

## Evaluation de l'évapotranspiration réelle d'une pessière Comparaison avec l'évapotranspiration potentielle <sup>(1)</sup>

par F. PETIT et M. ERPICUM

Laboratoire de Géographie Physique  
de l'Université de Liège

RESUME. — *L'évapotranspiration réelle (ETR) d'une pessière âgée d'une soixantaine d'années a été évaluée en appliquant la méthode du bilan global d'énergie. Ceci a nécessité l'équipement d'un mât, du fait que la plupart des paramètres doivent être mesurés par-dessus la surface évaporante. Par ailleurs, l'évapotranspiration potentielle (ETP) a également été calculée, par la formule de Penman ; les différents paramètres intervenant dans cette formule ont été mesurés en site dégagé (parc météo), à proximité de la pessière étudiée (rebord septentrional des Hautes-Fagnes). La mise en relation de l'ETR et de l'ETP pour 57 journées de l'été 1980 a montré que dans bon nombre de cas, l'ETR de la pessière était supérieure à l'ETP calculée à partir de paramètres mesurés en parc météo. Ces écarts résultent de différences au niveau des surfaces évaporantes respectives (principalement différences de rugosité vis-à-vis du vent). Des moyens de contrôle ont été mis en oeuvre ; ils ont confirmé ces différences. En période estivale, il suffit cependant d'un nombre relativement limité de jours à forte transpiration pour que l'ETR de la pessière soit inférieure à l'ETP, du fait d'un épuisement partiel du stock d'eau dans le sol.*

### INTRODUCTION

L'évaporation de la lame d'eau interceptée par un couvert forestier est généralement évaluée par différence entre les précipitations recueillies en site dégagé d'une part, sous couvert forestier d'autre part. Ces mesures peuvent être réalisées aisément, mais elles nécessitent cependant que certaines précautions soient prises, notamment quant à la disposition du réseau pluviométrique

---

<sup>(1)</sup> Recherche effectuée dans le cadre des études intégrées des problèmes hydrologiques et forestiers sur le versant septentrional des Hautes-Fagnes. Nous tenons ici à exprimer nos plus vifs remerciements au Professeur J. Alexandre qui a dirigé cette recherche.

installé sous couvert forestier et quant à un éventuel écoulement le long des troncs, d'une fraction de la lame d'eau interceptée.

En revanche, l'évaporation qui résulte de la transpiration des végétaux ne peut être mesurée si ce n'est dans certaines conditions d'expérimentation, notamment en case lysimétrique. Ainsi, de façon générale, dans l'élaboration de bilans hydriques, on estime conjointement l'évaporation directe de la fraction interceptée et la transpiration des végétaux (suivie bien entendu d'une évaporation) grâce à des formules qui ont été établies principalement à partir d'expériences menées avec des bacs évaporatoires. Ces formules permettent en fait d'estimer l'évapotranspiration potentielle (ETP), c'est-à-dire la quantité d'eau maximale qui peut être absorbée par l'air - et qui dès lors, peut être évaporée directement ou être transpirée par les végétaux - compte tenu de l'énergie fournie à la surface évaporante d'une part, du déficit de saturation et de la turbulence de l'air d'autre part.

Ce sont donc, en principe, les quantités de vapeur d'eau que l'air peut absorber qui sont calculées (évapotranspiration potentielle), mais pas nécessairement celles qu'il absorbe *réellement* (évapotranspiration effective ou réelle = ETR). En effet, pour qu'il y ait égalité entre les deux, il est indispensable qu'une quantité d'eau soit encore disponible (dans le sol) pour la transpiration des végétaux <sup>(2)</sup> ; or, il arrive que cette dernière condition ne soit pas remplie.

C'est donc l'évapotranspiration réelle qu'il faut connaître, mais, comme nous le verrons ci-dessous, la méthode utilisée pour évaluer cette dernière nécessite un équipement important et coûteux, ainsi que le traitement de nombreuses données. Par contre, le calcul de l'évapotranspiration potentielle peut se faire à partir de paramètres climatiques relativement faciles à mesurer. C'est pourquoi nous avons mis en relation l'évapotranspiration réelle d'une pessière et l'évapotranspiration potentielle afin d'appliquer à cette dernière certains facteurs de correction qui la rendent plus performante.

## I. — L'EVAPOTRANSPIRATION POTENTIELLE

L'évapotranspiration potentielle a été calculée en valeur journalière par une des méthodes les plus précises, la formule de Penman. Dans cette formule, il est possible d'évaluer le bilan de rayonnement de façon indirecte, en utilisant notamment l'insolation relative, la radiation solaire sans atmosphère . . .

---

<sup>(2)</sup> Rappelons, en effet, que la transpiration (processus biologique) ne peut débiter qu'à partir du moment où le feuillage est entièrement sec, c'est-à-dire après qu'il y ait eu évaporation (processus physique) de l'entièreté de la lame d'eau interceptée par le feuillage. De ce fait, en période de sécheresse, moment où, a priori, le décalage entre ETR et ETP risque d'être le plus grand, la vapeur d'eau proviendra uniquement de la transpiration des végétaux.

Les mesures *in situ* nécessaires au calcul de cette formule sont : la température et l'humidité de l'air, la vitesse du vent à 2 m du sol et la durée d'ensoleillement ; ces données doivent obligatoirement être mesurées en parc météorologique, ceci afin de répondre à certaines normes internationales. Les valeurs d'évapotranspiration obtenues à partir des mesures faites en parc météorologique peuvent cependant être transposées à un couvert forestier, en les multipliant par un terme correctif qui tient compte des différences de rayonnement réfléchi par ces surfaces (C. Riou, 1975 ; J. Alexandre, 1977).

Pour des raisons topographiques et microclimatiques (effet de clairière notamment), il n'a pas été possible d'équiper une station météorologique complète à proximité immédiate de la pessière étudiée. Aussi avons-nous installé une série de postes de mesures échelonnés sur le rebord septentrional des Hautes-Fagnes, de façon à encadrer la pessière étudiée et à déterminer ainsi les variations de l'ensoleillement, de la température et de l'humidité de l'air, variations qui sont essentiellement liées à l'altitude (A. Deflandre, 1977 ; M. Erpicum, 1979 ; M. Sorée, 1980).

## II.— L'EVAPOTRANSPIRATION REELLE

L'évapotranspiration réelle (ETR) a été estimée par la méthode du bilan global d'énergie, méthode testée et utilisée avec succès notamment par A. Galoux (1973), C. Riou (1975), P. Everbecq (1977) et P. Rondou (1979).

