

ORSAY
n° d'ordre :
730

T H E S E
présentée

A L' UNIVERSITE DE PARIS-SUD
CENTRE D'ORSAY

pour obtenir le titre de Docteur-Ingénieur
Spécialité : ECOLOGIE VEGETALE

par

Jerzy NIZINSKI

MODELISATION DU BILAN DE L'EAU D'UNE FUTAIE DE CHÊNES
EN FORÊT DE FONTAINEBLEAU.

Soutenue le 20 Février 1986, devant la Commission d'Examen :

MM. G. LEMEE Président
G. AUSSENAC
A. PERRIER Examineurs
B. SAUGIER

TABLE DES MATIERES

	pages
LISTE DES SYMBOLES	1
1. INTRODUCTION	9
2. CYCLE HYDROLOGIQUE EN FORET	11
2.1. Eléments du bilan et méthodes employées	11
2.1.1. Approche générale	11
2.1.2. Apports d'eau	15
2.1.3. Contenu en eau de l'écosystème	19
2.1.4. Sorties d'eau	29
2.2. Principaux processus influençant la circulation de l'eau en forêt	32
2.2.1. Système sol-plante-atmosphère	32
2.2.2. Demande évaporative de l'atmosphère	33
2.2.3. Résistance de la couverture végétale	37
2.2.3.1. Approche générale	37
2.2.3.2. Résistance aérodynamique	41
2.2.3.3. Evolution de la surface des feuilles	43
2.2.3.4. Résistance stomatique	57
2.2.3.5. Système racinaire	63
2.2.4. Circulation de l'eau dans le sol	67
2.2.4.1. Description du processus	67
2.2.4.2. Matériel et méthodes	71
3. MODELISATION DU BILAN D'EAU EN FORET	73
3.1. Approche générale	73
3.2. Description du modèle	74
3.3. Sous-modèles	79
3.3.1. Indice foliaire	79
3.3.2. Résistance stomatique	83
3.3.3. Potentiel hydrique du sol	87
3.3.4. Potentiel hydrique des feuilles	87
3.4. Calculs des flux d'eau	89

4. LA STATION, LES RESULTATS OBTENUS	97
4.1. Description du milieu	97
4.1.1. Situation géographique	97
4.1.2. Le climat	97
4.1.3. Le sol	97
4.1.4. La végétation	99
4.2. Mesures effectuées	99
4.2.1. Les résultats des années 1981, 1982 et 1983	99
4.2.2. Discussion des résultats	103
5. COMPARAISON DU MODELE AVEC LES MESURES	125
5.1. Evolution de l'indice foliaire	125
5.2. Interception et précipitations au sol	133
5.3. Stock d'eau du sol	143
CONCLUSION ET PERSPECTIVES	150
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	153
RESUMES	161
ANNEXE	163

AVANT-PROPOS

J'exprime ici à Monsieur le Professeur Bernard SAUGIER toute ma gratitude de m'avoir accueilli dans son laboratoire et d'avoir mis à ma disposition les moyens de mener à bien ce travail.

Je remercie Monsieur le Professeur Georges LEMEE de m'avoir donné de précieux renseignements concernant l'écologie forestière du massif de Fontainebleau et de m'avoir fait l'honneur d'être Président du Jury.

Je remercie Monsieur Gilbert AUSSENAC, Directeur de recherche au Centre National de Recherches Forestières de Nancy-Champenoux d'être membre du Jury et d'avoir accepté la tâche de rapporteur.

Je remercie Monsieur Alain PERRIER, Directeur du Laboratoire de Bioclimatologie de l'INRA à Versailles, d'avoir bien voulu juger ce travail et participer au jury.

Je remercie Monsieur le Professeur Jorge VIEIRA DA SILVA de m'avoir permis d'utiliser locaux et matériel de la Station de Fontainebleau et je remercie les membres de son laboratoire de leur accueil à chacun de mes passages à Fontainebleau.

Je remercie Monsieur André FAILLE de m'avoir fourni des données personnelles concernant les peuplements de chênes du Massif de Fontainebleau.

Je remercie Monsieur Pierre DOIGNON (Station Météorologique de la ville de Fontainebleau) de m'avoir fourni les données climatiques utilisées dans ce travail.

Je remercie le personnel du Laboratoire de Télédétection de Bioclimatologie de l'INRA à Versailles de m'avoir aidé à interpréter les photos hémisphériques de mon peuplement.

Je remercie Messieurs Bernard LEGAY et Jean-Yves PONTAILLER de leur aide sur le terrain.

Je remercie Mesdames Marie-Claire PELE et Janine LE GOFF d'avoir assuré la réalisation pratique de ce mémoire.

Je remercie, enfin, toutes les personnes du Laboratoire d'Ecologie Végétale de l'Université de Paris-Sud qui, à un moment ou à un autre, m'ont aidé durant ces cinq années passées à Orsay.

LISTE DES SYMBOLES*

A_1, A_2, A_2B	- horizons pédologiques du sol;
A_{ip}	- coefficient dépendant des caractéristiques hydrauliques du sol pour la strate i tube p ;
$ABS_{ip}(j)$	- absorption d'eau par les racines d'arbres dans la strate i tube p , le jour j , en $mm.j^{-1}$;
$ABS_p(j)$	- absorption d'eau par les racines d'arbre dans l'ensemble du profil du tube p , le jour j , en $mm.j^{-1}$;
AE	- alimentation en eau de l'écosystème, en $mm.j^{-1}$;
AF	- absorption d'eau par la cuticule des feuilles, en $mm.j^{-1}$;
$B, B/C$	- horizons pédologiques du sol;
B_{ip}	- coefficient dépendant des caractéristiques hydrauliques du sol pour la strate i du tube p ;
Br	- brouillards, en $mm.j^{-1}$;
$C_1 \dots C_{18}$	- coefficients empiriques;
CCb_{max}	- capacité de rétention maximale de la surface de l'écorce des troncs et des branches d'arbres, en mm ;
CCb_{min}	- capacité de rétention minimale de la surface de l'écorce des troncs et des branches d'arbres, en mm ;
CCf_{max}	- capacité de rétention maximale de la surface des feuilles d'arbres, en mm ;
CCf_{min}	- capacité de rétention minimale de la surface des feuilles d'arbres, en mm ;
CCH	- capacité au champ;
$CC_p(j)$	- recouvrement de la surface du sol par les couronnes d'arbres le jour j , tube p ;
CC_{minp}	- recouvrement minimal de la surface du sol par les couronnes d'arbres, tube p ;

* Ordre dans la liste: majuscules, minuscules, lettres grecques

$CD_p(j)$	- ouverture de la forêt le jour j , tube p ;
CE	- contenu en eau de l'écosystème, en mm;
C_p	- chaleur massique de l'air, en $Jg^{-1}C^{-1}$;
CR	- eau absorbée utilisée dans les processus de croissance, en $mm.j^{-1}$;
$DD(j)$	- photopériode du jour j , en min.;
DD_{jdr}	- photopériode du jour du débourrement réel, en min.;
DD_{jrfc}	- photopériode du jour de la fin de croissance des feuilles, en min.;
$\Delta(t_{ch})$	- changement de pression de vapeur d'eau saturante, en $mbar.C^{-1}$;
$DR_{ip}(j)$	- drainage de l'eau de la strate i , tube p , le jour j , en $mm.j^{-1}$;
$DRLIT_p(j)$	- drainage de l'eau de la litière, tube p , le jour j , en $mm.j^{-1}$;
$DR_{np}(j)$	- drainage de l'eau de la dernière strate n , tube p , le jour j , en $mm.j^{-1}$;
$DR_p(j)$	- drainage de l'eau, sonde p , le jour j , en $mm.j^{-1}$;
Ea	- pouvoir évaporant de l'air au-dessus de la surface évaporante, en $mm.j^{-1}$;
$EB_p(j)$	- évaporation réelle de l'eau des couronnes d'arbres, tube p , le jour j , en $mm.j^{-1}$;
$ECB(j)$	- écoulement le long des branches, le jour j , en $mm.j^{-1}$;
$EC(j)$	- écoulement le long des troncs, le jour j , en $mm.j^{-1}$;
$EGB_p(j)$	- égouttement de l'eau des couronnes d'arbres, tube p , le jour j , en $mm.j^{-1}$;
$EL_p(j)$	- évaporation réelle de l'eau de la litière, tube p , le jour j , en $mm.j^{-1}$;
ES	- évaporation réelle du sol, en $mm.j^{-1}$;
$ET(j)$	- évaporation réelle des troncs d'arbres le jour j , en $mm.j^{-1}$;
$ETP(j)$	- évapotranspiration potentielle le jour j , en $mm.j^{-1}$;

ETP*	- évapotranspiration potentielle théorique, en mm.j^{-1} ;
ETP _{sol} (j)	- évapotranspiration potentielle imposée au sol, le jour j, en mm.j^{-1} ;
ETPT(j)	- évapotranspiration potentielle imposée aux troncs d'arbres, en mm.j^{-1} ;
ETR(j)	- évapotranspiration réelle du peuplement le jour j, en mm.j^{-1} ;
ET _{sol} (j)	- évapotranspiration potentielle corrigée imposée au sol le jour j, en mm.j^{-1} ;
F	- surface des feuilles, en m^2 ;
FCF	- photopériode du jour de la fin de la croissance de la surface des feuilles, valeur calculée, en min.;
FR _g (j)	- fraction du rayonnement global, interceptée le jour j par le couvert;
FV(j)	- fonction de la vitesse moyenne du vent v, pour le jour j;
H	- hydromasse de la végétation, en mm;
In _p (j)	- interception de l'eau par la forêt, tube p, le jour j, en mm.j^{-1} ;
JDC	- photopériode du jour le jour du débourrement, valeur calculée, en min.;
L	- chaleur latente de vaporisation de l'eau ($2,46.10^6 \text{ Jkg}^{-1}$);
LAI(j)	- indice foliaire calculée pour la forêt le jour j;
LAI _{max}	- indice foliaire maximal pour la forêt;
M _{air}	- masse molaire de l'air ($29.10^{-3} \text{ kg Mole}^{-1}$);
M _{eau}	- masse molaire de l'eau ($18.10^{-3} \text{ kg Mole}^{-1}$);
NC	- nombre de coups mesurés;
NCC	- nombre de coups corrigés;
NJSP	- nombre des jours qui suivent la dernière pluie, en jour;
P _{atm} (j)	- pression atmosphérique au sol le jour j, en mb;

Pc	- fraction des précipitations incidentes qui rencontrent l'écran végétal, en mm.j^{-1} ;
Pd	- fraction des précipitations incidentes qui tombent directement au sol, en mm.j^{-1} ;
Pi	- précipitations incidentes, en mm.j^{-1} ;
PFP	- point de flétrissement permanent;
PR _p	- longueur totale des racines, tube p, en cm;
PR _{ip}	- fraction de longueur totale des racines présente dans la strate i, tube p, en cm;
Ps _{p(j)}	- précipitations au sol le jour j, tube p, en mm.j^{-1} ;
Ra(j)	- rayonnement atmosphérique le jour j, en $\text{Jcm}^{-2}.$ jour;
RCC _{ip}	- rétention en eau à la capacité au champ dans la strate i, tube p, en mm;
Re	- ruissellement dans le sol, en mm.j^{-1} ;
RE _{maxp(j)}	- rétention en eau maximale des couronnes d'arbres de la forêt le jour j, tube p, en mm;
RE _{minp(j)}	- rétention en eau minimale des couronnes d'arbres de ma forêt le jour j, tube p, en mm;
RE _{p(j)}	- rétention en eau des couronnes d'arbres le jour j, tube p, en mm.j^{-1} ;
RE _{R.U.}	- "réserve utile" des couronnes d'arbres, en mm;
Rg(j)	- rayonnement global le jour j, en $\text{Jcm}^{-2}.\text{j}^{-1}$;
RL _{abs}	- capacité de rétention absolue en eau de la litière, en mm;
RL _{max}	- rétention en eau maximale de la litière, en mm;
RL _{min}	- rétention en eau minimale de la litière, en mm;
RL _{p(j)}	- rétention en eau de la litière, tube p, le jour j, en mm;
Rn(0)	- rayonnement net au niveau de la litière, en $\text{J.cm}^{-2}.\text{j}^{-1}$;
Rn(h)	- rayonnement net au niveau des cimes d'arbres, en $\text{J.cm}^{-2}.\text{j}^{-1}$;
Rn(j)	- rayonnement net du couvert forestier, le jour j, en $\text{J.cm}^{-2}.\text{j}^{-1}$;

- RFP_{ip} - rétention en eau au point de flétrissement permanent de la strate *i*, tube *p*, en mm;
- RP_{ip(j)} - rétention en eau de la strate *i*, tube *p*, le jour *j*, en mm;
- RP_{ipR.U.} - "réserve utile" de la strate *i*, tube *p*, en mm;
- RPP_{R.U.} - "réserve utile", tube *p*, en mm;
- RP_{p(j)} - rétention en eau, tube *p*, le jour *j*, en mm;
- Rs - ruissellement de l'eau sur la surface, en mm.
 j^{-1} ;
- Rsp - résistance totale sur l'ensemble du trajet sol-plante, correspondant à la somme des résistances suivantes :
- résistance à la pénétration radiale de l'eau dans les racines,
 - résistance des manchons du sol entourant les racines,
 - résistance à la circulation de l'eau dans le xylème,
 - résistance à la circulation de l'eau dans les nervures des feuilles et les chambres sous-stomatiques, en bars. $j^{-1}mm^{-1}$;
- RT_{max} - rétention en eau maximale des troncs d'arbres, en mm;
- RT_{min} - rétention en eau minimale des troncs d'arbres, en mm;
- RT_{R.U.} - "réserve utile" des troncs d'arbres, en mm;
- S - surface du sol, en m²;
- SE - sortie de l'eau de l'écosystème, en mm. j^{-1} ;
- SG - surface des grilles, en cm²;
- St - rapport surface des troncs d'arbres du peuplement/surface du sol occupée par ce peuplement;
- ST - surface des troncs d'arbres, en m²;
- TR_(j) - transpiration de la forêt le jour *j*, en mm.
 j^{-1} ;
- a - albédo moyen du couvert;
- b - recouvrement de la surface du sol par les branches;
- b0....b4 - stades de l'évolution des bourgeons;

bf	- recouvrement de la surface du sol par les branches et les feuilles;
c_s	- conductance stomatique, en cm.s^{-1} ;
d	- hauteur du déplacement;
e_a	- pression actuelle de vapeur d'eau à une hauteur donnée au-dessus de la surface évaporante en mbars;
$e_s(t_a)$	- pression de vapeur d'eau saturante pour une température de l'air t_a , en mbars;
$e_s(t_{ch})$	- pression de vapeur d'eau saturante pour une température de la chambre t_{ch} , en mbars;
f	- recouvrement du sol par les feuilles;
h	- hauteur du peuplement, en m;
h_i	- épaisseur de la strate i du sol, en m;
h_p	- hauteur de la remontée du mercure dans le manomètre, en mm;
i	- numéro de la strate du sol;
j	- numéro du jour;
jdr	- numéro du jour du débourrement;
jrfc	- numéro du jour de la fin de la croissance des feuilles;
k	- coefficient d'extinction du rayonnement solaire;
k_0	- constante de Karman (0.39);
k_s	- conductivité hydraulique du sol saturé, en m.s^{-1} ;
n	- nombre de strates du profil du sol;
p	- numéro du tube;
q	- flux d'eau liquide, en mm.j^{-1} ;
$r_a(j)$	- résistance aérodynamique pour la forêt le jour j, en s.cm^{-1} ;
rb_{\max}	- rétention en eau maximale des branches pour un recouvrement du sol par les branches b, en mm;
rb_{\min}	- rétention en eau minimale des branches pour un recouvrement du sol par les branches b, en mm;

$r_{f_{max}}$	- rétention en eau maximale des feuilles pour un recouvrement du sol par les feuilles f , en mm;
$r_{f_{min}}$	- rétention en eau minimale des feuilles pour un recouvrement du sol par les feuilles f , en mm;
$r_{f^*_{max}}$	- rétention en eau maximale des feuilles pour un recouvrement du sol par les feuilles de 100 % avec $LAI(j)$ pour indice foliaire, en mm;
$r_{f^*_{min}}$	- rétention en eau minimale des feuilles pour un recouvrement du sol par les feuilles de 100 % avec $LAI(j)$ pour indice foliaire, en mm;
$r_s(j)$	- résistance stomatique foliaire moyenne le jour j , pour le potentiel hydrique des feuilles $\Psi_f(j)$ en $s.cm^{-1}$;
r_{smax}	- résistance stomatique foliaire maximale pour le potentiel hydrique des feuilles maximal Ψ_{fmax} , en $s.cm^{-1}$;
$r_{smin}(j)$	- résistance stomatique foliaire minimale le jour j pour le potentiel hydrique des feuilles inférieur au potentiel hydrique critique Ψ_{flim} , en $s.cm^{-1}$;
t	- nombre de jours du bilan;
$t_a(j)$	- température moyenne de l'air le jour j , en °C;
t_{ch}	- température de la chambre, en °C;
t_f	- température de la feuille, en °C;
$t_h(j)$	- température humide de l'air le jour j , en °C;
$t_r(j)$	- température du point de rosée le jour j , en °C;
$t_s(j)$	- température du couvert forestier le jour j , en °K;
$v(j)$	- vitesse moyenne du vent le jour j , en $m.s^{-1}$;
z	- niveau considéré;
z_0	- longueur de rugosité;
z_1	- différence entre la surface du sol et la surface libre de mercure, en mm;
α	- coefficient de précision d'approche;
γ	- constante psychrométrique, en $mb\ ^\circ C^{-1}$;

- Δ - dérivée de la courbe de pression de vapeur saturante de l'eau à la température de l'air t_{aj} . On suppose que la température de l'air t_{aj} est approximativement la même que celle de la surface évaporante;
- ϵ - émissivité moyenne de la forêt;
- $\theta_{ip}(j)$ - humidité volumique de la strate i , tube p , le jour j , en $\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$;
- θ_s - humidité superficielle de la surface évaporante;
- λ - longueur d'ondes, en μm ;
- ρ - masse volumique de l'air, en kgm^{-3} ;
- σ - constante de Stefan-Boltzmann ($5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Wm}^{-2} \text{ } ^\circ\text{K}^{-4}$);
- $\Psi_f(j)$ - potentiel hydrique moyen des feuilles d'arbres le jour j , en bars;
- Ψ_{flim} - potentiel hydrique critique de la feuille au-delà duquel les stomates se ferment, en bars;
- Ψ_{fmax} - potentiel hydrique maximal de la feuille, en bars;
- $\Psi_{sp}(j)$ - potentiel hydrique moyen dans la zone racinaire obtenue d'après une méthode qui consiste à pondérer le potentiel de chaque strate ($\Psi_{sip}(j)$) par un coefficient égal au rapport de la longueur racinaire (PR_{ip}) dans la strate considérée (i) à la longueur racinaire totale (PR_p) le jour j , tube p , en bars;
- $\Psi_{sip}(j)$ - potentiel hydrique moyen dans la strate i , tube p , le jour j , en bars.

INTRODUCTION

Nous nous proposons de modéliser le bilan hydrique d'un peuplement de chênes appartenant au massif forestier de Fontainebleau.

Deux applications peuvent être envisagées :

- 1 - apprécier l'impact de la présence d'un peuplement forestier sur le bilan hydrique d'une région.
- 2 - prédire les périodes de déficit hydrique, leur intensité et leur incidence sur la production de bois.

Dans le travail présent, nous nous intéressons seulement aux aspects fondamentaux en cherchant à rendre compte par des équations des processus physiques et biologiques qui régissent le bilan hydrique.

Pour étudier les échanges de vapeur d'eau entre notre couvert forestier et l'atmosphère, nous avons adopté la démarche proposée par MONTEITH (1965); cette méthode présente l'avantage de pouvoir être utilisée en ne disposant que de moyens matériels simples; d'autre part notre station d'étude, supposée représentative du peuplement forestier, répond aux exigences de cette démarche : l'uniformité horizontale du peuplement (chênaie faisant partie du massif forestier de Fontainebleau de 25 000 ha) et l'uniformité verticale de ce peuplement (futaie de chênes de 120 ans).

Nous avons, dans cette étude, tenté d'approcher au mieux l'évolution de la résistance du couvert qui régule le flux de vapeur d'eau, en suivant les variations de l'indice foliaire et de la résistance stomatique d'une feuille.

Notre travail comprendra quatre parties distinctes :

- Dans le chapitre "Cycle hydrologique en forêt", nous commencerons par exposer les théories et relations de base choisies pour ce travail, décrivant qualitativement les phénomènes de circulation de l'eau dans un écosystème forestier.

- Le chapitre suivant "Modélisation du bilan d'eau de la forêt" sera consacré à l'approche quantitative, la modélisation des processus précédemment exposés.

- Ensuite, dans le chapitre "La station, les résultats obtenus", nous discuterons l'ensemble de nos mesures, à savoir les paramètres du milieu nécessaires à la construction du modèle ainsi que les bilans et les flux nécessaires à sa validation.

- Dans le dernier chapitre "Comparaison du modèle avec les mesures", nous serons amenés à discuter des grandeurs dont l'étude expérimentale mérite d'être approfondie.

CYCLE HYDROLOGIQUE EN FORET

2.1 - ELEMENTS DU BILAN ET METHODES EMPLOYEES

2.1.1 - Approche générale

Le bilan d'eau dans une forêt peut être étudié à différentes échelles spatiales : feuille, arbre, peuplement ou massif forestier, et à différentes échelles de temps : heure, jour, année. Chaque niveau d'approche suppose des mesures et une méthodologie d'échantillonnage particulières permettant d'intégrer les hétérogénéités spatiales en vue d'un traitement statistique. D'autre part, pour un niveau d'étude donné, la description des variations temporelles du cycle pour chaque composante du bilan nécessite une division du temps en périodes de durée fixe, pendant lesquelles l'état du système considéré reste le même, tout changement supposé ayant lieu d'un intervalle à l'autre. Dans cette étude, nous avons choisi, pour des raisons expliquées par la suite, de travailler au niveau du peuplement et d'utiliser un pas de temps d'une journée. Pour décrire l'état hydrique de la forêt, nous avons utilisé des valeurs moyennes ou cumulées d'une journée, exprimées en unités de teneur en eau (mm) ou en potentiel hydrique (bars). L'expression simplifiée du bilan d'eau d'un peuplement est illustrée par le schéma 1 ; elle se présente sous la forme suivante :

Apports d'eau (AE) dans le peuplement = contenu en eau (CE) du peuplement + sorties d'eau (SE)

$$CE/t = AE - SE \text{ (mm.j}^{-1}\text{)} \quad (2.1)$$

L'alimentation en eau (AE) du système est assurée, par ordre d'importance, par les précipitations incidentes (pluie ou neige) (P_i), la nappe phréatique (N), le ruissellement sur la surface (R_s) et dans le sol (R_e), les brouillards (Br), les rosées (U) et l'absorption d'eau par la cuticule des feuilles d'arbres (AF). Dans ce qui suit nous ne considérerons que les précipitations incidentes (P_i), nous pouvons en effet négliger, en raison de leur importance quantitative mineure, la valeur des brouillards (Br) (FARDJAH, 1978), des rosées (U) et de l'absorption de l'eau par la cuticule des feuilles d'arbres (AF) (AUSSENAC, 1977b) ; d'autre part, compte-tenu des conditions topographiques locales de la station d'étude (ROBIN, 1968 ; PONTAILLER, 1977 ; FAILLE, 1978), nous pouvons éliminer les apports d'eau par la nappe phréatique (N), ainsi que le ruissellement sur la surface (R_s) et dans le sol (R_e).

$$AE = P_i \text{ (mm.j}^{-1}\text{)} \quad (2.2)$$

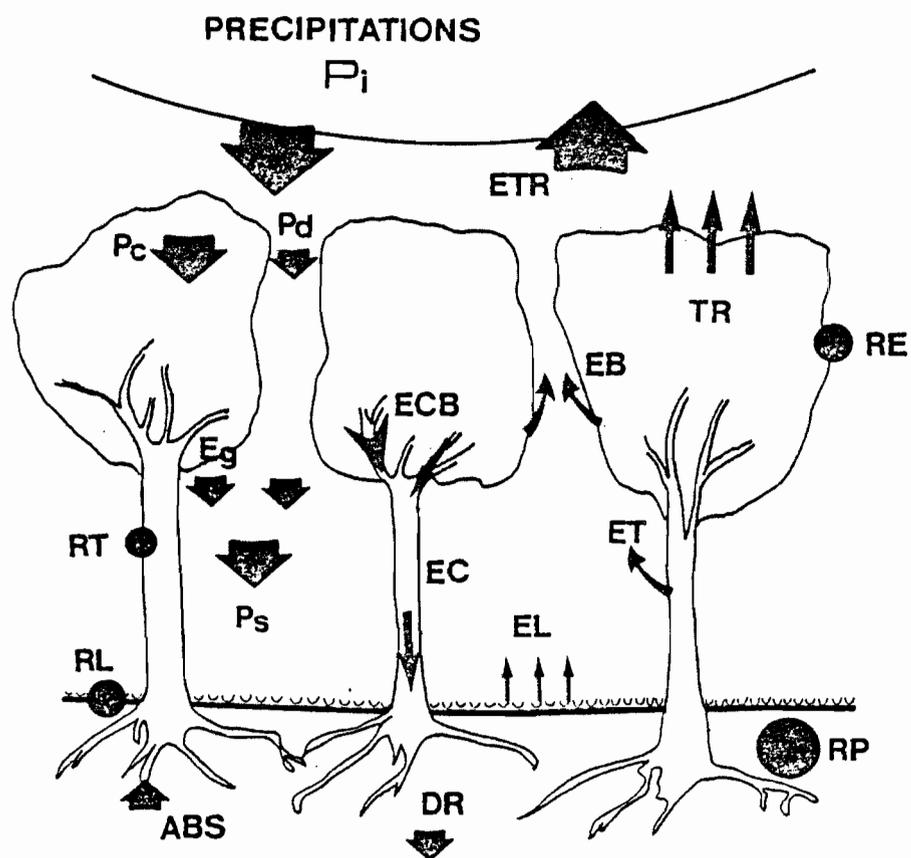


Schéma 1 - Bilan simplifié de l'eau en forêt.

Les sorties d'eau (SE) réelles peuvent se résumer à :
la transpiration (TR), l'évaporation de l'eau des couronnes (EB) et des troncs (ET) d'arbres, l'évaporation de l'eau de la litière (EL) et du sol (ES), le drainage (DR), le ruissellement sur la surface (Rs) et dans le sol (Re), l'eau absorbée, utilisée dans les processus de croissance (CR). Dans ce qui suit nous n'avons pris en compte que la transpiration (TR), l'interception (In) et le drainage (DR) :

- nous avons éliminé, compte-tenu des conditions topographiques locales de la placette d'étude le ruissellement sur la surface (Rs) et dans le sol (Re),

- nous admettrons que la litière de feuilles supprime l'évaporation de l'eau du sol (ES) (LEMEE et FARDJAH, 1980),

- nous regrouperons les valeurs de l'eau évaporée des couronnes (EB), des troncs (ET), de la litière (EL) et le volume d'eau provenant de la biomasse morte (CR) dans l'interception (In). Ainsi :

$$SE = TR + In + DR \text{ (mm.j}^{-1}\text{)} \quad (2.3)$$

L'eau, dans le système considéré, est retenue (CE) principalement dans le sol (RP), dans la litière (RL), sur les troncs (RT), sur les couronnes d'arbres (RE) et dans l'arbre lui-même (hydromasse, H). Dans ce qui suit nous ne tiendrons compte que de la réserve en eau du sol (RP) :

- nous regrouperons les valeurs du stock d'eau sur les couronnes (RE), sur les troncs (RT) et dans la litière (RL) avec celles des précipitations au sol (Ps) ;

- nous assimilerons les précipitations au sol (Ps) aux valeurs du volume d'eau qui entre dans le sol (RP/t) ;

- nous supposerons, en admettant que le transfert de l'eau du sol vers l'atmosphère a le caractère d'un flux conservatif (transpiration = absorption) (VAN DEN HONERT, 1948), que la valeur de l'hydromasse est constante. Ainsi :

$$CE = RP/t \text{ (mm.j}^{-1}\text{)} \quad (2.4)$$

Nous avons obtenu, après ces déductions, l'équation du bilan d'eau sous la forme suivante :

$$Pi = TR + In + DR + RP/t \text{ (mm.j}^{-1}\text{)} \quad (2.5)$$

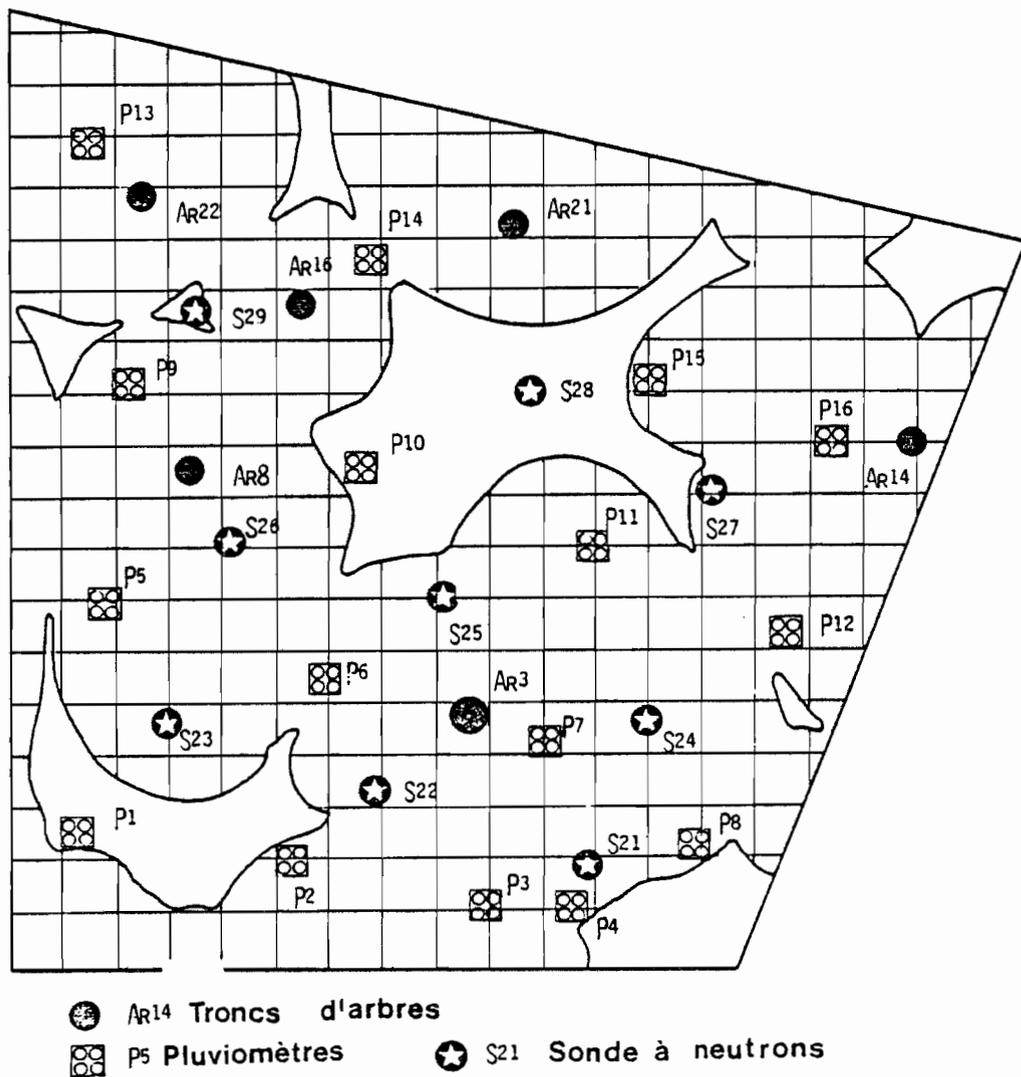


Figure 1 - Plan de la station d'étude :

- surface 277 m²,
- pente 0 % ,
- altitude 130 à 140 m,
- la projection de la couronne des chênes est en traits fins et hachures.

Nous avons mesuré la réserve en eau du sol (RP), les précipitations au-dessus de la végétation (Pi) et au sol (Ps) ainsi que l'écoulement le long des troncs (EC) ; les valeurs du drainage (DR), de l'interception (In) et de la transpiration (TR) ont été calculées.

Les variations quantitatives et temporelles de chacun des éléments du bilan mentionnés ci-dessus, dépendent des facteurs physiques de l'atmosphère et du sol, et des facteurs propres à la végétation. Parmi ces derniers, nous devons tenir compte de l'âge du peuplement, donc de sa potentialité d'accroissement d'une année à l'autre. Nous avons considéré notre peuplement comme stabilisé : ainsi sur la durée de l'étude (3 ans) on peut négliger les variations de biomasse des troncs et des branches. Quant à l'indice foliaire, il est stabilisé dès la fermeture du couvert.

2.1.2 - Apports d'eau

Nous rappelons que l'apport d'eau à l'écosystème est limité aux précipitations sous forme de pluie. DOIGNON, cité par FARDJAH (1978) mentionne la présence de neige 17 jours en moyenne par an, phénomène que nous négligeons. En période de chute de neige, l'absorption n'existe pas, l'ETP est la plus basse de l'année, la rétention en eau du profil du sol est supérieure ou égale à la capacité au champ ; au total, le drainage n'est que ralenti par la durée de fonte de la neige.

Les précipitations incidentes (Pi) arrivent au niveau des couronnes. En fonction du degré de recouvrement du sol par la végétation (CC) elles tombent directement au sol (Pd) ou elles rencontrent l'écran végétal (Pc). Cette partie de la pluie (Pc) réhumecte la surface des feuilles, des branches et des troncs. Si elle dépasse leur capacité maximale de rétention en eau (RE_{max} et RT_{max}), il y a égouttement de l'eau des feuilles et des branches (EGB) vers la surface du sol et écoulement - l'eau ruisselant le long des branches (ECB) et des troncs arrive au sol (EC). Dans tous les cas, il existe une fraction de Pc qui s'évapore vers l'atmosphère sous forme d'interception (In). On peut écrire :

$$Pi = (Pd + (EGB + EC)) + In \text{ (mm} \cdot \text{j}^{-1}\text{)} \quad (2.6)$$

- Précipitations incidentes (Pi)

Les valeurs des précipitations tombant sur la forêt peuvent être estimées à l'aide de pluviomètres déposés sur une tour de 1,5 m au-dessus du sol ou encore posés au sol, sur une face dépourvue de végétation à proximité de l'écosystème observé (IBRAHIM, 1979). SCHNOCK (1970) estime l'erreur à 1 à 2 % des précipitations totales.

(1)



(2)

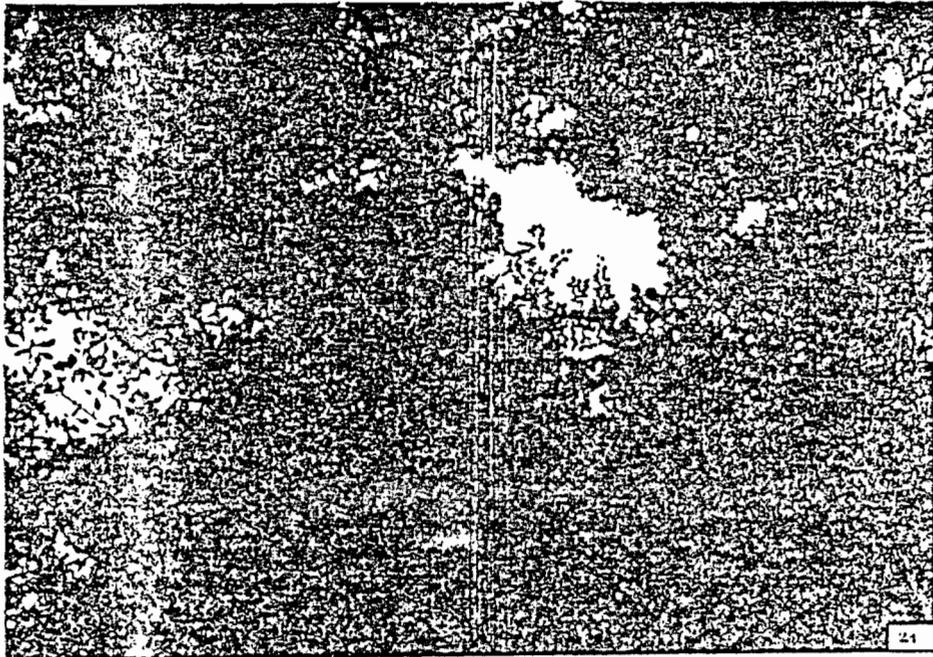


Photo 1 - Recouvrement du sol par les couronnes d'arbres au niveau du tube 21.

(1) phase sans feuilles; recouvrement CC = 31,6 %,

(2) phase avec feuilles; recouvrement CC = 86,8 %.

Nous avons utilisé, dans nos calculs du bilan d'eau de l'ensemble du peuplement et de chacun des neuf tubes, les relevés journaliers de la pluie (P_i), effectués à la station météorologique de Fontainebleau-Ville, à 2 km de la placette d'étude (DOIGNON, communication personnelle), obtenus à l'aide d'un pluviomètre de type "association" (la surface réceptive est de 400 cm^2 , le pluviomètre est placé à 1,5 m de la surface du sol). Parallèlement, nous avons mesuré les précipitations incidentes (P_i) pendant des périodes variables (de 7 à 10 jours) au moyen des 4 pluviomètres fixes (la surface totale de réception est de 225 cm^2) déposés au sol sur une parcelle déboisée circulaire de $1\ 000 \text{ m}^2$ entourée d'arbres d'environ 10 mètres de haut, située à 2 km du lieu d'expérimentation. Nous comparerons, pour le bilan d'eau de l'ensemble du peuplement et pour chacun des 9 tubes, la valeur moyenne des hauteurs d'eau des 4 pluviomètres avec les valeurs moyennes journalières cumulées sur des durées déterminées.

- Précipitations au sol ($P_s = P_d + EGB$)

Les précipitations arrivant au sol, soit la pluie directe (P_d) et l'égouttement des couronnes (EGB) ont été recueillis à l'aide de 64 pluviomètres fixes disposés régulièrement sur la placette d'étude (296 m^2) et recouvrant une surface totale de $3\ 607 \text{ cm}^2$. La figure 1 illustre la distribution spatiale des 64 pluviomètres et des 9 tubes.

Nous avons utilisé la moyenne des hauteurs d'eau des précipitations au sol (P_s) des 64 pluviomètres comme valeur représentative de l'ensemble du peuplement (64 pluviomètres - 9 tubes). Pour chaque tube, nous avons pris en considération les 4 groupes de pluviomètres disposés à son voisinage immédiat, soit 16 pluviomètres recouvrant une surface de réception de 902 cm^2 .

- Ecoulement le long des troncs (EC)

AUSSENAC (1968) a employé une technique qui permet de recueillir l'eau qui coule le long des troncs des arbres (EC). Elle consiste à entourer le tronc d'une gouttière en matière plastique, étanchéifiée par un mastic souple, en forme de spirale débutant à 1,3 m du sol et s'arrêtant à 0,5 m, hauteur à laquelle le volume d'eau recueilli par la gouttière s'écoule dans un bidon installé au pied de l'arbre. Nous avons mesuré cet écoulement sur 2 arbres, différant par leur circonférence de tronc et par la surface de la projection verticale au sol de leur couronne.

L'écoulement le long des troncs, exprimé en hauteur d'eau pour l'ensemble du peuplement, est calculé à partir de la somme des volumes d'eau collectés dans les 2 bidons, divisée par la somme des surfaces des projections verticales des couronnes des 2 arbres. Pour obtenir ces dernières, nous nous sommes déplacés à la limite verticale des couronnes d'arbres avec un fil à

Tableau 1 - Degré de recouvrement de la surface du sol par les couronnes d'arbres.

(1) PHASE SANS FEUILLES

Numero du tube		Essai N° 1 en %	Essai N° 2 en %	Essai N° 3 en %	Valeurs moyennes
21	Blanc	66.40	69.60	69.14	68.40 ^x
	Noir (b)	33.60	30.32	30.86	31.60 ^x
Valeur moyenne des neuf tubes	Blanc				58.41 ^{xx}
	Noir (b)				41.59 ^{xx}
(2) PHASE AVEC FEUILLES					
Numero du tube		Essai N° 1 en %	Essai N° 2 en %	Essai N° 3 en %	Valeurs moyennes
21	Blanc	13.54	13.60	12.48	13.21 ^{xxx}
	Noir (b)	86.46	86.40	87.52	86.79 ^{xxx}
Valeur moyenne des neuf tubes	Blanc				7.93 ^{xxxx}
	Noir (b)				92.07 ^{xxxx}

^x N= 3; s=1.76

^{xx} N=27; s=7.18

^{xxx} N= 3; s=0.63

^{xxxx} N=27; s=6.20

plomb, et à chaque mètre environ, nous avons fixé en terre un repère nous permettant de localiser sur le sol la surface projetée d'une couronne d'arbre donnée.

Nos mesures (Pi, Ps et EC) sont faites toutes les semaines en moyenne lors de la période avec feuilles, et tous les mois pour la phase sans feuilles, à l'aide d'une éprouvette graduée (précision $\pm 1 \text{ cm}^3$). L'interception (In) dans un cycle hydrologique fait partie des sorties d'eau qui seront discutées dans le chapitre 2.1.4.

2.1.3 - Contenu en eau de l'écosystème

L'eau est retenue dans le sol (RP), dans la litière (RL), dans l'hydromasse de la végétation (H) et à la surface des parties aériennes : les couronnes (RE) et les troncs (RT).

(1) Capacité de rétention en eau des couronnes d'arbres (RE)

La capacité de rétention en eau de la surface des parties aériennes d'arbres intervient directement dans la distribution des apports d'eau tels que l'égouttement (EGB) et l'écoulement le long des troncs (EC) (AUSSENAC, 1975). La capacité de rétention en eau des couronnes et des troncs a une importance capitale pour comprendre le phénomène d'interception (In) (RUTTER, 1975). La surface des feuilles, des branches et des troncs constitue un réservoir qui est rempli par la pluie (Pi) et est vidé par la demande évaporative de l'atmosphère (ETP). D'autre part, l'évolution de l'indice foliaire (LAI) conditionne les variations dans le temps de la capacité de rétention en eau des couronnes d'arbres.

L'évolution de cette "réserve utile" exige que nous estimions :

a) le degré de recouvrement de la surface du sol par les couronnes et donc, respectivement, celui des branches et des feuilles ;

b) la "réserve utile" des branches à partir d'un échantillon de l'écorce des branches ;

c) la "réserve utile" des feuilles à partir d'un échantillon de feuilles ;

d) la capacité de rétention en eau des couronnes d'arbres.

a - Le degré de recouvrement du sol par les couronnes d'arbres (CC) : nous l'avons estimé à partir de photographies hémisphériques (ANDERSON, 1966 ; BONHOMME, 1970) prises au-dessus de chacun des 9 tubes lors de la phase sans feuilles (LAI = 0) et de la phase avec feuilles, au maximum d'indice foliaire (Photo 1). Nous avons interprété ces photographies au Laboratoire de Télédétection de Bioclimatologie de l'INRA, à Versailles, en mesurant la surface relative de la zone opaque (branches, ou branches + feuilles) pour une fraction de photographie estimée comme étant la "zone d'influence" d'un tube.

Chaque lecture a été répétée 3 fois. Nous avons ensuite calculé le pourcentage de recouvrement de la surface du sol par les branches (b, phase sans feuille) et le pourcentage de recouvrement du sol par les branches et les feuilles (bf, phase avec feuilles) tel que $LAI = LAI_{max}$; par différence, nous obtenons le pourcentage de recouvrement du sol par les feuilles (f) (Tableau 1).

$$f = bf - b \quad (2.7)$$

A partir de ce pourcentage de recouvrement du sol par les couronnes d'arbres, à l'époque où le $LAI = LAI_{max}$, nous avons évalué le recouvrement pour les phases intermédiaires entre l'hiver (pas de feuilles, LAI = 0) et le moment où $LAI = LAI_{max}$ (été), à savoir l'automne et le printemps, comme suit :

$$CC = C_{10} \cdot LAI + C_{11} \quad (2.8)$$

Pour l'ensemble du peuplement, nous avons fait la moyenne arithmétique des valeurs des 9 tubes, avec $C_{10} = 11,85$ et $C_{11} = 31,60$.

b - La "réserve utile" des branches. Nous avons récolté, dans le peuplement, une surface d'écorce de branches (5 échantillons totalisant 4 022 cm²)*. Cette surface a été saturée en eau, puis pesée (poids à saturation) et ensuite, une

* Les écorces ont été découpées en surfaces planes, reportées ensuite sur papier dont nous avons mesuré la surface avec un planimètre automatique de type "Delta" (précision de % 0,1 cm²).

partie (3 échantillons) a été séchée à 105 °C et l'autre (2 échantillons) a été séchée à l'air (20 °C, jusqu'à stabilisation du poids). La "réserve utile" en eau des écorces des branches, exprimée en hauteur d'eau, est égale à la différence entre le volume d'eau à saturation et le volume d'eau à 20 °C, divisée par la surface de l'échantillon ($CCb = 1,08 \text{ mm}^*$, $CCb_{\text{max}} = 4,70 \text{ mm}^{**}$).

c) La "réserve utile" des feuilles. Nous avons récolté, au moment où $LAI = LAI_{\text{max}}$, une branche avec les feuilles et nous avons immédiatement immergé la coupure dans l'eau, sur le terrain. Pour apprécier la quantité d'eau maximale susceptible d'être retenue à la surface d'une feuille, nous avons pesé chaque feuille de l'échantillon sans eau sur sa surface et après immersion sous l'eau, mouillée. Ainsi, nous avons estimé le volume d'eau maximum moyen retenu à la surface d'une feuille (CCf_{max}) qui, divisé par la surface moyenne, nous a donné la capacité de rétention maximale, en hauteur d'eau ($CCf_{\text{max}} = 0,472 \text{ mm}$; $N = 29$; $S = 0.23$). Si on assimile une végétation à LAI - feuilles, retenant l'eau en parallèle, le volume d'eau total susceptible d'être retenu par toutes les feuilles est égal à :

$$rf^*_{\text{max}} = LAI \cdot CCf_{\text{max}} \quad (2.9)$$

alors pour $LAI_{\text{max}} = 4,26$, $rf^*_{\text{max}} = 2,01 \text{ mm}$

La capacité de rétention minimale est considérée comme nulle ($CCf_{\text{min}} = 0$), alors $rf^*_{\text{min}} = 0$.

d) Capacité de rétention en eau des couronnes d'arbres. La capacité de rétention maximale de l'eau par les couronnes d'arbres pour la phase sans feuilles ($LAI = 0$) a été calculée d'après la formule suivante :

$$rb_{\text{max}} = CCb_{\text{max}} \cdot b \quad (2.10)$$

La rétention maximale en eau, seulement par les feuilles (rf_{max}) a été estimée par l'équation :

$$rf_{\text{max}} = rf^*_{\text{max}} \cdot f \quad (2.11)$$

* $N = 2$; $S = 1,01$; $\bar{x} = 1,085 \text{ mm}$

** $N = 5$; $S = 0,532$; $\bar{x} = 4,696 \text{ mm}$

Tableau 2 - Capacité de rétention en eau des couronnes d'arbres (LAI_{max} = 4.26).

	Numéro du tube	
	21	Valeurs moyennes des neuf tubes
Recouvrement du sol par:		
- branches (b)	0.260	0.343
- branches et feuilles (bf)	0.715	0.759
- feuilles (f=bf-b)	0.415	0.416
Capacité de rétention en eau de l'écorce, en mm:		
- minimale (CC _{min})		1.085
- maximale (CC _{max})		4.696
Capacité de rétention en eau des feuilles, en mm:		
- minimale (rf ^k _{min})		0.000
- maximale (rf ^k _{max})		2.010
Capacité de rétention en eau des branches, en mm:		
- minimale (rb _{min} =CC _{min} x b)	0.283	0.372
- maximale (rb _{max} =CC _{max} x b)	1.223	1.609
Capacité de rétention en eau des feuilles, en mm:		
- minimale (rf _{min} =rf ^k _{min} x f)		0.000
- maximale (rf _{max} =rf ^k _{max} x f)	1.109	1.015
Capacité de rétention en eau des couronnes d'arbres, en mm:		
- minimale (RE _{min} =rf _{min} + rb _{min})	0.283	0.372
- maximale (RE _{max} =rf _{max} + rb _{max})	2.331	2.624
"Réserve utile" des couronnes d'arbres, en mm (RE _{RU} =RE _{max} - RE _{min})	2.050	2.250

Ainsi, la rétention maximale en eau pour les couronnes d'arbres (phase avec feuilles) est la somme de 2 rétentions maximales, celle des branches (rb_{max}) et celle des feuilles (rf_{max}) (Tableau 2) :

$$RE_{max} = rb_{max} + rf_{max} \text{ (mm)} \quad (2.12)$$

Pour calculer la capacité maximale de rétention en eau des couronnes pour toutes les phases, nous proposons la formule suivante :

$$RE_{max} = C_{13} \cdot LAI + rb_{max} \quad (2.13)$$

avec : $C_{13} = 0,26$ (tube 21)
 $C_{13} = 0,29$ (ensemble de la placette d'étude)

(2) Capacité de rétention en eau par la surface des troncs

(RT)

De façon similaire à l'estimation de la capacité maximale de rétention en eau par l'écorce des branches, nous avons estimé la capacité de rétention maximale par l'écorce des troncs d'arbres (CCb_{max}). Ensuite, nous avons effectué, sur une surface (S) d'un ha (station d'expérimentation comprise), le relevé de la structure du peuplement (mesures faites par classes de 10 cm de diamètre, à 1,3 m du sol, avec une précision de 1 cm) (Figure 2). Nous avons comptabilisé le nombre d'arbres par classe, puis pour chaque classe, nous avons établi la relation entre la circonférence du tronc à 1,3 m du sol et sa surface. Connaissant le nombre d'individus par classe, nous avons évalué la surface de tous les troncs d'arbres d'une classe* et de même pour l'ensemble de toutes les classes (ST).

* La surface d'un arbre a été mesurée de la façon suivante : nous avons assimilé le tronc d'arbre, du sol au niveau du houppier à un cône tronqué dont nous avons mesuré deux circonférences particulières :

- la circonférence au niveau du houppier (la plus haute) à l'aide du relascope de Biterlisch,
- la circonférence à 1,30 m du sol (la plus basse) à l'aide d'un mètre.

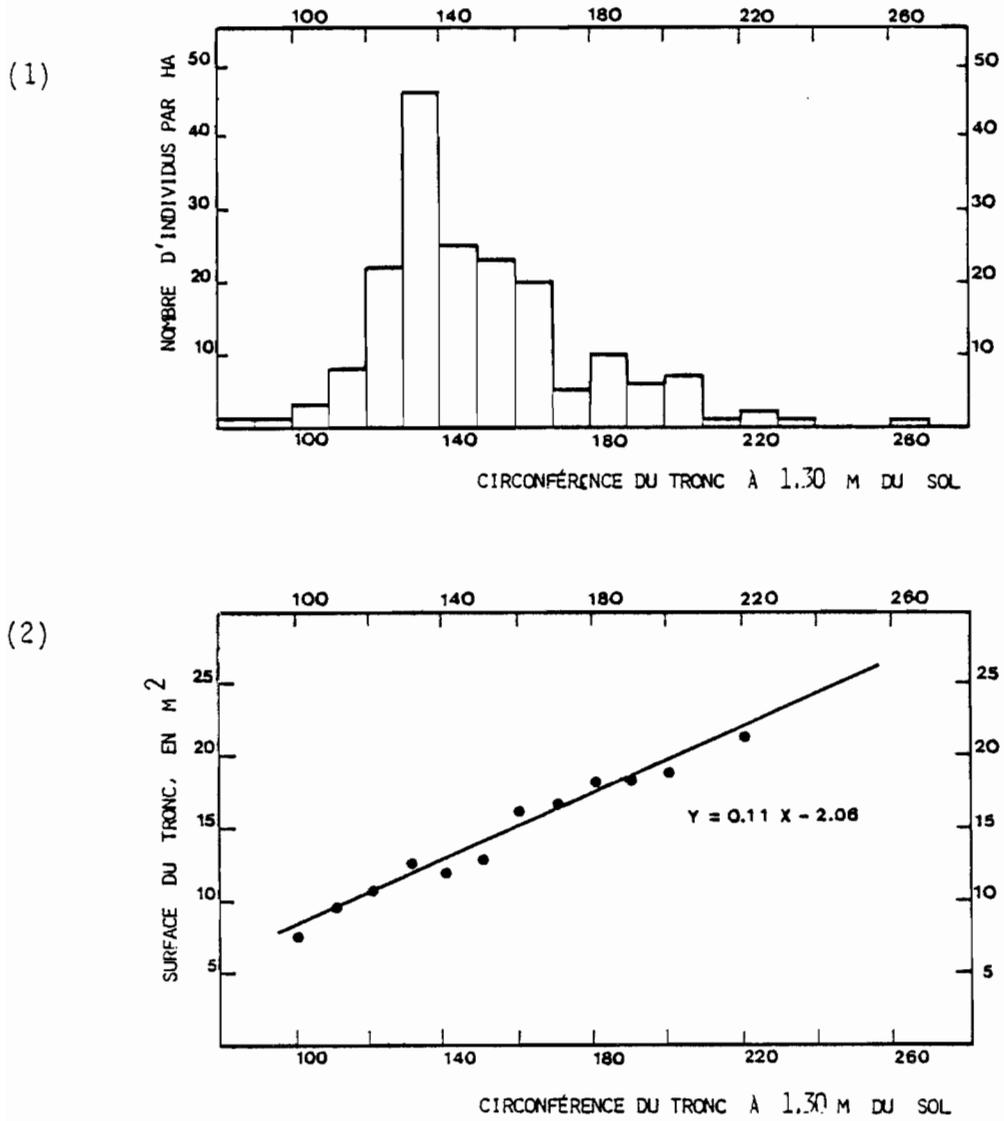


Figure 2

- (1) Structure du peuplement ligneux du Gros-Fouteau.
- (2) Relation entre la circonférence du tronc à 1,30 m du sol et sa surface.

