

BILAN DE L'EAU ET EVAPOTRANSPIRATION DE FORETS FEUILLUES

PONTAILLER J.Y., NIZINSKI J., SAUGIER B.

Laboratoire d'Ecologie Végétale, Université de Paris-Sud
91405 ORSAY CEDEX

I - INTRODUCTION

La consommation en eau des forêts a été beaucoup étudiée à cause de son importance dans le bilan hydrique régional ; mais c'est seulement depuis 10-15 ans que l'on a réalisé la nécessité de distinguer clairement l'évaporation de l'eau libre interceptée par la forêt de sa transpiration (STEWART, 1983). Toute végétation intercepte les précipitations incidentes, mais l'évaporation de l'eau interceptée est particulièrement intense pour une forêt à cause du fort brassage turbulent qui intervient au sommet de la voûte forestière. Il en résulte des taux instantanés d'évaporation absorbant une énergie pouvant atteindre 2 ou 3 fois le rayonnement net (CALDER, 1976 ; GASH et al., 1980).

En revanche, la transpiration d'une forêt n'est pas très différente de celle d'une prairie ou d'une culture ; elle lui est même souvent inférieure à cause du long trajet que doit parcourir l'eau pour aller du sol aux feuilles (MORTON, 1984).

La plupart des études sur le bilan hydrique des forêts ont été réalisées sur résineux. Il nous a paru important d'étudier des forêts feuillues bien représentées en Europe Occidentale, pour préciser notamment le rôle des variations d'indice foliaire dans le bilan hydrique. Cette étude de bilan hydrique a commencé en 1980 à l'occasion d'une Action Thématique Programmée du C.N.R.S. sur les écosystèmes forestiers et s'est poursuivie avec le financement de l'Action Thématique Programmée "Eau" de l'I.N.R.A.

Notre but a d'abord été d'établir les termes usuels du bilan hydrique : précipitations à découvert et sous forêt, écoulement le long des troncs, réserve en eau du sol à la sonde à neutrons. Nous avons ensuite cherché à modéliser l'interception nette et la transpiration pour permettre une généralisation des

Fonds Documentaire IRD



010024103

Fonds Documentaire IRD

Cote : Bx 24103 Ex: unique

mesures obtenues. Ceci a permis de relier les mesures de bilan hydrique à des mesures physiques (capacité de rétention en eau des feuilles et de l'écorce, indice foliaire) et physiologiques (résistance stomatique et potentiel hydrique des feuilles). Un accent particulier a été mis sur la prévision de la phénologie foliaire du chêne : date de débourrement, croissance de la surface foliaire, sénescence et chute des feuilles.

II - LE MILIEU

1- Les stations

Les deux stations sont proches de la Route Nationale 7, au niveau du carrefour du Grand Veneur, au Nord-Ouest de la forêt de Fontainebleau.

La chênaie du Gros Fouteau (parcelle 267) est située à proximité immédiate du carrefour du Gros Hêtre, elle est âgée de 110 ans environ. Une coupe, la dernière sans doute avant l'exploitation, a éliminé les individus mal conformés (hiver 1978-1979).

La parcelle a une surface terrière* de 29 m²/hectare. Le chêne sessile est l'unique occupant de la strate arborescente, d'une hauteur moyenne de 29 mètres, tandis que le hêtre est fortement dominant dans la strate arbustive. La strate herbacée est discrète, essentiellement composée des *Brachypodium silvaticum*, *Descampsia flexuosa*, *Melica uniflora*, *Euphorbia amygdaloïdes*, *Ruscus aculeatus* (recouvrement 35 % environ). L'indice foliaire ou L.A.I.** est de 5,2 (4,2 pour les chênes, 1 pour le sous-étage de hêtre).

L'Office National des Forêts a mis à notre disposition, à partir de l'hiver 1980-1981, un enclos de 275 mètres carrés de superficie sur la placette de notre choix.

* Surface terrière : surface des sections horizontales des troncs à 1,30 m de hauteur rapportée à une superficie donnée.

** L.A.I. est l'abréviation de Leaf Area Index.

L'autre Station est située dans la réserve biologique intégrale de la Tillaie, parcelles 270-271 du nouvel aménagement. C'est une hêtraie presque pure dont la structure n'est pas sans présenter d'analogies avec celle d'une futaie jardinée. La hauteur moyenne du peuplement est de 29 mètres avec des dominants de 35 mètres de haut, la surface terrière de la placette est de 35,4 m²/ha. La strate herbacée est très discrète, *Ruscus aculeatus* y est fortement dominant. Le L.A.I. est de 6. Depuis une quinzaine d'années, cette réserve a fait l'objet de multiples travaux : structure et dynamique du peuplement végétal, production primaire, cycles biogéochimiques, peuplement animal et production secondaire. Ces travaux ont été résumés par G. LEMEE (1978).

L'accès aux réserves intégrales étant interdit au public, le dispositif n'a pas été clôturé.

2- Les sols

a) Description

Les deux stations, situées à 1500 m l'une de l'autre, ont pratiquement le même sol. C'est un sol lessivé formé sur des sables silicieux éoliens épais de 60 cm à 1 mètre et reposant sur une dalle de calcaire de Beauce, fragmentée et partiellement décomposée en surface. Il comprend cinq horizons bien différenciés :

1. Un horizon humifère A₁, gris-brun, épais de 5 à 10 cm et contenant 2 à 5 % de matière organique.
2. Un horizon sableux lessivé A₂, jaune clair, de 20 à 50 cm d'épaisseur.
3. Un horizon de transition A₂B, enrichi irrégulièrement en argile et en fer, épais d'une dizaine de cm.
4. Un horizon d'accumulation B, brun-rouge, compact, enrichi en argile (15-20 %) et en fer, épais de 10 à 35 cm.
5. Un horizon BC, sableux, clair, marque la transition avec la dalle de calcaire de Beauce. Il est épais de 10 à 20 cm.

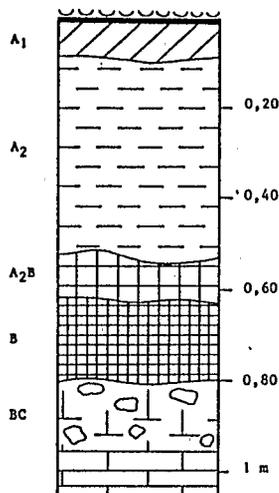


Figure 1 : Profil moyen
Representative soil profile

L'ensemble du profil reste essentiellement sableux fin avec une fraction granulométrique 0,1 à 0,2 mm nettement dominante (45 à 60 %) caractéristique des sables de Fontainebleau de l'étage stampien dont le dépôt éolien est originaire.

b) Caractéristiques hydriques

Les caractéristiques physiques et hydriques de ce sol sont résumées dans le Tableau 1. L'humidité à la capacité au champ a été déterminée in situ, en hiver, par la méthode des paliers (RODE, 1960). Des résultats très voisins ont été obtenus au laboratoire par la méthode de ressuyage sur terre sèche (FEODOROFF, 1962) sur des échantillons non remaniés. L'humidité au point de flétrissement permanent a été déterminée au laboratoire à l'aide d'une presse à membrane (à 16 bars) ; ces valeurs d'humidité au point de flétrissement permanent ont pu être largement confirmées par prélèvement et pesée d'échantillons non remaniés, en période de flétrissement de la végétation (à Fontainebleau en juillet 1976 et septembre 1982).