Cette méthode est basée sur la résolution de deux équations ; comme nous allons le voir ci-dessous, la plupart des paramètres qui interviennent dans ces équations doivent être mesurés au-dessus de la surface évaporante, notamment à deux niveaux différents, ceci afin de déterminer les gradients de température et d'humidité de l'air par-dessus la surface évaporante.

$$LE = \frac{Q - S}{1 + \beta} \quad \text{où } Q = \text{l'énergie reçue ; } S = \text{l'énergie stockée dans le sol et la végétation.}$$

$$\beta = \frac{C}{LE} \quad \text{où } C = \text{le flux de chaleur sensible ; } LE = \text{le flux de chaleur latente.}$$

$\beta$  est le rapport de Bowen qui peut aussi se calculer de la façon suivante :

$$\beta = \gamma \frac{\Delta T}{\Delta e_d} \quad \text{où } \gamma = \text{constante psychrométrique ; } \Delta e_d = \Delta e_m - K (\Delta T - \Delta T_m) ; \Delta T = \text{le gradient de température entre deux niveaux ; } \Delta T_m = \text{le gradient de thermomètre mouillé entre ces deux mêmes niveaux ; } \Delta e_m = \delta \Delta T_m \text{ où } \delta \text{ est le gradient de vapeur saturante en fonction de la température.}$$

Par rapprochement de ces deux formules, on obtient :

$$LE = (Q - S) \left( 1 - \frac{\gamma}{\delta + \gamma} \frac{\Delta T}{\Delta T_m} \right)$$

Ce sont donc des différences de concentration de vapeur d'eau entre deux niveaux qui sont mesurées, ou même un flux mais dont on ne connaît pas la vitesse. Toutefois, vu l'énergie fournie, il n'existe qu'un seul système compatible avec les gradients de température et d'humidité, si bien que cela revient à résoudre un système de deux équations à deux inconnues. Comme nous le verrons ci-dessous, ceci se vérifie lors de l'utilisation des coefficients d'échange.

Il a été nécessaire d'équiper un mât afin de déterminer ces différents paramètres (fig. 1). Ce mât a été installé dans une pessière d'une soixantaine d'années, située dans le bassin de la Robinette (petit affluent de la Soor).

- L'énergie reçue (Q) est obtenue par un bilanmètre installé au-dessus de la cime des arbres ;
- $\Delta T$  et  $\Delta T_m$  sont obtenus au moyen de deux psychromètres installés à des niveaux différents, distants de 80 cm, au-dessus de la surface évaporante constituée par la cime des arbres ;
- une même unité (un bilanmètre et deux psychromètres) a été installée sous couvert végétal, à proximité du sol, afin de déterminer la part de l'évaporation venant du sol (la strate herbacée est inexistante) ;
- un ensemble de sondes de mesures des températures de l'air et du sol complètent ces deux premières unités, ceci afin de contrôler le gradient de température dans le sol, sous la strate arbustive, au sein même de celle-ci et au-dessus.

L'ensemble de ces senseurs est relié à trois potentiomètres à six pistes chacun, un enregistrement subcontinu assurant un pointage de chaque senseur toutes les deux minutes.

Les calculs effectués jusqu'à présent ont fait apparaître deux problèmes d'ordre méthodologique :

- Différents modes de dépouillement ont été testés afin de concilier précision et nombre de jours pour lequel la mesure d'évapotranspiration réelle sera effectuée. Il est apparu indispensable d'utiliser une précision rigoureuse lors des dépouillements, mais d'autre part, l'évaluation de l'évapotranspiration réelle pour une seule journée nécessite le dépouillement et le traitement de 3 600 données. Le calcul se fait par tranche de demi-heure, si bien que pour une journée considérée nous disposons de 48 valeurs.

- L'utilisation de la formule  $LE = (Q - S) \left( 1 - \frac{\gamma}{\delta + \gamma} \frac{\Delta T}{\Delta T_m} \right)$  est soumise à certaines contraintes. Cette formule n'a pas de solution réalisable lorsque  $\Delta T_m \cong 0$  ou lorsque d'une façon ou l'autre  $\beta = -1$ . Les cas sont relativement rares mais non exceptionnels. Lorsque se présente un tel cas d'incom-

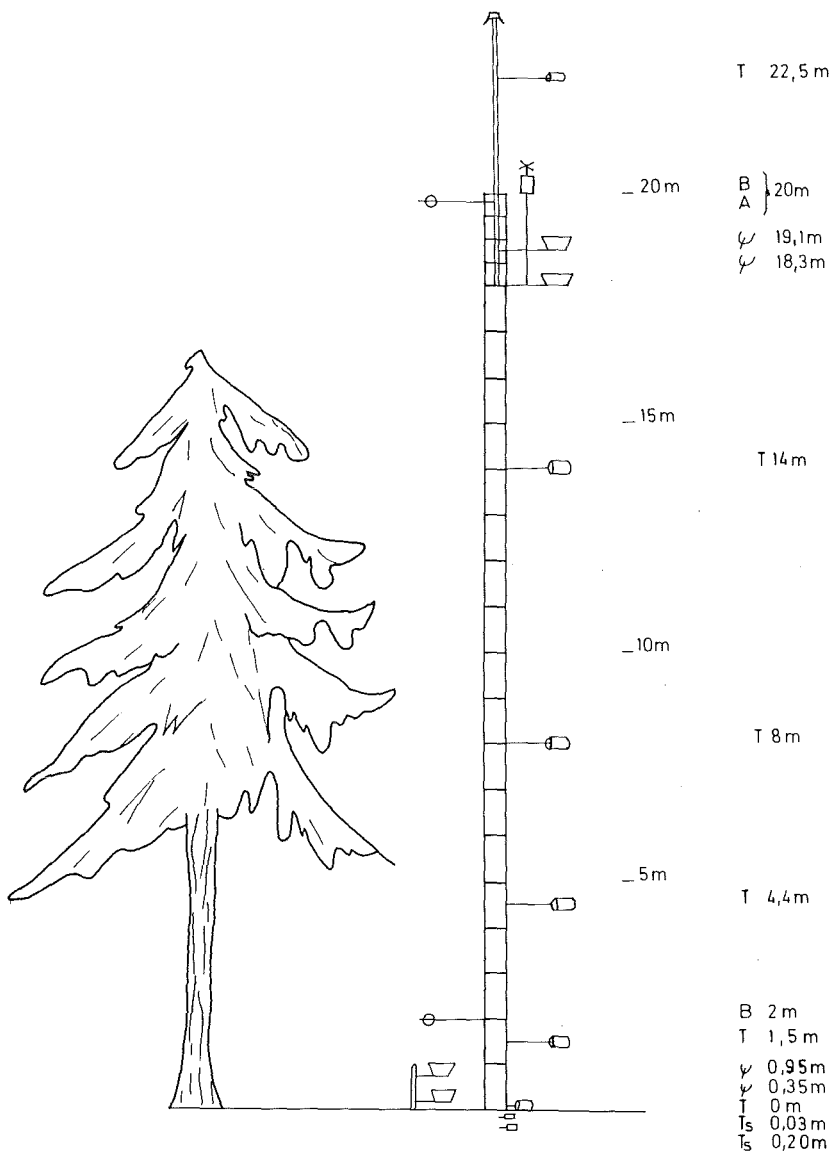


FIG. 1. — Disposition des appareils installés en vue d'évaluer l'évapotranspiration réelle d'une pessière par la méthode du bilan global d'énergie.

