

B A PB 1173/1

# MODÉLISATION DU BILAN DE L'EAU D'UNE FORÊT. APPLICATION À UNE FUTAIE DE CHÊNES\*

par Jerzy NIZINSKI\*, Dominique MORAND\* et Bernard SAUGIER\*

\* Laboratoire d'Écologie Végétale, Bât. 362, Université de Paris-Sud — 91405 ORSAY Cedex  
\*\* Laboratoire d'Écologie Végétale, Centre ORSTOM, B.P. 1386 — DAKAR, Sénégal

KEY-WORDS : Forest - Water balance - *Quercus petraea* (Matt.) Liebl. modelling - Stomatal resistance.

## SUMMARY (Poster communication)

*A simulation of the forest water balance. Application for a mature oak forest*

A hydrologic model for the development of the soil-water content in a 120 year-old oak stand (*Quercus petraea* (Matt.) Liebl.) is presented with a one day time resolution. The model was conceived for working with daily potential evapotranspiration, throughfall and leaf area index data. It predicts transpiration from the dry canopy and soil-water content. The canopy is considered as a single leaf (the PENMAN-MONTEITH's equation) with entailed measurements of the physiological control of vapour flow from the leaf such as stomatal resistance (porometer), leaf water potential (pressure chamber), leaf area index, root distribution and soil-water potential (tensiometers). The model estimates the daily leaf water potential equalizing absorption and transpiration, that controls of opening of the stomatas which in turn regulate the transpiration flow. The model was tested during the growing seasons of 1981, 1982 and 1983 in the Fontainebleau forest (22000 ha) near Paris (France). Simulated transpiration and soil-water content correlated well with measurements of the soil-water content (neutron probe). The model can be used for the quantification of tree water stress, which has numerous applications such as assessing stand productivity, disease and insect epidemic susceptibility, fire danger rating and nutrient cycling.

## DESCRIPTION DU MODÈLE

Nous présentons ici un modèle du bilan d'eau du sol (Fig. 1) où la transpiration est gérée par la relation résistance stomatique ( $r_s$ )/potentiel hydrique des feuilles ( $\Psi_f$ ), mais cette relation n'est pas univoque : elle évolue avec l'âge des feuilles, phénomène jusqu'alors non modélisé. Ce modèle s'inscrit dans la suite des travaux de SAUGIER (1974) inspirés de COWAN (1965) où au moyen d'un bilan hydrique de la plante on régule le flux transpiratoire et où le flux d'eau dans le système sol-plante-atmosphère est conservatif ; dans cette optique, le modèle calcule chaque jour le potentiel hydrique des feuilles qui égalise la transpiration et l'extraction racinaire. Dans cette optique, l'absorption est égale à la transpiration. L'écoulement de l'eau du sol vers les racines, l'absorption de cette eau par les racines d'arbres, la circulation de l'eau dans l'arbre des racines aux feuilles (phase liquide), la diffusion de vapeur d'eau à travers les stomates vers la couche d'air abondant le peuplement (phase vapeur), constituent le flux transpiratoire. L'absorption de l'eau liquide dans l'ensemble du profil du sol est égale :

$$ABS = \sum_{i=1}^n ABS_i (\Psi_s - \Psi_f) / R \quad (\text{mm/j}) \quad (1)$$

avec : ABS - absorption d'eau par les racines d'arbres dans l'ensemble du profil (mm/j) ; n - nombre de strates du profil

du sol ;  $\Psi_{si}$  - potentiel hydrique moyen dans la strate i (bars) ;  $\Psi_f$  - potentiel hydrique moyen des feuilles d'arbres (bars) ; R - résistance totale sur l'ensemble du trajet sol-arbre correspondant à la somme des résistances suivantes : (a) résistance à la pénétration radiale de l'eau dans les racines, (b) résistance des manchons du sol entourant les racines, (c) résistance à la circulation de l'eau dans le xylème, (d) résistance à la circulation de l'eau dans les nervures des feuilles et les chambres sous-stomatiques (bars/j mm) ;  $L_i$  - fraction de la longueur totale des racines présentes dans la strate i.

