

*Article paru dans*



**LA HOUILLE  
BLANCHE**

**REVUE INTERNATIONALE DE L'EAU**

## Réservoir en eau des sols forestiers tempérés : spécificité et difficultés d'évaluation

*Forest soil extractable water : specificity and estimation*

par Nathalie Bréda, Yves Lefèvre, Vincent Badeau

INRA, Institut National de la Recherche Agronomique, Centre de Nancy, Ecologie et Ecophysiologie Forestières,  
Equipe Phytoécologie, 54280 Champenoux  
Tél : 03 83 39 40 48, Fax : 03 83 39 40 22  
E-mail : breda@nancy.inra.fr

*The amount of water stored in soils and available to roots is among the most difficult but critical measurement to obtain. It's a key parameter for forest soil water balance and hydrology, at both local and regional scales. The estimation of extractable soil water is difficult and still subject of debate. Forest soils exhibited specific properties and constrains, like deep depths, contrasted soil layers, high carbon content, large amount of coarse elements... Forest trees themselves exhibited specific ability to extract water at very low soil water potentials. As a consequence, the extrapolation of agronomic evaluation of available water, established for annual plants and cultivated soils, to forest soils is discussed. Finally, the state of knowledge about soil extractable water in the French forest is presented and the lack of in situ observations is pointed out. It seems actually difficult to draw up a map of forest soils extractable water at national scale.*

Le sol agit comme un réservoir tampon entre l'atmosphère et les couches géologiques souterraines. Ses propriétés hydrodynamiques, en particulier sa capacité de rétention, caractérisent la **taille de ce réservoir** et ses dynamiques de vidage et de remplissage. Sa position d'interface confère au sol un rôle clé dans le cycle de l'eau, en contrôlant la production des écosystèmes forestiers et l'hydrologie.

Sous nos climats, l'apport d'eau au sol se fait sous forme de pluie, neige, rosée et brouillards. Toutefois, toute l'eau des précipitations (occultes ou directes) n'atteint pas les sols forestiers : sur une année, de 15 à 45 % des précipitations sont interceptées par les couverts, ce qui constitue une différence majeure avec les écosystèmes herbacés. Cette interception varie de quelques pourcents à 100 % selon l'intensité et le type d'événements (pluie continue ou intermittente, conditions d'évaporation...). A l'échelle annuelle, 15 à 30 % des précipitations sont interceptées chez les feuillus, contre 20 à 45 % chez les résineux [2]. L'eau qui atteint le sol ruisselle, s'infiltre et réhumecte le sol. La vitesse et la direction des flux sont déterminés par la nature et l'état du sol, la topographie, la lithologie. Les couverts forestiers évapotranspirent sous forme vapeur l'eau absorbée par les racines dans le sol. Enfin, une fraction réduite de l'eau incidente gagne la profondeur et alimente les nappes et les cours d'eau.

A l'échelle du peuplement forestier, deux interfaces clés régulent les flux d'eau entrant et sortant de l'écosystème [34] :

– à l'interface entre le peuplement et l'atmosphère, l'indice foliaire du couvert contrôle à la fois le flux d'eau entrant *via*

l'interception des précipitations et le flux de vapeur d'eau sortant sous forme d'évapotranspiration.

– à l'interface entre le peuplement et le sous-sol, le sol colonisé par les racines fournit l'alimentation hydrique et minérale des arbres, et alimente par ruissellement et drainage les nappes et les cours d'eau.

Si ces schémas généraux du cycle de l'eau et du bilan hydrique sont bien décrits, la quantité d'eau *stockée* dans les sols et accessible aux racines est l'un des paramètres les plus difficiles mais aussi les plus critiques à déterminer. En effet, tant la taille de ce réservoir que ses caractéristiques physico-chimiques conditionnant la circulation de l'eau affectent sensiblement les calculs de bilans hydriques et hydrologiques. Pour le forestier et sous un climat donné, le réservoir en eau du sol est aussi un des éléments clés de la productivité des écosystèmes, voir de la pérennité des arbres. L'objet de cette synthèse est de dresser un état des lieux des connaissances sur la définition du réservoir en eau du sol sous forêt, les moyens dont disposent les praticiens et les chercheurs pour le caractériser à différentes échelles d'espace (parcelle, bassin versant, région...) et de dynamiques temporelles, ainsi que les limites inhérentes aux particularités des sols forestiers.

### I ■ TENEUR EN EAU DU SOL ET ABSORPTION PAR LES RACINES

La teneur en eau volumique correspond à la fraction du volume du sol occupée par la phase liquide. Le volume d'eau dans la zone racinaire est équivalent au produit de l'humidité

volumique du sol par la profondeur d'enracinement. La porosité du sol est le rapport du volume des pores par unité de volume de sol. Lorsque l'humidité est de 100 %, tous les pores sont remplis d'eau et le sol est saturé. Dans la plupart des cas, la porosité du sol varie entre 30 et 60 %, selon la densité apparente, la texture, la teneur en matière organique et en éléments grossiers.

L'eau du sol effectivement disponible pour les arbres dépend en premier lieu de l'énergie avec laquelle elle est retenue et à l'inverse du potentiel nécessaire à son absorption. Le sol est un milieu poreux dans lequel l'eau est liée d'autant plus fortement que la taille des vides est plus petite.

L'absorption racinaire dépend de la surface absorbante, de la perméabilité des membranes (ces deux composantes étant souvent optimisées chez les arbres par la présence de mycorhizes) et surtout du gradient de potentiels hydriques entre les racines et le sol. Le potentiel hydrique du sol est la somme de plusieurs composantes, le potentiel gravitaire, le potentiel osmotique et le potentiel matriciel. Dans la plupart des sols forestiers, les concentrations en sels sont faibles et le potentiel matriciel est la composante la plus importante. Elle dépend de la taille des pores remplis d'eau. L'eau du sol peut être séparée en différentes fractions : une composante à drainage rapide qui occupe des pores > 50 µm de diamètre, une fraction disponible pour les plantes qui est localisée dans les pores de diamètre compris entre 0,2 et 50 µm (soit à un potentiel hydrique du sol compris entre -0,01 et -1,5 MPa), et une fraction non disponible contenue dans les pores de diamètre inférieur à 0,2 µm (eau liée ou eau d'adsorption). Lorsque le sol se dessèche, l'énergie nécessaire pour extraire l'eau augmente rapidement puisque l'eau la plus disponible dans les vides de grande taille est consommée en premier lieu.

En général, les arbres extraient l'eau du sol d'abord dans les horizons superficiels (où la densité racinaire est la plus forte), tant que l'eau y est faiblement liée (potentiel peu négatif). L'eau est ensuite progressivement extraite d'horizons de plus en plus profonds [42, 18], sauf si la surface du sol se réhumecte. La *figure 1* illustre la répartition des prélèvements d'eau par une jeune frênaie sur sol brun marmorisé au cours d'une saison. Au printemps, les frênes s'alimentent dans les 70 premiers cm du sol. Entre juin et juillet, l'eau provient de l'ensemble du profil, tandis qu'en fin d'été, toute l'alimentation est assurée par les horizons profonds, les plus humides à cette période, bien que colonisés par des racines fines uniquement et à très faible densité (environ 8 % des racines fines en dessous de 80 cm).