Connaissant la surface évaporante des troncs d'arbres du peuplement (ST) rapportée à une surface (S), la "réserve maximale" de l'écorce des troncs d'arbres (RT_{max}) est égale à :

$$RT_{max} = (ST/S) \cdot CCB_{max} \text{ (mm)} \quad (2.14)$$

avec : $ST = 2635 \text{ m}^2 \cdot \text{ha}^{-1}$

La "réserve minimale" s'écrit donc :

$$RT_{min} = (ST/S) \cdot CCB_{min} \text{ (mm)} \quad (2.15)$$

La "réserve utile" est ainsi la différence entre la "réserve maximale" et la "réserve minimale" en eau des troncs d'arbres, soit :

- La "réserve maximale" $RT_{max} = 1,24 \text{ mm}$
- la "réserve minimale" $RT_{min} = 0,29 \text{ mm}$
- la "réserve utile" $RT_{RU} = 0,95 \text{ mm}$

(3) Contenu en eau de la litière (RL)

La rétention en eau de la litière possède 2 aspects. D'une part, l'eau résiduelle interne aux feuilles de la litière fraîche et qui, d'après SCHNOCK (1972) est négligeable pour notre propos ; d'autre part, l'eau retenue par capillarité à la surface des feuilles, sa capacité de rétention en eau maximale, minimale et sa "réserve utile" qui évoluent au cours de l'année en fonction des apports de la litière fraîche et de la décomposition de la litière ancienne. D'après BIGNAND (1978), l'amplitude maximale de variation de la capacité de rétention capillaire en eau est de l'ordre de 3 mm, phénomène sans importance du point de vue du bilan d'eau général annuel. Nous avons effectué 2 séries de mesures de la capacité de rétention capillaire en période de valeur supposée moyenne, soient les 26 Avril et 26 Mai 1982.

La première expérience du 26 Avril 1982 avait pour but l'estimation de la capacité de rétention en eau absolue de la litière : nous avons recueilli la litière (fraîche et ancienne) à l'aide de 10 grilles (surface totale de $4\ 000 \text{ cm}^2$) à proximité de la station d'étude; après immersion de quelques minutes et égouttement gravifique (environ 1 h), nous avons pesé les échantillons, puis nous les avons séchés durant 1 semaine à $80 \text{ }^\circ\text{C}$; les échantillons secs sont pesés à $20 \text{ }^\circ\text{C}$ (capacité de rétention absolue en eau de la litière; $RL_{abs} = 6,45 \text{ mm}$; $N = 10$; $S = 2,19$).

La deuxième expérience du 26 Mai 1982 nous a permis d'établir la "réserve utile" de la litière. Nous avons prélevé

Tableau 3 - Valeurs de l'humidité à la capacité au champ, au point de flétrissement permanent, valeurs de la "réserve utile", pour chaque strate et pour l'ensemble du profil. Tube n° 21.

Strate (i)	Capacité au champ (RCC) en mm	Point de flétrissement (RPFP) en mm	"Réserve utile" (RP _{RU}) en mm
00 - 10	23.88	7.16	16.72
10 - 20	16.36	2.23	14.13
20 - 30	20.38	3.88	16.50
30 - 40	26.60	7.36	19.24
40 - 50	30.15	14.03	16.12
50 - 60	26.25	15.34	10.91
60 - 70	22.93	13.18	9.75
Total du profil	166.55	63.18	103.37

les échantillons (5 grilles, surface totale de 2 000 cm²) de la litière immédiatement après une forte pluie (capacité maximale de rétention en eau). Nous les avons pesés tout de suite après le prélèvement, puis ils ont été séchés à la température de l'air (environ 18 °C) durant 23 jours et enfin pesés. La différence entre les valeurs avant et après séchage nous donne la "réserve utile" de la litière. En comparant les résultats des 2 expériences, nous avons obtenu la réserve maximale en eau, à savoir le volume d'eau retenu après une forte pluie, donc à saturation; et la réserve en eau minimale à savoir le volume d'eau toujours retenu dans la litière dans les conditions naturelles (volume mesuré lors de la première expérience) (Capacité de rétention minimale en eau de la litière ; $RL_{\min} = 0,93$ mm*. Capacité maximale de rétention en eau de la litière, $RL_{\max} = 3,82$ mm**. "Réserve utile" de la litière $RL_{RU} = RL_{\max} - RL_{\min} = 2,89$ mm***).

La "réserve utile" de la litière intervient dans la distribution de la pluie qui arrive au sol (Ps). Ainsi, après une période de sécheresse, un volume de pluie inférieur ou égal à la "réserve utile" de la litière, n'arrivera pas jusqu'au sol, puisqu'il sera retenu par la litière.

(4) Contenu en eau du sol (RP)

L'analyse du bilan d'eau en forêt repose avant tout sur la détermination de l'état hydrique des horizons racinaires. C'est à partir des variations du stock d'eau du profil que l'on déduit la transpiration, donc la résistance de la végétation vis-à-vis de son environnement climatique, d'où l'importance accordée à la recherche de méthodes permettant d'apprécier le plus justement possible le contenu en eau du profil du sol (RP). Nous avons utilisé 2 types d'approche de ce phénomène : la mesure des quantités d'eau contenues dans le sol et celle de l'état énergétique de l'eau dans le sol. Dans ce chapitre, nous parlerons des méthodes de mesures des teneurs en eau ; dans le chapitre "Processus principaux qui influencent la circulation de l'eau en forêt", nous discuterons des méthodes de mesure du potentiel de l'eau dans le sol.

GARDNER (1965) récapitule l'ensemble des méthodes directes et indirectes pour mesurer la teneur en eau du sol. Dans cette étude, nous avons utilisé une sonde à neutrons de type "Solo" mise au point au CEN (Centre d'Etudes Nucléaires) de Cadarache.

* N = 5 ; $\bar{x} = 0,93$ mm ; S = 0,34
** N = 5 ; $\bar{x} = 3,82$ mm ; S = 1,17
*** N = 5 , $\bar{x} = 2,89$ mm ; S = 1,05

Nous avons utilisé la courbe d'étalonnage de la sonde établie à l'aide de la méthode gravimétrique de FARDJAH (1978) et PONTAILLER (1979)*.

Le dispositif expérimental permettant l'emploi de la sonde pour l'estimation des teneurs en eau des profils est constitué de 9 tubes en duralumin descendant jusqu'à la dalle calcaire à une profondeur variant de 0,5 à 0,9 m (voir Figure 1, la distribution spatiale des 9 tubes). Les mesures s'étalent du 29 Janvier 1981 au 21 Décembre 1983. Pour la phase sans feuilles, les mesures sont faites tous les 20 ou 30 jours, pour la phase avec feuilles, toutes les semaines dans chaque tube. Dans chaque cas elles sont effectuées tous les 10 cm de la surface du sol jusqu'au fond du tube, soit un ensemble de 64 niveaux. Nous avons compté 2 fois le nombre de neutrons thermiques pendant 20 secondes ; si les valeurs des 2 mesures différaient de plus de 10**, nous les avons répétées jusqu'à stabilisation des résultats. Le stock d'eau est exprimé en mm pour chaque niveau des tubes. La somme des stocks d'eau de tous les niveaux d'un tube constitue la réserve en eau du profil au niveau d'un tube. Les valeurs de l'humidité équivalent à la capacité au champ ont été déterminées pour chaque niveau de chacun des tubes à partir des mesures de teneur en eau pendant les phases sans feuilles (à transpiration nulle) sur les 3 ans d'expérience.

Pour estimer l'humidité équivalente au point de flétrissement permanent, nous avons repris les valeurs du stock d'eau (dans chacun des niveaux de chaque tube) les plus faibles observées durant ces 3 années d'expérimentation. Nous avons obtenu "la réserve utile" pour chaque niveau de chaque tube, leur somme nous donne la "réserve utile" pour chaque profil (Tableau 3).

(5) Contenu en eau de la forêt ou hydromasse (H)

Pour une forêt tempérée, d'âge similaire à celui de la nôtre, la biomasse totale s'élève à 30 kg m² (RUTTER, 1975). Si on suppose que les tissus des troncs et des racines contiennent 50 à 60 % de leur poids en eau et les feuilles 77 à 95 %, alors le volume d'eau susceptible d'être retenu par notre forêt s'élève à 30-50 %. Dans le bilan d'eau, nous sommes intéressés par la part "dynamique" du stock d'eau, c'est-à-dire par la

* Courbes d'étalonnage de l'humidimètre à neutrons :

RP A₁ = 0,059 * NC + 1,32 (en %) ;
RP A₂ = 0,075 * NC - 2,50 (en %) ;
RP A₂/B = 0,065 * NC + 0,70 (en %) ;
RP B = 0,054 * NC + 2,65 (en %) ;
RP B/C = 0,069 * NC + 1,37 (en %).

** Ceci correspond à une erreur relative allant de 5 % à la capacité au champ à 15 % au point de flétrissement permanent

fraction de la teneur en eau mise en circulation, la "réserve utile". L'eau qui reste toujours lié aux structures des éléments de l'écosystème n'intervient pas dans l'équation du bilan.

La variation de l'hydromasse d'une forêt pour une ETP très élevée est de 1 à 2 mm d'eau par jour (RUTTER, 1975). Le volume d'eau perdu pendant la journée est reconstitué durant la nuit par absorption active de l'eau du sol. Toutes ces fluctuations, quantitativement peu élevées (pour l'ensemble de la forêt de 2,5 à 5 % du volume d'eau total) peuvent être négligées dans un bilan portant sur plusieurs mois, avec un pas de temps de 24 h (qui intègre les variations jour-nuit). Le contenu en eau de la végétation sera exprimé en quantité d'eau par unité de poids de matière sèche ou en pourcentage de la teneur maximale en eau de l'échantillon (teneur en eau relative).

Toute perte d'eau momentanée de la végétation, à partir d'un seuil donné, influence, par la turgescence des feuilles, le fonctionnement des stomates (HSIAO, 1973) donc la transpiration et influence le port des feuilles, en conséquence l'interception. En résumé, nous négligerons toutes les variations de l'hydromasse, mais nous tiendrons compte des variations stomatiques qui, fonctionnellement, leur sont liées. Nous en discuterons dans le chapitre 2.2.3.4 et 3.3.2.

2.1.4 - Sorties d'eau

Les sorties d'eau de l'écosystème, après simplification (chapitre 2.1.1), se limitent, pour le peuplement étudié, à l'interception déduite directement, à la transpiration et au drainage par déduction indirecte. La précision de l'estimation de ces grandeurs dépend en partie de l'estimation de la demande évaporative de l'atmosphère (ETP). Dans le cas de notre peuplement, de la méthode de bilan choisie, de la situation climatique et pédologique, l'ETR sera supposée égale à l'ETP durant la phase sans feuilles ; si l'ETP est supérieure aux précipitations incidentes (P_i), alors le drainage n'existe pas, toutes les sorties d'eau du sol se font uniquement à travers la végétation (transpiration). Nous exposerons, dans le chapitre "Processus qui influencent la circulation de l'eau en forêt", la signification physique de l'ETP et ses méthodes d'approche.

a) Le drainage (DR)

La circulation de l'eau dans le sol est basée sur la notion de capacité de rétention en eau du sol, les mouvements d'eau ne se produisant qu'au-dessus d'un seuil de teneur en eau (FEODOROFF, 1962), seuil différant d'un sol à l'autre et dépendant de la taille prédominante ou de la gamme de tailles des particules du sol, d'une manière quantitative et

qualitative, ainsi que de leur arrangement spatial. Lorsque la rétention en eau du sol est supérieure à la capacité au champ, l'eau des macropores s'écoule vers la profondeur du profil, hors de la zone racinaire de la forêt : c'est l'eau de gravitation ou eau de drainage naturel. La littérature qui porte sur le bilan d'eau dans une forêt et en particulier sur le drainage, nous propose plusieurs méthodes pour l'estimer (IBRAHIM, 1979). Nous avons retenu la méthode de l'excédent climatique ; en reprenant l'équation du bilan simplifiée (2.5), deux possibilités d'évaluation du drainage se présentent :

- si l'humidité du sol (RP) est supérieure à la capacité au champ (RCC), alors l'évapotranspiration réelle est égale à l'évapotranspiration potentielle (ETP). Le drainage est alors :

si $RP \geq RCC$ (mm)

$$DR = (P_i - ETP) - RP/t \text{ (mm.j}^{-1}\text{)} \quad (2.16)$$

- si l'humidité du sol (RP) est inférieure ou égale à la capacité au champ (RCC), alors le drainage (DR) naturel n'existe pas ; ainsi :

si $RP \leq RCC$ (mm)

$$DR = 0 \text{ (mm.j}^{-1}\text{)}$$

b) Interception (In)

Cette fraction des précipitations incidentes (P_i), retenue dans la "réserve utile" de la litière, des couronnes et des troncs d'arbres, est évaporée sans atteindre le sol ; elle est estimée par différence entre le volume d'eau mesuré au-dessus de la végétation (P_i) et le volume d'eau qui arrive dans le sol (l'écoulement EC et la pluie au sol P_s) :

$$In = P_i - (EC + P_s) \text{ (mm.j}^{-1}\text{)} \quad (2.17)$$

c) Transpiration (TR)

La transpiration d'un peuplement forestier correspond au volume d'eau absorbé dans le sol sous forme liquide par le système racinaire et diffusé ensuite par les feuilles sous forme de vapeur, dans l'atmosphère. La connaissance incomplète de l'influence des facteurs climatiques, des paramètres dépendant de la végétation et de la situation topographique sur la transpiration est à l'origine de l'existence de plusieurs méthodes de son évaluation (IBRAHIM, 1979; BRUTSAERT, 1982;

STEWART, 1984). Dans tous les cas, la précision quantitative d'approche de la transpiration est de l'ordre de 20 % (STEWART, 1984). Nous avons choisi deux méthodes d'évaluation de la transpiration :

- d'abord la méthode de l'équation du bilan hydrique, employée depuis 1974 par les chercheurs qui ont travaillé sur les problèmes hydriques dans le massif forestier de Fontainebleau (FARDJAH, 1978; PONTAILLER, 1979; LEMEE et FARDJAH, 1980). Leurs résultats sont comparables aux valeurs obtenues pour des peuplements semblables (AUSSENAC, 1968, 1975, 1977b; SCHNOCK, 1968, 1970). Pour cela, il est nécessaire de prendre soin d'estimer correctement la zone racinaire du peuplement (DAUDET et VACHAUD, 1977) pour mesurer la "réserve utile" et la réserve actuelle (RP) des profils du sol de la zone racinaire. Nos sols épais de 0,5 à 0,9 m reposent sur une dalle calcaire, peu altérée, imperméable aux racines (ROBIN, 1968), le profil racinaire s'arrête à cette dalle. En reprenant l'équation du bilan (2.5) :

$$1. \quad TR = ETR - In$$

$$2. \quad In = Pi - (EC + Ps)$$

$$a. \quad \text{si } RP > RCC, \quad ETR = ETP$$

$$\text{donc } TR = ETP - In$$

$$DR = Pi - ETP - RP$$

$$b. \quad \text{si } RP \leq RCC, \quad DR = 0$$

$$ETR = Pi - RP$$

$$TR = (EC + Ps) - RP \quad (2.18)$$

La mesure du volume des apports d'eau (Ps + EC) et de la teneur en eau du sol a été effectuée en moyenne toutes les semaines (pour la phase avec feuilles), en conséquence, nous travaillons avec la transpiration cumulée durant la période séparant 2 mesures. La valeur journalière de la transpiration est obtenue en divisant la transpiration cumulée ($\sum_1^t TR$) sur t jours par ce nombre de jours :

$$TR = \frac{\sum_1^t TR}{t} \quad (\text{mm.j}^{-1}) \quad (2.19)$$

- nous avons ensuite estimé le taux journalier de la transpiration d'après la formule de MONTEITH (1965). Le commentaire de cette équation implique nécessairement de prendre en compte les processus qui gèrent la circulation de l'eau dans une forêt, cette équation sera discutée au chapitre suivant.

2.2 - PRINCIPAUX PROCESSUS INFLUENCANT LA CIRCULATION DE L'EAU DANS UNE FORET.

2.2.1 - Système sol-plante-atmosphère

Nous appréhenderons la circulation de l'eau dans l'écosystème forestier dans l'optique de VAN DEN HONERT (1948), reprise par COWAN (1965, 1977) et par PHILIP (1966), considérant l'ensemble sol-arbres-atmosphère comme une entité physique unique dans laquelle les processus liés à la circulation de l'eau de chacun des compartiments sont interdépendants ; cette optique suppose l'étude de la transpiration, processus permanent en phase feuillée et quantitativement le plus important*. Le flux transpiratoire comprend :

- l'écoulement de l'eau du sol vers les racines,
- l'absorption de l'eau par les racines d'arbres,
- la circulation dans l'arbre, des racines aux feuilles,
- la diffusion de vapeur d'eau à travers les stomates vers la couche d'air abordant le peuplement.

Le flux d'eau liquide est proportionnel au gradient des potentiels hydriques et inversement proportionnel à la résistance qu'il rencontre sur son parcours, soit par analogie à la loi d'Ohm, il est égal (GARDNER, 1960) à :

$$q = \Delta\Psi/R_{sp} \text{ (mm.j}^{-1}\text{)} \quad (2.20)$$

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.

L'approche quantitative du flux d'eau dans le système sol-plante-atmosphère nécessite l'évaluation du potentiel et de la résistance des points remarquables du parcours, en particulier des zones de transition entre le sol et les racines, les racines et les feuilles (eau en phase liquide) et entre les feuilles et l'air (avec changement d'état de l'eau liquide en phase vapeur). Les divers potentiels hydriques et résistances au flux de l'eau ou vapeur d'eau ne sont pas constants dans le temps, ils dépendent (PASSIOURA, 1982) :

* Selon AUSSÉNAC (1977a) pour la période du 26 Mars au 11 Novembre 1968 (phase avec feuilles), l'évapotranspiration réelle d'une forêt feuillée s'élève à 536,8 mm pour des précipitations incidentes de 548,7 mm, soit 98 % des pluies. ZINKE (1967) estime l'interception pour une forêt feuillée à 10-25 % des précipitations totales.

- de l'état physiologique de l'arbre qui peut être approché par l'intermédiaire de l'indice foliaire (croissance en surface et en poids, sénescence et chute des feuilles), de la croissance racinaire, de la rugosité du couvert, du changement d'albédo et des mouvements stomatiques ;

- des facteurs climatiques et édaphiques tels que la demande évaporative de l'atmosphère, les pluies et le drainage.

Dans notre étude, nous nous intéresserons plus particulièrement à l'évolution dans le temps de l'indice foliaire et de la résistance stomatique.

2.2.2 - Demande évaporative de l'atmosphère

MONTEITH (1965) compare le phénomène d'évaporation de l'eau à un échange commercial pour lequel la surface humide "vendrait" de la vapeur d'eau à son environnement en échange de chaleur : à 20°C, chaque gramme liquide nécessite 2 450 joules pour passer à l'état de vapeur d'eau.

a) Rayonnement net (Rn)

Nous nous intéresserons en premier lieu à l'apport d'énergie effectivement disponible pour la surface évaporante, le rayonnement net (Rn). Celui-ci peut être obtenu :

- par mesures directes à l'aide d'un pyrromètre différentiel (ou "bilanomètre") dont le domaine spectral va de 0,2 à 100 μm , grandeurs mesurées par certaines stations de recherches seulement ;

- sur la base de corrélations entre rayonnement net et rayonnement global, grandeurs mesurées dans les stations météorologiques importantes ;

- à l'aide de l'équation suivante (méthode choisie par nous-mêmes, dans cette étude) :

$$R_n = ((1 - a) \cdot R_g) + \epsilon(R_a - \sigma t_s^4) \quad (\text{J} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{j}^{-1}) \quad (2.21)$$

R_g est le rayonnement global solaire de courtes longueurs d'ondes ($0,2 \mu\text{m} \leq \lambda < 4,0 \mu\text{m}$) ; a (albédo) et ϵ (émissivité) sont des paramètres représentant les propriétés radiatives de la surface évaporante ; ces paramètres dépendant de l'humidité superficielle (θ_s) de cette surface, la relation entre θ_s et ces 2 paramètres est linéaire (LINACRE, 1969).

Ainsi, nous avons pris de FEDERER (1968), pour la phénopase :

- sans feuille a = 0,12 et ε = 0,94
- avec feuilles a = 0,18 et ε = 0,93

Ra est le rayonnement atmosphérique de grandes longueurs d'ondes ($4,0 \mu\text{m} = < \lambda = < 100 \mu\text{m}$) dû à la température propre de l'atmosphère. Une partie de la radiation solaire est absorbée par l'atmosphère et par la suite vers la surface de la terre. Ra peut être estimé d'après la formule empirique de BRUNT (1939) :

$$Ra = r \cdot t_a^4 (0,44 + 0,08 \sqrt{e_a}) \text{ (MJ.m}^{-2}\text{.j}^{-1}) \quad (2.22)$$

avec t_a , la température de l'air (°K) et e_a , la pression de vapeur d'eau (mb).

Le pas de temps de nos calculs étant la journée (24 h), nous avons :

- le jour : Rn est supérieur à 0
- la nuit : Rn est négatif ; il sera considéré comme nul

La grande partie du rayonnement net est absorbé sous forme de chaleur latente dans le processus d'évaporation et de transpiration. D'après RUTTER (1968) pour une forêt feuillue ne présentant pas de déficit hydrique du sol, ou bien un déficit hydrique du sol n'excédant pas la moitié de la "réserve utile" du sol, la chaleur latente d'évaporation représente 94 à 99 % du rayonnement net.

b) Pouvoir évaporant de l'air au-dessus de la surface évaporante (Ea)

Il représente la quantité d'eau qui serait évaporée par la surface considérée si elle était saturée et avait la même température que l'air au niveau de référence. Il s'estime selon la formule de DALTON :

$$Ea = FV \cdot (e_s(t_a) - e_a) \text{ (mm.j}^{-1}) \quad (2.23)$$

$e_s(t_a)$: pression de vapeur d'eau saturante à la température de la surface t_a , soit :

$$e_s(t_a) = 6,1078 \cdot \text{EXP} \left(\frac{17,27 \cdot t_a}{237,3 + t_a} \right) \text{ (mb)} \quad (2.24)$$

e_a : pression actuelle de vapeur d'eau dans l'air au dessus de la surface évaporante soit :

$$e_a = e_s(t_h) - \gamma(t_a - t_h) \text{ (mb)} \quad (2.25)$$

γ : constante psychrométrique (fonction des propriétés de l'air) estimée selon la formule :

$$\gamma = C_p \cdot P_{ATM}/L \cdot (M_{eau}/M_{air}) \text{ (mb } ^\circ\text{C}^{-1}) \quad (2.26)$$

FV : fonction empirique de la vitesse moyenne du vent (PENMAN, 1948) soit :

$$FV = 0,26 (1 + 0,54 v) \quad (2.27)$$

c) Equation de PENMAN (1948)

Equation valable pour une surface d'eau libre ou la surface d'une feuille saturée en eau. Cette équation associe des grandeurs relevant d'un bilan énergétique et du transport aérodynamique ; elle est applicable pour un pas de temps d'une journée (STEWART, 1984) et s'écrit (PENMAN, 1948) :

$$ETP = [(\Delta R_n/L) + (\gamma \cdot E_a)]/(\Delta + \gamma) \text{ (mm.j}^{-1}) \quad (2.28)$$

Δ : dérivée de la fonction reliant la pression de vapeur d'eau saturante de l'air et la température de l'air, soit :

$$\Delta = (e_s(t_a) - e_a)/(t_a - t_r) \quad (2.29)$$

avec t_r température de rosée.

Récemment (Colloque sur l'évapotranspiration potentielle de l' "International Commission for Irrigation and Drainage", Budapest, 1977), il a été proposé de distinguer 2 approches de l'évapotranspiration potentielle (McILROY, 1984) :

- l'évapotranspiration potentielle théorique (ETP*) ne dépendrait que du climat, et supposerait une saturation en vapeur d'eau au sommet du couvert, cas qui ne se rencontre pas dans la pratique ;

- l'évapotranspiration potentielle (ETP), toujours inférieure à l'évapotranspiration théorique (ETP*), correspondrait au cas d'un couvert dont les surfaces d'échanges, surfaces végétales-air, sont à saturation (les "réserves utiles" des couronnes, des troncs d'arbres et de la litière sont saturées). En réalité au sommet du couvert, il n'y a pas saturation, mais un état proche de la saturation. L'ETP sera donc dépendante des facteurs climatiques et de l'architecture du couvert (TANNER, 1968). Néanmoins, les conditions météorologiques priment sur l'influence de la surface évaporante (JARVIS et al., 1981).

Les méthodes micrométéorologiques estimant l'évapotranspiration potentielle au-dessus d'un couvert végétal sont discutées par TANNER (1968), WEBB (1975) et THOM (1975).

d) Evapotranspiration réelle (ETR). Equation de MONTEITH (1965)

Pour estimer l'évapotranspiration réelle (ETR) du couvert, soit la quantité d'eau effectivement perdue par une surface pendant un intervalle de temps donné, nous avons utilisé, pour l'ensemble du peuplement, la formule de PENMAN (1948) et présentée par MONTEITH (1965), revue par TANNER (1968), appliquée à un pas de temps d'une journée, soit :

$$ETR = ETP / [1 + (\gamma / (\Delta + \gamma)) (r_s / (LAI \cdot r_a))] \text{ (mm.j}^{-1}\text{)} \quad (2.30)$$

ETP : évapotranspiration potentielle calculée selon la formule de PENMAN (1948) ; r_a : résistance de la surface au transfert de la quantité de mouvement (résistance aérodynamique, en $s.cm^{-1}$); r_s/LAI : résistance de la surface à la diffusion de vapeur d'eau, considérée comme la résultante des résistances stomatiques (r_s) de toutes les LAI - feuilles en parallèle (en $s.cm^{-1}$).

L'analyse de l'équation de PENMAN-MONTEITH montre que :

- dès que la surface est saturée en eau ("réserves utiles" des couronnes, des troncs d'arbres et de la litière remplies), l'évapotranspiration de l'eau des surfaces végétales est similaire au processus d'évaporation d'une surface d'eau libre, ainsi la résistance interne de la surface (les résistances stomatiques de LAI - feuilles) n'entre pas en compte, le phénomène de transpiration n'a pas lieu.

- dès que la surface est sèche, la demande évaporative de l'atmosphère (ETP) est réduite seulement à l'eau transpirée (TR).

Nous discuterons de l'influence des paramètres de la surface (résistance aérodynamique r_a , résistance stomatique d'une feuille r_s et indice foliaire LAI) sur le processus d'évapotranspiration réelle (ETR) dans le chapitre suivant "La résistance de la surface".

Nous avons obtenu les paramètres météorologiques journaliers nécessaires à l'estimation de la demande évaporative de l'atmosphère d'après l'équation de PENMAN-MONTEITH (rayonnement global R_g , température moyenne de l'air t_a , température du point de rosée t_r , vitesse moyenne du vent v , pression atmosphérique P_{ATM}) dans les stations météorologiques :

- de Fontainebleau-Ville située à 2 km de la station d'étude (t_a, P_i),
- de la Minière, près de Versailles, à 59 km de la station d'étude (t_r, v, P_{atm}),
- du Parc Montsouris (Paris) à 60 km de la station d'étude (R_g).

2.2.3 - Résistance de la couverture végétale

2.2.3.1 - Approche générale

Le phénomène de vaporisation de l'eau est géré par les conditions externes énergétiques et mécaniques, l'état hydrique et les caractéristiques de la surface évaporante. Dans le chapitre précédent, nous avons parlé de la demande évaporative de l'atmosphère imposée au couvert végétal, nous discuterons maintenant de quelques paramètres du peuplement dont le rôle dans la réponse à l'ETP est déterminant.

Le processus de vaporisation de l'eau, à conditions climatiques et ressources en eau égales, diffère selon le type de surface : surface inerte (passive) ou biologique (active). Le passage de la vapeur d'eau d'une surface biologique vers l'atmosphère est soumis, par rapport à une surface inerte à des résistances sur l'ensemble du trajet sol-plante. Nous avons distingué, dans le milieu dans lequel nous avons travaillé, ces 2 types de surfaces :

- les surfaces passives : surfaces des feuilles, des branches, des troncs sur lesquelles l'eau est retenue et constitue ce que nous appelons les "réserves utiles". L'évaporation de cette eau possède le caractère d'un processus

de vaporisation de l'eau d'un plan d'eau pour lequel la résistance de la surface au flux évaporant est considérée comme nulle (RUTTER, 1975) ;

- les surfaces actives : l'ensemble des feuilles.

Rappelons que nous considérons que l'influence de la structure du peuplement (stabilisé) dans le bilan d'eau est constante d'une année à l'autre. Lors des phases sans feuilles, le peuplement est constitué par un ensemble de surfaces inertes et le flux évaporant sera estimé à l'aide de paramètres constants pendant toute la période d'expérimentation. Lors des phases avec feuilles, à l'ensemble de ces surfaces inertes s'ajoute l'ensemble du feuillage dont l'évolution saisonnière introduit des variations du flux transpiratoire durant toute cette phase.

a) Les paramètres constants.

Ces paramètres constants, caractérisant l'espèce, l'âge et la structure du peuplement, sont la hauteur du peuplement (h) (phase sans feuilles et phase avec feuilles), l'arrangement spatial des branches d'arbres (phase sans feuilles) et enfin la distribution racinaire dans le profil du sol (voir justifications dans le chapitre "Système racinaire"). Précisons que les échanges de masses (dans notre cas, la vapeur d'eau) du peuplement avec l'air peuvent se faire par les feuilles, les tiges non subérifiées et enfin par les organes reproducteurs. Nous négligerons les phénomènes concernant ces 2 derniers types d'organes pour ne nous intéresser qu'aux feuilles.

- Hauteur du couvert. La hauteur de la végétation influence le profil de la vitesse du vent, modifie les conditions mécaniques de déplacement des masses d'air au-dessus du peuplement et donc la résistance aérodynamique au flux évaporatif. Plus le couvert végétal est haut, moindre est la résistance aérodynamique (r_a). D'après STEWART (1984), pour une vitesse moyenne du vent $v = 2 \text{ m.s}^{-1}$, r_a est égale, pour une pelouse de 0,1 m de hauteur, à 75 s.m^{-1} et pour une forêt de 10 m de haut à 5 s.m^{-1} .

- Arrangement spatial des branches d'arbres. Cet arrangement influence :

. La distribution mécanique de la pluie au sol et l'écoulement le long des troncs, compte-tenu de la capacité de saturation des couronnes d'arbres (0,8 mm lors de la phase sans feuilles, selon SCHNOCK, 1970). D'après SCHNOCK (1968), pour la phase défeuillée, la distribution de la pluie qui tombe sur la forêt est la suivante : interception (I_n) : 18,3 %, écoulement le long des troncs (EC) : 1,8 %, pluie au sol (P_s) : 79,9 %, grandeurs exprimées en pourcentage de la pluie

recueillie au-dessus de la forêt*.

. Les propriétés radiatives. L'état thermique et hydrique du peuplement est déterminé par la quantité d'énergie effectivement utilisée par ce couvert** ou rayonnement net, fonction de l'albédo et de l'émissivité du couvert (R_g et R_a). Pour une phase sans feuilles, étant donné que la présence de neige est rare (FARDJAH, 1978), nous considérerons les valeurs de l'albédo (0,12) et de l'émissivité (0,94) (FEDERER, 1968) comme constantes.

. La pénétration par le rayonnement solaire d'un couvert végétal (loi de BEER-LAMBERT). Pour un degré de recouvrement du sol par les branches (CC) d'environ 0,40 (surface de la projection verticale des branches rapportée à la surface du sol), la relation rayonnement net reçu par la litière ($R_n(h)$) / rayonnement net reçu par la surface du couvert végétal ($R_n(0)$) (RAUNER, 1976) est égale à :

$$R_n(h) / R_n(0) = 0,58$$

avec un coefficient d'extinction $k = 0,25$ à $0,27$ (défini de $R_n(h) = R_n(0) \text{EXP}(-k \cdot \text{LAI})$).

- Système racinaire. Bien que la longueur des racines par unité de volume du sol ($\text{cm} \cdot \text{cm}^{-3}$) et leur capacité d'absorption (mm) évoluent parallèlement à la croissance foliaire saisonnière (REICH et al., 1980), nous considérerons ces paramètres comme constants. Compte-tenu de notre hypothèse du transfert conservatif de l'eau à travers l'arbre, le flux d'eau et ses variations périodiques peuvent être suivies au niveau de l'appareil racinaire ou de l'appareil foliaire. Nous avons choisi de travailler au niveau des feuilles et avons considéré la densité racinaire comme constante.

Les études de FAILLE (communication personnelle) du système racinaire de Quercus petraea en phase défeuillée, sur ce même sol, ont montré que la répartition des racines (les mesures ont porté sur les racines "fines" de diamètre inférieure à 1 mm) dans le profil est corrélée positivement à la disponibilité en eau des horizons, la densité racinaire est maximale dans l'horizon A_1 , minimale en A_2 et intermédiaire en B.

* Les valeurs qui sont citées par la suite ont été obtenues dans une forêt où Quercus robur est l'espèce dominante d'âge compris entre 40 et 60 ans, la hauteur 6 à 21 m et la densité des tiges = $146 \text{ tiges} \cdot \text{ha}^{-1}$.

** Se reporter au chapitre "Demande évaporative de l'atmosphère".

b) L'indice foliaire et son évolution saisonnière

L'évolution saisonnière de la surface foliaire possède plusieurs dimensions, spatiale, temporelle et fonctionnelle. En moyenne, pour ce type de forêt, l'indice foliaire varie de 4 à 4,6 (RAUNER, 1976).

- Evolution spatiale. L'apparition et la mise en place de l'appareil foliaire provoquent :

. l'augmentation de la capacité de saturation des couronnes d'arbres qui, pour LAI_{max} , atteint 1,6 mm (SCHNOCK, 1970), l'augmentation du volume d'eau intercepté (22,2 %) et la diminution de la pluie au sol (77,3 %) et de l'écoulement le long des troncs (0,5 %) (SCHNOCK, 1968).

. l'augmentation du degré de recouvrement de la surface du sol (CC). L'accroissement de la surface des feuilles de $LAI = 0$ à $LAI = 4,5$, obtenu d'après photos hémisphériques, induit une augmentation du recouvrement de la surface du sol par les couronnes d'arbres (branches et feuilles) de 0,4 à 0,9 et une diminution de la quantité de rayonnement net reçu par la surface des troncs et de la litière. Le rapport $Rn(h)/Rn(0)$ varie de 0,58 (phase sans feuilles) à 0,11 pour $LAI = LAI_{max}$.

- Evolution temporelle. L'évolution de la surface foliaire sous le contrôle des facteurs climatiques varie d'une année à l'autre, la date du débourrement s'étale du 16 Mars au 18 Mai (63 jours de différence); la période d'accroissement de la surface des feuilles peut durer de 16 à 35 jours ; la fin de la croissance de la surface des feuilles, soit le jour où $LAI = LAI_{max}$, varie du 16 Avril au 3 Juin (48 jours de différence) (AUSSENAC, cité par CHASSAGNEUX, 1984). D'après les observations de LEMEE (communication personnelle), la période de chute des feuilles se situe entre le 19 Septembre et le 10 Décembre (environ 75 à 80 jours). En moyenne l'appareil foliaire est dans son plein développement (LAI_{max}) pendant 110 à 120 jours.

- Evolution fonctionnelle. L'appareil foliaire subit au cours du temps une évolution fonctionnelle, évolution de la résistance stomatique, de la résistance cuticulaire (TURNER et HEICHEL, 1977) et des propriétés radiatives : absorption, diffusion et réflexion (RAUNER, 1976).

. Résistance stomatique et résistance cuticulaire. La transpiration dépend des mouvements stomatiques, donc de la résistance exercée par ceux-ci au flux transpiratoire. Les observations* de TURNER et HEICHEL(1977)

* Travaux de TURNER et HEICHEL (1977), il s'agit de Quercus rubra L. âgé de 8 ans, hauteur 8 m, date de débourrement 6 Mai. Fin d'accroissement de la surface foliaire 13-16 Juin.

ont mis en évidence que chez Quercus rubra la résistance stomatique minimale r_{smin} (eau non limitante) évolue dans le temps de 18 à 20 $s.cm^{-1}$ (valeurs suivent immédiatement le débourrement) à environ 6 à 9 $s.cm^{-1}$ (moment où $LAI = LAI_{max}$); r_{smin} chute à son niveau le plus bas 87 jours après le débourrement, soit $r_{smin} = 2$ à 4 $s.cm^{-1}$ (fin Juillet), valeur qui s'est maintenue jusqu'au début de la sénescence (fin Septembre). Lors de la sénescence, la résistance stomatique minimale augmente pour atteindre $r_{smin} = 75 s.cm^{-1}$ en fin de la période d'étude.

. Propriétés radiatives. La valeur moyenne de l'albédo pour une forêt, lors de la phase avec feuilles, est de l'ordre de 0,17 à 0,19 (RAUNER, 1976) ; elle évolue avec le changement de la coloration des feuilles (teneur en chlorophylle, jaunissement des feuilles lors de la sénescence). L'émissivité des feuilles, d'après RAUNER (1976) peut être estimée à 0,94 à 0,96.

2.2.3.2 - Résistance aérodynamique

Nous traiterons de la masse d'air au voisinage du couvert végétal, couche de l'atmosphère dite couche limite, perturbée par la présence de ce couvert végétal. Ses caractéristiques, température, humidité, sont modifiées par les échanges de masse (vapeur d'eau) et d'énergie entre le couvert et l'atmosphère et les mouvements d'air y sont toujours turbulents (SAUGIER, 1974). Actuellement, pour décrire ces mouvements turbulents, les auteurs utilisent des formules semi-empiriques donnant une approximation suffisante des phénomènes (SAUGIER, 1970), mais nécessitant diverses hypothèses. Ainsi, si la couverture végétale est homogène et suffisamment étendue, les gradients et les transports gazeux dans la couche atmosphérique la plus proche de la végétation seront considérés comme verticaux (PERRIER, 1976). On distinguera 3 types de transferts verticaux, transfert de quantité de mouvements, transfert de chaleur, transfert de vapeur d'eau (THOM, 1975).

Les études de la variation de ces grandeurs en fonction de la hauteur ont permis de constater que les mécanismes de transport de masse et de quantité de mouvements sont liés, la résistance aérodynamique au flux de vapeur d'eau s'obtient à partir du profil de la vitesse moyenne du vent. Autrement dit, le flux de vapeur d'eau sera considéré comme proportionnel au gradient de concentration de vapeur d'eau entre le couvert végétal et l'air, et inversement proportionnel à une résistance appelée résistance aérodynamique. Cette résistance est, avec la quantité d'énergie arrivant sur le couvert végétale, le facteur essentiel intervenant dans l'évaporation; la résistance aérodynamique gère l'efficacité de déplacement de vapeur d'eau de la surface évaporante, cette résistance dépend de la vitesse moyenne du vent et de la rugosité du couvert; et en l'absence de stratification thermique, s'exprime ainsi (MONTEITH, 1965) :

Tableau 4 - Caractéristiques du peuplement observé.

	Station d'étude	Ensemble du peuplement
Surface, en m ²	277	10 000
Nombre d'arbres ha ⁻¹	6 sur 277 m ² (217)	182
Surface terrière m ² ha ⁻¹	29.2	33.8
Hauteur moyenne des arbres, en m	29.8 ^x	30 ^{xx}

^x Moyenne arithmétique des hauteurs des six arbres; s=2.09

^{xx} Moyenne arithmétique des hauteurs des vingt arbres; s=2.20

$$r_a = (1/(k_0^2 \cdot v)) \cdot (\ln(z - d)/z_0)^2 \quad (\text{s.cm}^{-1}) \quad (2.31)$$

L'absence d'une instrumentation nécessaire à l'établissement du profil de la vitesse moyenne du vent et du profil thermique nous a conduit à appliquer les simplifications proposées par THOM (1972) ; il suggère, pour une vitesse du vent modérée, de déduire la hauteur de déplacement (d) et la longueur de rugosité (z_0) du couvert végétal de la hauteur du peuplement (h) selon les formules suivantes :

$$d = 0,75 \times h \quad (2.32)$$

$$z_0 = 0,1 \times h \quad (2.33)$$

où la hauteur de déplacement (d) rend compte d'un déplacement du profil du vent vers le haut d'une distance d, et où la longueur de rugosité (z_0) est obtenue à partir d'une régression linéaire entre $\ln(z - d)$ et v.

Nous avons évalué la hauteur des arbres à l'aide du relascope de W. BITTERLICH. Les mesures ont été effectuées lors de la phase sans feuilles (cimes des arbres bien visibles) le 18 Février 1982 sur 20 individus adultes de Quercus petraea ; pour calculer la hauteur du peuplement, nous avons retenu la moyenne arithmétique des hauteurs des 20 individus (Tableau 4).

2.2.3.3 - Evolution de la surface des feuilles

Les études sur la phénologie illustrent l'influence des facteurs physiques du milieu, climatiques et pédologiques, sur la forêt, sur son comportement physiologique (AUSSENAC, 1975 ; CAMPBELL, 1978 ; KRAMER et KOZLOWSKI, 1979 ; BRAUN, 1983 ; CANNEL et SMITH, 1983). Lors du suivi de l'évolution de la surface des feuilles, on peut exprimer la surface foliaire par la surface totale des feuilles en unités de surface (m^2), ou bien par l'indice foliaire, la surface des feuilles (F) divisée par la surface du sol (S) recouvert par celles-ci, expression que nous utiliserons ici, à savoir :

$$\text{LAI} = F / S \quad (\text{m}^2 \cdot \text{m}^{-2}) \quad (2.34)$$

Nous avons divisé le cycle annuel de l'évolution de la surface des feuilles en 5 stades :

- stade de dormance des bourgeons où LAI est constant et nul ;

- stade "d'activation" physiologique des bourgeons qui se termine par le débourrement ;

- stade de croissance de la surface des feuilles ;

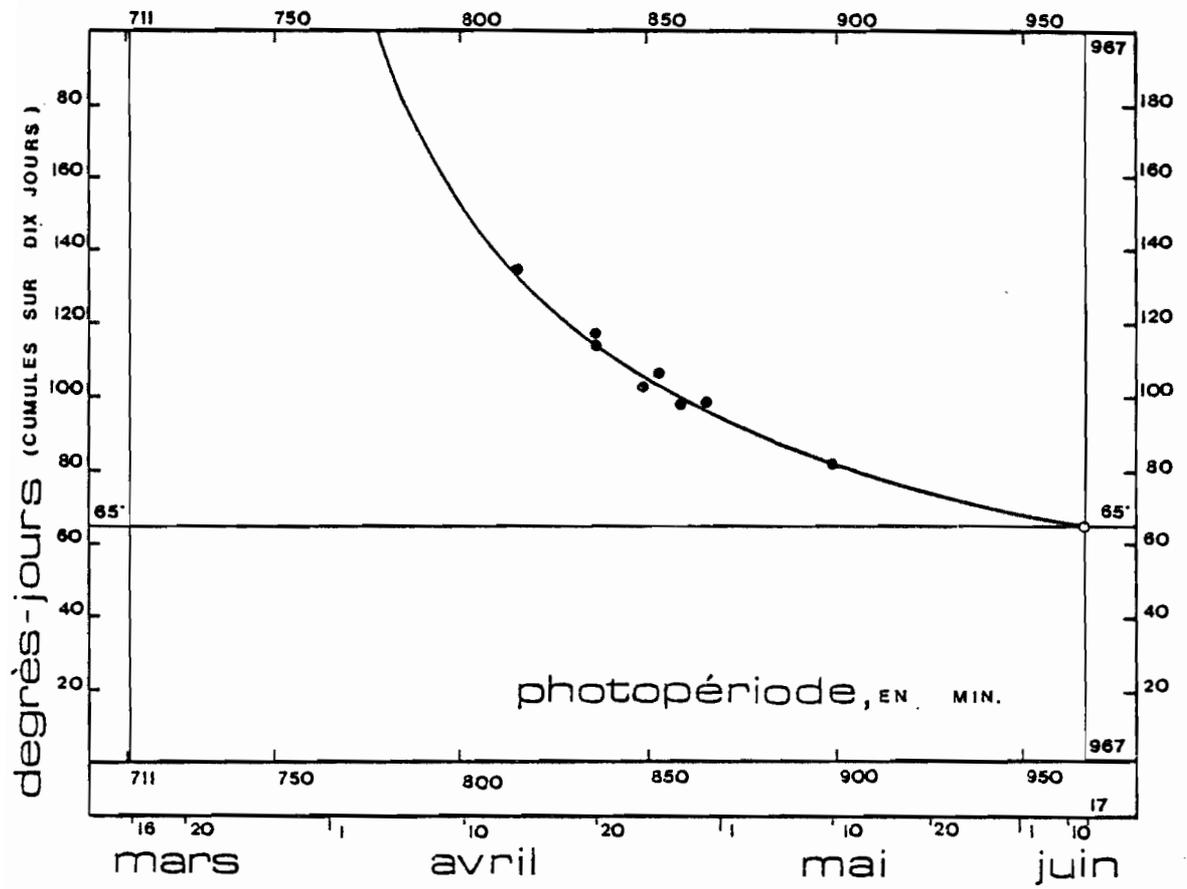


Figure 3 - Prévion de la date de débourement.

- stade de plein développement des feuilles où $LAI=LAI_{max}$
- stade de chute des feuilles où la surface totale des feuilles décroît.

a) La dormance. Elle peut être corrélée aux jours courts, aux basses températures de l'air, à un stress hydrique aigu ou une carence nutritive (KRAMER et KOZLOWSKI, 1979). Elle correspond à un équilibre interne entre promoteurs (gibberelline, cytokinine) et inhibiteurs (acide abscissique) de la croissance (MICHNIEWICZ, 1967).

b) Le débourrement. Sous l'influence, d'abord du froid et ensuite de l'augmentation de la durée du jour et de la température de l'air, le taux d'acide abscissique diminue alors que le taux de gibberelline augmente, avec comme conséquence, l'accroissement de l'activité métabolique ; il y a mobilisation des réserves nutritives, croissance racinaire (REICH et al., 1980) ainsi que transfert de métabolites et d'hormones de croissance (gibberelline et cytokinine) des racines vers les bourgeons. Nous appellerons cette période, période "d'activation" métabolique.

Les études hormonales expliquent la division et l'expansion des cellules des feuilles par l'action des cytokinines. Ainsi, les bourgeons évoluent de leur forme hivernale vers la libération distincte des feuilles ; AUSSENAC (1975) propose l'échelle suivante pour observer cette évolution :

- b0, bourgeons non gonflés, conservent leurs dimensions hivernales;
- b1, bourgeons gonflés, écailles plus ou moins écartées;
- b2, la jeune pousse, dans le bourgeon, apparaît sans faire éclater les écailles;
- b3, le débourrement est effectif, écailles éclatées; les feuilles de la pousse sont partiellement libérées;
- b4, la jeune pousse est entièrement libérée et en phase de croissance.

La période "d'activation" métabolique correspond aux stades b1, b2 d'AUSSENAC (1975) et se termine au stade b3 ; la durée exacte de cette période, le seuil thermique et le degré d'intervention du photopériodisme est propre à chaque génotype (BRAUN, 1983). Nous avons considéré, dans nos analyses, le stade b3 comme date de débourrement. Dès qu'on peut mesurer les feuilles (longueurs ou longueurs + largeurs), nous avons estimé les bourgeons en phase de croissance (stade b4). Nous disposons des dates de débourrement pour les années 1976, 1977, 1978, 1979 et 1980 (PONTAILLER, communication personnelle); ces dates correspondent à la situation dans laquelle les bourgeons, dans

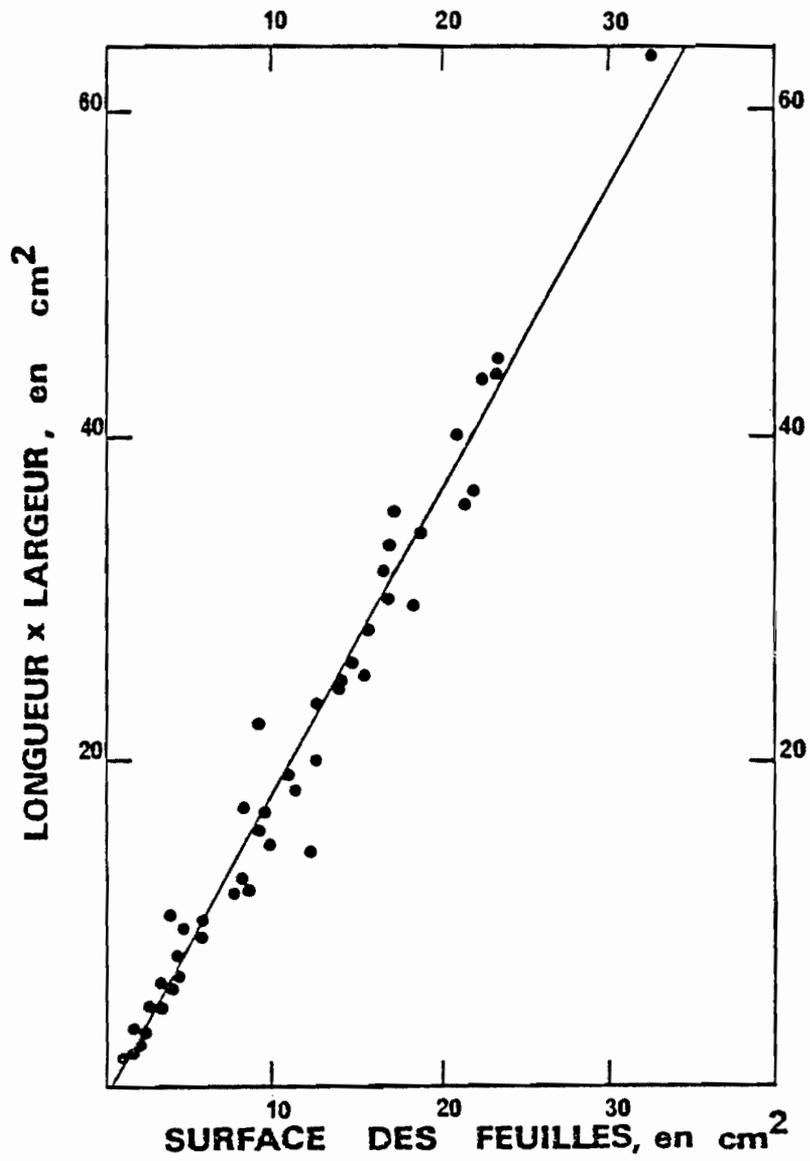


Figure 4 - Relation entre la surface foliaire réelle et la surface calculée à partir des longueurs et des largeurs.

l'ensemble du peuplement, se trouvaient en phase b3 pour au moins 50 % des arbres, avec une précision de 1 à 5 jours. Puis, à partir de 1981 jusqu'au printemps 1983, nous avons observé le comportement des bourgeons, parallèlement sur :

. 5 individus adultes de Quercus petraea situés à 50 m de la station d'étude, d'après l'échelle d'AUSSENAC (1975);

. l'ensemble du peuplement d'après les critères utilisés* pour les années 1976 à 1980. Dans les 2 cas, les observations furent effectuées avec une précision d'une journée (Tableau 5).

Comparant les 2 approches, nous avons pu vérifier la représentativité des arbres échantillonnés.

Pour prédire la date de débourrement, AUSSENAC (1975) utilise (pour les résineux) la corrélation entre une somme de degrés-jours (cumulés au seuil de 0 °C, de façon régressive en partant de la date du débourrement, stade b3 jusqu'au 15 Décembre de l'année précédente) et les dates du débourrement. La méthode est utilisée par plusieurs auteurs, surtout pour les résineux (CAMPBELL, 1978 ; THOMSON et MONCRIEFF, 1982).

Dans cette étude, nous nous proposons d'utiliser la méthode suivante de prévision de la date de débourrement : le débourrement sera corrélé avec la somme des degrés-jours cumulés pendant les 10 jours qui précèdent la date de débourrement (avec 0 °C de base). On avance l'hypothèse que "l'activation" physiologique de Quercus petraea s'étale sur 10 jours avec un seuil de températures nécessaires au débourrement modifié par le photopériodisme (Figure 3). Ceci peut se résumer sous la forme d'une équation :

$$JDC = \left(\sum_{j-10}^j t_a / (C_3 \sum_{j-10}^j t_a - C_4) \right) \text{ (min)} \quad (2.35)$$

avec $C_3 = 0,0014082$

$C_4 = 0,0241712$

La longueur de la journée (DD) a son équivalent au printemps, à une date précise. Dans l'équation (2.35), nous avons utilisé les températures moyennes de l'air, mesurées à la station météorologique de Fontainebleau-Ville, à 2 km du peuplement étudié (DOIGNON, communication personnelle). L'exactitude de la prévision du jour du débourrement a une

* Le jour du débourrement a lieu lorsque 50 % des bourgeons sont au stade b3; la précision d'approche est de 1 à 7 jours.

Tableau 5 - Dates observées du début du débourrement et de la fin d'accroissement en surface des feuilles.

