

# Etude des sols de la Forêt de Hesse

(Lorraine)

Contribution à l'étude du bilan hydrique

C. Quentin<sup>(1)</sup>, F. Bigorre<sup>(1)</sup>, N. Bréda<sup>(2)</sup>, A. Granier<sup>(2)</sup> et D. Tessier<sup>(1)</sup>

(1) INRA Science du sol, 78026 Versailles

(2) INRA, Ecophysiologie forestière, 54280 Champenoux.

## RÉSUMÉ

Les sols de la forêt de Hesse (57) ont servi de support à une étude dont l'objectif principal est de déterminer des critères d'évaluation de la réserve en eau utile. A partir de la prospection de terrain, trois profils de brunisols oligosaturés polycycliques à caractère plus ou moins hydromorphe ont été retenus. Des analyses physico-chimiques et granulométriques ont été effectuées sur chacun des horizons. Des prélèvements sur cylindres et l'étude de la rétention de l'eau et de la porosité de mottes a été faite en laboratoire à différents potentiels de l'eau. Contrairement à d'autres exemples étudiés dans la littérature, dans les sols sous forêt étudiés, la teneur en eau des sols au point de flétrissement (-1 600 kPa) n'est reliée ni à la texture, ni à la nature des constituants minéraux. Les résultats des mesures de densité apparente de mottes centimétriques montrent que les horizons se distinguent avant tout par leur porosité totale ou son corollaire le volume massique. Ces derniers sont très bien corrélés à la teneur en eau à la capacité au champ et dans une moindre mesure à l'humidité au point de flétrissement.

Les résultats obtenus ont pu être confrontés à des données de terrain portant sur une chronique de trois années. La prise en compte de la densité apparente comme estimateur de la réserve en eau apparaît très satisfaisante afin d'établir une relation de pédotransfert. L'utilisation du modèle de bilan hydrique (BILJOUR) indique que les prédictions de consommation d'eau par la végétation sont inférieures aux mesures in situ de sondes à neutrons. Cependant le modèle rend bien compte des variations climatiques.

Au total ce travail montre l'intérêt de développer simultanément une approche de laboratoire et de terrain, combinée à une modélisation du bilan hydrique, ce qui permet d'analyser et de valider le choix des paramètres pris en compte pour approcher les propriétés des sols et améliorer des modèles de prédiction.

Mots clés

Sol, réserve utile, bilan hydrique, forêt

## SUMMARY

## TITREANGLAIS

The soils of the Hesse forest were used to determine criteria for an evaluation of the available water for plants. From a soil survey, three polycyclic oligosaturated profiles of brunisols, with a more or less hydromorphic character were studied. Physicochemical, granulometric and mineralogical analyses were carried out on each horizon. Cylinders were collected and clods were extracted for water retention and porosity measurements at various water potentials.

Contrary to other examples studied in the literature, in Hesse forest, the water content of the soils is connected neither to texture, nor with the nature of the mineral components. The results of bulk density measurements of centimetric clods show that the horizons are distinguished, above all, by their porosity or his corollary the bulk density. They are very well correlated with the water content at field capacity and to a lesser extent with moisture at the wetting point.

The results obtained could be confronted with data of bearing soil on a three year old chronicle. The taking into account of the apparent density as estimator of the available water content appears very satisfactory as an entry parameter for water balance model. The use of a water balance model (BILJOUR) indicates that the predictions of water consumption by the vegetation are underestimated compared with in situ measurements from neutronic probes. However the model accounts for the climatic variations rather well.

On the whole this work shows the interest simultaneously to develop an approach of laboratory and soil, combined with a modeling of water balance assessment, which makes it possible to analyze and validate the choice of the parameters taken into account to approach the properties of the soils and to improve of the models of prediction.

## Key-words

Soil, available water, water balance, forest

**A**u cours de l'histoire l'usage des sols a subi des évolutions considérables. Ainsi en moins de deux siècles, la surface forestière est passée de 10 % à environ 25 % du territoire français avec une évolution importante du volume de bois exploitable et de la composition des peuplements, notamment par l'introduction des résineux (Ministère de l'Agriculture, 1991).

Alors que sous culture la demande en eau peut être maîtrisée par l'irrigation, les forêts quant à elles sont sous l'influence directe des fluctuations climatiques. Or l'alimentation en eau des forêts contrôle une part importante de la production forestière, (Becker et Le Goff, 1988 ; Pritchett, 1979). De plus on sait que la demande en eau des forêts comme des cultures augmente, grosso modo, dans la même proportion que la production de carbone (Granier et al., 1995). La durée et l'intensité des épisodes de contraintes hydriques et par voie de conséquence la production de biomasse est alors directement dépendante de l'alimentation en eau de l'arbre pour laquelle la réserve hydrique des sols est prépondérante.

Durant ces dernières décennies, en raison du fort développement de l'agriculture, les propriétés de rétention en eau ont fait l'objet d'un grand nombre d'études sur des sols cultivés. L'analyse de ces propriétés étant coûteuse et difficile à mettre en œuvre, des recherches se sont orientées vers l'estimation de la réserve en eau à partir de paramètres plus accessibles. Des expressions mathématiques utilisant des critères simples et faciles à obtenir comme la teneur en argile ont été développées (Gras, 1957 ; Peterson et al., 1968 ; Gupta et Larson, 1979). De telles fonctions ont été reprises pour le calcul de la réserve utile à partir de la texture. En France, les données publiées par Jamagne et al., (1977) constituent encore aujourd'hui des références très largement utilisées pour l'évaluation de la qualité des sols (aptitude à telle ou telle production agricole, sensibilité au risque de pollution diffuse...).

Cependant dès 1973, Reeve et al. (1973) ont constaté que pour des sols de texture très différente les réserves utiles (RU) pouvaient être sensiblement identiques au seuil de 5 %. Par la suite, Hall et al. (1977) ont publié des valeurs moyennes de RU pour lesquelles les écarts-types variaient de 0,3 à 0,6 mm/cm de sol au sein de chaque classe de texture comme le confirment les travaux de Ratliff et al., 1983.

Quelle que soit l'approche développée, une bonne image de la réserve utile peut être donnée en considérant l'épaisseur d'une lame d'eau présente dans le sol utilisable par les végétaux. L'humidité à la capacité au champ (CC) correspond à la quantité d'eau restant dans le sol après ressuyage. Aux faibles pF, des sols de même texture mais de **structure distinctes** peuvent avoir des rétentions d'eau très différentes (Robain et Curmi, 1986). D'après Bruand (1990) la densité apparente est un excellent indicateur de CC, dans les sols argileux car elle rend bien compte de la nature et de l'organisation des argiles du sol.

Aux bas potentiels ( $\Psi = -1\,600$  kPa) en revanche l'eau est retenue dans des pores de petite taille ( $\sim 0,1$   $\mu\text{m}$ ). Le rapport sur-

face/volume des pores du sol est d'autant plus grand qu'il est composé de particules plus fines. De ce fait la connaissance de la taille et de la nature des constituants est une approche qui permet de prévoir les propriétés de rétention en eau. À ce sujet, la CEC mesurée à pH = 7,0 (CEC<sub>7</sub>) apparaît un excellent outil de prévision de la teneur en eau (Bigorre et al., 2000). Dans le cas de sols issus de roches carbonatées, le coefficient de corrélation entre la CEC<sub>7</sub> et la rétention de l'eau à  $\Psi = -1\,600$  kPa dépasse souvent 0,95 voire 0,98 pour les sols cultivés (Bruand, 1990). En revanche, on dispose de très peu de données relatives à la réserve en eau des sols forestiers, notamment ceux développés en conditions acides.

Le principal objectif de cette étude est donc de progresser dans la connaissance de la réserve utile des sols forestiers et notamment de préciser l'importance de différents facteurs relatifs aux sols dans le bilan hydrique. Cette étude a été réalisée sur une hêtraie de la forêt de Hesse (57). Elle entre dans le cadre des recherches du programme européen Euroflux sur la production forestière.

## DONNÉES GÉNÉRALES SUR LES SOLS

### Présentation du site d'étude

La forêt domaniale de Hesse (48°40'N, 7°05'E, altitude 300 m) située à une dizaine de kilomètres au sud de Sarrebourg (57) recouvre une superficie de 485 ha, elle est entrecoupée par la Bièvre, un affluent de la Sarre. La végétation est composée à 90 % de hêtres (*Fagus sylvatica*), les autres espèces d'arbres sont *Carpinus betulus*, *Betula alba*, *Quercus petraea* et *Larix decidua*. Notre étude de sols porte sur 4 parcelles (217, 218, 221 et 222), d'une superficie totale de 65 ha, dont l'ensemble couvre une surface homogène de hêtres âgés d'une trentaine d'années issus de régénération naturelle. Ces quatre parcelles sont quadrillées selon un maillage de 50 m de côté, définissant 182 placettes. L'enclos richement instrumenté par l'INRA de Champenoux est situé au cœur de cet ensemble dans la parcelle 217. Ce dispositif expérimental, qui s'intègre dans le programme européen Euroflux, assure la mesure en continu des flux d'eau et de dioxyde de carbone échangés par une hêtraie représentative de la région.