## II ■ PARTICULARITÉS DES SOLS FORESTIERS

Traditionnellement, les sols à fortes potentialités hydriques et chimiques ont été réservés aux grandes cultures [44]. À l'inverse, les forêts sont fréquemment reléguées sur des sols superficiels, souvent acides, chimiquement pauvres [5], et à forte teneur en éléments grossiers. De même, les situations topographiques rendant difficile toute exploitation mécanisée (pentes, zone mouilleuse...) ont été délaissées par l'agriculture au profit de la forêt. Cette différence d'occupation de l'espace par les forêts et les grandes cultures n'est pas sans conséquences sur l'extrapolation des connaissances agronomiques relatives au diagnostic du réservoir en eau du sol. Pourtant, ce n'est que récemment que les différences de propriétés physico-chimiques et hydrodynamiques selon l'occupation du

sol (cultures ou forêt) ont été mises en évidence [27] et clairement quantifiées [7, 12].

Les sols cultivés, amendés et travaillés, présentent un complexe d'échange saturé par le calcium, tandis que les sols forestiers sont plus acides [7, 36]. Les sols forestiers sont en général beaucoup moins homogènes que les sols agricoles travaillés, et les profondeurs d'enracinement des arbres forestiers peuvent varier de moins de quelques décimètres à plus de 10 m [39, 42]. L'extension en profondeur des systèmes racinaires forestiers permet aux arbres d'accéder à des volumes de sol et donc à des ressources en eau plus importantes que la plupart des autres types de végétation [23]. Sous forêt, des canaux naturels créés par les racines pérennes ou en décomposition, les galeries d'animaux ou encore les fentes de retrait lors de dessèchements sont des voies de circulation privilégiées de l'eau, permettant souvent un écoulement rapide en profondeur (drainage vertical) même si les horizons de surface ne sont pas saturés. Ces vides constituent une macroporosité difficile à quantifier, car elle est très variable dans l'espace et concerne des volumes de sol importants, supérieurs aux échantillons classiquement prélevés (décimétriques) pour caractériser les propriétés hydrodynamiques du sol.

La teneur en matière organique diffère nettement entre les sols forestiers et agricoles. Les teneurs en carbone les plus fréquentes dans les 60 premiers cm de sols agricoles sont de 12-14 g/kg contre 18-20 g/kg en forêt [7]. Ces auteurs soulignent que 69 % des sols agricoles présentent des teneurs en carbone inférieures à 20 g/kg, contre seulement 29 % des sols forestiers. De plus, certains horizons profonds peuvent localement présenter une accumulation de matière organique liée à un fort renouvellement de racines (limites d'horizons à contrainte mécanique et/ou hydrique, zone de rupture structurale...) Un taux de matière organique élevé dans les premiers horizons du sol diminue fortement sa densité apparente, ce qui conduit le plus souvent à des densités plus faibles sous forêt que sous culture. Bigorre [11] quantifie cet écart de densité entre sols cultivés et forestiers à 4 % en moyenne, ce qui conduit à une réserve utile de 20 % supérieure en sol forestier. Le modèle de prédiction de la densité apparente dans des sols podzoliques proposé [1] et appliqués dans des sols vosgiens [13] met en évidence la contribution de cette fraction organique et des différentes fractions minérales. Le taux de carbone dans le sol est la première variable explicative de la densité apparente [29], et particulièrement pour les horizons de surface (0-20 cm), dans une large gamme de type de sols sous hêtraies du nord est de la France. À l'échelle du territoire, utilisant 540 placettes françaises du réseau européen de suivi des dommages forestiers, la teneur en carbone explique plus de 55 % de la variance de la densité apparente entre horizons [5]. La pierrosité intervient aussi significativement dans l'explication des variations de densité mais contribue peu (4 %).

## III ■ CARACTÉRISATION THÉORIQUE DU RÉSERVOIR EN EAU DU SOL

Le sol peut être considéré comme une zone de stockage de l'eau (volume constitué par la porosité plus ou moins rempli par l'eau) ou comme un lieu de circulation. Selon le point de vue adopté, les descripteurs utilisés seront plutôt statiques (notions classiques de capacité au champ et point de flétrissement permanent) ou dynamiques en tenant compte des

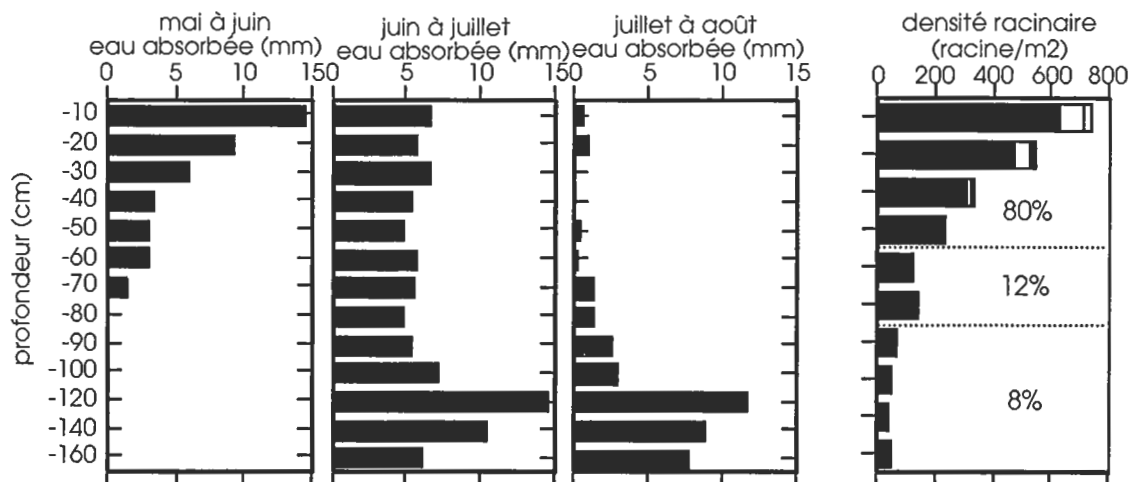


Figure 1 : Répartition des prélèvements d'eau le long d'un profil de sol sous frênaie au cours d'un dessèchement estival. L'eau absorbée est calculée à partir des variations d'humidité volumique par horizon, mesurées à la sonde à neutrons. La répartition des densités racinaires décrites sur fosses distinguent 4 classes de diamètre de racines (0-2 mm en noir, 2-5 mm en blanc, 5-10 mm et > 10 mm grisés). Les pourcentages de racines de 0-2 mm par grands horizons pédologiques sont indiqués. (Bréda, Lefèvre, Granier, données non publiées).

gradients de potentiels le long du trajet de l'eau dans le système (et en particulier à l'interface sol-racine).