T. : sonde de température de l'air ; T<sub>s</sub> : sonde de température du sol ;  
 ψ : psychromètre ; B : bilanmètre ; A : anémographe.

patibilité, nous calculons alors pour les périodes qui suivent et précèdent ce cas, le coefficient d'échange ( $E_v$ ) :

$$Q_v = E_v \frac{\Delta q_v}{\Delta Z} L_v \quad \text{où } Q_v = \text{chaleur latente ; } q_v = \text{l'humidité spécifique ; } L_v = \text{chaleur latente de vaporisation (60 cal/mm) ; } \Delta Z = \text{la différence d'altitude.}$$

Nous introduisons alors ce coefficient dans l'équation ci-dessus pour la période litigieuse. Ajoutons que l'estimation d'un coefficient peut également se faire sur base de données spécifiques à la chaleur sensible ; l'équation se présente alors comme suit :

$$Q_a = E_a \frac{\Delta \theta}{\Delta Z} C_p \quad \text{où } Q_a = \text{chaleur sensible ; } \theta = \text{la température potentielle ; lorsque les } \Delta Z \text{ sont faibles } \Delta \theta \text{ équivaut à } \Delta T \text{ (température de l'air) ; } C_p = \text{chaleur spécifique à pression constante.}$$

A noter que les coefficients d'échange ( $E_a$ ) calculés sur cette base sont sensiblement égaux à ceux calculés sur la base de données spécifiques à la chaleur latente ( $E_v$ ), du fait qu'une même turbulence brasse calories et vapeur d'eau, et qu'en fait il y a compensation de l'un par l'autre.

### III. — COMPARAISON ENTRE L'EVAPOTRANSPIRATION REELLE ET L'EVAPOTRANSPIRATION POTENTIELLE

L'évapotranspiration réelle a été calculée pour 57 cas se répartissant sur la période mai 1980 à septembre 1980. Avant d'envisager ces résultats et leur relation avec l'ETP, nous analyserons tout d'abord trois cas choisis, non seulement à titre d'exemples, mais également parce qu'y apparaissent des éléments auxquels nous ferons référence par la suite.

*Journée du 25 juillet 1980.* — Cette journée fort ensoleillée ( $\frac{n}{N} = 85 \text{ } ^\circ/\text{o}$ )

reçoit 332 calories. D'autre part, le stock d'eau dans le sol est encore fort important à la suite des abondantes précipitations tombées du 15 juin au 21 juillet ; toutefois, le 25, les cimes sont complètement ressuyées car, comme nous le verrons par la suite, l'ETP a été importante les 22, 23 et 24 juillet. Le 25, une lame d'eau de 5,31 mm est transpirée par les résineux ; on constate à la figure 2 que cette transpiration ne garde pas, au cours de la journée, une même proportionnalité vis-à-vis de l'énergie reçue du soleil. En effet de 10 h à 12 h 30, l'évaporation (au sens large) est supérieure à l'énergie reçue ; l'après-midi, par contre, la situation s'inverse. Parallèlement à ceci, on constate que, le matin, les températures de l'air par-dessus la surface évaporante ( $T_2$ ) sont plus élevées que celles qui sont mesurées au niveau inférieur, plus proche de cette dernière

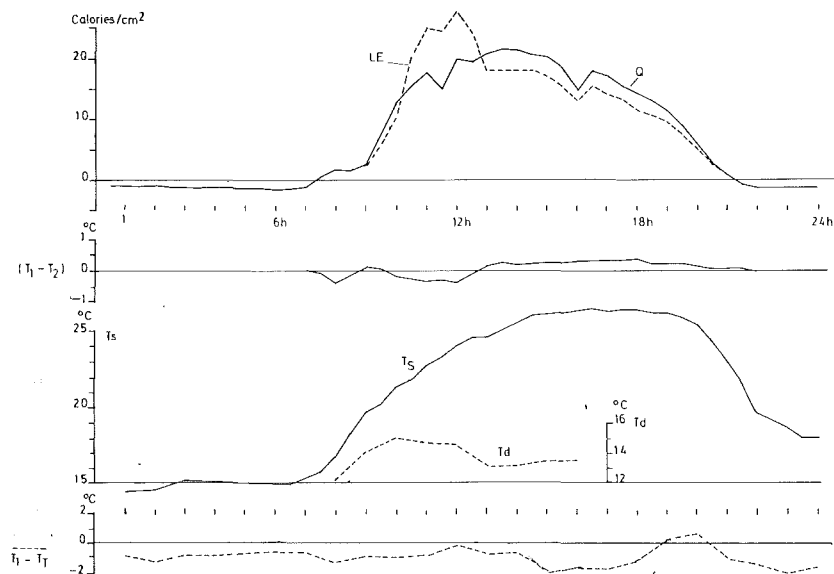


FIG. 2. — Evaluation de l'évapotranspiration réelle d'une pessière (journée du 25 juillet 1980).

LE : évapotranspiration (flux de chaleur latente en  $\text{cal}/\text{cm}^2/30 \text{ min.}$ ); Q : énergie disponible (énergie reçue moins l'énergie réfléchie et l'énergie réémise en infrarouge, en  $\text{cal}/\text{cm}^2/30 \text{ min.}$ ) ;  $(T_1 - T_2)$  gradient de température à proximité de la surface évaporante ( $T_1$  : température de la sonde la plus proche de la surface évaporante) ;  $T_s$  : température sèche au-dessus de la surface évaporante  $\frac{(T_1 + T_2)}{2}$  ;  $T_d$  : température du point de rosée ;  $(T_1 - T_t)$  : différence entre les températures mesurées au-dessus de la pessière ( $T_1$ ) et en site dégagé à Ternell ( $T_t$ ).

$(T_1)$  ; le gradient de température est donc orienté vers la surface évaporante, c'est-à-dire que l'air lui rétrocède des calories et permet ainsi d'entretenir une forte évaporation. Toutefois, du fait de cette inversion de température, du fait également qu'il n'y a pas trop de turbulence, il se crée une stabilité de l'air, si bien que la quantité de vapeur d'eau dans l'air augmente fortement (voir à ce propos l'accroissement de la température du point de rosée ( $T_d$ ) à la figure 2), ce qui représente un frein à l'évaporation.

Par contre, l'après-midi, moment où l'évaporation ne consomme plus la totalité de l'énergie reçue, ce sont alors les températures de l'air à proximité de la surface évaporante qui sont les plus élevées. Il peut alors y avoir un brassage de l'air et donc une meilleure répartition de la vapeur d'eau, si bien que la température du point de rosée à proximité de la surface évaporante diminue.