Tableau 1 : Caractéristiques hydriques et physiques des sols
Hydric and physical-soil properties

Horizons	Capacité au champ % pondéral	Point de flétrissement % pondéral	Densité apparente	Argile* %	Matière organique %
A ₁	16,5	4,7	1,30	3	2 - 4,5
A ₂	10,8	2,8	1,41	3	0,5
A ₂ B	14	6,1	1,47	11,5	0,35
B	16 - 19	7,4 - 8	1,63	17 - 21	0,15
BC	14,6	6,5	1,54	5	0,1

* sans granulométrique

Pour ce qui est de la détermination de l'humidité à la capacité au champ et au point de flétrissement, la bonne concordance entre les mesures in-situ et les mesures de laboratoire peut s'expliquer :

- par l'utilisation, au laboratoire, d'échantillons non remaniés (prélevés dans les cylindres),
- par la nature peu argileuse des sols ainsi que par la relative homogénéité des horizons pédologiques.

les données du Tableau 1 montrent que les horizons A₁ (humifère) et B (argileux) ont le plus fort contenu en eau. C'est également dans ces horizons que la densité des racines fines est la plus forte, tant pour le hêtre (PONTAILLER, 1979) que pour le chêne (NIZINSKI, 1986). Nous n'avons pas observé de racines dans la dalle de calcaire, ce qui permet de négliger l'absorption racinaire sous l'horizon BC. Par ailleurs, la texture essentiellement sableuse du sol permet de négliger les remontées d'eau par capillarité lorsque la surface du sol se dessèche. On a donc un régime hydrique à phases nettement séparées : lorsque l'ensemble du profil est humide il y a drainage et l'évapotranspiration est maximale. Lorsque le sol se dessèche, le drainage cesse et on peut calculer l'évapotranspiration réelle à partir des variations de stock d'eau du sol.

L'absence du drainage n'a pu être vérifiée en phase feuillée, par contre, en phase défeuillée, on remarque à l'occasion d'épisodes sans pluies,

que l'humidité du sol se stabilise rapidement, ce qui montre bien la très faible intensité du drainage après la phase de ressuyage rapide.

3- Le mésoclimat de Fontainebleau

Il s'agit d'un climat aux tendances océaniques subissant toutefois des influences continentales plus ou moins marquées.

Les précipitations sont réparties régulièrement sur l'ensemble de l'année et le total annuel excède de 17 % celui des stations voisines du bassin parisien (DOIGNON, 1976).

La moyenne thermique générale est de 10,2 °C, elle est légèrement plus basse qu'à l'extérieur de la forêt.

L'évapotranspiration potentielle (ETP) correspond à la demande évaporative imposée au système sol-plante par les facteurs climatiques (rayonnement, température, humidité, vent) qui composent le "pouvoir évaporant de l'air". On peut l'estimer par des formules empiriques résultant d'ajustement statistiques (THORNTHWAITE, 1948 ; TURC, 1963) ou par l'application des lois physiques basées sur des données climatologiques facilement accessibles (PENMAN, 1948, BOUCHET, 1964 ; BROCHET et GERBIER, 1972). A Fontainebleau, l'ETP annuelle est de l'ordre de 670 mm.

A partir de l'ETP (PENMAN) calculée par le B.A.R.M.A.* à Melun et la pluviométrie de la station météo de Fontainebleau, on peut établir le diagramme théorique de la Figure 2. Pour un sol ayant une réserve utile de 135 mm, on met alors aisément en évidence :

- une longue période hivernale de drainage (précipitations supérieures à l'ETP),

* Bureau pour l'application des renseignements météorologiques à l'agriculture et aux activités économiques, éditeur des décades climatologiques de l'ILE de France, BP 206, 78140 Velizy-Villacoublay.

- une utilisation des réserves du sol au printemps et en été (l'ETP devenant supérieure aux précipitations),
- une courte période de déficit en fin de saison de végétation,
- une phase de reconstitution des réserves du sol qui précède la reprise du drainage.

En fait, on observe très souvent des situations qui n'ont rien à voir avec le cas de figure mentionné ci-dessous et que les années "normales" ont en fait un caractère quasi-exceptionnel.

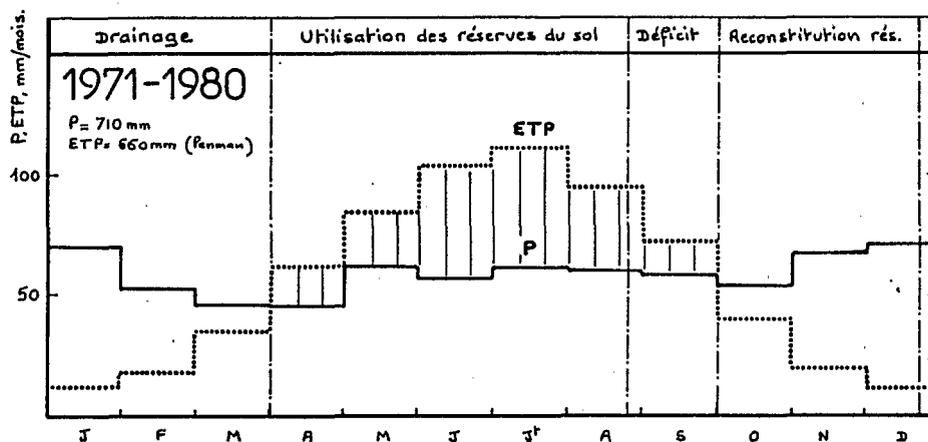


Figure 2 : Bilan hydrique théorique d'un sol lessivé à Fontainebleau (Réserve utile : 135 mm).

Theoretical water balance of a leached soil in Fontainebleau (Available reserve : 135 mm).

III - MATERIEL ET METHODES

Les termes du bilan hydrique d'une forêt sont représentés figure 3 où P représente les précipitations incidentes, E_c l'écoulement le long des troncs, E_g l'égouttement (= précipitations sous forêt), I_n l'interception nette, fraction des précipitations interceptée par les feuilles, les branches et les troncs puis rééaporée.

I_l est l'interception par la litière, R la réserve totale d'eau dans le sol, D le drainage. T_r est la transpiration et E_v l'évaporation à la surface du sol (faible sous litière). On peut distinguer deux évapotranspirations : ETR, l'évapotranspiration réelle du couvert et $ETR_{(s)}$ la composante de l'ETR prove-

nant de l'eau du sol.

De ces divers termes seuls certains sont mesurés directement : les précipitations incidentes P sont mesurées dans une grande clairière à environ 1 km des stations d'étude, à l'aide de 9 pluviomètres d'une surface totale de 507 cm². L'eau d'écoulement E_c est recueillie par des gouttières en spirale disposées autour des troncs (mousse polyuréthane et mastic) ; enfin, l'eau d'égouttement sous futaie est mesurée par des groupes de quatre pluviomètres, ces groupes sont au nombre de 16 sous chêne et de 5 sous hêtre.

