

## Article de recherche

# Dynamique de l'eau dans une chênaie (*Quercus petraea* (Matt.) Liebl.) en forêt de Fontainebleau

J. Nizinski et B. Saugier

Laboratoire d'écologie végétale, bâtiment 362, Université de Paris-Sud, 91405 Orsay Cedex, France

(reçu le 12-2-1988, accepté le 25-8-1988)

**Résumé** — Dans une futaie de chênes de 120 ans (*Quercus petraea* (Matt.) Liebl., hauteur moyenne de 30 m, densité de 182 arbres/ha, surface terrière de 33,8 m<sup>2</sup>/ha, indice foliaire de 4,38), on a mesuré toutes les semaines, de 1981 à 1983, les précipitations incidentes, les précipitations au sol (pluviomètres), l'écoulement le long des troncs (gouttières) et la réserve en eau du sol (sonde à neutrons). L'interception et la transpiration ont été déduites par la méthode du bilan hydrique.

Les précipitations au sol, l'interception nette et l'écoulement le long des troncs s'élèvent respectivement à 70,6%, 28,8% et 0,6% des précipitations incidentes (moyenne sur 3 ans); avec lors des phénophases défeuillées : 76,6%; 22,4% et 1,0% de Pi et, lors des phénophases feuillées, 65,5%, 34,4%, 0,1% de Pi; la transpiration (T) est de 76,4% de Pi (T = 288,4 mm/an). Le rapport T/ETP varie au cours de la phase feuillée en fonction : (a) de l'évolution du comportement stomatique — à indice foliaire maximal et déficit hydrique du sol négligeable, T/ETP augmente au printemps de 0,44 à 0,83; (b) de l'état hydrique du sol — de la capacité au champ ( $R_{CC} = 168$  mm) jusqu'à une valeur critique 109 mm (65% de  $R_{CC}$ ), le rapport T/ETP reste constant (0,83), puis en deçà de ce seuil, diminue suivant une courbe hyperbolique jusqu'à 0-0,2 pour les valeurs proches du point de flétrissement permanent (37% de  $R_{CC}$ ).

**forêt – bilan d'eau – précipitations au sol – interception nette – écoulement le long des troncs – transpiration – *Quercus petraea* (Matt.) Liebl. – forêt de Fontainebleau**

**Summary** — Soil water balance in an oak (*Quercus petraea* (Matt.) Liebl.) in Fontainebleau forest. In a mature 120 years-old oak forest (*Quercus petraea* (Matt.) Liebl., mean tree height is 30 m, stand density is 182 trees/ha, total basal area is 33.8 m<sup>2</sup>/ha, leaf area index is 4.38) gross precipitations, throughfall (rain gauges), stemflow (stemflow collar) and soil-water content (neutron probe) were measured weekly. Interception and transpiration were derived by the water balance equation method.

Throughfall, interception and stemflow for three years were 70.6-28.8 and 0.6 per cent of gross precipitation (average value over 3 years) respectively, while those in nonfoliated conditions : 76.6, 22.4, 1.0% of Pi in foliated conditions : 65.5, 34.4, 0.1% of Pi; transpiration was of 76.4% of Pi

( $T = 288.4$  mm/year). During the growing seasons  $T/ETP$  ratio is related to the evolution of the stomatal resistance with leaf age (at maximal leaf area index and negligible soil-water stress,  $T/ETP$  increases in spring from 0.44 to 0.83) and soil-water depletion ( $T/ETP$  ratio was not reduced from field capacity ( $R_{CC} = 168$  mm) until 65% of  $R_{CC}$  (108 mm), and then decreased quickly to near zero (0-0.2) at wilting point or 37% of  $R_{CC}$ ).

**forest – water balance – throughfall – net interception – stemflow – transpiration – *Quercus petraea* (Matt.) Liebl. – Fontainebleau forest**

## Introduction

Les études sur la répartition et l'économie de l'eau dans le domaine forestier de Fontainebleau (22 000 ha) ont débuté en 1974, au Laboratoire d'écologie végétale d'Orsay (Université de Paris-Sud) dans le cadre d'un contrat pour l'étude de la régénération du chêne et du hêtre, en collaboration avec le Centre de recherches forestières de Nancy (INRA). Ces recherches ont traité du bilan hydrique d'un sol nu, d'une station colonisée par un peuplement graminéen envahissant les coupes (dominé par *Calamagrostis epigeios*), et d'une futaie fermée de hêtres (*Fagus sylvatica*) (Fardjah, 1978; Pontailier, 1979; Fardjah et Lemée, 1980; Saugier *et al.*, 1985). Nous avons complété ces recherches par l'étude de la dynamique de l'eau sous chênaie (*Quercus petraea*) dans la partie centrale de la forêt de Fontainebleau pendant 3 années (1981, 1982 et 1983). Nous avons comparé ces résultats à ceux publiés par l'INRA de Nancy concernant des peuplements feuillus de *Quercus petraea* et *Fagus sylvatica* du plateau lorrain dans l'Est de la France, les méthodes d'études employées étant semblables (Aussenac, 1968, 1970, 1973, 1975, 1977; Aussenac et Ducrey, 1977; Aussenac et Granier, 1979, 1984; Aussenac et Boulangeat, 1980). Les données concernant l'interception des précipitations sont présentées par Nizinski et Saugier (1988).

Ce travail permettra de discuter de la relation existant entre la transpiration et la réserve utile du sol pour différents peuplements.

## Description de la station d'étude

Nous avons travaillé dans la partie centrale du domaine forestier de Fontainebleau dans la parcelle n° 267 (Fig. 1), adjacente à la réserve du Gros-Fouteau (lat. 48°26'N, long. 2°41'E, alt. 136 m). Le substrat géologique du plateau est constitué par le «calcaire d'Etampes» (fin oligocène) en continuité avec le «calcaire de Beauce», recouverts par des sables siliceux quaternaires d'origine éolienne. En fonction de l'épaisseur de la couche sableuse, les sols de cette parcelle sont soit des sols lessivés, soit des sols podzoliques (Tableau I). Les précipitations annuelles moyennes (de 1883 à 1983) sont de 720 mm; la répartition des pluies au cours de l'année est très régulière : 361 mm d'octobre à mars et 359 mm d'avril à septembre, avec des maxima en janvier et en décembre (72 mm), et des minima en mars (48 mm) et en avril (46 mm); la température moyenne de l'air pour la même période est de 10,2°C (moyenne mensuelle maximum en juillet : 18,2°C, minimum en janvier : 2,2°C). Le peuplement de la station est une futaie qui, en raison de son âge (120 ans) peut être considérée

