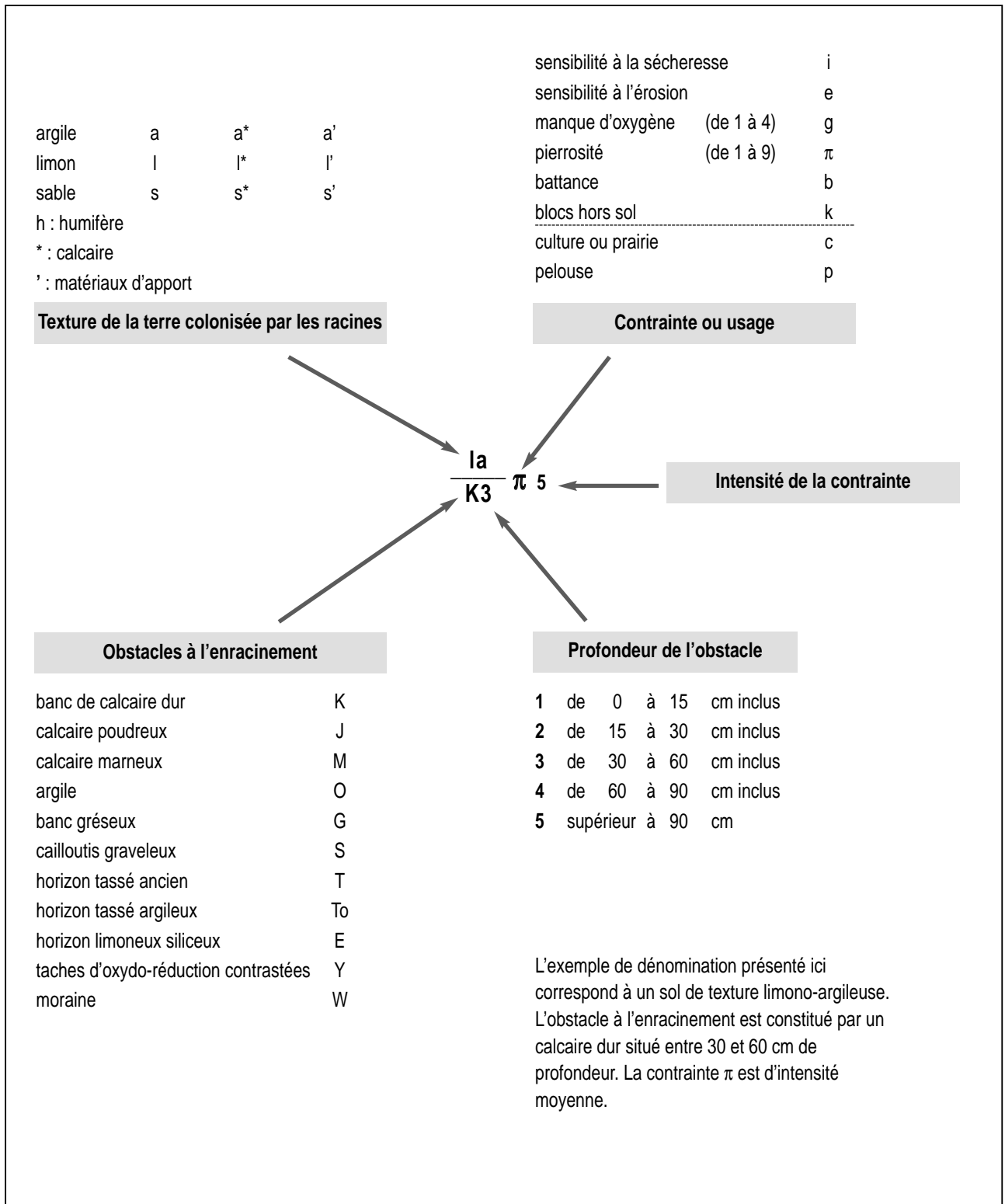
Désignation du sol par le sigle morpho-édaphique

(*figure 6*)

Dans le système de désignation des sols mis au point par Bruckert (1989) en milieu agricole, les caractères morphologiques du profil sont utilisés pour caractériser l'aptitude du sol à la colonisation racinaire. Le premier critère pris en compte est le caractère aéré ou anoxique, qui détermine les qualités de porosité nécessaires à la pénétration des racines. Le deuxième est la profondeur disponible au-dessus de l'obstacle physique

Figure 6 - Principes et abréviations de la méthode de désignation des sols (Sigle Bruckert) adaptée au domaine forestier sur sols caillouteux en Franche-Comté.