Ces mesures permettent de calculer l'interception nette I_n , par la relation suivante :

$$I_n = P - E_c - E_g \quad (1)$$

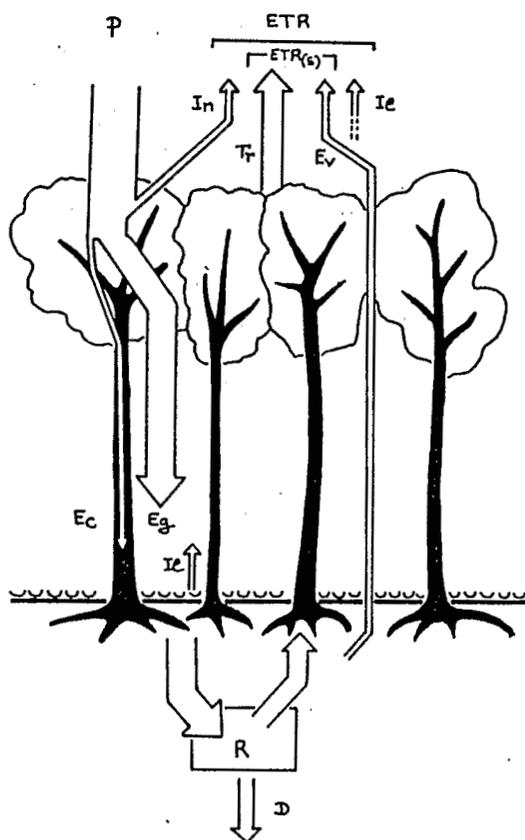


Figure 3 : Eléments d'un bilan d'eau en forêt
Terms of the water balance in forests.

On mesure d'autre part l'humidité du sol par tranches de 10 cm depuis la surface jusqu'à la dalle de calcaire à l'aide d'une sonde à neutrons SOLO 10 fabriquée par le CEA et étalonnée in situ avec des mesures gravimétriques (prélèvement d'échantillons à la tarière et mise en place d'un tube provisoire). Cet étalonnage a été confirmé par expédition d'échantillons au CEA de Cadarache pour détermination de leurs caractéristiques propres de diffusion et d'absorption. Les deux droites d'étalonnage ont rigoureusement la même pente, on n'observe de légères discordances que sur l'ordonnée à l'origine.

La stratification du sol a rendu nécessaire l'utilisation de 5 droites d'étalonnage distinctes correspondant aux cinq horizons pédologiques précédemment décrits.

Le dispositif se compose de 9 tubes d'accès sous chêne et de 4 tubes sous hêtre (tubage aluminium AG3, Ø 41-45 mm), ce qui permet la détermination de R, réserve en eau totale de chaque profil. Du schéma de la figure 3, on peut déduire :

$$P = ETR + \frac{\Delta R}{\Delta t} + D \quad (2)$$

Δt étant l'intervalle entre les mesures, typiquement d'une semaine pendant la période de végétation et de deux semaines en phase défeuillée. Lorsque le sol se dessèche, on peut négliger le drainage et calculer l'ETR à partir des mesures de la pluviométrie et de la variation de stock.

IV - RESULTATS

1- Écoulement, égouttement et interception nette

L'écoulement le long des troncs de hêtre représente environ 4 % des précipitations pendant la phase feuillée et 8 % pendant la phase défeuillée ; ces chiffres sont beaucoup plus faibles pour les troncs de chêne, plus rugueux, avec respectivement 0,5 % et 0,25 % de P. Ils sont comparables aux valeurs obtenues par AUSSENAC (1975) : l'écoulement le long des troncs représente sur un an 7 à 15 % des précipitations pour des hêtraies d'âge varié en Lorraine, et seulement 0,3 % à 1,3 % des précipitations pour des peuplements de chêne

sessile dans le Perche.

L'interception nette est plus importante pendant la phase feuillée et plus importante pour la chênaie que pour la hêtraie (28 % contre 18 % de P pour la phase feuillée). AUSSENAC (1975) trouve respectivement des rapports I_n/P variant de 17 à 28 % pour des hêtraies et de 18 à 25 % pour des chênaies, donc des valeurs du même ordre pour les deux espèces. Ces résultats sont en partie dépendants du régime et de l'intensité des précipitations, une pluie d'orage étant moins interceptée qu'une petite pluie fine et continue. On ne peut les généraliser qu'à l'aide d'un modèle prenant en compte les principaux paramètres intervenant dans l'interception, ce qui est en cours de réalisation au laboratoire.

2- Variation de stock et évapotranspiration

La figure 4 illustre les variations de la réserve en eau du sol en pourcentage de la réserve maximale à capacité au champ, pour la chênaie et la hêtraie pour l'année 1982 (été sec). On remarque que le point de flétrissement permanent est atteint fin août pour la chênaie et n'est pas atteint pour la hêtraie. Ceci est dû essentiellement à une plus faible profondeur de sol dans la chênaie et donc à une réserve utile plus faible. L'ETP et l' $ETR_s (= ETR - I_n)$ pour les deux peuplements sont représentées en bas de la figure 4.

On remarque de faibles ETR_s en avril et début mai à cause d'un indice foliaire insuffisant pendant le débourrement et la croissance des rameaux. En juin et juillet les valeurs d' ETR_s sont élevées (2 à 3,5 mm/j) l'indice foliaire étant maximal et le sol bien humide. Puis les valeurs d' ETR_s diminuent avec la réserve en eau du sol, plus rapidement pour la chênaie que pour la hêtraie, début septembre l' ETR_s est d'environ 0,6 mm/j pour la chênaie et de 1,1 mm/j pour la hêtraie.

Les valeurs calculées d' ETR_s ont été moyennées pour trois conditions de réserve en eau du sol, et pour la totalité de la période d'étude en 1982. Les valeurs d' ETR_s sont très comparables pour les deux peuplements, avec un maximum d'environ 80 % de l'ETP lorsque le sol est bien humide. Les valeurs d' ETR_s/ETP décroissent régulièrement lorsque le sol se dessèche pour atteindre

0,20 dans la chênaie au voisinage du point de flétrissement permanent.

Si l'on ajoute l'interception nette à ETR_s pour obtenir l'ETR du peuplement, on obtient un rapport ETR/ETP de 0,80 pour la chênaie et de 0,76 pour la hêtraie pour la période 13 mai - 30 septembre, valeurs comparables malgré une interception plus forte chez le chêne. AUSSENAC et GRANIER (1979) ont obtenu des valeurs moyennes de 0,8 pour une hêtraie pour la période de végétation en 1977 (année normale) et de 0,5 en 1976 (année sèche). Nos valeurs semblent donc un peu plus élevées, si l'on considère que l'année 1982 a été relativement sèche.

Les résultats de 1983 (figure 5) confirment les valeurs d' ETR_s obtenues en 1982 bien que l'été 1983 présente une ETP largement excédentaire.

Au printemps, le rapport TR/ETP (transpiration de la forêt/évaporation potentielle de PENMAN) croît d'une valeur de 0,4 - 0,5 à un maximum un peu supérieur à 0,8 atteint début juillet (Figure 4). Cette augmentation a lieu alors que la croissance des feuilles est terminée. Elle correspond à une diminution de la résistance stomatique mesurée indépendamment au poromètre (Figure 6). TURNER et HEICHEL (1977) ont observé un comportement semblable chez Quercus rubra aux U.S.A. et attribué la diminution de la résistance stomatique à la rupture d'une mince pellicule de cire disposée sur les stomates des feuilles jeunes. Cependant, la conséquence de ce comportement sur les pertes en eau de tout un peuplement n'avait à notre connaissance pas encore été mise en évidence.

V - MODELISATION DU BILAN HYDRIQUE

Deux modèles ont été utilisés pour simuler les divers termes du bilan hydrique en forêt.