Sur le plan climatique, la moyenne des précipitations annuelles est de 820 mm et la température moyenne est de 9,2 °C.

### Conditions géologiques et pédologiques

Sur le versant exposé au nord-ouest le substratum géologique est constitué de grès micacés gris et massifs du Muschelkalk inférieur d'origine lacustre. Des passées argileuses correspondent plus à des variations de faciès qu'à des limites stratigraphiques. Côté est (versant abrupt exposé au sud-est) les sols reposent sur un grès à *Voltzia* fortement micacé et arkosique de couleur rouge

violacée. Les deux formations sont recouvertes d'un placage de limons argileux à limono-argilo-sableux (carte géologique de Sarrebourg, 1/50 000, BRGM, 1968).

Afin de préciser la distribution spatiale des sols, une reconnaissance pédologique a été effectuée à la tarière. Trois transects recoupant la topographie et la stratigraphie ont permis de caractériser les solums caractéristiques des quatre parcelles. Sur le versant exposé au nord-ouest, les sols présentent un gradient d'hydromorphie avec apparition d'une nappe temporaire (mars 1999). Le versant opposé (grès à Voltzia), présente une rupture de pente où les traces d'engorgement temporaire sont moins visibles. Sur la base du Référentiel Pédologique (1995) et en fonction du caractère croissant de l'hydromorphie nous avons classé les sols de la façon suivante (figure 1):

1. - Brunisol Oligosaturé, (BO), polycyclique, de bordure de plateau, à Oligomull et horizon Cg peu tacheté sur grès à Voltzia.

2. - Brunisol Oligosaturé redoxique, (BO-r), polycyclique, à Oligomull, à horizons tachetés et plancher structural sur altérite de grès micacé.

3. - Brunisol Oligosaturé - Redoxisol, (BO-R), polycyclique, paléoluvique à Mésomull, sur altérite de grès micacé.

L'étude des sols indique que les horizons organo-minéraux (A) sont à structure grumeleuse de type Oligomull, à l'exception du sol le plus hydromorphe (BO-R) qui possède un Mésomull très structuré dû à un fort enracinement de surface. Les trois sols sont marqués par des horizons structuraux (S) limono-argileux, de structure polyédrique subanguleuse. On constate une augmentation de la compacité vers la profondeur qui est semble-t-il accentuée avec l'hydromorphie. La densité de racines diminue à partir de 50 cm.

Soulignons aussi la présence d'une sur-structure prismatique dans les horizons argilo-limoneux (II BTg, III BT) du Rédoxisol indicateur de la présence d'un paléosol (communication orale, Guy Grandjean).

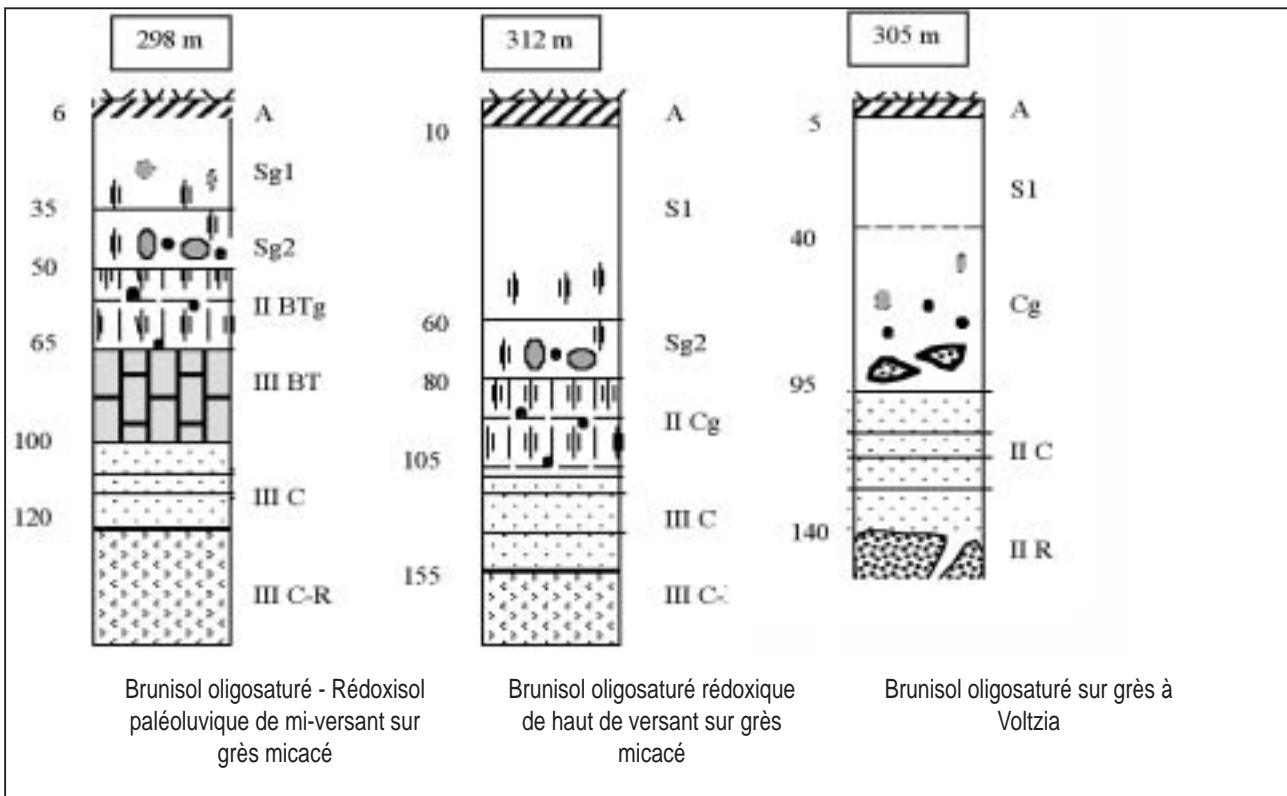
En résumé, ces sols présentent deux phases distinctes (sols polycycliques). Une pédogenèse actuelle dans les dépôts limoneux récents et une évolution pédogénétique semble-t-il plus ancienne développée sur les grès micacés sous-jacents.

### Caractérisation des sols

Trois profils ont été creusés à la fin de l'hiver à une teneur en eau proche de la capacité au champ. Des mesures de densité appa-

Figure 1 - Représentation schématique de trois sols forestiers étudiés (symbolisation des horizons selon Jabiol B. et Gégout J.C., 1992).

Figure 1 - Schematic representation of the three studied forest soils. (horizon symbols according to Jabiol B. and Gégout J.C., 1992).



rente sur cylindre (250 cm<sup>3</sup>) ont été effectuées par tranche de 10 cm (3 répétitions). Au sein de chaque horizon, nous avons prélevé des blocs de 30 cm de côté en prenant soin de conserver la structure et l'humidité du sol en place. Les échantillons ont été stockés au frais à l'abri de l'air et de la lumière.

Les mesures de rétention d'eau ont été effectuées sur des mottes (~10 cm<sup>3</sup>) extraites des blocs par fragmentation manuelle. Pour les potentiels matriciels ( $\Psi_m$ ) de -1 kPa à -100 kPa, nous avons utilisé le dispositif de filtration pneumatique proposé par Tessier et Berrier (1979). Pour  $\Psi_m$  de -1 600 kPa, nous avons utilisé la cellule de Richards (1941).

Les mottes ont été disposées sur un lit de pâte de kaolin afin d'assurer la continuité du film d'eau entre la motte et le filtre ou la membrane. Pour les potentiels inférieurs à -1,6 MPa, les échantillons ont été placés en équilibre avec des humidités relatives contrôlées (Tessier, 1975). Les masses volumiques humides ont été déterminées en mesurant la poussée d'Archimède de l'échantillon dans du kérosène (Monnier et al., 1973). Chaque point de la courbe a fait l'objet d'au moins cinq répétitions. Les résultats concernant l'évolution de la teneur en eau et du volume poral ont été calculés par référence au volume de solide à savoir de l'indice des vides ( $e = V_v/V_s$ ) et l'indice d'eau ( $\theta = V_w/V_s$ ) sachant que  $V_v$ ,  $V_w$  et  $V_s$  sont respectivement les volumes de vide, d'eau et de solide. Dans le but d'affiner la précision des calculs d'indices, les densités réelles ou densités de solide de chaque horizon ont été réalisées selon la méthode du pycnomètre à eau (Blake, 1965).