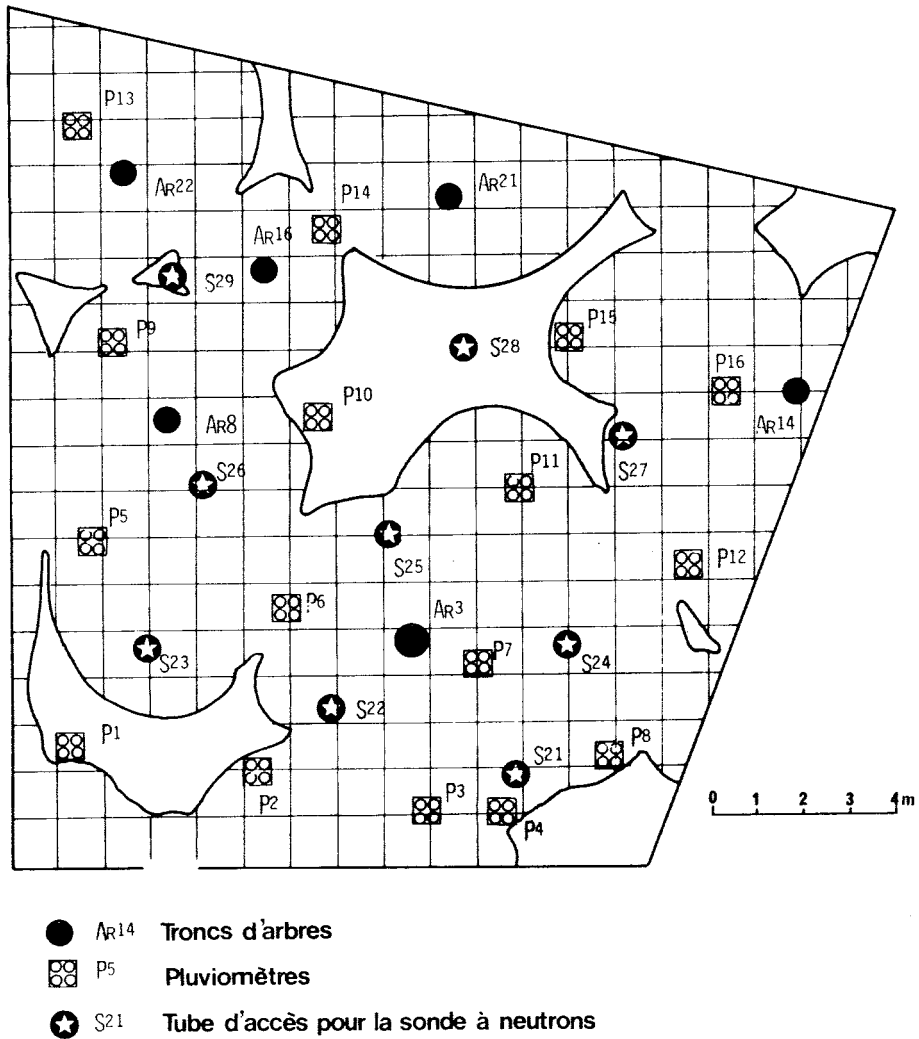


Fig. 1. Plan de la station d'étude (surface : 277 m<sup>2</sup>; pente : 0%; altitude : 136 m; la projection de la couronne des chênes est en traits fins et hachures).

comme stabilisée : sur la durée de l'étude (3 années) on négligera les variations de biomasse des troncs et des branches; quant à l'indice foliaire, il est constant dès la fermeture du couvert ( $LAI_{max} = 4,4$ ). Le chêne *Quercus petraea* (Matt.) Liebl. en

représente l'espèce dominante (Fig. 2) avec une hauteur moyenne de 30 m, une densité de 182 arbres par hectare et une surface terrière de 33,8 m<sup>2</sup>/ha; la strate arbustive, très peu dense, est essentiellement constituée de hêtres.

Tableau I. Caractéristiques du sol de la station d'étude.

	H o r r i z o n				
	A <sub>1</sub>	A <sub>2</sub>	A <sub>2</sub> /B	B	C
Couleur	gris brun	jaune	ocre clair	ocre rouge	gris blanc
Texture	sableuse	sableuse compacte	un peu argileuse	sablo-argileuse compacte	graviers bloc calcaire
Structure	agrégats	particulaire	polyédrique	polyédrique	graviers bloc calcaire
Épaisseur, en cm	10	20	10	20	10
Profondeur de prélèvement, en cm	5	30	35	50	65
Argile, en %	3.0	3.5	12.5	19.90	5.5
Limon, en %	6.0	9.0	12.2	7.2	8.5
Sables, en % :					
- 0.02 à 0.05 mm	8.1	9.2	11.9	7.5	4.5
- 0.05 à 0.10 mm	12.8	12.7	9.7	10.2	10.3
- 0.10 à 0.20 mm	58.5	59.0	47.7	48.8	42.6
- 0.20 à 0.50 mm	7.5	6.1	5.4	6.0	9.2
- 0.50 à 1.00 mm	0.2	0.0	0.2	0.15	2.4
- 1.00 à 2.00 mm	0.0	0.0	0.0	0.0	3.2
Matière organique, en %	3.9	0.5	0.4	0.17	0.0
CaCO <sub>3</sub> , en %	0.0	0.0	0.0	0.0	13.8
Densité apparente	1.37	1.41	1.40	1.63	1.55
Porosité, en %	54.00	41.66	37.00	28.66	36.00
pH	4,4	4,8	5,6	6,1	6,4
Conductivité hydraulique à saturation, en mm/jour	2078,0	1279,0		527,0	1322,0
Capacité au champ, en mm d'eau/10 cm du sol	24,9	18,4	26,6	28,2	22,9
Point de flétrissement perm., en mm/10 cm	7,2	3,1	7,4	14,7	13,2
"Réserve utile", en mm d'eau/10 cm du sol	17,7	15,3	19,2	13,5	9,8
"Réserve utile", en mm/strate	17,7	30,6	19,2	27,0	9,8

## Matériel et Méthodes

### Equation du bilan hydrique

La forte valeur de la conductivité hydrique à saturation (Tableau I) permet de conclure à l'absence de ruissellement et de nappe phréatique, ce qui est bien vérifié en pratique. L'expression

du bilan hydrique du sol peut donc s'écrire sous la forme suivante :

$$\begin{aligned}
 P_i &= T + I_n + D + \Delta R / \Delta t && (\text{mm/j}) && (1) \\
 \text{ou } ETR &= T + I_n && (\text{mm/j}) && (2) \\
 \text{et } I_n &= P_i - (P_s + E_c) && (\text{mm/j}) && (3)
 \end{aligned}$$

avec  $P_i$  - précipitations incidentes, en mm/j;  $T$  - transpiration, en mm/j;  $I_n$  - interception nette, en mm/j;  $D$  - drainage, en mm/j;  $\Delta R$  - variation de