Le modèle de NIZINSKI (1986) a été conçu au laboratoire. Il est assez détaillé et comprend quelques dizaines de paramètres. Il prédit notamment les variations d'indice foliaire de la chênaie, de la date de débourrement à la chute des feuilles. Il détaille le phénomène d'interception en séparant l'eau

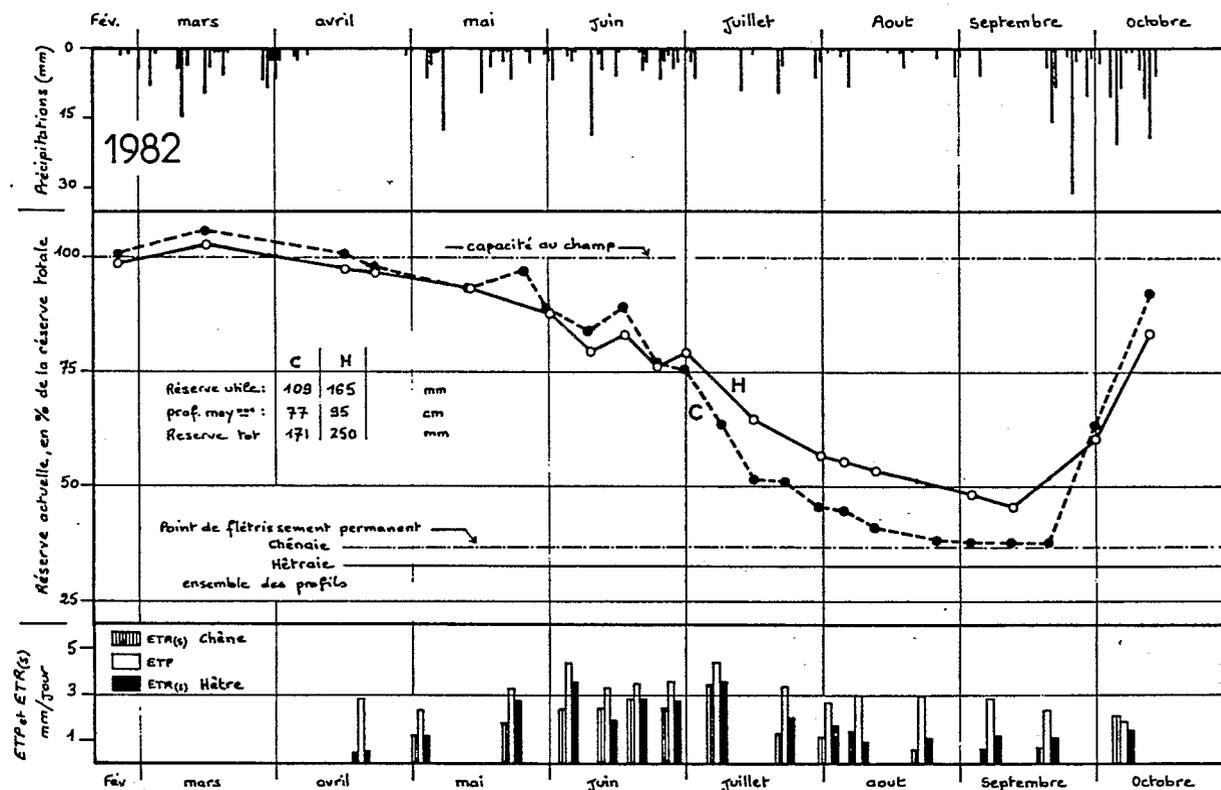


Figure 4 : Evolution, durant la phase feuillée 1982, de la réserve en eau dans les deux stations d'étude ainsi que de la consommation en eau des peuplements (ensemble des profils).

Middle: Time changes of the soil water reserve (in % of maximum) in the two study plots during

the leafy period in 1982. Bottom: Real transpiration of the two stands, compared to Penman evaporation.

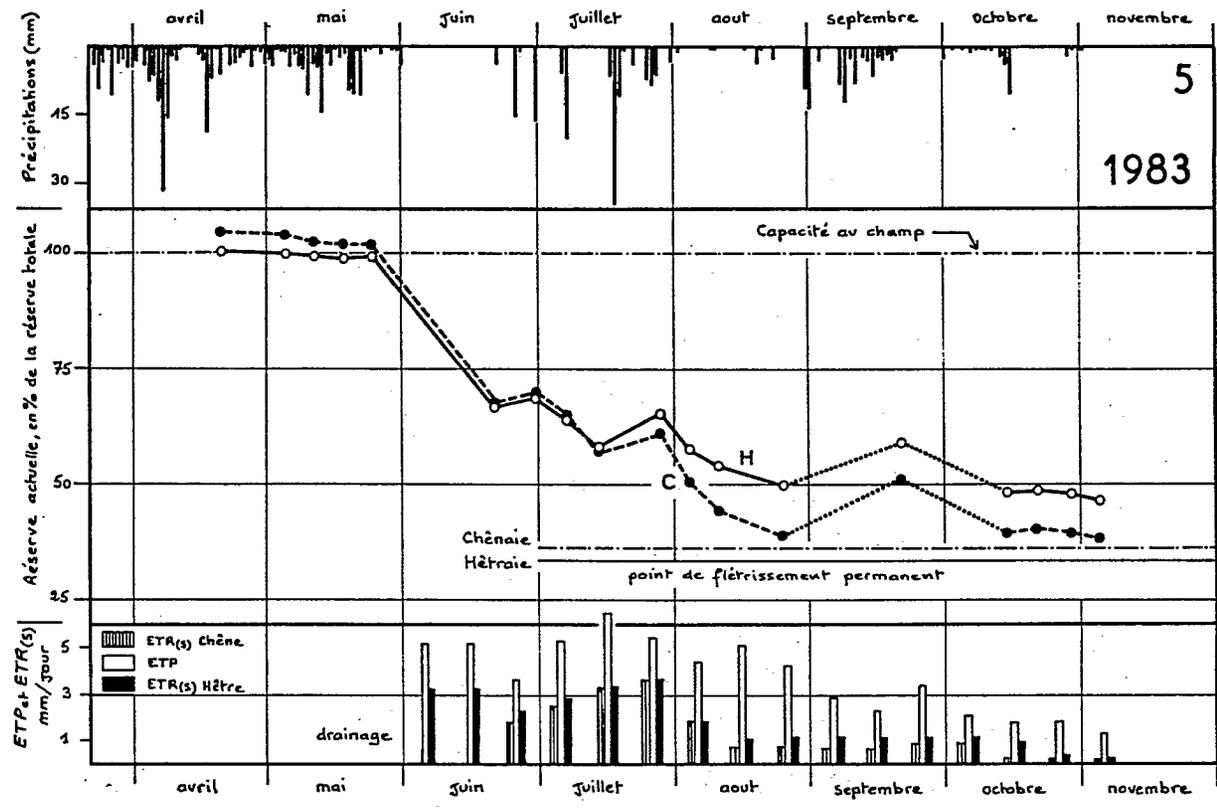


Figure 5: Evolution durant la phase feuillée 1983, de la réserve en eau dans les deux stations d'étude ainsi que la consommation en eau des peuplements.
 Middle: Time changes of the soil water reserve (in % of maximum) in the two study plots during the leafy period in 1983. Bottom: Real transpiration of the two stands, compared to Penman evaporation.