Année	Jour de débourrement des feuilles	Jour de la fin d'accroissement en surface des feuilles
1976	16 - 20. Avril	10 - 15 Mai
1977	18 - 25 Avril	18 - 25 Mai
1978	27 Avril - 01 Mai	18 - 20 Mai
1979	10 - 12 Mai	24 - 25 Mai
1980	20 - 25 Avril	≅ 17 Mai
1981	14 - 20 Avril	15 - 18 Mai
1982	29 Avril	19 Mai
1983	25 Avril	18 Mai

importance majeure pour le bilan d'eau de la forêt, puisque les écarts d'une année à l'autre, entre les dates de débourrement, peuvent varier jusqu'à 63 jours.

c) Croissance des feuilles. Il y a d'abord multiplication cellulaire dans les méristèmes, avec formation d'un nombre donné de cellules, correspondant à un nombre déterminé de feuilles. Ensuite, il y a élongation de ces feuilles jusqu'à ce qu'elles acquièrent leurs dimensions définitives. Nous parlerons de mise en place de la surface foliaire pour cette phase d'accroissement de la surface (jusqu'à la surface maximale). Pareillement, la mise en place de la surface foliaire sera suivie à partir du moment où les premières feuilles sorties du bourgeon sont mesurables. En moyenne, pour un bourgeon donné, entre le moment où les premières feuilles sont mesurables et le moment où la dernière feuille qui apparaît devient elle aussi mesurable, il s'écoule environ une semaine. Croissance en dimensions et croissance en poids sont, pour un organe donné, décalées dans le temps (GILLET et al., 1984, graminées). Nous pouvons supposer qu'il en est de même pour l'ensemble des feuilles de notre espèce, dont toutes les feuilles apparaissent pendant une durée de 7 jours.

La croissance en poids ne nous intéresse pas directement pour l'objectif suivi, mais nous pouvons faire l'hypothèse que la croissance en dimensions et l'évolution fonctionnelle de l'appareil stomatique sont décalées, elles aussi, dans le temps. La croissance en dimensions, la mise en place de la surface foliaire agit essentiellement sur l'interception, la distribution des précipitations incidentes. L'évolution fonctionnelle de l'appareil stomatique règle la capacité transpiratoire de la végétation.

Ce chapitre sera consacré à la mise en place de la surface foliaire; l'évolution fonctionnelle des stomates sera discutée dans le chapitre "Résistance stomatique". D'après KRAMER et KOZLOWSKI (1979), la vitesse d'accroissement est sous la dépendance de la concentration des promoteurs de la croissance (gibberelline), cette vitesse varie avec l'espèce et l'âge de l'arbre observé. L'équilibre hormonal de l'arbre est en étroite relation avec l'évolution du climat. Les facteurs climatiques qui semblent régir le phénomène d'accroissement de la surface sont la température moyenne de l'air et la photopériode. Nous suivons donc la mise en place de la surface foliaire à partir du moment où les feuilles sont mesurables (b4) jusqu'à ce que la surface foliaire maximale soit atteinte. Nous estimerons :

- la surface maximale des feuilles du peuplement LAI_{max} ;
- la date de la fin de la croissance de la surface des feuilles;
- le suivi de l'accroissement de la surface des feuilles.

- Calcul des surfaces foliaires. Dans ce qui suit, indice foliaire maximal et accroissement de la surface

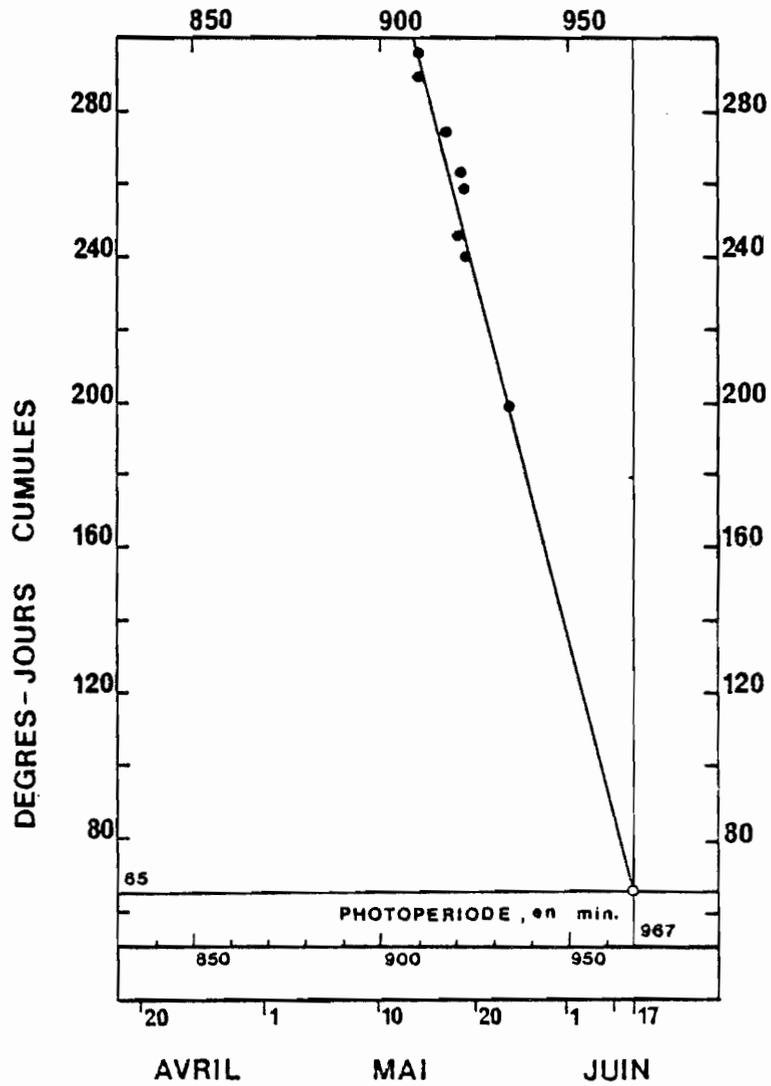


Figure 5 - Relation entre la date de la fin de la croissance de la surface des feuilles et la somme des températures cumulées durant la période de la mise en place de la surface foliaire.

foliaire, nous avons établi la relation entre la surface foliaire réelle et la surface calculée à partir des longueurs et des largeurs, par régression linéaire sur un échantillon de 56 feuilles de taille différente, récoltées sur la station d'étude, en Août 1981, au moment où $LAI = LAI_{max}$, donc au moment où ces feuilles ont leurs dimensions maximales. La longueur est mesurée sur la nervure centrale, pétiole non compris, et la largeur à l'endroit le plus large de la feuille (précision ± 1 mm). Les surfaces sont mesurées à l'aide d'un planimètre automatique de fabrication "Delta T Devices", avec une précision de $\pm 0,1$ cm² (Figure 4).

- Indice foliaire maximal (LAI_{max}). Nous avons obtenu les valeurs de l'indice foliaire maximal (LAI_{max}) par mesures indirectes. Nous assimilons le nombre et la surface totale des feuilles présentes sur l'arbre avant la chute des feuilles au nombre et à la surface totale des feuilles constituant la litière fraîche, après la chute des feuilles. Les valeurs de LAI_{max} obtenues ont pour source :

. les valeurs de LEMEE (communication personnelle) pour un peuplement correspondant au nôtre*, établies en automne 1975;

. nos propres mesures effectuées au Gros-Fouteau de 2 façons : premièrement, le 17 Janvier 1983, après la chute totale des feuilles, à l'aide de la méthode de l' "aiguille" (GUITTET, communication personnelle) qui consiste à comptabiliser le nombre de feuilles de l'année (litière fraîche) récoltées à l'aide d'une aiguille, utilisée perpendiculairement au sol, chaque mesure est répétée 100 fois. Nous avons retenu la moyenne arithmétique de tous les prélèvements comme valeur de LAI_{max} (LAI_{max} du chêne: 4,38; $S = 1,70$; LAI_{max} du hêtre: 0,91; LAI_{max} des chênes et des hêtres: 5,29). Deuxièmement, au moment de la chute des feuilles durant l'automne 1983, au moyen de 10 pièges à feuilles fixes, disposés régulièrement sur la station d'étude (surface totale des pièges égale 25 000 cm²); les feuilles sont récoltées en moyenne toutes les semaines, respectivement sur chaque grille. Nous obtenons, en fin de période de chute des feuilles, le nombre de feuilles cumulées pendant cette période. Nous avons utilisé la moyenne arithmétique des 10 grilles comme valeur de LAI_{max} ($x = 4,38 \pm 0,3$) (Tableau 7). Les 2 approches nous donnent des résultats similaires ($LAI_{max} = 4,38$). Nous utiliserons la même valeur d'indice foliaire maximal (LAI_{max}) pour le bilan de chacune des sondes et pour celui de l'ensemble du peuplement.

* Forêt de Fontainebleau, parcelle 536

Tableau 6 - Accroissement de la surface des feuilles en 1981, 1982 et 1983.

Date	Température, en °C		Surface foliaire mesurée, en %
	Moyenne de l'air	Cumulée	
Année 1981 Jour du début du débourrement 14 Avril Jour de fin de croissance des feuilles 14 Mai			
15 Avril 1981	13.9	13.9	0.00
14 Mai	11.4	289.7	100.00
Année 1982 ^x Jour du début du débourrement 29 Avril Jour de fin de croissance des feuilles 19 Mai			
30 Avril 1982	9.2	9.2	0.81
04 Mai	9.8	49.1	13.68
12 Mai	14.5	125.1	38.67
19 Mai	15.8	240.4	100.00
Année 1983 ^{xx} Jour du début du débourrement 25 Avril Jour de fin de croissance des feuilles 18 Mai			
25 Avril 1983	9.9	9.9	0.00
02 Mai	9.3	72.6	13.00
05 Mai	13.6	109.7	25.30
09 Mai	10.3	160.3	42.53
18 Mai	10.3	262.9	100.00

^x Moyenne arithmétique des surface foliaires de 240 feuilles

^{xx} Moyenne arithmétique des surface foliaires de 150 feuilles

d) Date de la fin de croissance des feuilles. Nous avons bénéficié des observations des dates de la fin de la croissance des feuilles, faites par PONTAILLER (communication personnelle) durant 5 ans, de 1976 à 1980 (précision d'approche de 1 à 5 jours) (Tableau 5).

Nous avons fait nos propres observations de 1981 à 1983 :

. sur 5 individus de Quercus petraea (même échantillon que celui choisi pour le débourrement), avec une précision d'approche d'une journée. Nous avons considéré comme date de fin d'accroissement de la surface des feuilles, la date pour laquelle les longueurs et les largeurs mesurées (à 2 reprises) étaient stabilisées sur l'ensemble des feuilles observées, à savoir 240 feuilles en 1982 et 150 en 1983;

. parallèlement, sur l'ensemble du peuplement, selon les critères appliqués par PONTAILLER pendant les 5 années précédentes.

Nous avons corrélé la durée du jour (ou de la date) de la fin de la croissance des surfaces des feuilles pour Quercus petraea à la somme des températures cumulées durant la période de la mise en place de la surface foliaire (du stade b4 jusqu'au stade où $LAI=LAI_{max}$, à partir de 0°C), nous obtenons la relation suivante (Figure 5) :

$$FCF = (C_5 \sum_{jdr}^j t_a + C_6) \quad (\text{min}) \quad (2.36)$$

avec $C_5 = 0,2441$

$C_6 = 982,7731$

Nous avons utilisé les températures moyennes de l'air mesurées à la station météorologique de Fontainebleau-Ville, à 2 km du peuplement étudié (DOIGNON, communication personnelle).

- Evolution de l'accroissement de la surface des feuilles. Nous avons suivi l'accroissement de la surface des feuilles sur 5 individus de Quercus petraea (même échantillon que celui choisi pour le débourrement). Les branches des arbres choisis sont exposées au soleil, et accessibles à hauteur d'homme; ces 5 individus subissent, on le suppose, le même régime d'éclairement que les arbres du peuplement. L'échantillon choisi était de 240 feuilles en 1982 et 150 en 1983; chaque feuille est repérée par un numéro et suivie jusqu'à stabilisation de la valeur de sa surface. La surface des feuilles, à tout moment, est calculée à partir de la moyenne des surfaces foliaires de toutes les feuilles. Du débourrement jusqu'à la fin de l'accroissement de la surface les valeurs des surfaces sont exprimées en pourcentage de la surface maximale. Ces pourcentages sont appliqués pour chacun des 9 tubes, comme pour l'ensemble du peuplement (Tableau 6).

Tableau 7 - Apports de litière fraîche durant les automnes 1975, 1981 et 1983.

Date de récolte	Durée d'exposition en jours	Poids sec à 100 °C en g m ⁻²	Poids sec à 100 °C Valeurs cumulées en g m ⁻²			
Automne 1975						
30 Septembre	21	4.9	4.9			
15 Octobre	15	4.5	9.4			
31 Octobre	16	104.0	113.4			
15 Novembre	15	156.0	269.4			
04 Décembre	19	67.0	336.4			
30.09.-04.12.	86	336.4				
Automne 1981						
25 Septembre	7	2.0	2.0			
15 Octobre	20	4.5	6.5			
26 Octobre	11	20.5	27.0			
04 Novembre	9	61.0	88.0			
15 Novembre	11	83.0	171.0			
30 Novembre	15	151.0	322.0			
07 Décembre	7	5.0	327.0			
18.09.-07.12.	80	327.0				
Automne 1983						
Date	Valeurs moyennes			Valeurs moyennes cumulées		
	Nombre des feuilles (2500cm ²)	Surface totale des feuilles, en cm ² (2500 cm ²)	Poids sec à 100°C en gm ⁻²	Nombre des feuilles (2500cm ²)	Surface totale des feuilles, en cm ² (2500 cm ²)	Poids sec à 100°C en gm ⁻²
07 Octobre	23.6	381.44	9.6	23.6	381.44	9.6
14 Octobre	32.4	505.90	12.2	56.0	887.39	21.8
21 Octobre	27.1	534.51	12.6	83.1	1421.90	34.4
28 Octobre	14.6	258.65	6.2	97.7	1680.55	40.6
04 Novembre	35.3	704.64	17.8	133.0	2385.19	58.4
11 Novembre	61.3	1101.91	30.9	194.3	3487.10	89.3
18 Novembre	245.1	4469.19	130.2	439.4	7956.29	219.5
16 Décembre	131.8	3006.87	76.0	571.2	10963.16	295.5
07.10.-16.12.	571.2	10963.16	295.5			

e) Chute des feuilles. La chute des feuilles nous importe pour 2 raisons :

lors de la chute des feuilles, il y a décroissance de la surface totale des feuilles jusqu'à annulation de cette surface avec comme conséquence :

. la diminution de la capacité de rétention en eau des couronnes d'arbres, et donc la modification de l'interception;

. il y a diminution jusqu'à l'arrêt du flux transpiratoire.

Pour estimer la décroissance de la surface totale des feuilles, nous disposons :

. des relevés d'apports de litière fraîche durant l'automne 1975 (LEMEE, communication personnelle*) et l'automne 1981 (FAILLE, communication personnelle**) effectués au Gros-Fouteau, à l'aide de pièges à feuilles (surface totale 75 000 cm² pour 1975 et 25 000 cm² pour 1981). Les résultats sont exprimés en grammes de feuilles (séchées à 80 °C), précision de ± 0,01 g (Tableau 7);

. de nos propres mesures. Début Septembre 1983, nous avons installé au sol 10 grilles fixes sur une surface totale de 25 000 cm², disposées régulièrement sur la station. Nous avons recueilli les feuilles fraîchement tombées sur les grilles, une fois par semaine; nous les avons comptées et avons mesuré leur surface à l'aide d'un planimètre automatique de type "Delta" (précision de ± 0,1 cm²); ces feuilles ont été ensuite séchées à 80 °C à l'étuve (jusqu'à stabilisation de leur poids) et pesées à 20 °C (précision ± 0,0001 g). La chute des feuilles débute le 18 Septembre 1983 et s'achève le 4 Décembre 1983 (Tableau 7). Durant nos 3 années d'observations, nous n'avons pas constaté l'existence de feuilles marcescentes. La moyenne arithmétique des valeurs des relevés des 10 grilles représente l'estimation de la décroissance partielle et totale de la surface des feuilles, valeurs utilisées pour l'ensemble du peuplement et pour chacune des tubes (Figure 6).

Puis, nous avons corrélié l'indice foliaire actuel (LAI) et la photopériode, d'où la relation suivante :

$$LAI = LAI_{max} / (1 + C_7 \cdot \text{EXP}(C_8 \cdot DD)) \quad (2.37)$$

$$\text{avec } C_7 = 1,3043 \cdot 10^{10}$$

$$C_8 = 0,0404304$$

* Dispositif : 30 grilles de 0,25 m², déposées sur le sol, réparties en lignes voisines de 10 m.

** Dispositif : 10 grilles de 0,25 m², déposées sur le sol, régulièrement sur la station.

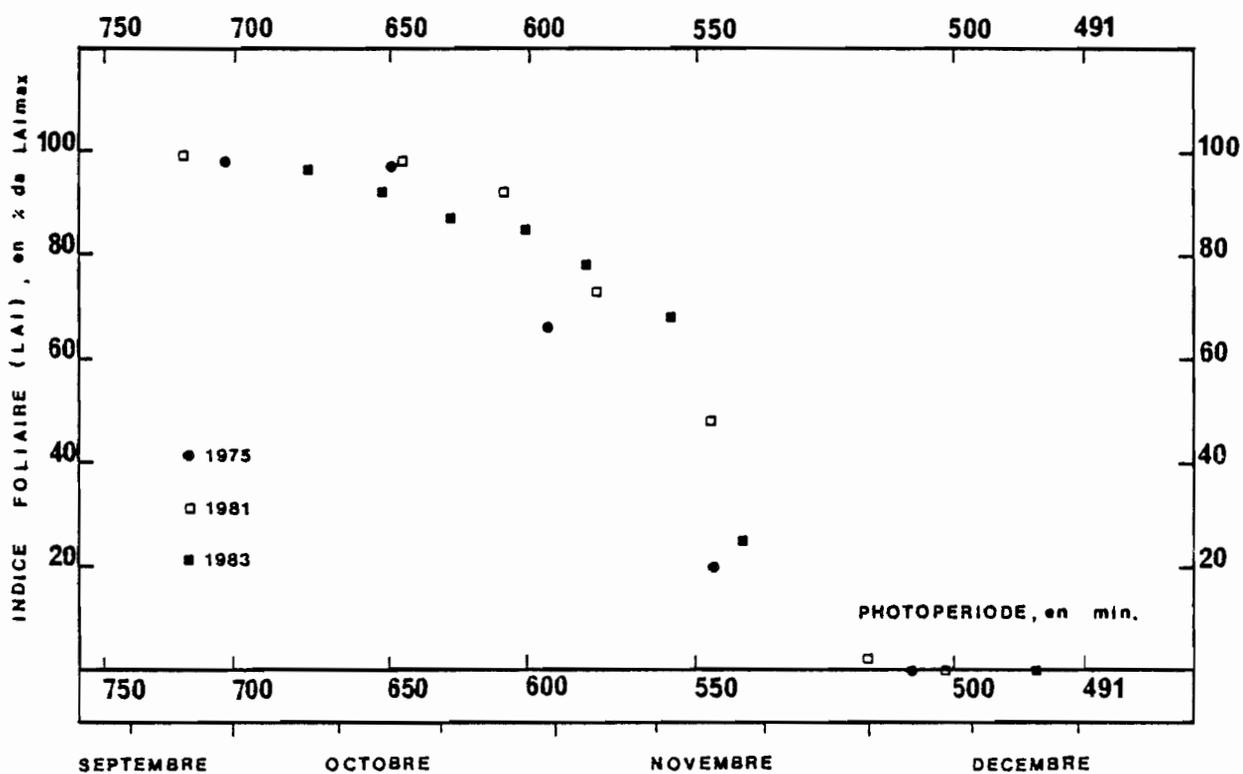


Figure 6 - Evolution de l'indice foliaire durant l'automne 1975, 1981 et 1983.

La diminution de la transpiration ne suit pas fidèlement la diminution de l'indice foliaire, ainsi l'évolution de l'indice foliaire n'est pas un critère satisfaisant pour l'estimation de l'évolution du flux transpiratoire lors de la chute des feuilles. Les analyses physiologiques portant sur la chute des feuilles (KOZLOWSKI, 1973 ; KRAMER et KOZLOWSKI, 1979) distinguent 2 étapes :

.l'étape de sénescence des feuilles, lors de laquelle il y a changement de couleur des feuilles (perte de chlorophylle) et constitution à la base du pétiole de la zone d'abscission;

.l'étape d'abscission proprement dite, provoquée par digestion des cellules constituant la zone d'abscission, puis détachement ou arrachement sous l'influence du vent.

La sénescence des feuilles survient comme réponse au changement de photopériode et de régime thermique; il y a rééquilibre hormonal en faveur des inhibiteurs de la croissance (auxine, gibberelline et cytokinine). La constitution de la zone d'abscission coïncide avec l'extinction de la transpiration (KRAMER et KOZLOWSKI, 1979), donc bien avant l'abscission ou chute des feuilles. Nous discuterons, dans le chapitre "Résistance stomatique", de l'évolution de la capacité transpiratoire d'une feuille.

2.2.3.4 - Résistance stomatique

Pour estimer le flux transpiratoire et ses variations dans le temps, il est nécessaire d'établir des paramètres pour les états biologiques du peuplement à l'aide de grandeurs physiques mesurables toute l'année et d'une année à l'autre. Il faut d'abord, pour les définir, reconnaître le passage "privilegié" du flux transpiratoire, voie pour laquelle les résistances sont les moins élevées.

a) Les stomates en tant que voie "privilegiée" pour la transpiration

Les stomates, les cellules de garde et les cavités sous-stomatiques, pour l'espèce étudiée, se trouvent sur la face inférieure de la feuille, au nombre de 500 à 600 par mm² pour une feuille adulte de Quercus petraea. La longueur moyenne de l'ostiole est de 43,6 μm et sa largeur à l'ouverture maximale de 10 μm (TURNER et HEICHEL, 1977). Les ostioles représentent 0,3 à 1 % de la surface totale d'une feuille adulte (RUTTER, 1975).

Le passage de l'eau de la feuille vers l'atmosphère a lieu lorsqu'il existe une différence de potentiel entre feuille et atmosphère. L'eau, sous forme de vapeur, se déplace d'un niveau d'énergie supérieur vers un niveau inférieur avec une vitesse proportionnelle au gradient de pression de vapeur d'eau et

inversement proportionnelle à la résistance qu'elle rencontre lors du déplacement. Le potentiel de l'eau dans l'atmosphère peut descendre très bas lors d'une importante diminution de l'humidité de l'air, soit - 1000 bars pour une humidité relative de l'air de 50 %, à 17 °C. Dans le même temps, le potentiel de l'eau dans la feuille (stomates fermés) peut descendre à - 28 bars (HALL, 1982); un tel gradient de potentiel fait que le flux transpiratoire passe à travers toutes les cellules en contact avec l'air (RUTTER, 1975). Ainsi la morphologie cuticulaire, son épaisseur en particulier, par l'intermédiaire de la résistance qu'elle exerce sur le flux transpiratoire, présente des caractéristiques adaptatives selon la demande évaporative de l'environnement aérien. La résistance cuticulaire s'élève, pour les espèces mésophytiques à 20 à 50 s.cm^{-1} (SCHONHERR, 1982), alors que les ostioles à ouverture maximale, exercent une résistance au flux de vapeur d'eau de 1,5 à 4,6 s.cm^{-1} (COWAN et MILTHORPE, 1968). Il est évident que le passage par les stomates constitue une voie "privilégiée" pour la vapeur d'eau transpirée. Ainsi, l'essentiel des échanges de masse (vapeur d'eau et CO_2) se fait à travers l'appareil stomatique. L'intensité de ces échanges est conditionnée par le degré d'ouverture des stomates, donc par la résistance qu'ils exercent sur le flux transpiratoire. L'anatomie d'un stomate permet de différencier 3 types de résistance à la diffusion de la vapeur d'eau : la résistance dans l'ostiole, dans la chambre sous-stomatique et la résistance à la diffusion dans la paroi limitant la chambre sous-stomatique. Le caractère global de nos analyses, eu égard aux méthodes employées, nous permet seulement de considérer la résistance stomatique comme une somme des résistances sur l'ensemble du trajet des espaces intercellulaires jusqu'à la surface de la feuille, dans laquelle la résistance dans l'ostiole est la plus élevée et la plus variable. Cette dernière résistance varie en fonction du degré d'ouverture des cellules de garde, lié à l'état physiologique de l'arbre et aux facteurs physiques externes. L'ouverture stomatique dépend de la lumière, la température de l'air, la teneur en CO_2 , l'état hydrique des feuilles et du déficit de saturation de l'air en vapeur d'eau (HSIAO, 1973).

b) Résistance stomatique - potentiel hydrique foliaire, potentiel hydrique du sol

Il n'existe actuellement pas de théorie unifiant l'action de tous ces paramètres physiques qui permettrait de modéliser le comportement stomatique. Pour ce qui est du facteur eau, à l'échelle d'une feuille, il existe des modèles empiriques (SAUGIER, 1974 ; COWAN, 1977). Nous pouvons corréliser la résistance stomatique moyenne avec le potentiel hydrique moyen des feuilles (grandeurs mesurées sur une population de feuilles, les valeurs retenues correspondent aux moyennes arithmétiques de toutes les mesures effectuées dans chacune des séries de relevés), ou avec le potentiel hydrique moyen du sol. Nous avons utilisé comme potentiel hydrique du sol le potentiel hydrique moyen dans la zone racinaire obtenu par la pondération du potentiel de chaque strate par un coefficient égal au

rapport de la longueur racinaire dans la strate considérée à la longueur racinaire totale.

Nous avons utilisé ces corrélations sur la base de la relation entre le flux d'eau en phase liquide qui passe à travers la plante, le potentiel hydrique des feuilles et du sol et la résistance aux flux. Nous avons utilisé, dans notre travail, la relation proposée par VAN DEN HONERT (1948), reprise par GARDNER (1960), COWAN (1965) et PHILIP (1966). Le transfert de l'eau en phase liquide des racines jusqu'à la chambre sous-stomatique répond aux conditions du flux conservatif, c'est-à-dire :

$$q = (\Psi_s - \Psi_f) / R_{sp} \quad (\text{mm.j}^{-1}) \quad (2.38)$$

Ainsi, nous supposerons que le potentiel hydrique de la feuille et du sol tendent vers l'équilibre, lors de l'arrêt du flux transpiratoire ou lors d'une diminution substantielle de la transpiration (LAWLOR et LAKE, 1976), donc :

si $TR \approx 0$ (mm) et $R_{sp} > 0$

alors $\Psi_f \approx \Psi_s$

Le pas de temps choisi, une journée, soit 24 h (durant la nuit les stomates sont fermés, il y a donc diminution du flux transpiratoire*, $TR \approx 0$ mm) nous a permis d'avoir 2 types de couplages :

- Potentiel hydrique de la feuille - résistance stomatique (SAUGIER, 1974 ; COWAN, 1977). Les pertes d'eau par les feuilles peuvent faire varier le potentiel de l'eau dans l'air proche de la végétation de 1 à 2 % (HALL, 1982), phénomène influençant donc peu les échanges énergétiques (chaleur latente de l'évaporation) entre la végétation et l'atmosphère. Une perte en eau maximale de 10 % du contenu en eau (maximal) de l'appareil foliaire entraîne la chute du potentiel hydrique de la feuille jusqu'à - 28 bars (HALL, 1982)** avec comme conséquence la fermeture totale des stomates, donc l'arrêt de la transpiration stomatique. Dans le couplage potentiel hydrique foliaire-résistance stomatique moyenne, nous estimerons :

. la résistance foliaire stomatique minimale et la résistance foliaire stomatique maximale (fermeture totale des cellules de garde) et leur évolution durant les phénophases, en relation avec le potentiel hydrique (minimal-maximal) des feuilles;

* Seule la transpiration cuticulaire subsiste.

** Pour les espèces dites xérophytiques par cet auteur.

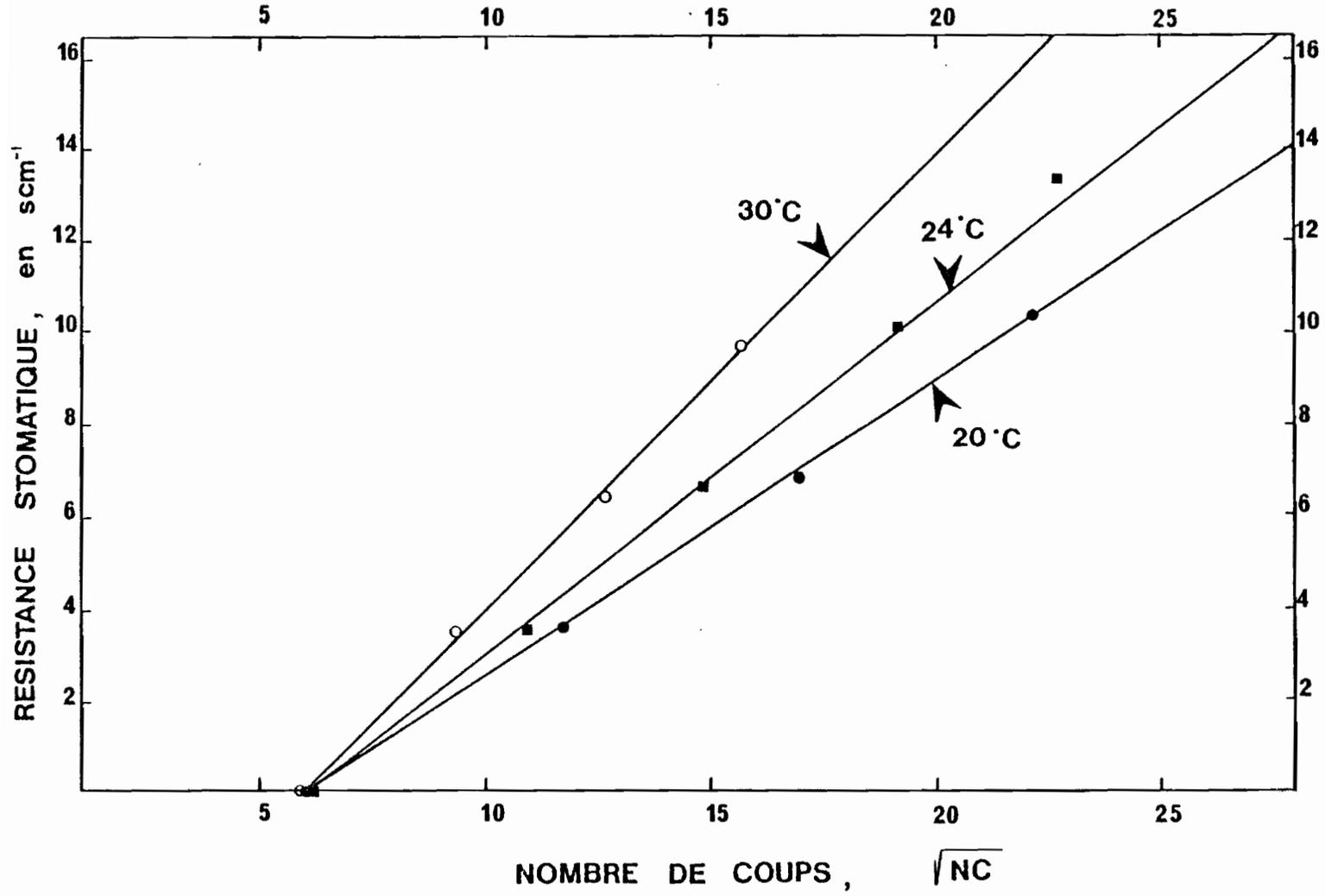


Figure 7 - Courbes d'étalonnage du poromètre.

. la fonction régissant la relation entre le potentiel hydrique foliaire moyen et la résistance stomatique moyenne pour les valeurs comprises entre le potentiel foliaire critique (résistance stomatique minimale) et le potentiel foliaire maximal (résistance stomatique maximale). Ce qui nous amènera à définir le domaine dit du "stress hydrique".

- Potentiel hydrique du sol - résistance stomatique (HALLDIN et GRIF, 1979). Parallèlement au suivi de la résistance stomatique et du potentiel hydrique des feuilles, nous avons mesuré le potentiel de l'eau dans le sol jusqu'à - 0,8 bars (tensiomètres) et au-delà, la teneur en eau du sol (sonde à neutrons) transformée par la suite en potentiel hydrique à l'aide des relations teneur en eau-potentiel hydrique.

Nous avons utilisé les relations résistance stomatique moyenne-potentiel foliaire moyen, ou potentiel moyen de l'eau dans le sol, avec les éléments suivants :

. l'évolution de la surface totale des feuilles (croissance, sénescence), le degré de développement des feuilles, l'évolution de l'indice foliaire;

. l'évolution fonctionnelle de l'appareil foliaire après la fin de la croissance en dimension ($LAI = LAI_{max}$).

Nous avons ainsi établi les points suivants :

. la relation (caractéristique de notre espèce Quercus petraea) entre le potentiel hydrique foliaire moyen et la résistance stomatique moyenne;

. le comportement stomatique en liaison avec l'état hydrique du peuplement et du milieu; nous pourrions donc vérifier si les stomates sont les "responsables" exclusifs de la variation du flux transpiratoire, surtout lors du stress hydrique; nous pourrions mesurer l'influence du changement des propriétés radiatives des feuilles (sénescence et enroulement des feuilles) sur la modification de la transpiration à partir du bilan radiatif;

. dans ce travail, 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

$$r_{sc} = r_s / LAI \quad (s.cm^{-1}) \quad (2.39)$$

Cette simplification est supposée être une approximation satisfaisante pour un bilan d'eau général en forêt. Compte tenu de la hauteur d'une forêt, certains auteurs proposent d'utiliser l'équation de PENMAN-MONTEITH en divisant la

couverture végétale en plusieurs strates et en estimant pour chacune d'elles la résistance stomatique moyenne et la résistance aérodynamique (STEWART, 1984).

. notre approche de type hydrologique du bilan d'eau nous a permis d'opter pour une uniformisation du potentiel hydrique foliaire (satisfaisante, comme le suggère LANDSBERG et al., 1984), malgré l'hétérogénéité de la résistance stomatique du potentiel foliaire (LEVERENZ et al., 1982).

c) Méthodes de mesure employées

Les mesures ont été effectuées durant l'été 1982 où $LAI = LAI_{max}$ (9 juin et 10 juillet) et pendant toutes les phénomènes de l'année 1983 :

- Lors de l'accroissement de la surface des feuilles :

- . le 6 mai 1983 où $LAI = 0,2711 \cdot LAI_{max}$
- . le 10 mai 1983 où $LAI = 0,4458 \cdot LAI_{max}$
- . le 17 mai 1983 où $LAI = 0,8657 \cdot LAI_{max}$

- Pendant la période où $LAI = LAI_{max}$

- . le 29 juin 1983
- . le 6 juillet 1983
- . le 20 juillet 1983

- Durant la phase de décroissance de la surface totale des feuilles

- . le 21 septembre 1983 où $LAI = 0,9984 \cdot LAI_{max}$
- . le 7 octobre 1983 où $LAI = 0,9834 \cdot LAI_{max}$

Nous avons observé le comportement stomatique et le potentiel foliaire sur la même feuille. Les feuilles observées ont été échantillonnées sur les 5 arbres adultes, supposés représentatifs du peuplement (les mêmes que ceux choisis pour les observations de débourrement et pour le suivi de la croissance). Les branches des arbres choisis sont en lisière, exposées au soleil et accessibles à hauteur d'homme. Nous supposons que ces 5 individus subissent le même régime d'éclairement que les arbres de la parcelle du Gros-Fouteau.

- Mesure de la résistance stomatique

La résistance stomatique des feuilles à un moment donné, diffère d'une feuille à l'autre en fonction de leur âge, de leur éclairement de croissance (feuille de lumière et feuille d'ombre), de leur localisation sur l'arbre et la branche. Nous avons pu constater la variabilité de la résistance stomatique entre des individus appartenant à la même espèce du même peuplement (MONTEITH et al., 1965). Nous avons essayé d'adopter

un échantillonnage qui prenne en compte la variabilité dans le temps et dans l'espace, de la résistance stomatique (résistance stomatique moyenne), en travaillant sur un nombre de feuilles allant de 6 à 25, et en suivant le comportement stomatique des feuilles à l'échelle de la journée. L'observation du comportement stomatique débutait le matin après évaporation de l'eau de rosée présente sur la feuille et s'achevait au coucher du soleil (exception faite pour les périodes de pluie).

Les mesures de résistance stomatique de chaque feuille ont été effectuées à l'aide d'un poromètre portable de type "MK II" mis au point par "Delta Devices" (appareil construit à partir de la description de MONTEITH et BULL, 1970); il possède une petite chambre avec une surface de contact avec la feuille de 0,559 cm². La résistance stomatique s'obtient en mesurant le temps nécessaire pour que l'humidité de l'air de la chambre augmente d'une valeur déterminée en tenant compte de la température de la feuille et de la température de l'air. Le poromètre a été calibré d'après la procédure de la notice technique pour des températures de l'air variant de 20 à 30 °C; les mesures ont été répétées jusqu'à stabilisation des valeurs observées (Figure 7).

- Mesures de la pression hydrique foliaire

Après les mesures de la résistance stomatique, la feuille a été séparée de la branche au moyen d'une lame de rasoir, à la base du pétiole, et introduite dans la chambre à pression. Celle-ci mesure la pression hydrostatique négative dans le pétiole de la feuille et son emploi consiste à établir l'équilibre entre la pression hydrique de la feuille et la pression de l'air de la chambre (RITCHIE et HINCKLEY, 1975), équilibre qui se manifeste pour l'observateur par l'apparition de la sève sur la coupure du pétiole, observée à la loupe. Nous avons utilisé la chambre à pression, mise au point par PMS Inst Co (Corvallis, Oregon, USA) sur la base des travaux du TURNER et al. (1971); cette chambre est portable et alimentée par une bouteille d'azote (précision des mesures, 0,5 bars).

Les méthodes employées lors des mesures du potentiel hydrique du sol sont discutées dans le chapitre "Circulation de l'eau dans le sol".

2.2.3.5 - Système racinaire

Le flux d'eau liquide, à caractère de flux conservatif, du sol jusqu'à la chambre sous-stomatique, pour un pas de temps d'une journée (soit 24 h), implique l'égalité entre la transpiration et l'absorption (l'équation 2.38),

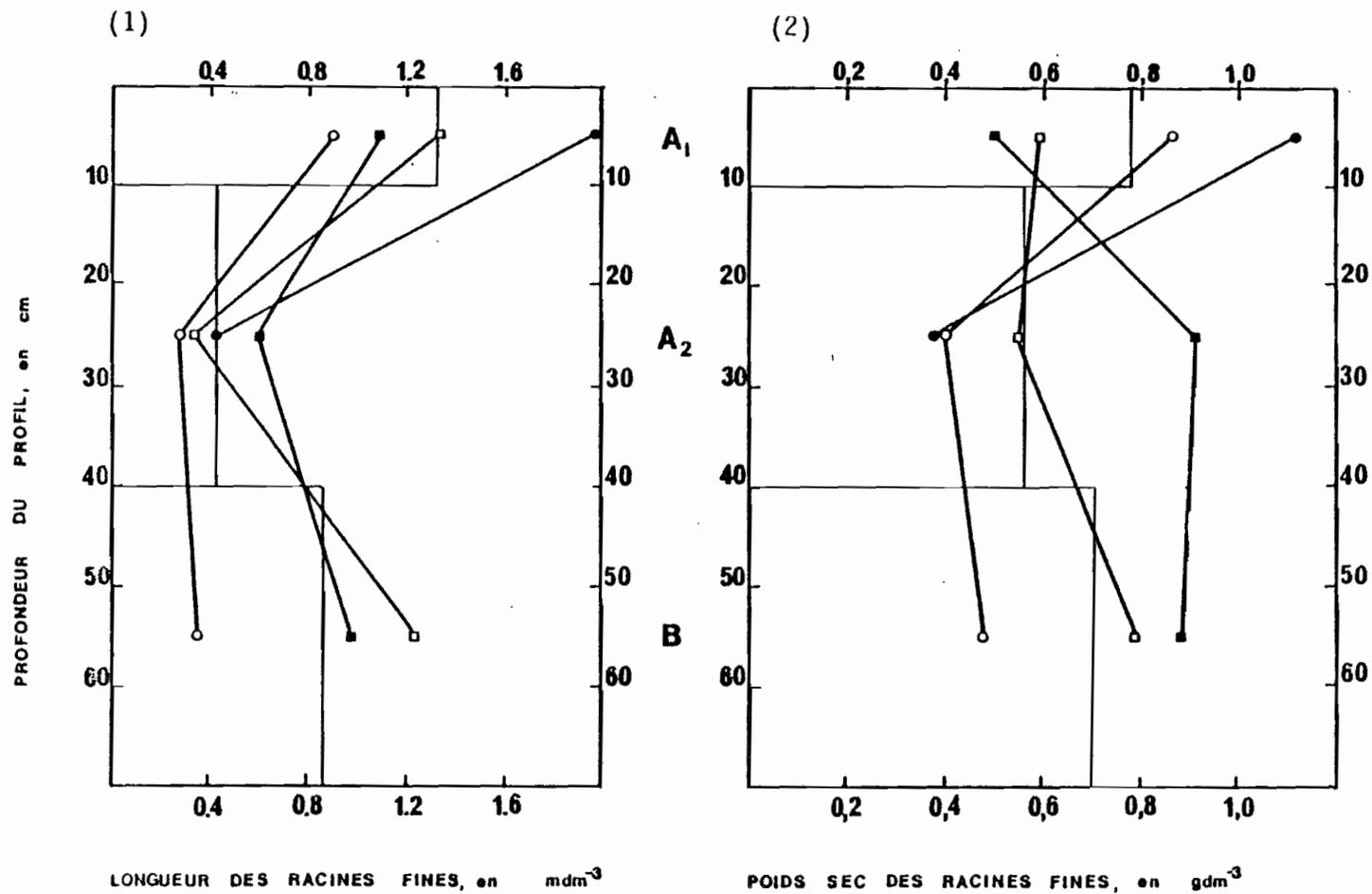


Figure 8 - Répartition des racines dans le profil du sol. Prélèvements effectués le 18 Février 1983, près de la station d'étude. Volume de l'échantillon 10 x 10 x 10 cm³.

(1) Longueur des racines fines, en m dm⁻³.

(2) Poids sec (80 °C) des racines fines, en g dm⁻³.

donc $TR = ABSp \text{ (mm.j}^{-1}\text{)}$

Le débit journalier étant identique à tous les niveaux de la plante, le volume de l'eau transpirée du peuplement, déterminé à l'aide de l'équation de PENMAN-MONTEITH (voir chapitre 2.2.2), est égal à la quantité d'eau absorbée par les racines dans tout le profil racinaire. En supposant une relation linéaire entre absorption d'eau et longueur racinaire (GARCIA de CORTAZAR, 1982), seule la longueur du système racinaire et sa répartition dans le compartiment sol nous intéressera.

a) Cas du profil mono-strate

On suppose l'homogénéité du sol et de la densité racinaire sur tout le profil, soit :

$$\psi_s = \text{const. et } PR/h_i = \text{const.}$$

Ceci implique que la demande imposée au peuplement et transférée aux racines est répartie régulièrement sur toute la profondeur du sol. D'autre part, avec la condition que toutes les racines soient également actives pendant toutes les phénophases (SAUGIER, 1979), la variation du stock d'eau du sol, et donc du potentiel hydrique, se fait de la même façon en tout point du profil. Le potentiel hydrique en un point donné du profil est alors égal au potentiel hydrique moyen du profil, soit :

$$\psi_{si} = \psi_s \text{ (bars)}$$

La valeur du potentiel hydrique moyen nécessaire à l'estimation de l'absorption exige la connaissance de la profondeur exploitée par les racines mais non celle de leur répartition horizontale.

b) Cas du profil pluri-strates

Nous avons choisi de prendre en compte les différentes strates du sol, et donc leurs particularités de structure, de texture et la répartition des racines, chaque strate étant considérée comme homogène. L'absorption totale sur tout le profil est calculée à partir du potentiel hydrique moyen du profil obtenu par pondération du potentiel de chaque couche par un coefficient égal au rapport de la longueur racinaire dans la couche considérée sur la longueur racinaire totale (VAN BAVEL et AHMED, 1976), soit :

$$ABS_{ip} = (\psi_{si} - \psi_f) / R_{sp} \cdot PR_{ip} \quad (\text{mm.j}^{-1}) \quad (2.40)$$

avec : $PR_{ip} = \frac{\text{longueur racinaire dans la couche } i \text{ du profil } p}{\text{longueur racinaire totale sur tout le profil } p}$

et l'absorption de l'eau dans l'ensemble du profil :

$$ABS_p = \sum_1^n ABS_{ip} \quad (\text{mm.j}^{-1}) \quad (2.41)$$

A potentiel hydrique égal, la quantité d'eau absorbée est d'autant plus grande que la densité de racines est importante. La répartition des racines dans chaque couche revêt par conséquent un rôle fondamental (Figure 8).

- Mesures de la longueur des racines absorbantes

Les racines ont été récoltées le 18 février 1983, à proximité de la station d'étude (environ 10 m), après creusement d'une fosse atteignant la dalle calcaire qui limite le profil vers le bas, à une profondeur de 0,7 à 1,0 m. Cette fosse est située entre 2 arbres adultes distants d'environ 8 m. L'échantillonnage a consisté à prélever sur les faces de la fosse horizons A₁, A₂ et B, sous forme de cubes de 1 000 cm³ découpés à l'aide d'une truelle. Nous avons effectué 2 extractions pour chaque horizon, sur les 4 faces de la fosse (8 échantillons par profil). Les racines ont ensuite été séparées de la terre par lavage au-dessus d'un tamis (de maille de 1 mm) puis divisées en 2 classes :

. "racines fines" d'un diamètre inférieur ou égal à 1 mm; ces racines sont considérées comme racines absorbantes;

. "grosses racines" d'un diamètre supérieur à 1 mm, ces racines sont considérées comme non absorbantes.

Par la suite, nous avons mesuré, pour chaque horizon, la longueur totale des racines "fines", au moyen de la méthode décrite par NEWMAN (1966), consistant à comptabiliser le nombre d'intersections d'un ensemble de racines posé au hasard sur une surface couverte par une série de lignes parallèles, l'écartement entre ces lignes étant connu (Figure 8).

2.2.4 - Circulation de l'eau dans le sol

2.2.4.1 - Description des processus

a) Courbes caractéristiques de l'humidité du sol

Le potentiel hydrique est la somme des potentiels résultants :

. de l'attraction de la matière solide du sol pour l'eau (potentiel matriciel)

. de l'action de la pression des gaz extérieurs (potentiel hydrostatique)

. du champ de force gravitationnel (potentiel gravitationnel)

. de la concentration en ions minéraux (potentiel osmotique) (GARDNER, 1972).

L'eau du sol se déplace dans le sens des potentiels décroissants et l'intensité du flux dépend du gradient des potentiels. L'eau tend vers un état d'équilibre où le potentiel serait uniforme dans tout le profil.

La transpiration du peuplement, et donc l'absorption d'eau par les racines d'arbres, entraîne une différence de potentiel hydrique entre les manchons de sol entourant les racines et le reste du profil. Dans le continuum sol-plante, le transfert de l'eau vers la plante dépend de la différence entre le potentiel hydrique du sol (ψ_s) et le potentiel hydrique des feuilles d'arbres (ψ_f), exprimé par l'équation (2.38). Il est donc nécessaire, pour estimer l'absorption, de connaître chaque jour le potentiel de l'eau du sol. Le choix de notre site de travail nous a permis de négliger le potentiel hydrostatique (absence de nappe phréatique et d'apports latéraux) et le potentiel gravitationnel (le modèle fonctionne avec un pas de temps d'une journée dont nous supposons qu'il représente le temps nécessaire à l'évacuation de l'eau gravitationnelle). La composante principale du potentiel hydrique est donc le potentiel matriciel, composé des forces d'adsorption, des forces capillaires et des forces d'attraction entre les molécules d'eau et les ions à la surface des particules d'argile. L'eau retenue par les forces matricielles représente le volume compris entre le contenu à la capacité au champ (potentiel matriciel $\psi_{CCH} = - 0,1$ bar pour un sol sableux) et le contenu au point de flétrissement permanent (potentiel matriciel $\psi_{PPF} = - 16$ bars). Le potentiel matriciel du sol est lié au contenu en eau du sol par une relation appelée courbe caractéristique de l'humidité du sol. Ainsi, la connaissance du contenu en eau du sol (chapitre 2.2) nous permet de connaître son état énergétique. Pour évaluer le potentiel matriciel du sol à partir de son contenu en eau (mesuré) nous avons choisi l'équation empirique (fonction du type de sol) proposée par GARDNER (1960) (Tableau 8).

Tableau 8 - Valeurs des coefficients de la formule de GARDNER ($\psi_s = A \cdot \theta^B$).
Tube n° 21.

Strate (i)	Humidité volumique (θ_{tp}) à la capacité au champ en $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$	Humidité volumique (θ_{tp}) au point de flétrissement permanent, en $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$	Coefficient	
			A_{tp}	B_{tp}
00 - 10	0.2388	0.0716	2.396×10^{-4}	-4.2134
10 - 20	0.1636	0.0223	9.948×10^{-4}	-2.5467
20 - 30	0.2038	0.0388	7.698×10^{-4}	-3.0600
30 - 40	0.2660	0.0736	5.349×10^{-4}	-3.9500
40 - 50	0.3015	0.1403	3.511×10^{-5}	-6.6343
50 - 60	0.2625	0.1534	3.253×10^{-7}	-9.4474
60 - 70	0.2293	0.1318	1.374×10^{-7}	-9.1652

b) Recharge du profil du sol à partir des précipitations au sol et l'écoulement le long des troncs

L'infiltrabilité du sol et ses variations dans le temps dépendent de la structure et de la stratification du profil, ainsi que de l'humidité du sol, donc du potentiel hydrique avant réhumectation (HILLEL, 1976). L'infiltrabilité du profil est inversement proportionnelle à sa teneur en eau. A saturation, l'infiltrabilité (minimale) est caractérisée par un coefficient appelé conductivité hydraulique du sol saturé établi in situ, pour nos sols, par FARDJAH (1978). Or, compte tenu du régime de nos pluies et de nos conditions topographiques, nous pouvons supposer que l'infiltrabilité de nos sols n'est jamais minimale et qu'il n'y a donc jamais ruissellement :

- l'intensité des précipitations au sol est toujours inférieure à l'intensité de la pluie au niveau des cimes d'arbres (influence de l'écran végétal, voir chapitre 2.2.3);

- les précipitations parvenant à la surface de la litière s'infiltrant vers l'horizon humifère*. Lorsque la litière présente un déficit par rapport à sa "réserve utile"**, la pénétration des précipitations dans le profil assure d'abord la recharge de cette "réserve utile" avant d'atteindre la première couche du sol (ralentissement du flux d'eau entrant dans le profil);

- d'après 103 ans (1883 à 1985) d'observations météorologiques (DOIGNON, 1976), les précipitations journalières maximales observées à Fontainebleau les 30 juillet 1947 et 01 août 1981 s'élèvent à $P_i = 71 \text{ mm.j}^{-1}$, alors que le coefficient de conductivité hydraulique du sol saturé, d'après FARDJAH (1978) pour l'horizon B (le moins perméable) est égal à $k_s = 6,1 \times 10^{-6} \text{ m.s}^{-1}$, soit l'équivalent de 500 mm.j^{-1} ;

- nous supposons que l'eau provenant de l'écoulement le long des troncs arrive directement au premier horizon du sol, car la litière est très peu abondante près des troncs et la porosité du sol proche des troncs très élevée (AUSSENAC, 1977a) (conductivité préférentielle le long des racines).

* Nous admettons que :

- . la surface de la litière est alimentée en eau de manière uniforme sur toute sa surface, ceci est justifié par l'homogénéité du couvert;
- . il y a homogénéité d'épaisseur de la litière;
- . la pente est nulle.

** D'après BIGNAND (1978) pour l'ensemble de la litière fraîche et ancienne, $RL_{\max} \approx 3 \text{ mm}$ (valeur moyenne annuelle).

Le choix de la journée comme pas de temps nous conduit à simplifier les processus d'infiltration et de distribution des apports d'eau au sol :

- nous admettons que les qualités hydrauliques de chaque strate (correspondant aux horizons pédologiques) sont identiques sur toute leur épaisseur;

- dans le bilan d'eau, le sol se rechargera en eau comme suit: les pluies rechargeront d'abord la "réserve utile" de la litière, puis le volume d'eau entrant dans la première strate s'additionnera à celui déjà présent. Si la teneur en eau résultante est supérieure à la capacité au champ, l'excès d'eau est ajouté à la strate suivante, et le processus se répète jusqu'à la dernière strate.

c) Pertes en eau du profil du sol

- Drainage du profil. Si la teneur en eau de la dernière strate (n) excède sa capacité au champ, il y a écoulement de l'excédent hors de la zone radiculaire, alors le drainage de l'ensemble du profil est égal au drainage de la dernière strate de ce profil, soit : $DR_p = DR_{np}$ (mm.j⁻¹).

- Evaporation. La répartition de la demande évaporative (ETP) imposée par l'atmosphère à la forêt se fait à partir des arbres (transpiration) et du sol (évaporation). Cette dernière dépend de la quantité d'énergie disponible au niveau de la surface du sol, elle-même dépendant de la fraction du rayonnement disponible au niveau des cimes des arbres, ainsi :

$$ETP_{SOL} = (1 - FRg) \cdot ETP \text{ (mm.j}^{-1}\text{)} \quad (2.42)$$

avec la fraction du rayonnement global intercepté (FRg) égale à (MONSI et SAEKI, 1953, revu par ROSS, 1975) :

$$FRg = 1 - \text{EXP}(-k \cdot \text{LAI}) \text{ avec } k = 0,275* \quad (2.43)$$

Si le sol est suffisamment humide, l'évaporation réelle est égale à l' ETP_{SOL} (comme n'importe quelle surface saturée dont la résistance est nulle). Dès que la surface du sol se dessèche, l'évaporation réelle décroît en fonction des conditions de transfert d'eau des parties profondes du sol

* déduit de la formule suivante :

$$CC = CC_{\min} + (1 - CC_{\min}) \cdot (1 - \text{EXP}(-k \cdot \text{LAI}))$$

vers la surface, transfert dépendant de la résistance de cette surface qui augmente en se desséchant (DENMEAD, 1984). GARDNER (1959) a démontré qu'après une pluie (précipitations au sol suffisamment abondantes, supérieures à l' ETP_{SOL}), l'évaporation réelle d'un sol nu diminue en fonction de la racine carrée du temps (nombre de jours sans pluie - NJSP). L'évaporation réelle du sol s'écrit :

$$ET_{SOL} = ETP_{SOL} / \sqrt{NJSP} \text{ (mm.j}^{-1}\text{)} \quad (2.44)$$

Les observations de LEMEE et FARDJAH (1980) concernant le processus d'évaporation de l'eau sous la forêt (Gros-Fouteau) laissent supposer que la litière a un rôle de protection vis-à-vis de l'évaporation de l'eau du sol (self-mulching) et donc que seule la litière est soumise au phénomène d'évaporation, alors que le sol sous-jacent n'est concerné que par le phénomène d'absorption. D'après les résultats de BIGNAND (1978), le processus d'évaporation de l'eau d'une litière (litière de chênes, Gros-Fouteau) est similaire à celui des sols nus étudiés par GARDNER (1959). L'évaporation réelle de l'eau de la litière se maintient à un rythme potentiel (ETP_{SOL}) pendant une journée après la pluie, puis décroît (ET_{SOL}). L'écart entre l' ETP_{SOL} et l' ET_{SOL} dépendra de la durée de la période sans pluie (NJSP).