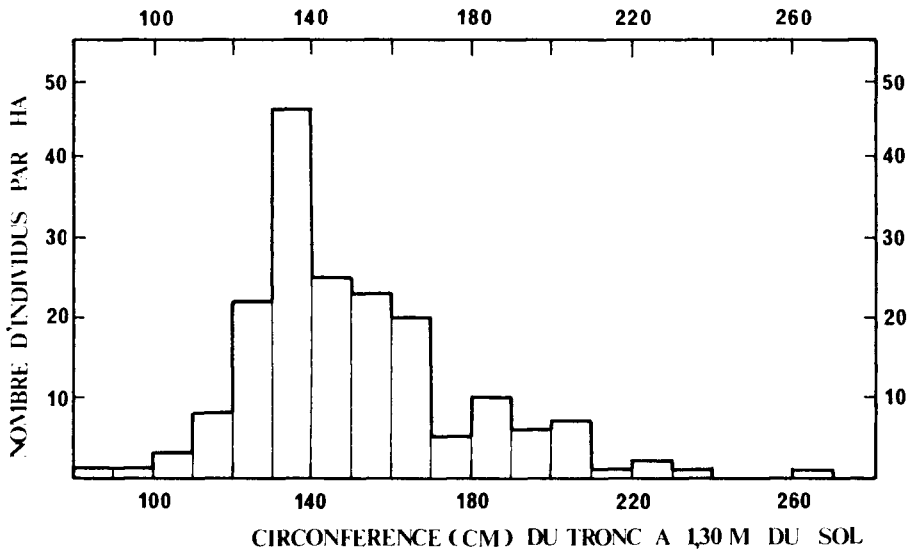


Fig. 2. Distribution du peuplement ligneux en classes de circonférence pour la parcelle n° 267.

la réserve en eau du sol, en mm;  $\Delta t$  - pas de temps des calculs, en jours; ETR - évapo-transpiration réelle du peuplement, en mm/j; Ps - précipitations au sol, en mm/j; Ec - écoulement le long des troncs, en mm/j.

Cette expression considère comme négligeable l'évaporation directe du sol et de la litière, approximation raisonnable en période de dessèchement. Nous avons mesuré directement la réserve en eau du profil du sol (R), les précipitations au-dessus du peuplement (Pi) et au sol (Ps) ainsi que l'écoulement le long des troncs (Ec); les valeurs du drainage (D), de l'interception nette (In) et de la transpiration (T) ont été calculées en supposant qu'on avait  $ETR = ETP$  en période humide (réserve à la capacité au champ) et, au contraire, un drainage nul en période sèche (réserve inférieure à la capacité au champ); ceci permet de calculer respectivement le drainage connaissant l'ETR :

$$\text{Si } R \geq R_{CC} \text{ alors } ETR = ETP \\ \text{et } D = Pi - ETP - \Delta R/\Delta t \text{ (mm/j) (4)}$$

$$\text{Si } R < R_{CC} \text{ alors } D = 0 \\ \text{et } ETR = Pi - \Delta R/\Delta t \text{ (mm/j) (5)}$$

L'hypothèse d'un drainage nul lorsque  $R < R_{CC}$  est liée à la texture sableuse du sol de

la station, qui implique une chute très rapide de la conductivité hydrique avec le dessèchement du sol. Elle n'est strictement vraie que lorsque l'humidité de l'horizon le plus profond est devenue inférieure de quelques points à sa valeur à la capacité au champ. Dans les deux cas (équations (4) et (5)), la transpiration du peuplement est calculée en soustrayant l'interception nette In calculée à l'aide de (3) de l'évapo-transpiration réelle ETR :

$$T = ETR - In \quad (\text{mm/j}) \quad (6)$$

Ces calculs utilisent les notions de capacité de rétention en eau maximale du sol de la zone racinaire du peuplement (capacité au champ :  $R_{CC}$ ), de la capacité de rétention minimale (point de flétrissement permanent :  $R_{PPF}$ ) (Feodoroff, 1962) et de l'évapo-transpiration potentielle (ETP). La zone exploitée par les racines est ici bien délimitée vers le bas du profil par la dalle calcaire; d'autre part, les caractéristiques topographiques et pédologiques sont telles qu'il n'y a ici ni nappe phréatique, ni ruissellement en surface et dans le sol. Les valeurs de  $R_{CC}$  et  $R_{PPF}$  ont été déterminées *in situ* comme étant les valeurs maximale et minimale de la réserve en eau (cf. ci-dessous 3.21). Pour estimer l'éva-

po-transpiration potentielle (ETP), nous avons utilisé la formule de Penman (1948) modifiée par Van Bavel (1966) :

$$ETP = (\Delta R_n + \rho c_p \delta e / r_a) / L (\Delta + \gamma) \quad (\text{mm/j}) \quad (7)$$

avec :  $\Delta$  - dérivée de la fonction reliant la pression de vapeur d'eau saturante de l'air et la température de l'air;  $R_n$  - rayonnement net, en  $W/m^2$ ;  $\rho c_p$  - capacité calorifique de l'air à pression constante, en  $J/m^3 \text{ } ^\circ C$ ;  $\delta e$  - déficit de saturation de l'air en vapeur d'eau, en mb;  $\gamma$  - constante psychrométrique, en  $mb/^\circ C$ ;  $L$  - chaleur latente de vaporisation de l'eau, en  $J/kg$  ( $2,46 \cdot 10^6$ ); la résistance aérodynamique,  $r_a$  (s/m), a été estimée à l'aide de l'équation proposée par Monteith (1965) :  $r_a = (l/(k^2 u)) (\ln(z-d)/z_0)^2$  avec  $k$  - constante de von Karman (0,39);  $u$  - vitesse moyenne du vent à 2 m de la surface du sol (m/s);  $z$  - niveau considéré (m);  $z_0$  - longueur de rugosité (m) et  $d$  - hauteur du déplacement (m). Les paramètres  $d$  et  $z_0$  ont été obtenus à partir des formules proposées par Thom (1971) :  $d = 0,75 h$  et  $z_0 = 0,1 h$  où  $h$  = hauteur du peuplement (m). Les paramètres météorologiques journaliers nécessaires à l'estimation de l'ETP proviennent de la station météorologique de Fontainebleau-Ville (température moyenne de l'air, précipitations incidentes) et de celle de la Minière, près de Versailles (température de rosée, vitesse du vent, pression atmosphérique, rayonnement net).

Nous avons mesuré  $R$ ,  $P_i$ ,  $P_s$  et  $E_c$  du 29 janvier 1981 au 21 décembre 1983. Pour les phases sans feuilles, les mesures sont faites tous les 20 ou 30 jours; pour les phases avec feuilles, toutes les semaines. Les valeurs de l'évapo-transpiration potentielle (ETP) ont été calculées pour chaque jour et cumulées sur les durées correspondant aux intervalles de mesures.