Sur chacun des horizons prélevés, la granulométrie (cinq fractions) a été effectuée après dispersion à l'hexaméthaphosphate de sodium. La capacité d'échange cationique et les cations échangeables ont été déterminés sur le sol total et sur la fraction < 2  $\mu$ m après échange avec le cation cobaltihexammine ( $CEC_{Co}$ ), sans solution tampon, c'est-à-dire à un pH très proche de celui du sol (Ciesielski et Sterckeman, 1997).

Une comparaison avec la  $CEC_7$  selon la méthode Metson (tampon à pH 7) a permis de préciser l'importance des charges variables. La mesure du pH a été effectuée dans l'eau et dans une solution non tamponnée de KCl normal dans un rapport 1/2,5 sol – solution. Afin de compléter l'étude des propriétés de surface des constituants du sol, les surfaces totales ont été mesurées par adsorption à l'éthylène glycol monoéthyl ether (EGME) selon la méthode décrite par Heilmen, et al. (1965).

Sur chaque horizon, le dosage du carbone organique (méthode Anne), du carbone total et de l'azote total ont été effectués afin d'évaluer la teneur et la nature des matières organiques.

Les réserves utiles mesurées et estimées ont été calculées d'après la formule suivante :

$$RU = (H_{cc} - H_f) \cdot da \cdot Ep \cdot (100 - EG)/100$$

Avec : RU, la réserve utile en mm d'eau

$H_{cc}$ , l'humidité massique à la capacité au champ (cm<sup>-3</sup>.g<sup>-1</sup>)

$H_f$ , l'humidité massique au point de flétrissement (cm<sup>-3</sup>.g<sup>-1</sup>)

da, la densité apparente mesurée sur cylindre (g.cm<sup>-3</sup>)

Ep, l'épaisseur de l'horizon en mm

EG, le pourcentage volumique d'éléments grossiers supérieurs à 2 mm

## Approche du bilan hydrique

Ce travail s'inscrivant dans le cadre d'une étude sur la réserve utile et son impact sur la forêt, nous avons utilisé un modèle de bilan hydrique conçu par l'unité d'écophysiologie forestière de l'INRA de Champenoux. Ce modèle prend en compte les principaux aspects du transfert de l'eau dans les écosystèmes forestiers (Modèle BILJOUR, Granier et al., 1999). Le modèle BILJOUR est itératif et les variations de teneur en eau du sol sont calculées au pas de temps journalier de la façon suivante :

$$\Delta R = P - I_n - T - \text{Ess} - D_h,$$

avec  $\Delta R$  la variation de la réserve en eau entre deux jours successifs, P les précipitations,  $I_n$  l'interception par le couvert forestier, T la transpiration des arbres, Ess l'évaporation du sol et du sous-étage et  $D_h$  le drainage.

Dans ce modèle, le sol est considéré comme une succession de réservoirs connectés par la macroporosité. Ainsi l'eau incidente est prise en compte à la fois par la microporosité qui sert à réhumecter l'horizon, mais aussi par la macroporosité ou porosité structurale qui draine quel que soit l'état hydrique de l'horizon. Dans notre étude nous avons envisagé autant de réservoirs que d'horizons. Afin de mettre en évidence d'éventuelles différences de comportement au niveau de la réserve en eau du sol, nous avons effectué quelques simulations de bilan hydrique à partir de données climatiques de 1996 à 1998. Nous avons aussi comparé nos données à des mesures d'humidité in situ obtenues à la sonde à neutrons au voisinage immédiat de nos profils

## RÉSULTATS

### Caractéristiques générales des sols

Les résultats des analyses granulométriques sont présentés dans le [tableau 1](#).

- Le profil du brunisol oligosaturé (BO) présente dans les horizons d'altération (Cg et II C) un taux d'argile maximum de 31,4 % entre 40 à 100 cm de profondeur. La proportion d'argile dans les horizons superficiels n'excède pas 24,1 %. Les teneurs en sables et limons montrent une discontinuité texturale à 40 cm avec une remontée des teneurs en sables (23,0 %).

- Dans le profil du brunisol oligosaturé redoxique (BO-r), la teneur en argile est de 22,2 % dans l'horizon A et de 30,8 % dans les horizons les plus profonds (105-155 cm), et une zone d'accumulation d'argile (34,1 %) correspondant à une diminution de la teneur en

Tableau 1 - Composition granulométrique des horizons des sols de la forêt de Hesse.

Table 1 - Particle-size distribution of horizons of the Hesse forest.

limons entre 60 à 80 cm.

- Dans le sol le plus hydromorphe (BO-R) la teneur en argile augmente de l'horizon A (25,4 %) à l'horizon III BT (37,8 %), horizon le plus argileux des trois profils. La teneur en sables est constante dans les 50 premiers centimètres et diminue progressivement en profondeur jusqu'à atteindre 2,6 % dans l'horizon III C (100-120 cm).

Dans tous les horizons les  $CEC_7$  et au pH du sol ( $CEC_{co}$ ) sont très faibles. La  $CEC_{co}$  est comprise entre 6,3 et 6,8  $cmol^+/kg$  pour les horizons organo-minéraux, inférieure à 9,2  $cmol^+/kg$  dans les horizons S et en moyenne égale à 9,5  $cmol^+/kg$  dans les horizons profonds C. Les CEC et les valeurs du taux de saturation en cations alcalins et alcalino-terreux présentent une évolution analogue dans les trois profils. Elles sont par ailleurs d'autant plus élevées dans les sols où l'hydromorphie est plus intense. Sur le complexe d'échange le Ca est dominant dans les horizons superficiels mais en profondeur le complexe devient magnésien.

Les mesures d'adsorption d'Éthylène Glycol Monoéthyl Ether (EGME) effectuées sur la fraction  $< 2 \mu m$  indiquent que les argiles présentent des surfaces spécifiques très faibles. Les argiles des horizons structuraux développent des surfaces spécifiques toujours inférieures à celles des horizons d'altération (respectivement 80 et 100  $m^2/g$ ).

Les teneurs en matières organiques révèlent des profils très semblables, avec une plus forte teneur en surface pour le sol non hydromorphe. Les rapports C/N sont comparables mais ils sont plus élevés dans BO-R que dans les horizons supérieurs de BO

et au BO-r. Dans les trois sols, les valeurs de pH eau et KCl décroissent régulièrement avec la profondeur, allant de 4,0 en surface à 3,8 en bas du profil indiquant une augmentation de l'acidité.

## Comportement physique

Comparaison mottes-cylindres Nous comparerons les valeurs d'indice de vides obtenues sur cylindre ( $\# 250 \text{ cm}^3$ ) et sur mottes ( $10 \text{ cm}^3$ ) au moment du prélèvement, c'est-à-dire à une teneur en eau proche de la capacité au champ (figure 2). Les différences obtenues rendent compte de la porosité structurale du sol. L'indice de vides a aussi été déterminé sur des mottes préparées à  $-100 \text{ MPa}$  (séchage à 47 % d'humidité relative). La différence d'indice de vides entre la capacité au champ et celle à  $-100 \text{ MPa}$  renseigne sur le retrait du sol à l'échelle des mottes, c'est-à-dire l'aptitude du sol à se structurer.

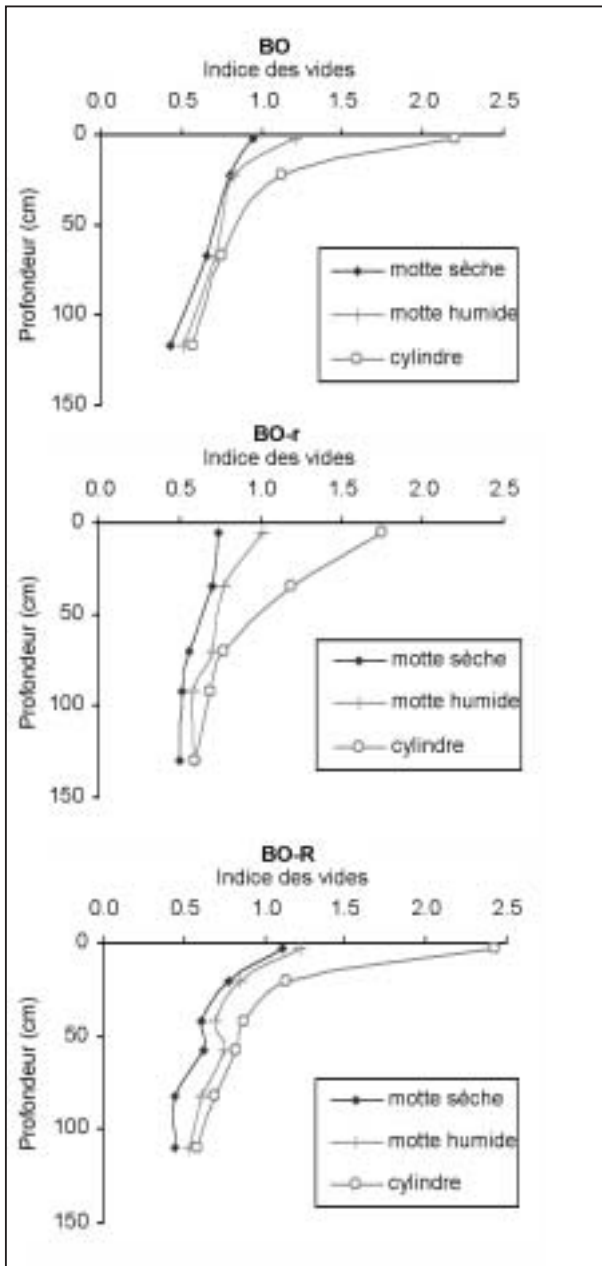
Quelles que soient l'échelle d'étude et la valeur du potentiel de l'eau, l'indice de vides décroît du haut vers le bas du profil. Les horizons profonds sont donc plus compacts que les horizons supérieurs. La différence d'indice de vides entre les cylindres et les mottes est très importante dans l'horizon A et décroît fortement jusqu'à 50 cm où elle tend à disparaître.