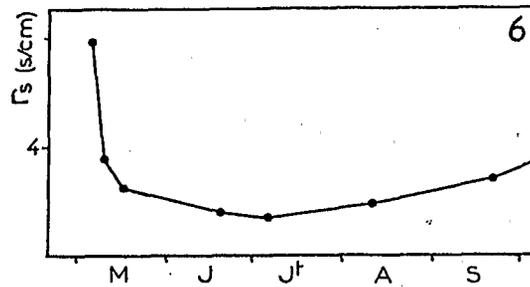


Figure 6 : Variations de la résistance stomatique du chêne au cours de la saison de croissance.

Seasonal variation of the minimal stomatal resistance in Quercus petraea.

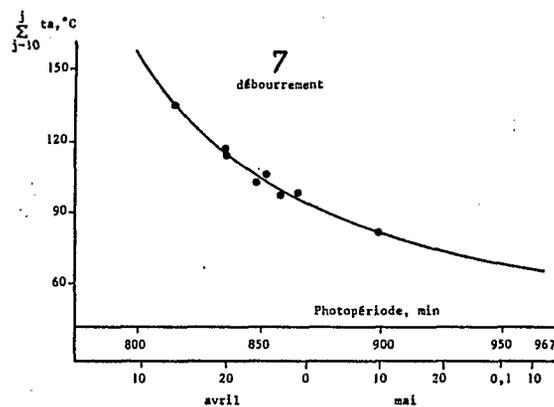


Figure 7 : Prédiction de la date de débournement. Variations de la somme de températures des dix jours précédant le débournement, en fonction de la photopériode du jour du débournement, pour 8 années.

Prediction of the budbreak date. Heat sum of the last ten days before budbreak, as a function of daylength at the time of budbreak, for 8 years.

retenue par les couronnes des arbres et par l'écorce des troncs (Figure 9) ce qui améliore nettement la précision des estimations de l'égouttement (Figure 10). La transpiration est calculée par une formule de PENMAN-MONTEITH dans laquelle la résistance stomatique dépend du potentiel hydrique foliaire ce potentiel est lui-même déterminé comme le potentiel pour lequel il y a égalité entre l'absorption d'eau par les racines et la transpiration, comme dans le modèle de SAUGIER et RIPLEY (1975). Ce modèle, décrit en détail dans la thèse de NIZINSKI (1986) est en cours de publication. Seuls quelques points sont soulignés dans le texte qui suit.

Le modèle d'HALLDIN et al. (1984-1985) a été conçu pour une forêt de pin sylvestre dans le cadre du projet SWECON (SWEdish CONiferous forest), et adapté à la chênaie en changeant quelques paramètres. Il constitue une version très simplifiée de modèle de bilan hydrique en retenant néanmoins les processus principaux. Il sera présenté de façon relativement détaillée.

1- Le modèle de NIZINSKI

Dans ce modèle, le débourrement intervient lorsque la somme des températures des dix derniers jours (au seuil de 0 °C) excède une fonction décroissante de la durée du jour D_j :

$$\sum_{j-10}^j T_a > b.D_j / (aD_j - 1) \quad \text{Avec } a \text{ et } b \text{ constants}$$

Cette fonction, obtenue empiriquement à partir de 6 années d'observation (1976 à 1981), a permis de prédire à 2-3 jours près le débourrement en 1982 et 1983 (Figure 7).

La fin de la croissance des feuilles intervient dans le modèle lorsque la somme des températures (base 0 °C) à partir du débourrement excède une fonction décroissante de la durée du jour :

$$\sum_{j=j_d}^{j_{fc}} T_a > c - dD_j \quad \text{avec } c \text{ et } d \text{ constantes}$$

La relation a été obtenue empiriquement à partir des données de 8 années. Enfin la croissance de la surface foliaire (entre les dates de débourrement et de fin de croissance) est supposée dépendre de la somme de températures écoulée depuis le débourrement. Elle permet une simulation satisfaisante de la croissance en indice foliaire.

La maturité physiologique des feuilles de chêne est plus difficile à définir et donc à simuler. Elle est supposée intervenir le 1er juillet quelle que soit l'année.

Le modèle de J. NIZINSKI calcule la transpiration d'après l'équation de PENMAN-MONTEITH, la résistance stomatique r_s étant fonction de ψ_f le potentiel hydrique des feuilles. Ensuite, l'absorption racinaire est évaluée à l'aide de l'expression :

$$A = \frac{\psi_s - \psi_f}{r_{\text{plante}}}$$

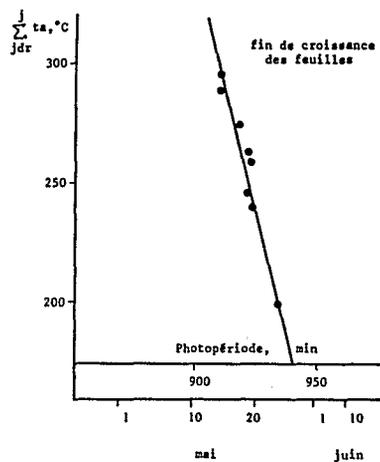


Figure 8 : Prédiction de la date de fin de croissance des feuilles de chêne. Variations de la somme de températures entre le débournement et la fin de croissance, en fonction de la photopériode du jour de fin de croissance, pour 8 années.

Predicting the time of the end of leaf growth. Heat sum between budbreak and the end of leaf growth, as a function of daylength at the end of leaf growth, for 8 years (Oak).

r_{plante} étant la somme des résistances liées au transit de l'eau en phase liquide dans la plante et ψ_s le potentiel hydrique du sol. Retenant l'hypothèse du flux conservatif, le modèle détermine alors, par itérations successives, la valeur de ψ_f telle que l'absorption racinaire soit égale à la transpiration.

Le modèle peut donc évaluer les modifications du rapport ETR/ETP pendant les périodes où les résistances sont importantes (immaturité ou sénescence des feuilles, eau du sol limitante...).

L'originalité du modèle réside également dans le traitement de l'interception. D'une part, un bilan d'eau des écorces a été ajouté à celui, plus classique, des couronnes. D'autre part les précipitations "fortes" sont traitées séparément. Il en résulte que l'interception nette n'est pas une simple fonction des précipitations incidentes et qu'on obtient ainsi un excellent ajustement (Figure 10).

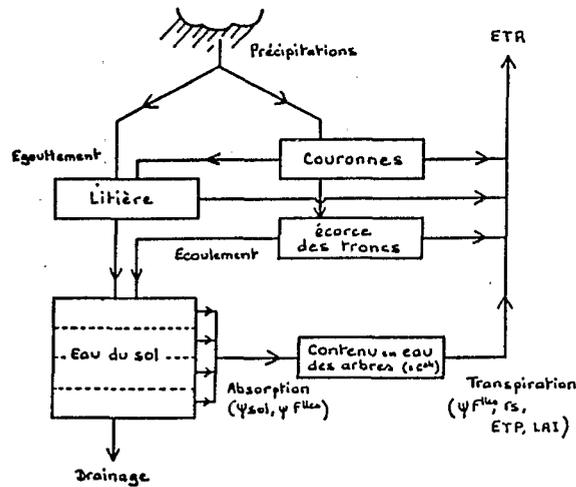


Figure 9 : Diagramme des flux dans le modèle de Nijinski. Les rectangles représentent les compartiments de stockage de l'eau.

Block diagram of Nijinski's model. In boxes are the water storage compartments : water stored at the canopy surface (couronnes), in trunk bark (écorce des troncs), in litter (litière), in the soil (eau du sol) and in the trees.