Selon la définition classique, la réserve utile d'un sol correspond à la quantité d'eau maximale disponible pour la végétation. Elle est égale à la différence entre la teneur en eau du sol à la capacité au champ et celle au point de flétrissement permanent pour la tranche de sol considérée [45]. Cette définition fait appel à deux états caractéristiques de l'eau dans le sol, définis par des agronomes par une approche essentiellement statique, sur la fraction terre fine du sol. La réserve utile (RU, en mm) d'une couche de sol d'épaisseur  $e$  est calculée par :

$$RU = e * da * (H_{C_{APPA}} - H_{PFP}) * (100 - C)/100$$

$e$  = épaisseur du sol en dm

$da$  = densité apparente du sol ( $g.cm^{-3}$ )

$H_{C_{APPA}}$  = humidité pondérale à la capacité au champ en  $cm^{-3}.g^{-1}*100$

$H_{PFP}$  = humidité pondérale au point de flétrissement permanent en  $cm^{-3}.g^{-1}*100$

$C$  = pourcentage volumique d'éléments grossiers.

La capacité au champ correspond à la teneur en eau du sol après ressuyage, lorsque tout écoulement gravitaire a cessé. Cette teneur est étroitement liée à la constitution minéralogique et augmente avec le taux d'argile [22] et de matière organique. Elle ne peut théoriquement être déterminée qu'*in situ*. A défaut, on utilise une humidité équivalente à celle de la capacité au champ déterminée au laboratoire en soumettant un échantillon de sol à des potentiels hydriques compris entre 0,023 et 0,1 MPa ( $pF = 1,7$  à 3). Soulignons ici l'existence d'un débat autour de cette valeur de potentiel hydrique, en partie liée au fait que l'on cherche à caractériser un état hydrique transitoire (= dynamique) par une valeur fixe (= statique) de potentiel. De plus, historiquement, ces valeurs ont été établies sur des échantillons de sol séchés à l'air et tamisés à 2 mm, ce qui a pour conséquence de détruire la porosité structurale du sol (porosité inter- et intra-agrégats, porosité biotique). Il a en outre été proposé d'adapter la pression d'extraction de l'eau au laboratoire à la texture de l'échantillon lorsqu'on procède sur échantillon remanié [15] ( $pF = 3$

sur argile,  $pF = 2,5$  sur limons et  $pF = 2$  sur sables). En revanche, sur échantillon non remanié, la teneur en eau à la capacité au champ est proche de celle déterminée à une pression de 0,01 MPa ( $pF = 2$ ) et ceci quelque soit la texture [21]. Cette même conclusion a été retrouvée pour trois sols forestiers argileux [40]. Une pression de 0,1 MPa ( $pF = 3$ ) [9] ou de 0,03 MPa ( $pF = 2,5$ ) [40] a été recommandée. La teneur en eau à la capacité au champ est proche mais souvent supérieure à la teneur en eau à 0,03 MPa ( $pF = 2,5$ ) quelque soit la texture du sol [21, 43]. Au final et devant ces difficultés de mesure indirecte au laboratoire, on peut préférer une méthode de suivi du contenu en eau du sol *in situ* (par gravimétrie, par suivi neutronique ou en réflectométrie dans le domaine temporel), afin d'approcher la contenance maximale du réservoir d'eau que constitue le sol (fig. 2).

Le point de flétrissement permanent correspond au potentiel hydrique à partir duquel les racines ne peuvent plus extraire d'eau. Il est compris entre -1,5 et -2,5 MPa selon les conditions de dessèchement et les plantes. Au laboratoire, il est déterminé en soumettant un échantillon de sol à une pression de 1,5 MPa ( $pF = 4,2$ ). Cette valeur est communément admise pour les plantes cultivées [8] et a aussi été retrouvée pour des semis forestiers (Aussenac, comm. pers.). Cependant, des profils hydriques sous différentes cultures (soja, luzerne, maïs) font parfois apparaître une exploitation du réservoir en eau du sol à une humidité très inférieure au point de flétrissement [28]. De même, les arbres forestiers tolèrent des dessèchements de sol plus intenses et sont souvent capables d'extraire de l'eau d'un sol à potentiel plus négatif. Ainsi, le potentiel hydrique de base (potentiel de l'arbre mesuré en absence de transpiration et pouvant être considéré comme une mesure indirecte du potentiel hydrique du sol dans ses couches les plus humides) a atteint en 1976 des valeurs de -1,6 MPa chez le Douglas et le Pin sylvestre, de -1,7 MPa chez le Pin noir, et -2,0 MPa chez l'épicéa [3]. Au Mont Ventoux lors d'une année sèche, des potentiels hydriques de base inférieurs à ce seuil de -1,5 MPa ont été mesurés chez des individus adultes de nombreuses espèces [4]: *Acer opulus*, *Buxus sempervirens*, *Cedrus atlantica*,

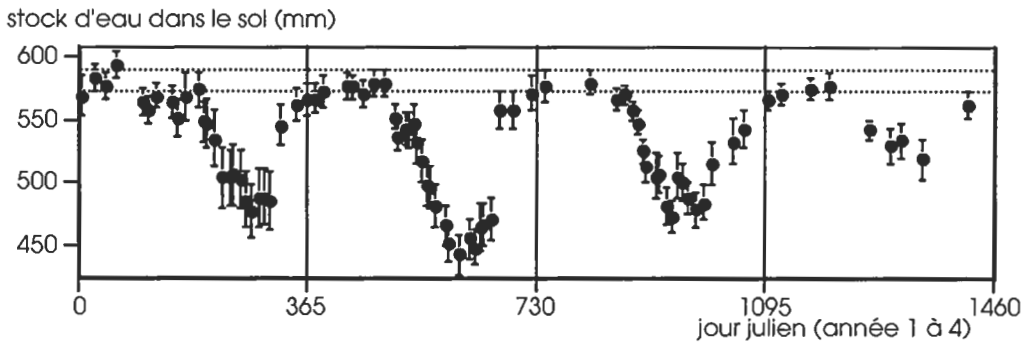


Figure 2 : Exemple de variations du stock d'eau entre 0 et 160 cm quantifiés par mesures neutroniques sous châenaie. Les traits pointillés représentent les limites entre lesquelles la capacité au champ est comprise (d'après [17]) Cette manière d'estimer l'état hydrique du sol à capacité au champ a été appelée « méthode des paliers » [28].

*Pinus nigra*, *Pinus sylvestris*, *Pinus uncinata*, *Quercus ilex* et *Quercus pubescens*. De même, des chênes sessiles dans l'Est de la France sont capables de maintenir une transpiration et une absorption d'eau lorsque le potentiel hydrique du sol (mesuré *in situ* dans différents horizons du sol) est compris entre  $-2,0$  et  $-2,5$  MPa (fig. 3) [18]. Le sol a pu fournir de l'eau aux arbres jusqu'à des potentiels hydriques bien plus négatifs de la valeur théorique de  $-1,5$  MPa, et ceci pendant une période s'étalant de mi-juillet à début octobre. Ce dessèchement intense et prolongé n'a provoqué aucune mortalité d'arbres. Cet exemple souligne que l'utilisation du potentiel théorique au point de flétrissement permanent tend à sous-estimer la quantité d'eau que peuvent extraire les chênes (dans cet exemple de 30 à 50 %).