La variation de porosité des mottes au cours de la dessiccation est faible. Ceci signifie que les sols sont peu gonflants et donc peu aptes à se structurer en fonction des conditions hydriques.

Évolution de l'indice de vides et d'eau. Les courbes d'indices des vides et d'eau en fonction du potentiel de l'eau permettent de suivre l'évolution simultanée du volume de pores et d'eau (figu-

Figure 2 - Profils des indices de vides mesurés sur motte et cylindre des sols de la forêt de Hesse.

Figure 2 - Void ratio profiles measured on clods and cylinders on Hesse forest soils



re 3). Les barres d'erreurs donnent une information sur la variabilité des résultats. La désaturation en eau est progressive et une grande partie de l'eau utile pour les plantes est perdue entre -100 et -1600 kPa.

Les indices des vides ( $e$ ) des horizons de surface sont très variables. Pour les horizons structuraux intermédiaires,  $e$  est

compris entre 0,6 et 0,8. Le retrait est faible puisque  $\Delta e = 0,05$  pour BO, 0,1 pour BO-R et 0,2 pour l'horizon Sg2 du Brunisol redoxique. Les horizons profonds d'altération sont peu poreux ( $e = 0,5$ ) et peu gonflants avec  $\Delta e = 0,13$ .

Les indices d'eau ( $\theta$ ) des superficiels sont compris entre 1,0 et 1,3. Dans ces horizons, l'activité biologique intense, (faune, racines) se traduit par une forte proportion de pores grossiers permettant le stockage de l'eau aux hauts potentiels ( $\Psi \dot{Z} -10$  kPa).

Pour tous les horizons, l'indice d'eau à -1600 kPa est très constant ce qui traduit une grande homogénéité granulométrique des profils. La perte d'eau importante entre -100 et -1600 kPa signifie que la majeure partie de l'eau est retenue par des pores de taille inférieure à 1,5  $\mu\text{m}$  (en supposant l'équivalence potentiel / taille de pores conforme à la loi de Jurin). La contribution de ces pores apparaît déterminante dans la réserve utile.

## DISCUSSION

Elle comprendra trois parties : (1) la pédogenèse des sols de la forêt de Hesse, (2) l'établissement de relations de pédotransfert dans ces sols et (3) la modélisation du bilan hydrique.

### Pédogenèse des sols

À partir d'une reconnaissance des sols nous avons sélectionné trois profils qui ont été étudiés à la fois du point de vue chimique et physique. Les analyses granulométriques indiquent que la texture limono-argileuse à argilo-limoneuse des sols est relativement homogène. Les faibles variations de texture d'un horizon et d'un profil à l'autre peuvent s'expliquer à partir de la variabilité des dépôts limoneux mais nous manquons d'éléments pour venir à l'appui de cette hypothèse. D'autres facteurs peuvent aussi intervenir comme la présence d'un paléosol (horizons II BTg et III BT) ou encore des variations latérales de faciès dans les grès micacés sous-jacents (horizons II C et III C). Il existe aussi la possibilité d'un lessivage latéral en relation avec l'acidité ou des migrations géochimiques liées à l'hydromorphie actuelle. Dans ce dernier cas, l'existence de concrétions ferro-manganiques peut conduire à surestimer les teneurs en sable.

Les analyses chimiques ne révèlent pas de différences nettes entre les brunisols même si le sol le plus hydromorphe (BO-R) est le sol le moins désaturé en cations alcalins et alcalino-terreux. Ceci traduit certainement l'existence de transferts géochimiques latéraux au sein de la séquence. On note aussi une augmentation du magnésium échangeable comme il a été observé par d'autres auteurs en milieu hydromorphe et initialement très acide (Tessier et al., 1992).

Les propriétés physiques des sols illustrent des comportements très différents. Les courbes de retrait présentées figure 4 reprennent les résultats de la figure 3. Ils montrent que l'évolution des sols se traduit par une augmentation de la porosité depuis les horizons profonds vers les horizons de surface, c'est-à-dire là où l'ac-

Figure 3 - Courbes de rétention d'eau et de changement de volume obtenues sur trois horizons des sols de la forêt de Hesse.  
 Figure 3 - Water retention and volume change curves obtained on three soil in the Hesse forest

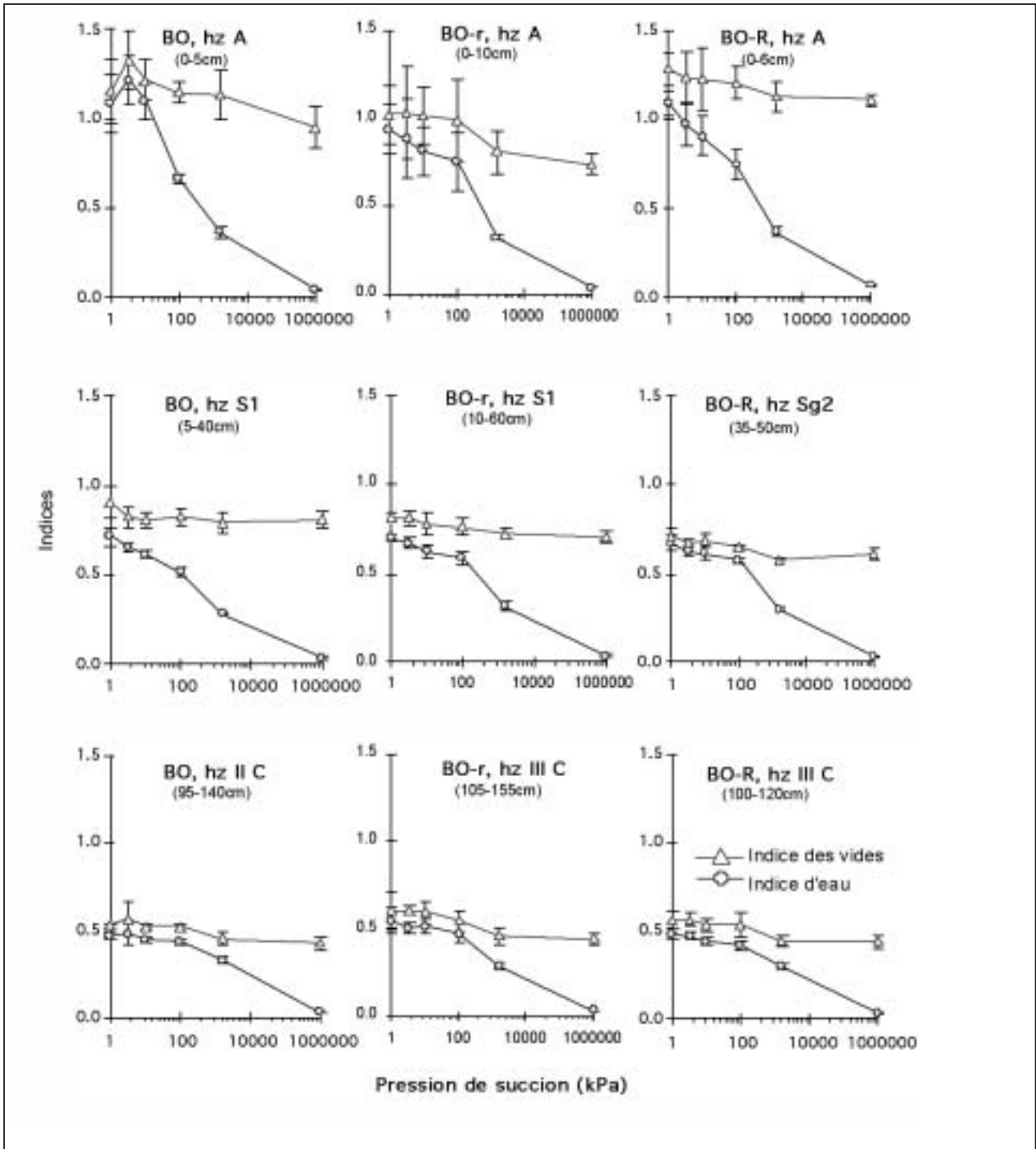




Tableau 2 - Analyses physico-chimiques des sols (CEC, taux de saturation et surface spécifique).