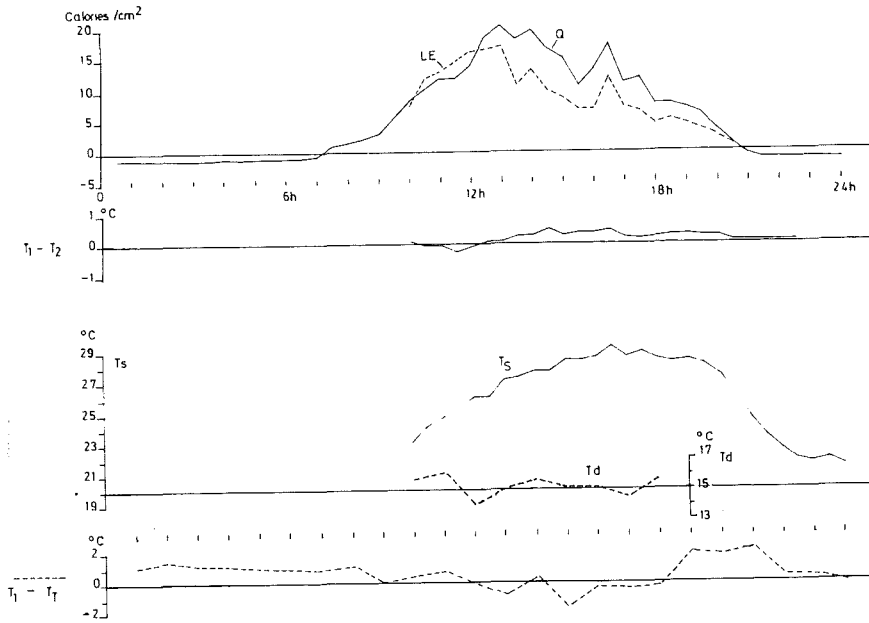


FIG. 3. — Evaluation de l'évapotranspiration réelle d'une pessière (journée du 2 août 1980). (Pour la signification des symboles, voir la légende de la fig. 2).

Par ailleurs, la comparaison de ces températures avec celles qui sont mesurées dans une station située sur une surface gazonnée (Ternell) montre que ces dernières sont plus élevées ; nous verrons par la suite que ceci a une signification précise.

D'autre part, l'évapotranspiration potentielle est seulement de 3,82 mm ; elle est donc inférieure à l'ETR, ce qui semble paradoxal étant donné que l'ETP donne en fait une valeur maximum qui ne peut être dépassée. Nous reviendrons évidemment sur ce point par la suite.

*Journée du 2 août 1980.* — Cette journée relativement bien ensoleillée ( $\frac{n}{N} = 63\%$ ) reçoit un peu moins de 270 calories ; 2,82 mm ont été évaporés (au sens large) au cours de cette journée. Ainsi, seuls 64 % de l'énergie reçue a été consommée pour l'évaporation, alors que le 25 juillet ceci représentait 96 %. On constate à la figure 3 que la période de la journée où l'ETR dépasse l'énergie reçue est courte, et en outre que l'évaporation lui est alors à peine supérieure. Les températures mesurées par-dessus la surface évaporante aux deux niveaux différents ( $T_1$  et  $T_2$ ) ne présentent que des écarts minimes comparativement aux écarts observés dans la matinée du 25 juillet. L'après-midi, l'évaporation est nettement inférieure à l'énergie reçue et parallèlement



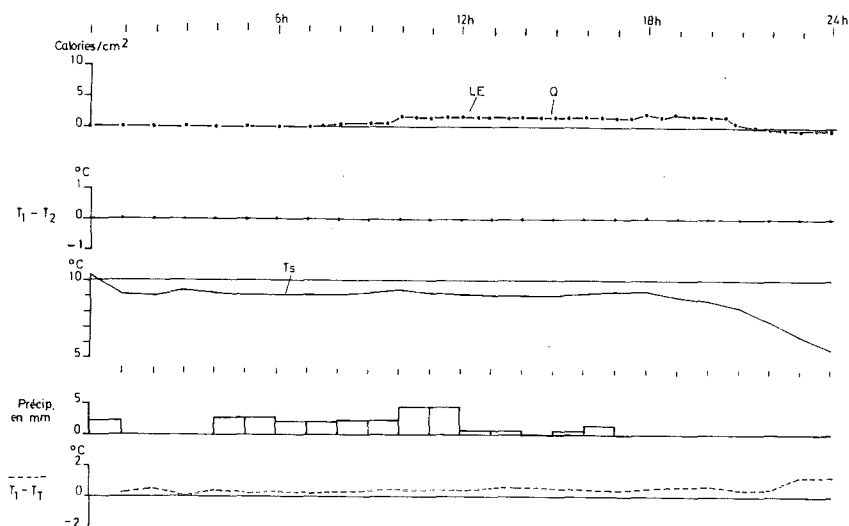


FIG. 4. — Evaluation de l'évapotranspiration réelle d'une pessière (journée du 21 juillet 1980). (Pour la signification des symboles, voir la légende de la fig. 2).  
Précip : précipitation en mm/h.

à ceci, les températures au niveau de la surface évaporante sont alors nettement plus élevées ( $T_1 - T_2 > 0$ ). D'autre part, si l'on compare ces températures à celles de Ternell, les températures par-dessus la pessière sont identiques ou à peine plus faibles que celles de Ternell.

L'ETP calculée pour cette journée est de 3,43 mm ; l'ETR lui est donc inférieur. Précisons que le stock d'eau dans le sol est entamé du fait qu'il n'y a plus eu de fortes pluies depuis le 21 juillet, alors que, comme nous l'avons vu ci-dessus, l'ETR a été importante durant cette période.

*Journée du 21 juillet 1980.* — Des précipitations de forte intensité sont tombées la veille et pendant la nuit ; si ces pluies ont diminué d'intensité au cours de cette journée, la couverture nuageuse reste cependant importante ( $\frac{n}{N} = 0$ ) et l'énergie reçue est particulièrement faible (moins de 35 calories). Bien que l'entièreté de ces calories soit utilisée pour l'évaporation, seuls 0,56 mm sont évaporés, au sens strict <sup>(3)</sup>.

<sup>(3)</sup> Ce ne peut pas être de la transpiration, étant donné que la lame d'eau interceptée par le couvert végétal est importante - supérieure à celle qui peut être évaporée au cours de cette journée - et qu'il est nécessaire que cette dernière soit évaporée entièrement avant qu'il puisse y avoir transpiration.

D'autre part, on constate qu'il n'y a pas de gradient de température par-dessus la surface évaporante ( $T_1 - T_2 = 0$ ) et que la différence de température avec la station située en site dégagé est minime et constante (fig. 4).

L'ETP est de 1,11 mm ; dans ce cas l'ETR lui est donc inférieur. Soulignons cependant que l'énergie reçue au cours de cette journée est exceptionnellement faible pour un mois de juillet et que de ce fait, ce rapport ETR/ETP (égale à 0,5) est, comme nous le verrons lors de l'analyse de cas semblables, rare pour une journée de ce type.

