

Volume 1

SEC 2008

Symposium International Sécheresse et Constructions

International Symposium Drought and Constructions

Avec le parrainage de / *Under the auspices of*

Ministère de l'Écologie, de l'Énergie, du Développement Durable
et de l'Aménagement du Territoire

Fédération Française du Bâtiment
Fédération Nationale des Travaux Publics
Agence Qualité Construction

Comité Français de Géologie de l'Ingénieur et de l'Environnement
Comité Français de Mécanique des Roches
Comité Français de Mécanique des Sols

Marne-la-Vallée, 1 – 3 septembre 2008 / 1 – 3 September 2008



UNE POMPE BIOLOGIQUE PERFORMANTE : CONTRIBUTION DES RACINES FINES D'ARBRES FORESTIERS DANS LE DESSÈCHEMENT DES COUCHES ARGILEUSES DE SOL LORS D'ÉPISODES DE SÉCHERESSE

AN EFFICIENT PUMP :CONTRIBUTION OF FINE ROOTS OF FOREST TREES IN CLAY LAYER DRYING OUT DURING DROUGHT EVENTS

Marion ZAPATER, Cédric BARLET, Yves LEFÈVRE, André GRANIER, Nathalie BRÉDA
UMR 1137 Ecologie et Ecophysiologie Forestière, INRA Nancy, Champenoux, France

RÉSUMÉ – Le comportement de sept espèces d'arbres forestiers a été étudié en condition de sécheresse, dont la distribution racinaire sur un sol qui présente une accumulation d'argile à 50 cm de profondeur. Les espèces les moins affectées par la sécheresse sont celles, comme le chêne, capables de coloniser les horizons enrichis en argile, et d'en extraire une partie de l'eau en période de déficit hydrique estival.

ABSTRACT – Seven forest tree species were studied under drought conditions (water loss regulation and root distribution). Soil was characterized by an enriched clay-layer at 50 cm depth. The species the less affected by the drought, like oak trees, were able to develop into the clay layer and uptake water in this horizon during summer soil water deficit.

1. Introduction

Les scénarios de changements climatiques prévoient une augmentation de la fréquence et de l'intensité des épisodes de sécheresse en Europe (Schär et al., 2004 ; Alcamo et al., 2007). On considère qu'une sécheresse débute lorsque la quantité d'eau dans le sol disponible pour les arbres n'est plus suffisante pour assurer des échanges gazeux optimums, ce qui implique une fermeture stomatique, provoquant une diminution de la transpiration des arbres, et par là-même, une réduction de leur croissance (Hinkley et al., 1981).

Les différentes espèces d'arbres répondent de manière contrastée à la sécheresse. Cela se traduit par différentes stratégies d'utilisation de l'eau : certaines espèces réduisent drastiquement leur perte en eau en fermant précocement leurs stomates, alors que d'autres maintiennent de forts niveaux de transpiration et conservent une croissance significative. Ces différences de régulations sont elles-mêmes étroitement liées à la capacité de la plante à extraire l'eau du sol, via son système racinaire (Levitt, 1980 ; Bréda et al., 2006), prolongé sous forêt par un réseau mycélien associé (mycorhizes) augmentant la surface d'absorption.

La distribution verticale de l'enracinement est principalement contrainte par les caractéristiques physiques du sol (teneur en argile, cailloux, densité des horizons...) et leurs conséquences sur la dynamique de l'eau (nappe temporaire) (Kramer, 1983 ; Bréda et al., 1995 ; Bengough, 2003 ; Bréda et al., 2006). Ainsi, la capacité de certaines espèces d'arbres à coloniser des horizons plus ou moins denses leur permet d'absorber de l'eau en profondeur en cas de sécheresse.

Les objectifs de ce travail sont :

- (i) déterminer la distribution racinaire de sept espèces d'arbres forestiers en fonction des contraintes du sol (racines fines et racines de plus gros diamètre) ;
- (ii) relier cet enracinement à la physiologie de l'arbre notamment en période de déficit hydrique ;
- (iii) mettre en évidence le lien entre comportement des différentes espèces en condition de sécheresse et dessèchement des couches de sol argileuses.