Des dessèchements de sols en dessous du pF 4.2 ont été obtenus en conditions expérimentales sur de jeunes hêtres, là encore sans mortalité (Aussenac, comm. pers.). Il a aussi été observé que des semis de Cèdre se comportaient comme des plantes herbacées et mourraient à  $-1,6$  MPa, tandis que des individus de même origine quelques années plus tard supportaient des dessèchements de  $-5$  MPa sans mortalité (Aussenac, comm. pers.). Ainsi, pour les arbres forestiers adultes, la valeur du potentiel limite de survie ou d'extraction d'eau serait à établir non seulement en fonction des propriétés du sol mais aussi selon l'espèce considérée. Les écophysiolistes forestiers considèrent d'ailleurs cette aptitude à extraire de l'eau du sol à potentiel très négatif comme un des traits de résistance à la sécheresse des arbres, au même titre que une

régulation stomatique efficace ou qu'une faible vulnérabilité du système conducteur à la cavitation. Ces potentiels d'extraction et de survie restent toutefois insuffisamment décrits en conditions naturelles, puisque, comme nous l'avons souligné, l'extrapolation des connaissances acquises sur des semis aux individus adultes n'est pas possible.

#### IV ■ ESTIMATION OPÉRATIONNELLE DU RÉSERVOIR EN EAU DU SOL

Depuis longtemps, les agronomes ont proposé des méthodes simplifiées d'estimation du réservoir en eau du sol à partir de propriétés physico-chimiques de la terre fine. Une des difficultés premières est donc d'être capable d'évaluer les proportions volumiques de terre fine et d'éléments grossiers qui constituent le sol. Très souvent, la quantité d'éléments grossiers est appréciée visuellement, par grandes classes, en surface plutôt qu'en volume, sur les parois de fosses pédologiques. De plus, selon leur nature minéralogique et leur degré d'altération, ces éléments grossiers peuvent représenter un réservoir en eau accessible pour les arbres. On retiendra que les craies et calcaires marneux, les grès et silex altérés peuvent retenir entre 4 et 20 g d'eau pour 100 g de poids sec [8, 26, 35, 46] et qu'il n'est pas rare de voir des racines pénétrer dans ces cailloux altérés.

Une fois que cette fraction du sol occupée par les éléments grossiers a été estimée, la méthode dite « des textures » ne nécessite plus qu'une appréciation tactile ou par analyse de la granulométrie de la terre fine. Différentes tables (dont la plus

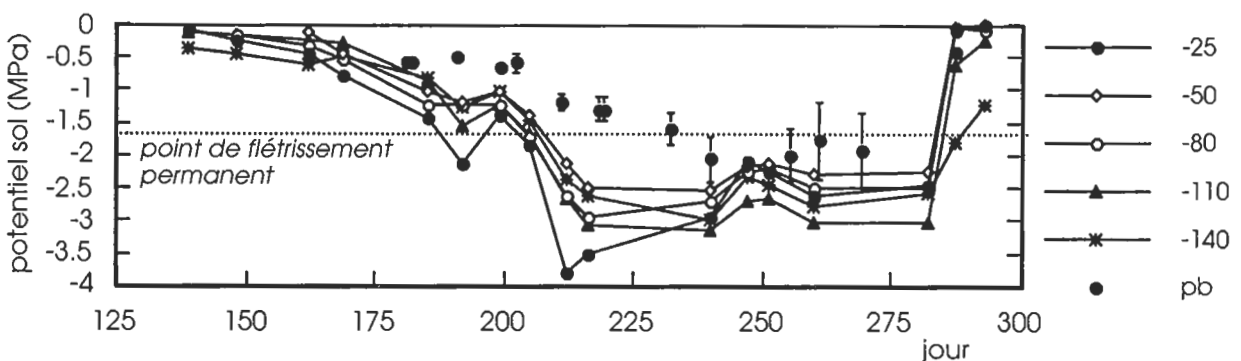


Figure 3 : Evolution du potentiel hydrique mesuré sous un sol forestier à 5 profondeurs à l'aide de micropsychromètres au cours d'un dessèchement saisonnier. Le potentiel de base moyen (pb) de chênes sessiles est représenté et montre des valeurs inférieures au potentiel théorique du point de flétrissement permanent (D'après [18]).

utilisée est celle des sols de l'Aisne, [37]) permettent ensuite d'attribuer pour chaque classe de texture un réservoir en eau unitaire (calculé comme la différence des humidités mesurées à pF 2,5 et 4,2), qu'il suffit de multiplier par l'épaisseur de chaque horizon [8]. Cette méthode, rustique, bien que fréquemment critiquée en raison de sa validité théoriquement limitée aux types de sols ayant permis d'établir les tables de conversion pour des sols agricoles, reste très couramment utilisée en raison de sa facilité de mise en œuvre. Si les valeurs absolues des réserves en eau ainsi estimées sont discutables eu égard aux différentes critiques énoncées précédemment, cette méthode est encore à ce jour la seule permettant un calcul homogène à partir de descriptions pédologiques standards. Cette méthode a en outre été adoptée pour estimer les réserves utiles des placettes RENECOFOR [20] et des placettes du réseau européen [5]. Les deux sources majeures d'erreur lors de ce type d'estimation sont les mauvaises appréciations d'une part de la profondeur de sol prospecté et d'autre part de la charge en éléments grossiers. Nous reviendrons sur la définition de la profondeur de prospection plus loin.

D'autres méthodes simplifiées ont été proposées sous forme de fonctions statistiques établies empiriquement entre la teneur en eau à un potentiel matriciel donné et certaines propriétés physico-chimiques du sol (composition granulométrique, densité apparente, teneur en matière organique ou en carbone, plus récemment capacité d'échange cationique). Ces fonctions, regroupées sous le terme générique de fonctions de pédotransferts [16], ont fait l'objet d'une récente synthèse [10, 11]. Toutefois, la quasi totalité de ces fonctions de pédotransferts ont été établies pour des sols agricoles et leur extrapolation aux sols forestiers se heurte à plusieurs difficultés :

- les teneurs en matière organique ou en carbone des sols forestiers sortent des gammes de calibrations de la plupart des fonctions de pédotransferts,
- les potentiels caractéristiques utilisés sont mal adaptés aux capacités d'extraction des arbres,
- pour une même composition granulométrique, les densités apparentes des sols forestiers sont plus faibles, en partie à cause de leur charge en matière organique
- enfin, les capacités d'échanges cationiques pour les sols forestiers sont souvent déterminées au pH du sol et non à pH standardisé à 7.

Devant ces difficultés, quelques travaux récents s'attachent à établir des fonctions de pédotransferts spécifiques pour sols forestiers. Sur les sols lorrains, deux études récentes conduites sur sols calcaires [12] et sur sols argileux décarbonatés [41] aboutissent à des conclusions contradictoires quant à la pertinence de la capacité d'échange cationique mesurée à pH standard ( $CEC_7$ ) pour prédire le contenu en eau du sol aux potentiels caractéristiques. Ainsi, la teneur en eau à pF 4,2 des sols sur plateau calcaire lorrain est correctement prédite par la  $CEC$  ( $pH = 7$ ,  $CEC_7$  comprise entre 10 et  $28,6 \text{ cmol}_c \cdot \text{kg}^{-1}$ ) quelque soit la texture, tandis que cette prédiction n'est pas possible pour les sols argileux décarbonatés analysés ( $CEC_7$  comprise entre 6 et  $11 \text{ cmol}_c \cdot \text{kg}^{-1}$ ). Dans ce dernier cas, la teneur en eau est mieux prédite par l'inverse de la densité apparente du sol. En effet, la densité apparente du sol, composante de sa porosité, permet d'appréhender sa teneur en eau à la capacité au champ [21].