Le flux de vapeur d'eau à travers les stomates est proportionnel au gradient de pression de vapeur d'eau et inversement proportionnel à la résistance rencontrée. Nous avons adopté la simplification proposée par MONTEITH (1965) : il considère la surface évaporante comme une strate unique dans laquelle la résistance stomatique moyenne du peuplement est considérée comme étant la somme des résistances stomatiques moyennes de LAI-feuilles. Pour estimer la transpiration du couvert nous avons utilisé la formule présentée par MONTEITH (1965), soit :

$$TR = ETP / (1 + (\gamma / (\Delta + \gamma)) * (r_s / LAI * r_a)) \quad (\text{mm/j}) \quad (2)$$

avec ETP - évapotranspiration potentielle calculée selon la formule de PENMAN (1948) (mm/j) ;  $r_a$  - résistance aérodynamique (s/cm) ; LAI - indice foliaire ;  $\gamma$  - constance psychrométrique (mb/°C) ;  $\Delta$  - dérivée de la fonction reliant la pression de vapeur d'eau saturante de l'air et la température de l'air.  $r_s$  - résistance stomatique moyenne du couvert :

\* Texte correspondant à un exposé sur panneau présenté aux Journées de la Société d'Écologie, janvier 1988.



Fonds Documentaire IRD  
Cote : B \* 24328 Ex : 1



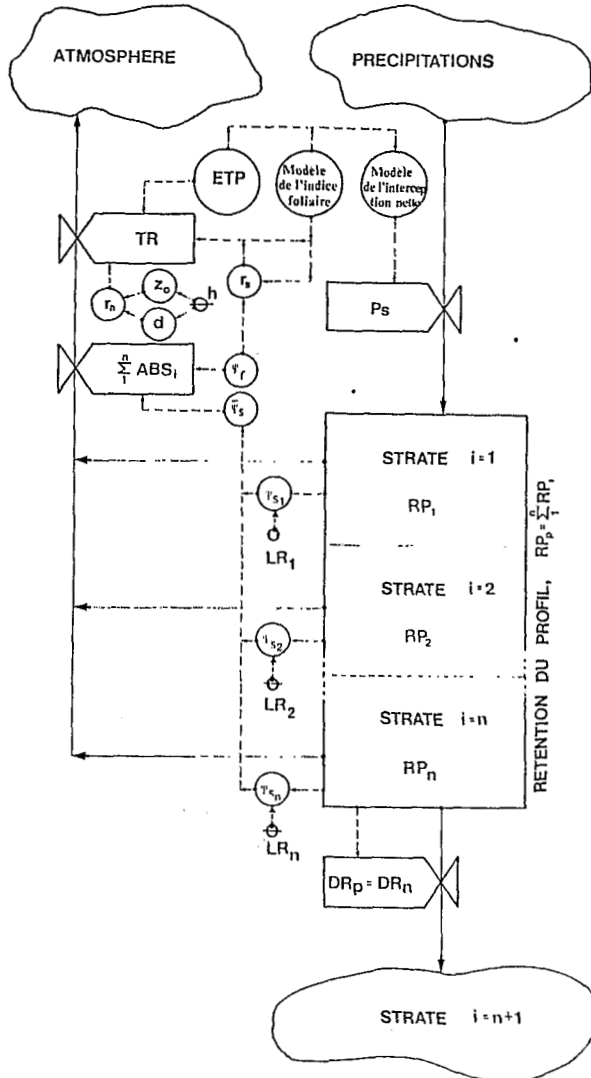


FIG. 1. — Schéma fonctionnel du modèle du bilan d'eau du sol sous une forêt (ABS<sub>i</sub> : absorption de l'eau par les racines d'arbres dans la strate *i* ; DR<sub>i</sub> : drainage de l'eau de la strate *i* ; ETP : évapotranspiration potentielle ; LAI : indice foliaire ; Ps : précipitations au sol ; LR<sub>i</sub> : longueur des racines présente dans la strate *i* ; RP<sub>i</sub> : rétention en eau de la strate *i* ; d : hauteur du déplacement ; h : hauteur du peuplement ; i : index de la strate du sol ; n : nombre de strates du sol ; r<sub>s</sub> : résistance stomatique ; r<sub>a</sub> : résistance aérodynamique ; z<sub>0</sub> : longueur de rugosité ; Ψ<sub>f</sub> : potentiel hydrique des feuilles ; Ψ<sub>si</sub> : potentiel hydrique de l'eau du sol dans la strate *i*).