2. Matériel et méthodes

2.1. Site expérimental

Cette étude a été menée dans un jeune peuplement forestier du Nord Est de la France (Hesse, 57, N 48° 40' 27"; E 7° 03' 53", altitude 295 m, Parcelle 215), issu de régénération naturelle. L'âge des arbres varie entre 15 et 25 ans. Le peuplement est constitué de différentes espèces à feuilles caduques, à savoir de la plus représentée à la moins représentée : hêtre (*Fagus sylvatica*, noté Fs), charme (*Carpinus betulus*, noté Cb), chênes (*Quercus petraea* noté Qp et *Quercus robur*, noté Qr), saule (*Salix caprea*, noté Sc), bouleau (*Betula pendula*, noté Bp), tremble (*Populus tremula*, noté Pt) et merisier (*Prunus avium*, noté Pa). La hauteur moyenne des arbres est de 9 m. Le tableau I présente les caractéristiques dendrométriques des arbres étudiés.

Tableau I. Caractéristiques des arbres étudiés

Species	Abréviation	Circonférence (cm)	Hauteur (m)	Distance tree-trench wall (cm)	Profondeur (cm)
<i>Betula pendula</i>	Silver birch	Bp	57,3	12	20
<i>Populus tremula</i>	Aspen	Pt	55,2	16,7	45
<i>Salix caprea</i>	Goat willow	Sc	43,3	8,7	44
<i>Prunus avium</i>	Wild cherry	Pa	56	12,4	65
<i>Quercus robur</i>	Pedunculate oak	Qr	22,7	7,2	30
<i>Carpinus betulus</i>	Hornbeam	Cb	21,1	7,3	27
<i>Fagus sylvatica</i>	European beech	Fs	30,8	9,3	52

Le climat se caractérise par des précipitations moyennes annuelles de 820 mm et une température annuelle moyenne de 9,2°C.

Le substratum géologique est une altérite sur grès et silts de la zone moyenne argileuse du Muschelkalk inférieur (carte géologique de Sarrebourg, 1/50000, BRGM, 1968). Le sol est un néoluvisol mésosaturé à caractère rédoxique. La situation topographique est un haut de versant, faiblement incliné vers le Nord Ouest. Le sol présente un horizon d'accumulation d'argile (horizon BT) à structure polyédrique moyennement développée, avec des enrobements brun rouille, 10% de taches de décoloration peu contrastées et 7% de concrétions ferromanganiques. L'ensemble du profil est décarbonaté et présente un pH(eau) compris entre 4,5 et 4,9. La figure 1 présente les caractéristiques de densité du sol mesurée par gammamétrie et la granulométrie de la terre fine analysée en cinq fractions. Un changement textural et structural net apparaît à la transition avec l'horizon BT, avec de plus la présence de traces d'hydromorphie (taches de décoloration et d'oxydation) liée à la nappe temporaire.

2.2. Distribution des racines sur front de fosse

Des fosses (2,40 m de long, 0,75 m de large, 1,50 à 1,70 m de profondeur) ont été ouvertes à l'aide d'une mini-pelle mécanique en juillet 2006, à une distance variant selon l'accessibilité de 25 à 65 cm du tronc de l'arbre étudié. À cette distance de l'arbre, la fosse se situe dans la zone qui contient le maximum de racines (Thomas et Hartmann, 1998). Une prospection préalable a vérifié l'homogénéité du sol afin de choisir les arbres étudiés dans des zones présentant des caractéristiques pédologiques semblables. Les descriptions d'enracinement ont été réalisées entre juillet et septembre 2006 par cartographie d'impacts en deux dimensions sur front de fosses. La surface verticale d'observation (3,6 m² par arbre) a été préalablement décompactée à l'aide d'un couteau afin de mettre en évidence les impacts racinaires ; puis, chaque impact a été recensé selon une grille de maille de 100 cm² (Figure 2). Cinq classes de diamètre de racines ont été distinguées : fines (diamètre < 3 mm) ; moyennes (3-5 mm et 5-10 mm de

diamètre) et grosses racines (> 20 mm de diamètre). Toutes les racines de diamètre supérieur à 3 mm ont été mesurées individuellement au pied à coulisse.