Ainsi, la réserve en eau du sol, ou selon le terme anglophone plus explicite d'eau extractible (« extractable water »),

représente un volume d'eau compris entre deux limites, dont les définitions sont controversées et sans doute mal adaptées aux arbres forestiers. De plus, la définition de cette réserve pour les arbres se heurte à une autre difficulté : apprécier la profondeur à prendre en compte, c'est-à-dire l'épaisseur de sol colonisé par le système racinaire. Notons dès à présent qu'une partie sous-jacente du sol, bien que non prospectée, peut néanmoins contribuer à l'approvisionnement en eau des arbres par remontées capillaires depuis un horizon plus humide ou une nappe.

## V ■ ÉPAISSEUR DE SOL À PRENDRE EN COMPTE DANS L'ESTIMATION DU RESERVOIR EN EAU

Il s'agit là encore d'un point délicat particulièrement sous forêt. Une première approximation réalisée par les pédologues forestiers consiste à définir une profondeur d'enracinement « constante » par opposition à un profil d'enracinement agronomique en croissance. Cette vision statique du système racinaire absorbant des arbres est sans doute inexacte, en particulier dans tous les sols hydromorphes dans lesquels les racines absorbantes profondes ne sont en croissance qu'à certaines périodes de l'année, lorsque le niveau d'engorgement du sol s'abaisse. Il semble donc, sous forêt aussi, important de définir une profondeur d'enracinement potentielle, même si cette profondeur n'est pas atteinte toute l'année. La profondeur potentielle se définit, par antithèse, par la présence d'obstacle de nature mécanique, hydrique ou chimique. Il peut s'agir d'un horizon pédologique asphyxiant, massif, induré, carbonaté ou de la roche mère non altérée. Là encore, une sensibilité différentielle des espèces forestières à ces contraintes peut intervenir. La *figure 4* illustre la distribution des racines de chênes sessiles en fonction de la profondeur, comparativement à la distribution des éléments grossiers. Le sol (fersialsol sableux caillouteux) présente une induration calcaire qui constitue un obstacle mécanique à la pénétration des grosses racines, mais colonisé par les racines fines malgré une charge en éléments grossiers de 80 % [19]. On retrouve d'ailleurs une augmentation des racines fines dans les couches profondes du sol, là où le calcaire et la matière organique issue de la décomposition des racines annuelles améliorent les capacités de rétention en eau. De plus, ces éléments grossiers altérés et revêtus d'un encroûtement calcaire présentent une réserve en eau utilisée par les racines [46].

L'observation directe des distributions de racines est fastidieuse, d'autant que les racines pertinentes pour l'absorption d'eau sont les racines fines, profondes donc nécessitant l'ouverture de grandes fosses. Toutefois, des approches indirectes permettent d'appréhender les zones d'alimentation hydrique des arbres et leurs évolutions possibles en cours de saison, ou encore les différences de volume de sol exploités par des individus ou espèces différentes. Par exemple, dans une jeune hêtraie, un sol argileux où la densité apparente et le degré d'hydromorphie varient rapidement, une différence de profondeur d'extraction d'eau par les arbres de un ou deux mètres a été mise en évidence par des profils de dessèchement du sol [33] : ceci conduit à une réserve utile de 130 mm ou de 205 mm.

Un autre cas de figure se rencontre lorsque les racines atteignent une nappe permanente : la transpiration n'est pas limitée par les capacités de rétention en eau du sol et dépend

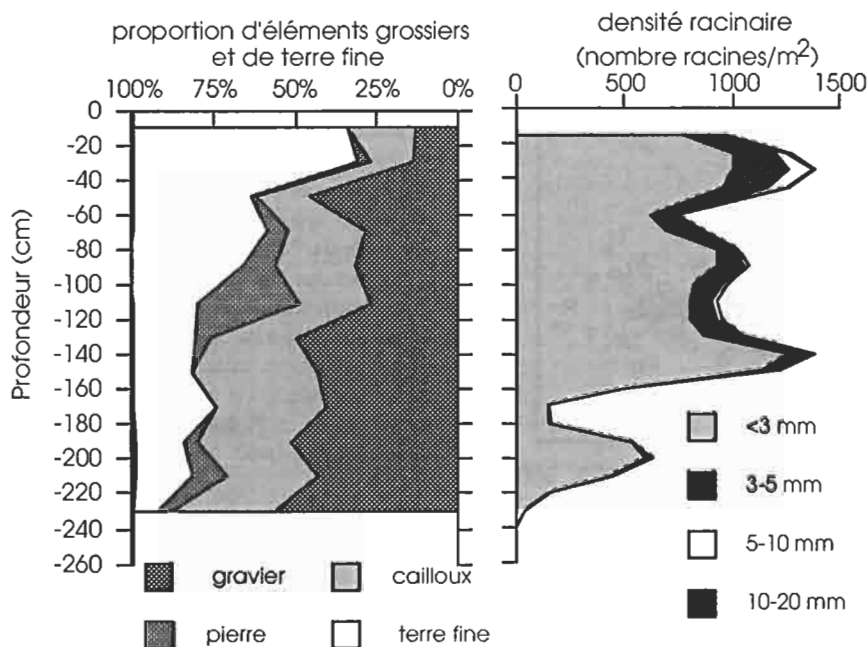


Figure 4 : Distribution en fonction de la profondeur de la terre fine et des différentes fractions d'éléments grossiers sur un ferralsol sableux caillouteux (à gauche). Distribution des racines de chênes sessiles par classe de diamètre en fonction de la profondeur (à droite). D'après [19].

uniquement de l'évapotranspiration potentielle et de l'indice foliaire du peuplement. La mesure du potentiel hydrique de base des arbres permet de vérifier si les arbres utilisent de telles ressources profondes. Si tel est le cas, une incohérence est observée entre les potentiels hydriques de base des arbres et du sol de surface, typiquement pris en compte dans un calcul de bilan hydrique [24] : le potentiel hydrique des arbres est maximal, indépendamment de l'état hydrique du sol. L'absence de diminution de transpiration des arbres alors que le sol se dessèche indique aussi l'accès à une ressource en eau plus profonde que la couche de sol prise en compte. Ainsi, lorsque le sol superficiel est desséché, une forêt alluviale composée de chênes pédonculés et de frênes assure jusqu'à 60 % de sa transpiration à partir de la nappe [25]. De la même manière, la composition en isotopes stables de l'oxygène (18O/16O) et de l'hydrogène (2H/1H ou D/H) mesurée dans le flux de sève brute des cerneaux est un indicateur du type de ressource en eau utilisée par les arbres [30]. En particulier, il est possible de distinguer grâce à des signatures isotopiques différentes entre une alimentation à partir d'une eau de surface (pluie des précipitations en cours de saison) ou d'eau profonde (nappe essentiellement reconstituée par des pluies hivernales, la fonte des neiges). Toujours en utilisant des traceurs isotopiques sur sol podzolique ennoyé, l'alimentation hydrique du pin sylvestre est assurée à partir de l'horizon Bh tandis que l'épicéa s'alimente à partir de la surface [14].