De l'analyse de ces trois cas, on peut dégager les éléments suivants :

- il arrive que l'ETR soit supérieure à l'ETP ;
- l'air peut rétrocéder des calories (flux de chaleur sensible de l'atmosphère vers la surface évaporante qui se traduit par  $T_1 - T_2 < 0$ ) ; ceci a pour effet de favoriser l'évaporation, et cette dernière peut alors être supérieure à l'énergie reçue (la matinée du 25 par exemple) ;
- inversement, lorsque l'évaporation ne consomme pas l'entièreté de l'énergie reçue, il peut y avoir réchauffement à partir de la surface évaporante ( $T_1 - T_2 > 0$ ) ;
- lors de journées pluvieuses, il y a évaporation et la totalité de l'énergie reçue est utilisée à cette fin (rapport  $LE/Q = 1$ ,  $T_1 - T_2 = 0$ ).

Les 57 journées pour lesquelles l'ETR a été calculée sont reportées à la figure 5. Rappelons brièvement que le mois de mai a été ensoleillé et relativement sec ; cette situation s'est prolongée jusqu'à la mi-juin. Par la suite nous enregistrons d'abondantes précipitations qui ont d'ailleurs occasionné d'importantes inondations. A partir du 22 juillet, le temps a été ensoleillé et sec et le mois d'août a accusé un déficit sensible de précipitations.

Certaines valeurs d'ETR dépassent 5 mm/jour. Ainsi les 10 et 11 mai, on mesure plus de 6 mm ; l'énergie reçue lors de ces journées est importante (respectivement 300 et 360 calories) et l'air est particulièrement sec. D'autre part, il semble bien qu'à cette époque le stock d'eau dans le sol soit encore important. Du 22 au 25 juillet, l'ETR est également importante (plus de 20 mm en 4 jours). Toutefois, à la suite de quelques jours de relative sécheresse, l'ETR diminue sensiblement, les autres paramètres étant égaux (voir à ce propos la comparaison entre le 1er août et le 26 juillet). Ceci va de pair avec un rapport  $LE/Q$  (rapport entre l'énergie dissipée par évapotranspiration et énergie reçue) nettement inférieur à 1 alors qu'en période de forte évapotranspiration il est égal ou supérieur à 1 (les 10 et 11 mai par exemple).

D'autre part, en période de pluie, la totalité de l'énergie reçue est généralement consommée pour l'évaporation ( $LE/Q = 1$ ) et parfois même plus, du fait de la rétrocession de calories par l'air.

Toutefois, la constatation essentielle que l'on peut dégager de ces résultats, c'est que dans la grande majorité des cas, l'ETR est supérieur à l'ETP. Seuls

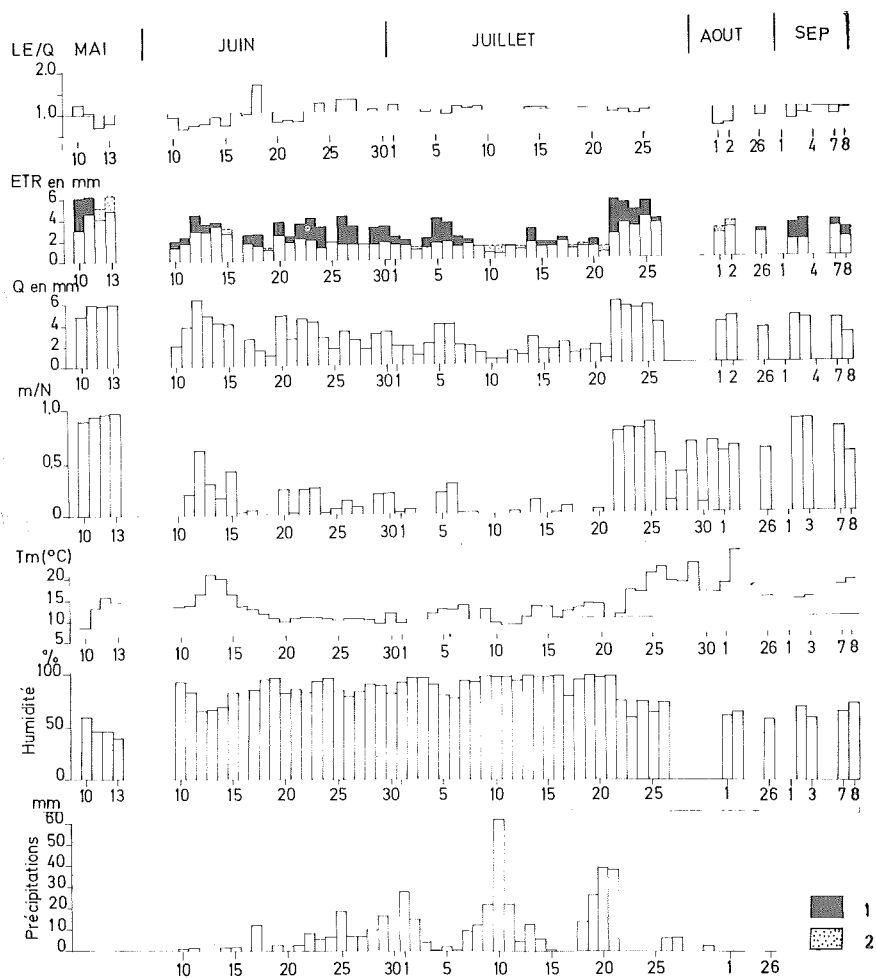


FIG. 5. — Valeurs journalières de l'évapotranspiration réelle (ETR) exprimées en mm d'une pessière située dans le bassin de la Robinette ; avec en (1)  $ETR > ETP$  et en (2)  $ETR < ETP$ . Sont également représentées les valeurs journalières de  $LE/Q$  (rapport entre chaleur latente et énergie reçue), le bilan radiatif net ( $Q$ ) exprimé en mm d'évaporation ; l'insolation relative  $\frac{m}{N}$  ; la température moyenne journalière en site dégagé ( $T_m$ ) ; l'humidité relative et les précipitations.

deux groupes de cas forment exception :

- lorsque l'énergie reçue est particulièrement faible, ce qui résulte probablement d'une surestimation du rayonnement au niveau même de la formule approchée de Penman <sup>(4)</sup> ;
- certaines journées où le rapport LE/Q est nettement inférieur à 1, ce qui pourrait traduire un épuisement partiel du stock d'eau (exemple des cas analysés en août).

Le rapport moyen entre l'ETR et l'ETP est de 1,40, ceci pour l'ensemble des cas étudiés. Cette différence résulte essentiellement des conditions climatiques propres au milieu forestier :

- surface évaporante accrue ;
- localisation sur les forêts, lorsque la convection apparaît, de colonnes d'air sec subsident sauf en fin de journée ;
- turbulence accrue parce que la surface évaporante est élevée et irrégulière.