$$r_s = ((r_{smax} - r_{smin}) / (\Psi_{fmax} - \Psi_{flim})) * (\Psi_f - \Psi_{flim}) + r_{smin} \quad (s/cm) \quad (3)$$

avec : r<sub>smax</sub> - résistance stomatique maximale (s/cm) ; r<sub>smin</sub> - résistance stomatique minimale (s/cm) ; Ψ<sub>fmax</sub> - potentiel hydrique foliaire maximale (bars) ; Ψ<sub>flim</sub> - potentiel hydrique critique de la feuille au-delà duquel les stomates se ferment (bars). D'après l'équation (1) si le potentiel hydrique des feuilles est supérieur ou égal au potentiel hydrique du sol, alors l'absorption de l'eau par les racines n'a pas lieu :

$$\text{si } \Psi_f \geq \Psi_s \quad \text{alors} \quad \sum_1^n \text{ABS}_i \approx 0 \quad (\text{mm/j})$$

Dans le cas contraire, il y a absorption ; compte tenu de la continuité du flux d'eau dans le système sol-arbre-atmosphère, la somme des extractions d'eau par les racines dans *n* strates du profil est égale à la transpiration (en reprenant les équations (1) et (2)) :

$$(\Psi_s = \Psi_f) / R \approx \text{ETP} / (1 + (\gamma / (\Delta + \gamma)) * (r_s / \text{LAI} * r_a)) \quad (\text{mm/j}) \quad (4)$$

Ce qui, après transformation, permet d'estimer le potentiel hydrique des feuilles (Ψ<sub>f</sub>), soit :

$$(\Psi_f = R (\text{ETP} / (1 + \gamma / (\Delta + \gamma)) (r_s / \text{LAI} * r_a)) + \Psi_s \quad (\text{bars}) \quad (5)$$

équation implicite, puisque r<sub>s</sub> dépend de Ψ<sub>f</sub> (équation (3)). Pour estimer le potentiel hydrique des feuilles tel que ABS = TR, nous avons repris la résolution numérique proposée par ROSE *et al.* (1976).

La simulation commence le 01 janvier (jour *j*=1) avec comme condition initiale de simulation, une rétention en eau de chacune des strates du profil égale à la capacité au champ (RP<sub>i</sub> (1)=RCC<sub>i</sub>). Le modèle utilise comme variables d'entrée : la demande évaporative de l'atmosphère (PENMAN, 1948), les précipitations au sol (Ps) et l'indice foliaire (LAI). Les valeurs journalières de Ps et LAI ont été obtenues en utilisant les modèles de NIZINSKI et SAUGIER (1988a, 1988b). Le modèle comporte quatre principaux paramètres : la relation résistance stomatique moyenne/potentiel hydrique foliaire (r<sub>s</sub>/Ψ<sub>f</sub>), la distribution de la longueur racinaire dans le profil du sol (LR<sub>i</sub>), les capacités maximale et minimale de rétention en eau de chacune des strates du profil du sol (RCC<sub>i</sub> et RFP<sub>i</sub>). Ces paramètres ont été mesurés lors des saisons végétatives des années 1981, 1982 et 1983 *in situ* dans une futaie de chênes de 120 ans (*Quercus petraea*) dans la partie centrale de la forêt de Fontainebleau.