## VI ■ RÉSERVE UTILE À L'ÉCHELLE DE LA FRANCE : OUTILS DISPONIBLES POUR LES SOLS FORESTIERS

À l'échelle du territoire, le Service d'Etude des Sols et de la Carte Pédologique de France a proposé différentes cartes thématiques, directement dérivées d'une spatialisation de données mesurées (carte des textures par exemple) ou dérivées de règles d'expertises et de fonctions de pédotransferts

telle que la carte du réservoir en eau du sol. Cette carte a été établie à partir de la cartographie des sols au 1 : 1 000 000 et des propriétés de nombreux sols, pour l'essentiel agronomiques [38]. La réserve en eau correspond au stock d'eau théorique capable d'être retenu par le sol entre l'humidité au point de flétrissement et l'humidité à la capacité au champ. L'évaluation est effectuée ici pour 1,40 m de profondeur de sol sauf dans le cas où un obstacle aux racines apparaît à une profondeur moindre. Pour chaque unité typologique de sol, les estimations sont calculées à l'aide d'un enchaînement de règles d'expertise utilisant les informations présentes dans une base de données « sols » (type de sol, texture, matériau parental, etc.). Des regroupements sont effectués par grande unité cartographique afin de représenter sur la carte la classe de réserve en eau dominante [38]. Cette carte fait apparaître une gamme de réserve utile comprise entre moins de 50 mm jusqu'à plus de 130 mm.

Toutefois, la comparaison des valeurs de cette carte avec celles estimées par la méthode des textures sur des sols forestiers montrent une forte incohérence, avec une gamme de réserve utile plus large pour les estimations des placettes forestières (fig. 5). Les raisons pouvant expliquer les différences sont nombreuses : la profondeur de sol utile, sauf contrainte apparente, est de 1,4 m pour la carte de France et de 2 m pour les placettes du réseau forestier [5]. Par ailleurs, les fonctions de pédotransferts agronomiques et la méthode des textures ne sont pas toujours cohérentes, d'autant moins ici que les textures ont été appréciées sur le terrain au toucher par différents pédologues. De plus, sur les sols forestiers décrits, la charge en éléments grossiers a été évaluée visuellement par grandes classes.

Dans ce type d'approche visant à estimer l'eau disponible à partir des cartes pédologiques à l'échelle régionale, les erreurs sont associées à l'utilisation de fonctions de pédotransferts et à l'utilisation de données standard de sols (texture, densité,

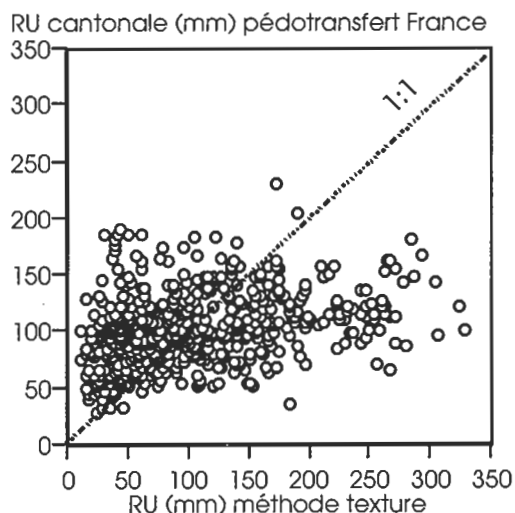


Figure 5 : Relation entre la réserve utile du sol des 540 placettes françaises du réseau européen de surveillance de l'état sanitaire des forêts, estimée à partir des descriptions de sol sur fosse et utilisation de la méthode des textures, et la réserve utile du canton correspondant issue de la carte du Service d'Etude des Sols (INRA-Orléans), à partir de fonctions de pédotransferts.

taux de C) à la place de données mesurées [32]. Si les textures dérivées des cartes de sol au 1:100 000 sont relativement proches de celles mesurées (10 et 15 %), l'erreur sur la prédiction de la profondeur utile de sol est beaucoup plus importante (40 à 100 %) car elle ne dépend pas uniquement du type de sol.

Outre des caractérisations fines réalisées *in situ* et en laboratoire sur quelques sites ateliers instrumentés, les estimations de réserves utiles forestières disponibles à ce jour à

l'échelle de la France sont issues des réseaux de placettes de surveillance de l'état sanitaire des forêts et de suivi des écosystèmes forestiers (540 placettes de niveau I et 103 placettes de niveau II RENECOFOR). Sur ces deux réseaux, les réserves ont été évaluées par la méthode des textures appliquée à des descriptions pédologiques sur fosses, avec ou sans analyse granulométrique, avec ou sans prise en compte de la densité apparente du sol. La profondeur de calcul a été par l'arrêt de l'enracinement observé *in situ*. Cependant dans la plupart des fosses décrites (de profondeur non standardisée), des racines ont été observées jusqu'au fond du profil. Dans ce cas et à défaut de caractéristiques générales de l'enracinement par espèce, les calculs ont été arrêtés par convention à 2,0 m de profondeur. On constate dans les deux cas que les réserves évaluées sont globalement supérieures à la gamme de la carte de France, avec toutefois une forte variabilité, de 40 à 200 mm.

Dans ces deux réseaux, il s'agit d'estimations ponctuelles et, actuellement, il n'est pas raisonnablement envisageable d'en extraire une carte spatialisée de RU « forêt ». En effet, avant d'envisager ce type d'exercice, des règles générales doivent être dégagées et validées en fonction des grands types de sol et par classe de substrat géologique, par essence etc... Ce travail reste entièrement à faire pour la forêt.

La distribution des réserves utiles en fonction de l'essence fait apparaître des valeurs plus fortes (autour de 175 mm) pour les peupleraies, chênaies pédonculées, frênaies, tandis que les sols à plus faibles réserves sont occupés par des résineux et des espèces sempervirentes (fig. 6). Ce type de classement par espèce est présenté ici pour illustrer la gamme de réserve utile estimée, et reflète globalement l'autécologie des essences sans pour cela avoir une quelconque valeur prédictive.