### Dispositif expérimental (Fig. 1)

#### Rétention en eau du sol (R)

Nous avons utilisé une sonde à neutrons de type «Solo» mise au point au Centre d'études nucléaires de Cadarache, en utilisant les courbes d'étalonnage établies par Fardjah (1978) par la méthode gravimétrique. Le dispo-

sitif expérimental permettant l'emploi de la sonde est constitué de 9 tubes (Fig. 1) en durallumin ( $\varnothing$  41-45 mm) descendant jusqu'à la dalle calcaire; au niveau de la station d'étude, cette dalle calcaire n'est pas plane : sa profondeur varie entre 50 et 90 cm. Les mesures sont effectuées tous les 10 cm à partir de la surface du sol jusqu'au fond des tubes. Nous avons compté 2 fois le nombre de neutrons thermiques pendant 20 secondes; si les valeurs des deux mesures différaient de plus de 10 (soit une erreur relative allant de 5% à la capacité au champ à 15% au point de flétrissement permanent), elles ont été répétées jusqu'à stabilisation des résultats. La somme des rétentions en eau (en mm) de tous les niveaux d'un tube constitue la réserve en eau du profil au niveau du tube. Les valeurs de  $R_{CC(i)}$  ont été déterminées pour chaque niveau ( $i$ ) de chacun des tubes à partir des mesures de rétention en eau pendant les phases sans feuilles (à transpiration nulle) sur les trois ans d'expérience. Pour estimer  $R_{PPF(i)}$ , nous avons repris les valeurs de rétention en eau les plus faibles observées durant ces 3 années d'expérimentation. Nous avons obtenu la  $RU_{(i)}$  à partir de la différence entre  $R_{CC(i)}$  et  $R_{PPF(i)}$ ; la somme des  $RU_{(i)}$  d'un tube rend compte de  $RU$  du profil au niveau de chaque tube (Tableau I); et au niveau de l'ensemble des 9 profils, nous obtenons les valeurs moyennes suivantes : profondeur du sol = 70 cm,  $R_{CC} = 167,6$  mm,  $R_{PPF} = 63,4$  mm, soit  $RU = 104,2$  mm.

#### Précipitations incidentes ( $P_i$ )

Les relevés journaliers de  $P_i$  proviennent de la station météorologique de Fontainebleau-Ville, à 2 km de la station d'étude; ils ont été obtenus à l'aide d'un pluviomètre de type «association» (surface réceptrice de 400  $cm^2$ ) disposé à 1,50 m au-dessus du sol.

#### Précipitations au sol ( $P_s$ )

Les précipitations au sol ont été recueillies à l'aide de 64 pluviomètres fixes de diamètre 87,7 mm (16 groupes de 4) disposés régulièrement sur la placette d'étude (Fig. 1) et constituant une surface totale de réception de 3 866  $cm^2$ . Comme valeur représentative de l'ensemble du peuplement, nous avons utilisé la

moyenne arithmétique des hauteurs d'eau des 64 pluviomètres.

### *Écoulement le long des troncs (Ec)*

Nous avons entouré le tronc d'une gouttière en matière plastique étanche en forme d'hélice débutant à 1,30 m du sol et s'en arrêtant à 0,50 m, hauteur à laquelle le volume d'eau qui s'écoule par la gouttière est recueilli. Nous avons mesuré cet écoulement sur 2 arbres différant par leur circonférence à 1,30 m (1,58 m et 1,08 m) et par la surface de la projection verticale au sol de leur couronne (61,5 m<sup>2</sup> et 12,5 m<sup>2</sup>) (Fig. 1). Ec, exprimé en hauteur d'eau, est rapporté à la surface des projections verticales des couronnes des 2 arbres.

## Résultats et discussion

### *Rétention en eau du sol (R) et transpiration (T)*

La méthode du bilan permet d'apprécier la transpiration du peuplement (équations

(4), (5) et (6)) car on peut négliger l'évaporation de l'eau du sol, la litière de feuilles supprimant cette évaporation (Fardjah et Lemee, 1980). Nous discuterons ici seulement des valeurs de la transpiration issues des équations (5) et (6), soit lors des périodes de dessèchement à drainage nul, afin de pouvoir comparer nos valeurs à celles obtenues ailleurs. Nous n'utilisons pas l'équation (4), dont l'application à la forêt donne des résultats contestés (Morton, 1984), la valeur de la transpiration étant déduite de celle de l'évapo-transpiration potentielle «gazon» (mise au point pour une végétation de petite taille). De la fin d'accroissement en surface jusqu'au début de la chute des feuilles en 1981, 1982 et 1983, lors des périodes végétatives ( $LAI = LAI_{max}$ ) qui ont duré en moyenne 154 jours (respectivement 158, 148, 156 jours), le peuplement a transpiré en moyenne 288,4 mm d'eau par an (284,2 à 339,8 mm/an), ce qui représente une moyenne journalière de 1,63-2,15 mm/j (valeur calculée à partir du cumul sur la période végétative) (Tableau II). Ambros

**Tableau II.** Précipitations au sol (Ps), interception nette (In), écoulement le long des troncs (Ec) et transpiration (T). Valeurs cumulées durant les phénophases sans feuilles et avec feuilles du 29 janvier 1981 au 16 décembre 1983. Ensemble du peuplement.

Année	$P_i$ mm	$P_s$ mm (% de $P_i$ )	$Ec$ mm (% de $P_i$ )	$In$ mm (% de $P_i$ )	$T$ mm (% de $P_i$ )
Phase feuillée ( $LAI = LAI_{max}$ )*					
1981	513,3	343,7 (67,0)	0,5 (0,1)	169,1 (32,9)	339,8 (66,2)
1982	322,5	223,3 (69,2)	0,3 (0,1)	98,9 (30,7)	241,1 (74,8)
1983	297,3	174,4 (58,7)	0,3 (0,1)	122,6 (41,2)	284,2 (95,6)
Total	1 133,1	741,4 (65,4)	1,1 (0,1)	390,6 (34,5)	865,1 (76,4)
Phase sans feuilles ( $LAI = 0$ )					
1981	188,7	129,4 (68,6)	1,9 (1,0)	57,4 (30,4)	*
1982	395,2	307,9 (77,9)	3,9 (1,0)	83,4 (21,1)	*
1983	477,7	376,5 (78,8)	4,8 (1,0)	96,4 (20,2)	*
Total	1 061,6	813,8 (76,7)	10,6 (1,0)	237,2 (22,3)	*
Total sur 3 ans (avec les phases intermédiaires)					
	2 515,3	1 775,8 (70,6)	15,1 (0,6)	724,4 (28,8)	*

\* 1981, du 15 mai au 19 octobre (158 jours); 1982, du 19 mai au 13 octobre (148 jours); 1983, du 18 mai au 20 octobre (156 jours).