## RÉSULTATS ET DISCUSSION

La simulation de l'évolution de la rétention en eau du sol du peuplement a été effectuée pour 1981, 1982 et 1983 pour les neuf tubes pendant les périodes végétatives, du débournement jusqu'à environ 50 % de l'indice foliaire maximal, en automne. Nous comparerons les valeurs simulées et les valeurs mesurées de la rétention en eau des neuf tubes représentatifs du peuplement (Fig. 2). Cette étude de l'évolution de la rétention en eau du sol confirme l'importance quantitative de la transpiration. Celle-ci s'élève en moyenne sur les trois années étudiées à 283 mm d'eau par an, ce qui représente une moyenne journalière de 1,4 mm/j (valeur calculée à partir des cumuls sur les périodes végétatives qui ont duré 205 jours en moyenne). Ces valeurs sont à rapprocher de celles obtenues par AMBROS (1978) pour *Quercus pedunculata* (de 250 à 320 mm/an) et AUSSENAC and GRANIER (1979) pour *Quercus petraea* (de 254 à 300 mm/an). L'évolution dans le temps de la rétention en eau du sol du profil est bien simulée, de même que les variations relatives de la rétention en eau d'une période à l'autre, alors que les trois années étudiées ont eu des régimes pluviométriques contrastés (en 1981 : 1085 mm, soit 51 % de plus que la moyenne annuelle de 103 ans (720,4 mm) ; en 1982 : 791 mm et en 1983 : 744,4 mm — années proches de la moyenne). La rétention en eau du sol est bien simulée lors de l'année 1982, mais tantôt sousestimée, tantôt surestimée lors des années 1981 et 1983. Il existe une tendance à une sousestimation lors de périodes pour lesquelles la rétention en eau du sol est proche de la capacité au champ (cas de mai, juin, juillet, août 1981. Cas du début mai 1983), et une