Table 2 - Physico-chemical analysis of the soils (CEC, saturation rate and specific surface area).

Profil	Hz (cm)	Surf. Spécifique EGME m <sup>2</sup> /g	CEC		Cobaltihexamine (cmol+/kg)				S	S/T %	
			Metson (cmol+/kg)	Cohex	Cations échangeables du sol						
					Ca	Mg	K	Na			
BO	0-5	A	80	8.8	6.3	1.03	0.20	0.29	0.02	1.5	24.6
	5-40	S	77	6.4	5.1	0.17	0.06	0.15	0.02	0.4	7.8
	40-95	Cg	88	7.9	7.0	0.12	0.07	0.18	0.01	0.4	5.5
	95-140	II C	90	9.7	8.9	1.48	1.35	0.27	0.02	3.1	35.1
BO r	0-10	A	-	9.8	6.8	1.80	0.40	0.40	0.02	2.6	38.6
	10-60	S1	89	8.0	6.7	0.19	0.19	0.18	0.03	0.6	8.9
	60-80	Sg2	93	10.0	9.2	0.43	0.61	0.29	0.02	1.4	14.7
	80-105	II Cg	92	10.4	9.6	0.83	1.59	0.35	0.03	2.8	29.1
	105-155	III C	97	10.9	10.1	1.35	1.83	0.39	0.03	3.6	35.6
BO-R	0-6	A	-	10.0	6.8	1.86	0.55	0.34	0.02	2.8	40.9
	6-35	Sg1	78	8.1	5.8	0.54	0.27	0.23	0.02	1.1	18.4
	35-50	Sg2	86	6.9	5.7	0.67	0.38	0.19	0.02	1.3	22.0
	50-65	II BTg	103	6.8	8.1	0.96	1.01	0.27	0.03	2.3	28.4
	65-100	III BT	103	10.8	10.3	1.36	2.72	0.36	0.07	4.5	43.8
	100-120	III C	-	10.4	9.9	2.29	3.23	0.39	0.10	6.0	61.0

Tableau 3 - Analyses chimiques des horizons des sols de la forêt de Hesse (pH et matières organiques).

Table 3 - Chemical Analysis of horizons of the Hesse forest (organic matter and pH).

Profil	Hz (cm)		pH eau	pH KCl	Δ pH	C org mg/g	M.O. mg/g	CHN		C/N
								C mg/g	N mg/g	
BO	0-5	A	4.8	3.8	1	24.9	42.8	25.9	1.95	13.3
	5-40	S	4.6	3.8	0.8	8.5	14.8	8.4	0.79	10.6
	40-95	Cg	4.5	3.7	0.8	2.9	5.0	3.3	0.47	7.1
	95-140	II C	4.9	3.5	1.4	1.1	1.9	1.0	0.35	2.7
BO r	0-10	A	4.9	3.8	1.1	19.8	34.1	24.0	1.61	14.9
	10-60	S1	4.6	3.7	0.9	3.7	6.4	3.3	0.51	6.4
	60-80	Sg2	4.7	3.6	1.1	2.5	4.3	2.0	0.44	4.6
	80-105	II Cg	4.8	3.5	1.3	1.2	2.1	0.7	0.32	2.3
	105-155	III C	4.9	3.4	1.5	1.3	2.2	1.2	0.34	3.6
BO-R	0-6	A	5.1	3.9	1.2	21.8	37.5	25.3	1.97	12.8
	6-35	Sg1	4.9	3.9	1	12.7	21.7	13.8	1.05	13.1
	35-50	Sg2	4.9	3.8	1.1	3.8	6.5	3.4	0.34	10.1
	50-65	II BTg	4.9	3.7	1.2	2.5	4.3	1.9	0.23	8.1
	65-100	III BT	5.1	3.4	1.7	1.2	2.1	0.8	0.12	6.8
	100-120	III C	5.3	3.4	1.9	1.3	2.2	0.5	0.08	5.9

tivité biologique a des conséquences directes la teneur en matières organiques et la rétention de l'eau.

Les variations de teneurs en eau à -1 600 kPa sont expliquées à 93 % par la teneur en matières organiques dans les horizons A et S. Ainsi, à teneur en argile constante, une différence de teneur en matières organiques de 8,7 mg/g augmente la quantité d'eau utile de 54 % (tableau 4).

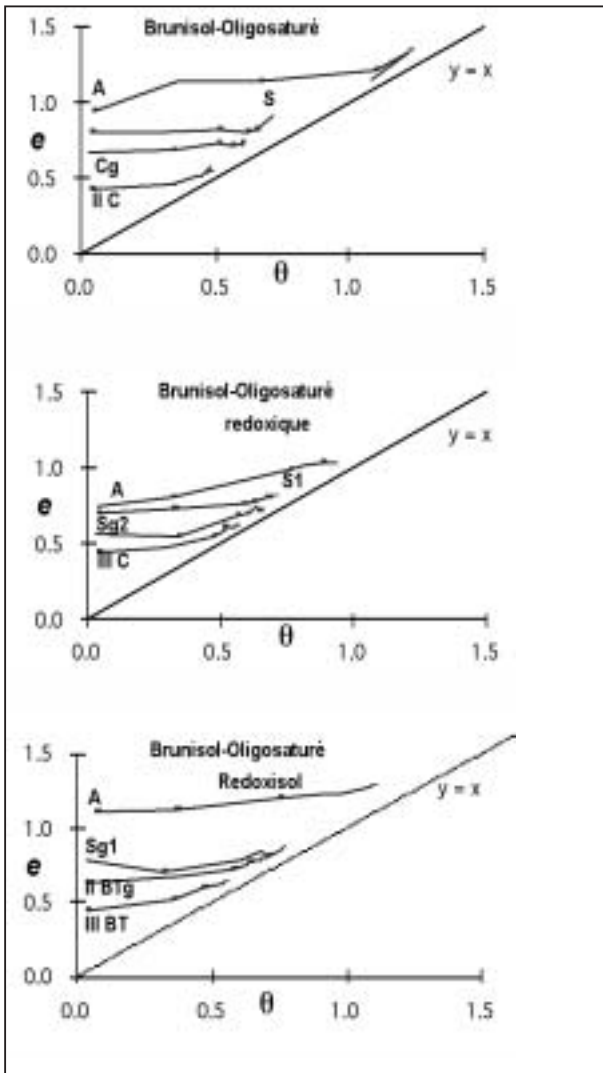
Il est particulièrement intéressant de constater que l'évolution

des propriétés physiques de cette séquence de Brunisols conduit à la création d'une porosité par décompaction. De toute évidence la pédogenèse de ces sols est caractérisée par une modification des propriétés physiques dont l'origine est principalement liée à l'évolution de la structure, sans que les caractères géochimiques interviennent de façon déterminante dans le comportement des sols.

Dans ce type de milieu, les conditions acides prévalent (pH<sub>eau</sub>

Figure 4 - Courbes de retrait de quelques horizons des sols de la forêt de Hesse.

Figure 4 - Shrinkage curves of some horizons of Hesse



< pKa de l'aluminium). L'aluminium est présent dans l'espace interfeuillet des minéraux 2 : 1 comme le montrent les baisses de surface spécifique et de CEC dans les horizons structuraux. On sait que, dans ces conditions de pH, l'aluminium assure une certaine stabilité physique à l'assemblage des constituants des sols de telle sorte que la porosité d'origine biologique ou résultant de l'altération a pu, après sa mise en place, rester stable dans le temps (Assouline et al., 1997). Il apparaît ainsi que même si les données physico-chimiques n'apparaissent pas au premier abord discriminantes dans l'origine de la décompaction des sols, elles sont sans doute la condition nécessaire pour que la porosité reste stable dans le

Tableau 4 - Humidités en % des horizons A des sols de la forêt de Hesse (les teneurs en matière organique mentionnées en italique sont exprimées en mg/g de MS).