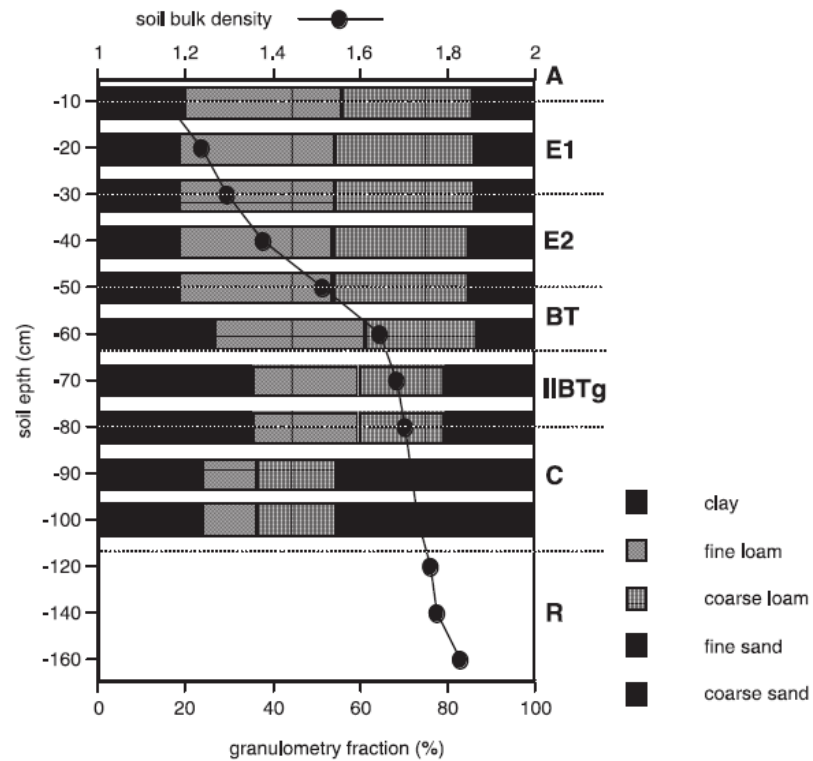


Figure 1. Granulométrie (5 fractions) et densité apparente du sol étudié avec délimitation des différents horizons pédologiques.



Figure 2. Comptage des impacts racinaires sur front de fosse

2.3. Dynamique saisonnière de teneur en eau du sol

La teneur en eau du sol a été mesurée périodiquement de 2000 à 2002 à l'aide de comptages neutroniques réalisés dans trois tubes d'accès de 1,60 m de profondeur au centre du dispositif. Une mesure complémentaire a été réalisée à la fin de l'été 2003. L'humidimètre utilisé est une sonde à neutrons (Nordisk Elektrisk Apparatfabrik, Danemark), les mesures sont réalisées tous les 10 cm jusqu'à 1 m de profondeur, puis tous les 20 cm. Les résultats sont exprimés en teneur en eau volumique grâce à un étalonnage par horizon et mesures de densité à l'aide d'un gammadensimètre (Pacific Nuclear Corp.TM, CPN Type 502).

2.4. Estimation de la sécheresse subie par les arbres

En fin de nuit, alors que la conductance stomatique foliaire est faible à nulle et que l'humidité de l'air est proche de la saturation, il y a équilibre des potentiels hydriques dans le système interface sol/racines-arbre. Ainsi, mesurer les potentiels hydriques des feuilles en fin de nuit, appelé potentiel hydrique de base, revient à estimer indirectement les potentiels hydriques du sol dans la zone la plus humide colonisée par le système racinaire (Aussenac et al., 1984). Plus le potentiel de base est négatif, plus la contrainte hydrique subie par l'arbre est importante. Les mesures de potentiels de base ont été réalisées au cours de la saison 2006 avec une chambre à pression de type Scholander (PMS instrument, Corvallis, Oregon, USA) sur des échantillons de feuilles prélevées en fin de nuit sur les arbres.