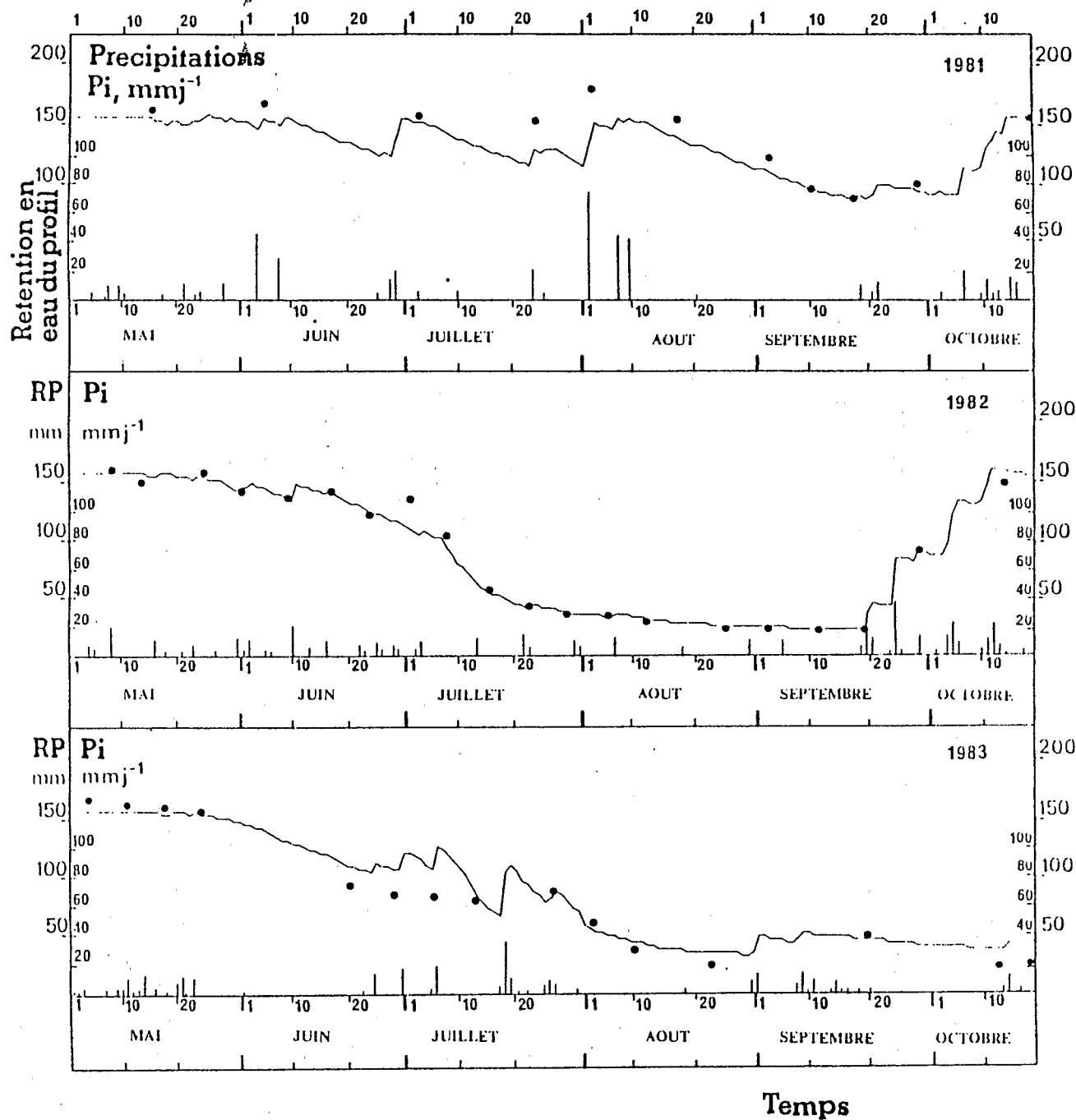


FIG. 2. — Comparaison entre les valeurs calculées (—) et mesurées (●) de la réserve en eau du sol (RP) pour les saisons végétatives 1981, 1982 et 1983 (capacité au champ : 167 mm ; point de flétrissement permanent : 63 mm).

tendance à une surestimation lors des périodes sèches (juin, juillet, août, octobre 1983). Il existe diverses causes possibles à ces différences entre valeurs simulées et valeurs mesurées : Les propriétés hydriques du sol n'ont pas été étudiées expérimentalement. Il est possible que les racines de *Quercus petraea* pénètrent dans les fissures de la dalle calcaire. Ainsi, pour une transpiration simulée donnée, correspondant à une transpiration réelles supposée, alors que les racines extraient

l'eau dans le sol et dans la dalle calcaire, dans le modèle les racines extraieront un volume équivalent mais uniquement dans l'épaisseur du sol ; d'où une extraction dans le sol trop forte, et en conséquence une sousestimation de la rétention en eau du profil. Dans le modèle, le drainage s'effectue durant la journée même de la pluie provoquant un drainage (jour  $j+1$ ) de façon telle que la rétention simulée en eau du sol se maintient alors à la capacité au champ. En réalité, nous

pouvons supposer que le drainage est beaucoup plus lent que dans le modèle et qu'après une forte pluie provoquant un drainage, un volume d'eau supérieur à la capacité au champ (dépendant de la lame d'eau tombée au sol) reste dans le profil une journée ou plus. Nous donnerons deux exemples : (a) le 01 août 1981 eut lieu un orage de  $P_i=70,4$  mm. Les mesures effectuées le 02 août 1981 indiquent  $RP=188,5$  mm, soit 22 mm de plus que la rétention en eau du sol à la capacité au champ ; (b) après deux jours de pluie, le 15 mars 1982 ( $P_i=9,4$  mm) et le 16 mars 1982 ( $P_i=3,5$  mm), la rétention en eau du sol mesurée le 17 mars 1983 est de  $RP=180,3$  mm, soit 13,7 mm de plus que la rétention en eau du sol à la capacité au champ. Dans le modèle, le drainage trop rapide est susceptible d'être à l'origine de la sousestimation de la rétention en eau du sol lors des périodes proches de la capacité au champ, en début et en fin de saison végétative et comme ce fut le cas après les précipitations incidentes du 01 août 1981 qui ont réhumecté le profil et provoqué un drainage en milieu de saison de végétation. Nous avons négligé l'absorption de la strate arbustive de hêtres (individus de 1 à 4 mètres) dont l'indice foliaire maximal est de 0,95, cause probable de surestimation de la rétention en eau du profil.