Par ailleurs, le classement des placettes selon ce gradient de réserve utile, dont la pertinence d'estimation a été discutée précédemment, est cohérent avec d'autres indicateurs d'ali-

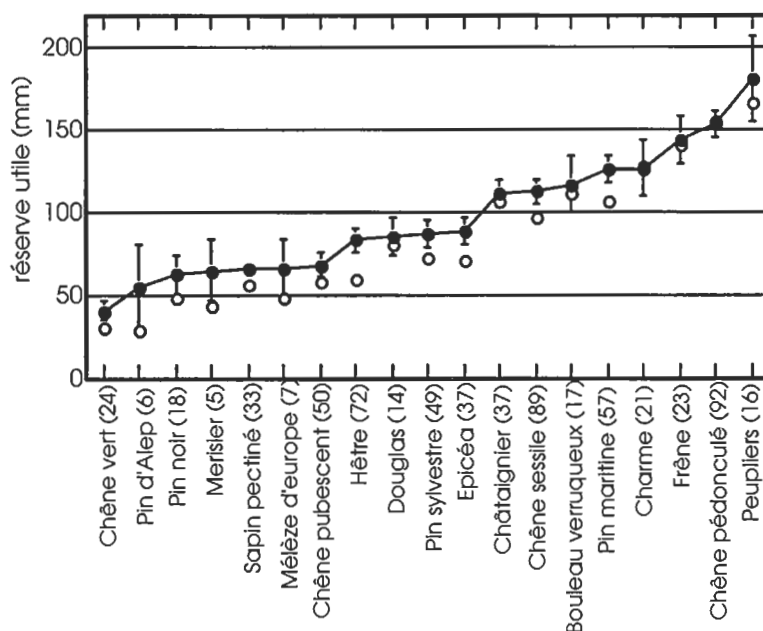


Figure 6 : Réserve utile moyenne (points noirs) et médiane (points blancs) pour les essences forestières représentées dans les 540 placettes françaises du réseau européen de surveillance de l'état sanitaire des forêts (effectif de placettes indiqué entre parenthèses, erreur standard figurée) D'après [6].



mentation hydrique disponibles sur ces mêmes placettes. Par exemple, la caractéristique indicateur de la flore forestière a permis de calculer pour chaque placette un paramètre de qualité de l'alimentation hydrique (Coefficient « F » d'Ellenberg, [31]). La réserve utile et le coefficient F moyens par types de sols évoluent conjointement et permettent un classement relatif des sols cohérent [5].

## VII ■ CONCLUSIONS

Si le réservoir en eau du sol apparaît donc bien comme un paramètre essentiel du bilan hydrique et hydrologique des écosystèmes forestiers, il demeure particulièrement difficile à mesurer, estimer ou prédire. La distribution de la porosité, la densité apparente, les propriétés physico-chimique et l'épaisseur utile sont les déterminants essentiels du réservoir en eau du sol, aussi difficiles à caractériser et variables dans l'espace les uns que les autres. Il en résulte une forte imprécision sur l'estimation de la réserve en eau du sol.

Les particularités des sols forestiers contribuent à cette difficulté, et n'autorisent pas sans précaution une simple transposition des notions acquises sur sols agricoles. La connaissance du comportement écophysologique des arbres forestiers en relation avec la disponibilité en eau dans les sols a fourni un certain nombre d'arguments quant aux capacités d'extraction de l'eau par les arbres. Toutefois, ceci n'est pas actuellement intégré dans l'évaluation de la réserve en eau des sols forestiers. Des recherches fondamentales sont encore nécessaires dans ce domaine (potentiels hydriques des sols et des arbres, profondeurs d'alimentation en eau...). Parallèlement, les recherches en sciences du sol devraient se poursuivre pour améliorer nos capacités de prédiction des propriétés de rétention en eau par les sols, à partir de propriétés physico-chimiques. Les sciences du « sol forestier » ont clairement accumulé un retard dans ce domaine et les tentatives réalisées à ce jour ont souligné l'importance des singularités et contraintes spécifiques des sols forestiers. Cette prise de conscience des particularismes des sols forestiers et de leur incidence sur le réservoir en eau du sol est relativement récente. Les premiers travaux d'inventaire de l'état des sols forestiers, réalisés dans le cadre des réseaux de surveillance de l'état sanitaire des forêts, ont largement contribué à cette prise de conscience et à la construction de base de données « sol-forestier ». Bien qu'actuellement peu de groupes en France travaillent sur cette question, la caractérisation systématique et précise des réservoirs en eau des sols forestiers mérite un investissement spécifique, tant sur le plan de la quantification *in situ*, et de la recherche que de la poursuite des inventaires.

## BIBLIOGRAPHIE

- [1] ADAMS (1973). — The effect of organic matter on the bulk and true densities of some uncultivated podzolic soils. *J. of Soil Sci.*, 24, 10-17.
- [2] AUSSENAC G. (1981). — L'interception des précipitations par les peuplements forestiers. *La Houille Blanche*, 7-8, 531-536.
- [3] AUSSENAC G., GRANIER A. (1978). — Quelques résultats de cinétique journalière du potentiel hydrique de sève chez les arbres forestiers. *Ann. Sc. For.*, 35, 19-32.
- [4] AUSSENAC G., VALETTE J.C. (1982). — Comportement hydrique estival de *Cedrus atlantica* Manetti, *Quercus ilex* L. et *Quercus pubescens* Willd. et de divers pins dans le Mont Ventoux. *Ann. Sci. For.*, 39, 41-62.
- [5] BADEAU V. (1998). — Caractérisation écologique du réseau européen de suivi des dommages forestiers. Bilan des opérations de terrain et premiers résultats. Les Cahiers du DSF, 5-1998, *Min. Agri. Pêche*, D.E.R.F., Paris 211 p. (ISSN 1270-9417).
- [6] BADEAU V. (1999). — Etude des relations entre l'état sanitaire des peuplements forestiers et les conditions de l'environnement. Premier résultats de l'analyse spatio-temporelle de la partie française du Réseau Européen de Suivi des Dommages Forestiers. Ministère de l'Agriculture et de la Pêche, Direction de l'Espace Rural et de la Forêt, Département de la Santé des Forêts, INRA Commission Européenne, DG VI.
- [7] BADEAU V., DAMBRINE E., WALTER C. (1999). — Propriétés des sols forestiers français : résultats du premier inventaire systématique. *Etude et Gestion des Sols*, 6, 165-180.
- [8] BAIZE D. (2000). — Guide des analyses en pédologie. INRA Eds, Paris, 2<sup>e</sup> édition, 257 p.
- [9] BAIZE D., JABIGL B. (1995). — Guide pour la description des sols. INRA Eds, Paris, 375 p.
- [10] BASTET G. (1999). — Estimation des propriétés de rétention en eau des sols à l'aide de fonctions de pédotransfert : développement de nouvelles approches. Thèse de Doctorat, Université d'Orléans, 193 p.
- [11] BASTET G., BRUAND A., QUÉTIN P., COUSIN I. (1998). — Estimation des propriétés de rétention en eau des sols à l'aide de fonctions de pédotransfert (FPT) : une analyse bibliographique. *Etude et Gestion des Sols*, 5, 7-28.
- [12] BIGORRE F. (2000). — Influence de la pédogénèse et de l'usage des sols sur leurs propriétés physiques. Mécanismes d'évolution et éléments de prévision. Thèse Doctorat, Université Henri Poincaré Nancy I, 148 p.
- [13] BIRON P. (1994). — Le cycle de l'eau en forêt de moyenne montagne : flux de sève et bilans hydriques stationnels (Bassin Versant du Strengbach à Aubure, Hautes Vosges). Thèse Université Louis Pasteur, Strasbourg, 244 p.
- [14] BISHOP K., DAMBRINE E. (1995). — Localization of tree water uptake in Scots pine and Norway spruce with hydrological tracers. *Can. J. For. Res.*, 25, 286-297.
- [15] BONNEAU M. (1961). — Evaluation au laboratoire de la capacité au champ en fonction de la texture. *Bull. AFES*, 8, 16-26.
- [16] BOUMA J., VAN LANEN H.A.J. (1987). — Transfer function and threshold values: from soil characteristics to land qualities. 106-111. In Beck K.J., Nurrrough P.A., McCormack D.E. (Eds) Proc. ISSS/SSSA workshop on quantified land evaluation procedures, 27/04-2/05/1986, Washington, D.C. *Int. Inst. For Aerospace Surv. and Earth Sci. Publ.* n° 6, Enschede, the Netherlands.
- [17] BRÉDA N. (1994). — Analyse du fonctionnement hydrique des chênes sessile (*Quercus petraea*) et pédonculé (*Quercus robur*) en conditions naturelles : effets des facteurs du milieu et de l'éclaircie. Thèse de Doctorat, Université Henri Poincaré, Nancy, 59p + publications.
- [18] BRÉDA N., GRANIER A., BARATAUD F., MOYNE C. (1995). — Soil water dynamics in an oak stand. I. Soil moisture, water potentials and water uptake by roots. *Plant and Soil*, 172, 17-27.
- [19] BRÉDA N., PEIFFER M. (1999). — Dépérissement forestier en vallée du Rhin : Etude du bilan hydrique des chênaies de la forêt domaniale de la Harth (Haut-Rhin) et impact des épisodes de sécheresse sur la croissance radiale des chênes. Programme INTERGEG II. Rapport final convention ONF-INRA, juillet 1999, 60 p.
- [20] BRÉTHES A., ULRICH E. (1997). — RENECOFOR – Caractéristiques pédologiques des 102 peuplements du réseau. Office National des Forêts ed., Département des Recherches Techniques, ISBN 2 – 84207 – 112, 3, 573 p.
- [21] BRUAND A., DUVAL O., GAILLARD H., DARTHOIT R., JAMAGNE M. (1996). — Variabilité des propriétés de rétention en eau des sols : importance de la densité apparente. *Etude et Gestion des Sols*, 3, 1, 27-40.
- [22] BRUAND A., TESSIER D., BAIZE D. (1988). — Contribution à l'étude des propriétés de rétention en eau des sols argileux : importance de la prise en compte de l'organisation de la phase argileuse. *C.R. Acad. Sci.*, Paris 307, Série II, 1937-1941.