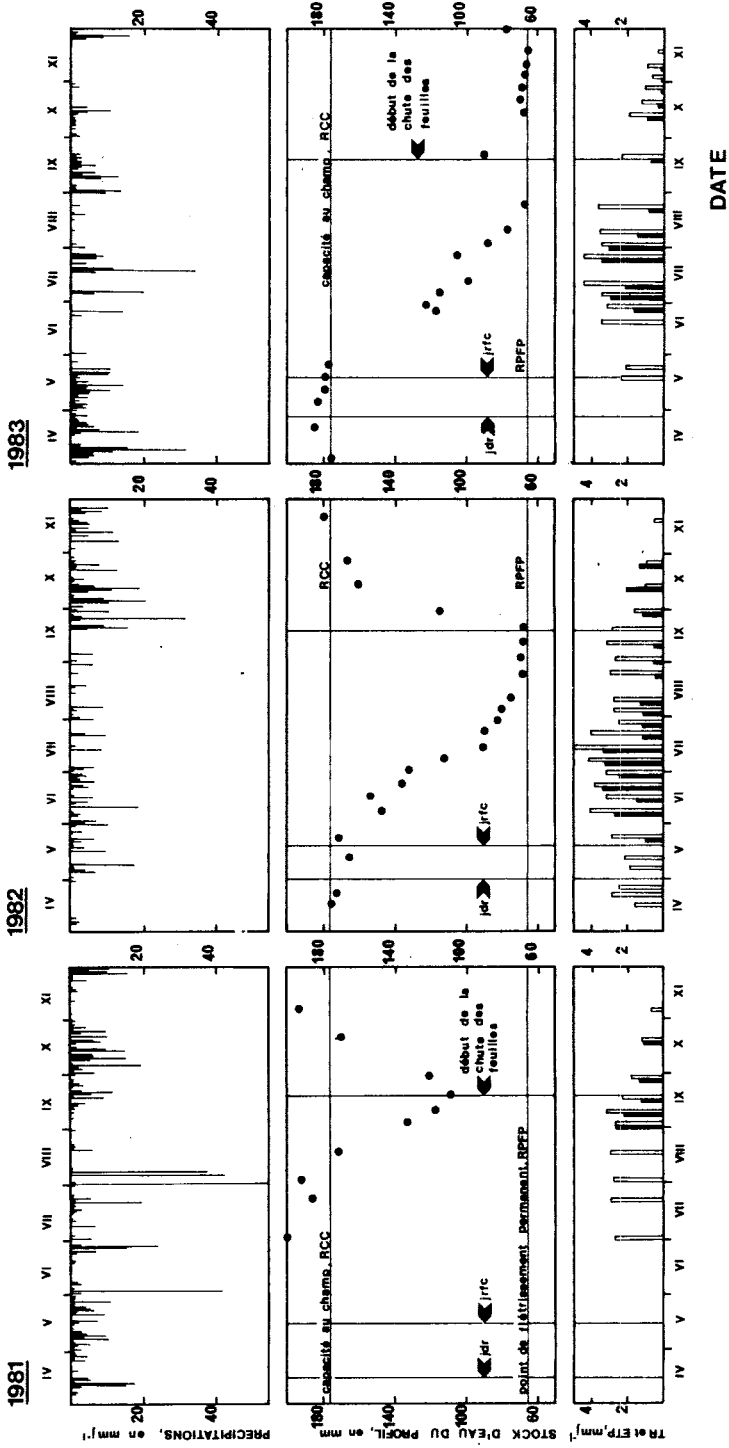


Fig. 3. Evolution de la réserve en eau du sol (R). Valeurs moyennes pour l'ensemble du peuplement durant les années 1981, 1982 et 1983 (jdr : jour du débourrement; jrc : jour de la fin d'accroissement en surface des feuilles); RCC : capacité au champ; RPPF : point de fétissement permanent).



(1978), utilisant la même approche pour une chênaie des Carpathes (*Quercus pedunculata*, hauteur du peuplement 23 à 25 m), avec une période végétative de 160 à 178 jours, obtient une transpiration annuelle de 250 à 320 mm (1,64 à 2,02 mm/j) avec des précipitations incidentes de 700 à 775 mm/an, donc proches de celles de Fontainebleau. Aussenac et Granier (1979) obtiennent pour une futaie mélangée de *Quercus petraea* et *Fagus silvatica*, à l'est de la France, une transpiration de 254 à 300 mm/an ( $P_i = 700$  mm/an). Roberts (1983) obtient une transpiration annuelle de 320 à 327 mm, pour *Quercus petraea*. Nous obtenons des valeurs moyennes journalières maximales de 3,2-3,4 mm/j, et ce, pour les mois de juillet, alors qu'il n'y a pas de contrainte hydrique (rétention en eau du sol supérieure à 70% de  $R_{CC}$ ). Nous rappellerons que, d'après Rutter (1968) le déficit hydrique est (a) négligeable ou faible si la rétention en eau du sol est supérieure à 50% de RU; (b) modéré si cette rétention est inférieure à 50% de RU; (c) sévère si on atteint le point de flé-

trissement pendant au moins 30 jours. Ladefoged, in Aussenac (1977), estime la transpiration journalière maximale de *Quercus petraea*, sans contrainte hydrique, à 3,3 mm/j, valeur proche de nos 3,4 mm/j. La transpiration évolue (moyenne sur deux ans : 1982 et 1983) depuis la 3<sup>e</sup> décade de mai ( $T = 1,1$  mm/j) (époque correspondant à l'arrêt d'accroissement en surface des feuilles) jusqu'au début juillet ( $T = 3,2-3,4$  mm/j). Ces variations sont fonction à la fois des facteurs climatiques (ETP) et des caractéristiques physiologiques de l'espèce. Pour dissocier leurs influences respectives, nous avons comparé les valeurs de la transpiration aux valeurs de la demande évaporative de l'atmosphère calculées selon la formule de Penman (1948). On observe chaque année des valeurs importantes de réserve en eau du sol au printemps puis une diminution de celle-ci au cours de l'été, et, en général, une recharge à l'automne (sauf en 1983). En 1981, l'été fut humide avec notamment d'importants orages début août; le déficit hydrique a commencé vers la mi-août et a été particulièrement inten-

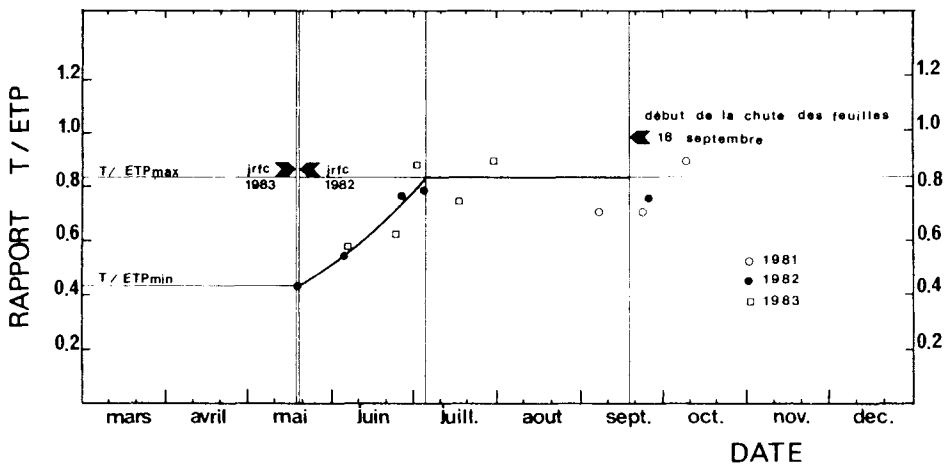


Fig. 4. Evolution du rapport T/ETP en période de déficit hydrique négligeable ou faible. Valeurs moyennes pour l'ensemble du peuplement durant les années 1981, 1982 et 1983 (jrfc : jour de la fin d'accroissement en surface des feuilles).

se à la mi-septembre, provoquant une chute de la transpiration par rapport à l'ETP. En 1982, l'été fut sec, le déficit hydrique a commencé dès juin et le point de flétrissement permanent a été atteint du 20 août au 15 septembre. En 1983, la situation a été comparable, avec toutefois des pluies plus importantes en juillet, et surtout un déficit hydrique permanent jusqu'à la fin novembre. Le bas de la Figure 3 et la Figure 4 permettent de comparer les variations de la transpiration et de l'ETP de la fin mai (après la fin de croissance des feuilles) jusqu'au début juillet, avant que le déficit hydrique du sol ne devienne trop important (Fig. 4) : le rapport T/ETP évolue d'une valeur de 0,44 à un maximum d'environ 0,83.