Le modèle calcule l'absorption dans les strates du sol en supposant que la longueur de racines par unité de volume ne varie pas dans le temps, or la longueur de racines par unité de volume de sol et leur capacité d'absorption évoluent parallèlement à la croissance foliaire saisonnière (REICH *et al.* 1980) évolution probablement spécifique pour chaque horizon. Il est donc nécessaire de poursuivre cette étude de l'extraction de l'eau par les racines dans une optique à la fois dynamique et spatiale. La résistance stomatique moyenne des feuilles du peuplement a ici été appréhendée dans une optique dynamique (effet de l'âge des feuilles) et dans une optique spatiale (effet de la position des feuilles dans la couronne d'arbres). En tenant compte de l'âge des feuilles dans la relation  $r_s/\Psi_f$ , nous avons pu observer que ce facteur participait hautement au bon accord entre valeurs simulées et valeurs mesurées de la rétention en eau du sol. L'échantillonnage au hasard des feuilles au sein des couronnes d'arbres que nous avons fait peut être à l'origine d'un biais de la résistance stomatique moyenne. Nous avons pu constater que les feuilles du bas des couronnes d'arbres ont une résistance stomatique moyenne inférieure à celles des autres feuilles, un échantillon ne prenant en compte que ces feuilles aurait pour conséquence de sousestimer la rétention en eau du profil (NIZINSKI, 1986). L'échantillonnage des feuilles doit tenir compte de la somme des microclimats au sein des couronnes d'arbres. Des deux résistances au flux d'eau sur le parcours sol-plante-atmosphère à savoir la résistance au flux d'eau liquide et la résistance au flux de vapeur d'eau, nous avons supposé la première constante, et avons intégré certaines des variations de la deuxième dans le modèle. Un futur modèle prendra en considération les variations de la première résistance par l'intermédiaire de l'évolution de la longueur de racines (ou de la surface absorbante de ces racines) dans le temps parallèlement à l'évolution de l'indice foliaire.

Les variations de la résistance stomatique en fonction de l'indice foliaire et de l'âge des feuilles dans des conditions données rendent compte de l'évolution morphologique des feuilles : accroissement progressif du nombre de stomates par unité de surface de feuille, réduction de la pilosité des feuilles, formation d'une couche de cire sur l'ouverture stomatique, phénomènes observés chez *Castanea sativa* et *Quercus petraea* (NIZINSKI *et al.*, 1988c).

## RÉFÉRENCES

- AMBROS, Z., (1978). — Vodna bilancia lesnych porastov Karpat. *Lesnický časopis*, 24 : 203-221.
- AUSSENAC, G. and GRANIER, A., (1979). — Étude bioclimatique d'une futaie feuillue (*Fagus sylvatica* L. et *Quercus sessiliflora* Salisb.) de l'Est de la France. (II). Étude de l'humidité du sol et de l'évapotranspiration réelle. *Annales des Sciences Forestières*, 36 : 265-280.
- COWAN, I.R., (1965). — Transport of water in the soil-plant-atmosphere system. *Journal of Applied Ecology*, 2 : 221-239.
- MONTEITH, J.L., (1965). — Evaporation and environment. In : G.E. Fogg (Editor). The state and movement of water in living organisms, 19th Symp. Soc. Exp. Biol., The Company of Biologists, Cambridge University Press, pp. 205-234.
- NIZINSKI, J., (1986). — Modélisation du bilan de l'eau d'une futaie de chênes en forêt de Fontainebleau. Thèse de Docteur-Ingénieur, Université de Paris-Sud, Orsay, 171 p.
- NIZINSKI, J. and SAUGIER, B. (1988a). — A model of leaf budding and development for a mature oak forest. *Journal of Applied Ecology*, 25 (2), (sous presse).
- NIZINSKI, J. and SAUGIER, B. (1988b). — Mesures et modélisation de l'interception nette dans une futaie de chênes. *Acta Oecologica/Oecologica Plantarum*, 4 : (sous presse).
- NIZINSKI, J., MORAND, D. and SAUGIER, B., (1988c). — Change of the stomatal resistance with leaf age in *Quercus petraea* (Matt.) Liebl. (en rédaction).
- PENMAN, H.L., (1948). — Natural evaporation from open water, bare soil and grass. *Proceedings of Royal Society London A*, 193 : 120-145.
- REICH, P.B., TESKEY, R.O., JOHNSON, P.S. and HINCKLEY, T.M. (1980). Periodic root and shoot growth in oak. *Forest Science*, 26 : 590-598.
- ROSE, C.W., BYRNE, G.F. and HANSEN, G.K., (1976). — Water transport from soil through plant to atmosphere : a lumped parameters model. *Agricultural Meteorology*, 16 : 171-184.
- SAUGIER, B., (1974). — Transports de CO<sub>2</sub> et de vapeur d'eau à l'interface végétation-atmosphère. Interaction du microclimat avec le comportement physiologique de plante prairiales. Thèse d'État U.S.T.L., Montpellier, 155 p.