Table 4 - Water content of A horizons of Hesse forest soils (organic matter content is given in *italic* and expressed in mg/g of DM)

	BO 42,8	BO-r 34,1	BO-R 37,5
Humidité % à -10 kPa	43,5	31,4	33,0
Humidité % à -1600 kPa	14,2	12,3	13,4
Eau utile %	29,3	19,1	19,6

Tableau 5 - Coefficients de régression entre la teneur en eau massique (g.g<sup>-1</sup>) et le volume massique (cm<sup>3</sup>/g) à différents potentiels de l'eau.

Table 5 - Regression coefficients between the gravimetric water content (g.g<sup>-1</sup>) and the reciprocal of bulk density (cm<sup>3</sup>/g) at different water potentials.

Pression de succion	a	b	c
-1 kPa	0.8597	-0.3153	0.
-3.2 kPa	0.8289	-0.3044	0.
-10 kPa	0.8017	-0.2911	0.
-100 kPa	0.4484	-0.0863	0.
-1600 kPa	0.0689	0.0793	0.

Tableau 6 - Comparaison des réserves utiles totales estimées et mesurées pour les sols étudiés.

Table 6 - Comparison between estimated and measured available water storage of the studied soils

Profil	RU estimée (mm)	RU mesurée (mm)
BO	158,0	147,7
BO-r	198,8	205,3
BO-R	153,4	152,2

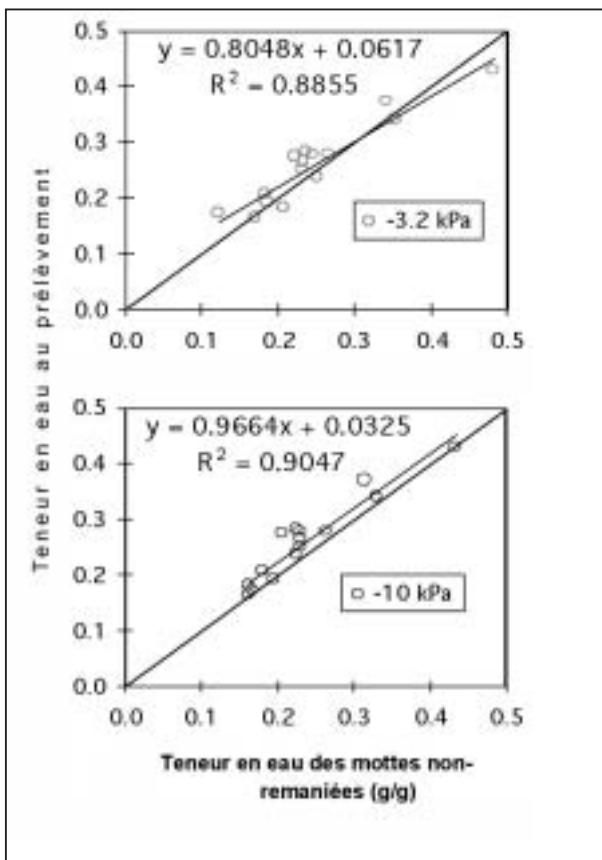
temps. Ceci conditionne indirectement la stabilité physique du sol, donc la ressource en eau du sol et in fine la production de biomasse par la végétation.

### Évaluation de la réserve en eau

#### Calcul de la réserve utile

Figure 5 - Comparaison entre les teneurs en eau au prélèvement et à deux potentiels proches de la capacité au champ.

Figure 5 - Comparison between water contents at sampling and at two matric potential near the field capacity.



Nous pouvons calculer la réserve en eau du sol à partir de la teneur en eau à la capacité au champ et au point de flétrissement. Nous avons utilisé la rétention en eau à  $-1600$  kPa comme valeur de l'humidité au point de flétrissement.

D'après Bruand et al. (1996) et Bigorre (2000), la teneur en eau à la capacité au champ correspond à une valeur de potentiel de l'eau de l'ordre de  $-10$  kPa ( $pF = 2,0$ ). Nous avons comparé les humidités mesurées au prélèvement et les humidités des mottes correspondant au potentiel  $-1$  kPa,  $-3.2$  kPa, et  $-10$  kPa. Les résultats montrent en effet que le potentiel le plus proche de la capacité au champ correspond à une pression de succion de  $-10$  kPa (figure 5).

Nous considérerons donc que la teneur en eau à  $-10$  kPa est représentative de la capacité au champ de nos sols.

Bases pour la prévision de la réserve en eau.

Il est apparu intéressant de relier le contenu en eau du sol à sa porosité ou à l'inverse de la densité apparente. Les résultats de la figure 6 et du tableau 5 ont été obtenus en prenant en compte tous les horizons étudiés. Les coefficients de corrélation entre la teneur en eau et le volume massique, dans la gamme des hauts potentiels ( $-1$  kPa à  $-10$  kPa avec  $R^2 = 0,95$  pour  $-10$  kPa), sont très étroits. Aux bas potentiels la droite de régression devient horizontale et l'humidité massique devient pratiquement constante:  $H_{-1600 \text{ kPa}} = 0,124$  g/g. et l'écart type vaut  $0,013$  g/g.

Par ailleurs, dans le calcul de la réserve en eau, il est important de tenir compte de la densité apparente du sol. C'est la mesure sur cylindre qui s'en approche le mieux puisqu'elle tend à prendre en compte l'ensemble de la porosité. A partir de la profondeur moyenne  $P_{(cm)}$  de chaque horizon, la densité apparente ( $D_a$ ) peut être aisément calculée à partir de la relation suivante (figure 7):

$$D_a = 0,6518 \cdot P_{(cm)}^{0,2038} \quad (r^2 = 0,9876; n = 15)$$

A partir de ces considérations et compte tenu de l'étroitesse des relations humidité – volume massique, il est possible d'estimer la réserve en eau des sols. La figure 8 et le tableau 6 présentent les réserves utiles estimées à partir du volume massique et les réserves utiles calculées avec les mesures de teneur en eau des mottes. D'après ces calculs, les RU totales estimées sont très proches de celles faites à partir des mesures de teneur en eau. Il faut néanmoins souligner que les erreurs les plus grandes sont obtenues dans les horizons A ( $0,2$  mm d'eau / cm de sol), de faible épaisseur ( $<10$  cm). Sur toute l'épaisseur du sol ( $\sim 1,50$  m), le plus grand écart entre les mesures in situ et la réserve utile calculée est seulement de  $10,3$  mm d'eau (profil BO).

## Modélisation du bilan hydrique

Les données sur la réserve en eau constituent avec le climat et la végétation les paramètres d'entrée indispensables à tout modèle de bilan hydrique. En parallèle à notre étude, un suivi des mesures de la teneur en eau in situ réalisé par l'équipe d'Ecophysiologie de Nancy a permis de montrer que les racines des arbres prélevaient de l'eau sur l'ensemble du profil de sol. Nous avons donc calculé la réserve en eau du sol en sommant les réserves de l'ensemble des horizons du sol. Les données bioclimatiques proviennent de la station Euroflux située à quelques mètres des profils. Les données sur la végétation correspondent à une hêtraie de 30 ans.

En premier lieu la figure 9 permet de voir que la réserve utile des sols est différente, elle est estimée à  $205$  mm pour le profil BO-r et  $152$  mm pour le profil BO-R. Les valeurs des estimations de la réserve en eau calculées à partir de nos résultats sont proches des mesures réalisées à la sonde à neutrons. D'une manière générale, le modèle représente bien les variations saisonnières de la réserve en eau des sols. Le modèle explique plus de  $79\%$  et plus de  $87\%$  de la variabilité saisonnière de la réserve en eau des deux sols calculée à partir des mesures à la sonde

Figure 6 - Relation entre le volume massique et l'humidité massique de mottes soumises aux différents potentiels matriciels (tous les points de mesure sont représentés).

Figure 6 - Relationships between the gravimetric water content and the reciprocal of bulk density at different matric potential (all measurements are presented).