2.2.4.2 - Matériel et méthodes

a) Courbes caractéristiques de l'humidité du sol

Nous avons établi la relation entre teneur en eau volumique (θ_p) et potentiel matriciel (ψ_s) pour les 5 à 9 subdivisions du sol, pour chacun des 9 tubes, à partir :

- de nos mesures expérimentales des teneurs en eau volumique ($\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$) à la capacité au champ (RCC) et au point de flétrissement permanent (RPFP),

- des valeurs des potentiels matriciels (données bibliographiques) qui correspondent à ces 2 points caractéristiques :

. à RCC, correspond le potentiel matriciel $\psi_{CCH} = - 0,1$ bar (valeur du potentiel matriciel d'horizons sableux à la capacité au champ (RUTTER, 1975));

. à RPFP, correspond le potentiel matriciel $\psi_{PFP} = - 16$ bars (RUTTER, 1975).

D'autre part, pour le tube 25, nous avons mesuré la teneur et les potentiels matriciels (compris entre - 0, 1 et - 0,8 bar); le potentiel a été mesuré au moyen de tensiomètres et la teneur en eau à l'aide d'une sonde à neutrons.

- Tensiomètre. Un tensiomètre, constitué d'une cellule poreuse emplie d'eau, installée dans le sol à la profondeur désirée, est en équilibre, d'une part avec la phase liquide du sol et, d'autre part avec un manomètre à mercure; l'augmentation du potentiel matriciel (ψ_s) de l'eau du sol entraîne la remontée du mercure dans le manomètre (h_p).

Nous avons utilisé des tensiomètres de type "Soil moisture". Ils ont été installés sur la station d'étude le 22 janvier 1982 (sol à la capacité au champ). Les bougies des tensiomètres ont été saturées en eau avant d'être introduites à la profondeur requise; les cannes et les tuyaux ont été remplis par de l'eau dégazée. Nous avons mis en place 2 batteries de tensiomètres :

. une batterie à 4 bougies, implantées à 10 cm de profondeur dans l'horizon A_1 ;

. une seconde batterie à 3 bougies, enfoncées à 10, 40 et 70 cm de profondeur, respectivement dans les horizons A_1 , A_2 et B.

L'ensemble de ce dispositif nous a permis de suivre l'évolution du potentiel hydrique du sol du 22 janvier 1982 au 21 décembre 1983. Lors des phases sans feuilles, les mesures ont été faites tous les 20 à 30 jours, et lors des phases avec feuilles, chaque semaine; et ce en-deçà d'un potentiel hydrique du sol de $\psi_s = - 0,8$ bar, potentiel au-delà de laquelle les tensiomètres ne fonctionnent plus.

- Sonde à neutrons. Se reporter au chapitre "Contenu en eau de l'écosystème - contenu en eau du sol".

b) Conductivité saturée (k_s)

Nous avons repris de FARDJAH (1978) les coefficients de conductivité hydraulique pour les horizons A_1 et A_2 et B de ces sols saturés en eau, coefficients établis in situ à l'aide d'un infiltromètre mis au point par COLOMBANI et al. (1972) (Tableau 10).

MODELISATION DU BILAN D'EAU DE LA FORET

3.1 - APPROCHE GENERALE

La modélisation de tout objet renvoie à la notion "d'imitation" de l'objet, ou encore de représentation simplifiée de la réalité de cet objet; le modèle devenant ensuite, au même titre que ces différents constituants, instrument d'étude de l'objet.

Dans notre travail, l'objet est la circulation de l'eau dans un écosystème forestier. Ainsi, dans le chapitre "Cycle hydrologique en forêt", nous avons adopté une approche qualitative des phénomènes de circulation de l'eau dans l'écosystème forestier étudié (modèle dit verbal). Dans ce qui suit, nous utiliserons une approche quantitative, formalisation mathématique du modèle verbal précédemment exposé. Un tel modèle mathématique est constitué :

a) d'un ensemble de variables mesurables choisies pour représenter l'objet étudié. Dans leurs analyses de systèmes écologiques, de WIT et GOUDRIAAN (1974) distinguent cinq types de variables :

. les variables d'état qui décrivent l'état du système à un instant donné (par ex. stock d'eau du sol),

. les variables d'entrée nécessaires au début de chaque pas de temps de calcul (par ex. précipitations),

. les variables de flux qui quantifient les taux de changement des variables d'état (par ex. transpiration),

. les variables auxiliaires, nombres ou relations fonctionnelles nécessaires au fonctionnement du modèle (par ex. indice foliaire),

. les variables de sortie que l'on désire simuler (par ex. évapotranspiration réelle).

b) d'un ensemble de relations mathématiques entre ces variables. Chaque écosystème est caractérisé par une structure et un fonctionnement dont certaines propriétés évoluent dans le temps et dans l'espace (les différentes variables); ces variables sont déterminées et interdépendantes, l'ensemble des relations mathématiques entre ces variables doit assurer le fonctionnement du modèle. La connaissance parfaite de toutes les caractéristiques et lois régissant le système modélisé permettrait de construire un modèle explicatif (ou mécaniste). Lorsque ce n'est pas le cas, les relations entre variables sont élaborées à partir de critères statistiques, le modèle est alors empirique. Dans notre modèle, nous traduirons certains

phénomènes par des équations empiriques propres au milieu considéré, en cherchant à limiter au mieux l'empirisme du modèle.

3.2 - DESCRIPTION DU MODELE

Il existe de nombreux modèles mathématiques concernant les échanges sol-plante-atmosphère. On pourra consulter HALL (1982) qui en a fait une compilation très complète et qui discute les différentes approches.

Notre modèle simule l'évapotranspiration réelle du couvert, sur une base journalière, en séparant l'évaporation de l'eau interceptée et la transpiration de la voûte forestière. Nous nous sommes inspiré, pour l'interception, des modèles de RUTTER et al. (1971) et de GASH (1979), utilisant la notion de capacité de rétention en eau des parties aériennes du couvert; ce type d'approche a donné des résultats satisfaisants (RUTTER et al., 1975, 1977; GASH et MORTON 1978). Le processus de transpiration est modélisé suivant la résolution proposée par SAUGIER (1974) qui consiste à rechercher le potentiel hydrique des feuilles pour lequel la transpiration et l'absorption sont approximativement égales (voir chapitre 3.3.5).

Notre modèle a nécessité la mise au point des sous-modèles suivants :

. prévision de la date de débourrement des feuilles et évolution dans le temps de l'indice foliaire en fonction de la somme des températures et de la photopériode (voir chapitre 3.3.3),

. évolution dans le temps de la résistance stomatique foliaire minimale en fonction de l'indice foliaire et de l'état hydrique des feuilles et du sol (voir chapitre 3.3.4).

Les caractéristiques du modèle sont les suivantes :

- Variables d'entrée

- . rayonnement global (R_g)
- . température moyenne de l'air (t_a)
- . température de rosée (t_r)
- . vitesse du vent (v)
- . précipitations incidentes (P_i)
- . pression atmosphérique (P_{atm})
- . photopériode (DD)

- Variables d'état

- . stock d'eau sur les couronnes d'arbres (RE)

- . stock d'eau sur les troncs d'arbres (RT)
- . stock d'eau dans la litière (RL)
- . stock d'eau dans le sol (RP)

- Taux de flux

- . transpiration (TR)
- . absorption d'eau par les racines (ABS)
- . évaporation d'eau des couronnes d'arbres (EB)
- . évaporation d'eau des troncs d'arbres (ET)
- . évaporation d'eau de la litière (EL)
- . écoulement le long des branches (ECB)
- . écoulement le long des troncs (EC)
- . égouttement des couronnes d'arbres (EGB)
- . drainage de la litière (DRLIT)
- . drainage du sol (DR)

- Variables auxiliaires et paramètres et relations fonctionnelles nécessaires au fonctionnement du modèle

. climat :

- évapotranspiration potentielle au niveau des cimes d'arbres (ETP), mm
- évapotranspiration potentielle au niveau du sol (ETP_{sol}), mm
- évapotranspiration potentielle au niveau des troncs (ETPT), mm

. peuplement :

- hauteur du déplacement (d)
- longueur de rugosité (z_0)
- résistance aérodynamique (r_a), $s \cdot cm^{-1}$
- degré de recouvrement du sol (CC)
- capacité de rétention maximale d'eau des couronnes d'arbres (RE_{max}), mm
- relation résistance stomatique moyenne/potentiel hydrique des feuilles (r_s/ψ_f)

. sol :

- potentiel hydrique su sol (ψ_s), bars

- Constantes et paramètres

. du peuplement :

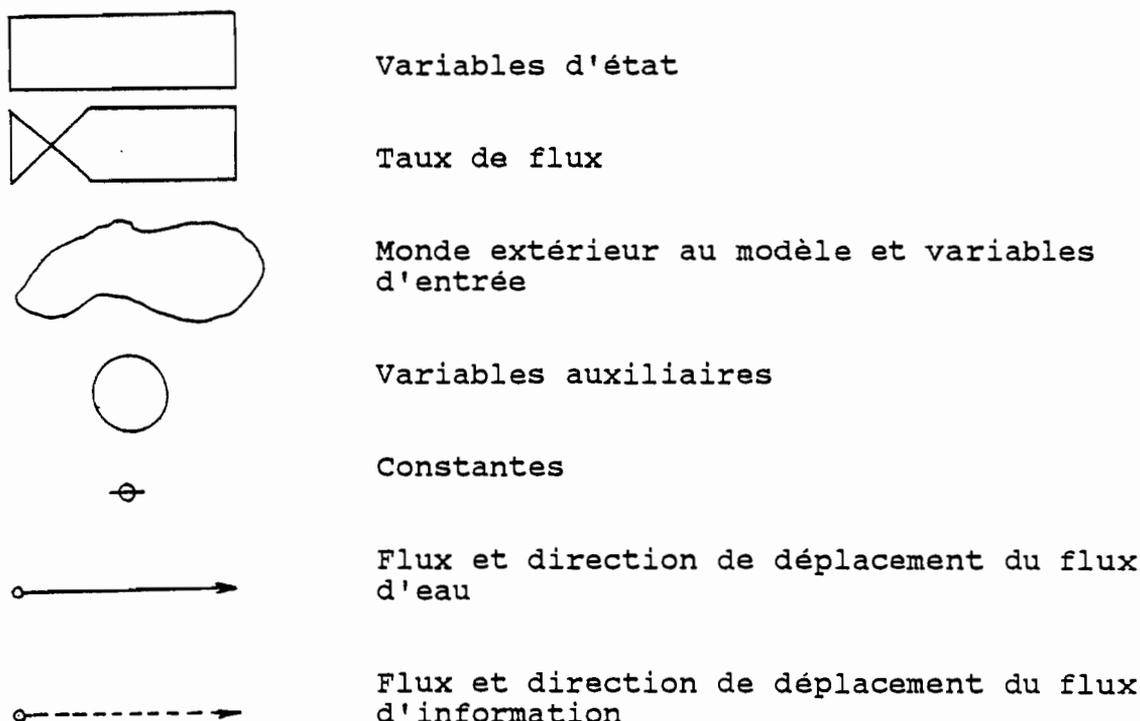
- albédo moyenne du peuplement (a)
- émissivité du peuplement (ϵ)
- hauteur du peuplement (h), m
- indice foliaire maximal (LAI_{max})
- coefficient d'extinction du rayonnement solaire (k)

rapport surface des troncs d'arbres du peuplement/surface
 du sol occupée par ce peuplement (ST)
 résistance stomatique minimale (r_{smin}), $s \cdot cm^{-1}$
 résistance stomatique maximale (r_{smax}), $s \cdot cm^{-1}$
 potentiel hydrique des feuilles maximal (ψ_{fmax}), bars
 potentiel hydrique critique des feuilles (ψ_{flim}), bars
 longueur racinaire (PR)
 capacité de rétention minimale des couronnes d'arbres
 (RE_{min}), mm
 capacité de rétention maximale des troncs d'arbres
 (RT_{max}), mm
 capacité de rétention minimale des troncs d'arbres
 (RT_{min}), mm
 capacité de rétention maximale de la litière (RL_{max}), mm
 capacité de rétention minimale de la litière (RL_{min}), mm
 degré de recouvrement minimal du sol (CC_{min})

. du sol :

rétention en eau du sol à la capacité au champ (RCC),
 $cm^3 \cdot cm^{-3}$
 rétention en eau du sol au point de flétrissement
 permanent (RPFPP), $cm^3 \cdot cm^{-3}$
 potentiel hydrique du sol à la capacité au champ (ψ_{RCC}),
 bars
 coefficients A et B de la formule de GARDNER ($\psi_s = A \theta^B$)
 conductivité hydraulique du sol saturé (k_s), $m \cdot s^{-1}$

La structure et les principes du fonctionnement du modèle
 sont illustrés par le schéma fonctionnel du modèle (Schéma 2)
 pour lequel nous avons repris de FORRESTER (1961) cité par
 DE WIT et GOUDRIAAN (1974), les symboles des variables
 suivantes :



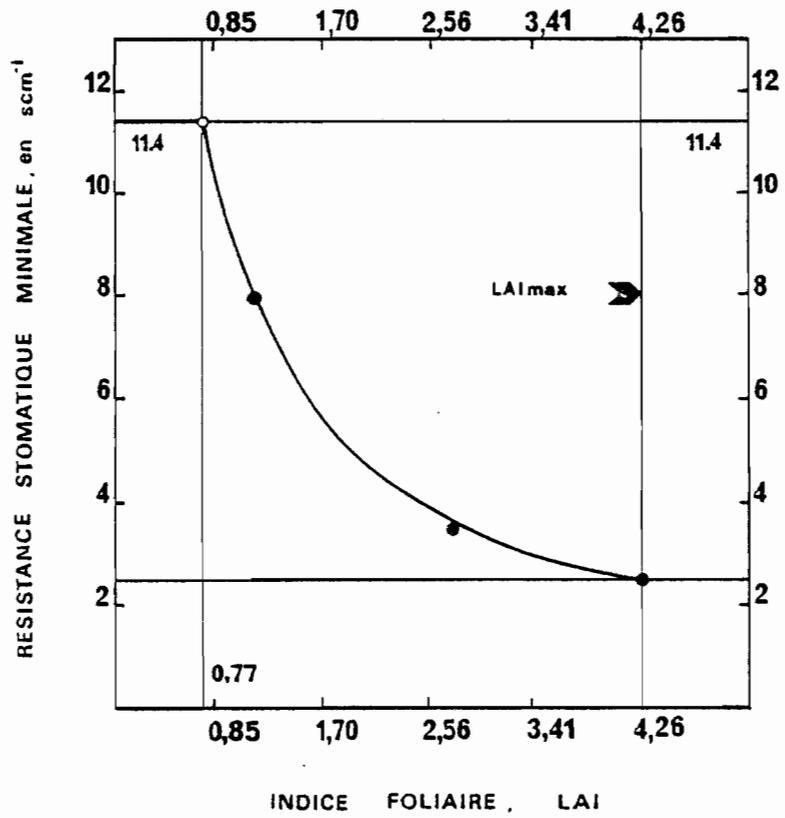


Figure 9 - Résistance stomatique lors de la croissance en surface des feuilles.

Ce modèle a été élaboré :

. d'une part sur la base de données expérimentales (à partir de mesures au Gros-Fouteau), soit :

- toutes les valeurs des constantes du peuplement et du sol;
- les relations fonctionnelles du peuplement tels que l'indice foliaire, la résistance stomatique, le potentiel hydrique des feuilles, le degré de recouvrement du sol, la capacité de rétention maximale en eau des couronnes d'arbres et du sol;

. d'autre part sur la base de données issues de la littérature (toutes celles non mentionnées ci-dessus).

Le modèle est écrit en BASIC-80 Microsoft sur un ordinateur ISTC 5000. Le début de la simulation se fait le 1^{er} janvier (j=1), en supposant comme conditions initiales que les stocks d'eau dans la litière, dans le sol, sur les couronnes et sur les troncs ont leurs valeurs maximales (Schéma 2).

Le modèle a été validé pour les années 1981, 1982 et 1983 sur la base des données* suivantes :

- . mesures de l'évolution de la surface foliaire,
- . mesures des précipitations au sol,
- . mesures de l'écoulement le long des troncs,
- . mesures des profils hydriques du sol.

3.3 - SOUS-MODELES

3.3.1 - Indice foliaire

a) Phénophase sans feuilles. Dans tout ce qui suit, le pas de temps est la journée, le jour du calcul est appelé jour j, et les simulations commencent le 1^{er} Janvier (jour j=1) avec comme condition initiale de simulation LAI(1)=0. Le LAI(j) est considéré comme nul jusqu'au débourrement que nous avons modélisé.

b) Phénophase avec feuilles

- Calcul de la photopériode nécessaire au débourrement :

Il y a débourrement lorsque la somme des températures des dix jours précédant le jour j est supérieure à une fonction décroissante de la durée du jour :

* Données provenant de mesures effectuées sur la station d'étude, ou au Gros-Fouteau, à proximité de la station d'étude.

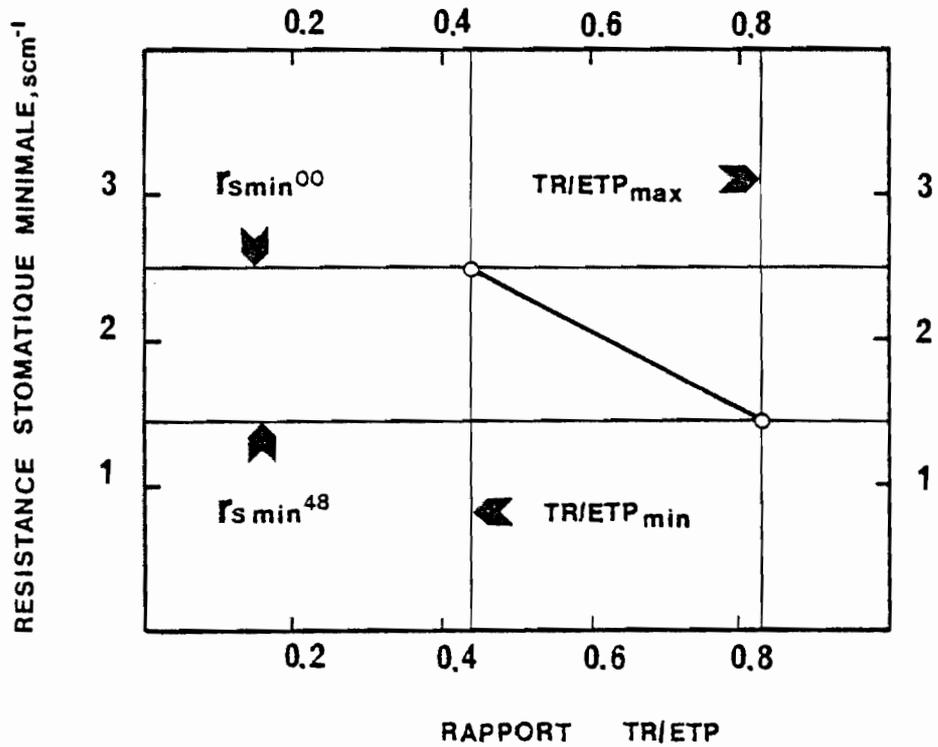


Figure 10 - Relation entre le rapport TR/ETP et la résistance stomatique minimale durant la période du plein développement de la surface des feuilles (déficit hydrique négligeable ou faible).

$$\sum_{j-10}^j t_a \geq (C_4 \cdot DD(j)) / (C_3 \cdot DD(j-1)) \quad (3.1)$$

avec : $C_3 = 1,4082 \cdot 10^{-3}$
 $C_4 = 24,1712 \cdot 10^{-3}$

Ce calcul est répété pour chaque jour jusqu'à ce qu'il y ait débourrement pour $DD(j) = DD(j_{dr})$ (min).

D'après l'équation (3.1) l'asymptote $1/C_3$ (min) représente la photopériode limite en-deçà de laquelle il ne peut y avoir débourrement, cette valeur asymptotique est de 710 min, photopériode du 16 mars. Le débourrement ne peut donc avoir lieu avant cette date.

- Estimation de l'indice foliaire lors de l'accroissement en surface ($0 < LAI(j) < LAI_{max}$) et estimation de la photopériode correspondant à la fin de la croissance de la surface des feuilles ($LAI(j) = LAI_{max}$).

Nous avons conçu, pour le calcul de l'indice foliaire au jour j, la formule suivante :

$$LAI(j) = (LAI_{max} \sum_{j_{dr}}^j t_a) / ((DD(j) - C_6) / C_5) \quad (3.2)$$

$C_5 = 0,2441$
 $C_6 = 982,7731$

L'indice foliaire $LAI(j)$ ainsi calculé est une fonction de l'indice foliaire maximal (LAI_{max}) et dépend de la somme des températures au jour j qui est elle-même une fraction de la somme des températures nécessaire à la fin de croissance en surface des feuilles pour la photopériode de ce jour j ($DD(j)$).

- Indice foliaire maximal ($LAI(j) = LAI_{max}$). De la photopériode correspondant à la fin d'accroissement de la surface des feuilles jusqu'à la photopériode 746 min* (18 septembre) l'indice foliaire ($LAI(j)$) est considéré comme constant et est égal à l'indice foliaire maximal (LAI_{max}), soit :

si $DD(j_{rfc}) > DD(j) > 746$ min.

alors $LAI(j) = LAI_{max}$

- Indice foliaire lors de la diminution de la surface des feuilles ($LAI_{max} > LAI(j) > 0$). Si la photopériode du jour j est inférieure à 746 min, alors l'indice foliaire $LAI(j)$ est inférieur à l'indice foliaire maximal (LAI_{max}):

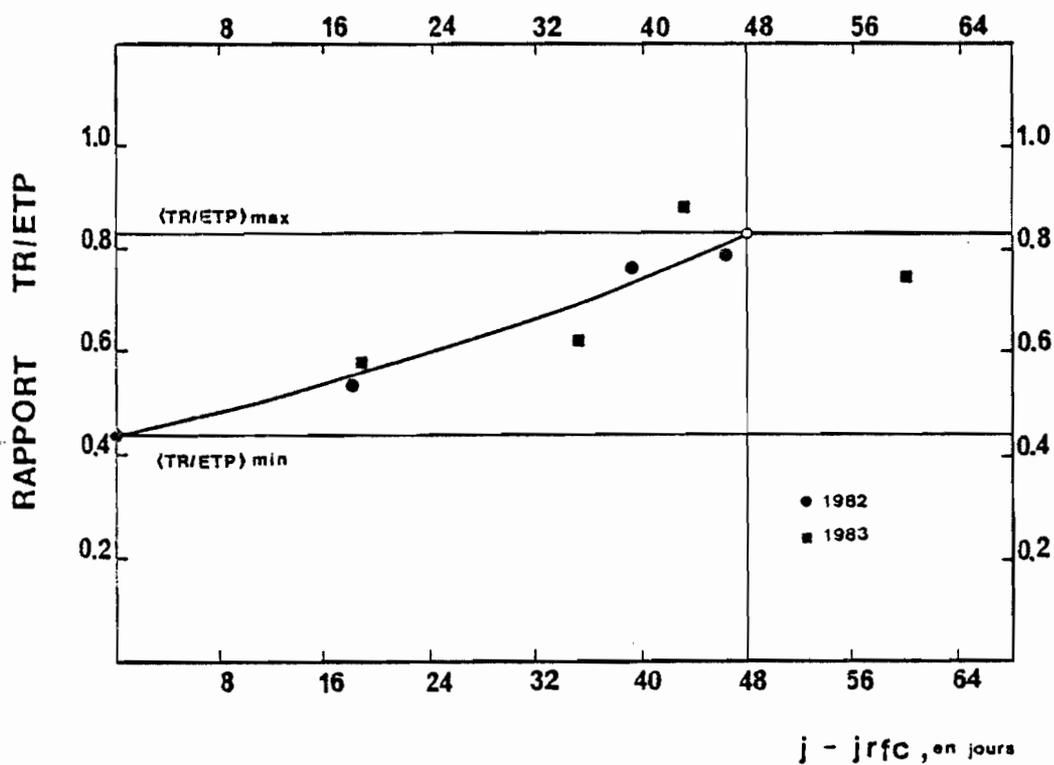


Figure 11 - Evolution du rapport TR/ETP durant la période du plein développement de la surface des feuilles (stress hydrique négligeable ou faible) en fonction du nombre de jours écoulés depuis le jour d'arrêt de la croissance en surface des feuilles.

si $DD_{(j)} < 746$ min

alors $LAI_{(j)} < LAI_{max}$

Nous avons exprimé l'indice foliaire ($LAI_{(j)}$) dans sa phase de diminution en fonction de l'indice foliaire maximal (LAI_{max}) et de la photopériode d'après l'équation suivante:

$$LAI_{(j)} = (LAI_{max} / (1 + C_7 \cdot \text{EXP}(C_8 \cdot DD_{(j)})) \quad (3.3)$$

avec $C_7 = 1,3043 \cdot 10^{10}$
 $C_8 = 0,0404304$

3.3.2 - Résistance stomatique

a) Résistance stomatique minimale

Il s'agit de la résistance stomatique minimale en dehors de tout stress hydrique, lorsque le potentiel hydrique des feuilles est inférieur à ψ_{flim} .

- Résistance stomatique lors de la croissance en surface des feuilles. Nous avons modélisé l'évolution de la résistance stomatique minimale en fonction du $LAI_{(j)}$ à l'aide de l'équation empirique suivante (Figure 9) :

pour $0 < LAI_{(j)} < LAI_{max}$

$$r_{smin} = C_{13} (LAI_{(j)})^{C_{14}} \quad (s \cdot cm^{-1}) \quad (3.4)$$

avec $C_{13} = 9,0027$
 $C_{14} = -0,8896$

Ainsi, pour $0 < LAI_{(j)} < LAI_{max}$, la résistance stomatique minimale décroît jusqu'à environ $r_{smin} = 2,48 \text{ s} \cdot \text{cm}^{-1}$ pour LAI_{max} au jour jr_{fc} ; pour les indices foliaires très faibles (pas de points expérimentaux) les résistances stomatiques minimales calculées d'après l'équation ci-dessus sont très élevées, au-delà de $r_{smin} = 11,36 \text{ s} \cdot \text{cm}^{-1}$, ce qui correspond à la résistance stomatique maximale (r_{smax}); ainsi, les résistances stomatiques supérieures à $r_{smax} = 11,36 \text{ s} \cdot \text{cm}^{-1}$ seront considérées, dans notre modèle, comme égales à $r_{smax} = 11,36 \text{ s} \cdot \text{cm}^{-1}$, valeur limite correspondant à des stomates non encore fonctionnels, soit

si $r_{smin} \geq r_{smax} \quad (s \cdot cm^{-1})$

alors $r_{smin} = r_{smax} \quad (s \cdot cm^{-1})$

* La photopériode maximale pour Fontainebleau est égale à 967 min du 17 au 23 Juin. Après cette date, la photopériode diminue.

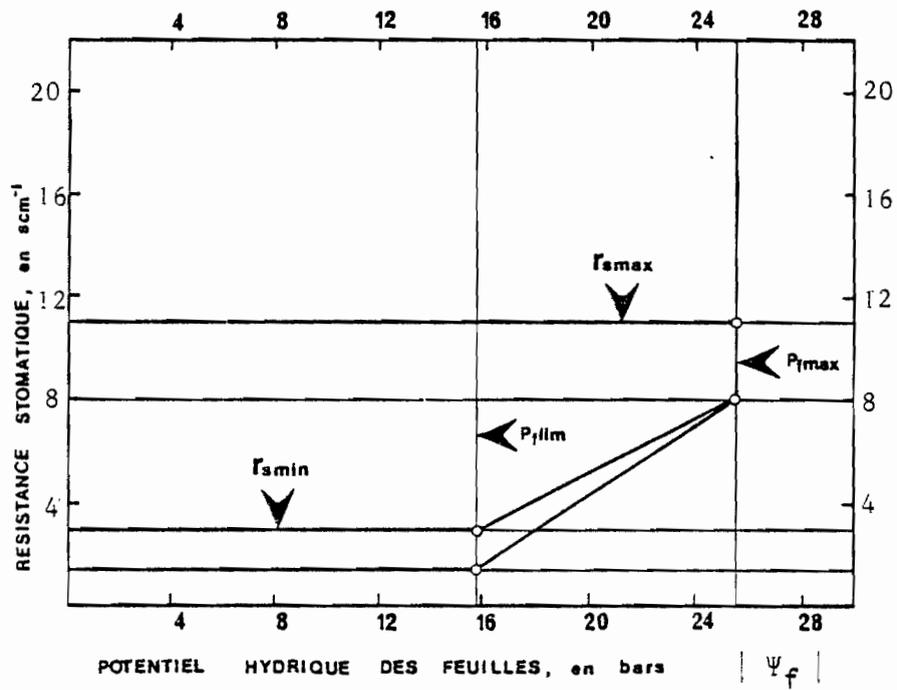


Figure 12 - Evolution de la résistance stomatique moyenne (r_s) en fonction du potentiel hydrique foliaire (ψ_f).

- Résistance stomatique minimale durant la période du plein développement en surface des feuilles ($LAI(j) = LAI_{max}$). Après l'arrêt d'accroissement en surface des feuilles, la relation évapotranspiration réelle - évapotranspiration potentielle (facteur hydrique non limitant), soit $TR(j)/ETP(j)$, n'est pas à son niveau maximal $(TR/ETP)_{max}$, signifiant ainsi que la résistance stomatique minimale n'a pas atteint sa valeur minimale ou encore que les stomates n'ont pas encore acquis leur maturité fonctionnelle; il s'écoule environ 48 jours (durée variable selon les années) entre le jour où $LAI(j) = LAI_{max}$ (j_{rfc}) et le jour où les stomates acquièrent leur maturité fonctionnelle. Entre ces deux dates remarquables $TR(j)/ETP(j)$ augmente en fonction du temps (de 0,44 à 0,83, valeur maximale) (Figure 10) selon l'équation empirique suivante :

$$\text{si } LAI(j) = LAI_{max}$$

$$TR(j)/ETP(j) = 0,44 \cdot \exp(0,0131 \cdot (j - j_{rfc})) < (TR/ETP)_{max} \quad (3.5)$$

r_{smin} décroît en fonction du temps (de $r_{smin} = 2,48 \text{ s} \cdot \text{cm}^{-1}$ à $r_{smin} = 1,44 \text{ s} \cdot \text{cm}^{-1}$, valeur minimale) (Figure 11) selon l'équation empirique suivante:

$$r_{smin} = (-2,667 \cdot (TR(j)/ETP(j))) + 3,653 \text{ (s} \cdot \text{cm}^{-1}) \quad (3.6)$$

Cette dernière équation est issue de l'équation (3.6) et de l'équation modélisant l'évolution de $TR(j)/ETP(j)$, en fonction de r_{smin} . Ainsi :

$$\text{si } LAI(j) = LAI_{max}$$

$$\text{et } TR(j)/ETP(j) \geq (TR/ETP)_{max}$$

alors $r_{smin} = 1,44 \text{ s} \cdot \text{cm}^{-1}$, valeur minimale qui se maintient pendant toute la période de maturité fonctionnelle des stomates.

b) Résistance stomatique moyenne, fonction du potentiel hydrique foliaire

Il s'agit de la résistance stomatique comprise entre les résistances stomatiques maximale (valeur mesurée $r_{smax} = 11,36 \text{ s} \cdot \text{cm}^{-1}$) et minimale qui, nous l'avons vu plus haut, évolue jusqu'à maturité fonctionnelle des stomates. L'équation ci-dessous permet de rendre compte de la variation de la résistance moyenne en fonction du potentiel hydrique foliaire (Figure 12) tout en tenant compte des variations de r_{smin} :

$$r_s(j) = \frac{(r_{smax} - r_{smin}(j)) \cdot (\psi_{fmax} - \psi_{flim})}{(\psi_f(j) - \psi_{flim})} + r_{smin}(j) \text{ (s} \cdot \text{cm}^{-1}) \quad (3.7)$$

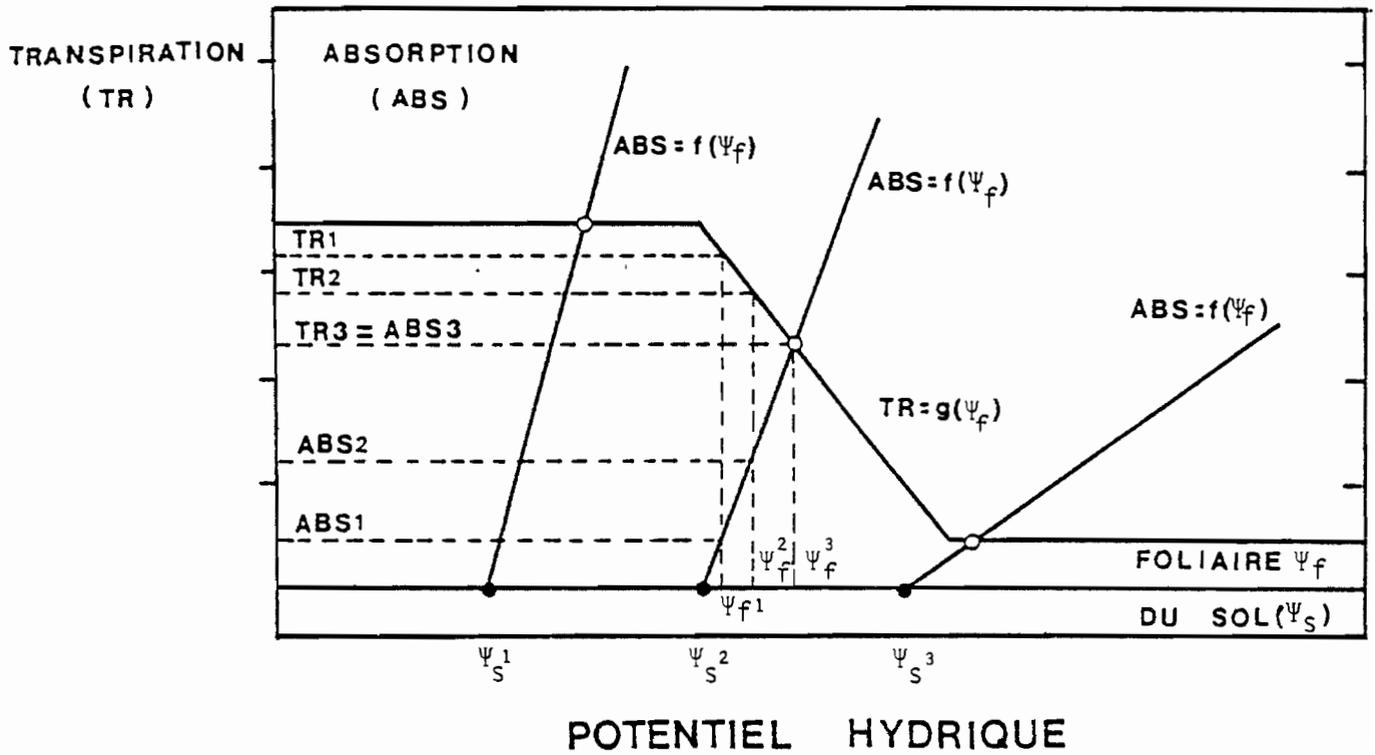


Schéma 3 - Estimation du potentiel hydrique des feuilles (Ψ_f)

Ainsi, si le potentiel hydrique actuel des feuilles ($\Psi_f(j)$) est supérieur ou égal au potentiel hydrique critique des feuilles (Ψ_{flim}), alors:

$$((r_{smax} - r_{smin}(j)) / (\Psi_{fmax} - \Psi_{flim})) (\Psi_f(j) - \Psi_{flim}) = 0$$

et $r_s(j) = r_{smin}(j)$ ($s \cdot cm^{-1}$)

En l'absence de toute contrainte hydrique, les stomates opposent effectivement au flux de vapeur d'eau une résistance minimale.

3.3.3 - Potentiel hydrique du sol

Pour le calcul du potentiel hydrique du sol le jour j, nous possédons la valeur de la rétention en eau de chacune des couches du sol le jour j-1, soit $RPip_{(j-1)}$ (mm), valeur que nous exprimons en humidité volumique, soit:

$$\theta_{ip}(j-1) = (RPip_{(j-1)} / h_i) \cdot 100 \quad (cm^3 \cdot cm^{-3}) \quad (3.8)$$

alors le potentiel hydrique du sol de la couche i le jour j est égal, d'après la formule de GARDNER, à :

$$\Psi_{sip}(j) = A_{ip} \cdot (\theta_{ip}(j-1))^{B_{ip}} \quad (\text{bars}) \quad (3.9)$$

3.3.4 - Potentiel hydrique des feuilles

Suivant l'équation (2.38), si le potentiel hydrique des feuilles ($\Psi_f(j)$) est supérieur ou égal au potentiel hydrique du sol ($\Psi_s(j)$), alors l'absorption de l'eau par les racines n'a pas lieu:

$$\text{si} \quad \Psi_f(j) \geq \Psi_s(j) \quad (\text{bars})$$

$$\text{donc} \quad \sum_1^n ABS_i(j) = 0 \quad (mm \cdot j^{-1})$$

Compte tenu de la continuité du flux d'eau dans le système sol-plante, la somme des extractions d'eau par les racines dans n strates du profil p est égale à la transpiration, soit :

$$\sum_1^n ABS_i(j) = TR(j) \quad (mm \cdot j^{-1})$$

La transpiration sera exprimée d'après la formule de PENMAN-MONTEITH (l'équation 2.30). Ainsi, en vertu de la continuité du flux d'eau:

$$\text{si } \sum_1^n \text{ABS}_i(j) = \text{TR}(j) \quad (\text{mm} \cdot \text{j}^{-1})$$

alors

$$(\Psi_s(j) - \Psi_f(j)) / \text{Rsp} = \text{ETP} / (1 + (\gamma / (\Delta + \gamma)) (r_s(j) / (\text{LAI}(j) \cdot r_a))) \quad (\text{mm} \cdot \text{j}^{-1})$$

Ce qui, après transformation, permet d'estimer le potentiel hydrique des feuilles $\Psi_f(j)$, soit :

$$\Psi_{fj} = \text{Rsp} \cdot (\text{ETP} / (1 + (\gamma / (\Delta + \gamma)) (r_s(j) / (\text{LAI}(j) \cdot r_a)))) \quad (\text{bars}) \quad (3.10)$$

équation implicite, puisque $r_s(j)$ dépend de $\Psi_f(j)$; $\Psi_f(j) = f(\Psi_f(j))$.

Pour estimer ce potentiel hydrique des feuilles, nous avons repris la résolution numérique proposée par ROSE et al. (1976) pour un sol non stratifié* (Schéma 3). Les étapes du calcul sont les suivantes :

$$\begin{aligned} \text{si } r_s(j) &= r_{s\text{min}}(j) && (\text{s} \cdot \text{cm}^{-1}) \\ \text{alors } \Psi_f(j) &= < \Psi_{f\text{lim}} && (\text{bars}) \\ \text{si } r_s(j) &= r_{s\text{max}} && (\text{s} \cdot \text{cm}^{-1}) \\ \text{alors } \Psi_f(j) &= > \Psi_{f\text{max}} && (\text{bars}) \\ \text{si } r_{s\text{min}}(j) &< r_s(j) < r_{s\text{max}} && (\text{s} \cdot \text{cm}^{-1}) \\ \text{alors } \Psi_{f\text{lim}} &< \Psi_f(j) < \Psi_{f\text{max}} && (\text{bars}) \\ \text{et } f(\Psi_{f\text{lim}}) &=> 0 \\ \text{et } f(\Psi_{f\text{max}}) &=< 0 \end{aligned}$$

* Nous avons utilisé le potentiel moyen du profil obtenu par pondération du potentiel matriciel de chaque couche par un coefficient égal au rapport de la longueur racinaire dans la strate considérée à la longueur racinaire totale.

Ainsi la solution se trouve entre $f(\psi_{flim})$ et $f(\psi_{fmax})$. Nous imposerons une précision d'approche α . Nous calculerons la différence entre TR et ABS pour un potentiel $(\psi_{flim} + \psi_{fmax})/2$ ensuite nous répétons le procédé jusqu'à obtention du potentiel qui égalise (à un seuil de précision fixé à l'avance) TR et ABS.

3.4 - CALCULS DES FLUX D'EAU

a) Bilan d'eau des couronnes d'arbres

Le bilan d'eau des couronnes d'arbres peut s'exprimer sous forme des équations suivantes :

$$\text{si } CC_p(j) \cdot Pi + RE_p(j-1) - CC_p(j) \cdot ETP(j) \leq RE_{min}$$

$$\begin{aligned} \text{alors } EGB_p(j) &= 0 && (\text{mm} \cdot j^{-1}) \\ ECB_p(j) &= 0 && (\text{mm} \cdot j^{-1}) \\ RE_p(j) &= RE_{min} && (\text{mm}) \\ EB_p(j) &= (CC_p(j) \cdot Pi + RE_p(j-1) - RE_{min}) && (\text{mm} \cdot j^{-1}) \end{aligned}$$

$$\text{si } CC_p(j) \cdot Pi + RE_p(j-1) - CC_p(j) \cdot ETP(j) \leq RE_{maxp}$$

$$\begin{aligned} \text{alors } EGB_p(j) &= 0 && (\text{mm} \cdot j^{-1}) \\ ECB_p(j) &= 0 && (\text{mm} \cdot j^{-1}) \\ RE_p(j) &= (CC_p(j) \cdot Pi + RE_p(j-1) - (CC_p(j) \cdot ETP(j))) && (\text{mm}) \\ EB_p(j) &= CC_p(j) \cdot ETP(j) && (\text{mm} \cdot j^{-1}) \end{aligned}$$

$$\text{si } CC_p(j) \cdot Pi + RE_p(j-1) - CC_p(j) \cdot ETP(j) > RE_{maxp}$$

$$\begin{aligned} \text{alors } EB_p(j) &= CC_p(j) \cdot ETP(j) && (\text{mm} \cdot j^{-1}) \\ RE_p(j) &= RE_{maxp} && (\text{mm}) \\ EGB_p(j) &= (CC_p(j) \cdot Pi - ECB_p(j) + RE_p(j-1)) - (CC_p(j) \cdot ETP(j) + RE_{maxp}) \end{aligned}$$

L'écoulement le long des branches* ($ECB(j)$) peut être approché de deux façons différentes :

- lère version

$$ECB(j) = EC(j) = ((-5,3756 \cdot 10^{-4} LAI(j)) + 0,00487) Pi \quad (\text{mm} \cdot j^{-1}) \quad (3.11)$$

Dans cette optique, le volume d'eau qui s'écoule le long des branches est égal au volume d'eau recueilli sur le tronc à 1,3 m. A partir des mesures d'écoulement le long des troncs ($EC(j)$) et des données des précipitations à découvert (Pi) (valeurs annuelles cumulées), nous avons établi le taux d'écoulement le long des troncs, à savoir le rapport:

$$\frac{\text{valeur culumée } (EC(j))}{\text{valeur culumée } (Pi)}$$

* La valeur de l'écoulement le long des branches est supposée uniforme pour toute la surface de la station d'étude, indépendante donc de l'emplacement des sondes (p).

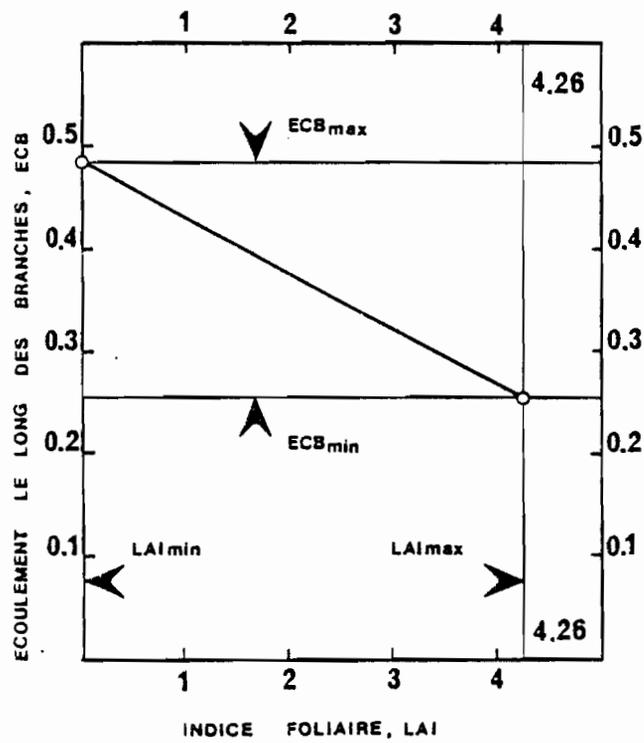


Figure 13 - Evolution du rapport ECB/Pi en fonction de l'indice foliaire.

Ce taux d'écoulement ne dépend que du LAI_(j) :

. pour la phase sans feuilles où LAI_(j)=0, il est égal à $0,4 \cdot 10^{-2}$, EC_(j) représente 0,4 % de Pi;

. pour la phase avec feuilles où LAI_(j)=LAI_{max}; il est égal à $0,2 \cdot 10^{-2}$, EC_(j) représente 0,2 % de Pi;

. pour les phases intermédiaires, ce taux varie de façon linéaire en fonction de l'indice foliaire, entre le taux maximal (0,4 % de Pi) et minimal (0,2 % de Pi) (Figure 13).

Dans cette version, nous négligerons l'évaporation de l'eau des troncs et le stock d'eau susceptible d'être retenu sur la surface des troncs. Ainsi, dans l'équation empirique de l'écoulement le long des branches (ECB_(j)) que nous avons établi (équation 3.11), l'écoulement le long des branches dépend du LAI_(j) et des précipitations à découvert (Pi); et à LAI_(j) constant, cet écoulement ne dépend donc plus que de Pi (pourcentage constant).

2ème version

Dans cette version, nous avons établi un bilan d'eau des troncs d'arbres, dans lequel l'écoulement le long des branches (ECB_(j)) constitue l'entrée d'eau sur les troncs; dans ce cas, le taux d'écoulement (% de Pi) n'est pas fixe mais varie avec Pi (plus Pi est grand, plus le taux d'écoulement ECB_(j)/Pi l'est aussi) jusqu'à une valeur limite de Pi = 10 mm, au-delà de laquelle le taux d'écoulement est un pourcentage constant de Pi (on revient à la première version). Cette valeur limite Pi = 10 mm est inspirée des données de ROBINS (1974) et de FORD et DEANS (1978), données calculées pour des durées inférieures à la journée et sur plusieurs types de peuplements, elles ont donc valeur de moyenne approximative. Au total, ECB_(j) est une fonction des précipitations à découvert Pi, du LAI_(j) (CC_{p(j)} · Pi) et de l'état hydrique des couronnes d'arbres (RE_{max} et RE_{p(j)}); ces dernières variables RE_{max} et RE_{p(j)} étant elles-mêmes dépendantes de l'indice foliaire (Figure 14); ce qui se résume par le système d'équations suivant :

$$\text{si } (CC_{p(j)} \cdot Pi - CC_{p(j)} \cdot ETP(j)) - (RE_{max} - RE_{p(j-1)}) < P_{lim}$$

alors

$$ECB_{(j)} = 0,00014 \cdot ((CC_{p(j)} \cdot Pi - CC_{p(j)}) - (RE_{max} - RE_{p(j-1)})) (\text{mm} \cdot j^{-1})$$

$$\text{si } (CC_{p(j)} \cdot Pi - CC_{p(j)} \cdot ETP(j)) - (RE_{max} - RE_{p(j-1)}) > P_{lim}$$

alors

$$ECB_{(j)} = 0,14 (CC_{p(j)} \cdot Pi - CC_{p(j)} \cdot ETP(j)) - (RE_{max} - RE_{p(j-1)}) (\text{mm} \cdot j^{-1})$$

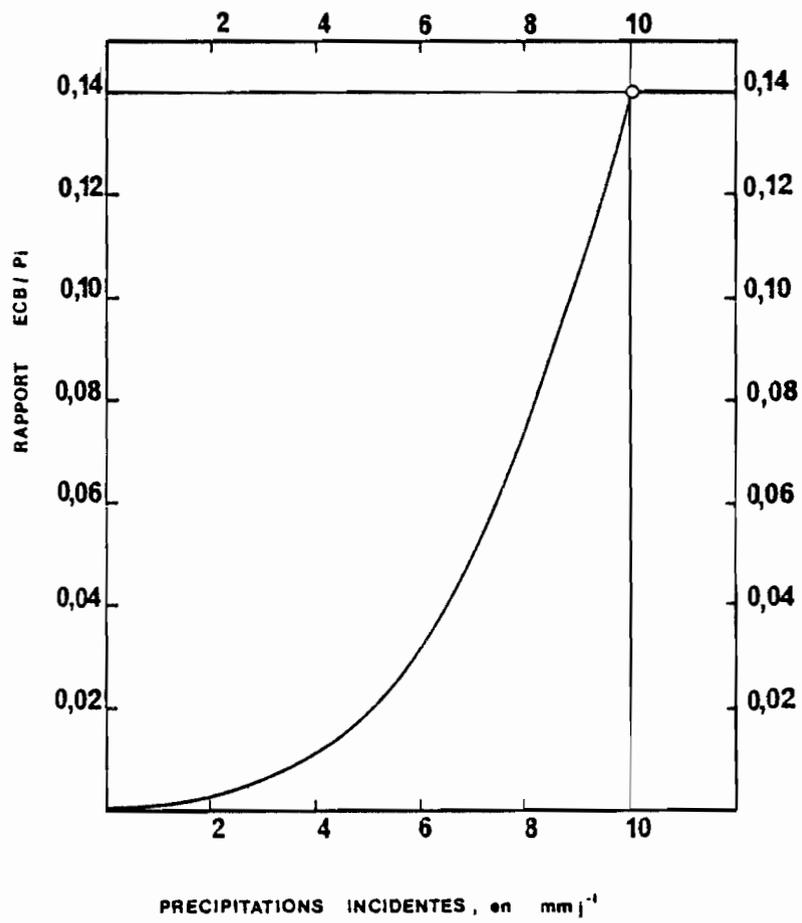


Figure 14 - Evolution du rapport ECB/Pi en fonction des précipitations incidentes (Pi).