Figure 6 - Principles and abbreviations of soil designation method (Sigle Bruckert) adapted to stony forest soils in Franche-Comté.



(roche) ou physico-chimique (horizon anoxique) limitant l'enracinement, critère lié à la réserve en eau. En troisième lieu sont prises en compte des données texturales et les contraintes particulières comme la sensibilité au tassement, à l'érosion ou à la sécheresse. Ces observations sont exprimées sous forme d'une fraction ou "sigle" :

$$\text{Sigle} = \frac{\text{Texture}}{\text{Obstacle/Profondeur}} \quad \text{Aération/Contraintes}$$

A partir des données climatiques et pédologiques régionales, les profondeurs nécessaires pour assurer les besoins en eau des cultures avaient été estimées par Bruckert à 4 classes dont les seuils se situaient à 20, 35 et 60 cm. En milieu forestier, compte tenu de nos observations sur le développement des racines en sol sans contrainte et en sol caillouteux, nous proposons 5 classes dont les seuils sont situés à 15, 30, 60 et 90 cm. La figure 6 résume les abréviations utilisées régionalement dans le sigle. Lorsque les cailloux affleurent à la surface, la profondeur est notée 0-1. Dans le cas des lapiaz, la présence de blocs qui s'élèvent au-dessus de la surface du sol est notée k au niveau des contraintes (latéralement). Les indices c (culture ou prairie de fauche) et p (pelouse ou pâture) servent à indiquer l'usage agricole actuel des sols destinés à être boisés. Leur mode d'utilisation est souvent un bon indicateur de la valeur des sols. La liste des abréviations n'est ni exhaustive, ni limitative et se prête à toutes les adaptations imposées par un contexte géologique ou pédologique différent.

CONCLUSION

Le présent travail avait pour objectif de quantifier par des données objectives les difficultés de développement des racines des arbres dans les milieux à forte pierrosité.

L'étude des enracinements a permis de mettre en évidence certains aspects du comportement des racines, intéressants à la fois d'un point de vue fondamental et appliqué. La profondeur de ramification des pivots est identique chez le chêne et le sapin et se situe vers 90 cm dans un sol sans contrainte. Les réactions des racines sont très différentes selon la forme du caillou, c'est à dire selon l'importance de sa surface horizontale par rapport à ses faces inclinées. Cette observation - qui a pu être quantifiée - rejoint les constatations effectuées sur le terrain quant à la nocivité des calcaires en plaquettes horizontales, comparée à celle des cailloux désordonnés des éboulis. Elle justifie également les travaux de sous-solage, dont un des effets est de créer des surfaces inclinées à partir de cailloux horizontaux lités.

La prise en compte des critères pédologiques utilisés dans le sigle (aération - anoxie, profondeur d'enracinement, équilibre textural) et des contraintes majeures associées, conduit à une évaluation objective de l'aptitude d'un sol à la production forestière. Les critères retenus contribuent à exprimer

prioritairement le volume total de terre poreuse, aérée et meuble mis à la disposition du système racinaire. Cette quantité de terre fine n'apparaît pas limitée seulement par le volume occupé par les cailloux (paramètre peu significatif) mais aussi par la contrainte que ces derniers opposent en fonction de leur morphométrie à la progression des racines vers des couches profondes théoriquement prospectables. Or le volume effectivement mis à la disposition de l'arbre constitue non seulement la source de nutriments mais aussi le réservoir d'eau utile. Connaissant les exigences des écosystèmes forestiers vis à vis du régime hydrique des sols (Badot *et al.*, 1994 ; Lucot *et al.*, 1995) et l'implication des stress hydriques dans les phénomènes de "déperissements forestiers" (Badot *et al.*, 1990 ; Badot, 1991), il apparaît que cette donnée est la première à prendre en compte dans les aménagements sylvicoles. L'évaluation objective de la contrainte de pierrosité par l'indice π se révèle un outil simple et efficace de gestion des sols à vocation forestière de l'est de la France.

REMERCIEMENTS

Cette étude a été réalisée grâce au soutien financier du Conseil Régional de Franche-Comté et à l'aide technique du Centre Régional de la Propriété Forestière de Franche-Comté, de l'Office National des Forêts et de P.M. Badot.