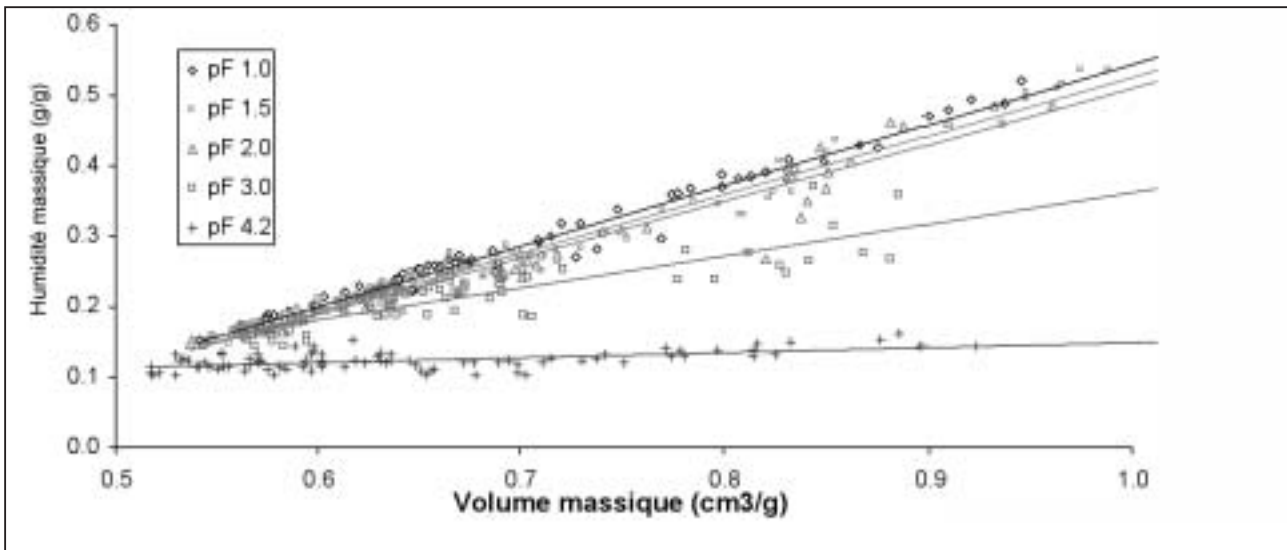
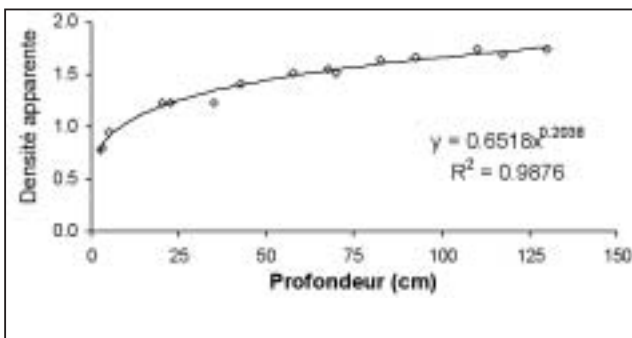


Figure 7 - Relation entre la profondeur et la densité apparente déterminée sur cylindre pour les sols de la forêt de Hesse.

Figure 7 - Relationship between depth and bulk density from



neutronique.

Toutefois, même si les écarts sont faibles, nous constatons que les réserves utiles calculées sont toujours supérieures aux données fournies par les sondes neutroniques. Néanmoins, les décalages entre le modèle et les sondes sont plus importants dans les deux dernières années, alors que ces années sont moins sèches que 1996.

Pour expliquer ces écarts, plusieurs arguments peuvent être avancés. En premier lieu une dérive des mesures issues des sondes à neutrons peut conduire à sous estimer la réserve en eau du sol des années 1997 et 1998. D'autre part une activité précoce de

la végétation peut introduire un décalage dans le temps des variations du stock d'eau calculées par le modèle (année 1998). Enfin, dans le modèle nous avons tenu compte de l'épaisseur totale du sol en attribuant un pourcentage d'enracinement dans chaque horizon. Un biais peut aussi intervenir sur ce point. Par ailleurs dans les entrées du modèle nous avons individualisé chaque horizon, ceci pouvant avoir pour conséquence de minimiser les variations de teneur en eau des horizons les plus profonds en période estivale.

Au total le modèle de bilan hydrique rend cependant bien compte des variations de stock d'eau dans le sol en fonction des événements climatiques. Il apparaît donc qu'il intègre de façon adéquate les caractéristiques du sol et de la végétation. Néanmoins il serait utile d'étendre ces travaux à une chronique plus longue afin de valider nos conclusions.

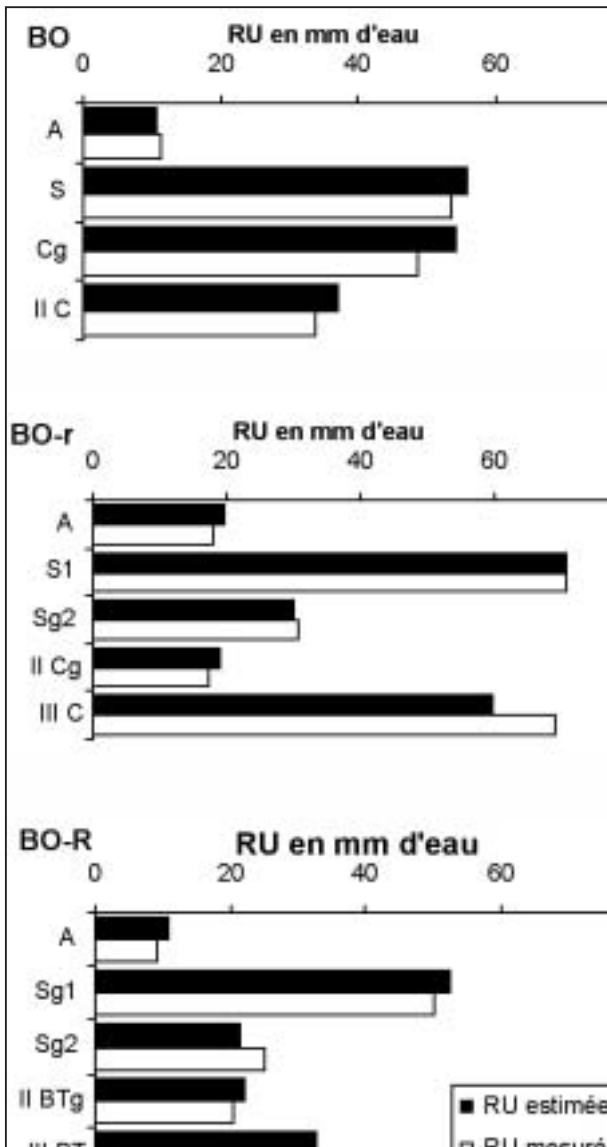
## CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Cet article est consacré à l'étude de la réserve utile et notamment au déterminisme des variations de la réserve en eau de sols forestiers acides.

Une étude de terrain a permis d'identifier une séquence de sols de type brunisol plus ou moins hydromorphe en fonction de la topographie. Les sols présentent un caractère acide et sont fortement désaturés en cations alcalins et alcalino-terreux. Les sols possèdent des caractéristiques granulométriques similaires. Ils diffèrent avant tout par leur plus ou moins grande densité apparente. Une

Figure 8 - Comparaison des réserves utiles mesurées et estimées des sols de la forêt de Hesse.

Figure 8 - Comparison of measured and estimated available water storage of the soils of the Hesse forest.



sorte de décompaction apparaît le facteur essentiel de l'évolution des sols. C'est donc la porosité qui conditionne la ressource en eau, principal facteur limitant de la production de biomasse.

Contrairement aux sols cultivés étudiés par de nombreux auteurs, la capacité d'échange du sol ne permet pas, même à -1 600 kPa ( $pF = 4,2$ ), d'estimer correctement la teneur en eau au point de flétrissement. Ceci vient du fait que la porosité susceptible de retenir l'eau à ce potentiel est fortement dépendante d'un arrangement de particules au niveau le plus fin. Il ne s'agit pas

ici de la géométrie des constituants eux-mêmes car la minéralogie est similaire (Quentin, 1999), mais plutôt de leur assemblage. Sur ce point la végétation semble jouer un rôle déterminant en structurant le sol et en apportant de la matière organique.

Une étude sur l'organisation des constituants basée sur des observations (microscopie optique, MEB, MET), ainsi que des mesures de spectres poral par injection de mercure permettraient de progresser dans la connaissance du mécanisme d'évolution des sols

Pour valider ces résultats, et notamment l'impact de l'acidité sur la microstructure du sol, des études d'une approche similaire, devraient être entreprises. Elles permettraient de vérifier la pertinence de l'approche développée dans ce travail, en particulier pour la rétention de l'eau dans d'autres contextes pédologiques et écologiques.