*Variations du rapport T/ETP lorsque le déficit hydrique est négligeable ou faible (Figs. 3 et 4).* Avec une bonne disponibilité en eau sur toute la profondeur du profil et avec une ETP élevée favorisant la transpiration (ETP = 4,3 mm/j), le rapport T/ETP augmente du jour correspondant à la fin d'accroissement en surface des feuilles (18 mai 1982 et 1983, T/ETP = 0,44) jusqu'au début du mois de juillet (5 juillet T/ETP = 0,83) pour ensuite rester plus ou moins constant. Rauner (1976) obtient un rapport T/ETP égal à 0,68 pour une chênaie (*Quercus pedunculata*) d'environ 120 ans, valeur que nous supposons être une valeur moyenne (les variations de T/ETP ne sont pas précisées); Aussenac et Granier (1979) obtiennent un rapport T/ETP compris entre 0,78 et 0,84 pour une futaie mélangée de chênes et de hêtres dans l'est de la France en 1977 avec un déficit hydrique faible ou nul; nous retiendrons ces valeurs comme proches de la valeur maximale de notre rapport T/ETP = 0,83. Le déficit hydrique étant négligeable et l'indice foliaire maximal, l'augmentation du rapport T/ETP qui s'effectue pendant 48 jours, ne peut s'expliquer que par une modification des caractéristiques physiolo-

giques de *Quercus petraea* durant cette période, et en particulier, par l'évolution du comportement des stomates (Nizinski *et al.*, 1989). Aussenac et Granier (1979) ont observé sur *Quercus petraea* et *Fagus sylvatica* dans des conditions de déficit hydrique faible ou nul, un manque «d'efficacité» transpiratoire du couvert au début et à la fin de la phénophase feuillée.

*Variations du rapport T/ETP avec le déficit hydrique (Figs. 3 et 5).* (a) 1981 est une année humide (1 085 mm, soit 51% de plus que la moyenne annuelle de 101 ans) avec une période légèrement déficitaire en précipitations incidentes du 10 août au 20 septembre, qui a provoqué une brève période de faible déficit hydrique : la rétention en eau du sol est passée de 71,1% à 64,1% de  $R_{CC}$ , et le rapport T/ETP de 0,7 (du 3 au 9 septembre) à 0,52 (du 10 au 17 septembre). (b) En 1982, les précipitations incidentes sont légèrement supérieures à la moyenne (10% de plus), mais pendant la phase feuillée elles sont inférieures de 20% à la moyenne; le mois d'avril est particulièrement sec (précipitations inférieures de 80% à la moyenne); ainsi, pendant toute la phase feuillée, la rétention en eau du sol est restée inférieure à sa capacité au champ; à partir de la 2<sup>e</sup> décennie de juillet, la rétention en eau du profil diminue de 69,6% de  $R_{CC}$  (du 1<sup>er</sup> au 7 juillet) jusqu'à 38,8% de  $R_{CC}$  (du 12 au 19 septembre), valeur proche du point de flétrissement permanent ( $R_{PEP} = 36,95\%$  de  $R_{CC}$ ), cette évolution est parallèle à la chute du rapport T/ETP de 0,79 à 0,2. (c) En 1983, année proche de la moyenne (744,4 mm, la moyenne étant de 720,4 mm), la période allant du mois d'août jusqu'à la fin de l'année est fortement déficitaire en précipitations incidentes (54% de moins que la moyenne), la rétention en eau du sol passe de 62,7% de  $R_{CC}$  (du 20 au 26 juillet) à 38,3% de  $R_{CC}$  (du 10 au 17

novembre), et dans le même temps le rapport T/ETP de 0,77 à 0,2.

Nos résultats illustrent la corrélation existant entre l'épuisement de la rétention en eau du sol et la diminution du rapport T/ETP, phénomène qui se manifeste en moyenne à partir de la mi-juillet jusqu'à la mi-septembre, sachant par ailleurs que l'ETP est élevée. En analysant l'évolution du rapport T/ETP en fonction de R (Fig. 5) nous pouvons observer que le rapport T/ETP reste sensiblement constant de la capacité au champ jusqu'à une valeur critique de R correspondant à 65% de  $R_{CC}$

puis en deçà de ce seuil, le rapport T/ETP diminue jusqu'à s'annuler pour  $R = R_{PPF}$ . Rauner (1976) pour une chênaie (*Quercus robur*) de 40 à 50 ans sur chernozem obtient une relation similaire, mais avec un seuil critique qui se situe de 31 à 44% de RU. Aussenac et Granier (1984) (*Pseudotsuga menziesii*), utilisant les mêmes méthodes de calcul de T et ETP que nous, observent une première phase de diminution rapide du rapport T/ETP de la capacité au champ jusqu'à 67% de RU puis une seconde phase de diminution plus lente en deçà de 67% de RU, phases qu'ils interprètent comme expression de la