2.5. Densité de flux de sève

La densité de flux de sève brute¹ (sève ascendante) est une variable proportionnelle à la transpiration des arbres (Granier, 1985). Les flux de sève ont été enregistrés automatiquement à l'aide de fluxmètres radiaux à chauffage continu (Granier, 1987) reliés à une centrale d'acquisition. L'enregistrement a été poursuivi en continu au cours de la saison de végétation 2006 sur cinq des huit espèces présentes dans le peuplement (bouleau, saule, charme, chêne pédonculé, hêtre).

3. Résultats

3.1. Distribution des racines fines, lien avec le comportement des arbres en condition de sécheresse

Les cartographies racinaires (racines fines) des sept espèces forestières mettent en évidence des distributions contrastées. Certaines espèces (bouleau, saule et chêne) ont un enracinement plus profond et sont capables de coloniser les horizons riches en argile ; à l'opposé, l'enracinement d'autres espèces comme charme, hêtre, tremble et merisier (Figure 3) est bloqué au niveau de l'horizon argileux. La contrainte à l'enracinement est non seulement physique mais également liée à la contrainte hydrique par excès d'eau : le hêtre par exemple est connu pour ne pas supporter les conditions anoxiques ici présentent périodiquement suite à la formation d'une nappe temporaire au-dessus de l'horizon BT.

La capacité ou non à coloniser les horizons profonds, denses et argileux, peut être reliée au fonctionnement de l'arbre en condition de sécheresse, en particulier la réduction de la transpiration et le niveau de contrainte subie par les arbres (tableau II).

¹ La densité de flux de sève est le flux de sève par unité de surface conductrice