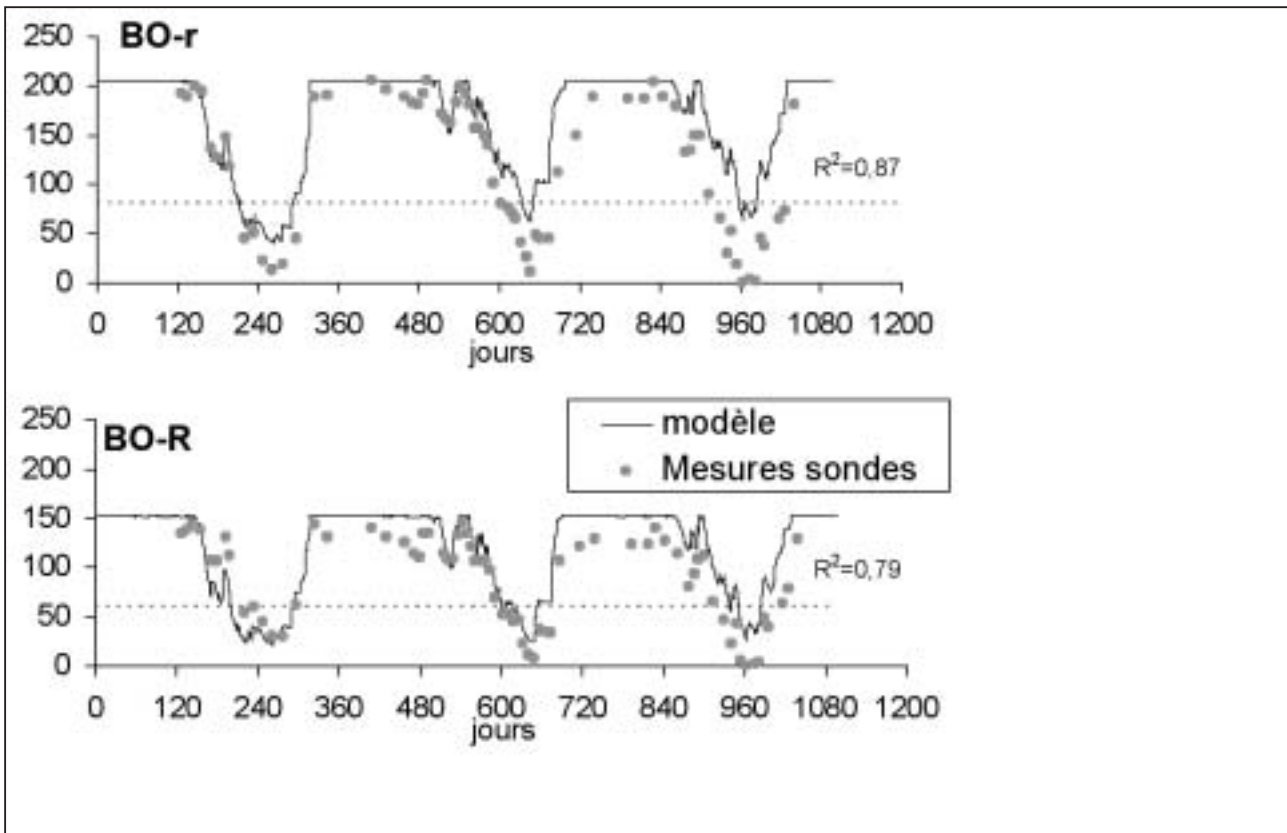
Au total ce travail montre l'intérêt de développer simultanément une approche de laboratoire et de terrain, combinée à une modélisation du bilan hydrique ce qui permet d'analyser et de valider le choix des paramètres pris en compte pour approcher les propriétés des sols et améliorer des modèles de prédictions.

## BIBLIOGRAPHIE

- Assouline S., Tavares-Filho J., and Tessier D., 1997 - Effect of compaction on soil physical and hydraulic Properties : experimental results and modeling. Soil Science Society of America Journal, vol.61, n° 2, 390-398.
- Becker M., Le Goff N., 1988 - Diagnostic stationnel et potentiel de production. Rev. Forest. Fr. 1988 (XL), 29-43.
- Bigorre F. 2000. Influence de la pédogenèse et de l'usage des sols sur leurs propriétés physiques. Mécanismes d'évolution et éléments de prévision. Thèse de l'univ. Henri Poincaré, Nancy I, France 145p.
- Bigorre F., Tessier D., Pedro G. 2000. Contribution des argiles et des matières organiques à la rétention de l'eau dans les sols. Signification et rôle fondamental de la capacité d'échange en cations. Significance of CEC and surface area of soils. How clay and organic matter contribute to water retention properties. C.R. Acad. Sci. Paris, 330: 1-6.
- Blake G.R., 1965 - Particles density. In: Black, C.A. Methods of soil analysis. Madison, Am. Soc. of Agron., 1, 371-373.
- B.R.G.M. - Feuille de Sarrebourg (2315) 1/50 000. Cartes géologiques B.R.G.M.
- Bruand A., 1990 - Improved prediction of water retention properties of clayey soils by pedological stratification. Journal of soil science, 41, 491-497.
- Bruand A., Duval O., Gaillard H., Darthout R., Jamagne M., 1996 - Variabilité des propriétés de rétention en eau des sols : importance de la densité apparente. EGS, 3, n° 1, 27-40.
- Ciesielski H., and Sterckman T. 1997 - Determination of cation exchange capacity and exchangeable cations in soils by means of cobalt hexamine trichloride. Effects of experimental conditions. Agronomie 17 : 1-7.
- Granier A., Badeau V., Bréda N. 1995. - Modélisation du bilan hydrique des peuplements forestiers. Rev. For. Fr., 47, n° sp.
- Granier A., Bréda N., Biron P., Vilette S., 1999 - A lumped water balance model to evaluate duration and intensity of drought constraints in forest stands. Ecological Modelling, 116, 269-283.
- Gras R. 1957 - Relation entre l'humidité équivalente et la granulométrie du sol. Rapport interne, Dept Agro. INRA.
- Gupta S. C. & Larson W.E. 1979 - Estimating soil water retention characteristics

Figure 9 - Comparaison la réserve en eau (REW) mesurée et calculée pour deux sols de la forêt de Hesse de 1996 à 1998, la ligne en pointillée correspond au seuil de stress hydrique soit 40% de la RU.

Figure 9 - Comparison of measured and simulated water storage between two Hesse forest soils from 1996 to 1998, the dotted line is the threshold of water stress of 40% AW. RU



from particle size distribution, organic matter percent, and bulk density. *Water resources research*, 15, 1633-1635

Hall D.G.M., Reeve M.J., Thomasson A.J. & Wright, V.F. 1977 - Water retention porosity and density of field soils. *Soil Survey, Techn. Monogr. 9*, Rohamsted Exper. Stat., UK, 75p.

Heilmen M.D., Carter D.L. & Gonzalez C.L. 1965 - Ethylene glycol Monoethyl-ether for determining surface area of silicate minerals. *Soil Science*, 100, 356-360.

Jabiol B. et Gégout J.-C., 1992 - Recommandation pour la présentation illustrée des descriptions de sols. *Rev. For. Fr.* XLIV. 6-1992.

Jamagne M., Bétrémieux 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.

Ministère de l'Agriculture et de la Forêt, 1991 - Un siècle et demi d'élevage en France AGRESTE Analyse et études n° 8, mai 1991.

Monnier G., Stengel P. & Fies J.-C. 1973. - Une méthode de mesure de la densité apparente de petits agglomérats terreux. Application à l'analyse de systèmes de porosité du sol. *Ann. Agron.*, 24, 533-545

Peterson G. W., Cunningham R. L., Matelski R. P., 1968 - Moisture characteristics of Pennsylvania soils: I. Moisture retention as related to texture. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 32, 271-275.

Pritchett W. L., 1979 - Properties and Management of Forest Soils. *J. Wiley and Sons*, New-York, 500p.

Quentin C. 1999 - Etude de la réserve utile de sols de la forêt de Hesse, contribution à l'étude du bilan hydrique. *Mém. D.E.A. Nat. Sci. Sol* 30p, E.N.S.A. Rennes.

Ratliff L. F., Ritchie J. T. and 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

Reeve M.J., Smith P.D. & Thomasson, A.J. 1973 - The effect of density on water retention properties of field soils. *Journal of soil science*, 24, 356-367.

Référentiel pédologique, 1995 - Coordinateurs Baize D. et Girard M.C. INRA Editions, 332p.

Richards L.A., 1941 - A pressure membrane extraction apparatus for soil solution. *Soil science*, 51, 377-386.

Robain H. & Curmi P., 1986 - Rôle de la structure pédologique sur le comportement hydrique du sol aux faibles pF. *C.R. Acad. Sci. Paris, Série II T.* 303 n°6, 509-514.

Tessier D., 1975 - Recherches expérimentales sur l'organisation des particules dans l'argile. Thèse ingénieur CNAM, Paris 230p.

Tessier D., Berrier J., 1979 - Utilisation de la microscopie électronique à balayage dans l'étude des sols. *Observation de sols soumis à différents pF. Science du sol*, 1, 67-82.

Tessier D., Bouziques J.-C., Favrot J.-C. et Valles V. (1992) - Influence du micro-relief sur l'évolution texturale dans les sols lessivés de la vallée de la

Garonne. Différenciation des structures verticale et prismatique, C. R. Acad.

Sci. Paris, 315, II, 1027-1032.