Ces équations sont valables pour toutes les phénomènes. Ainsi, le bilan d'eau des troncs se présente sous la forme suivante :

```

si ECB(j) + RT(j-1) - ETPT(j-1) =< RT_min
alors EC(j) = 0;
      RT(j) = RT_min;
      ET(j) = (ECB(j) + RT(j-1)) - (ETPT(j) + RT_min)

```

```

si ECB(j) + RT(j-1) - ETPT(j) =< RT_max
alors EC(j) = 0;
      ET(j) = ETPT(j);
      RT(j) = (ECB(j) + RT(j-1) - ETPT(j))

```

```

si ECB(j) + RT(j-1) - ETPT(j) > RT_max
alors ET(j) = ETPT(j);
      RT(j) = ETPT(j);
      EC(j) = (ECB(j) + RT(j-1)) - (ETPT(j) + RT_max)

```

b) Bilan d'eau de la litière

Le volume d'eau qui arrive au niveau de la litière, les précipitations au sol (pluies directes et égouttement des couronnes d'arbres) est égal à :

$$P_{sp}(j) = (ECB(j) + CD_p(j) \cdot P_i) \quad (\text{mm} \cdot j^{-1}) \quad (3.12)$$

```

si P_sp(j) + RL_p(j-1) - CD_p(j) \cdot ET_sol(j) =< RL_min

```

```

alors DRLIT_p(j) = 0;
      RL_p(j) = RL_min;
      EL_p(j) = (P_sp(j) + RL_p(j-1) - RL_min)

```

```

si P_sp(j) + RL_p(j-1) - CD_p(j) \cdot ET_sol(j) =< RL_max

```

```

alors EL_p(j) = CD_p(j) \cdot ET_sol(j);
      RL_p(j) = (P_sp(j) + RL_p(j-1)) - (CD_p(j) \cdot ET_sol(j));
      DRLIT_p(j) = 0

```

```

si P_sp(j) + RL_p(j-1) - CD_p(j) \cdot ET_sol(j) > RL_max

```

```

alors DRLIT_p(j) = (P_sp(j) + RL_p(j-1)) - (CD_p(j) \cdot ET_sol(j) + RL_max);
      RL_p(j) = RL_max;
      EL_p(j) = CD_p(j) \cdot ET_sol(j)

```

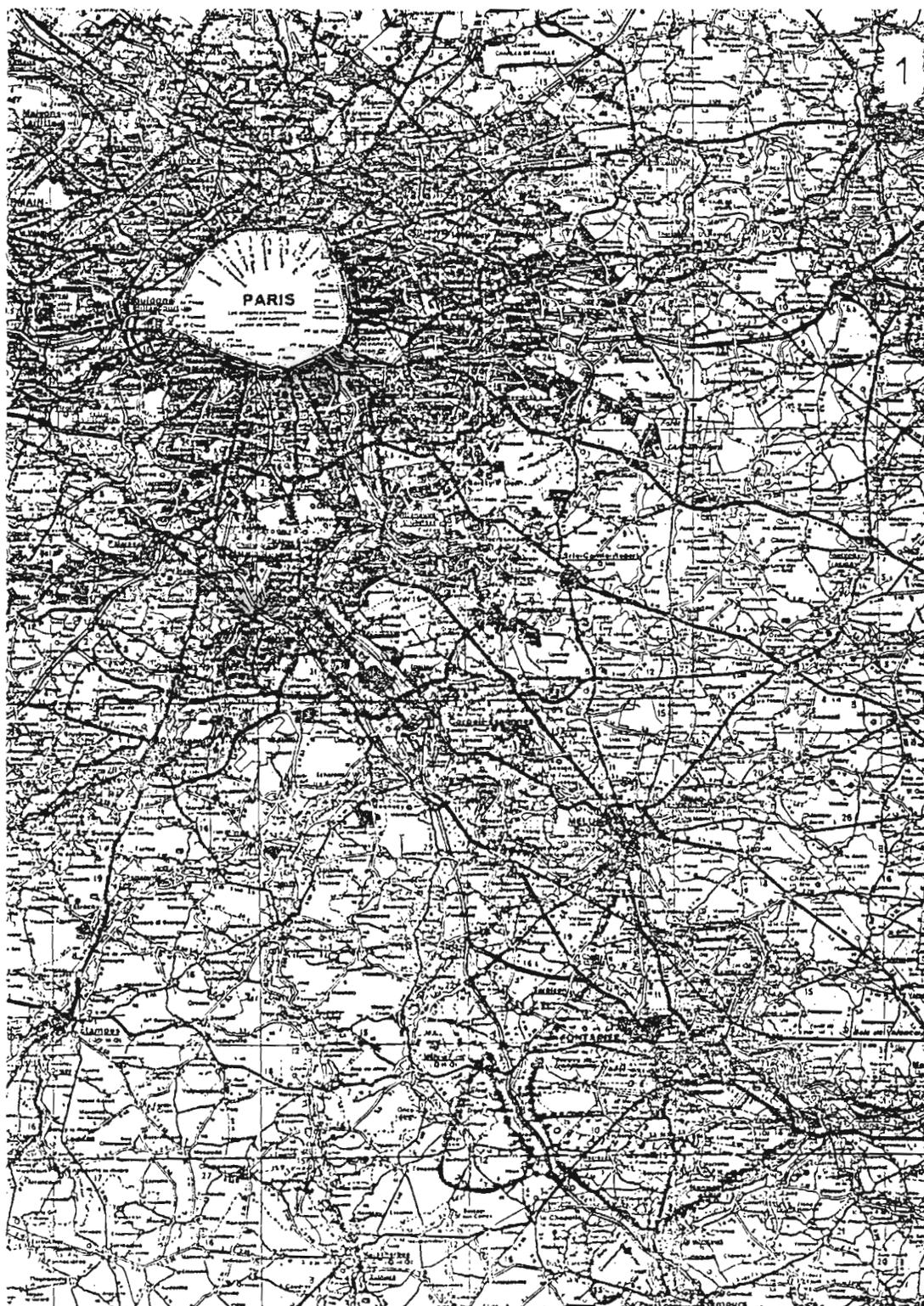


Figure 15 - Localisation de la forêt de Fontainebleau et de la placette étudiée. Echelle : 1/200 000ème.

Ainsi, l'interception du peuplement est égale à:

$$In_p(j) = EB_p(j) + ET_p(j) + EL_p(j) \quad (mm \cdot j^{-1}) \quad (3.13)$$

c) Bilan d'eau du sol

- Bilan d'eau de la première strate du sol. Le bilan d'eau de la première strate diffère de celui des strates sous-jacentes. La première strate reçoit l'eau de drainage de la litière et l'eau issue de l'écoulement le long des troncs qui ne transite pas par la litière. Chacune des autres strates reçoit l'eau de drainage de la strate immédiatement supérieure.

Le bilan d'eau de la première strate est le suivant:

```

si      DRLITp(j)+RP(1)p(j-1)+EC(j)-ABS(1)p(j) =< RFPF(1)p
alors   DR(1)p(j) = 0;
        RP(1)p(j) = RFPF(1)p
si      DRLITp(j)+RP(1)p(j-1)+EC(j)-ABS(1)p(j) =< RCC(1)p
alors   DR(1)p(j) = 0;
        RP(1)p(j) = DRLITp(j)+RP(1)p(j-1)+EC(j)-ABS(1)p(j)
si      DRLITp(j)+RP(1)p(j-1)+EC(j)-ABS(1)p(j) > RCC(1)p
alors   RP(1)p(j) = RCC(1);
        DR(1)p(j) = (DRLITp(j)+RP(1)p(j-1)+EC(j))-RCC(1)p
    
```

- Bilan d'eau de toute strate i

```

si      DR(i-1)p(j)+RPip(j-1)-ABSip(j) =< RFPFip
alors   DRip(j) = 0;
        RPip(j) = RFPFip
si      DR(i-1)p(j)+RPip(j-1)-ABSip(j) =< RCCip
alors   DRip(j) = 0;
        RPip(j) = DR(i-1)p(j)+RPip(j-1)-ABSip(j)
si      DR(i-1)p(j)+RPip(j-1)-ABSip(j) > RCCip
alors   DRip(j) = (DR(i-1)p(j)+RPip(j-1))-(RCCip+ABSip(j));
        RPip(j) = RCCip
    
```

Tableau 9 - Moyennes mensuelles des précipitations incidentes et des températures moyennes de l'air de la station météorologique de Fontainebleau.

		I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	I - XII
Précipitations incidentes en mm	1883 - 1983	71.6	54.1	47.6	46.0	62.3	58.3	62.3	62.4	59.8	55.9	69.5	72.5	720.4
	1981	87.1	53.9	82.7	64.5	95.1	101.0	51.7	161.4	46.1	139.1	53.2	149.2	1 085.0
	1982	79.5	26.7	79.7	9.7	67.8	72.4	40.9	24.3	85.0	113.7	70.1	121.2	791.0
	1983	60.5	62.0	51.4	145.0	108.1	38.1	107.2	17.2	69.2	29.3	29.5	26.9	744.4
Température moyenne de l'air, en °C	1883 - 1983	2.10	3.37	6.61	10.11	13.55	16.57	18.19	17.23	14.50	10.14	5.59	2.28	10.16
	1981	3.00	2.00	9.70	9.90	13.20	15.50	17.80	18.80	15.70	10.33	6.47	3.45	10.53
	1982	3.29	4.06	6.31	9.28	13.67	18.38	20.04	17.39	17.31	10.72	7.78	4.35	11.05
	1983	5.49	2.25	7.12	8.99	11.86	17.89	22.15	19.54	15.56	10.88	5.85	3.27	10.96

LA STATION D'ETUDES, LES RESULTATS OBTENUS

4.1 - DESCRIPTION DU MILIEU

4.1.1 - Situation géographique

Le massif forestier de Fontainebleau est situé à 55 km au Sud-Sud-Est de Paris. Les 25 000 ha de forêt sont limités au Nord et à l'Est par la Seine, au Sud-Est par la vallée du Loing, au Sud et à l'Ouest par le plateau du Gâtinais. Nous avons travaillé dans la parcelle du Gros-Fouteau, no 267, localisée sur un plateau à 130 à 140 m d'altitude, dans la partie centrale de la forêt (Figure 15).

4.1.2 - Le climat

Le macroclimat séquanien auquel la région de Fontainebleau est soumise est intermédiaire entre le climat océanique et le climat subcontinental. A l'intérieur de ce climat régional, l'existence du massif forestier de Fontainebleau engendre un mésoclimat particulier à cette zone boisée (DOIGNON, 1976).

Les précipitations annuelles moyennes pour 101 ans (de 1883 à 1983) sont de 720,4 mm. La répartition des pluies au cours de l'année est très régulière, 361,3 mm d'octobre à mars et 359,1 mm d'avril à septembre, avec des maxima en janvier (71,6 mm) et en décembre (72,5 mm), et des minima en mars (47,6 mm) et en avril (46,0 mm). La température moyenne de l'air pour la même période (101 ans) est de 10,16 °C; le maximum moyen mensuel se situe en juillet (18,19 °C) et le minimum en janvier (2,18 °C) (Tableau 9).

4.1.3 - Le sol

Le substrat géologique du plateau est constitué de dépôts calcaires de la fin de l'Oligocène ("Calcaire d'Etampes") en continuité avec le "Calcaire de Beauce". Il a été recouvert au Quaternaire par des sables siliceux d'origine éolienne. La parcelle du Gros-Fouteau repose sur des sols lessivés et des sols podzoliques, dont le déterminisme est lié à l'épaisseur de la couche sableuse (variable de 0,4 à 1,5 m). La station d'étude repose sur un sol lessivé étudié par LEMEE (1966) et ROBIN (1968), dont l'épaisseur varie localement en fonction du microrelief de la dalle calcaire, entre 0,5 et 0,9 m (Tableaux 10 et Figure 16).

. Horizon A₁, épaisseur de 5 à 8 cm, mull-moder avec 4 à 10 % de matière organique très faiblement humifiée; rapport C/N de 15 à 18; taux de saturation en bases de 25 à 35 %, pH très acide (environ 4); structure très instable.

Tableau 10 - Caractéristiques du sol de la station d'étude.

	H o r i z o n				
	A ₁	A ₂	A ₂ /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	35	10	35	
Profondeur de prélèvement, en cm	5	30	50	75	90
Argile, en %	3.0	3.5	12.5	19.98	5.5
Limon, en %	6.0	9.0	12.2	7.2	8.5
Sables, en % :					
- 0.02 à 0.05 mm	8.4	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	41.6
- 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
Masse organique, en %	3.9	0.5	0.4	0.17	0.0
CaCO ₃ , en %	0.0	0.0	0.0	0.0	13.8
Densité apparente, en gcm ⁻³	1.37	1.41	1.40	1.63	1.55
Porosité, en %	54.00	41.66	37.00	28.66	36.00
Conductivité hydraulique, en m s ⁻¹	24.05 x 10 ⁻⁶	14.80 x 10 ⁻⁶		6.10 x 10 ⁻⁶	15.30 x 10 ⁻⁶
Capacité au champ, en mm					
- in situ	18.2	11.5	13.2	16.8	13.7
- met. Bouyoucos	17.1	11.9	14.0	17.6	
Point de flétrissement perm., en mm	5.0	2.7	3.6	6.8	4.7
"Réserve utile", en mm	13.2	8.8	9.6	10.0	9.0
pH	4.4	4.8	5.6	6.1	6.4

. Horizon A₂, épaisseur très variable de sable jaune clair, très pauvre en limon et argile, friable et très perméable.

. Horizon B, horizon rubéfié et compact, très enrichi en argile (11 à 25 %) et en fer (rapport B/A de 3 à 6); taux de saturation généralement supérieur à 50 % et pH proche de 5.

. Horizon D, sables et graviers calcaires (13 à 30 % de carbonates) reposant sur une dalle calcaire.

4.1.4 - La végétation (d'après LEMEE, 1966)

Le peuplement du Gros-Fouteau est une futaie qui, en raison de sa longévité peut être considérée comme relativement stable; le chêne Quercus petraea (Mat.) Liebl. en représente l'espèce dominante; la strate arbustive, très peu dense est essentiellement constituée de hêtres et la strate herbacée quasi-absente. LEMEE rattache le groupement végétal représenté au Gros-Fouteau à la chênaie acidiphile, classe des Querco-Fagetea, alliance du Quercion robori-petraeae (Figure 17).

4.2 - MESURES EFFECTUEES

4.2.1 - Les résultats des années 1981, 1982 et 1983

a) flux et bilans

- précipitations au sol (Ps)

Les résultats des mesures des précipitations au sol (Ps) effectuées sur la station d'études du 19 janvier 1981 au 16 décembre 1983 (les valeurs moyennes du tube 21 et de l'ensemble du peuplement - moyenne de neuf tubes) figurent en annexe (Tableau 01).

- écoulement le long des troncs (EC)

Les résultats des mesures de l'écoulement le long des troncs d'arbres effectuées sur la station d'études du 11 mars 1982 au 16 décembre 1983 figurent en annexe (Tableau 02).

- stock d'eau dans le sol (RP)

Les résultats des mesures de la rétention en eau du sol effectuées sur la station d'études (les valeurs du tube 21) figurent en annexe (Tableau 03).

b) paramètres morpho-physiologiques

- résistance stomatique/potentiel hydrique des feuilles

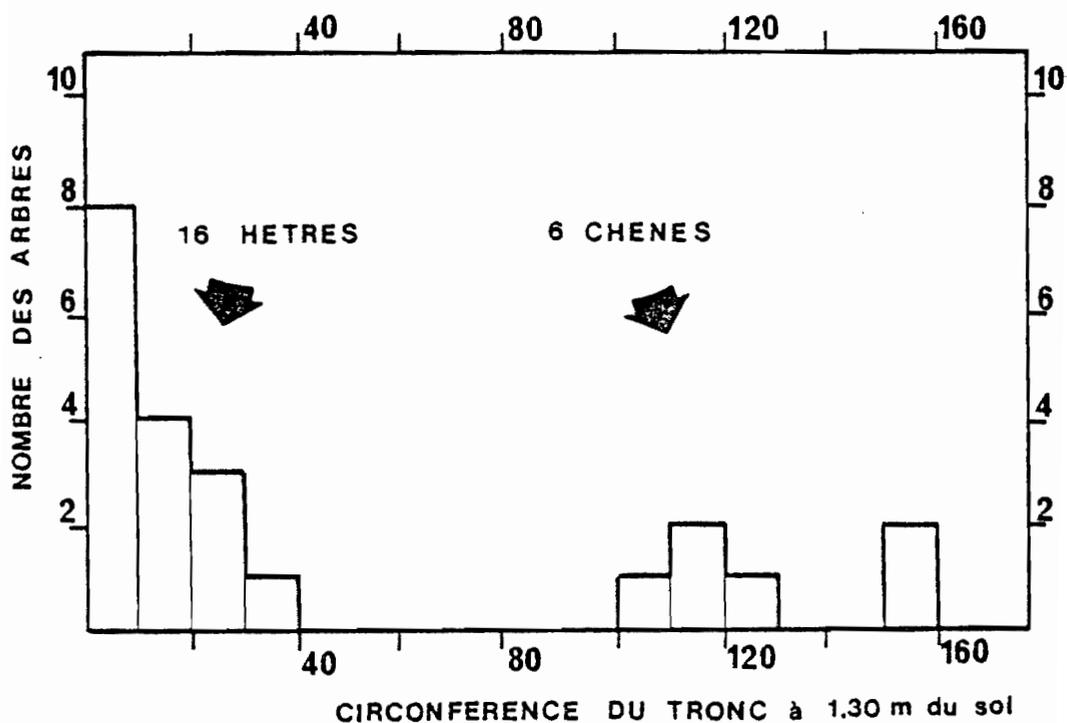


Figure 17 - Structure du peuplement ligneux de la placette d'étude (surface : 277 m²).

Arbres et arbustes :

Ab1	∅	18 cm	h = 4,50 m	hêtre
Ab2		12 cm	h = 3,20 m	hêtre
Ab3		158 cm	h = 30,50 m	chêne
Ab4		39 cm	h = 10,50 m	hêtre
Ab5		13 cm	h = 2,50 m	aubépine
Ab6		6 cm	h = 1,50 m	hêtre
Ab7		4 cm	h = 2,00 m	hêtre
Ab8		153 cm	h = 32,00 m	chêne
Ab9		28 cm	h = 5,50 m	hêtre
Ab10		27 cm	h = 5,00 m	hêtre (mort)
Ab11		15 cm	h = 2,50 m	hêtre
Ab12		6 cm	h = 2,20 m	hêtre
Ab13		6 cm	h = 2,20 m	hêtre
Ab14		113 cm	h = 32,00 m	chêne
Ab15		7 cm	h = 3,80 m	hêtre
Ab16		108 cm	h = 27,00 m	chêne
Ab17		8 cm	h = 3,00 m	hêtre
Ab18		6 cm	h = 2,10 m	hêtre
Ab19		5 cm	h = 2,10 m	hêtre
Ab20		30 cm	h = 6,50 m	hêtre
Ab21		125 cm	h = 29,00 m	chêne
Ab22		115 cm	h = 28,00 m	chêne

L'influence du potentiel hydrique (Ψ_f) sur la résistance stomatique moyenne (r_s) (mesures effectuées au Gros-Fouteau) est illustrée par le tableau 4, annexe.

- autres paramètres morpho-physiologiques

1. Albédo moyen du couvert :
 - a) phase défeuillée; $a = 0.12$
 - b) phase feuillée; $a = 0.18$ (page 34 et 41).
2. Emissivité du couvert :
 - a) phase défeuillée; $\epsilon = 0.94$
 - b) phase feuillée; $\epsilon = 0.93$ (page 34 et 41).
3. Hauteur moyenne du peuplement; $h=30$ m (Tableau 4, Page 42)
4. Indice foliaire maximal:
 $LAI_{max} = 4.38$ (Page 51 et 121)
5. Coefficient d'extinction du rayonnement solaire: $k = 0.275$, page 39 et 70).
6. Rapport surface des troncs d'arbres/surface du sol occupée par le peuplement; $ST = 0.2635$ (Page 25)
7. Capacité de rétention des couronnes d'arbres:
 - a) maximale, $RE_{max} = 1.61$ mm (hiver); 2,62 mm (été)
 - b) minimale, $RE_{min} = 0.372$ mm (Tableau 2, Page 22)
8. Capacité de rétention des troncs d'arbres:
 - a) maximale, $RT_{max} = 1.24$ mm (Page 25),
 - b) minimale, $RT_{min} = 0.29$ mm (Page 25)
9. Capacité de rétention de la litière:
 - a) maximale, $RL_{max} = 3.82$ mm (Page 27),
 - b) minimale, $RL_{min} = 0,93$ mm (Page 27)
10. Degré de recouvrement minimal de la surface du sol:
 $CC_{min} = 0.416$ (Tableau 2, Page 22)
11. Longueur racinaire; RP (Figure 8, Page 64 et Page 121).

c) paramètres édaphiques

- 1 - Rétention en eau du sol:
 - a) à la capacité au champ; RCC,
 - b) au point de flétrissement permanent; RFPF (Tableau 3, Page 26)

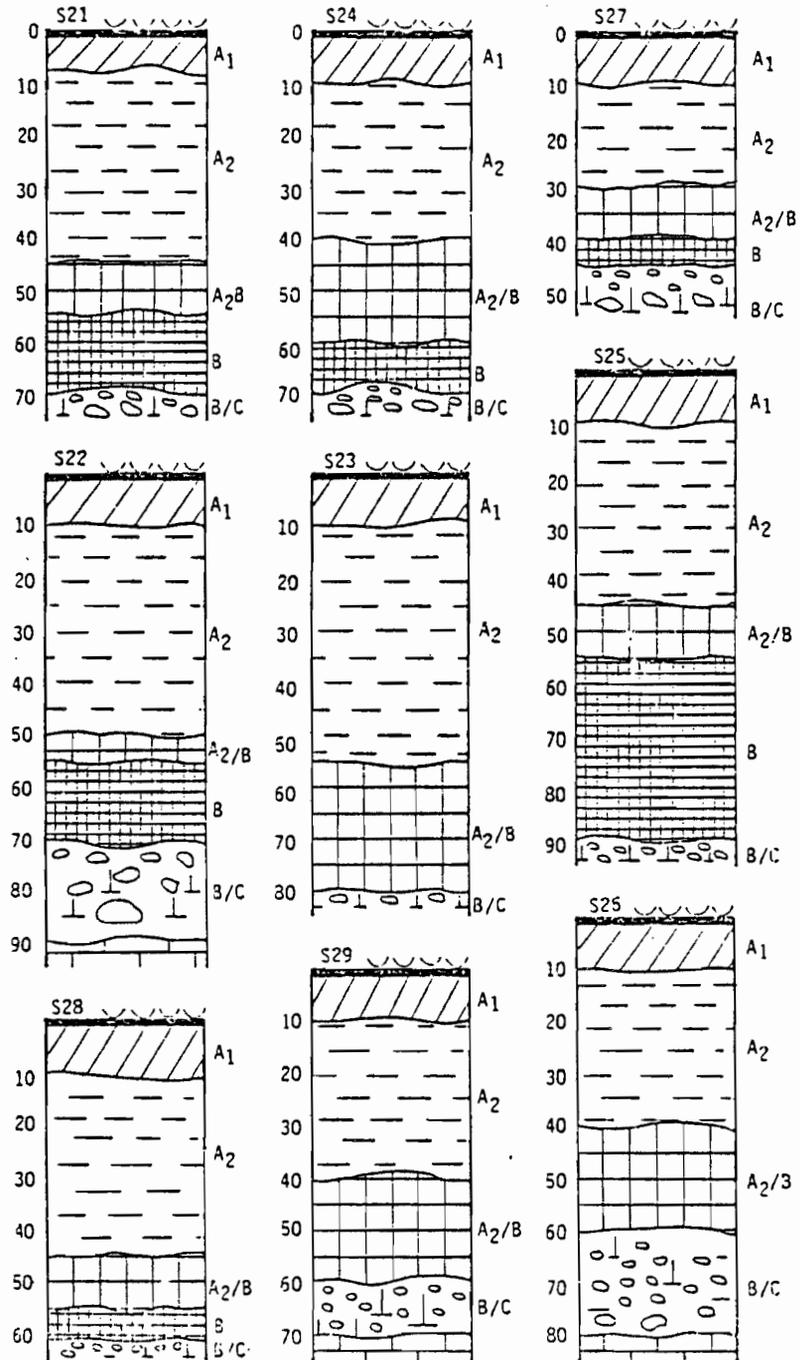


Figure 16 - Profils pédologiques de la station d'étude.

- 2 - Coefficients dépendants des caractéristiques hydrauliques du sol dans la formule de GARDNER; A_{ip} et B_{ip} (Tableau 8, Page 64)
- 3 - Conductivité hydraulique du sol saturé (Tableau 10, Page 98).

4.2.2 - Discussion des résultats

a) flux et bilans

- précipitations au sol (voir Tableau 11)

Les précipitations au sol (P_s) obtenues pour l'ensemble du Gros-Fouteau pendant les trois années d'études s'élèvent à 71 % des précipitations incidentes (P_i); elles sont sensiblement plus importantes lors de la phénophase sans feuilles (77 % de P_i) que lors de la phase feuillée (65 % de P_i), soit 11 % de différence. En supposant un régime des P_i similaire, cette différence s'explique par le changement de recouvrement du sol (CC) par les feuilles, de $CC=0.42$ à $CC=0.92$, évolution du recouvrement parallèle à l'augmentation de la capacité d'interception des couronnes d'arbres ($RE_{min}=0.37$ mm; $RE_{max}=1.61$ mm (hiver) à 2.62 mm (été)).

Nous constatons une variabilité interannuelle du pourcentage de P_i que représente P_s pour une même phénophase, par exemple pour la phase avec feuilles :

- 1983, avec $P_i = 297.30$ mm; $P_s = 58.67$ % de P_i ,
- 1982, avec $P_i = 321.50$ mm; $P_s = 69.46$ % de P_i .

Nous retrouverons le fait que P_s/P_i augmente avec P_i , déjà mentionné par RAPP et IBRAHIM, 1978. Nous pouvons par ailleurs supposer une influence de l'intensité de chaque P_i sur P_s ; cette supposition n'est pas vérifiable puisque nous ne disposons que de mesures de P_s cumulées (semaine, mois). L'influence des divers facteurs météorologiques (la nature des pluies, leurs fréquences, leurs directions, les dimensions des gouttes d'eau, la vitesse du vent, ...) supposerait de suivre chaque pluie individuellement. En ce qui concerne l'influence de la structure du peuplement (voir AUSSÉNAC, 1975 pour une discussion à ce sujet), nous avons supposé que la structure du couvert reste la même d'une année à l'autre; d'autre part le facteur de variabilité de P_s qu'est la position du point de mesure à l'intérieur de la forêt est minimisé par le nombre de pluviomètres employés (64) et par leur disposition au sol (revoir Figure 2). Nos valeurs des précipitations au sol (P_s) sont du même ordre de grandeur que celles obtenues sous chânaie à l'Est de la France par AUSSÉNAC 1975, 1977b ($P_s = 70$ à 80 % P_i - phase sans feuilles; $P_s = 65$ à 70 % P_i - phase avec feuilles), et en Belgique par SCHNOCK 1967, 1968 ($P_s = 73$ à 81 % P_i - phase sans feuilles; $P_s = 66$ à 77 % P_i - phase avec feuilles).

Tableau 11 - Précipitations au sol : valeurs cumulées durant les phénophases sans feuilles et avec feuilles du 29 Janvier 1981 au 16 Décembre 1983; valeurs du tube n° 21 et l'ensemble du peuplement.

Période	Précipitations incidentes(Pi), en mm	Ensemble du peuplement		Tube N°21	
		en mm	en % de Pi	en mm	en% de Pi
1.	2.	3.	4.	5.	6.
29.01.1981 - 23.04.1981	188.70	129.37	68.56	129.41	68.58
06.11.1981 - 25.04.1982	395.20	307.87	77.90	305.60	77.33
18.11.1982 - 19.04.1983	439.80	342.77	77.94	350.12	79.61
18.11.1983 - 16.12.1983	37.90	33.72	88.97	35.15	92.74
Phases sans feuilles	1 061.60	813.73	76.65	820.28	77.27
14.05.1981 - 19.10.1981	513.30	343.65	66.95	349.85	68.16
25.05.1982 - 13.10.1982	321.50	223.30	69.46	210.07	65.34
18.05.1983 - 20.10.1983	297.30	174.44	58.67	173.52	58.36
Phases avec feuilles	1 132.10	741.39	65.49	733.44	64.78
29.01.1981 - 16.12.1983	2 514.30	1 776.22	70.62	1 774.08	70.53

- écoulement le long des troncs (voir Tableau 12)

L'écoulement le long des troncs (EC) mesuré pendant deux années (11 Mars 1982 au 16 Décembre 1983) représente 0,62 % des précipitations incidentes (Pi), calcul qui suppose que toutes les tubes possèdent le même EC (ce qui n'est pas le cas*). Comme pour les précipitations au sol, l'écoulement le long des troncs (EC) est plus important lors de la phase sans feuilles (EC = 1 % Pi) que lors de la phase feuillée (EC = 0,12 % Pi), 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 pluies, phénomène que nous n'avons pas quantifié (pour les mêmes raisons que celles invoquées au sujet des précipitations au sol). Nous constatons seulement (phase sans feuilles), que pour Pi = 37.90 mm avec averses abondantes, EC = 1,41 % Pi (1983), alors que pour Pi = 56.2 mm avec averses peu abondantes EC = 0,33 % Pi (1982). L'écoulement le long des troncs dépend aussi des "réserves utiles" des branches et des troncs**; d'après SCHNOCK (1968) il faut une pluie d'environ 2.5 mm pour que l'on observe un début d'écoulement et au-delà, le rapport EC/Pi augmente avec Pi jusqu'à une valeur proche de sa valeur maximale (EC/Pi = 10 à 20 % Pi), correspondant à Pi supérieur à 10 mm***. La capacité de rétention des couronnes d'arbres et de l'écorce des troncs de notre peuplement étant proche de 2.5 mm (= 3.2 mm), et nos valeurs cumulées du pourcentage de Pi que représente EC étant similaires à celles de SCHNOCK 1968, nous avons utilisé pour notre modélisation **** du bilan hydrique sur un pas de temps d'une journée, les valeurs limites mesurées par SCHNOCK, 2.5 et 10 mm.

- interception (voir Tableau 13)

La moyenne de l'interception pour les années 1981, 1982 et 1983, années à régime pluviométrique très différent, s'élève à 28,74 % de Pi, elle est du même ordre que celles observées par AUSSENAC 1975, 1977b (Est de la France, chênaies) et SCHNOCK

* Il existe une corrélation positive entre le pourcentage de Pi que représente l'écoulement le long d'un tronc et les dimensions de l'arbre. Pour l'arbre no 3 (circonférence 1.58 m; surface projetée 61.5 m²) EC = 0.12 % Pi alors que pour l'arbre no 16 (circonférence 1.08 m; surface projetée 12.5 m²) EC = 1.12 % Pi. Nous retrouvons ici les observations de FORD et DEANS (1978).

** Pour notre peuplement RE_{RU} = 2.25 mm; RT_{RU} = 0,95 mm; revoir chapitre 2.1.3.

*** Valeurs avancées également par AUSSENAC 1975 pour une chênaie (Quercus sessiliflora). Par contre RAPP et IBRAHIM, 1978 donnent la valeur de 7 mm, pour un peuplement de Pinus pinea.

**** Revoir la description du modèle chapitre 3.4. Calculs des flux d'eau. L'écoulement le long des troncs, 2^{ème} version

Tableau 12 - Ecoulement le long des troncs : valeurs cumulées
durant les phénophases sans feuilles et avec feuilles
du 11 Mars 1982 au 16 Décembre 1983.

Période	Précipitations incidentes(Pi), en mm	Ecoulement le long des troncs - valeurs moyennes d'arbres N° 3 et N° 16.	
		en mm	en % de Pi
1.	2.	3.	4.
11.03.1982 - 25.04.1982	56.20	0.1853	0.3297
18.11.1982 - 19.04.1983	439.80	4.6254	1.0517
18.11.1983 - 16.12.1983	37.90	0.5346	1.4105
Phases sans feuilles	533.90	5.3453	1.0012
25.05.1982 - 19.09.1982	163.90	0.2022	0.1237
18.05.1983 - 20.10.1983	297.30	0.3491	0.1174
Phases avec feuilles	461.20	0.5513	0.1195
11.03.1982 - 16.12.1983	1 221.60	7.5832	0.6208

° à l'exception de la période du 20 Septembre 1982 au 13 Octobre 1982.

1967, 1968 (en Belgique, chênaies). Nous retrouvons pour l'interception (I_n) l'incidence de l'absence ou de la présence des feuilles constatée pour les précipitations au sol et l'écoulement le long des troncs : I_n/P_i représente en moyenne 22 % en phase défeuillée et 34 % en phase feuillée. Nous constatons une grande variabilité interannuelle pour une même phénophasse; par exemple pour la phase feuillée:

- 1982, avec $P_i = 321.5$ mm, $I_n = 30.4$ % P_i ,
- 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; nous citerons comme illustration de ce phénomène les mesures de RAPP et IBRAHIM, 1978, concernant un peuplement de Pinus pinea:

- jusqu'à 2 mm, $I_n = 100$ % de P_i ,
- jusqu'à 5 mm, $I_n = 50$ % de P_i ,
- entre 5 et 50 mm, $I_n = 50$ à 18 % de P_i ,
- plus que 50 mm. $I_n = 18$ % de P_i : $I_n = f(P_i)$: exponentielle négative, admettant pour asymptote $I_n = 0.18 P_i$.

- transpiration (TR)

Nous rappelons que la méthode du bilan permet d'apprécier directement le volume d'eau transpiré par le peuplement* (TR) lorsque le contenu en eau du sol est inférieur ou égal à la capacité au champ (drainage $DR = 0$), ce qui est le cas pour :

- 1981, du 18 Août au 19 Octobre
- 1982, du 07 Mai au 26 Octobre
- 1983, du 25 Mai au 17 Novembre, soit les périodes avec feuilles.

La figure 19 donne pour l'ensemble du peuplement, les valeurs de la transpiration et du rapport transpiration/demande évaporative de l'atmosphère (TR/ETP).

Du débourrement jusqu'à la chute des feuilles pour 1981, 1982 et 1983, périodes végétatives de 205 jours en moyenne (respectivement 196, 206, 213 jours), le peuplement a transpiré en moyenne de 283 mm d'eau par an, ce qui représente une moyenne journalière de 1.41 mm.j^{-1} ** (valeur calculée à partir

* Nous négligeons l'évaporation de l'eau du sol (ES).

** AMBROS (1978) utilisant la même approche que nous-même pour une chênaie des Carpathes (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^{-1}) avec des précipitations incidentes proches de celles de Fontainebleau, soit 700 à 775 mm/année. ROBERTS (1983) obtient une transpiration annuelle de 320 à 327 mm, pour Quercus sessiliflora.

Tableau 13 - Interception : valeurs cumulées durant les phénophases sans feuilles et avec feuilles du 29 Janvier 1981 au 16 Décembre 1983; valeurs du tube 21 et de l'ensemble du peuplement.

Période	Précipitations incidentes(Pi), en mm	Ensemble du peuplement		Tube n° 21	
		en mm	en % de Pi	en mm	en % de Pi
1.	2.	3.	4.	5.	6.
29.01.1981 - 23.04.1981	188.70	57.44	30.44	57.40	30.42
06.11.1981 - 25.04.1982	395.20	83.38	21.10	85.65	21.67
18.11.1982 - 19.04.1983	439.80	92.63	21.06	85.28	19.39
18.11.1983 - 16.12.1983	37.90	3.80	10.03	2.37	6.25
Phases sans feuilles	1 061.60	237.25	22.35	230.70	21.73
14.05.1981 - 19.10.1981	513.30	169.03	32.93	162.63	31.72
25.05.1982 - 13.10.1982	321.50	97.81	30.42	111.04	34.54
18.05.1983 - 20.10.1983	297.30	122.50	41.21	123.54	41.55
Phases avec feuilles	1 132.10	389.35	34.39	397.30	35.09
29.01.1981 - 16.12.1983	2 514.30	722.49	28.74	724.63	28.82

des cumuls sur la saison). Compte tenu de la périodicité de nos mesures, à partir des valeurs cumulées sur environ 7 jours, nous obtenons des valeurs moyennes journalières minimales et maximales de respectivement 1.48 et 3.40 mm.j^{-1} , et ce, pour les mois de Juillet, Août, et pour les deux premières décades de Septembre, alors qu'il n'y a pas de contrainte hydrique (stock d'eau du sol supérieur à 70 % de RCC). LADEFOGED, in AUSSENAC (1977a), estime la transpiration journalière de Quercus petraea, sans contrainte hydrique, à 3.31 mm.j^{-1} (méthode de mesure et de calcul non précisée).

La transpiration évolue depuis la 3^{ème} décade de Mai qui a suivi l'arrêt d'accroissement en surface des feuilles jusqu'au début Juillet de la façon suivante:

- Mai : 3^{ème} décade TR = 1.05 mm.j^{-1} ,
- Juin : 1^{ère} décade TR = 2.72 mm.j^{-1} ,
2^{ème} décade TR = 1.72 mm.j^{-1} ,
3^{ème} décade TR = 2.48 mm.j^{-1} ,
- Juillet : début TR = 3.19 mm.j^{-1} .

La transpiration augmente de la fin Mai au début Juillet. 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). Soulignons d'abord que le rapport TR/ETP n'a pu être suivi durant la phase d'accroissement en surface des feuilles; pour toute la période végétative, alors que les surfaces foliaires sont maximales, nous pouvons comprendre les variations du rapport TR/ETP comme suit:

1) variations du rapport TR/ETP lorsque le déficit* hydrique est négligeable ou faible (voir Figure 18). Avec une bonne disponibilité en eau sur toute la profondeur du profil et avec une ETP favorisant la transpiration ($ETP = 4.3 \text{ mm.j}^{-1}$), le rapport TR/ETP augmente du jour correspondant à la fin d'accroissement en surface des feuilles (18 Mai, $TR/ETP=0.44$) jusqu'au début du mois de Juillet (5 Juillet $TR/ETP=0.83$) pour ensuite rester plus ou moins constant. RAUNER (1976)

* d'après RUTTER (1968) :

- déficit hydrique négligeable ou faible si la réserve est supérieure à 50 % de RP ,
- déficit hydrique modéré si elle est inférieure à 50 % de RP
- déficit hydrique sévère si on atteint le point de flétrissement pendant au moins 30 jours.

obtient un rapport TR/ETP égal à 0.68 pour une chênaie d'environ 120 ans, valeur que nous supposons être une valeur moyenne (les variations de TR/ETP ne sont pas précisées); nous retiendrons que 0.68 est une valeur proche de notre rapport

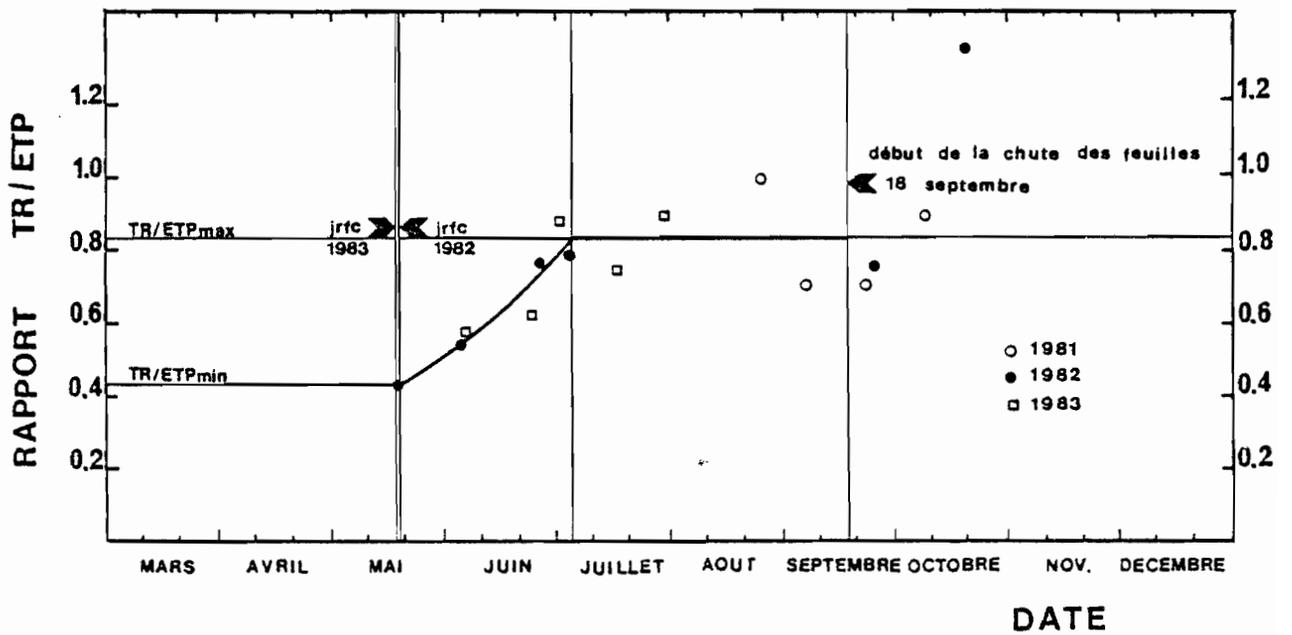


Figure 18 - Evolution du rapport TR/ETP en période de déficit hydrique négligeable ou faible. Valeurs moyennes pour l'ensemble du peuplement durant les années 1981, 1982 et 1983.

TR/ETP=0.83. L'augmentation du rapport TR/ETP qui s'effectue pendant 48 jours, ne peut donc s'expliquer que par une modification des caractéristiques physiologiques de Quercus petraea durant cette période, et en particulier, par l'évolution du comportement des stomates. Celui-ci a fait l'objet de mesures dont nous discuterons les résultats plus loin.

2) variations du rapport TR/ETP lorsque le déficit hydrique est modéré ou sévère.

Nous commencerons par commenter l'évolution du stock d'eau du sol pour l'ensemble du peuplement pendant 1981, 1982 et 1983.

- 1981 (voir Figure 19) est une année humide (1085 mm, soit 51 % de plus que la moyenne annuelle de 101 ans) avec une période légèrement déficitaire en précipitations du 10 août au 20 septembre, qui a provoqué une brève période de faible déficit hydrique : le stock d'eau du sol est passé de 71.13 % à 64.14 % de RCC, et le rapport TR/ETP de 0.70 (03 au 09 septembre) à 0.52 (10 au 17 septembre).

- En 1982 (Figure 19) les précipitations sont légèrement supérieures à la moyenne (10 % de plus) mais pendant la phase feuillée, elles sont inférieures de 20 % à la moyenne; notons un mois d'avril particulièrement sec (précipitations inférieures de 80 % à la moyenne); ainsi pendant toute la phase feuillée le stock d'eau du sol est resté inférieur à sa capacité au champ; à partir de la 2^{ème} décennie de juillet le stock d'eau du profil diminue de 69,6 % des RCC (01 au 07 juillet) jusqu'à 38,8 % de RCC (12 au 19 septembre), valeur proche du point de flétrissement permanent (RPFP=36.95 % de RCC), cette évolution est parallèle à la chute du rapport TR/ETP de 0.79 à 0.2.

- En 1983 (Figure 19), année proche de la moyenne (744.40 mm, la moyenne étant de 720.41 mm); la période allant du mois d'août jusqu'à la fin de l'année est fortement déficitaire en précipitations (54 % de moins que la moyenne), le stock d'eau du sol passe de 62.73 % de RCC (20 au 26 juillet) à 38.30 % de RCC (10 au 17 novembre), et dans le même temps le rapport TR/ETP de 0.77 à 0.2.

Nos résultats illustrent la corrélation existant entre l'épuisement du stock d'eau du sol et la diminution du rapport TR/ETP, phénomène qui se manifeste en moyenne à partir de la mi-juillet jusqu'à la mi-septembre, sachant par ailleurs que durant cette période les conditions climatiques favorisent la transpiration. En analysant l'évolution du rapport TR/ETP en fonction de RP (voir Figure 20) nous pouvons observer que le rapport TR/ETP reste sensiblement constant de la capacité au champ jusqu'à une valeur critique de RP correspondant à 45 à 55 % de RP_{RU} puis en-deçà de ce seuil, le rapport TR/ETP diminue jusqu'à s'annuler pour $RP = RP_{RFP}$. RAUNER (1976) pour une chênaie de 40-50 ans sur chernozem obtient une relation similaire, mais avec un seuil critique qui se situe à 31 à 44 % de RP_{RU} (ETP calculée avec la méthode du bilan énergétique).

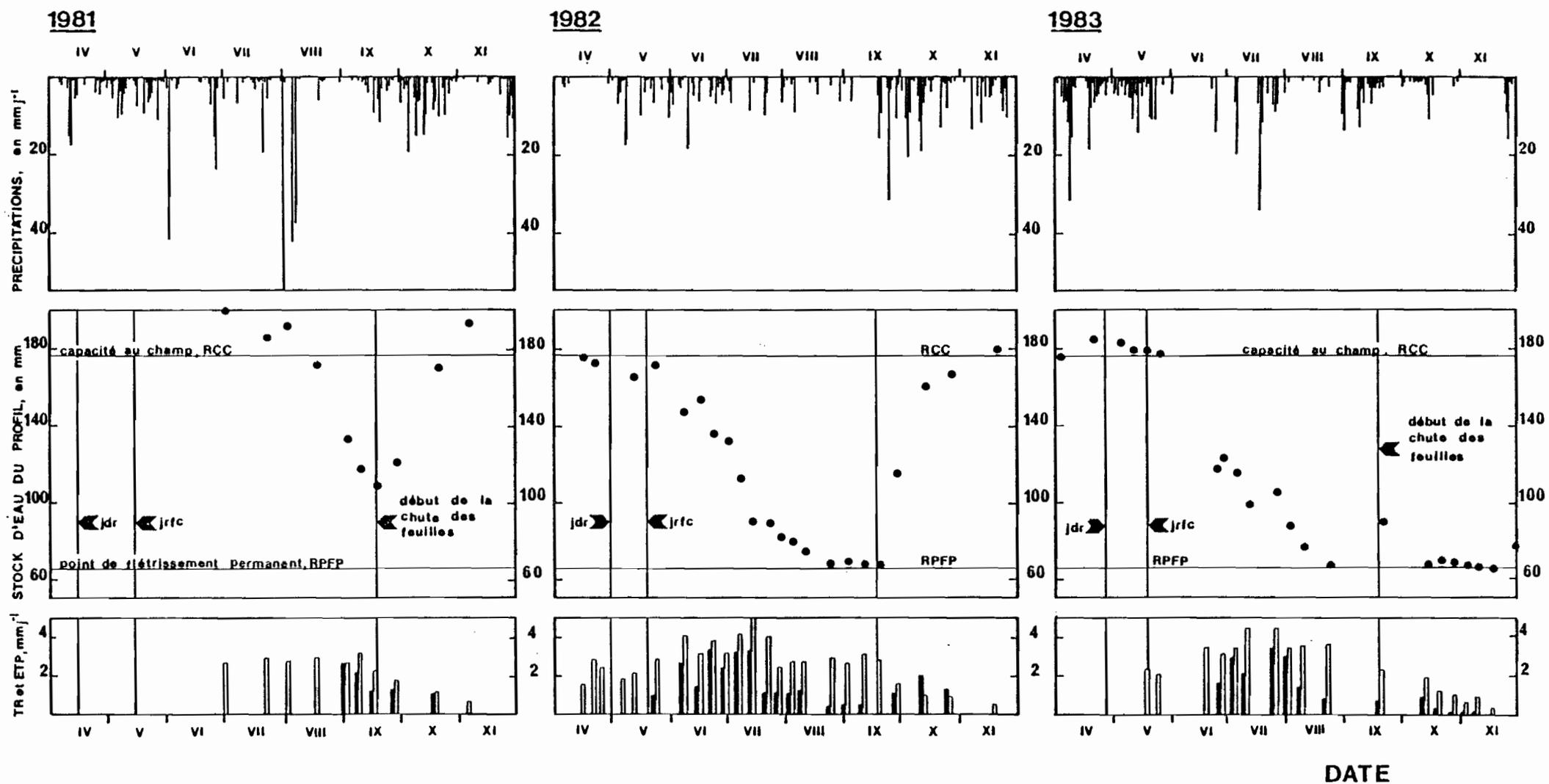


Figure 19 - Evolution de la réserve en eau du sol (RP). Valeurs moyennes pour l'ensemble du peuplement durant les années 1981, 1982 et 1983.

AUSSENAC et GARNIER (1984) (Pseudotsuga menziesii), utilisant les mêmes méthodes de calcul de TR et ETP que nous, observent une première phase de diminution rapide du rapport TR/ETP de la capacité au champ jusqu'à 67 % de RP_{RU} puis une seconde phase de diminution plus lente en-deçà de 67 % de RP_{RU} , qu'ils interprètent comme une conséquence de la régulation stomatique de Pseudotsuga menziesii. Ainsi nos propres résultats, ceux d'AUSSENAC et GARNIER (1984) et de RAUNER (1976) laissent supposer différents types de réponse en fonction de l'espèce.

b) paramètres morpho-physiologiques

- résistance stomatique/potentiel hydrique des feuilles (voir Figure 21), qui montre l'évolution dans le temps de ces deux paramètres). Lorsque une feuille se dessèche, son potentiel hydrique (Ψ_f) atteint un seuil (le potentiel hydrique foliaire critique Ψ_{flim}) pour lequel les stomates commencent à se fermer. Dans notre cas (voir Figure 21) le potentiel hydrique foliaire limite est d'environ - 16 bars. Il varie selon l'espèce (HSIAO, 1973) et se situe entre - 13 et - 25 bars pour les espèces arborescentes (FEDERER, 1977). Notre valeur - 16 bars est proche de celle mentionnée par AUSSENAC et LEVY (1983) pour Quercus pedunculata (- 14 bars).

1) Comportement stomatique en absence de déficit hydrique.

Le tableau 14 et figure 22 illustrent les variations (année 1983) de la résistance stomatique minimale du jour du débourrement (26 Avril) jusqu'au moment de la sénescence des feuilles (21 Septembre). Les mesures* ont débuté le 6 mai, soit 11 jours après le débourrement, la r_{smin} est alors voisine de 7.92 s.cm^{-1} (N=16; s=0.95) pour une surface foliaire de 21.1 % de sa surface maximale. L'accroissement en surface des feuilles s'accompagne d'une diminution rapide de r_{smin} (Figure 22); r_{smin} est égale à 2.48 s.cm^{-1} (N=25; s=0.40) lorsque la surface foliaire est maximale (18 mai). Par la suite pendant la 3^{ème} décennie de mai et pendant juin, la résistance stomatique minimale continue à diminuer alors que la surface foliaire est maximale, pour arriver à sa valeur minimum-minimorum de 1.44 s.cm^{-1} (N=5; s=0.14), le 06 juillet. Après cette date les valeurs de r_{smin} augmentent de 1.44 jusqu'à 2.80 s.cm^{-1} (N=6; s=0.12) le 21 septembre, début de la sénescence des feuilles; nous avons aussi une valeur de r_{smin} lorsque $LAI = 73 \% LAI_{max}$: 3.68 s.cm^{-1} le 26 octobre.

La variation saisonnière de la résistance stomatique minimale (r_{smin}) lors des différentes phénophases est un phénomène général, constaté par FEDERER (1977), sur de nombreuses espèces arborescentes caducifoliées. TURNER et HEICHEL (1977) étudiant l'évolution de la résistance stomatique

* mesures de r_s sur des feuilles portées par des branches à environ 2 m du sol.

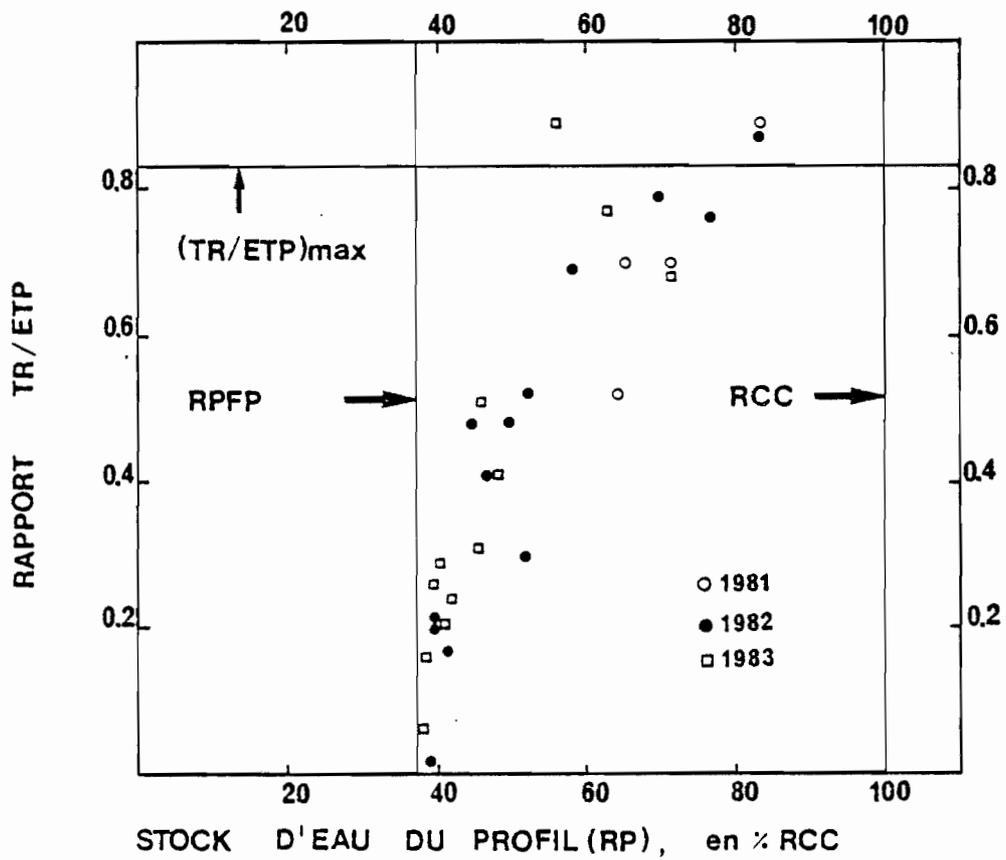


Figure 20 - Evolution du rapport TR/ETP en fonction de la réserve en eau du sol. Valeurs moyennes pour l'ensemble du peuplement durant les années 1981, 1982 et 1983.

minimale de Quercus rubra obtient les résultats suivants* :

a) après le débourrement (06 mai):

- 3 à 7 jours (du 09 au 13 mai), $r_{smin} = 18$ à 20 s.cm^{-1} ;
- 12 à 14 jours (du 18 au 20 mai), $r_{smin} = 15 \text{ s.cm}^{-1}$;
- 34 jours (09 juin: $LAI=100 \% LAI_{max}$), $r_{smin}=7.5 \text{ s.cm}^{-1}$

b) début de juillet, $r_{smin} = 2$ à 2.5 s.cm^{-1} ;

c) jusqu'au 28 septembre, début de la sénescence des feuilles, $r_{smin} = 2.5$ à 4 s.cm^{-1} ;

d) du 28 septembre au 15 octobre ($LAI=50 \% LAI_{max}$), r_{smin} comprise entre 4 et 35 s.cm^{-1} .

Nous retrouvons chez Quercus petraea le même type d'évolution de la résistance stomatique minimale. Actuellement, il n'y a pas encore d'explication d'ordre physiologique permettant de comprendre l'augmentation de conductance stomatique au stade juvénile, lors de l'accroissement en surface des feuilles (TURNER et HEICHEL, 1977) et plusieurs semaines après. Ensuite, à l'état de "maturité fonctionnelle", l'augmentation de r_{smin} pourrait être une conséquence de la fermeture progressive des cavités stomatiques par des dépôts de cire (TURNER et HEICHEL, 1977) et de l'accumulation progressive d'acide abscissique dans les cellules conduisant à leur sénescence (MILBORROW, 1974). Nous obtenons le même type d'évolution de r_{smin} que TURNER et HEICHEL (1977), mais nos valeurs sont toutes systématiquement plus faibles (d'un facteur de 2 environ). De même, si l'on compare nos données avec celles d'AUSSENAC et LEVY (1983) (Quercus pedunculata) et de FEDERER (1977) (28 espèces étudiées) qui ont mesuré la résistance stomatique minimale alors que les stomates sont dans leur état de "maturité fonctionnelle", nos valeurs sont encore deux fois inférieures à celles de ces auteurs : 3 à 5 s.cm^{-1} au début de Juillet pour AUSSENAC et LEVY (1983) et 2.5 à 4.5 s.cm^{-1} pour FEDERER (1977). Notons néanmoins que nous obtenons les mêmes résultats que SMALL (1972) (cinq espèces arborescentes), soit 1.3 à 3.0 s.cm^{-1} . Les résultats de SMALL (1972) ont été fortement contestés par FEDERER (1977) qui a effectué ses mesures dans des conditions édaphiques et météorologiques similaires pour chacune des 28 espèces qu'il a étudié, et avec un déficit de saturation de l'air constant, égal à 15 mbars. Ainsi,

* Caractéristiques de ce peuplement et détail de mesures :

- 1) hauteur du peuplement : $h = 8 \text{ m}$;
- 2) âge : 8 ans;
- 3) r_{smin} obtenue par mesures sur toute la hauteur des couronnes d'arbres (échafaudage);
- 4) r_{smin} mesurée in situ et en conditions contrôlées lorsque le rayonnement global n'est pas facteur limitant pour l'ouverture des stomates (supérieur à $0.2 \text{ cal.cm}^{-2}.\text{min}^{-1}$). Les valeurs citées dans le texte ont été obtenues avec un rayonnement global $R_g > 0.5 \text{ cal.cm}^{-2}.\text{min}^{-1}$.