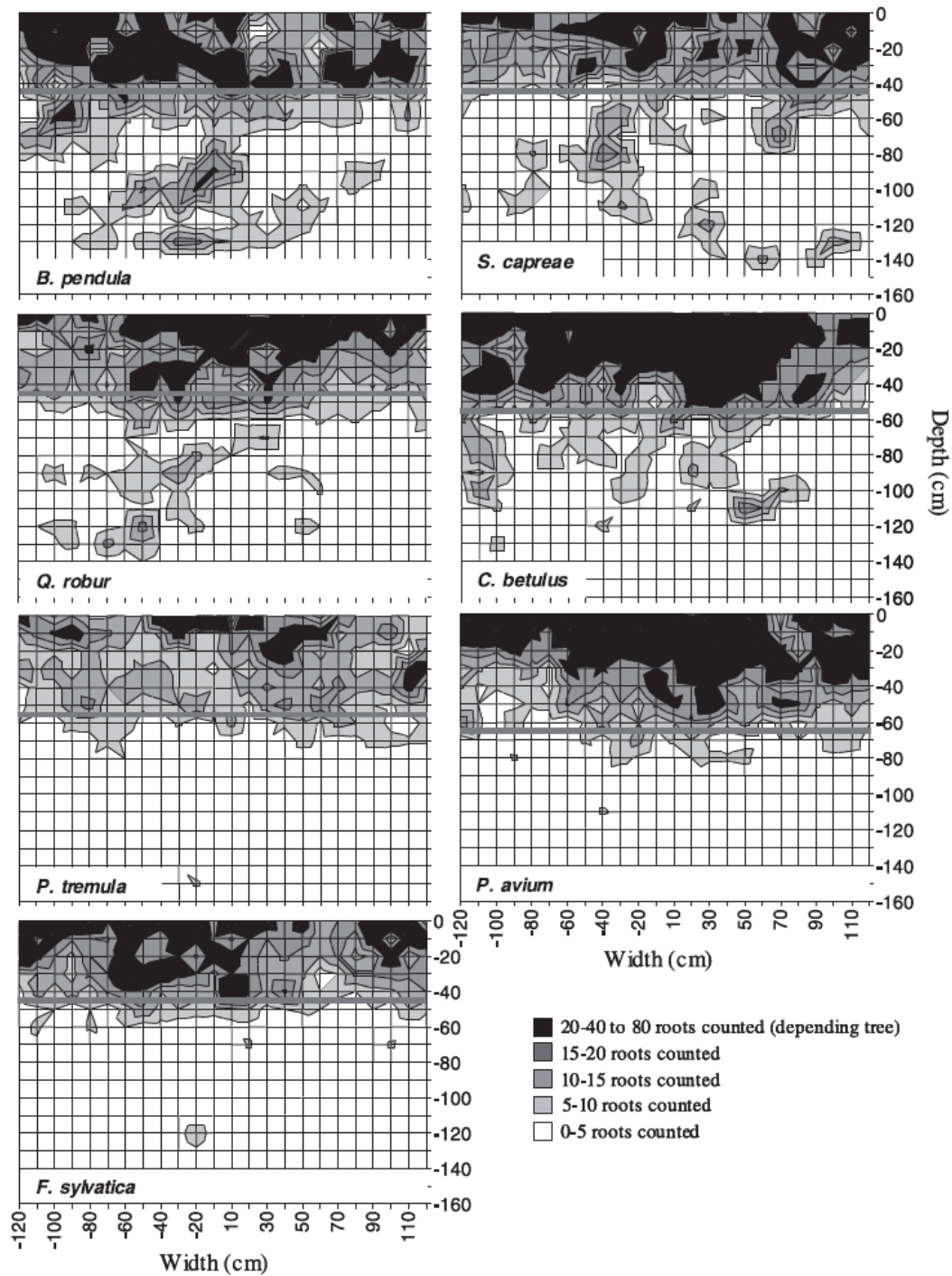


Figure 3. Cartographie racinaire des racines fines (diamètre < 3 mm) des sept espèces d'arbres forestiers étudiés in situ. Les lignes rouges représentent la limite supérieure de l'horizon BT. Les rectangles blancs représentent le plancher des fosses.

Tableau II. Diminution relative de la densité de flux de sève (DF) exprimée par rapport à son maximum (mesuré avant déficit hydrique du sol) et des potentiels hydriques de base au cours d'une sécheresse estivale (Jour 213, 31 juillet 2006).

Espèces	Diminution de la DF (%)	Potentiels de base (MPa)
Bouleau	85	-1.5
Saule	20	-1.4
Chêne p.	/	-0.8
Charme	65	-2.0
Hêtre	76	-2.0

On peut ainsi classer les espèces en trois catégories :

- (i) les espèces qui ont un système racinaire superficiel et qui diminuent fortement leur transpiration (charme et hêtre) et qui malgré cette régulation atteignent un potentiel hydrique de base très négatif ;
- (ii) les espèces qui ne réduisent pas leur flux grâce à un système racinaire profond (chêne pédonculé, saule) qui leur permet d'accéder à un plus grand réservoir en eau du sol et en conséquence de conserver des potentiels hydriques de base peu négatifs (faible contrainte hydrique) ;
- (iii) le bouleau qui, malgré un système racinaire profond réduit fortement sa transpiration. Cette espèce privilégie probablement le maintien de l'intégrité de son système vasculaire (évitement de la cavitation) aux dépens de la transpiration et donc de sa croissance ; une autre hypothèse pour expliquer ce comportement pourrait reposer sur des racines fines peu résistantes à la sécheresse, rapidement embolisées, ce qui entraînerait un taux élevé de mortalité et pénaliserait donc la transpiration.