A cet égard, il est indéniable que la *rugosité* d'une strate herbacée vis-à-vis du vent et celle d'une pessière (au niveau de la surface évaporante) sont différentes et que cette différence joue un rôle quant à l'importance de l'évaporation. Les sites dégagés présentent en effet une surface relativement lisse et l'écoulement y présente peu de turbulence, les différents filets glissant les uns sur les autres, si bien que les échanges verticaux sont limités. Par contre, du fait du découpage des cimes, des creux entre les arbres, une pessière présente une surface irrégulière qui provoquerait un écoulement animé d'une plus grande turbulence ; cet écoulement favoriserait l'évaporation grâce à un brassage et donc un renouvellement incessant de la masse d'air à proximité de la surface évaporante.

La différence de rugosité de ces deux surfaces peut être mise en évidence par comparaison entre les vitesses du vent au-dessus de ces deux types de site. En effet, les vitesses du vent mesurées le jour, à 2 m du sol, dans les conditions d'un parc météorologique (à Mont Rigi) sont systématiquement supérieures à celles mesurées au-dessus de la pessière (à 2 m au-dessus des cimes des arbres) ; ceci rend compte de la turbulence qui existe au-dessus de la pessière, car les anémographes ne mesurent que la composante horizontale des mouvements de l'air (fig. 6).

Toutefois, les différences de vitesses du vent se marquent de façon moins nette la nuit. Ainsi, au-dessus de la pessière, elles sont plus élevées qu'en site dégagé lors de nuits qui succèdent à des journées où l'évaporation a été forte,

---

<sup>(4)</sup> L'insolation relative qui intervient dans la formule de Penman traduit parfois mal l'énergie reçue. Ainsi l'insolation peut être égale à zéro - indifféremment - pour une énergie reçue de 120 calories ou de 35 calories.

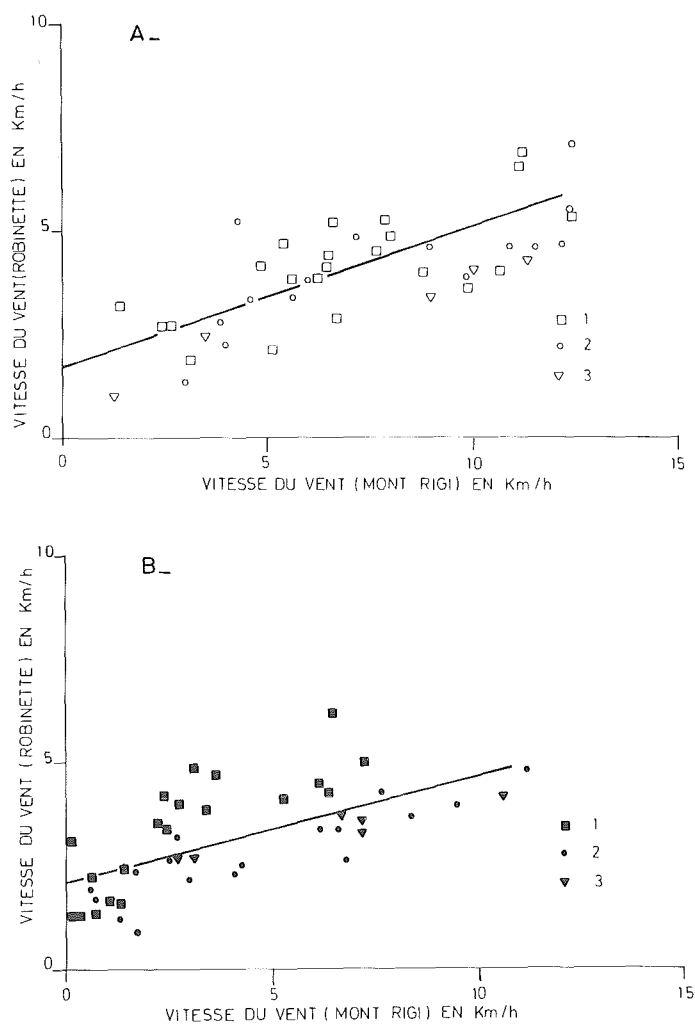


FIG. 6. — Relations entre les vitesses du vent mesurées à 2 m au-dessus d'un site dégagé (Mont Rigi) et à 20 m (2 m au-dessus de la pessière de la Robinette). A : Moyenne des vitesses du vent mesurées entre 8 h et 20 h : (1) journée où l'évaporation a été supérieure à 4 mm ; (2) journée où l'évaporation a été comprise entre 2 et 4 mm ; (3) journée où l'évaporation a été inférieure à 2 mm ( $r = 0,739$ ). - B : Moyenne des vitesses du vent mesurées entre 20 h et 8 h : (1) nuit succédant à des journées où l'évaporation a été supérieure à 4 mm ; (2) nuit succédant à des journées où l'évaporation a été comprise entre 2 et 4 mm ; (3) nuit succédant à des journées où l'évaporation a été inférieure à 2 mm ( $r = 0,651$ ).

jours qui ont généralement été ensoleillés et durant lesquelles d'importants contrastes thermiques ont probablement pu se créer (ces valeurs sont représentées par un carré noir à la fig. 6).

#### IV.— PHENOMENES CONFIRMANT LES VALEURS ELEVÉES DE L'EVAPOTRANSPIRATION REELLE

Deux éléments confirment les différences entre ETR et ETP mises en évidence au paragraphe précédent.

a) L'évapotranspiration réelle en milieu forestier étant supérieure à celle d'une strate herbacée (site découvert), une quantité supérieure d'énergie est donc consommée pour la vaporisation de l'eau. *Dans un bilan énergétique*, ceci doit se traduire par une diminution dans un autre poste. On observe en fait que la température de l'air au-dessus des cimes est généralement inférieure à celle mesurée au-dessus d'un site découvert (fig. 2), ce qui implique qu'un supplément d'énergie est fourni par un flux de chaleur sensible à partir de l'air et ceci à seule fin d'accroître le flux de chaleur latente. Comme nous l'avons vu ci-dessus, il arrive même qu'à la suite d'un tel processus, l'énergie utilisée pour l'évaporation (flux de chaleur latente) soit supérieure à l'énergie par rayonnement.

b) *Deux bacs évaporatoires* ont été installés au sol en site découvert et un troisième à hauteur des cimes d'une jeune pessière. L'évaporation de ce dernier bac est systématiquement supérieure à celle des bacs installés en site découvert, ceci suivant un rapport moyen (1,34) proche de celui mis en évidence lors de la comparaison entre l'évapotranspiration réelle et potentielle. Nous nous sommes évidemment assurés que les bacs étaient installés dans de bonnes conditions telles que l'évaporation qui y est mesurée se rapproche de celle qui est évaluée par la formule de Penman. En effet, bien que cette dernière formule ait été mise en évidence principalement grâce à des mesures faites à partir de bacs évaporatoires, il peut y avoir des écarts entre l'évaporation mesurée en bac et l'évaporation potentielle. Ainsi, F. Bultot et G. Dupriez (1973) ont montré que l'évaporation évaluée par un bac évaporatoire était, lors d'épisodes pluvieux en période estivale, supérieure à l'évaporation effective de la nappe d'eau, du fait qu'il y a dans le bac une évaporation pendant la pluie ; cette évaporation résulte essentiellement des conditions propres au bac (transfert vertical de calories). L'évaporation mesurée de cette façon risque alors d'être excédentaire. Par contre, toujours d'après ces auteurs, lorsque les pluies sont au moins aussi chaudes que la surface du bac - ce qui est le cas en hiver - l'évaporation du bac pendant la pluie est négligeable et, de ce fait, les écarts observés en période estivale sont alors réduits.