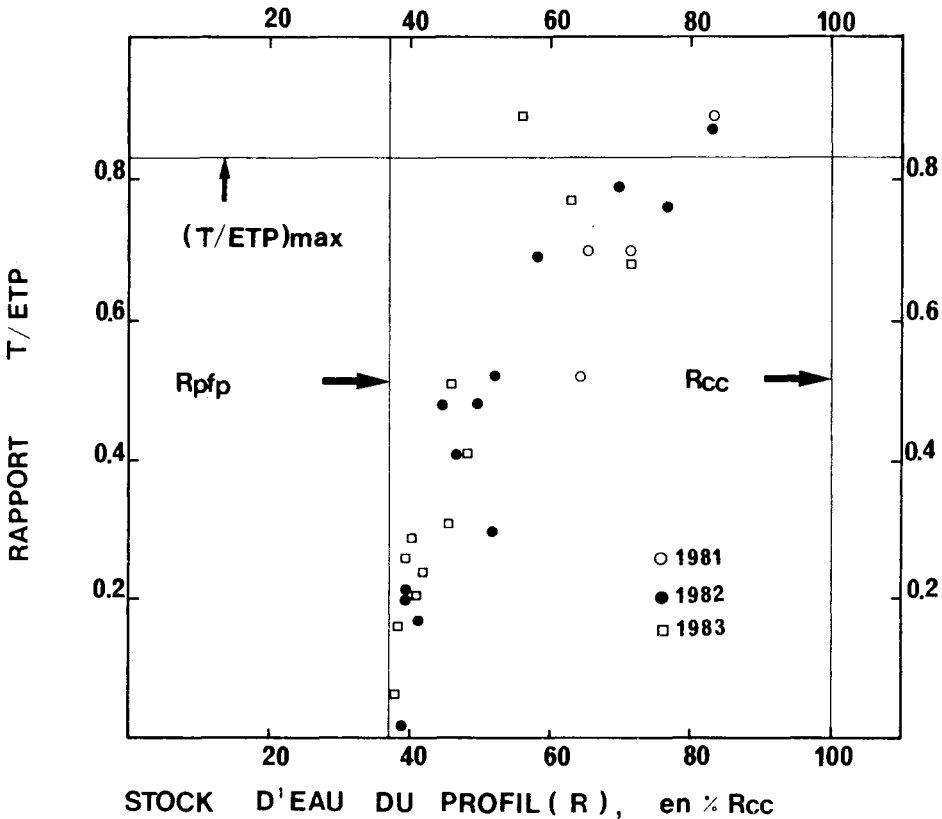


Fig. 5. Evolution du rapport T/ETP en fonction de la réserve en eau du sol (R). Valeurs moyennes pour l'ensemble du peuplement durant les années 1981, 1982 et 1983 (capacité au champ,  $R_{CC} = 167,6$  mm; point de flétrissement permanent,  $R_{PPF} = 63,4$  mm; réserve utile, RU = 104,2 mm).

régulation stomatique spécifique à *Pseudotsuga menziesii*.

#### Précipitations au sol ( $P_s$ )

Les précipitations au sol obtenues pour l'ensemble du peuplement pendant les 3 années d'études (Tableau II) s'élèvent à 70,6% des précipitations incidentes ( $P_i$ ); elles sont sensiblement plus importantes lors de la phase sans feuilles (76,6% de  $P_i$ ) que lors de la phase feuillée (65,5% de  $P_i$ ), soit 11,1% de différence qui s'explique par le changement de recouvrement du sol par la cime des arbres, de 0,34 en hiver à 0,76 en été (Nizinski et Saugier, 1988); cette évolution du recouvrement est parallèle à l'augmentation de la rétention en eau du couvert, de 2,2 mm en hiver à 3,04 mm en été. Nous enregistrons une variabilité interannuelle du pourcentage de  $P_i$  que représente  $P_s$  pour une même phénophase : par exemple pour la phase avec feuilles, en 1983, avec  $P_i = 297,3$  mm,  $P_s = 58,7\%$  de  $P_i$ ; en 1982, avec  $P_i = 321,5$  mm,  $P_s = 69,5\%$  de  $P_i$ . Nous retrouvons le fait que le rapport  $P_s/P_i$  augmente avec  $P_i$ , déjà mentionné par Rapp et Ibrahim (1978). Nos valeurs des précipitations au sol sont du même ordre de grandeur que celles obtenues sous chênaie à l'Est de la France par Aussenac (1968, 1970, 1975, 1977); Aussenac et Boulangeat (1980) ( $P_s = 70$  à 80% de  $P_i$  en phase sans feuilles;  $P_s = 65$  à 70% de  $P_i$  en phase avec feuilles), et en Belgique par Schnock (1970) ( $P_s = 73$  à 81%  $P_i$  en phase sans feuilles;  $P_s = 66$  à 77% de  $P_i$  en phase avec feuilles pour une forêt mélangée où *Quercus pedunculata* est l'espèce dominante).

#### Interception nette ( $I_n$ )

La moyenne de l'interception pour les années 1981, 1982, 1983, années à régi-

me pluviométrique très différent, s'élève à 28,7% de  $P_i$  (Tableau II), elle est du même ordre que celles observées par Aussenac (1968, 1970, 1975, 1977); Aussenac et Boulangeat (1980) (dans des chênaies à l'est de la France) et Schnock (1970) (dans des chênaies mélangées en Belgique). Nous retrouvons, pour l'interception, l'incidence de l'absence ou de la présence des feuilles constatée pour les précipitations au sol :  $I_n$  représente en moyenne 22% de  $P_i$  en phase défeuillée et 34% en phase feuillée. Il existe par ailleurs une grande variabilité interannuelle pour une même phénophase, par exemple pour la phase feuillée : en 1982, avec  $P_i = 321,5$  mm,  $I_n = 30,4\%$ ,  $P_i$ ; en 1983, avec  $P_i = 297,3$  mm,  $I_n = 41,2\%$   $P_i$ . L'analyse des régimes des pluies des années 1982 (averses abondantes) et 1983 (averses peu abondantes) fait apparaître une corrélation négative entre le pourcentage de pluie interceptée et l'intensité de ces pluies.

#### Écoulement le long des troncs ( $E_c$ )

Mesuré pendant 2 années (du 11 mars 1982 au 16 décembre 1983) sur deux arbres (Tableau II), il représente seulement 0,62% des précipitations incidentes (ordre de grandeur rendant acceptable la faiblesse de l'échantillonnage). Comme pour les précipitations au sol, l'écoulement le long des troncs est plus important lors de la phase sans feuilles ( $E_c = 1\%$   $P_i$ ) que lors de la phase feuillée ( $E_c = 0,12\%$   $P_i$ ), différence qui s'explique toujours par la présence de l'écran végétal. De même que pour les précipitations au sol, l'écoulement le long des troncs dépend de l'intensité des précipitations incidentes, phénomène que nous n'avons pas quantifié; nous constatons seulement (phase sans feuilles), que pour  $P_i = 37,9$  mm avec averses abondantes,  $E_c = 1,4\%$   $P_i$  (1983); alors que pour  $P_i = 56,2$  mm avec averses

peu abondantes  $E_c = 0,33\%$   $P_i$  (1982). La dynamique de l'écoulement le long des troncs dépend aussi de la rugosité de l'écorce des branches et des troncs (rétention en eau allant de 2,2 mm en hiver à 3,04 en été) (Nizinski et Saugier, 1988).

## Conclusion

Les grandeurs caractéristiques de la chênaie étudiée, les précipitations au sol, l'interception nette, l'écoulement le long des troncs et la transpiration (Tableau II) évoluent de la même façon que les grandeurs caractéristiques de peuplements feuillus de l'est de la France et de la Belgique. De façon générale, les valeurs de la transpiration (ou du rapport T/ETP) de *Quercus petraea* sont comparables à celles de nombreuses espèces arborescentes caducifoliées européennes (Rutter, 1968), avec en moyenne  $T = 333$  mm/an, soit environ 50% de l'ETP annuelle. Ce phénomène ressort de la comparaison de la dynamique de l'eau sous la chênaie étudiée et sous la hêtraie (Fardjah et Lemée, 1980; Saugier *et al.*, 1985) : exprimée en mm/an, la transpiration s'élève à 288,4 mm/an (284,2 à 339,8 mm/an) pour le chêne et de 290-316 mm/an pour le hêtre; exprimée en mm/j, elle s'élève à 2,9 mm/j pour le chêne et à 3 mm/j pour le hêtre lors des périodes sans contrainte hydrique et à 1,2 mm/j pour le chêne et à 1,1 mm/j pour le hêtre lors des périodes avec contrainte hydrique. Ces deux peuplements, distants de 2 km, sont situés sur le même type de sol (sols lessivés), la «réserve utile» du sol de la chênaie est de 104,2 mm, celle de la hêtraie de 165 mm. Ainsi ces 2 espèces présentent des rapports T/ETP (et donc ici T) semblables pour une période donnée, alors que leur disponibilité en eau est différente : par exemple, en août 1982 (Saugier *et al.*,