3.2. Distribution des racines de plus gros diamètre

L'absorption de l'eau et des éléments minéraux se fait par les racines fines, souvent associées en forêt à des champignons mycorhiziens et leurs filaments. Les racines de plus gros diamètre, quant à elles, assurent une fonction d'ancrage de l'arbre dans le sol. Elles servent également de support à la régénération de racines de dimension moyenne, et sont de ce fait moins susceptibles de dessécher les couches de sol argileuses que les racines fines. Les grosses racines (> 1 cm), hormis chez le merisier, ne pénètrent pas ou très peu ces horizons argileux (Figure 4). Elles ne contribuent donc pas non plus à la structuration du sol et à la décompaction des horizons argileux denses.

Les mesures d'humidité du sol, réalisées à différentes dates au cours d'un cycle de dessèchement saisonnier, montrent des variations importantes de la teneur en eau volumique entre la capacité au champ et la teneur en eau minimale observée sur ce site fin août 2003 (Figure 5). Les limites des horizons pédologiques ont été reportées sur ces profils de dessèchement du sol. Une teneur en eau plus élevée est observée en début de saison au niveau de l'horizon BT. Jusqu'au 15 juin, les prélèvements d'eau par les racines s'effectuent presque exclusivement jusqu'à 80 cm de profondeur, le niveau le plus argileux. Lorsque l'été progresse, les prélèvements sont répartis sur tout le profil jusqu'à 1 m de profondeur. Lors de la sécheresse de 2003, un très important prélèvement est décelé dans l'argile (horizon C) jusqu'au fond du profil (couche R). Ce dessèchement a été attribué aux chênes, les autres espèces ayant à cette date arrêté leur transpiration (par régulation stomatique ou par chute anticipée des feuilles mesurées sur ce site (Bréda et al., 2006 ;, Zapater et al., in prep.).