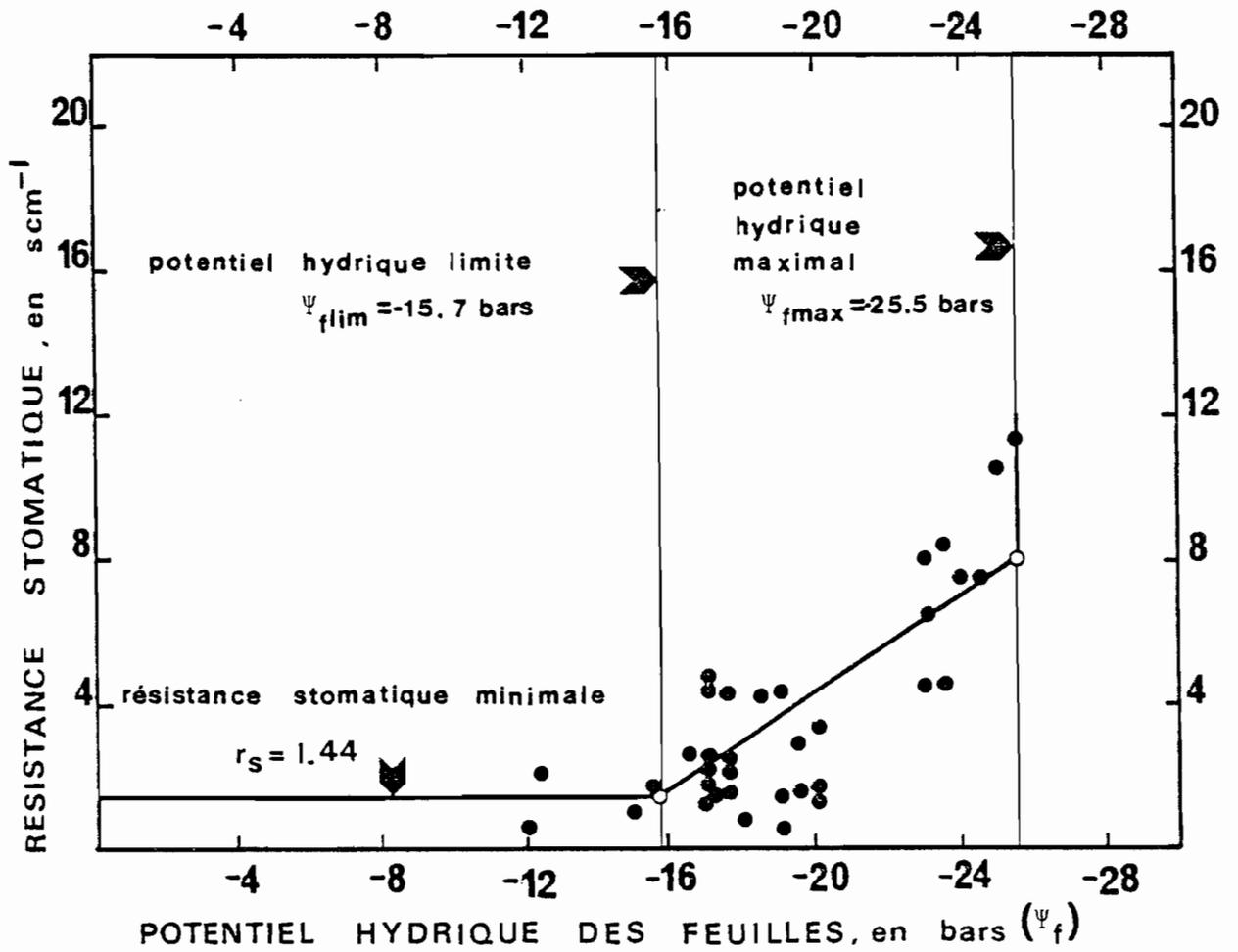


Figure 21 - Relation entre le potentiel hydrique des feuilles (ψ_f) et la résistance stomatique moyenne (r_s) en phase de régulation stomatique.

l'approche quantitative de l'évolution de r_{smin} nécessite d'approfondir plusieurs aspects méthodologiques :

- 1) l'étude de la fiabilité du poromètre à diffusion utilisé en milieu naturel pour les espèces arborescentes;
- 2) l'étalonnage de l'appareil;
- 3) l'échantillonnage des feuilles, soit la prise en compte :
 - du nombre minimum de feuilles à étudier;
 - du choix de la position des feuilles dans la couronne d'arbre compte tenu des gradients de déficit de saturation de l'air, du rayonnement, de la vitesse du vent à l'intérieur d'une couronne d'arbre;
 - de la variabilité inter-individuelle (LEVERENZ et al., 1982; HELLKVIST et al., 1975);
- 4) l'étude de la morphologie des stomates lors de la phase d'accroissement en surface des feuilles (TURNER et HEICHEL, 1977).

Toutes ces remarques laissent supposer que nos résultats n'ont qu'une valeur qualitative. Lors de la période végétative 1982 ($r_{smin}=0.4 \text{ s.cm}^{-1}$), nous avons déjà obtenu des résultats fortement sousestimés, et ce, probablement à cause de l'écart de température entre la feuille et la chambre pendant les mesures; ainsi en 1983, nous avons appliqué les consignes de KATERJI et OULID-AISSA (1983) pour l'utilisation du poromètre à diffusion "MK II" (protection de la pince contre le rayonnement).

L'étude de la régulation stomatique permet d'approcher le processus de transpiration, directement contrôlé par le comportement stomatique. La figure 23 illustre l'évolution parallèle de la résistance stomatique minimale (r_{smin}) et du rapport TR/ETP. Le rapport TR/ETP dépend aussi de facteurs autres que la résistance stomatique minimale* puisque sa variation entre le 18 mai et début juillet est plus forte que la variation de r_{smin} .

Selon FEDERER (1977), l'évolution du rapport TR/ETP pourrait être dépendante de l'évolution des résistances sur l'ensemble du trajet racines-cavités sous-stomatiques, ainsi que des changements dans le temps de la résistance de la couche limite de la feuille.

* valable pour la période du 17 mai au 06 juillet, pour laquelle ces deux paramètres ont été mesurés en même temps.

Tableau 14 - Ensemble des valeurs de la résistance stomatique minimale du jour du débourrement (26 Avril 1983) jusqu'au début de la sénescence des feuilles (21 Septembre 1983).

Date	Indice foliaire (LAI) en % de LAImax	Résistance stomatique minimale (r_{smin}) en $s\ cm^{-1}$	Réserve en eau du sol (RP) en % de RCC
06. Mai 1983	27.11	7.92 \pm 0.95 (N= 16)	103.5
10. Mai 1983	44.58	3.57 \pm 0.43 (N= 16)	102.6
17. Mai 1983	86.55	2.48 \pm 0.40 (N= 25)	102.6
29. Juin 1983	100.00	1.63 \pm 0.14 (N= 6)	70.1
06. Juillet 1983	100.00	1.44 \pm 0.14 (N= 6)	65.2
20. Juillet 1983	100.00	1.85 \pm 0.42 (N= 7)	58.7
21. Septembre 1983	99.84	2.80 \pm 0.12 (N= 6)	51.9

2) Réponse stomatique au déficit hydrique

Nous avons représenté dans la figure 21 la variation de la résistance stomatique moyenne à la vapeur d'eau en fonction du potentiel hydrique des feuilles. Les points de mesures ont été obtenus durant la phase végétative 1983, à partir du 06 juillet, date de la "maturité fonctionnelle" supposée des stomates. Nous pouvons distinguer trois phases:

1. la résistance stomatique minimale est constante et égale à $r_{smin} = 1.44 \text{ s.cm}^{-1}$ pour les potentiels hydriques foliaires inférieurs ou égaux au potentiel foliaire hydrique limite ($\Psi_{flim} = -15.67 \text{ bars}$).
2. la phase de régulation stomatique : pour les potentiels hydriques foliaires de -15.67 à -25.5 bars^* , la résistance évolue d'après la relation suivante :
$$r_s = 0,66 |\Psi_f| - 8,97 \quad (\text{s.cm}^{-1}) \quad (4.1)$$
3. la phase de fermeture maximale des stomates : c'est au-delà de -25.5 bars qu'il y a fermeture stomatique, ce qui correspond à des résistances stomatiques moyennes supérieures ou égales à 7.89 s.cm^{-1} , valeur calculée, obtenue en supposant que la phase de régulation stomatique (2^{ème} phase) est un phénomène linéaire.

La relation entre le potentiel hydrique foliaire et la résistance stomatique moyenne pendant les 2^{ème} et 3^{ème} phases est en fait une fonction exponentielle (RITCHIE et HEICHEL, 1975); mais, compte tenu de la dispersion de nos points expérimentaux et du fait que nous appliquons la résolution numérique de ROSE et al. (1976) pour estimer le potentiel hydrique des feuilles (chapitre 3.3.4.), nous supposons que les 2^{ème} et 3^{ème} phases sont deux phénomènes linéaires:

- 2^{ème} phase: équation 4.1 ci-dessus, pour $\Psi_{flim} < \Psi_f < \Psi_{fmax}$;

- 3^{ème} phase: $8 < r_s < 11 \text{ (s.cm}^{-1}\text{)}$, pour $\Psi_f < -25,5 \text{ bars}$; la valeur $r_s = 8 \text{ s.cm}^{-1}$ représente l'intersection entre ces deux fonctions linéaires; sachant par ailleurs qu'AUSSENAC et LEVY (1983) ont obtenu expérimentalement une résistance stomatique maximale de 30 s.cm^{-1} (*Quercus pedunculata*) nous retenons $r_s = 11.36 \text{ s.cm}^{-1}$ comme résistance stomatique moyenne maximale dans notre modèle.

* potentiel hydrique des feuilles maximal (Ψ_{fmax}), mesuré le 20 juillet 1983 avec une résistance stomatique $r_s = 11.36 \text{ s.cm}^{-1}$, valeur maximale de la résistance stomatique, observée sur la station d'études.

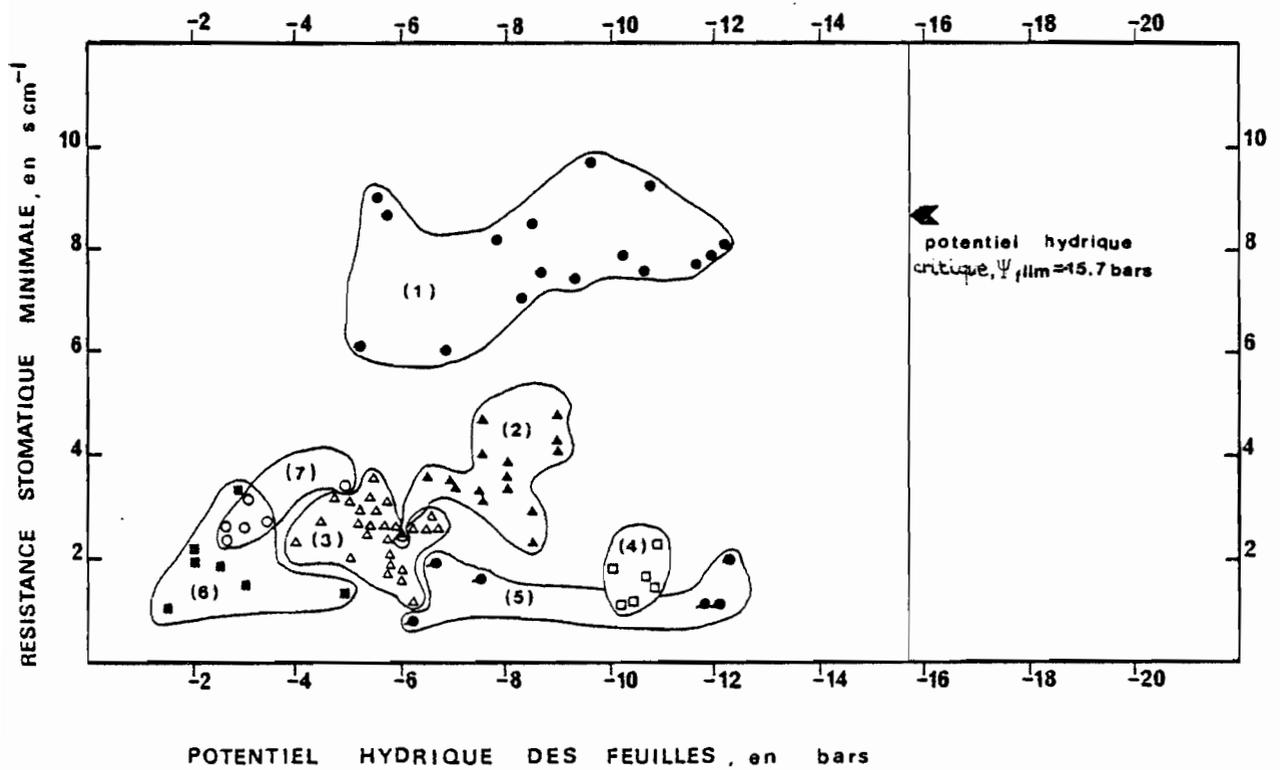


Figure 22 - Ensemble des valeurs de la résistance stomatique minimale, du jour du débourrement (26 Avril 1983) jusqu'au début de la sénescence des feuilles (21 Septembre 1983).

- système racinaire

Le système racinaire de Quercus petraea comporte un ou plusieurs pivots qui se ramifient au contact de la dalle calcaire* (entre 0.5 et 1.5 m de profondeur). Les variations de biomasse racinaire et de longueur par unité de volume (Figure 8) en fonction de la profondeur sont les suivantes : très élevées dans l'horizon A₁, les biomasse et longueur par unité de volume décroissent dans l'horizon A₂, cette diminution étant plus accentuée pour la longueur que pour la biomasse. Puis ces deux grandeurs réaugmentent dans l'horizon B, cet accroissement est plus marqué pour les grosses racines que pour les racines fines :

- Grosses racines : longueur dans B égale 112% longueur dans A₁
247% longueur dans A₂
- Racines fines : longueur dans B égale 64% longueur dans A₁
206% longueur dans A₂.

Nous n'avons par ailleurs pas constaté la présence de racines dans les fissures de la dalle calcaire**. Les diagrammes de longueur et de biomasse par unité de volume sont similaires pour les quatre profils analysés (Figure 8); dans l'horizon B (moyenne des quatre profils) l'accroissement en biomasse est supérieur à l'accroissement en longueur, ce qui suppose une augmentation du diamètre moyen dans chacune des classes de racines analysées. Il existe une corrélation positive entre la longueur de racines par unité de volume présentes dans un horizon et la réserve utile de cet horizon, maximale en A₁, minimale en A₂, intermédiaire en B. Nos observations recoupent celles de FAILLE (1978), PONTAILLER (1979) et LEMEE et FARDJAH (1980) qui ont travaillé sur le même sol mais sur Fagus silvatica.

- Indice foliaire maximal

Nous obtenons un LAI_{max} égal à 4.38*** et ****, valeur proche de celle obtenue par LEMEE (communication personnelle) pour la même espèce, dans la même forêt, mais dans la parcelle no 536 (LAI_{max}=4.26). D'après l'étude de RAUNER (1976) (Quercus robur) concernant l'évolution de LAI_{max} en fonction de l'âge du peuplement, LAI_{max} d'une forêt de 100 à 120 ans est de 4 à 4.5.

- Capacité de rétention des couronnes d'arbres (RE_{max})

La capacité de rétention maximale en eau des couronnes d'arbres (RE_{max}) ou la capacité de saturation en eau maximale des couronnes d'arbres varie avec les phénophases; pour LAI=0,

* absence de racines subhorizontales de grand diamètre.

** observation qui détermine la profondeur du sol exploité par le peuplement et donc les stocks en eau du sol.

*** LAI_{max} (17 janvier 1983) : moyenne = 4.38; s=1.70; n=100.

**** LAI_{max} (16 décembre 1983) : moyenne=4.38; s=0.30; n=10.

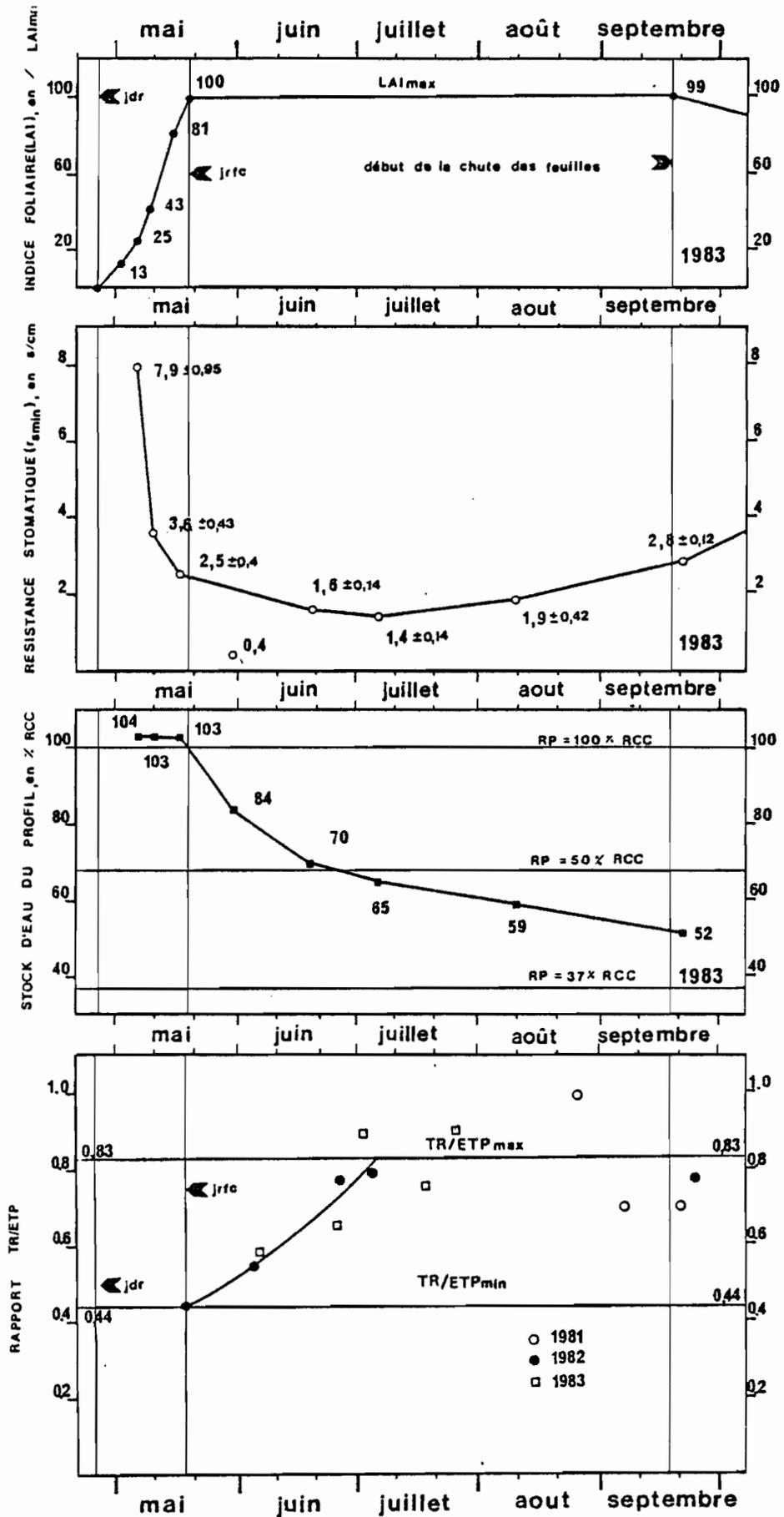


Figure 23 - Evolution dans le temps de l'indice foliaire, de la résistance stomatique minimale, de la réserve en eau du sol et du rapport TR/ETP.

elle s'élève à 1.61 mm, pour LAI_{max} , elle est égale à 2.62 mm. Nos valeurs sont plus élevées que celles de SCHNOCK (1970), respectivement 0.8 mm (hiver) et 1.6 mm (été)*, et correspondent aux valeurs maximales citées par AUSSENAC (1975) qui a étudié RE_{max} de plusieurs espèces arborescentes en fonction de multiples facteurs, âge du peuplement, densité des tiges par ha, recouvrement du sol, etc... : RE_{max} pour des peuplements feuillus avec un recouvrement du sol de 90 % : $RE_{max} = 1.9$ à 2.5 mm (phase feuillée); RE_{max} en phase défeuillée = 0,8 à 1,5 mm.

* Forêt de Quercus robur de 40 à 60 ans.

Tableau 15 - Comparaison entre la photopériode calculée et réelle du jour du débourrement.

Température cumulée, en °C	Photopériode du jour du débourrement, en min.	
	simulée $Y=X/(0.0014082X-0.0241712)$	observée
1.	2.	3.
64.61	967.00	967.00
70.00	940.82	
80.00	904.11	
81.70	899.00	899.00 (10 Mai 1979)
90.00	877.47	
97.90	861.10	859.00 (27 Avril 1978)
98.10	860.72	865.00 (29 Avril 1982)
100.00	857.27	
102.90	852.29	849.00 (24 Avril 1977)
106.00	847.34	852.00 (25 Avril 1983)
110.00	841.42	
114.00	836.00	836.00 (20 Avril 1976)
115.60	833.95	836.00 (20 Avril 1980)
120.00	828.65	
130.00	818.15	
134.50	814.00	815.00 (14 Avril 1981)

COMPARAISON DU MODELE AVEC LES MESURES

5.1 - EVOLUTION DE L'INDICE FOLIAIRE

La simulation de l'évolution annuelle de la surface des feuilles a été effectuée pour les trois années 1981, 1982 et 1983, et nous avons comparé les valeurs simulées et les valeurs mesurées de l'indice foliaire en confrontant :

- deux des dates remarquables* de l'évolution de l'indice foliaire; le jour du débourrement (tableau 15), et le jour de la fin d'accroissement en surface des feuilles (tableau 16).
- l'indice foliaire simulé le jour j avec l'indice foliaire mesuré le jour (j-1)**, lors de la phase d'accroissement en surface des feuilles, pour les années 1981, 1982 et 1983 (Tableau 17 et Figure 24).

1) Les dates remarquables de l'évolution de l'indice foliaire

a) le jour du débourrement

Nous avons commencé par étudier l'influence de la température sur la date de débourrement, pour ensuite l'étudier en relation avec la photopériode. Nous disposons pour cela de nos trois années d'étude 1981, 1982, 1983, mais aussi des observations du jour du débourrement en 1976, 1977, 1978, 1979, 1980 faites par PONTAILLER (communication personnelle). Nous avons d'abord établi une relation entre la date du débourrement et les températures moyennes de l'air à partir du 1^{er} mars. Plus la température de l'air depuis le 1^{er} mars est élevée, plus le débourrement est précoce, nous obtenons ainsi pour nos trois années d'étude :

* La période de mise en place de la surface des feuilles a été décomposée en cinq phases; voir le chapitre "Evolution de la surface des feuilles".

** Les mesures de la surface foliaire ont été effectuées le matin (fin des mesures avant 11 heures); les valeurs des mesures de LAI(j) obtenues le jour j ont été comparées avec les résultats simulés du jour (j-1).

Années - classées par date du débourrement de plus en plus tardive	Date du débourrement	Température moyenne journalière du 1 ^{er} mars jusqu'au débourrement	Somme des températures du 1 ^{er} mars jusqu'au jour du débourrement
1981	14 avril	10,4 °C (44 jours)	455,5
1983	25 avril	7,6 °C (55 jours)	417,3
1982	29 avril	7,9 °C (59 jours)	468,8

* 1982 : année proche de la normale

Mais la somme de températures du 1^{er} mars au débourrement est variable d'une année à l'autre, on n'améliore rien en choisissant une origine plus précoce (1^{er} novembre) ou plus tardive (15 mars). Les résultats de CANNEL et SMITH (1983)* illustrent bien le phénomène: la relation entre la somme des degrés-jours (base 5 °C) du 1^{er} novembre jusqu'au débourrement, est une fonction exponentielle négative du nombre de jours entre le 1^{er} février et le débourrement. Ce "nombre de jours" est en fait une fonction de la photopériode (qui réaugmente à partir du 21 décembre). Nous avons donc cherché à expliquer la date du débourrement à partir d'une somme des degrés-jours donnée, et de la photopériode; c'est en utilisant la somme des degrés-jours pendant les dix jours précédant le débourrement et la photopériode du jour du débourrement que nous avons obtenu la relation la plus satisfaisante : l'augmentation de la photopériode réduit la somme des degrés-jours nécessaire au débourrement (comptée pendant dix jours avant le débourrement) suivant une fonction exponentielle négative (équation 2.35; voir figure 3). Nous illustrerons cette relation à l'aide des données relatives aux huit années qui offrent des comportements extrêmes parmi nos données disponibles :

* Picea sitchensis de 2 à 10 ans; le jour du débourrement a lieu lorsque 50 % des bourgeons sont au stade b3; la précision d'approche est de 2 à 7 jours.

Années	Jour du débourrement	Somme des degrés-jours pendant les dix jours précédant le débourrement	Photopériode du jour du débourrement
Année à débourrement le plus précoce, 1981	14 Avril	135 degrés-jours	815 min.
Année à débourrement le plus tardif, 1979	10 Mai	82 degrés-jours	899 min.

Ce modèle empirique de prévision de la date de débourrement présente deux valeurs limites propres à l'espèce; l'équation 2.35 admet une première asymptote (somme théorique des degrés-jours pendant dix jours avant le débourrement) tendant vers l'infini $1/C_3$ (min.) qui fixe la photopériode limite en-deçà de laquelle il ne peut y avoir débourrement, cette valeur asymptotique de 711 min., photopériode du 16 Mars reste évidemment théorique (température moyenne journalière pendant dix jours correspondant à 11,2 °C). D'après la deuxième asymptote (photopériode théorique tendant vers l'infini), le débourrement ne pourrait avoir lieu si la température moyenne journalière pendant les dix jours précédant le débourrement est supérieure à 2.5 °C, mais cette valeur théorique ne nous intéresse pas puisque, compte tenu de la position géographique de la station d'étude (long. 48°26' N, lat. 2°41' E, alt. 136 m), la photopériode maximale est de 967 min., valeur du 17 juin, et à cette date correspond une somme des degrés-jours de 65, soit 6,5 °C pendant dix jours précédant le débourrement le plus tardif possible. A partir de nos points expérimentaux et des données disponibles (six années), nous avons calculé la moyenne des températures moyennes journalières des dix jours ayant précédé le débourrement, nous obtenons 10,6 °C par jour; or BRAUN (1983), étudiant sur plusieurs espèces caducifoliées* la période dite "d'activation" précédant le débourrement et pendant laquelle il y a absorption d'eau, détermine une température moyenne journalière de l'air lors de cette période "d'activation" de 12 °C, valeur proche de nos 10.6 °C. Sachant que l'étude de BRAUN a eu lieu sous un climat et une latitude proches des nôtres, ces valeurs de 10.6 °C et 12 °C pourraient rendre compte d'une adaptation de ces espèces caducifoliées aux températures les plus fréquentes au début du printemps.

* arbres de huit ans: Acer pseudoplatanus (h=5.4 m), Betula pubescens (h=5.1 m) et Prunus avium (h=4.5 m), présentant une absorption de 5 à 7.5 litres pendant une période de 28 à 52 jours avant le jour du débourrement.

Tableau 16 - Comparaison entre la photopériode calculée et réelle du jour de la fin d'accroissement en surface des feuilles.

Température cumulée, en °C	Photopériode du jour de la fin d'accroissement en surface, en min.	
	simulée $Y = -0.2441 X + 982.7731$	observée
1.	2.	3.
190.00	936.39	
199.80	934.00	934.00 (24 Mai 1979)
200.00	933.95	
210.00	931.51	
220.00	929.07	
240.00	926.63	
240.00	924.18	
240.40	924.09	923.00 (19 Mai 1982)
245.70	922.79	921.00 (18 Mai 1978)
250.00	921.74	
258.80	919.60	921.00 (18 Mai 1977)
260.00	919.30	
262.90	918.60	921.00 (18 Mai 1983)
270.00	916.86	
280.00	914.42	
289.70	912.05	910.00 (14 Mai 1981)
290.00	911.98	
297.20	910.22	910.00 (14 Mai 1976)
300.00	909.54	

b) jour de la fin d'accroissement en surface des
feuilles

Nous avons fait le même type d'analyse pour prévoir le jour de la fin d'accroissement en surface des feuilles que lors de la prévision du jour du débourrement :

. analyse de la somme des degrés-jours pendant toute la durée de la mise en place du LAI_{max} , du jour du débourrement jusqu'au jour de la fin d'accroissement en surface des feuilles.

. analyse des photopériodes pendant cette période de croissance foliaire.

Nous disposons toujours des huit années d'observations mentionnées pour l'étude du jour du débourrement. Par exemple, à partir de nos trois années d'observations, nous obtenons :

	<u>1981</u>	<u>1982</u>	<u>1983</u>
- Jour du débourrement	14 avril	25 avril	29 avril
- Jour du $LAI=LAI_{max}$	14 mai	19 mai	18 mai
- Durée de la croissance foliaire (en jours)	31	23	20
- Température moyenne journalière de l'air pendant la croissance foliaire (°C)	9,7	11,4	12,0
- Somme des degrés-jours pendant la période de croissance foliaire*, base 0 °C	289,7	262,0	240,0

Nous constatons d'abord que la durée de croissance foliaire est d'autant plus courte que la température moyenne journalière de l'air pendant la croissance est élevée, la température étant un facteur essentiel du déterminisme de la vitesse de tout phénomène biologique (DURAND, 1967), ici la vitesse de croissance de l'ensemble des feuilles. D'autre part, la somme des degrés-jours nécessaire à la croissance foliaire n'est pas constante, d'après nos données disponibles (huit ans), elle est d'autant plus faible que la température moyenne de l'air pendant la croissance est élevée, phénomène corrélé

* AUSSENAC (1975) utilise la méthode des Q_{10} pour l'étude de la phénologie de six espèces arborescentes.

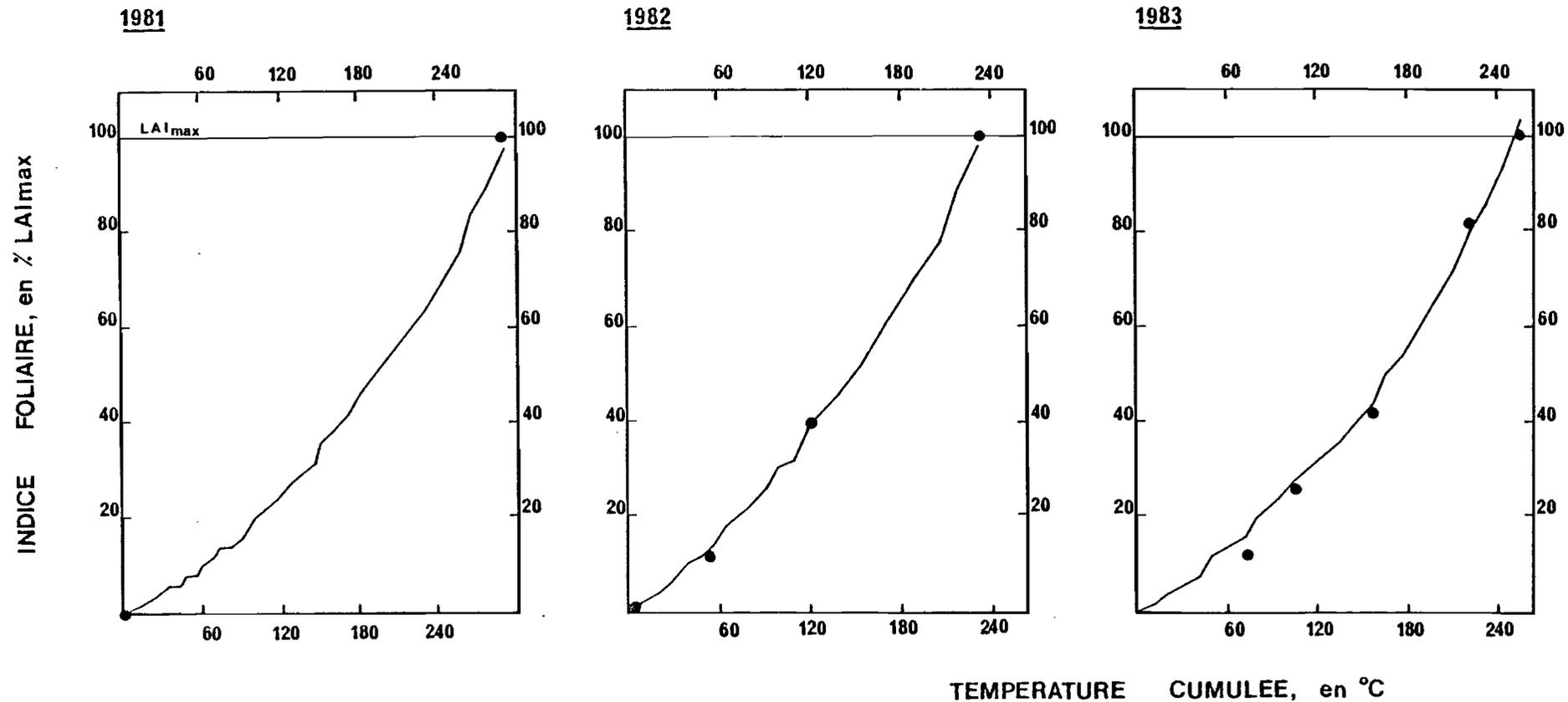


Figure 24 - Comparaison entre les valeurs calculées et simulées de la surface foliaire :

- (1) 1981 - jour du débourrement, le 15 Avril,
- jour de la fin d'accroissement en surface des feuilles, le 14 Mai.
- (2) 1982 - jour du débourrement, le 30 Avril,
- jour de la fin d'accroissement en surface des feuilles, le 19 Mai.
- (3) 1983 - jour du débourrement, le 26 Avril,
- jour de la fin d'accroissement en surface des feuilles, le 18 Mai.

statistiquement à une date de débourrement de plus en plus tardive et donc à des photopériodes de croissance de plus en plus élevées. Ainsi, l'augmentation de la photopériode réduit la somme des degrés-jours nécessaire au plein développement des feuilles suivant une fonction linéaire (équation 2.36 - somme des degrés-jours pendant la croissance foliaire: f (photopériode du jour de la fin d'accroissement en surface des feuilles) - voir figure 5). Nous mentionnerons comme exemple les deux années offrant un comportement extrême parmi nos données disponibles:

- . en 1976, le LAI_{max} est atteint le 14 mai avec une somme des degrés-jours de 297.2, et une photopériode du 14 Mai de 910 min.
- . en 1979, le LAI_{max} est atteint le 24 mai avec une somme des degrés-jours de 199.8, et une photopériode du 24 mai de 934 min.

2) Comparaison des valeurs simulées et des valeurs mesurées de l'indice foliaire.

La mise au point de tout modèle suppose deux phases distinctes : la calibration (ajustement du modèle aux points expérimentaux) et la validation. Dans ce sous-modèle, comme dans les autres sous-modèles on ne pourra parler que de calibration, la validation d'un modèle ne pouvant se faire qu'avec des variables d'entrée et des paramètres du milieu autres que ceux qui ont servi à construire le modèle (WIGAN, 1972).

L'accord entre ce sous-modèle* et les mesures est satisfaisant. On remarque toutefois que le modèle surestime systématiquement la surface foliaire en début de croissance et la sous-estime en fin de croissance. Ceci provient de la relation linéaire utilisée entre vitesse de croissance de surface foliaire et somme des températures : la relation réelle est certainement de type sigmoïdal.

Rappelons que la population de Quercus petraea que nous avons étudiée en vue du modèle est composée d'individus d'âge semblable, et que nos échantillons (nombre d'individus, $N_a=5$; nombre de feuilles, $N_f=240$ en 1982 et $N_f=150$ en 1983) sont de petite taille; ainsi, sachant que la phénologie est un facteur essentiel dans le bilan hydrique, mais aussi dans le bilan énergétique d'un couvert caducifolié, une amélioration de la calibration supposerait:

- de suivre les températures dans l'environnement immédiat des arbres observés.

* voir chapitre "Indice foliaire".

Tableau 17 - Comparaison entre les valeurs calculées et mesurées de la surface foliaire durant les années 1981, 1982 et 1983.

Date	Température, en °C		Surface foliaire, en % de LA _{max}	
	moyenne de l'air	cumulée	simulée	mesurée
15 Avril 1981	13.9	13.9	2.06	0.00
14. Mai 1981	11.4	289.7	97.17	100.00
30. Avril 1982	9.2	9.2	1.97	0.81
04. Mai 1982	9.8	49.1	11.78	13.68
12. Mai 1982	14.6	125.1	39.26	38.67
19. Mai 1982	15.8	240.4	98.17	100.00
26. Avril 1983	9.9	9.9	1.91	0.00
02. Mai 1983	9.3	72.6	16.29	13.00
05. Mai 1983	13.6	109.7	27.11	25.30
09. Mai 1983	10.3	160.3	44.58	42.53
15. Mai 1983	12.8	227.2	79.48	81.00
18. Mai 1983	10.9	262.9	103.87	100.00

- d'étudier aussi bien l'influence de la température moyenne journalière de l'air que celle des minima et des maxima journaliers.
- de suivre d'autres facteurs susceptibles d'influencer la phénologie (éclairage).
- d'améliorer l'échantillonnage dans le but d'intégrer la variabilité réelle inter-feuille et inter-individuelle.

Par la suite la validation du modèle nécessiterait de le tester avec des données concernant d'autres populations de Quercus petraea, puis d'autres espèces arborescentes caducifoliées.

L'intérêt d'un tel modèle réside dans la simplicité des variables d'entrée (température moyenne de l'air, photopériode) et sa facilité d'application (HALLDIN et al., 1985; CHASSAGNEUX et CHOISNEL, 1986).

5.2 - INTERCEPTION ET PRECIPITATIONS AU SOL.

La simulation de l'interception et des précipitations au sol pour 1981, 1982 et 1983 existe en deux versions, dépendant de l'estimation de l'écoulement le long des troncs. La deuxième version rendant mieux compte de la réalité des processus d'interception, c'est elle qui figure dans le modèle général; nous expliquerons par la suite en quoi cette deuxième version représente une modélisation plus proche de la réalité que la première. Nous comparerons les valeurs simulées et les valeurs mesurées en confrontant :

- les valeurs de P_s mesurées et les valeurs simulées lors des différentes phénophases: lorsque $LAI=LAI_{max}$ ou $LAI = 0$ ou pour l'ensemble des phénophases (intermédiaires comprises) sur toute la période d'étude, du 29 janvier 1981 au 16 décembre 1983;
- les relevés des précipitations au sol avec les précipitations au sol simulées cumulées sur des périodes comparables, à savoir une semaine lors de la phase feuillée ($LAI > 0$) et trente à cinquante jours lors de la phase défeuillée ($LAI=0$)*.

Dans ces deux types de comparaisons, les variables d'entrée, à savoir les précipitations incidentes sont les précipitations incidentes journalières obtenues à la station météorologique de Fontainebleau-Ville. Ces précipitations incidentes journalières ont été cumulées sur les périodes

* les mesures de P_s ont été effectuées avant midi le jour j , elles sont comparées aux valeurs simulées de P_s du jour $j-1$, exceptionnellement du jour j si la pluie avait lieu avant ou pendant les mesures.

Tableau 18 - Comparaison entre les valeurs simulées et calculées des précipitations au sol : valeurs cumulées durant les phases sans feuilles et avec feuilles du 29 Janvier 1981 au 16 Décembre 1983. Ensemble du groupement.

Date	Précipitations incidentes (Pi) en mm	Précipitations au sol (Ps), en mm				Ps _{simulées} - Ps _{mesurées}	
		mesurées (Ps _{mesurées}) ^x		simulées (Ps _{simulées}) ^{xx}		en mm	en % de P1
		en mm	en % de P1	en mm	en % de P1		
<u>Ensemble du peuplement</u>							
29.01.1981-23.04.1981	188.7	129.37	68.56	140.16	74.28	10.79	5.72
06.11.1981-25.04.1982	395.2	307.87	77.90	311.46	78.82	3.59	0.92
18.11.1982-19.04.1983	439.8	342.77	77.94	341.48	77.64	-1.29	-0.30
18.11.1983-16.12.1983	37.9	33.72	88.97	30.01	79.18	-3.71	-9.97
Phase sans feuille totale	1 061.6	813.73	76.65	823.11	77.53	9.38	0.88
14.05.1981-19.10.1981	513.3	343.65	66.95	350.32	68.25	6.67	1.30
25.05.1982-13.10.1982	322.5	223.30	69.24	185.75	57.60	-37.55	-11.64
18.05.1983-21.10.1983	297.3	174.44	58.67	158.09	53.17	-16.35	-5.50
Phase avec feuilles totale	1 133.1	741.39	65.43	694.16	61.26	-47.23	-4.17
29.01.1981-16.12.1983	2 515.3	1 776.22	70.62	1 728.21	68.71	-48.01	-1.91

^x Mesurées: Moyenne arithmétique des hauteurs d'eau des 64 pluviomètres posés au sol.

^{xx} Simulées: Moyenne arithmétique des neuf tubes.

correspondant aux périodes de cumul des précipitations au sol pour les besoins de la comparaison modèle-mesures. Nous avons fait figurer nos résultats dans la Figure 25 (ensemble de la placette d'étude).

1) Comparaison modèle-mesures par phénophases : l'accord entre les valeurs simulées et mesurées pour la période allant du 29 janvier 1981 au 16 décembre 1983 est dans l'ensemble satisfaisant. Les précipitations au sol pendant cette période sont les suivantes : Ps simulé = 1 728 mm, soit 69 % Pi et Ps mesuré = 1 776 mm, soit 71 % Pi; ce qui représente une sous-estimation des précipitations au sol de 48 mm (2 % Pi). Pour les trois années d'étude, les résultats des calculs sont toujours plus proches des mesures lors des phénophases défeuillées que lors des phénophases feuillées. Pour l'ensemble des phénophases défeuillées, nous obtenons Ps simulé = 823 mm, soit 78 % Pi; Ps mesuré = 814 mm, soit 77 % Pi; ce qui ne représente qu'une surestimation de 9 mm (1 % Pi). Selon les années, l'écart entre Ps simulé et Ps mesuré varie de - 1 mm (- 0.3 % Pi, pour la période du 18 novembre 1982 au 19 avril 1983) à + 11 mm (+ 6 % Pi pour la période du 29 janvier 1981 au 23 avril 1981). Pour l'ensemble des phénophases feuillées, Ps simulé est sous-estimé de 47 mm (4 % Pi) par rapport à Ps mesuré; les valeurs obtenues pour Ps simulé et Ps mesuré étant respectivement de 694 mm (61 % Pi) et 741 mm (65 % Pi). Selon les années, l'écart entre Ps simulé et Ps mesuré varie de - 38 mm (- 12 % Pi, pour la période du 25 mai au 13 octobre 1982) à + 7 mm (+ 1 % Pi, pour la période du 14 mai au 19 octobre 1981).

2) Comparaison modèle-mesures par périodes de sept à trente jours.

Nous retrouvons le constat fait ci-dessus à savoir que l'écart entre valeurs simulées et valeurs mesurées est plus faible lors des phases défeuillées que lors des phases feuillées. D'autre part, pour les phases défeuillées, cet écart qui oscille en moyenne entre - 8.3 % et + 8.8 % de Ps mesuré, est nettement plus faible pour des précipitations au sol comprises entre 54 mm et 129 mm (écart de - 6 % à + 3 % de Ps mesuré) que pour des précipitations au sol comprises entre 0 et 38 mm (écart de - 9 % à 13 % de Ps mesuré). Nous retrouvons ce même phénomène lors des phases feuillées, phénomène que nous avons analysé comme suit : à partir de la relation Ps mesuré : f(Ps simulé) (fonction linéaire, $Y = X$), en calculant l'écart-type (s) et le coefficient de variation (v)* de Ps simulé pour une classe donnée de valeurs de Ps mesuré, nous avons pu constater que les coefficients de variation des valeurs des précipitations au sol simulées diminuent lorsque les précipitations au sol mesurées augmentent.

* l'écart-type et le coefficient de variation ont été calculés exclusivement pour les phases feuillées puisque pour les phases défeuillées, le nombre de données est trop faible (2 à 4).

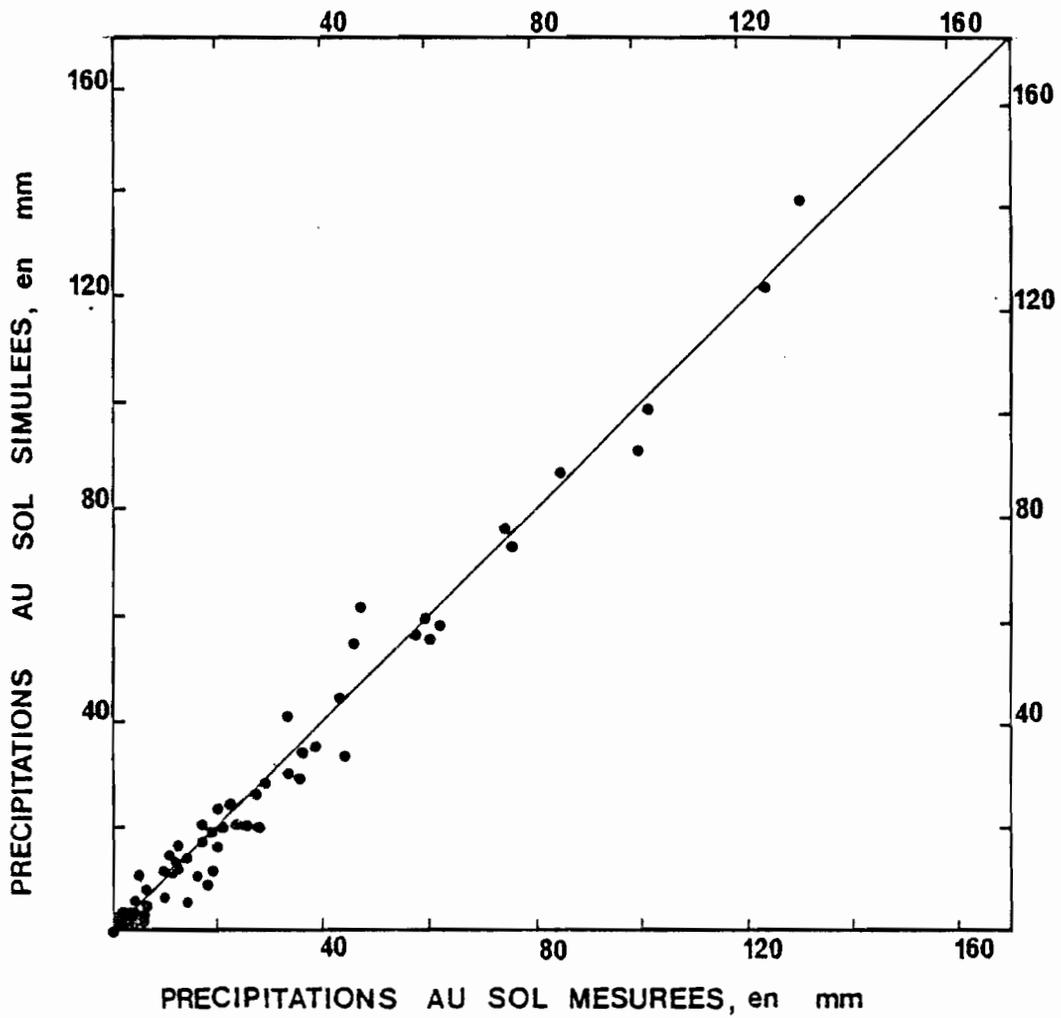


Figure 25 - Comparaison entre les valeurs cumulées et mesurées des précipitations au sol pour la période du 29 Janvier 1981 au 16 Décembre 1983. Valeurs moyennes des hauteurs d'eau :

- mesurées : de l'ensemble des 64 pluviomètres posés au sol,
- simulées : de l'ensemble des neuf tubes .

Or, cette évolution du coefficient de variation de Ps simulé en fonction de Ps mesuré rendrait plutôt compte d'un phénomène réel que d'une simulation entachée d'erreur puisque au niveau des mesures on retrouve une évolution similaire entre le coefficient de variation de Ps mesuré et Ps mesuré. RAPP et IBRAHIM (1983) étudiant les précipitations au sol dans un peuplement de Pinus pinea en 1975, 1976 et 1977 (précipitations au sol cumulées sur une semaine) a obtenu des coefficients de variation de Ps mesuré similaires aux nôtres et qui diminuent par classes croissantes de Ps, soit un coefficient de variation de 40 à 27 % pour des précipitations au sol comprises entre 2 et 20 mm; et de 27 à 23 % pour Ps compris entre 20 et 60 mm. Nous allons maintenant analyser les phénomènes que recouvrent ces variations du coefficient de variation à partir d'une analyse des précipitations incidentes P_i ; pour cela, nous diviserons ces précipitations incidentes en deux classes: de 00 à 10 mm, puis au-delà de 10 mm.

a) Cas des précipitations incidentes de 00 à 10 mm

Le modèle qui fonctionne avec un pas de temps d'une journée néglige la structure journalière des précipitations incidentes, le modèle suppose en effet que le montant journalier de P_i est distribué de façon uniforme sur toute la journée*. Les précipitations au sol simulées dépendent donc de cette distribution, supposée uniforme, des pluies. En réalité, la structure journalière des pluies inférieures à 10 mm influe de façon décisive sur la fraction des précipitations incidentes qui parviendront au sol. D'après l'exemple mentionné dans le Schéma 4, pour un volume de pluie journalier égal, la fraction des précipitations incidentes qui tombe au sol est d'autant moins importante que la pluie arrive en petites averses (A) entrecoupées de nombreuses périodes de temps clair. Lors de ces périodes sans pluie, l'eau interceptée s'évapore et le "réservoir" (d'un volume de 2.2 mm à 3.3 mm)** que constituent les parties aériennes est à nouveau disponible pour se recharger en eau; alors qu'en (B) compte-tenu de la durée plus longue des averses ce phénomène d'évaporation est moindre (à LAI et ETP égaux). Ainsi, les précipitations au sol de (A) seront inférieures à celles de (B). Ces phénomènes expliquent :

- que les précipitations au sol simulées soient très peu précises pour des précipitations proches des "réservoirs utiles" des couronnes et des troncs d'arbres. Pour la classe de

* concept de distribution uniforme de P_i durant un temps t , issu de GASH (1979).

** les "réserves utiles" de notre peuplement :
- les couronnes d'arbres; $RE_{RU} = 1.2$ mm (hiver) à 2.25 mm (été),
- les troncs d'arbres; $RT_{RU} = 0.95$ mm.

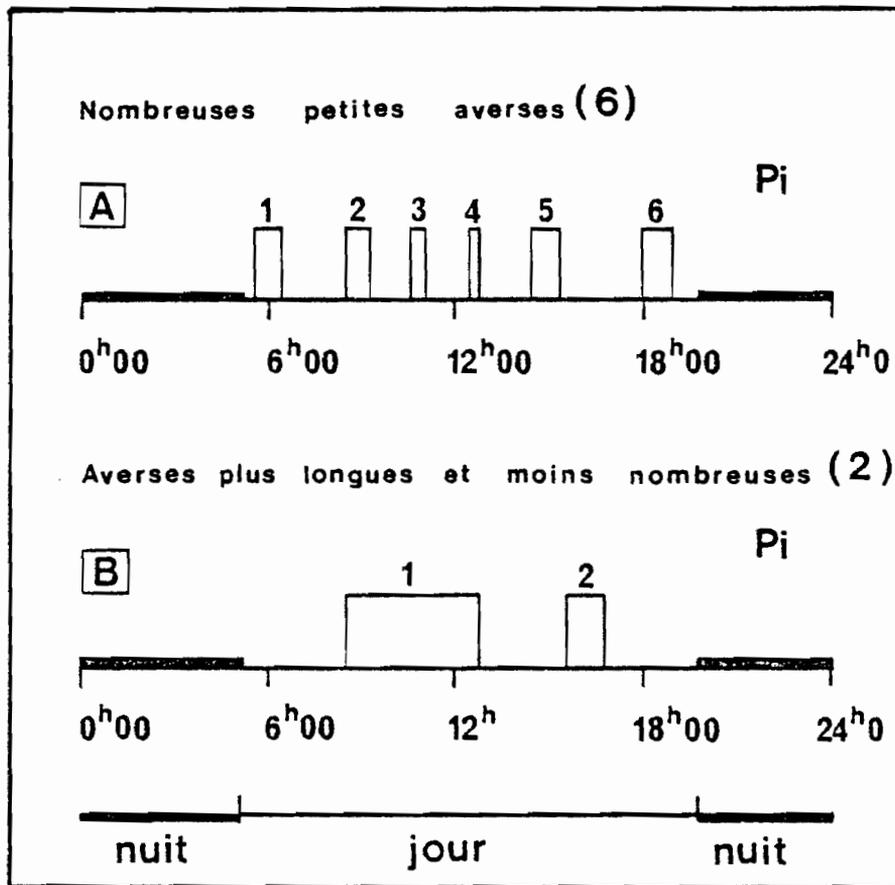


Schéma 4 - Exemple de structure journalière des précipitations incidentes réelles (A et B) à volume de pluie, égal, pendant une journée.

précipitations au sol de 00 à 10 mm, tantôt le modèle surestime, tantôt sous-estime les précipitations au sol*.