BIBLIOGRAPHIE

- Atger C., 1991 - L'architecture racinaire est-elle influencée par le milieu ? In : L'arbre. Biologie et développement. éd. C Edelin, Naturalia Monspelienca n° h.s., 71-84.
- Badot P.M., 1990 - L'état sanitaire des forêts comtoises. In : Les hommes et la forêt en Franche-Comté, P. Gresser, A. Robert, C. Royer, F. Vion-Delphin eds, éditions Bonnetons, Paris, 42-43.
- Badot P.M., 1991 - Sécheresse, pollution atmosphérique et déperissement de l'Epicéa dans le massif jurassien. Rev. For. Franç., XL2, 27-31.
- 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. Paris, Sciences de la vie, 317, 341-345.
- Bailly G., 1986 - Catalogue des types de stations forestières des plateaux calcaires de Haute-Saône. Ministère de l'Agriculture - Conseil Régional de Franche-Comté, 315 p.
- Bardet J.G., 1976 - Bocage et remembrement. Forêt privée, n°109 - mai-juin, p. 11. In HEINRICH J.C., 1976. Les chablis, analyse mécanique du phénomène et moyens de prévention. AFOCEL, n°2.
- Belgrand M., 1983 - Comportement de jeunes plants feuillus (chêne pédonculé, chêne rouge, chêne sessile, hêtre) sur substrat ennoyé. Adaptations racinaires. Thèse INA-PG, 188 p.

- Bouchon J., 1987 - État de la recherche relative aux dégâts forestiers dus aux tempêtes. Rev. forest. fr., 39 (4), 301-312.
- Bruckert S., 1989 - Désignation et classement des sols agricoles d'après des critères de situation et d'organisation : application aux terres franco-comtoises du domaine climatique tempéré semi-continental. Agronomie, 9, 353-361.
- Cailleux A., Tricart J., 1959 - Initiation à l'étude des sables et galets. Tomes I, 2, 3.
- Callot G., Chamayou H., Maertens C., Salsac L., 1983 - Les interactions sol-racine, incidence sur la nutrition minérale. INRA éd., 325 p.
- De Champs J., 1987 - Mesures sylvicoles préventives (contre les chablis). Rev. forest. fr., 39 (4), 313-322.
- Forristall F., Gessel S.P., 1985 - Soil properties related to forest cover type and productivity on the Lee forest, Snohomish County, Washinton. Soil Science Society Proceedings of America, 19, 384-389.
- Fraser A.J., 1962 - Soil and roots as factors in tree stability. Forestry, 35 (2), 117-127.
- Gaiffe M., Bruckert S., 1991 - Déterminisme paléocologique des écosystèmes actuels du Haut-Jura en relation avec la fracturation des roches. Ann. Sci. For., 48, 575-591.
- Gras R., 1994 - Sols caillouteux et production végétale. INRA - Ed., 175 p.
- Hidlebaugh A.R., 1984 - Use and survey information to determine extent and effect of rock fragments on productivity. In Erosion and productivity of soil containing rock fragments. SSSA Special publication, n°13, 7-12.
- Köstler J.N., Bruckner E., Bibelriether H., 1968 - Die Wurzeln der Waldbäume. Verlag Paul Parey, Hamburg, 284 p.
- Levy G., 1968 - Importance du sol pour l'enracinement de *Picea excelsa*. Ann. Sci. forest., 25 (3), 157-188.
- 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 de Pédologie, Besançon, 170 p.
- Lucot E., Bruckert S., 1992 - Organisation du système racinaire du chêne pédonculé (*Q. robur*) développé en conditions édaphiques non contraignantes (sol lessivé colluvial). Ann. Sci. For., 49, 465-479.
- Lucot E., Gaiffe M., 1995 - Estimation quantitative et qualitative de la contrainte "cailloux" pour les systèmes racinaires de Chêne (*Quercus robur* L et *Q. petraea* (Matt) Liebl) et de Sapin (*Abies alba* L). Can. J. Soil Sci., soumis.
- Lucot E., Badot P.M., Bruckert S., 1995 - Influence de l'humidité du sol et de la distribution des racines sur le potentiel hydrique du xylème dans des peuplements de Chêne (*Quercus sp.*) de basse altitude. Ann. Sci. For., 52, 173-182.
- McMinn R.G., 1963 - Characteristics of douglas fir root systems. Can. J. Bot., 41, 105-122.
- Paget D. 1992. Catalogue des types de stations forestières des Avant-Monts jurassiens. Ministère de l'Agriculture - Conseil Régional de Franche-Comté, 232 p.
- Pritchett W.L., 1979 - Properties and management of forest soils. Jhon Wiley and Sons, New York, 491 p.
- Riedacker A., 1978 - Étude de la déviation des racines horizontales ou obliques issues de boutures de peuplier qui rencontrent un obstacle : applications pour la conception de conteneurs. Ann. Sci. forest., 35 (1),