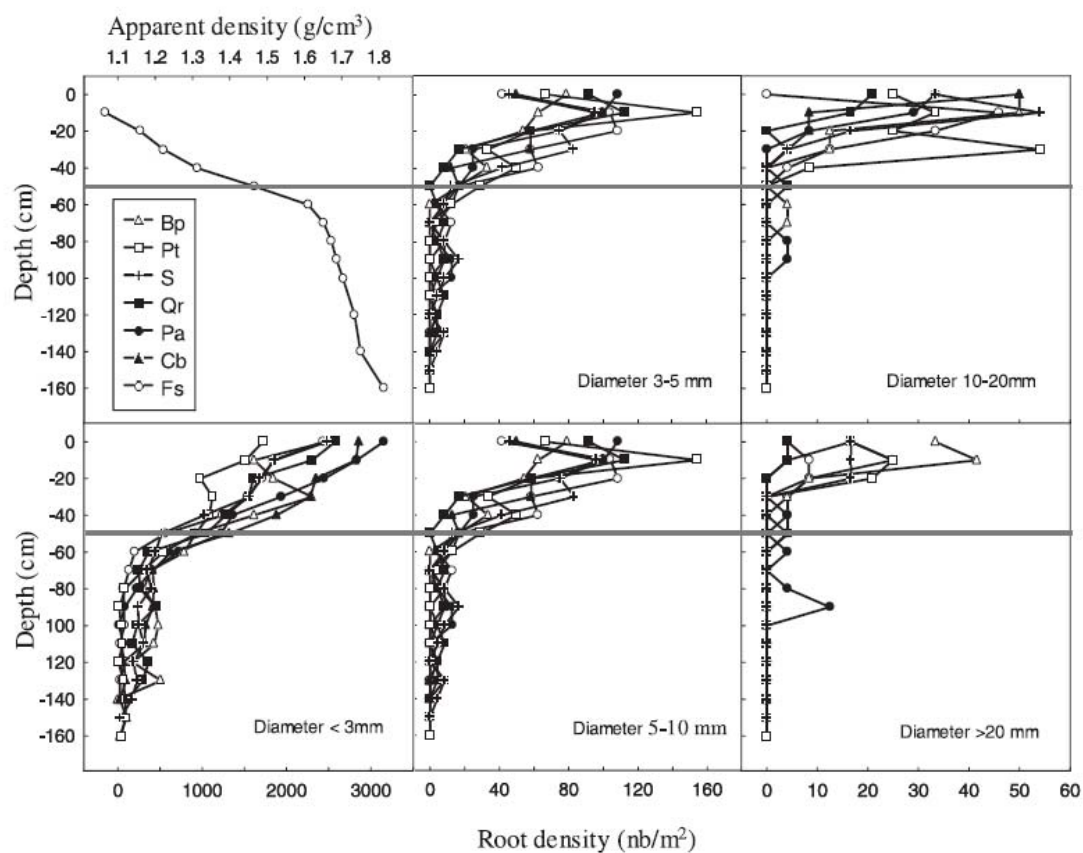


Figure 4. Profils racinaires (nombre de racines comptées par m² de sol en fonction de la profondeur) pour les différentes espèces et les différentes classes de diamètres. La ligne horizontale représente la limite supérieure de l'horizon BT. La densité apparente du sol est figurée dans le graphique en haut à gauche. Les espèces sont identifiées par leurs initiales (Tableau I). On note que les axes des densités racinaires sont différents entre les classes de racines, et très rapidement décroissants pour les racines > 3 mm.

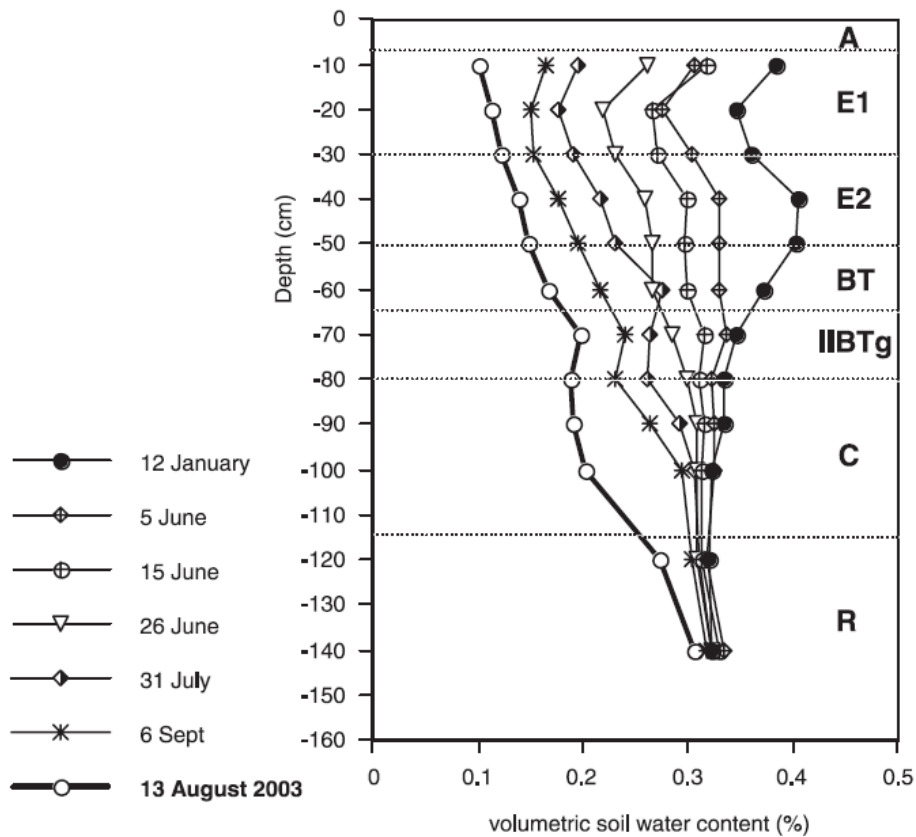


Figure 5. Profils de teneur en eau du sol (exprimée en humidité volumique) mesurés à différentes dates au cours d'un cycle de dessèchement saisonnier sur le site expérimental (année 2001). Le profil du 12 Janvier correspond à la capacité au champ, tandis que le profil de teneur en eau du sol le 13 août 2003 est le plus sec jamais observé sur le site.