Nous avons mis en relation les valeurs de l'évapotranspiration potentielle calculées à la station de Ternell par la formule de Penman d'une part et les valeurs observées au bac évaporatoire, placé à cette même station dans les conditions d'un parc météorologique d'autre part <sup>(5)</sup> (Tableau I).

TABLEAU I. — Comparaison entre les valeurs d'évaporation obtenues à partir d'un bac évaporatoire installé en site dégagé (station de Ternell) et les valeurs d'évapotranspiration potentielle calculées à cette même station par la formule de Penman.

	<i>ETP</i> en mm	<i>Evaporation</i> du bac en mm	<i>Ecart</i> en mm	<i>Précipitations</i> en mm
17.08.81 - 30.08.81	20.4	19.8	+ 0.6	0
31.08.81 - 27.09.81	35.4	40.7	- 5.3	58.2
28.09.81 - 25.10.81	18.6	16.1	+ 2.5	136.1
30.03.82 - 26.04.82	38.4	44.6	- 6.2	72.0
27.04.82 - 17.05.82	39.4	37.1	+ 2.3	68.0
25.05.82 - 28.06.82	90.9	90.3	+ 0.6	178.3
29.06.82 - 02.08.82	100.9	108.1	- 7.2	82.4
03.08.82 - 30.08.82	58.6	61.0	- 2.4	110.7
31.08.82 - 27.09.82	45.5	50.6	- 5.1	71.7

On constate que lors de périodes où il n'y a pas eu de pluie (cas des différentes séquences du mois d'août 1981), les écarts entre l'ETP et les valeurs estimées au bac sont minimes. D'autre part, en présence de pluies abondantes il arrive que l'évaporation mesurée au bac soit supérieure à l'ETP, mais ceci n'est pas systématique. Ainsi, lors de trois périodes où il y a eu des pluies relativement abondantes (octobre 1981, début mai 1982 et juin 1982), on constate en effet que l'ETP est supérieure à celle mesurée dans le bac. Certes, les deux premières périodes ne sont pas des périodes estivales et, en accord avec F. Bultot et G. Dupriez (1973), la température des pluies risque d'être proche de celle du bac, mais ce n'est pas le cas de la troisième période.

<sup>(5)</sup> Bac posé sur une surface gazonnée et non enterré afin de maintenir - *mutatis mutandis* - des conditions analogues à celles du bac placé au sommet de la pessière.

A noter d'autre part que les plus faibles écarts se présentent en période estivale, ceci non seulement en pourcentage mais aussi, à l'exception d'une seule période, en valeur absolue.

Les études comparatives présentées au Tableau I montrent donc que l'évaporation mesurée au moyen d'un bac n'a pas tendance à surestimer systématiquement l'ETP, les écarts étant tantôt positifs, tantôt négatifs.

Ajoutons enfin que, même si les bacs avaient tendance à surestimer l'évaporation, ceci n'influencerait en rien le rapport entre l'évaporation dans le bac installé au sommet de la pessière et l'évaporation du bac installé en site dégagé, puisque ce sont des bacs de même type, installés dans les mêmes conditions et puisque les lectures ont été faites aux mêmes moments (c'est-à-dire dans des conditions identiques quant aux épisodes secs ou pluvieux).

Par ailleurs, nous avons comparé les données obtenues au bac évaporatoire situé à la cime des arbres aux données d'ETP calculées par la formule de Penman d'une part, à ces mêmes données d'ETP multipliées par un facteur  $k$  d'autre part (rapport mis en évidence lors de la relation entre ETR et ETP) (Tableau II).

TABLEAU II. — Comparaison entre les valeurs d'ETP (station de la Soristène) et les données obtenues à partir du bac évaporatoire installé à la cime des arbres ainsi que les valeurs d'ETP pondérées par le facteur  $k$  (rapport entre ETR et ETP).

	<i>Bac</i>	<i>ETP</i>	<i>ETP x k = ETR</i>
27.07.81 - 30.08.81	84.7	63.0 (- 25.6 ‰)	88.2 (+ 4.1 ‰)
31.08.81 - 27.09.81	55.0	38.2 (- 30.6 ‰)	53.5 (- 2.7 ‰)
28.09.81 - 25.10.81	30.5	21.9 (- 28.2 ‰)	30.7 (+ 0.7 ‰)
26.10.81 - 23.11.81	15.6	12.4 (- 8.1 ‰)	17.4 (+ 11.5 ‰)
30.03.82 - 26.04.82	53.5	39.7 (- 25.8 ‰)	55.6 (+ 3.9 ‰)
27.04.82 - 17.05.82	57.7	40.9 (- 29.1 ‰)	57.3 (- 0.7 ‰)
25.05.82 - 28.06.82	116.3	84.5 (- 27.3 ‰)	118.3 (+ 1.7 ‰)
29.06.82 - 02.08.82	134.0	100.0 (- 25.4 ‰)	140.0 (+ 4.5 ‰)
03.08.82 - 30.08.82	82.3	61.2 (- 25.6 ‰)	85.7 (+ 4.1 ‰)
31.06.82 - 27.09.82	65.3	45.5 (- 30.3 ‰)	63.7 (- 2.5 ‰)

Les écarts entre les valeurs de l'ETP pondérées par le rapport  $k$  et celles mesurées grâce aux bacs sont faibles et ne se font pas systématiquement dans le même sens (à l'exception d'une seule période, ces écarts sont compris entre



$\pm 5$  0/0). Par contre, l'ETP calculée en conditions de parc météorologique est systématiquement inférieure à l'évaporation du bac installé au sommet de la pessière.

Ceci confirme bien que les conditions microclimatiques au-dessus d'une pessière permettent une évaporation nettement supérieure à celle d'un site dégagé, dépassant ainsi l'ETP calculée à partir de paramètres mesurés dans ces sites dégagés, en conditions de parc météorologique.