1985), année proche de la moyenne en ce qui concerne les précipitations incidentes, la réserve en eau du sol de la chênaie était proche de  $R_{PPF}$  et la transpiration du chêne tendait vers zéro; mais alors que la réserve en eau du sol de la hêtraie correspondait encore à 30-35% de la «réserve utile», le hêtre a réduit sa transpiration de la même façon que le chêne (même rapport T/ETP = 0,42-46). Ces résultats suggèrent que dans une même zone climatique ou dans des zones climatiques peu différentes, la régulation du flux transpiratoire serait essentiellement dépendante de la plante et ne serait que secondairement dépendante de la «réserve utile», phénomène déjà suggéré par Roberts (1983). Cette régulation du flux transpiratoire, similaire pour les 2 espèces (et pour d'autres espèces caducifoliées), pourrait s'expliquer par une évolution similaire des résistances stomatiques : nous avons suivi sur *Quercus petraea* l'évolution de la morphologie des stomates et de la résistance stomatique (Nizinski *et al.*, 1989). Ainsi, à partir du mois d'août donné en exemple, des dépôts de cire commencent à obstruer les stomates. Il conviendrait d'effectuer les mêmes observations sur *Fagus sylvatica*, en vue de proposer un schéma mécaniste de la régulation du flux transpiratoire.

## Remerciements

Nous remercions MM. B. Legay et J.Y. Pontailleur de leur aide sur le terrain.

## Références

- Ambros Z. (1978) Vodna bilancia lesnych porastov Karpat. *Lesn. Casopis* 24, 3, 203-221  
 Aussenac G. (1968) Interception des précipitations par le couvert forestier. *Ann. Sci. For. (Paris)* 25, 3, 135-156

- Aussenac G. (1970) Action du couvert forestier sur la distribution au sol des précipitations. *Ann. Sci. For. (Paris)* 27, 4, 383-399
- Aussenac G. (1973) Climat, microclimat et production ligneuse. *Ann. Sci. For. (Paris)* 30, 3, 239-258
- Aussenac G. (1975) *Couverts forestiers et facteurs du climat : leurs interactions, conséquences écophysiologicals chez quelques résineux*. Thèse d'Etat, Université de Nancy
- Aussenac G. (1977) Le cycle hydrologique en forêt. In : *Actualités d'Ecologie Forestière* (L. Pesson, éd.), Gauthier-Villars, Paris, pp. 283-307
- Aussenac G. & Ducrey M. (1977) Etude bioclimatique d'une futaie feuillue (*Fagus sylvatica* L. et *Quercus sessiliflora* Salisb.) de l'est de la France. (I) Etude des profils microclimatiques et des caractéristiques anatomiques et morphologiques de l'appareil foliaire. *Ann. Sci. For. (Paris)* 34, 4, 265-284
- Aussenac G. & Granier A. (1979) Etude bioclimatique d'une futaie feuillue (*Fagus sylvatica* L. et *Quercus sessiliflora* Salisb.) de l'est de la France. (II) Etude de l'humidité du sol et de l'évapotranspiration réelle. *Ann. Sci. For. (Paris)* 36, 4, 265-280
- Aussenac G. & Boulangeat C. (1980) Interception des précipitations et évapotranspiration réelle dans des peuplements de feuillus (*Fagus sylvatica* L.) et de résineux (*Pseudotsuga menziesii* Mirb. Franco). *Ann. Sci. For. (Paris)* 37, 2, 91-107
- Aussenac G. & Granier A. (1984) Influence du dessèchement du sol sur le fonctionnement hydrique et la croissance du douglas (*Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco). *Acta Oecol./Oecol. Plant.* 5, 3, 241-253
- Fardjah M. (1978) *Dynamique comparée de l'eau du sol sous futaie de hêtre et en clairière à Calamagrostis epigeios en forêt de Fontainebleau*. Thèse de Docteur-Ingénieur, Université de Paris-Sud, Orsay
- Fardjah M. & Lemée G. (1980) Dynamique comparée de l'eau sous hêtraie et dans des coupes nues ou à *Calamagrostis epigeios* en forêt de Fontainebleau. *Bull. Ecol.* 11, 1, 11-31
- Feodoroff A. (1962) Ressuyage du sol et capacité de rétention pour l'eau. *Ann. Agron. (Paris)* 13, 523-547
- Morton F.I. (1984) What are the limits on forest evaporation ? *J. Hydrol.* 74, 378-398
- Nizinski J. & Saugier B. (1988) Mesures et modélisation de l'interception nette dans une futaie de chênes. *Acta Oecol./Oecol. Plant.* 9, 3, 311-329
- Nizinski J., Morand D. & Saugier B. (1989) Changes in stomatal resistance with leaf age in *Quercus petraea*. Symposium International de l'INRA, 25-30 septembre 1988, Nancy (sous presse)
- Penman H.L., (1948) Natural evaporation from open water, bare soil and grass. *Proc. R. Soc. Lond. A*, 193, 120-145
- Pontailier J.Y. (1979) *La régénération du hêtre en forêt de Fontainebleau, ses relations avec les conditions hydriques stationnelles*. Thèse de 3<sup>e</sup> cycle, Université de Paris-Sud, Orsay
- Rapp M. & Ibrahim M. (1978) Egouttement, écoulement et interception des précipitations par un peuplement de *Pinus pinea* L. *Oecol. Plant.* 13, 321-330
- Rauner J.L. (1976) Deciduous forests. In : *Vegetation and Atmosphere* (J.L. Monteith, éd.), vol. 2, Academic Press, London, pp. 241-264
- Roberts J. (1983) Forest transpiration : a conservative hydrological process ? *J. Hydrol.* 66, 133-141
- Rutter A.J. (1968) Water consumption by forests. In : *Water Deficits and Plant Growth*. (T.T. Kozlowski, éd.) vol. 2, Academic Press, New York, pp. 23-84
- Saugier B., Halldin S., Pontailier J.Y. & Nizinski J. (1985) Bilan hydrique de forêts de chêne et de hêtre à Fontainebleau : Mesures et modélisation. *Rev. Palais Découverte* 13, 130, 187-200
- Schnock G. (1970) *Le bilan d'eau et ses principales composantes dans une chênaie mélangée calcicole de Haute-Belgique (bois de Virelles Blaimont)*. Thèse d'Etat, Université Libre de Bruxelles
- Thom A.S. (1971) Momentum absorption by vegetation. *Quart. J. R. Meteorol. Soc.* 97, 414-428
- Van Bavel C.H.M. (1966) Potential Evaporation : The Combination Concept and Its Experimental Verification. *Water Resour. Res.* 2, 3, 455-467