4. Conclusions

Les différentes espèces d'arbres forestiers se caractérisent par des comportements contrastés en condition de sécheresse : certaines espèces, à enracinement peu profond, stoppent leur transpiration et leur croissance, alors que d'autres, qui présentent des proportions de racines fines non négligeables dans les horizons argileux, maintiennent leur transpiration. Dans cette étude, c'est le cas de deux espèces de chênes et du saule. Lorsque l'eau devient difficile à extraire dans les horizons supérieurs de sol, ces arbres sont capables d'assécher des horizons argileux de plus en plus profonds. La présence de ces espèces d'arbre sur un sol argileux est donc un facteur à prendre en compte dans l'analyse des risques de propagation de sécheresses géotechniques. À l'inverse, les grosses racines, plus liées à l'ancrage des arbres dans le sol qu'à l'absorption d'eau et de minéraux, sont généralement bloquées par les horizons argileux et n'interviennent donc pas dans leur dessèchement.

5. Références bibliographiques

- Alcamo J., Moreno J., Nováki B., Bindi M., Corobav R., Devoy R., Giannakopoulos C., Martin E., Olesen J., Shvidenko A. (2007) In *Climate change 2007: impacts, adaptation and vulnerability. Contribution of working group ii to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change*. Parry M., Canzani O., Palutikof J., van der Linden PJ, Hanson C. (Eds.), 541-580.
- Aussenac G., Granier A., Ibrahim M. (1984) Influence du dessèchement du sol sur le fonctionnement hydrique et la croissance du douglas (*Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco). *Acta Oecologia* 5 (19), 241-253.
- Bengough A. (2003) Root growth and function in relation to soil structure, composition, and strength. In *Root ecology*, de Kroon H.,Wisser E. (Eds.), 151-171.
- Bréda N., Granier A., Barataud F., Moyne C. (1995) Soil water dynamics in oak stand. i. soil moisture, water potentials, and water uptake by roots. *Plant and Soil* 172, 17-27.
- Bréda N., Lefèvre Y., Badeau V. (2002) Réservoir en eau des sols forestiers tempérés : spécificité et difficultés d'évaluation. La Houille Blanche, 3-2002, *Forêts et Eau*, 25-40.
- Bréda N., Huc R., Granier A., Dreyer E. (2006) Temperate forest trees and stands under severe drought: a review of ecophysiological responses, adaptation processes and long-term consequences. *Annals of Forest Science* 63, 625-644.
- Granier A. (1985) Une nouvelle méthode pour la mesure de flux de sève brute dans le tronc des arbres. *Annals of Forest Science* 42, 193-200.
- Granier A. (1987) Evaluation of transpiration in a douglas-fir stand by means of sap flux measurements. *Tree Physiology* 3, 309-320.
- Hinkley T., Teskey R., Duhme F., Richter H. (1981) Temperate hardwood forests. In *Water deficits and plant growth (vi)*. Koslowski (Ed.), 154-197.
- Kramer P. (1983) Developement of root system. In *Water relation of plants*. Kramer P. (Ed.) Academic Press, Inc., 147-186.
- Levitt J. (1980) Physiological ecology. Water, radiation, salt and other stresses. *Vol II: Water, Radiation, Salt and other stresses*. In: Kozlowski T. (Ed.) Academic Press, New York. 607p.
- Schär C., Vidale P., Lüthi D., Frei C., Häberli C., Liniger M., Appenzeller C. (2004) The role of increasing temperature variability in European summer heat waves. *Nature* 427, 332-336.
- Thomas F.M.,Hartmann G. (1998) Tree rooting patterns and soil water relations of healthy and damaged stands of mature oak (*Quercus robur* L and *Quercus petraea* [Matt] Liebl). *Plant and Soil* 203, 145-158.