- que les précipitations au sol mesurées (et cumulées sur des périodes de sept à vingt et un jours), comprises entre 00 et 10 mm présentent une variabilité du même ordre de grandeur que les précipitations au sol simulées.

Ainsi, une amélioration de la précision du modèle nécessite le choix d'un pas de temps inférieur à la journée et suppose que parallèlement, les mesures soient faites en tenant compte de la structure journalière des pluies.

b) Cas des précipitations incidentes supérieures à

à 10 mm.

Nous avons vu que les précipitations au sol simulées (deuxième version) étaient très proches des précipitations au sol mesurées lorsque ces dernières étaient supérieures à 10 mm, ce qui correspond dans l'ensemble, à des précipitations incidentes supérieures à 10 mm. Cette deuxième version du sous-modèle interception/précipitations au sol a été obtenue par calibration de la première version (voir les résultats, Figure 26) dans laquelle nous avons négligé l'évaporation de l'eau à partir des troncs et le stock d'eau susceptible d'être retenu sur la surface des troncs, ce qui représentait deux sources de sur-estimation des précipitations au sol; en effet, les précipitations au sol étaient sur-estimées :

- pour la phase sans feuilles de + 16.6 mm (du 29 janvier au 19 mars 1981; cumuls de 50 jours) à + 33.9 mm (du 06 novembre au 28 décembre 1981; cumuls de 53 jours);

- pour la phase feuillée de + 16.1 mm (du 23 juillet au 03 août 1981; cumuls de 11 jours) à + 24.63 mm (du 03 août au 18 août 1981; cumuls de 15 jours).

Ces sur-estimations se retrouvaient de façon similaire pour l'ensemble des phénophases. D'autre part, en analysant, lors des périodes de cumuls, le nombre de jours présentant une lame d'eau supérieure à 10 mm.j^{-1} , nous avons constaté que la sur-estimation de P_s était d'autant plus forte que ce nombre de jours présentant une lame d'eau supérieure à 10 mm.j^{-1} était important.

Nous devons par ailleurs souligner que dans notre région d'étude, les journées présentant une lame d'eau supérieure à 10 mm.j^{-1} sont peu fréquentes. Une analyse du nombre de jours

* 1981 - P_s sur-estimées de 1.30 % P_i ,
1982 - P_s sousestimées de 11.64 % P_i ,
1983 - P_s sousestimées de 5.50 % P_i .

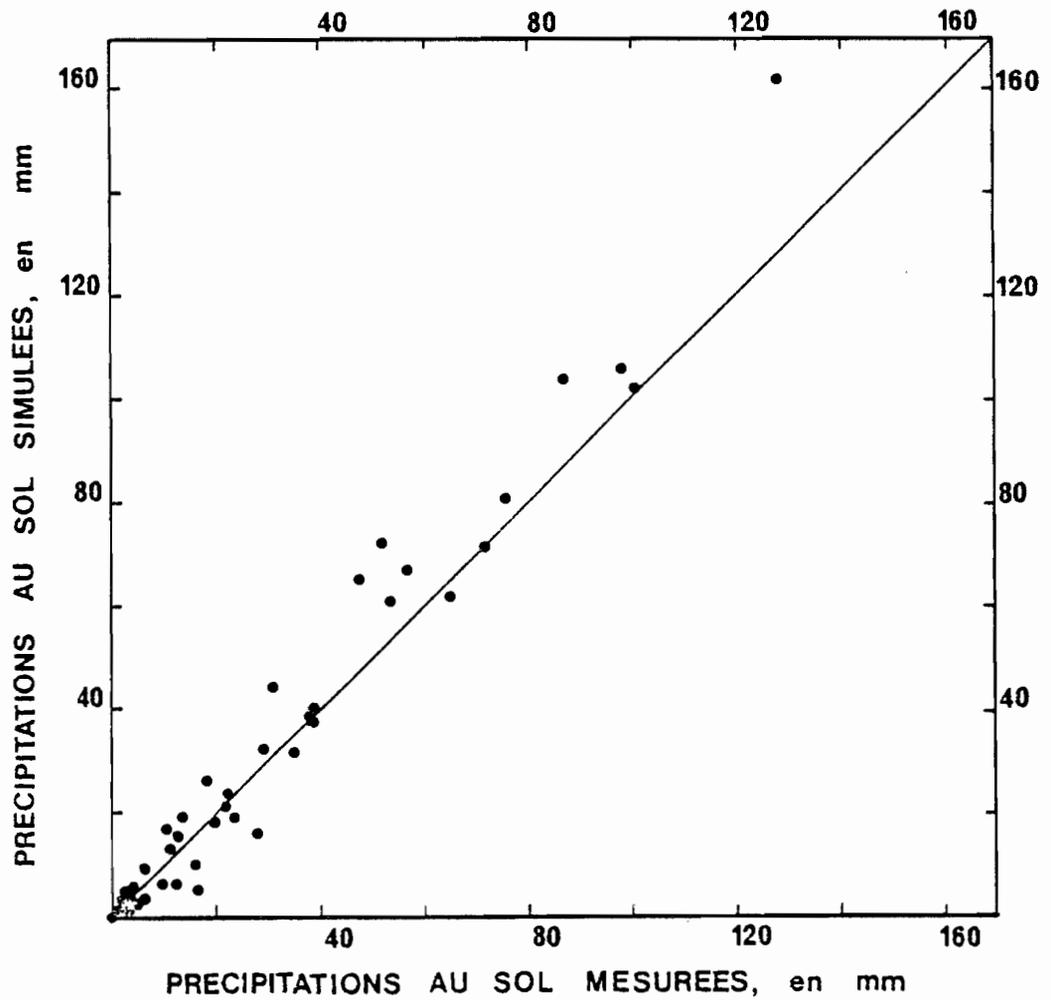


Figure 26 - Comparaison entre les valeurs calculées et mesurées des précipitations au sol cumulées pour la période du 29 Janvier 1981 au 13 Octobre 1982 (première version). Valeurs moyennes des hauteurs d'eau :

- mesurées : de l'ensemble des 64 pluviomètres posés au sol,
- simulées : de l'ensemble des neuf tubes.

présentant une lame d'eau donné (Figure 27) montre que 86 % des jours de pluie sont des jours pour lesquels la lame d'eau tombée est inférieure à 10 mm pour les 3 années 1981 à 1983:

- total des jours des pluies; $N_t = 572$ jours,
- jours avec pluies fines inférieures à 10 mm; $N_f = 487$ jours,
- jours avec pluies orageuses, égales ou supérieures à 10 mm; $N_0 = 85$ jours.

L'ensemble des résultats de la simulation des précipitations au sol obtenues d'après cette première version (voir aussi HALLDIN et al., 1985)* nous a conduit à élaborer la deuxième version du sous-modèle interception/précipitations au sol dans laquelle nous avons "détourné" le surplus des précipitations au sol présent dans la première version vers l'interception en établissant un bilan d'eau des troncs d'arbres: l'écoulement le long des branches constitue l'entrée d'eau sur les troncs qui sont capables de retenir un stock d'eau donné. Et dans ce bilan d'eau des troncs il existe évidemment une évaporation d'eau à partir des troncs. Dans ce cas nous supposons que l'écoulement (mesuré) provient exclusivement des précipitations incidentes orageuses et que le taux d'écoulement (% de P_i) n'est pas fixe mais varie avec P_i ; plus P_i est grand plus le taux d'écoulement l'est aussi jusqu'à une valeur limite de $P_i = 10 \text{ mm.j}^{-1}$, au-delà de laquelle le taux d'écoulement est un pourcentage constant de P_i , ce qui élimine la sur-estimation de P_s qui avait lieu dans la première version lorsque le nombre de jours de pluies orageuses était important. Il reste évidemment à prouver expérimentalement le bien-fondé de ces deux hypothèses en étudiant E_c , P_s et chaque pluie individuellement. En effet, l'adéquation P_s simulé- P_s mesuré ne peut constituer la garantie d'avoir modéliser des phénomènes réels; il faut toujours supposer l'existence possible de compensations dans le modèle, qui donnent lieu à des variables de sortie satisfaisantes mais qui ne rendent pas compte de phénomènes réels.

En conclusions, il reste à:

- tester la sensibilité du modèle en faisant varier les différents paramètres et relations fonctionnelles pour juger notre modèle de façon critique;
- vérifier expérimentalement certaines de nos hypothèses, deux études qui dépassent le cadre de ce travail.

* modèle sur une base journalière calculant l'interception et les précipitations au sol avec un sous-modèle semblable à celui de RUTTER et al. (1971) (notre première version).

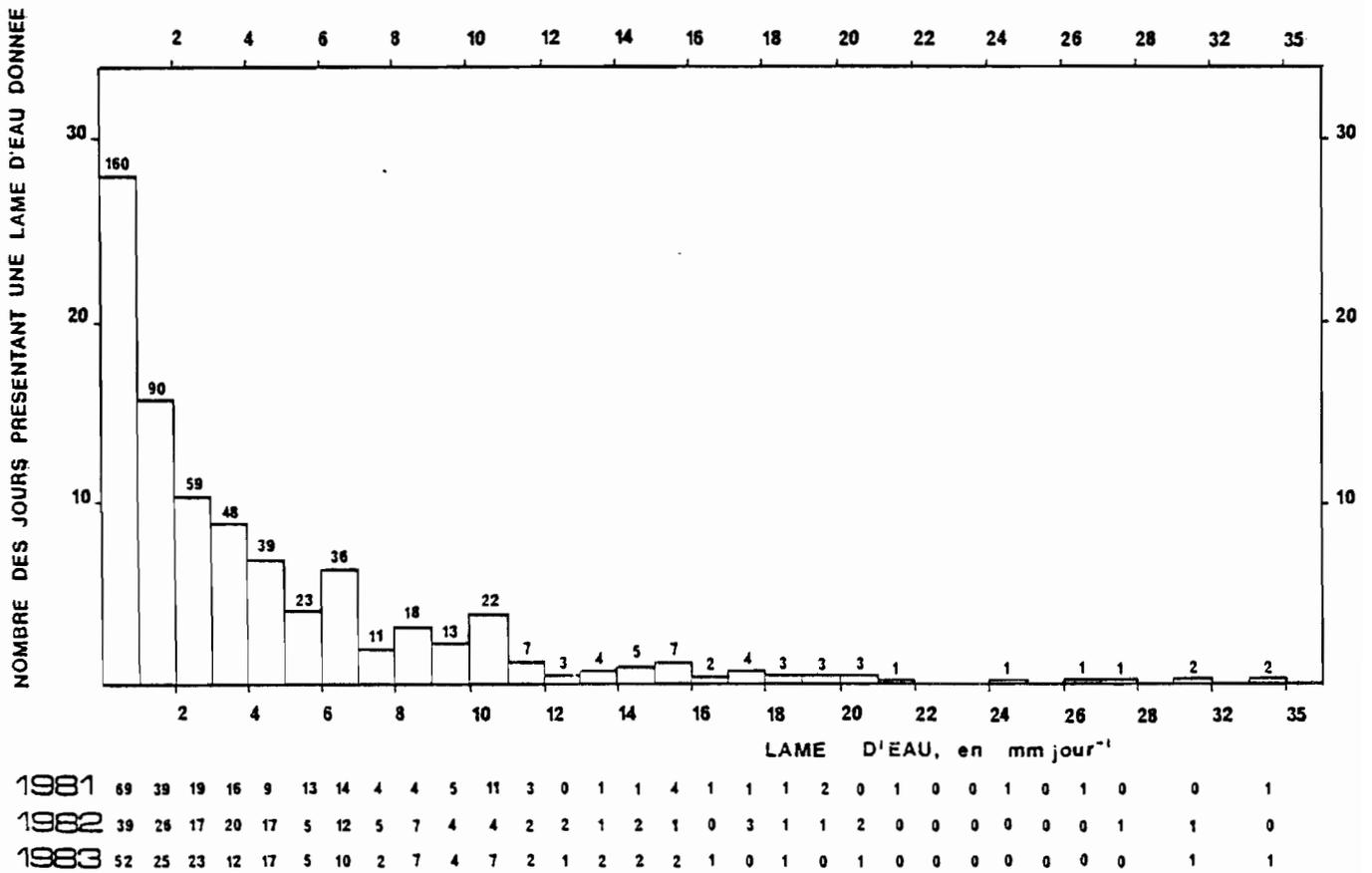


Figure 27 - Structure des pluies enregistrées à la station météorologique de Fontainebleau-Ville pour les années 1981, 1982 et 1983.

5.3 - STOCK D'EAU DU SOL

La simulation de l'évolution du stock d'eau du sol du peuplement a été effectuée pour 1981, 1982 et 1983 pour les neuf tubes, mais nous ne présentons ici que l'évolution du stock d'eau du sol pour le tube 21, pendant les périodes végétatives* uniquement. Nous comparerons les valeurs simulées du stock d'eau du sol, avec les valeurs mesurées au moyen d'une sonde à neutrons:

- par confrontation des valeurs mesurées et simulées du stock d'eau du sol pour l'ensemble du profil du tube 21.

- par confrontation des valeurs mesurées et simulées du stock d'eau des sept strates de 0,10 m définies dans le profil du tube 21.

Nous présentons les résultats dans la figure 28 et 29 (ensemble du profil pour les années 1981, 1982 et 1983) et dans la figure 30 (sept strates de 0.10 m, l'année 1982).

1) L'ensemble du profil du tube 21. Les variations simulées du stock d'eau du sol de l'ensemble du profil lors des périodes végétatives semblent être qualitativement correctes. Néanmoins, si nous définissons une "bonne simulation" par l'obtention de valeurs calculées qui se trouvent dans l'intervalle de confiance à 95 % des valeurs observées**, les variables de sortie obtenues ne répondent pas à ce critère. Pour chacune des trois années étudiées, le stock d'eau du sol est sousestimé par rapport aux mesures. Cette sousestimation du stock d'eau du sol peut avoir plusieurs origines :

a) au niveau du sol

. Nous n'avons pas, expérimentalement, étudié les propriétés hydriques du sol. La relation entre potentiel hydrique du sol et stock d'eau du sol a été établie pour

* du débourrement des feuilles jusqu'au moment où l'indice foliaire est à environ 50 % de sa valeur maximale en automne.

** rappelons que l'erreur relative des mesures du stock d'eau du sol varie de 5 % à la capacité au champ à 15 % au point de flétrissement permanent.

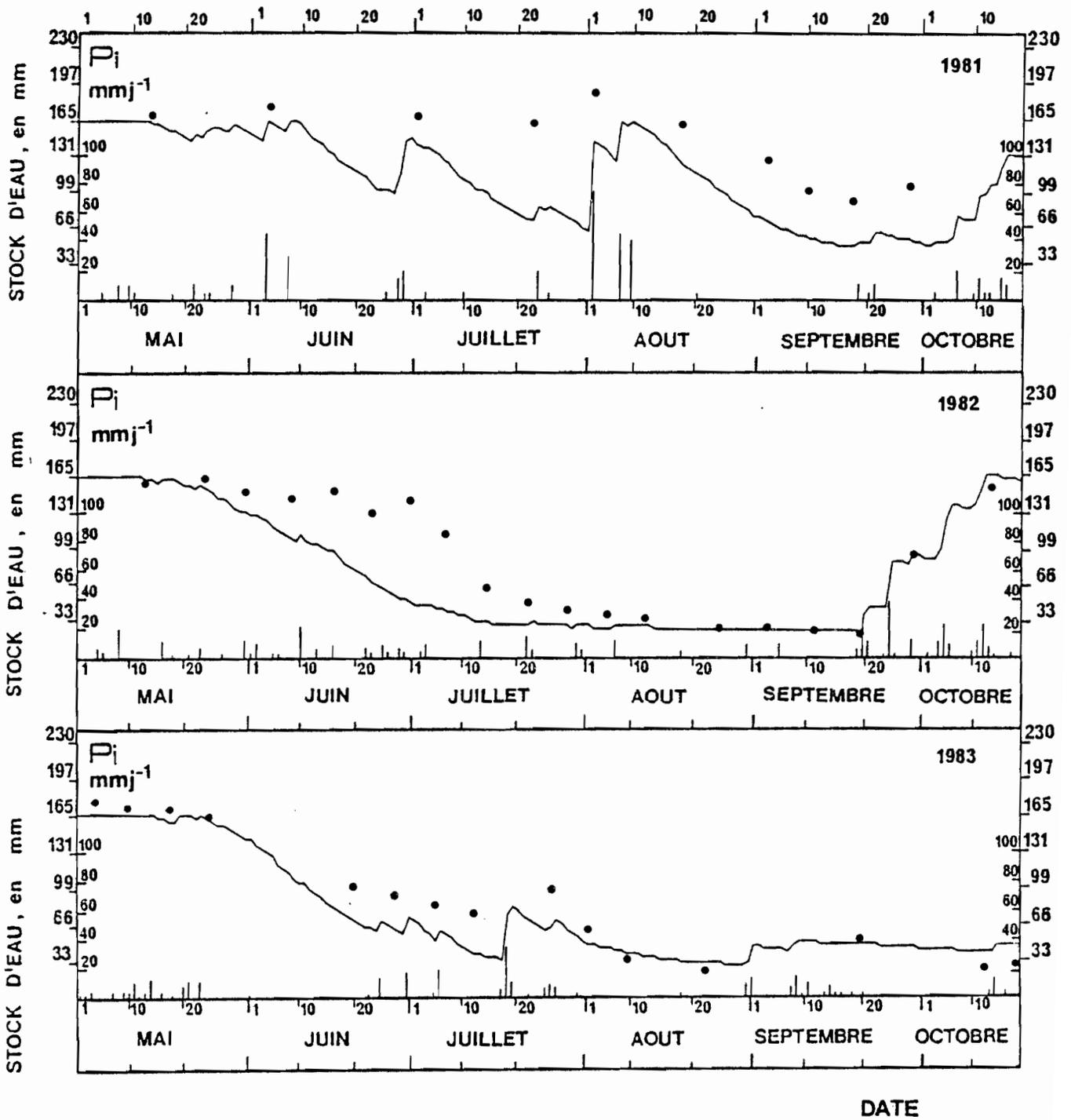


Figure 28 - Comparaison entre les valeurs calculées et mesurées de la réserve en eau du sol (RP) pour l'ensemble du profil du tube 21.

RCC = 166,6 mm ; RPPF = 63,2 mm.

l'essentiel à partir de données bibliographiques* (deux points expérimentaux seulement, le stock d'eau à la capacité au champ et au point de flétrissement permanent); ainsi pour un potentiel hydrique du sol donné, le stock d'eau du sol correspondant à cette relation peut être trop faible.

. Il est possible que des racines de Quercus petraea pénètrent dans les fissures de la dalle calcaire. Ainsi, pour une transpiration simulée donnée, correspondant à une transpiration réelle 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.

. Erreur possible dans l'estimation des apports d'eau par les précipitations au sol : les précipitations au sol sont sousestimées par le modèle lors des phases avec feuilles, soit une sousestimation allant de -9.9 mm** (du 24 avril au 6 novembre 1981), à -10.5 mm (du 3 mai au 18 novembre 1983), et jusqu'à - 54 mm (du 26 avril au 18 novembre 1982).

. Erreur possible dans l'estimation du drainage de l'eau hors du profil : le drainage du profil a lieu si le stock d'eau de la dernière strate excède sa capacité au champ. Dans le modèle la valeur du coefficient de conductivité du sol saturé étant d'environ 500 mm par jour (valable pour l'horizon B, horizon le moins perméable du profil), nous avons supposé que tout écoulement hors de la zone radiculaire s'effectuait durant la journée même de la pluie provoquant un drainage*** (jour j+1) et qu'alors le stock d'eau du sol simulé était à la capacité au champ. En réalité, nous pouvons supposer que le drainage est beaucoup plus lent que dans le modèle, nous donnerons deux exemples :

- le 01 août 1981 eut lieu un orage de $P_i = 70.4$ mm. Les mesures effectuées le 02 août 1981 indiquent $RP = 188.52$ mm,

* rappelons :

- que en-deçà du potentiel hydrique du sol de $\psi_s = -0.8$ bars, les tensiomètres ne fonctionnent plus.
- qu'il aurait été possible d'extrapoler à -16 bars, la relation potentiel hydrique du sol/stock d'eau du sol établie expérimentalement entre 0 et -0.8 bars, mais, comme les mesures ont été faites chaque semaine lors des phases avec feuilles, nous n'avons pu obtenir un nombre suffisant de points expérimentaux, le dessèchement ayant été trop rapide. Il est donc nécessaire, pour appliquer une méthode tensiométrique, de faire un suivi journalier du potentiel hydrique.

** nous n'avons pas pris en compte la surestimation des précipitations au sol de la période du 03 au 18 août 1981 ($P_s = +14.37$ mm en plus), puisque tout ce volume a été drainé les jours mêmes des précipitations au sol considérés le 06 au 08 août 1981.

*** aucune pluie ne dépasse 500 mm.j^{-1} .

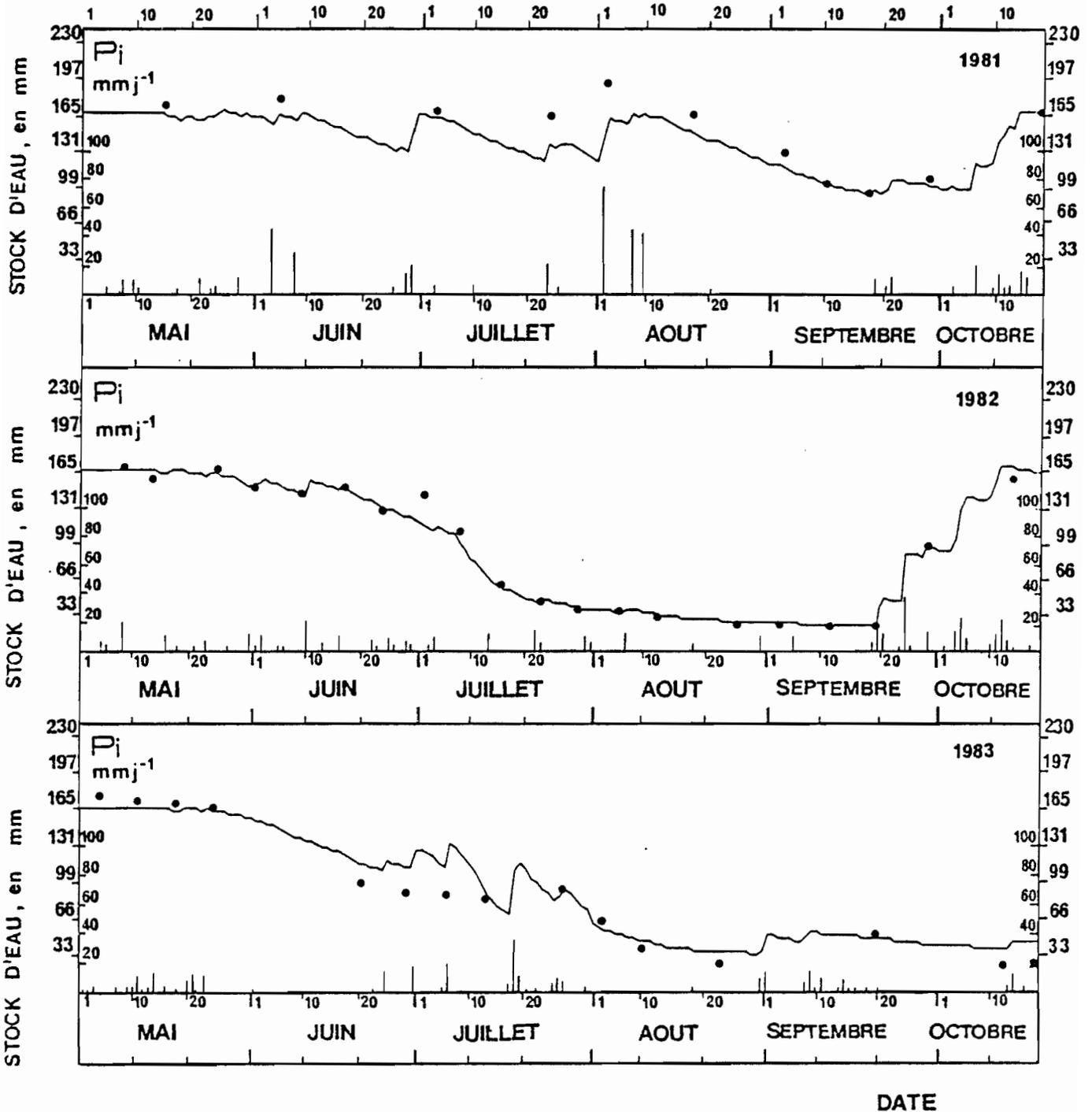


Figure 29 - Comparaison entre les valeurs calculées et mesurées de la réserve en eau du sol (RP) pour l'ensemble du profil du tube 21, avec \bar{r}_S (modèle) = 2 x \bar{r}_S (mesurée) ; (RCC = 166,6 mm ; RPFP = 63,2 mm).

soit 22 mm de plus que le stock d'eau du sol à la capacité au champ.

- après deux jours de pluie, le 15 mars 1982 ($P_i=9.4$ mm) et le 16 mars 1982 ($P_i=3.5$ mm), le stock d'eau du sol mesuré le 17 mars 1983 est de $RP = 180.3$ mm, soit 13.7 mm de plus que le stock d'eau du sol à la capacité au champ.

Ainsi en réalité, 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, et, cette eau est à la fois drainée et absorbée (transpirée). Or, dans le modèle, d'une part, le drainage trop rapide est susceptible d'être à l'origine de la sous-estimation du stock d'eau du sol, d'autre part, l'absorption, en débutant immédiatement à la capacité au champ agit comme facteur supplémentaire de la sous-estimation du stock d'eau du sol. Un tel processus pourrait avoir de l'importance au début ou à la fin de la saison végétative, lorsque le stock d'eau du sol est proche de la capacité au champ.

b) au niveau du peuplement

. L'incertitude concernant la résistance du peuplement au flux de vapeur d'eau. La résistance du couvert dépend de l'indice foliaire et de la résistance stomatique moyenne de la feuille; nous savons que l'indice foliaire ne peut être "responsable" de cette incertitude puisque, d'une part sa valeur maximale varie très peu d'une année à l'autre* et que d'autre part, les valeurs simulées de LAI, pour les phénomènes intermédiaires sont très proches des valeurs mesurées**. Nous pouvons donc supposer que la sous-estimation du stock d'eau du sol ou encore la surestimation de la transpiration est due à une sous-estimation de la résistance stomatique moyenne de la feuille. Nos mesures de résistance stomatique in situ, sont toutes systématiquement plus faibles d'un facteur d'environ deux par rapport aux valeurs issues de la bibliographie (FEDERER, 1977; AUSSENAC et LEVY, 1983) : ceci est probablement dû au fait que nos mesures ne sont représentatives que des feuilles les plus basses dans les couronnes d'arbres et non de l'ensemble du couvert (effet de la position des feuilles dans les couronnes d'arbres). Si nous introduisons dans notre sous-modèle de la transpiration des valeurs de résistance stomatique moyenne de la feuille deux fois supérieures aux valeurs mesurées, nous obtenons une meilleure simulation de la réserve en eau du sol pour les trois années de mesures (Figure 29), bien que cette amélioration ne soit pas de la même qualité d'une année à l'autre: la simulation de la réserve en eau est très bonne pour 1982 (année moyenne pour les précipitations incidentes et les températures moyennes de l'air), bonne pour 1981 et acceptable pour 1983.

* $LAI_{max}=4.26$ (1981); $LAI_{max} = 4.38$ (1982 et 1983).

** voir chapitre "Evolution de l'indice foliaire".

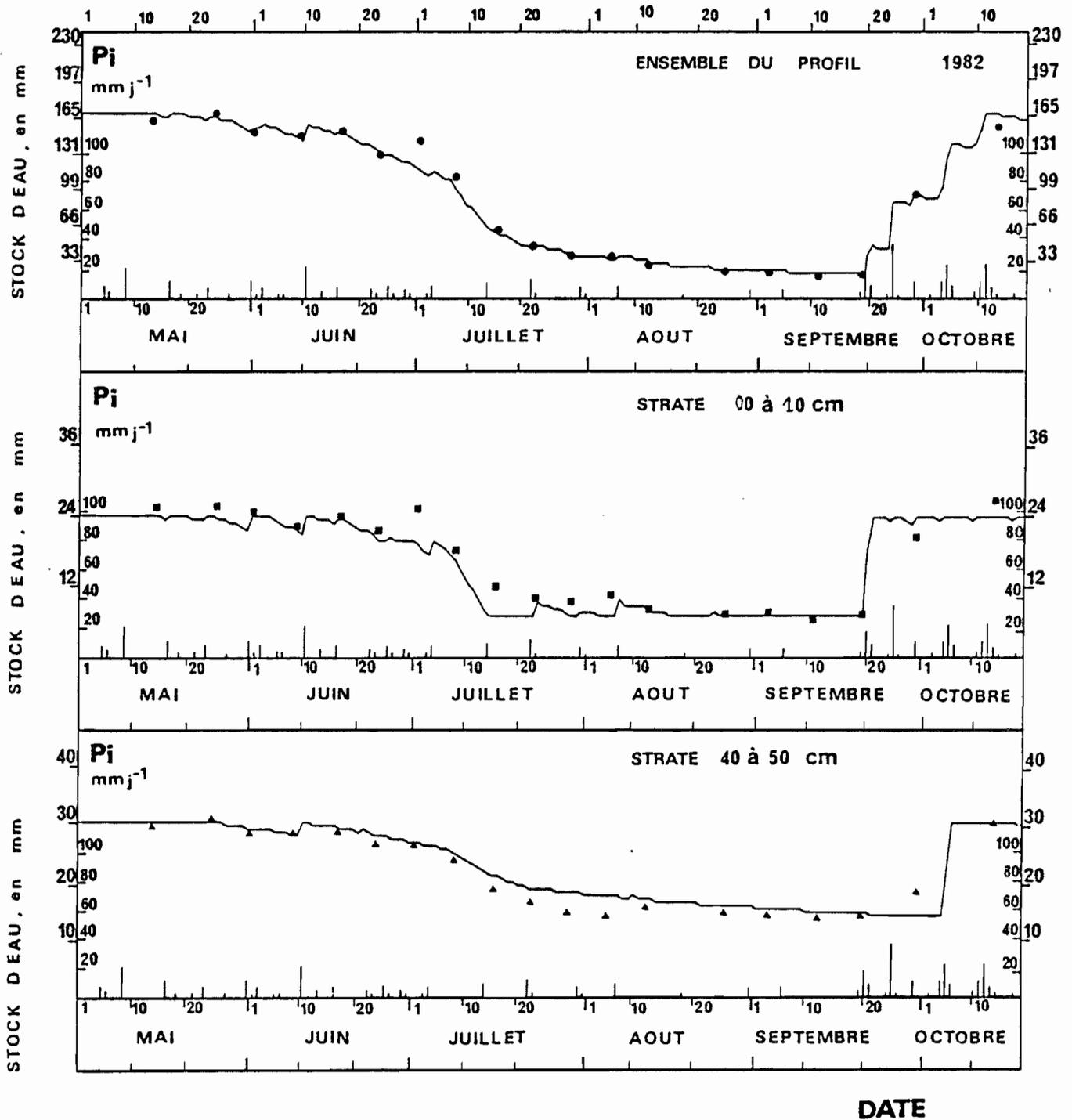


Figure 30 - Comparaison entre les valeurs calculées et mesurées de la réserve en eau durant l'année 1982, pour l'ensemble du profil du tube 21 (RCC = 166,6 mm ; RPPF = 63,2 mm) et pour la strate 00 à 0,10 m (RCC1 = 23,9 mm ; RPPF1 = 7,2 mm) et 0,40 à 0,50 m (RCC5 = 30,2 mm ; RPPF = 14 mm), avec \bar{r}_S (modèle) = $2 \times \bar{r}_S$ (mesurée).

. L'incertitude sur l'estimation du rayonnement net du couvert. Dans notre modèle de la transpiration, nous nous sommes imposé des valeurs de l'albédo et de l'émissivité constantes (calculées à partir de données bibliographiques pour les phases avec feuilles et les phases sans feuilles respectivement) alors qu'en réalité ces grandeurs évoluent dans le temps en fonction des pigments foliaires lors des phases avec feuilles, et varient lors des phases sans feuilles en fonction de l'humidité de l'écorce (LINACRE, 1969) et avec l'absence ou la présence de neige (FEDERER, 1968).

. L'incertitude sur la résistance aérodynamique du couvert. L'absence du matériel nécessaire à l'établissement du profil de la vitesse moyenne du vent et du profil thermique nous a conduit à déduire la hauteur de déplacement et la longueur de rugosité du couvert végétal de la hauteur du peuplement d'après les expressions proposées par THOM (1972), expressions valables pour une vitesse du vent modérée; mais nous ignorons l'ordre de grandeur de l'erreur faite sur la transpiration pour des vitesses du vent élevées.

2) Stock d'eau des sept strates de 0.10 m définies dans le profil du tube 21. Les variations du stock d'eau des différentes strates du sol semblent être assez mal simulées lors des périodes végétatives pour chacune des trois années étudiées. Même en considérant la simulation portant sur l'année 1982 pour laquelle les points expérimentaux sont en très bon accord avec les points simulés pour l'ensemble du profil (Figure 29), il ressort qu'il y a en fait compensation entre un stock d'eau surestimé pour les horizons A₂ et sous-estimé pour les horizons B plus profonds. Notre sous-modèle de la transpiration 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 de récents travaux concernant des espèces arborescentes caducifoliées (REICH et al., 1980) ont montré que la longueur de racines par unité de volume de sol et leur capacité d'absorption évoluent parallèlement à la croissance foliaire saisonnière; nous pouvons par ailleurs supposer que cette évolution est spécifique pour chaque horizon.

En conclusion, il faut que:

1) La résistance stomatique moyenne de la feuille d'un peuplement soit appréhendée d'une part dans une optique dynamique (effet de l'âge des feuilles) et d'autre part dans une optique spatiale (effet de la position des feuilles dans la couronne d'arbre).

2) L'extraction de l'eau par les racines dans les différentes strates soit de même considérée dans une optique dynamique et spatiale puisque la longueur racinaire par unité de volume de sol et sa capacité d'absorption évoluent dans le temps et dans l'espace. De telles considérations permettront une approche dynamique de la résistance dynamique de la résistance totale au flux d'eau de l'ensemble sol-racine-feuille.

CONCLUSION ET PERSPECTIVES

L'analyse de l'évapotranspiration réelle passe par l'étude du flux de vapeur d'eau en provenance du couvert et par l'étude des paramètres morpho-physiologiques du couvert qui régulent ce flux. Ces paramètres, comme tout phénomène physiologique, évoluent dans le temps : nous avons tenté d'approcher au mieux cette évolution, à l'échelle du peuplement.

Nous avons repris l'approche proposée par MONTEITH (1965) qui consiste à supposer que :

- la résistance de surface du couvert est nulle dès que la surface est mouillée; l'évaporation de l'eau à partir des surfaces végétales est alors similaire au processus d'évaporation d'une surface d'eau libre (sous-modèle d'interception);

- dès que la surface est sèche, il existe une résistance de surface au flux de vapeur d'eau, calculée à partir de la résistance stomatique en supposant que toutes les feuilles ont un comportement stomatique semblable, ce qui revient à assimiler l'ensemble des feuilles du peuplement à une feuille unique (sous-modèle de transpiration).

. Pour notre sous-modèle d'interception, nous nous sommes inspiré du modèle de RUTTER et al. (1971), utilisant la notion de capacité de rétention en eau des couronnes d'arbres et de la litière. Dans ce modèle, les surfaces des couronnes d'arbres et la litière fonctionnent comme deux réservoirs en parallèle qui se "vident" au-dessus d'un seuil qui correspond à la capacité de rétention. L'estimation de ces valeurs seuils constitue donc le facteur limitant de la prédiction du flux d'eau intercepté. Par rapport au modèle de RUTTER et al. (1971) nous avons été amenés à introduire deux nouveaux paramètres, la capacité de rétention en eau par les surfaces des troncs d'arbres et l'évolution saisonnière de la capacité de rétention en eau par les couronnes d'arbres en fonction de l'indice foliaire (prédit par un sous-modèle). Dans l'ensemble, les résultats de ce sous-modèle sont encourageants mais il reste à tester sa sensibilité, et à vérifier les hypothèses ayant servi à l'élaboration du bilan d'eau des troncs d'arbres.

. Dans notre sous-modèle de la transpiration, nous avons repris, en la simplifiant, la partie conceptuelle du modèle de SAUGIER (1974), modèle qui calcule chaque jour le potentiel hydrique des feuilles en supposant que l'extraction racinaire égale la transpiration. Dans un tel modèle, mis au point sur peuplement graminéen en été, la relation résistance stomatique moyenne/potentiel hydrique foliaire est décrite par une fonction empirique applicable à la prairie étudiée pour différentes valeurs d'indice foliaire; mais contrairement à une prairie dont le renouvellement des feuilles est continu et

important, la production de feuilles des espèces arborescentes caducifoliées et la sénescence de ces feuilles sont deux phénomènes dissociés dans le temps. Il y a production d'une surface foliaire donnée (LAI_{max}) qui est stable pendant toute la période de végétation et qui meurt globalement à un moment donné. Nous avons donc été amené à aborder la relation résistance stomatique moyenne/potentiel hydrique foliaire de façon dynamique : cette relation varie avec l'indice foliaire (de $LAI=0$ à $LAI=LAI_{max}$) et, une fois l'indice foliaire maximal atteint, avec l'âge des feuilles jusqu'à leur mort.

Les relations empiriques r_s/ψ_f que nous proposons sont évidemment propres à Quercus petraea; la phénologie propre à chaque espèce arborescente caducifoliée est donc un paramètre déterminant pour l'évolution de la relation r_s/ψ_f . Notre approche dynamique rend compte de l'âge physiologique des feuilles, feuilles dont nous avons supposé qu'elles avaient à un même instant un comportement stomatique identique.

En réalité, les feuilles ont selon leur position dans les couronnes d'arbres des conditions de croissance (lumineuses en particulier) différentes et la relation r_s/ψ_f devrait, dans de futurs modèles, être abordée à la fois dans une optique dynamique (effet de l'âge des feuilles) et dans une optique spatiale (effet de la position des feuilles). Le fait que nos valeurs de r_s soient systématiquement sous-estimées d'un facteur de deux par rapport aux valeurs issues de la bibliographie, provient certainement de ce que nos mesures n'ont été faites que sur des feuilles situées dans la partie la plus basse des couronnes d'arbres. Ainsi, l'approche quantitative de l'évolution de r_{smin} nécessite d'approfondir plusieurs aspects méthodologiques:

- 1) l'étude de la fiabilité du poromètre à diffusion utilisé en milieu naturel pour les espèces arborescentes;
- 2) l'étalonnage de l'appareil;
- 3) l'échantillonnage des feuilles, soit la prise en compte:
 - du nombre minimum de feuilles à étudier,
 - du choix de la position des feuilles dans la couronne d'arbre, compte tenu des gradients de déficit de saturation de l'air, du rayonnement, de la vitesse du vent à l'intérieur d'une couronne d'arbre;
- 4) l'étude de la morphologie des stomates lors de la phase d'accroissement en surface des feuilles.

Notre sous-modèle de transpiration simule mal l'extraction de l'eau par les racines dans les différentes strates: nous avons en effet supposé que la longueur de racines par unité de volume ne variait pas dans le temps et donc que la résistance totale au flux d'eau de l'ensemble sol-racine-feuille était constante, alors que de récents travaux ont montré que la longueur de racines par unité de volume du sol et leur capacité d'absorption évoluent parallèlement à la croissance foliaire

saisonnaire. Une amélioration du modèle nécessite donc l'étude de la dynamique de croissance racinaire et celle de l'évolution saisonnière de la résistance au flux d'eau liquide du système sol-plante.

Néanmoins, l'accord entre les valeurs mesurées et simulées de l'indice foliaire, des précipitations au sol et du stock d'eau du sol est satisfaisant, ce qui permet de généraliser les mesures obtenues à d'autres années lorsqu'on connaît les variables météorologiques d'entrée du modèle (rayonnement global, température de l'air, température de rosée, vitesse du vent et précipitations à découvert). Ce modèle permet notamment de bien caractériser la durée et l'intensité des épisodes de sécheresse qui peuvent affecter de façon significative la production de bois.

Cette modélisation a bien mis en évidence l'obligation d'aborder les phénomènes physiques et physiologiques dans leur dynamique, dans le temps et dans l'espace; d'autre part cette modélisation a permis de dégager les principaux phénomènes qui méritent d'être étudiées expérimentalement en vue d'un modèle de bilan d'eau plus mécaniste.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- AMBROS, Z., 1978 - Vodna bilancia lesnych porastov Karpat. Lesnicky casopis, 24 (3), 203-221.
- ANDERSON, M.C., 1966 - Stand structure and light penetration. II. A theoretical analysis. J. Appl. Ecol., 3, 41-54.
- AUSSENAC, G., 1968 - Interception des précipitations par le couvert forestier. Ann. Sci. Forest., 25 (3), 135-156.
- AUSSENAC, G., 1975 - Couverts forestiers et facteurs du climat: leurs interactions, conséquences écophysiologicals chez quelques résineux. Thèse d'Etat, Université de Nancy, 234 p.
- AUSSENAC, G., 1977a - Le cycle hydrologique en forêt. In Actualités d'écologie forestière (Pesson, L. ed.), Gauthier-Villars, Paris, 283-307.
- AUSSENAC, G., 1977b - Etude bioclimatique d'une futaie feuillue de l'Est de la France. Ann. Sci. Forest., 34 (4), 265-284.
- AUSSENAC, G., LEVY, G., 1983 - Influence du dessèchement du sol sur le comportement hydrique et la croissance du chêne pédonculé (Quercus pendunculata Ehrl.) et du frêne (Fraxinus excelsior L.) cultivés en cases de végétation. Ann. Sci. Forest., 40 (3), 251-264.
- AUSSENAC, G., GRANIER, A., 1984 - Influence du dessèchement du sol sur le fonctionnement hydrique et la croissance du douglas (Pseudotsuga menziesii (Mirb.) Franco). Acta Oecologia/Oecol. Plant., 5 (19), 3, 241-253.
- BIGNAND, C., 1978 - Recherches sur la biodégradation de litières forestières: dynamique annuelle de la minéralisation du carbone. Thèse de 3^e cycle, Université de Paris-Sud, Orsay, 87 p.
- BONHOMME, R., 1970 - Application de la technique des photographies hémisphériques in situ à la mesure de l'indice foliaire. In Techniques d'étude des facteurs physiques de la biosphère. INRA, 501-505.
- BRAUN, H.J., 1983 - Zur Dynamik des Wassertransportes in Bäumen. Ber. Deutsch. Bot. Ges., 96, 29-47.
- BRUNT, D., 1939 - Physical and Dynamical Meteorology. Cambridge University Press.
- BRUTSAERT, W.H., 1982 - Evaporation into the atmosphere. Reidel Publ. Co., Dordrecht.

- CANNELL, M.G.R. et SMITH, R.I., 1983 - Thermal time, chill days and prediction of budburst in Picea sitchensis. J. Appl. Ecol., 20, 951-963.
- CAMPBELL, R.K., 1978 - Regulation of budburst timing by temperature and photoregime during dormancy. Proceedings 5th North American Forest Biology Workshop (C.A. Hollis and A.E. Squillace eds.), 19-33. School of Forest Resources and Conservation, University of Florida, Gainesville.
- CHASSAGNEUX, P., 1984 - Etudes et modélisation de l'évaporation globale et du bilan hydrique d'un couvert forestier de stage de recherche. Ecole Nationale de la Météorologie, 84 p.
- CHASSAGNEUX, P., CHOISNEL, E., 1986 - Modélisation de l'évaporation globale d'un couvert forestier. Principes physiques et description du modèle. Ann. Sci. Forest. 43(4), 419 - 572.
- COLOMBANI, J., LAMAGNAT, J.P. et THIEBAUX, J., 1972 - Mesure de la perméabilité des sols en place : un nouvel appareil pour la méthode Muntz, une extension de la méthode Porchet aux sols hétérogènes. Cah. ORSTOM, Sér. Hydrol., IX, 3, 15-46.
- COWAN, I.R., 1965 - Transport of water in the soil-plant-atmosphere system. J. Appl. Ecol., 2, 221-239.
- COWAN, I.R., 1977 - Water use in higher plants. In Water : planets, plants and people (McIntyre, A.K., ed.), Aust. Acad. Sci. Canberra, 71-107.
- COWAN, I.R. et MILTHORPE, F.L., 1968 - Plant factors influencing the water status of plant tissues. In Water deficits and plant growth. Vol. I (Kozlowski, T.T., ed), Academic Press, New York, 137-189.
- DAUDET, F.A. et VACHAUD, G., 1977 - La mesure neutronique du stock d'eau du sol et ses variations. Application à la détermination du bilan hydrique. Ann. Agron., 28 (5), 503-519.
- DENMEAD, O.T., 1984 - Plant physiological methods for studying evapotranspiration : problems of telling the forest from the trees. Agricultural Water Management, 8, 167-189.
- DE WIT, C.T. et GOUDRIAAN, J., 1974 - Simulation of ecological processes. Simulation Monograph, Pudoc, Wageningen.
- DOIGNON, P., 1976 - Quatre vingt douze ans d'observations météorologiques à Fontainebleau (1883-1976). Bull. Assoc. Nat. de la Vallée du Loing.
- DURAND, R., 1967 - Action de la température et du rayonnement sur la croissance. Ann. Physiol. végét., 9 (1), 5-27.

- FAILLE, A., 1977 - Contribution à l'échelle de la dynamique des écosystèmes forestiers; évolution après clairiérage des conditions stationnelles de la hêtraie sur plateau en forêt de Fontainebleau. Thèse d'Etat, Université de Paris-Sud, Orsay, 201 p.
- 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 3^e cycle, Université de Paris-Sud, Orsay, 146 p.
- FEDERER, C.A., 1968 - Spatial variation of net radiation, albedo and surface temperature of forests. J. Appl. Meteorol., 7, 789-795.
- FEDERER, C.A., 1977 - Leaf resistance and xylem potential differ among broadleaved species. Forest Sci., 23 (4), 411-419.
- FEODOROFF, A., 1962 - Ressuyage du sol et capacité de rétention pour l'eau. Ann. Agron., 13, 523-547.
- FORD, E.D et DEANS, J.D., 1978 - The effects of canopy structure on stemflow, throughfall and interception loss in a young sitka spruce plantation. J. Appl. Ecol., 15, 905-917.
- GARCIA DE CORTAZAR, V., 1982 - Modélisation de la croissance d'une culture de maïs. Thèse de 3^e cycle, Université de Paris-Sud, Orsay, 111 p.
- GARDNER, W.H., 1965 - Water content. In Methods of soil analysis. Amer. Soc. Agron. Monograph, 9, 82-127.
- GARDNER, W.H., GARDNER, W.R. et BAVER, L.D., 1972 - Soil physics. 4th ed., (Wiley, J. and Sons, eds), New York.
- GARDNER, W.R., 1959 - Solution to the flow equation for the drying of soils and other porous media. Soil Sci. Soc. Am. Proc., 23, 183-187.
- GARDNER, W.R., 1960 - Dynamic aspects of water availability to plants. Soil Sci., 89, 63-73.
- GASH, J.H.C., 1979 - An analytical model of rainfall interception by forests. Q. J. Roy. Met. Soc., 105, 43-55.
- GASH, J.H.C. et MORTON, A.J., 1978 - An application of the Rutter model to the estimation of the interception loss from Thetford forest. J. Hydrol., 38, 49-59.
- GILLET, M., LEMAIRE, G. et GOSSE, G., 1984 - Essai d'élaboration d'un schéma global de la croissance des graminées fourragères. Agronomie, 4 (1), 75-82.

- HALL, A.E., 1982 - Mathematical models of plant water loss and plant water relations. In Physiological Plant Ecology. II. (Lange, O.L. et al., eds) Springer Verlag, Berlin, 231-256.
- HALLDIN, S. et GRIP, H., 1979 - Actual forest evapotranspiration by a simple model. EOS. Trans. Am. Geophys. Union, 60 (32), 580.
- HALLDIN, S., SAUGIER, B. et PONTAILLER, J.Y., 1985 - Evapotranspiration of a deciduous forest : simulation using routine meteorological data. J. Hydrol., 75, 323-341.
- HELLKVIST, J., RICHARDS, G.P. et JARVIS, P.G., 1975 - Vertical gradients of water potentiel and tissue water relations in sitka spruce trees measured with the pressure chamber. J. Appl. Ecol., 12, 367-380.
- HILLEL, D., 1976 - L'eau et le sol: principes et processus physiques. Masson, Paris.
- HSIAO, T.C., 1973 - Plant responses to water stress. Ann. Rev. Plant Physiol, 24, 571-598.
- IBRAHIM, M.M., 1979 - Recherche sur la dynamique et le bilan de l'eau d'un écosystème à Pin Pignon (Pinus pinea L.) sur sable dunaire. Thèse d'Etat, Université des Sciences et Techniques du Languedoc, Montpellier, 271 p.
- JARVIS, P.G., EDWARDS, W.R. et TALBOT, H., 1981 - Models of plant and crop water use. In Mathematics and Plant Physiology (Rose, D.A. et Charles-Edwards, D.A., eds), Academic Press, London, 151-194.
- KATERJI, N., OULID-AISSA, A.K., 1983 - Etude et amélioration de la fiabilité d'un poromètre à diffusion utilisé en milieu naturel. Agronomie, 3 (9), 931-936.
- KOZLOWSKI, T.T., 1973 - Shedding of plant parts. Academic Press, New York.
- KRAMER, P.J. et KOZLOWSKI, T.T., 1979 - Physiology of woody plants. Academic Press, New York.
- LANDSBERG, J.J. et McMURTRIE, R., 1984 - Water use by isolated trees. Agricultural Water Management, 8, 223-242.
- LAWLOR, D.W. et LAKE, J.V., 1976 - Evaporation rate, leaf water potential and stomatal conductance in Lolium, Trifolium and Lysimachia in drying soil. J. Appl. Ecol., 13, 639-646.
- LEMEE, G., 1966 - Sur l'intérêt écologique des réserves biologiques de la forêt de Fontainebleau. Bull. Soc. Bot. Fr., 113 (5-6), 305-323.

- LEMEE, G., 1974 - Recherches sur les écosystèmes des réserves biologiques de la forêt de Fontainebleau. *Oecol. Plant.*, 9 (3), 187-200.
- LEMEE, G. et FARDJAH, M., 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.
- LEVERENZ, J., DEANS, J.D., FORD, E.D., JARVIS, P.G., MILNE, R. et WHITEHEAD, D., 1982 - Systematic spatial variation of stomatal conductance in a sitka spruce plantation. *J. Appl. Ecol.*, 19, 835-851.
- LINACRE, E.T., 1969 - Net radiation to various surfaces. *J. Appl. Ecol.*, 6, 61-75.
- McILROY, I.C., 1984 - Terminology and concepts in natural evaporation. *Agricultural Water Management*, 8, 77-98.
- MICHNIEWICZ, M., 1967 - The dynamics of gibberellin-like substances and growth inhibitors in ontogeny of conifers. *Wiss. Z. Univ. Rostock, Math. Naturwiss. Riche*, 16, 577-583.
- MILBORROW, B.V., 1974 - The chemistry and physiology of abscisic acid. *Ann. Rev. Plant Physiol.*, 25, 259-279.
- MONTEITH, J.L., 1965 - Evaporation and environment. *In* The state and Movement of Water in Living Organisms (Fogg, G.E., ed.), 19th Symp. Soc. Exp. Biol., The Company of Biologists, Cambridge University Press, 205-234.
- MONTEITH, J.L., SZEICZ, G. et WAGGONER, P.E., 1965 - The measurement and control of stomatal resistance in the field. *J. Appl. Ecol.*, 2, 345-355.
- MONTEITH, J.L. et BULL, T.A., 1970 - Diffusive resistance porometer for field use. *J. Appl. Ecol.*, 7, 617-638.
- NEWMAN, E.I., 1966 - A method of estimating the total length of root in a sample. *J. Appl. Ecol.*, 3, 139-145.
- NIZINSKI, J., 1981 - Premiers éléments du bilan de l'eau d'une futaie de chênes en forêt de Fontainebleau. DEA, Université de Paris-Sud, Orsay, 39 p.
- PASSIOURA, J.B., 1982 - Water in the soil-plant-atmosphere continuum. *In* *Physiological Plant Ecology. II.* (Lange, O.L. et al., eds), Springer Verlag, Berlin 5-30.
- PENMAN, H.L., 1948 - Natural evaporation from open water, bare soil and grass. *Proc. Roy. Soc. London A*, 193, 120-145.