- [23] CANADELL J., JACKSON R. B., EHLERINGER J. R., MOONEY H. A., SALA O. E., SCHULZE E. D. (1996). — Maximum rooting depth of vegetation types at the global scale. *Oecologia*, 108, 583-595.
- [24] CERMAK J., HUZULAK J., PENKA M. (1980). — Water potential and sap flow rate in adult trees with moist and dry soil as used for the assessment of root system depth. *Biol. Plant.*, 22, 31-41.
- [25] CERMAK J., PRAX A. (2001). — Water balance of a Southern Maravian floodplain forest under natural and modified soil water regimes and its ecological consequences. *Ann. For. Sci.*, 58, 15-29.
- [26] COUTADEUR C., COUSIN I., NICOLLAUD B. (2000). — Influence de la phase caillouteuse sur la réserve en eau des sols. *Etude et Gestion des Sols*, 7, 191-205.
- [27] DROOGERS P., BOUMA J. (1997). — Soil survey input in exploratory modeling of sustainable soil management practices. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 61, 1704-1710.
- [28] DUCHAUFOR P., BONNEAU M., SOUCHIER B. (1979). — Pédologie. 2. Constituants et propriétés du sol. Masson, Paris, 459 p.
- [29] DUPOUEY J. L., THIMONIER A., BEHR P. (1997). — Variations de la densité des sols des hêtraies du nord-est de la France en relation avec leurs caractéristiques physico-chimiques. *Etude et Gestion des Sols*, 4, 43-52.
- [30] EHLERINGER J. R., DAWSON T.E. (1992). — Water uptake by plants : Perspectives from stable isotope composition. *Plant Cell and Environment*, 15, 1073-1082.
- [31] ELLENBERG H., WEBER H.E., DOLL R., WIRTH V., WERNER W., PAULSEN D. (1991). — Zeigerwerte von Pflanzen in Mitteleuropa. *Scripta Geobotanica*, 18, Gottingen, 2<sup>e</sup> édition, 248p.
- [32] FORTIN M. C., MOON D. E. (1999). — Errors associated with the use of soil survey data for estimating plant-available water at a regional scale. *Agron. J.*, 91, 984-990.
- [33] GRANIER A., BIRON P., LEMOINE D. (2000). — Water balance, transpiration and canopy conductance in two beech stands. *Agricultural and Forest Meteorology*, 100, 291-308.
- [34] GRANIER A., BREDA N., BIRON P., VINILLE S. (1999). — A lumped water balance model to evaluate duration and intensity of drought constraints in forest stands. *Ecol. Model.*, 269-283.
- [35] GRAS R., MONNIER G. (1962). — Contribution des cailloux à la capacité de réserve en eau du sol. *C.R. Acad. Sci.*, 3422-3424.
- [36] JAMAGNE M. (1973). — Contribution à l'étude pédogénétique des formations loessiques du Nord de la France. Thèse Doc. en Sc. Agr. Fac. Gembloux, 475 p.
- [37] JAMAGNE M., BÉTRÉMBEUX R., BÉGON J. C., MORI A. (1977). — Quelques données sur la variabilité dans le milieu naturel de la réserve en eau des sols. *Bull. Tech. Inf.*, 324-325, 627-641.
- [38] JAMAGNE M., HARDY R., KING D., BORNAND M. (1995). — La base de données géographique des sols de France. *Etude et Gestion des Sols*, 2, 3, 153-172.
- [39] LUCOT E., BRUCKERT S. (1992). — Organisation du système racinaire du chêne pédonculé (*Quercus robur*) développé en conditions édaphiques non contraignantes (sol brun lessivé colluvial). *Ann. Sci. For.*, 49, 465-479.
- [40] PETERSEN G.W., CUNNINGHAM R. L., MATFISKI R. P. (1968). — Moisture characteristics of Pennsylvania soils : Moisture retention as related to texture. *Soil Sci. Am. Proc.*, 32, 271-275.
- [41] QUENTIN C., BIGORRE F., TESSIER D., GRANIER A., BREDA N. (2001). — Estimation de la réserve utile et du bilan hydrique de trois sols forestiers lorrains. *Etude et Gestion des Sols*, sous presse.
- [42] RAMBALL S. (1984). — Water balance and pattern of root water uptake by a *Quercus coccifera* L. evergreen scrub. *Oecologia*, 62, 18-25.
- [43] RATIÉ L. F., RITCHIE J. T., CASSEL D. K. (1983). — Field measured limits of soil water availability as related to laboratory measured properties. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 47, 770-775.
- [44] TESSIER D., BRUAND A., LE BUSSONNAIS Y., DAMBRINE E. (1996). — Qualité chimique et physique des sols. *Etude et Gestion des Sols*, 3, n° spécial, 119-244.
- [45] VIEHMEYER F. J., HENDRICKSON A. H. (1927). — Soil Moisture Condition in Relation to Plant Growth. *Plant. Physiol.*, Lancaster, 2, 71-72.
- [46] VOGT, T., MAROCKE, R. (1973). — Les encroûtements calcaires de la Hardt (Haute-Alsace) : genèse et évolution. *Sci. Geol. Bull.*, 26, 305-314.