Relations et paramètres utilisés dans le modèle :

Caractéristiques hydrodynamiques du sol : $\psi [\theta]$ et K_s par horizon
 θ_{cc} et θ_{pfp}

Longueur de racines par strates

Caractéristiques hydriques de la litière : réserve max. et min.

Caractéristiques du couvert : - Indice foliaire maximal et indice
de recouvrement

hydrique foliaire - Relation résistance stomatique/potentiel

La figure 10 représente la simulation de l'égouttement sous chênaie.

La figure 11 donne les valeurs mesurées et calculées de la surface foliaire (en % du maximum atteint) dans la phase qui suit le débourrement.

2- Le modèle d'HALLDIN et al.

Le modèle utilisé comprend deux compartiments correspondant respectivement à l'eau stockée à la surface de la végétation R_v , et dans le sol R_s .

La transpiration et l'évaporation de l'eau interceptée sont calculées par l'équation de PENMAN incorporant un terme de résistance de surface r_s (MONTEITH, 1973) :

$$LE = \frac{\Delta R_n + \gamma E_a}{\Delta + \gamma (1 + r_s / r_a)} \quad ; \quad E_a = \frac{\rho c_p}{\gamma} \frac{e_s(T_a) - e_a}{r_a} \quad (3)$$

avec L : chaleur latente de vaporisation de l'eau (J/g)

Δ : dérivée de la courbe de pression de vapeur saturante de l'eau par rapport à la température ($\equiv de_s(T)/dT$, Pa/°C)

R_n : rayonnement net ($W m^{-2}$)

γ : constante psychrométrique (66 Pa/°C à 101,3 kPa de pression)

ρc_p : capacité calorifique de l'air à p. constante ($J m^{-3} °C^{-1}$)

$e_s(T_a) - e_a$: déficit de saturation de l'air en vapeur d'eau (Pa)

r_a : résistance aérodynamique du couvert forestier ($s m^{-1}$)

r_s : résistance de surface du couvert ($s m^{-1}$)

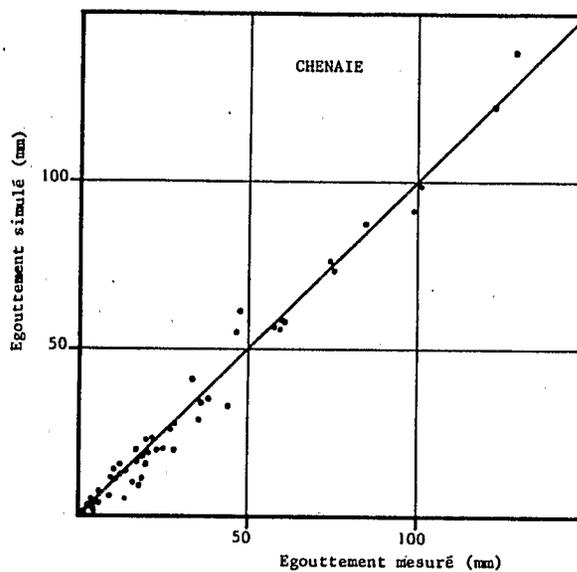


Figure 10 : comparaison entre les valeurs simulées et les valeurs mesurées de l'égouttement (précipitation sous forêt)

Comparison between simulated and measured values of the rain reaching the forest floor, for the oak forest.

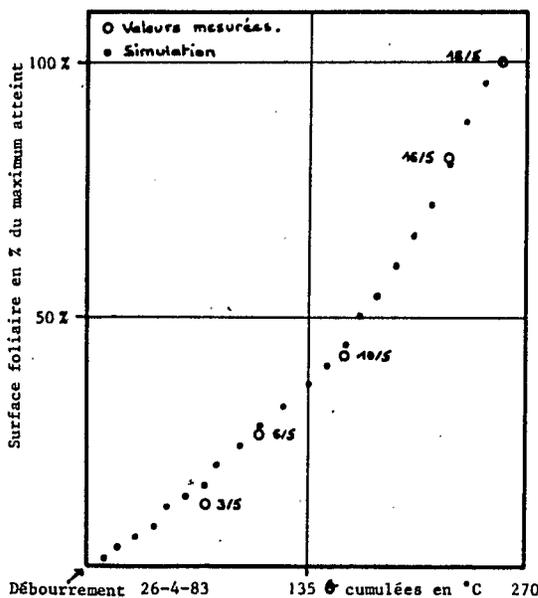


Figure 11 : croissance de la surface foliaire (en % du maximum atteint) en fonction de la somme de température cumulée à partir du débourrement.

Growth in leaf area (in % of the maximum) as a function of heat sum cumulated since budbreak..simulated values, o measurements.

L'évaporation E de l'eau interceptée est donnée par la formule (3) avec $r_s = 0$. La transpiration T lorsque le sol est humide est calculée avec la formule (3) où r_s est une fonction de l'éclairement I et du déficit de concentration de l'air en vapeur d'eau δc (kg m^{-3}) :

$$r_s = \frac{I_0 + I}{I} \frac{a + \delta c}{k_0} \frac{I}{\text{LAI}} \quad (4) \quad \text{avec } I_0, a, k_0 : \text{constantes}$$

LAI : indice foliaire du peuplement

Cette relation due à LOHAMMAR et al. (1980) rend compte de la baisse de transpiration occasionnée par de forts déficits de saturation. Lorsque la réserve en eau du sol diminue en-dessous d'un certain seuil, la transpiration est réduite d'un facteur variant linéairement entre 1 et 0 quand la réserve en eau baisse jusqu'à sa valeur minimale.

L'évapotranspiration lorsque le feuillage est mouillé est calculée comme la somme pondérée de E et T avec des poids reliés linéairement à la quantité d'eau interceptée.

Le modèle utilise des données météorologiques journalières mais sépare les 24 heures en jour et nuit, supposant le déficit de saturation constant le jour et nul la nuit.

Le modèle comporte 8 paramètres. Trois concernent la réserve en eau du sol (valeurs maximale, minimale et valeur seuil pour le déficit hydrique), trois servent à déterminer r_s (relation (4)), et deux concernent r_a (résistance aérodynamique) et la capacité maximale d'interception du couvert.

Ce modèle a été utilisé avec les données météorologiques des postes avoisinant Fontainebleau (Versailles pour le rayonnement, Fontainebleau pour les précipitations, Melun pour les autres données), en 1981 dans un premier temps, année relativement humide. Les valeurs des paramètres du modèle ont été fixées ainsi :

Réserve en eau du sol : V MAX (valeur max.) = 225 mm
 V MIN (valeur min.) = 86 mm
 V STRES (valeur seuil) = 138 mm

Paramètres de résistance stomatique :

$$I_0 = 125 \text{ W m}^{-2}$$

$$k_0 = 3.10^{-5} \text{ kg m}^{-3}$$

$$a = 4,57 \cdot 10^{-3} \text{ kg m}^{-3}$$

Résistance aérodynamique : $r_a \text{ (sm}^{-1}) = 60/\mu \text{ (ms}^{-1})$

Capacité maximale d'interception du feuillage 2 mm.

Une comparaison entre les valeurs simulées et les valeurs mesurées de la réserve en eau du sol pour 1981 et 1982 (Figures 12 et 13) montre que l'accord entre les valeurs simulées et les valeurs mesurées est bon dans l'ensemble. Il semble donc possible dès maintenant de simuler le bilan hydrique d'une forêt à l'aide d'un tout petit nombre de paramètres. Un tel modèle sera d'autant plus satisfaisant que les caractéristiques du sol (capacité au champ, point de flétrissement permanent) sont faciles à définir, c'est-à-dire qu'un sol sableux est plus facile à simuler simplement qu'un sol argileux.