- PERRIER, A., 1976 - Etude et essai de modélisation des échanges de masse et d'énergie au niveau des couverts végétaux : profils microclimatiques, évapotranspiration et photosynthèse nette. Thèse d'Etat, Université P. et M. Curie, Paris VI, 236 p.
- PHILIP, J.R., 1966 - Plant water relationships : some physical aspects. *Ann. Rev. Plant Physiol.*, 17, 245-268.
- PONTAILLER, J.Y., 1979 - La régénération du hêtre en forêt de Fontainebleau, ses relations avec les conditions hydriques stationnelles. Thèse de 3^e cycle, Université de Paris-Sud, Orsay, 98 p.
- RAPP, M. et IBRAHIM, M., 1978 - Egouttement, écoulement et interception des précipitations par un peuplement de Pinus pinea L.. *Oecol. Plant.*, 13 (4), 321-330.
- RAUNER, J.L., 1976 - Deciduous forests. In *Vegetation and the Atmosphere*. Vol. 2, (Monteith, J.L., ed.), Academic Press, London, 241-264.
- REICH, P.B., TESKEY, R.O., JOHNSON, P.S. et HINCKLEY, T.M., 1980 - Periodic root and shoot growth in oak. *Forest Sci.*, 26(4), 590-598.
- RITCHIE, G.A. et HINCKLEY, T.M., 1975 - The pressure chamber as an instrument for ecological research. *Adv. Ecol. Res.*, 9, 165-254.
- ROBERTS, J., 1983 - Forest transpiration : A conservative hydrological process ? *Journal of Hydrology*, 66, 133-141.
- ROBIN, A.M., 1968 - Contribution à l'étude des processus de podzolisation sous forêt de feuillus. Thèse de 3^e cycle, Université de Paris-Sud, Orsay, 88 p.
- ROBINS, P.C., 1974 - A method of measuring the aerodynamic resistance to the transport of water vapour from forest canopies. *J. Appl. Ecol.*, 11, 315-325.
- ROSE, C.W., BYRNE, G.F. et HANSEN, G.K., 1976 - Water transport from soil through plant to atmosphere : a lumped parameters model. *Agric. Meteorol.*, 16, 171-184.
- ROSS, J., 1975 - Radioactive transfer in plant communities. In *Vegetation and the Atmosphere* (Monteith, J.L., ed.), Academic Press, London, 13-52.
- RUTTER, A.J., 1968 - Water consumption by forests. In : *Water Deficits and Plant Growth* (T.T. Kozlowski, ed.), vol. 2, 23-84, Academic Press, New York.
- RUTTER, A.J., 1975 - The hydrological cycle in vegetation. In *Vegetation and the Atmosphere* (Monteith, J.L., ed.), Academic Press, London, 111-154.

- RUTTER, A.J., KERSHAW, K.A., ROBINS, P.C. et MORTON, A.J., 1971 - A predictive model of rainfall interception in forests. I. Derivation of the model from observations in a plantation of Corsican pine. *Agric. Meteorol.*, 9, 367-384.
- RUTTER, A.J., MORTON, A.J. et ROBINS, P.C., 1975 - A predictive model of rainfall interception in forest. II. Generalisation of the model and comparison with observations in some coniferous and hard-wood stands. *J. Appl. Ecol.*, 12, 367-380.
- RUTTER, A.J. et MORTON, A.J., 1977 - A predictive model of rainfall interception in forests. III. Sensitivity of the model to stand parameters and meteorological variables. *J. Appl. Ecol.*, 14, 567-588.
- SAUGIER, B., 1970 - Transports turbulents de CO₂ et de vapeur d'eau au-dessus et à l'intérieur de la végétation. *Méthodes de mesure micrométéorologiques. Oecol. Plant.*, 5, 179-223.
- SAUGIER, B., 1974 - Transports de CO₂ et de vapeur d'eau à l'interface végétation-atmosphère. Interaction du microclimat avec le comportement physiologique de plantes prairiales. Thèse d'Etat, Université des Sciences et Techniques du Languedoc, Montpellier, 155 p.
- SAUGIER, B., 1979 - Alimentation en eau, fixation du CO₂ et production végétale: cas d'une prairie. *In* Photosynthèse et Production Végétale (Costes, C., éd.), Gauthier-Villars, Paris.
- SAUGIER, B., HALLDIN, S., PONTAILLER, J.Y. et NIZINSKI, J., 1985 - Bilan hydrique de forêts de chêne et de hêtre à Fontainebleau. Mesures et modélisation. *In* Compte rendu du 101ème Congrès de l'AFAS, thème "L'eau et la forêt", Nancy, 7-10 Septembre 1983. *Rev. Palais Découverte*, vol. 13, N° 130, Juil.-Août-Sept., 187-200.
- SCHNOCK, G., 1967 - La chênaie mélangée calcicole de Virelles-Blaimont. Réception des précipitations et écoulement le long des troncs en 1966. 15 p., *Bull. Inst. Roy. Sci. Nat. Belg.*, 43/37.
- SCHNOCK, G., 1968 - Bilan des apports hydriques pour 1966 et 1967. *Bull. Soc. Roy. For. de Belg.*, 25, 1-19.
- SCHNOCK, G., 1970 - Le bilan d'eau et ses principales composantes dans une chênaie mélangée calcicole de haute Belgique (Bois de Virelles Blaimont). Thèse, Université Libre de Bruxelles, 352 p.
- SCHNOCK, G., 1972 - Contenu en eau d'une phytocénose et bilan hydrique de l'écosystème : chênaie de Virelles. *Oecol. Plant.*, 7 (3), 205-226.

- SCHONHERR, J., 1982 - Resistance of plant surfaces to water loss : transport properties of cutin, suberin and associated lipids. In *Physiological Plant Ecology*. II. (Lange, O.L. et al, eds), Springer Verlag, Berlin, 153-180.
- SMALL, E., 1972 - Water relations of plants in raised sphagnum peat bogs. *Ecology*, 53, 726-728.
- STEWART, J.B., 1984 - Measurement and prediction of evaporation from forested and agricultural catchments. *Agricultural Water Management*, 8, 1-28.
- TANNER, C.B., 1968 - Evaporation of water from plants and soil. In *Water Deficits and Plant Growth*, vol. I (Kozlowski, T.T., ed.), Academic Press, New York, 77-104.
- THOM, A.S., 1972 - Momentum, mass and heat exchange of vegetation. *Q.J.R. Meteorol. Soc.*, 98, 124-134.
- THOM, A.S., 1975 - Momentum, mass and heat exchange of plant communities. In *Vegetation and the Atmosphere*. Vol. 1 (Monteith, J.L., ed.), Academic Press, London, 57-109.
- THOMSON, A.J. et MONCRIEFF, S.M., 1982 - Prediction of budburst in Douglas fir by degree-day accumulation. *Can J. Forest Res.*, 12, 448-452.
- TURNER, N.C., De ROO, H. et WRIGHT, W.H., 1971 - A pressure chamber for the measurement of plant water potential. *Conn. Ag. Exp. Sta. Special Soils Bull.* XXXIII.
- TURNER, N.C. et HEICHEL, G.H., 1977 - Stomatal development and seasonal changes in diffusive resistance of primary and regrowth foliage of red oak (Quercus rubra L.) and red maple (Acer rubrum L.). *New Phytol.*, 78, 71-81.
- VAN BAVEL, C.H.M. et AHMED, J., 1976 - Dynamic simulation of water depletion in the root zone. *Ecol. Model.*, 2, 189-212.
- VAN DEN HONERT, T.H., 1948 - Water transport in plants as a catenary process. *Discussions of the Faraday Society*, 3, 146-153.
- WEBB, E.K., 1975 - Evaporation from catchments. In *Prediction in catchment Hydrology* (Chapman, I.G. et Dunin, F.X., eds), Aust. Acad. Sci., Canberra, 203-336.
- WIGAN, M.R., 1972 - The fitting, calibration and validation of simulation models. *Simulation*, 18, 188-192.
- ZINCKE, P.J., 1967 - Forest interception studies in the United States. In *Forest Hydrology* (Sopper, W.E. et Lull, H.W., eds), Pergamon Pres, Oxford, 137-161.

Modélisation du bilan de l'eau d'une futaie de chênes
en forêt de Fontainebleau

par Jerzy NIZINSKI

RESUME :

Cette thèse cherche à apprécier quantitativement les principaux processus influençant la circulation de l'eau dans un écosystème forestier relativement stable. Les techniques employées sont d'une part la méthode de l'équation du bilan hydrique et d'autre part la méthode de l'équation de PENMAN-MONTEITH.

A partir des résultats expérimentaux obtenus nous avons pu modéliser sur une base journalière l'évapotranspiration réelle du couvert et les variations du stock d'eau du sol.

Pour mettre au point ce modèle il a fallu établir des sous-modèles sur les points suivants : la date de débourrement des feuilles de chêne et l'évolution dans le temps de LAI et l'évolution dans le temps de la résistance stomatique foliaire minimale.

L'accord entre les mesures et l'évolution du stock d'eau du sol est satisfaisant, ce qui permet de généraliser les mesures obtenues à d'autres années lorsqu'on connaît les variables météorologiques d'entrée du modèle (rayonnement global, température de l'air, température de rosée, vitesse du vent et précipitations à découvert). Ce modèle permet notamment de bien caractériser la durée et l'intensité des épisodes de sécheresse qui peuvent affecter de façon significative la production de bois.

Mots-clés : Modélisation du bilan d'eau - Quercus petraea -
Indice foliaire - Résistance stomatique.

A simulation of the water balance in an oak forest
near Fontainebleau

SUMMARY :

Our objective was to quantify the main processes which have an influence on the water balance in a mature oak forest.

The actual evapotranspiration component of the water balance is the dominant process; it has been studied using the following methods : a water balance equation and the PENMAN'S equation, presented by MONTEITH for a single leaf.

A hydrologic model has been developed with one day time resolution; it was conceived to work with routine meteorological data. The model predicts : actual evapotranspiration from the forest arch, and soil-water content.

We developed the empirical models to predict : dates of the budburst, of full leaf area development, and of the beginning and the end of leaves' senescence and evolution of the average stomatal conductance, soil water potential and leaf water potential.

A validation of the model was attempted for a Quercus petraea stand in Fontainebleau forest (the growing seasons of 1981, 1982 and 1983). Simulated leaf area index, throughfall and soil-water content were in good agreement with the measurements.

We have found this model useful for the qualification of tree water stress which has numerous applications such as assessing stand productivity, disease and insect epidemic susceptibility, fire danger rating and nutrient cycling.

Key words : Water balance modelling - Quercus petraea -
Leaf area index - Stomatal resistance.

- A N N E X E -

N°	Date	N° du tube				N° du tube					CROS-FONTEAU
		21	22	23	24	25	26	27	28	29	
1	29. 1.1981-19. 3.1981	85.57	83.34	82.62	81.38	85.62	89.82	88.32	82.59	86.53	84.19
2	19. 3.1981-26. 3.1981	12.64	12.35	12.22	11.77	12.41	13.33	11.95	12.26	12.73	12.48
3	26. 3.1981-24. 4.1981	38.98	31.48	33.58	29.68	32.88	35.65	38.66	33.94	36.28	32.78
4	24. 4.1981-14. 5.1981	37.82	32.78	34.38	34.67	35.29	39.12	35.35	36.42	39.69	37.68
5	14. 5.1981- 5. 6.1981	65.36	57.46	62.41	62.27	58.37	57.45	65.35	64.89	51.88	68.54
6	5. 6.1981- 2. 7.1981	46.55	48.92	51.23	44.14	45.12	49.43	47.89	43.21	32.91	45.71
7	2. 7.1981-23. 7.1981	27.67	24.87	31.55	24.88	27.24	38.24	27.83	24.93	24.33	27.86
8	23. 7.1981- 3. 8.1981	56.13	58.66	48.35	58.99	55.99	57.53	44.72	48.53	59.71	59.18
9	3. 8.1981-18. 8.1981	51.36	45.28	49.38	45.47	43.32	47.84	46.58	46.41	44.29	46.66
10	18. 8.1981- 3. 9.1981	3.87	5.51	3.73	2.95	4.27	4.75	2.95	4.89	4.61	3.86
11	3. 9.1981-18. 9.1981	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
12	18. 9.1981-18. 9.1981	8.41	8.41	8.41	8.00	8.41	8.41	8.00	8.00	8.56	8.34
13	18. 9.1981-29. 9.1981	23.93	23.31	27.33	28.98	25.68	28.34	22.31	28.74	28.96	25.51
14	29. 9.1981-28.10.1981	74.54	68.54	72.00	68.00	71.47	75.88	72.81	79.18	82.58	73.99
15	28.10.1981- 6.11.1981	29.24	28.57	29.94	29.58	27.29	27.29	28.52	25.59	24.98	28.18
16	6.11.1981-28.12.1981	127.38	127.63	124.14	122.19	134.47	134.47	122.89	129.99	134.88	128.68
17	28.12.1981-24. 1.1982	99.68	98.29	98.93	93.34	104.62	105.54	98.33	104.82	105.99	99.44
18	24. 1.1982- 4. 3.1982	25.17	32.99	32.31	33.58	35.88	37.23	32.39	35.32	34.91	34.44
19	4. 3.1982-11. 3.1982	18.44	18.48	18.15	18.19	12.84	12.83	10.32	11.65	11.84	11.81
20	11. 3.1982-17. 3.1982	18.99	9.58	9.51	18.36	18.93	18.66	9.59	18.61	18.57	18.38
21	17. 3.1982-25. 3.1982	3.88	3.84	4.23	3.72	4.12	4.47	3.78	4.27	4.22	4.84
22	25. 3.1982- 9. 4.1982	18.14	17.88	19.14	17.89	28.38	22.35	19.48	21.32	21.84	19.82
23	9. 4.1982-16. 4.1982	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
24	16. 4.1982-22. 4.1982	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
25	22. 4.1982-26. 4.1982	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
26	26. 4.1982- 7. 5.1982	6.37	4.98	6.75	5.54	5.44	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
27	7. 5.1982-13. 5.1982	11.93	11.34	12.55	11.48	11.88	7.18	5.65	6.15	6.31	6.85
28	13. 5.1982-25. 5.1982	16.16	15.54	17.42	28.98	18.83	18.49	22.42	28.19	18.38	18.78
29	25. 5.1982- 9. 6.1982	12.53	13.48	17.38	16.58	15.37	15.52	28.39	19.17	16.28	16.78
30	9. 6.1982-17. 6.1982	19.95	19.54	21.28	19.74	18.89	19.58	28.48	19.64	17.67	19.64
31	17. 6.1982-24. 6.1982	3.26	3.72	4.77	3.73	3.82	3.65	4.95	4.28	3.31	3.84
32	24. 6.1982- 1. 7.1982	16.16	13.58	14.83	13.94	13.15	14.32	14.44	14.65	13.74	14.34
33	1. 7.1982- 8. 7.1982	2.35	2.23	3.07	2.32	2.38	2.73	2.07	3.88	2.92	2.66
34	8. 7.1982-15. 7.1982	2.99	2.64	3.52	2.56	2.62	3.56	2.78	2.51	2.51	2.85
35	15. 7.1982-22. 7.1982	9.55	9.48	18.44	8.59	9.19	18.66	9.49	8.93	8.95	9.48
36	22. 7.1982-29. 7.1982	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
37	29. 7.1982- 5. 8.1982	6.19	6.23	7.31	6.51	4.92	5.81	6.91	6.28	6.34	6.19
38	5. 8.1982-12. 8.1982	1.78	1.49	2.36	2.78	2.45	2.13	2.83	3.28	2.43	2.48
39	12. 8.1982-24. 8.1982	1.42	1.38	2.13	1.44	1.42	1.98	1.89	1.63	1.52	1.65
40	24. 8.1982- 3. 9.1982	4.71	4.89	5.59	5.34	5.32	5.61	6.13	5.37	5.38	5.38
41	3. 9.1982-13. 9.1982	5.03	4.92	3.88	4.29	3.99	3.78	4.06	4.17	4.85	4.87
42	13. 9.1982-28. 9.1982	8.27	8.24	8.36	8.24	8.37	8.27	8.27	8.27	8.27	8.38
43	28. 9.1982-38. 9.1982	53.21	53.28	57.39	54.93	59.66	62.33	62.43	65.88	65.61	59.32
44	38. 9.1982-14.10.1982	78.75	78.89	74.89	65.41	74.28	84.83	73.79	79.44	88.85	74.96
45	14.10.1982-27.10.1982	21.74	21.44	23.18	21.44	25.25	28.67	24.48	25.66	27.98	24.47
46	27.10.1982-18.11.1982	38.52	35.57	32.48	32.55	37.36	39.15	33.13	37.35	38.28	36.83
47	18.11.1982-29.11.1982	23.84	28.74	18.39	28.89	27.13	21.55	19.92	21.26	21.48	28.94
48	29.11.1982-21.12.1982	97.68	95.88	91.36	95.41	189.83	189.24	96.39	187.13	188.31	181.16
49	21.12.1982-11. 1.1983	24.85	28.66	18.48	19.94	21.17	28.74	28.41	28.41	28.71	28.56
50	11. 1.1983- 1. 2.1983	23.74	21.63	19.81	21.27	23.87	21.53	19.94	22.84	21.94	28.56
51	1. 2.1983-15. 3.1983	53.66	53.18	53.53	54.88	61.15	62.35	55.76	59.22	68.44	57.84
52	15. 3.1983-28. 3.1983	127.15	118.58	116.14	122.15	122.65	122.48	118.88	121.87	123.57	121.58
53	28. 3.1983- 3. 5.1983	29.48	26.84	27.78	26.58	27.38	28.48	26.69	28.41	28.88	27.72
54	3. 5.1983- 4. 5.1983	8.92	1.83	8.98	8.92	1.88	1.82	8.93	8.93	8.92	1.85
55	4. 5.1983-11. 5.1983	11.87	11.72	11.92	18.28	18.54	12.95	12.95	12.13	12.49	11.87
56	11. 5.1983-18. 5.1983	16.58	16.75	15.88	16.96	18.24	16.65	18.29	18.48	17.27	17.22
57	18. 5.1983-25. 5.1983	18.34	18.88	18.55	17.93	16.33	14.59	16.18	14.74	12.84	16.48
58	25. 5.1983-21. 6.1983	5.37	5.59	5.49	5.52	6.88	5.86	5.92	5.98	5.84	5.72
59	21. 6.1983-29. 6.1983	17.73	17.68	21.54	17.32	16.96	17.87	22.19	21.36	16.99	18.74
60	29. 6.1983- 4. 7.1983	12.23	13.88	11.61	11.98	12.95	12.44	13.36	13.98	11.87	12.68
61	4. 7.1983-13. 7.1983	8.82	8.82	8.82	8.82	8.82	8.82	8.82	8.82	8.82	8.82
62	13. 7.1983-28. 7.1983	45.57	42.74	44.73	43.88	42.66	46.31	45.32	43.93	43.12	44.38
63	28. 7.1983-27. 7.1983	19.29	19.27	19.92	18.48	19.88	19.92	19.93	19.25	18.43	19.29
64	27. 7.1983- 3. 8.1983	4.86	4.38	4.95	4.27	4.21	4.73	4.86	4.88	4.92	4.57
65	3. 8.1983-18. 8.1983	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
66	18. 8.1983-24. 8.1983	2.22	1.52	1.74	1.72	2.82	1.94	1.58	2.15	1.78	1.85
67	24. 8.1983-21. 9.1983	42.72	37.72	42.42	42.42	43.42	44.85	46.31	49.75	45.86	43.96
68	21. 9.1983- 7.10.1983	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
69	7.10.1983-14.10.1983	1.11	1.82	1.54	1.28	1.66	1.63	1.54	1.94	1.83	1.51
70	14.10.1983-21.10.1983	4.86	4.35	3.94	4.46	4.81	4.68	4.47	4.91	4.74	4.58
71	21.10.1983-28.10.1983	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
72	28.10.1983- 4.11.1983	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
73	4.11.1983-18.11.1983	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
74	18.11.1983-18.11.1983	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
75	18.11.1983-16.12.1983	35.15	35.84	31.91	31.96	37.15	34.53	29.49	34.12	34.12	33.72

Tableau 01 - Les résultats des mesures des précipitations au sol effectuées sur la station d'études du 19 Janvier 1981 au 16 Décembre 1983, valeurs moyennes du tube 21 et de l'ensemble du peuplement (moyenne de neuf tubes)

Tableau 02 - Les résultats des mesures de l'écoulement le long des troncs d'arbres effectuées sur la station d'études du 11 Mars 1982 au 16 Décembre 1983.

Numero	Date	Ecoulement, en mm		Moyenne
		No 3	No 16	
1	11. 3.1982-16. 3.1982	0.02	0.07	0.04
2	17. 3.1982-24. 3.1982	0.01	0.02	0.01
3	25. 3.1982- 8. 4.1982	0.07	0.19	0.13
4	9. 4.1982-15. 4.1982	0.00	0.00	0.00
5	16. 4.1982-21. 4.1982	0.00	0.00	0.00
6	22. 4.1982-25. 4.1982	0.00	0.00	0.00
7	26. 4.1982- 6. 5.1982	0.01	0.02	0.01
8	7. 5.1982-12. 5.1982	0.01	0.02	0.01
9	13. 5.1982-24. 5.1982	0.02	0.04	0.03
10	25. 5.1982- 8. 6.1982	0.02	0.06	0.04
11	9. 6.1982-16. 6.1982	0.02	0.09	0.06
12	17. 6.1982-23. 6.1982	0.00	0.01	0.01
13	24. 6.1982-30. 6.1982	0.01	0.06	0.04
14	1. 7.1982- 7. 7.1982	0.00	0.01	0.01
15	8. 7.1982-14. 7.1982	0.00	0.00	0.00
16	15. 7.1982-22. 7.1982	0.01	0.04	0.03
17	23. 7.1982-28. 7.1982	0.00	0.00	0.00
18	29. 7.1982- 4. 8.1982	0.00	0.02	0.01
19	5. 8.1982-11. 8.1982	0.00	0.01	0.01
20	12. 8.1982-25. 8.1982	0.00	0.00	0.00
21	26. 8.1982- 2. 9.1982	0.00	0.02	0.01
22	3. 9.1982-11. 9.1982	0.00	0.00	0.00
23	12. 9.1982-19. 9.1982	0.00	0.00	0.00
24	14.10.1982-26.10.1982	0.02	0.12	0.07
25	27.10.1982-17.11.1982	0.04	0.26	0.15
26	18.11.1982-28.11.1982	0.04	0.16	0.10
27	29.11.1982-20.12.1982	0.47	2.33	1.40
28	21.12.1982-10. 1.1983	0.03	0.14	0.08
29	11. 1.1983-31. 1.1983	0.03	0.17	0.10
30	1. 2.1983-14. 3.1983	0.15	2.59	1.37
31	15. 3.1983-19. 4.1983	0.19	2.94	1.56
32	20. 4.1983- 3. 5.1983	0.14	2.53	1.33
33	4. 5.1983-10. 5.1983	0.01	0.06	0.04
34	11. 5.1983-17. 5.1983	0.01	0.09	0.05
35	18. 5.1983-24. 5.1983	0.01	0.06	0.04
36	25. 5.1983-20. 6.1983	0.00	0.02	0.01
37	21. 6.1983-28. 6.1983	0.02	0.04	0.03
38	29. 6.1983- 5. 7.1983	0.00	0.03	0.01
39	6. 7.1983-12. 7.1983	0.00	0.00	0.00
40	13. 7.1983-26. 7.1983	0.07	0.35	0.21
41	27. 7.1983- 2. 8.1983	0.00	0.02	0.01
42	3. 8.1983- 9. 8.1983	0.00	0.00	0.00
43	10. 8.1983-23. 8.1983	0.00	0.00	0.00
44	24. 8.1983-13.10.1983	0.02	0.04	0.03
45	14.10.1983-20.10.1983	0.00	0.00	0.00
46	21.10.1983-27.10.1983	0.00	0.00	0.00
47	28.10.1983- 3.11.1983	0.00	0.00	0.00
48	4.11.1983- 9.11.1983	0.00	0.00	0.00
49	10.11.1983-17.11.1983	0.00	0.00	0.00
50	18.11.1983-16.12.1983	0.05	1.02	0.53

Tableau 03 - Les résultats des mesures de la rétention en eau du sol effectuées sur la station d'études, valeurs du tube 21.

RE1 - rétention en eau de la couche 00-10 cm en mm
 RE2 - rétention en eau de la couche 10-20 cm en mm
 RE3 - rétention en eau de la couche 20-30 cm en mm
 RE4 - rétention en eau de la couche 30-40 cm en mm
 RE5 - rétention en eau de la couche 40-50 cm en mm
 RE6 - rétention en eau de la couche 50-60 cm en mm
 RE7 - rétention en eau de la couche 60-70 cm en mm
 REPROFIL - rétention en eau du profil du sol en mm

DATE	RE1	RE2	RE3	RE4	RE5	RE6	RE7	REPROFIL
	mm							
30. 3.81	25.34	16.66	20.41	27.84	31.58	27.65	25.06	174.54
24. 4.81	23.22	15.95	19.25	26.55	31.64	27.22	24.55	168.38
14. 5.81	25.03	16.66	19.89	27.84	32.13	27.11	24.76	173.42
5. 6.81	26.33	17.08	20.60	30.13	31.58	26.95	25.22	178.13
2. 7.81	24.64	15.88	20.38	28.25	31.38	26.68	23.71	170.91
23. 7.81	28.31	18.13	19.70	24.91	29.20	25.49	22.63	168.37
2. 8.81	29.46	20.04	24.91	31.18	31.58	26.79	24.57	188.52
18. 8.81	23.57	15.73	19.81	26.71	31.06	27.03	24.66	168.57
3. 9.81	19.24	12.50	14.23	23.30	27.29	25.65	22.31	144.56
10. 9.81	17.03	10.63	12.95	16.85	19.10	24.41	21.55	122.51
18. 9.81	15.08	8.38	11.38	15.35	17.86	23.17	20.47	111.68
29. 9.81	23.22	14.30	14.08	13.33	17.60	22.85	20.20	125.57
20.10.81	24.99	15.88	20.08	28.25	29.95	25.87	23.17	168.18
6.11.81	25.88	17.38	20.75	30.13	31.58	26.95	24.90	177.55
26. 1.82	26.49	17.08	21.28	28.21	30.80	27.09	23.22	174.16
26. 2.82	23.88	16.36	20.38	26.60	30.15	26.25	22.93	166.54
17. 3.82	27.47	18.50	22.85	30.35	31.45	26.36	23.33	180.30
16. 4.82	24.02	15.73	19.48	26.98	31.09	27.25	23.12	167.64
22. 4.82	22.91	15.09	19.14	26.98	30.96	27.49	22.77	165.32
13. 5.82	25.43	14.90	19.18	24.99	29.82	26.19	23.23	163.71
25. 5.82	25.74	16.72	18.84	26.04	30.60	26.36	23.55	167.85
1. 6.82	24.77	14.83	17.08	23.00	28.72	26.63	22.79	157.80
9. 6.82	22.51	14.41	17.15	23.53	28.39	25.33	22.85	154.17
17. 6.82	24.11	15.43	19.36	24.80	28.91	23.93	21.44	157.97
24. 6.82	21.89	13.44	15.46	20.79	26.44	23.33	20.85	142.20
1. 7.82	25.61	15.13	16.55	23.00	26.99	23.28	20.23	150.76
8. 7.82	18.80	10.89	12.91	19.78	23.97	21.93	19.44	127.71
15. 7.82	12.73	5.53	7.96	12.65	18.67	19.01	17.28	93.84
22. 7.82	10.65	4.74	6.54	10.89	16.85	17.66	16.53	83.86
29. 7.82	10.08	4.03	5.75	9.80	14.68	17.15	16.02	77.49
5. 8.82	11.14	4.25	5.60	9.20	14.03	16.77	15.12	76.11
12. 8.82	8.66	2.79	4.93	8.83	15.91	16.74	14.94	72.79
26. 8.82	7.51	2.30	4.14	8.19	15.00	16.04	14.13	67.30
3. 9.82	8.00	2.49	4.18	8.11	14.87	15.69	14.18	67.51
12. 9.82	7.16	2.23	4.14	8.15	14.25	15.56	14.83	66.31
20. 9.82	7.82	2.34	3.88	7.85	14.61	15.34	13.56	65.39
30. 9.82	20.92	11.92	12.95	15.65	18.41	17.45	14.64	111.94
14.10.82	27.25	15.39	17.75	26.60	30.41	24.54	17.88	159.80
27.10.82	25.48	15.35	19.10	24.91	30.50	25.65	22.20	163.19
29.11.82	25.08	15.88	18.91	27.13	31.35	27.36	24.84	170.54
21.12.82	26.76	16.36	20.00	26.98	31.67	27.38	25.65	174.81
11. 1.83	26.23	16.36	19.89	27.09	31.67	27.11	25.38	173.74
1. 2.83	25.26	16.25	18.22	25.48	28.91	26.55	22.79	163.45
21. 2.83	20.61	14.15	16.14	23.79	28.33	25.98	21.98	150.97
15. 3.83	22.47	14.94	17.15	23.64	29.33	25.98	23.52	157.02
20. 4.83	27.16	16.93	19.70	26.38	31.38	27.19	31.65	180.38
4. 5.83	26.18	16.25	19.05	25.66	31.38	27.17	31.11	176.80
11. 5.83	25.39	15.92	19.03	25.44	31.38	26.84	30.30	174.29
18. 5.83	25.08	15.50	17.94	25.10	31.72	26.30	30.08	171.32
25. 5.83	24.19	15.16	17.34	24.88	31.12	25.84	29.94	168.47
21. 6.83	15.61	8.98	11.26	15.86	22.48	22.33	20.77	117.00
29. 6.83	14.10	6.80	14.45	13.51	21.86	21.06	19.77	111.56
6. 7.83	14.28	6.80	13.59	16.35	20.27	20.20	18.58	110.06
13. 7.83	16.41	7.33	12.88	16.21	19.68	18.20	16.96	107.66
27. 7.83	21.83	12.54	13.51	16.03	18.32	17.04	16.04	115.31
3. 8.83	15.03	8.38	10.03	13.14	16.95	16.77	15.23	95.52
10. 8.83	9.06	4.29	5.60	9.69	16.14	16.37	15.04	76.18
24. 8.83	7.82	2.30	4.36	7.36	15.72	15.77	14.29	67.62
21. 9.83	15.48	8.38	8.23	9.35	15.00	15.85	13.50	85.78
14.10.83	7.73	2.79	4.06	8.15	14.94	15.85	13.18	66.70
21.10.83	8.79	3.31	4.55	7.78	14.94	16.10	13.48	68.94
28.10.83	8.26	2.53	3.88	8.41	15.26	15.61	13.64	67.59
4.11.83	8.35	2.64	4.25	7.93	14.90	15.66	13.88	67.61
10.11.83	8.00	2.26	4.25	7.70	14.97	15.56	13.99	66.72
18.11.83	8.18	2.23	4.29	7.40	14.71	15.56	13.99	66.34
16.12.83	16.54	8.90	9.00	10.14	15.52	16.37	14.56	91.02

Tableau 04 - L'influence du potentiel hydrique des feuilles (Ψ_f) sur la résistance stomatique moyenne (r_s). Mesures effectuées au Gros-Fouteau:

- (a) le 09 Juin 1982; (b) le 06 Mai 1983; (c) le 10 Mai 1983;
- (d) le 17 Mai 1983; (e) le 29 Juin 1983; (f) le 06 Juillet 1983;
- (g) le 20 Juillet 1983; (h) 21 Septembre 1983; (i) le 07 Octobre 1983.

(a) le 09 Juin 1982

Heure	Température, en °C		Nombre des coups		Conductance stomatique (c_s), en cm^{-1}	Résistance stomatique (r_s), en cm^{-1}	Pression foliaire (Ψ_f), en bars
	feuille (t_f)	chambre (t_{ch})	mesurés (MC)	corrigés (MCC)			
15.25	27.5	28.4	47	53.1342	0.8340	1.1991	15.50
15.35	27.1	28.0	54	61.1504	0.6010	1.6640	15.50
15.45	27.5	28.0	79	84.4885	0.3427	2.9183	19.50
15.55	27.8	28.2	40	42.1881	2.1912	0.4564	12.00
16.04	27.2	28.1	37	41.8950	2.3043	0.4340	10.50
16.15	27.0	27.4	37	40.1380	3.3152	0.3016	9.50
16.28	26.9	27.2	39	40.5916	3.0517	0.3277	8.50

Courbes d'escalage du paramètre pour la température de la chambre:

$$\begin{aligned}
 t_{ch} = 27.2^\circ\text{C} & \quad r_s = 0.8829 \times (\text{MCC})^{0.5} - 5.2974 \text{ cm}^{-1} \\
 t_{ch} = 27.6^\circ\text{C} & \quad r_s = 0.8986 \times (\text{MCC})^{0.5} - 5.3914 \text{ cm}^{-1} \\
 t_{ch} = 28.0^\circ\text{C} & \quad r_s = 0.9143 \times (\text{MCC})^{0.5} - 5.4857 \text{ cm}^{-1} \\
 t_{ch} = 28.1^\circ\text{C} & \quad r_s = 0.9182 \times (\text{MCC})^{0.5} - 5.5092 \text{ cm}^{-1} \\
 t_{ch} = 28.2^\circ\text{C} & \quad r_s = 0.9221 \times (\text{MCC})^{0.5} - 5.5329 \text{ cm}^{-1} \\
 t_{ch} = 28.4^\circ\text{C} & \quad r_s = 0.9300 \times (\text{MCC})^{0.5} - 5.5800 \text{ cm}^{-1}
 \end{aligned}$$

(b) le 06 Mai 1983

Heure	Température, en °C		Nombre des coups		Conductance stomatique (c_s), en cm^{-1}	Résistance stomatique (r_s), en cm^{-1}	Pression foliaire (Ψ_f), en bars
	feuille	chambre	mesurés (MC)	corrigés (MCC)			
14.05	30.6	31.0	133	142.0266	0.1637	6.1071	5.2
14.10	30.8	30.8	175	189.4648	0.1257	7.9534	12.0
14.16	30.8	30.7	238	239.6509	0.1034	9.6744	9.8
14.20	30.8	30.9	214	216.7588	0.1115	8.9709	5.5
14.25	31.0	31.0	203	201.0000	0.1175	8.5123	11.3
14.30	30.8	30.8	228	228.9158	0.1078	9.2795	10.8
14.35	30.8	30.9	168	193.3779	0.1230	8.1289	12.2
14.40	30.4	30.8	199	209.6718	0.1151	8.8882	5.7
14.46	30.6	30.7	173	177.5199	0.1336	7.4734	8.6
14.50	30.8	31.0	175	179.5649	0.1309	7.6374	10.6
14.56	30.7	30.9	140	141.8043	0.1652	6.0518	6.9
15.00	30.8	30.8	181	181.0000	0.1300	7.6926	11.7
15.05	30.8	30.7	173	175.2308	0.1354	7.3654	9.3
15.10	30.6	30.8	192	197.0190	0.1224	8.1879	7.8
15.15	30.8	30.8	181	190.7170	0.1280	7.9379	10.2
15.20	30.1	30.8	158	166.8110	0.1424	7.0209	8.3

Courbes d'escalage du paramètre pour la température de la chambre:

$$\begin{aligned}
 t_{ch} = 30.6^\circ\text{C} & \quad r_s = 1.0184 \times (\text{MCC})^{0.5} - 6.0986 \text{ cm}^{-1} \\
 t_{ch} = 30.7^\circ\text{C} & \quad r_s = 1.0204 \times (\text{MCC})^{0.5} - 6.1221 \text{ cm}^{-1} \\
 t_{ch} = 30.8^\circ\text{C} & \quad r_s = 1.0243 \times (\text{MCC})^{0.5} - 6.1457 \text{ cm}^{-1} \\
 t_{ch} = 30.9^\circ\text{C} & \quad r_s = 1.0282 \times (\text{MCC})^{0.5} - 6.1693 \text{ cm}^{-1} \\
 t_{ch} = 31.0^\circ\text{C} & \quad r_s = 1.0321 \times (\text{MCC})^{0.5} - 6.1929 \text{ cm}^{-1}
 \end{aligned}$$

(c) le 10 Mai 1983

Heure	Température, en °C		Nombre des coups		Conductance sto- -matique (σ_s), en cm^{-1}	Résistance sto- -matique (r_s), en cm^{-1}	Pression foliaire (P_f), en bars
	feuille	chambre	mesurés (MC)	corrigés (MCC)			
1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.
14.06	18.8	18.0	131	134.4507	0.3813	3.1132	7.5
14.10	18.7	18.0	131	136.6846	0.3910	3.4381	7.0
14.15	18.4	18.5	131	132.8508	0.3071	3.2588	7.5
14.20	18.4	18.5	97	98.3704	0.4331	2.3091	8.5
14.25	18.5	19.0	138	137.5335	0.2893	3.4572	7.0
14.30	18.6	19.0	135	142.3259	0.2782	3.5947	8.5
14.35	19.1	19.5	107	111.2632	0.3466	2.9016	8.5
14.40	19.5	20.0	93	99.8881	0.3938	2.5391	8.0
14.45	19.3	19.5	158	160.4359	0.2400	4.1865	9.0
14.50	20.8	21.0	181	170.3174	0.2135	4.8838	7.5
14.55	20.7	21.0	158	141.8188	0.2568	3.9253	8.0
15.00	20.4	20.5	178	180.4780	0.2089	4.8328	9.0
15.05	19.8	20.0	138	139.7895	0.2917	3.4279	8.0
15.10	18.7	20.0	144	150.2134	0.2514	3.9789	7.5
15.15	18.8	20.0	132	135.7432	0.2784	3.5922	8.0
15.20	19.5	20.0	148	156.8104	0.2412	4.1482	9.0
15.30	19.4	19.5	124	125.7383	0.3088	3.2583	7.0

Courbes d'étalonnage du porométre pour la température de la chambre:

$$\begin{aligned}
 t_{ch} = 18.5^\circ\text{C} & \quad r_s = 0.5883 \times (\text{MCC})^{0.5} - 3.5357 \text{ cm}^{-1} \\
 t_{ch} = 18.0^\circ\text{C} & \quad r_s = 0.4038 \times (\text{MCC})^{0.5} - 3.6214 \text{ cm}^{-1} \\
 t_{ch} = 19.5^\circ\text{C} & \quad r_s = 0.8260 \times (\text{MCC})^{0.5} - 3.7500 \text{ cm}^{-1} \\
 t_{ch} = 20.0^\circ\text{C} & \quad r_s = 0.6357 \times (\text{MCC})^{0.5} - 3.8143 \text{ cm}^{-1} \\
 t_{ch} = 20.5^\circ\text{C} & \quad r_s = 0.6500 \times (\text{MCC})^{0.5} - 3.9000 \text{ cm}^{-1} \\
 t_{ch} = 21.0^\circ\text{C} & \quad r_s = 0.6643 \times (\text{MCC})^{0.5} - 3.9857 \text{ cm}^{-1}
 \end{aligned}$$

(d) le 17 Mai 1983

Heure	Température, en °C		Nombre des coups		Conductance sto- -matique (σ_s), en cm^{-1}	Résistance sto- -matique (r_s), en cm^{-1}	Pression foliaire (P_f), en bars
	feuille (t_f)	chambre (t_{ch})	mesurés (MC)	corrigés (MCC)			
1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.
11.22	11.9	12.0	156	158.3340	0.3866	2.5866	6.50
11.25	12.2	13.0	106	119.9612	0.4790	2.0874	5.80
11.30	12.4	13.0	195	213.6484	0.2754	3.6315	5.50
11.35	12.0	12.0	204	204.0000	0.3073	3.2543	5.00
11.40	12.0	12.0	204	204.0000	0.3073	3.2543	4.75
14.30	13.5	14.0	133	143.3673	0.3691	2.7092	4.50
14.35	15.5	16.0	130	140.0178	0.3333	2.9999	5.50
14.40	15.6	16.0	132	140.0140	0.3333	2.9999	5.20
14.45	15.4	15.5	121	122.7587	0.3951	2.5309	5.30
14.50	15.2	15.5	147	153.6018	0.3139	3.1855	5.40
14.55	14.8	15.0	151	155.4603	0.3207	3.1181	5.75
15.00	14.9	15.0	88	89.2808	0.6015	1.6624	5.75
15.05	14.5	15.0	79	85.1042	0.6433	1.5546	5.75
15.10	14.3	14.5	121	124.5887	0.4140	2.4155	5.75
15.15	14.2	14.5	144	150.5026	0.3409	2.9329	6.50
15.20	13.8	14.0	139	143.1403	0.3697	2.7049	5.20
15.25	14.0	14.5	123	132.5446	0.3876	2.5797	6.75
15.30	14.2	14.5	87	90.9287	0.6043	1.6548	6.00
15.35	14.1	14.5	124	131.5801	0.3906	2.5601	6.25
15.40	14.0	14.5	124	133.6222	0.3844	2.6015	6.00
15.45	14.4	14.5	94	95.3736	0.5674	1.7625	5.80
15.50	14.5	14.5	118	118.0000	0.4416	2.2645	4.00
15.55	14.3	14.5	105	108.1141	0.4859	2.0581	5.00
16.00	14.2	14.5	91	95.1093	0.5694	1.7562	6.00
16.05	13.2	14.0	62	70.1120	0.9293	1.0761	6.20

Curbes d'étalonnage du porométre pour la température de la chambre:

$$\begin{aligned}
 t_{ch} = 12.0^\circ\text{C} & \quad r_s = 0.3928 \times (\text{MCC})^{0.5} - 2.3560 \text{ cm}^{-1} \\
 t_{ch} = 13.0^\circ\text{C} & \quad r_s = 0.4214 \times (\text{MCC})^{0.5} - 2.5280 \text{ cm}^{-1} \\
 t_{ch} = 14.0^\circ\text{C} & \quad r_s = 0.4536 \times (\text{MCC})^{0.5} - 2.7220 \text{ cm}^{-1} \\
 t_{ch} = 14.5^\circ\text{C} & \quad r_s = 0.4678 \times (\text{MCC})^{0.5} - 2.8060 \text{ cm}^{-1} \\
 t_{ch} = 15.0^\circ\text{C} & \quad r_s = 0.4821 \times (\text{MCC})^{0.5} - 2.8929 \text{ cm}^{-1} \\
 t_{ch} = 15.5^\circ\text{C} & \quad r_s = 0.4982 \times (\text{MCC})^{0.5} - 2.9890 \text{ cm}^{-1} \\
 t_{ch} = 16.0^\circ\text{C} & \quad r_s = 0.5143 \times (\text{MCC})^{0.5} - 3.0857 \text{ cm}^{-1}
 \end{aligned}$$

(e) le 29 Juin 1983

Heure	Température, en °C		Nombre des coups		Conductance sto- -matique (σ_s), en cm^{-1}	Résistance sto- -matique (r_s), en cm^{-1}	Pression foliaire (Ψ_f), en bars
	feuille	chambre	mesurés (NC)	corrigés (NCC)			
13.45	22.8	24.0	68	71.8314	0.5337	1.8738	10.0
13.50	22.1	23.5	68	65.5087	0.6445	1.5517	10.8
13.55	22.4	24.0	63	68.4769	0.5931	1.6861	10.7
14.00	22.3	22.5	59	60.8935	0.7555	1.3237	10.4
14.10	22.5	24.0	58	55.7147	0.8023	1.1083	10.2
14.15	22.4	24.0	74	60.4356	0.4450	2.2473	10.9

Courbes d'étalonnage du paramètre pour la température de la chambre:

$$\begin{aligned}
 r_s &= 0.7411 \times (\text{NCC})^{0.5} - 4.468 \text{ cm}^{-1} \\
 r_s &= 0.7571 \times (\text{NCC})^{0.5} - 4.5429 \text{ cm}^{-1}
 \end{aligned}$$

(f) le 06 Juillet 1983

Heure	Température, en °C		Nombre des coups		Conductance sto- -matique (σ_s), en cm^{-1}	Résistance sto- -matique (r_s), en cm^{-1}	Pression foliaire (Ψ_f), en bars
	feuille (t_f)	chambre (t_{ch})	mesurés (NC)	corrigés (NCC)			
11.10	23.6	24.0	65	68.6624	0.5778	1.7306	7.50
11.30	22.9	23.0	76	77.0360	0.4967	2.0133	6.60
11.45	22.6	23.0	52	54.9564	0.9760	1.0246	6.10
14.30	26.5	27.0	51	54.5718	0.8238	1.2139	12.00
14.35	28.4	28.5	53	53.6942	0.8067	1.2397	11.90
14.40	27.0	27.5	66	70.6033	0.4653	2.1490	12.30
14.45	27.3	27.5	71	72.9012	0.4404	2.2704	17.00
14.50	26.8	27.0	96	98.5809	0.2909	3.4377	20.00
14.5*	27.5	28.0	74	79.1411	0.3776	2.6480	16.50
15.1.	29.1	30.0	247	279.1001	0.0941	10.6306	25.00
15.05	30.2	31.0	136	151.3952	0.1537	6.5063	23.00
15.10	31.0	32.0	241	275.6540	0.0880	11.3597	25.50
15.15	30.8	31.0	66	67.7216	0.4347	2.3006	16.50
15.20	29.3	30.0	172	188.8978	0.1300	7.6893	24.00
15.25	29.7	30.0	110	114.3853	0.2145	4.6621	23.00
15.30	29.2	30.0	170	189.3589	0.1298	7.7060	24.50
15.35	29.8	30.0	111	113.9114	0.2155	4.6400	23.50

Courbes d'étalonnage du paramètre pour la température de la chambre:

$$\begin{aligned}
 r_s &= 0.7250 \times (\text{NCC})^{0.5} - 4.3500 \text{ cm}^{-1} \\
 r_s &= 0.7571 \times (\text{NCC})^{0.5} - 4.5429 \text{ cm}^{-1} \\
 r_s &= 0.8750 \times (\text{NCC})^{0.5} - 5.2500 \text{ cm}^{-1} \\
 r_s &= 0.8946 \times (\text{NCC})^{0.5} - 5.3679 \text{ cm}^{-1} \\
 r_s &= 0.9143 \times (\text{NCC})^{0.5} - 5.4857 \text{ cm}^{-1} \\
 r_s &= 0.9339 \times (\text{NCC})^{0.5} - 5.6036 \text{ cm}^{-1} \\
 r_s &= 0.9878 \times (\text{NCC})^{0.5} - 5.9267 \text{ cm}^{-1} \\
 r_s &= 0.9929 \times (\text{NCC})^{0.5} - 5.9571 \text{ cm}^{-1} \\
 r_s &= 1.0321 \times (\text{NCC})^{0.5} - 6.1929 \text{ cm}^{-1} \\
 r_s &= 1.0714 \times (\text{NCC})^{0.5} - 6.4286 \text{ cm}^{-1}
 \end{aligned}$$

(g) le 20 Juillet 1983

Heure	Température, en °C		Nombre des coups		Conductance sto- matique (σ_s), en cm^{-1}	Résistance sto- matique (r_s), en cm^{-1}	Pression foliaire (r_p), en bars
	feuille (t_f)	chambre (t_{ch})	mesurés (MC)	corrigés (MCC)			
11.05	23.6	24.0	102	107.7472	0.3016	3.3159	3.00
11.10	23.4	23.5	70	70.9500	0.5568	1.7958	2.50
11.15	23.2	23.3	52	54.1763	0.9918	1.0082	1.50
11.20	23.0	23.3	75	80.3816	0.4550	2.1978	2.00
11.25	23.2	24.0	66	73.8816	0.5090	1.9647	2.00
11.30	23.3	24.0	57	62.8684	0.6849	1.4601	3.00
11.35	23.4	23.5	61	61.8279	0.7243	1.3807	5.00
11.40	23.0	23.0	70	70.0000	0.5828	1.7158	7.50
13.45	28.5	29.0	107	114.3587	0.2234	4.4763	17.00
13.50	28.1	29.0	183	206.9729	0.1250	7.9976	23.00
14.00	27.9	28.0	122	123.6059	0.2137	4.6793	17.00
14.05	27.3	28.0	105	115.5047	0.2304	4.3406	17.50
14.45	26.7	27.5	106	118.3457	0.2291	4.3642	19.00
14.50	27.0	27.5	70	74.8823	0.4213	2.3735	17.50
14.55	27.0	27.5	73	78.0915	0.3941	2.5376	17.00
15.00	27.2	28.0	100	111.5995	0.2396	4.1730	18.50
15.05	27.6	28.5	193	218.4154	0.1220	8.1984	23.50

Courbes d'étalonnage du paramètre pour la température de la chambre:

$$\begin{aligned}
 t_{ch} = 23.0 \text{ }^\circ\text{C} & \quad r_s = 0.7250 \times (\text{MCC})^{0.5} - 4.3500 \text{ cm}^{-1} \\
 t_{ch} = 23.3 \text{ }^\circ\text{C} & \quad r_s = 0.7411 \times (\text{MCC})^{0.5} - 4.4666 \text{ cm}^{-1} \\
 t_{ch} = 24.0 \text{ }^\circ\text{C} & \quad r_s = 0.7571 \times (\text{MCC})^{0.5} - 4.5429 \text{ cm}^{-1} \\
 t_{ch} = 27.3 \text{ }^\circ\text{C} & \quad r_s = 0.8946 \times (\text{MCC})^{0.5} - 5.3679 \text{ cm}^{-1} \\
 t_{ch} = 28.0 \text{ }^\circ\text{C} & \quad r_s = 0.9143 \times (\text{MCC})^{0.5} - 5.4857 \text{ cm}^{-1} \\
 t_{ch} = 28.5 \text{ }^\circ\text{C} & \quad r_s = 0.9339 \times (\text{MCC})^{0.5} - 5.6036 \text{ cm}^{-1} \\
 t_{ch} = 29.0 \text{ }^\circ\text{C} & \quad r_s = 0.9536 \times (\text{MCC})^{0.5} - 5.7214 \text{ cm}^{-1}
 \end{aligned}$$

(h) le 21 Septembre 1983

Heure	Température, en °C		Nombre des coups		Conductance sto- matique (σ_s), en cm^{-1}	Résistance sto- matique (r_s), en cm^{-1}	Pression foliaire (r_p), en bars
	feuille (t_f)	chambre (t_{ch})	mesurés (MC)	corrigés (MCC)			
14.00	20.3	20.5	100	102.8838	0.3718	3.8911	3.5
14.06	19.6	20.0	96	100.5452	0.3908	2.5800	3.0
14.10	19.4	19.6	96	98.3327	0.4194	3.3843	2.5
14.15	19.8	19.5	121	126.8354	0.3058	3.2728	3.0
14.20	19.1	19.5	99	104.7950	0.3778	2.8481	2.5
14.25	19.0	19.0	130	130.0000	0.3087	3.1807	5.0

Courbes d'étalonnage du paramètre pour la température de la chambre:

$$\begin{aligned}
 t_{ch} = 19.0 \text{ }^\circ\text{C} & \quad r_s = 0.6036 \times (\text{MCC})^{0.5} - 3.8214 \text{ cm}^{-1} \\
 t_{ch} = 19.5 \text{ }^\circ\text{C} & \quad r_s = 0.6250 \times (\text{MCC})^{0.5} - 3.7500 \text{ cm}^{-1} \\
 t_{ch} = 20.0 \text{ }^\circ\text{C} & \quad r_s = 0.6357 \times (\text{MCC})^{0.5} - 3.8143 \text{ cm}^{-1} \\
 t_{ch} = 20.5 \text{ }^\circ\text{C} & \quad r_s = 0.6500 \times (\text{MCC})^{0.5} - 3.9000 \text{ cm}^{-1}
 \end{aligned}$$

(i) le 07 Octobre 1983

Heure	Température, en °C		Nombre des coups		Conductance sto- métique (c _s), en cm ⁻¹	Résistance sto- métique (r _s), en cm ⁻¹	Pression foliaire (P _f), en bars
	feuille (t _f)	chambre (t _{ch})	non corrigé (NC)	corrigé (NCC)			
1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.
13.33	21.0	21.5	46	49.37	1.4313	0.6986	19.00
13.58	20.5	21.0	65	69.77	0.6398	1.5631	17.00
14.02	20.0	20.5	63	67.64	0.6916	1.4458	17.00
14.05	19.5	20.0	64	68.74	0.6867	1.4563	19.00
14.10	20.0	20.0	69	69.00	0.6820	1.4662	17.50
14.14	19.7	19.8	53	53.74	1.1881	0.8417	18.00
14.18	19.0	19.5	70	75.20	0.5988	1.6699	20.00
14.32	20.5	21.0	65	69.77	0.6398	1.5631	19.50
14.38	20.2	20.8	61	66.46	0.7054	1.4177	20.00
14.42	19.6	20.1	70	75.18	0.5863	1.7057	17.00

Courbes d'étalonnage du paramètre pour la température de la chambre:

t _{ch} = 19.5 °C	r _s = 0.6250 x (NCC) ^{0.5} - 3.7500 cm ⁻¹
t _{ch} = 19.8 °C	r _s = 0.6325 x (NCC) ^{0.5} - 3.7950 cm ⁻¹
t _{ch} = 20.0 °C	r _s = 0.6357 x (NCC) ^{0.5} - 3.8143 cm ⁻¹
t _{ch} = 20.1 °C	r _s = 0.6386 x (NCC) ^{0.5} - 3.8314 cm ⁻¹
t _{ch} = 20.5 °C	r _s = 0.6500 x (NCC) ^{0.5} - 3.9000 cm ⁻¹
t _{ch} = 20.8 °C	r _s = 0.6586 x (NCC) ^{0.5} - 3.9514 cm ⁻¹
t _{ch} = 21.0 °C	r _s = 0.6643 x (NCC) ^{0.5} - 3.9857 cm ⁻¹
t _{ch} = 21.5 °C	r _s = 0.6804 x (NCC) ^{0.5} - 4.0821 cm ⁻¹

Modélisation du bilan de l'eau d'une futaie de chênes
en forêt de Fontainebleau

par Jerzy NIZINSKI

RESUME :

Cette thèse cherche à apprécier quantitativement les principaux processus influençant la circulation de l'eau dans un écosystème forestier relativement stable. Les techniques employées sont d'une part la méthode de l'équation du bilan hydrique et d'autre part la méthode de l'équation de PENMAN-MONTEITH.

A partir des résultats expérimentaux obtenus nous avons pu modéliser sur une base journalière l'évapotranspiration réelle du couvert et les variations du stock d'eau du sol.

Pour mettre au point ce modèle il a fallu établir des sous-modèles sur les points suivants : la date de débourrement des feuilles de chêne et l'évolution dans le temps de LAI et l'évolution dans le temps de la résistance stomatique foliaire minimale.

L'accord entre les mesures et l'évolution du stock d'eau du sol est satisfaisant, ce qui permet de généraliser les mesures obtenues à d'autres années lorsqu'on connaît les variables météorologiques d'entrée du modèle (rayonnement global, température de l'air, température de rosée, vitesse du vent et précipitations à découvert). Ce modèle permet notamment de bien caractériser la durée et l'intensité des épisodes de sécheresse qui peuvent affecter de façon significative la production de bois.

Mots-clés : Modélisation du bilan d'eau - Quercus petraea - Indice foliaire - Résistance stomatique.