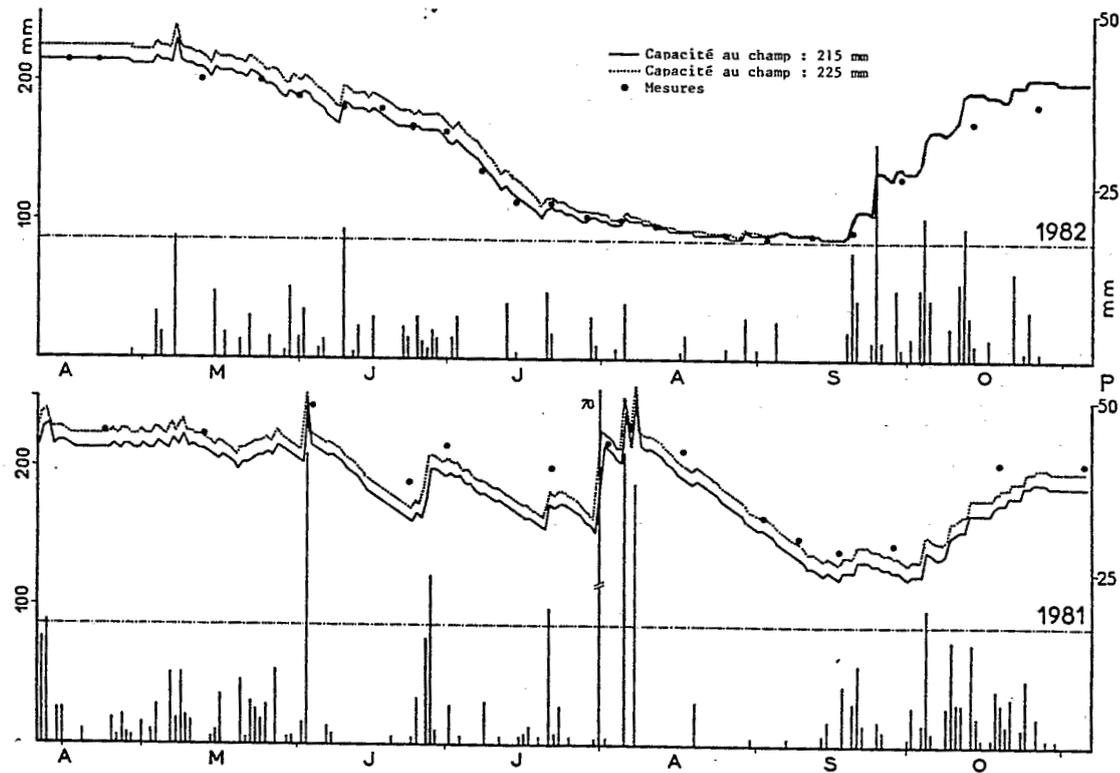
Il est à noter également que l'année 1981 ne comporte pas de périodes très sèches, la réduction de la transpiration par rapport à sa valeur maximale n'est donc pas intervenue. Il reste à tester ce modèle pour une grande variété de conditions, mais ses perspectives d'application semblent très intéressantes.

Sur la figure 14, on remarque que le meilleur accord est obtenu lorsque le modèle prend effectivement en compte la résistance de surface r_s (courbes 1, 2 et 3), avec d'excellents résultats pour une formulation très simple où le déficit de saturation de l'air n'intervient pas ($r_s = \text{constante}$, courbe 2). Les courbes 4, 5 et 6 utilisent différentes formulations de l'ETP et s'écartent très rapidement des mesures, en bonne partie parce qu'elles ne tiennent pas compte de la phénologie.

VI - CONCLUSION

Les études de bilan hydrique des forêts permettent de calculer la consommation en eau de la forêt (pertes par évaporation, transpiration et drainage) et de déterminer le seuil en-dessous duquel l'eau limite la production. Des études menées sur des peuplements divers et sous des climats variés peuvent donner des résultats assez différents qui sont difficiles à généraliser.

Un modèle simple prédisant sur une base de temps journalière la réserve en eau du sol, l'évaporation, la transpiration et le drainage a été appli-



Figures 12 et 13 :

Variations de la réserve en eau du sol de la chênaie de Fontainebleau en 1981 (13) et 1982 (14). Comparaison de deux simulations aux mesures de terrain.

Simulated and mesured values of soil water reserve in 1981 and 1982 in Fontainebleau forest (Oak).

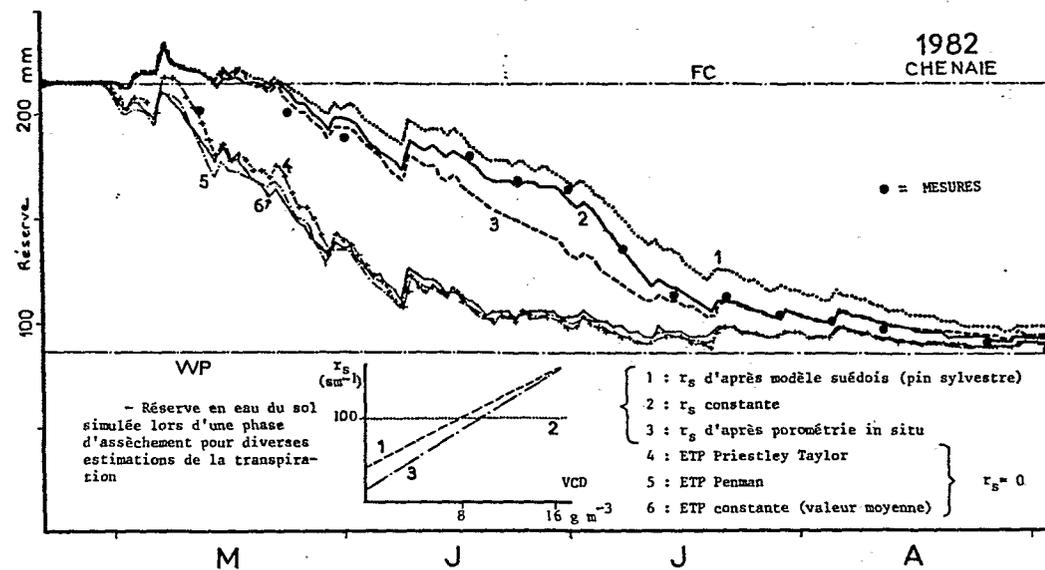


Figure 14 : valeurs simulées de la réserve en eau du sol pour diverses estimations de la transpiration ;
 1, 2 et 3 : transpiration estimée par la formule de Penman-Monteith avec r_s dépendant du
 déficit de concentration en vapeur d'eau de l'air (VCD) comme indiqué dans la figure en insertion.
 4, 5, 6 = diverses estimations de l'évaporation potentielle
 4 = Priestley-Taylor, 5 = Penman, 6 = valeur moyenne constante.

Simulated values of soil water reserve for various estimates of forest transpiration ; 1, 2 and 3 :
 transpiration calculated using Penman - Monteith's formula with r_s function of water vapour concen-
 tration deficit (VSD) as in the insert figure.
 4, 5, 6 = various estimates of potential evaporation :
 4 = Priestley - Taylor, 5 = Penman, 6 = constant value.

qué avec succès sur un peuplement forestier à Fontainebleau. Sa simplicité - il ne contient que huit paramètres - le rend intéressant pour généraliser les diverses études déjà réalisées. Il peut permettre également de poser des questions pertinentes sur la qualité des données et sur les relations de base utilisées pour la construction du modèle, renvoyant alors à des efforts de recherche plus fondamentale.

Le second modèle prédit de façon plus mécaniste la réduction de la transpiration lors d'un déficit hydrique.

Ces modèles ont été validés à l'aide de mesures dont le pas de temps était hebdomadaire.

Pour progresser dans l'analyse fine de l'évapotranspiration de forêts et de sa dépendance des variables climatiques, il est nécessaire d'en avoir des mesures à l'échelle horaire. La forte rugosité des forêts rend les mesures de profils microclimatiques difficiles au-dessus du couvert à cause, d'une part, de la faiblesse des gradients de température et d'humidité et d'autre part, d'une interprétation très délicate en raison de la structure de la turbulence qui modifie les relations classiques flux/gradients. La seule méthode considérée comme acceptable actuellement est la mesure des flux de chaleur et de vapeur d'eau par la méthode des corrélations entre la vitesse verticale du vent et les fluctuations de température ou d'humidité. Cette méthode est lourde (tour, appareillage délicat surtout pour les fluctuations d'humidité) et d'application encore peu répandue.

Une alternative possible consiste à mesurer le flux de sève dans les troncs de quelques arbres représentatifs, et de tenter d'extrapoler la mesure à l'ensemble du peuplement. Le flux de sève n'est pas la transpiration, il la suit avec un décalage de l'ordre de l'heure. Néanmoins la valeur journalière du flux et sa cinétique sont très voisines de celles de la transpiration. La méthode de mesure de GRANIER a été testée sur un taillis de châtaigniers et est présentée dans une autre partie de cet ouvrage.

RESUME

Les principaux termes du bilan hydrique ont été mesurés pendant plusieurs années sur une chênaie de 110 ans et une hêtraie naturelle en forêt de Fontainebleau, à cinquante kilomètres au sud de Paris. Pendant la phase feuillée, l'interception nette des précipitations est plus forte en chênaie (28 %) qu'en hêtraie (18 %), par contre, l'écoulement le long des troncs est important chez le hêtre (4 %) et négligeable chez le chêne.

Le rapport de la transpiration de la forêt à l'évaporation de PENMAN (TR/EP) a été calculé pendant les périodes sans drainage à partir de mesures neutroniques de la réserve en eau du sol. Ce rapport augmente au printemps pour atteindre une valeur maximale d'environ 0,8 en été, sur sol humide mais il peut diminuer jusqu'à environ 0,25 au voisinage du point de flétrissement.

Deux modèles ont été mis au point afin de simuler les variations saisonnières du bilan hydrique sur un pas de temps journalier. Ces modèles prennent en compte les variations de l'indice foliaire, de la résistance stomatique et de la transpiration du couvert. L'un des deux est assez détaillé et l'autre, plus simple, présente l'avantage de n'utiliser que huit paramètres.

Les résultats obtenus par la modélisation sont cohérents avec les mesures effectuées, ce qui ouvre la voie à une généralisation de ces mesures à d'autres sites.

Mots clés additionnels : Sonde à neutrons, *Quercus petraea*, *Fagus silvatica*, phénologie, résistance stomatique.

ABSTRACT

The main terms of the water balance equation were measured for several years on a 110 years old oak stand and on a natural beech forest in the Fontainebleau forest, 50 km south of Paris. During the leafy period, net interception of precipitation is higher in the oak stand (28 %) than in the beech forest (18 %) but stemflow is higher for beech (4 % of precipitation) and negligible for oak.

TR/EP ratio (forest transpiration/PENMAN evaporation) was computed from neutronic measurements of soil water reserve during drainage-free periods.

It increases in Spring to reach a maximum of about 0.8 in Summer on moist soil. Then it decreases with soil moisture to reach 0.25 when the wilting point is approached.

Two models have been built to simulate seasonal variations of the water balance on a daily timestep, predicting changes in leaf area index, sto-

matal resistance and forest transpiration. One is relatively detailed, the other uses only 8 parameters. They give results in close agreement with measurements and have a potential to extrapolate these studies to other sites.

Additional key-words : neutron probe, *Quercus petraea*, *Fagus silvatica*, phenology, stomatal resistance.

BIBLIOGRAPHIE

- AUSSENAC G.J., 1975 - Couverts forestiers et facteurs du climat : leur interactions, conséquences écophysologiques chez quelques résineux. Thèse d'Etat, Université de Nancy, 235 p.
- AUSSENAC G. et GRANIER A.J., 1979 - Etude bioclimatique d'une futaie feuillue (*Fagus silvatica* L. et *Quercus sessiliflora* Salisb.) de l'Est de la France. II - Etude de l'humidité du sol et de l'évapotranspiration réelle. *Ann. Sc. forest.*, 36, 265-280.
- BOUCHET R.J., 1964 - ETR, ETP et production agricole, in : l'eau et la production végétale. Publication INRA, 151-232.
- BROCHET P., GERBIER N., 1972 - Une méthode pratique de calcul de l'évapotranspiration potentielle. *Ann. Agro.*, 23 (1) : 31:49.
- DOIGNON P., 1976 - Quatre-vingt douze ans d'observations météorologiques à Fontainebleau (1883-1974). Mises à jour et révisions. *Bull. Assoc. Nat. Vallée du Loing*, 52, 18-21.
- FEODOROFF A., 1962 - Ressuyage du sol et capacité de rétention pour l'eau. *Ann. Agro.*, 13, 523-549.
- LEMEE G., 1978 - La hêtraie naturelle de Fontainebleau. In : "Problèmes d'Ecologie : Structure et fonctionnement des écosystèmes terrestres" (M. LAMOTTE et F. BOURLIERE, dir. publ.), Masson, 75-128.
- LOHAMMAR T., LARSSON S., LINDER S. et FALK S.O., 1980 - FAST-simulation models of gaseous exchange in Scob pine. In : PERSSON T. (ed.), Structure and Function of Northern Coniferous Forests. An

Ecosystem Study, Ecol. Bull. (Stockholm), 32 : 505-523.

MONTEITH J.L., 1973 - Principles of Environmental Physics. Edward Arnold, 241 p.

NIZINSKI J., 1983 - Modélisation du bilan hydrique d'une chênaie (thèse de Docteur-Ingénieur, Orsay, à paraître).

PENMAN H.L., 1948 - Natural evaporation from open water, bare soil and grass. Proc. roy. soc. (London) ser. A, 193 : 120-145.

PONTAILLER J.Y., 1979 - La régénération du hêtre en forêt de Fontainebleau, ses relations avec les conditions hydriques stationnelles. Thèse de 3ème cycle, Université d'Orsay, 98 p. + annexes.

RODE A.J., 1960 - Méthodes d'étude du régime hydrique des sols. Ac. Sc. URSS, Moscou, 154-161.

THORNTHWAITE C.W., 1948 - An approach toward a rational classification of climate. Geograph rev., 38 : 55-94.

TURC L., 1963 - Cartes d'ETP, interprétation et utilisation. Bull. Techn. génie rural, 60, 20 p.

733

N

ETUDES SUR LES TRANSFERTS D'EAU DANS LE SYSTEME SOL-PLANTE-ATMOSPHERE

R. CALVET

Editeur



1987