#### V. — VARIATIONS DU RAPPORT ENTRE L'EVAPOTRANSPIRATION REELLE ET L'EVAPOTRANSPIRATION POTENTIELLE EN FONCTION DES CONDITIONS CLIMATIQUES

La mise en relation des 57 jours où l'ETR a été calculée avec l'ETP (fig. 5) montre qu'il y a trois rapports d'importance différente selon qu'au cours de la journée, l'évaporation provient soit de la seule transpiration, soit uniquement de l'eau interceptée, soit encore des deux à la fois. En effet, connaissant l'évapotranspiration réelle d'une part (ETR), connaissant l'évaporation d'autre part ( $E_i$ ), ceci grâce à des mesures d'interception faites sous pessière (J. Alexandre et F. Petit, 1983), nous avons pu faire les distinctions entre les journées où :

- $ETR = E_i$ , il y a seulement évaporation ; c'est également les cas lorsque  $ETR < E_i$  car une partie de la lame interceptée peut éventuellement se maintenir sur les cimes au moins jusqu'au lendemain avant d'être évaporée ;
- $ETR > E_i$ , il y a évaporation et transpiration ;
- $E_i = 0$  et aucune lame interceptée n'est héritée des jours précédents, il y a uniquement transpiration.

En appliquant ces critères, nous avons pu mettre en évidence les éléments suivants.

Lorsqu'il y a seulement *évaporation* de la lame d'eau interceptée, le rapport moyen entre ETR et ETP est de l'ordre de 1,2, mais il varie entre 0,5 et 2,0. Les rapports les plus faibles sont obtenus lors des journées où tombe une pluie soutenue et où l'énergie reçue est particulièrement faible (moins de 60 calories/jour). Dans ces conditions, le bilan d'énergie est alors surestimé dans la formule de Penman (par exemple la journée du 21 juillet 1980). De façon plus générale, lors des journées où il y a seulement évaporation, l'énergie reçue ne dépasse que rarement 150 calories/jour ; toute cette énergie est utilisée de façon prioritaire pour l'évaporation, l'air pouvant même rétrocéder des calories à cette fin ( $LE/Q \geq 1$ ). Par ailleurs, il est normal que l'on ne trouve dans cette catégorie de cas, que des journées où l'on ne reçoit que peu d'énergie. En effet, si l'énergie reçue avait été importante, il y aurait eu rapidement évaporation de toute la lame d'eau interceptée et il y aurait alors pu y avoir transpiration, si bien que l'on serait dans la catégorie suivante (<sup>6</sup>).

Lorsqu'il y a à la fois *évaporation et transpiration* au cours d'une même journée <sup>(7)</sup>, le rapport moyen entre l'ETR et l'ETP est de l'ordre de 1,80 ; l'énergie reçue lors de telles journées est importante (généralement supérieure à 250 cal/jour) et la plus grande part, sinon la totalité, de ces calories est utilisée pour l'évaporation ( $LE/Q \cong 1$ ), évaporation de la lame d'eau interceptée d'une part, de la lame d'eau transpirée d'autre part <sup>(8)</sup>.

Lorsqu'il y a *uniquement transpiration*, le rapport moyen entre ETR et ETP est de l'ordre de 1,35. Mises à part quelques rares exceptions, l'énergie reçue est importante, généralement supérieure à 250 cal/jour et, souvent même, à 300 cal/jour. Ce dernier type de cas, qui se présentent en séquences continues de plusieurs jours, est en effet lié à la présence d'un anticyclone continental, si bien que la nébulosité est peu importante sinon inexistante. A noter d'autre part que l'énergie reçue n'est que partiellement utilisée pour l'évaporation de la lame d'eau transpirée ( $LE/Q < 1$ ) <sup>(9)</sup>. Par ailleurs, dans plusieurs cas, qui tous se présentent lors de périodes de relative sécheresse, le rapport entre ETR et ETP est nettement inférieur à 1, ce qui semble traduire un épuisement partiel du stock d'humidité dans le sol, épuisement qui aurait tendance à limiter l'ETR.

Ainsi, le 13 mai 1980 par exemple, le rapport entre l'ETR et l'ETP est de 0,78 ; les trois jours précédents, la lame d'eau puisée dans le sol par transpiration a été de 16,5 mm. Or, déjà à ce moment, le stock d'eau dans le sol était plus que probablement entamé car, depuis le 3 mai, seule une pluie de 6 mm était tombée. De même, le 15 mai 1980, le rapport entre ETR et ETP est de 0,88 ; la transpiration des trois jours précédents - moment à partir duquel le rapport entre ETR et ETP commence à chuter (de 1,53 le 12 à 1,10 le 14) - a été de près de 10 mm, ceci malgré quelques pluies de faible intensité ( $< 2$  mm/jour) qui ont d'ailleurs été presque entièrement interceptées et évaporées. Les pluies plus importantes remontent au début du mois de juin mais elles n'ont probablement pas pu reconstituer entièrement le stock d'humidité du sol ; celui-ci a en effet dû être fortement sollicité lors du mois de mai qui avait été sec et ensoleillé.

---

<sup>(6)</sup> Rappelons en effet qu'il est nécessaire que la lame d'eau interceptée par le couvert végétal soit entièrement évaporée avant qu'il puisse y avoir transpiration de ce dernier.

<sup>(7)</sup> Soit que la lame d'eau interceptée soit peu importante, du fait de faibles pluies, soit que les épisodes pluvieux soient entrecoupés de larges éclaircies qui assurent un resuyage des cimes et permettent ainsi une transpiration des végétaux, soit qu'il s'agisse d'une lame d'eau interceptée héritée de la veille.

<sup>(8)</sup> Lame d'eau disponible (se trouvant à proximité immédiate des racines des arbres) étant donné que les pluies datent du jour même ou de la veille.

<sup>(9)</sup> En effet, pour qu'il y ait transpiration, il faut un échauffement qui nécessite lui-même des calories (flux de chaleur sensible).

Enfin, les 1<sup>er</sup> et 2 août 1980, les rapports entre ETR et ETP sont respectivement de 0,86 et de 0,82. Ces deux journées font suite à une période de fortes pluies qui ont certainement su reconstituer le stock d'humidité dans le sol (plus de 350 mm ont en effet été recueillis entre le 17 juin et le 21 juillet). Toutefois, du 22 au 25 juillet, 20,6 mm ont déjà été puisés dans le sol par transpiration des végétaux ; on note par ailleurs une diminution progressive du rapport ETR/ETP du 22 au 25 juillet (de 2,39 à 1,39). Bien qu'il ait plu les 26 et 29 juillet (respectivement 12,6 mm et 3,3 mm), nous avons calculé que 36 mm avaient été puisés dans le sol à la suite de la transpiration des végétaux.

Ces trois exemples montrent bien qu'au cours de périodes de sécheresse estivale, l'ETR est inférieure à l'ETP, du fait de l'épuisement partiel du stock d'eau dans le sol. Le temps nécessaire pour que ceci se marque dépend évidemment des conditions préalables quant à l'état de saturation du sol. Ainsi, lorsque le stock d'humidité dans le sol est peu entamé ou lorsqu'il a pu se reconstituer (cf. juillet 1980), il faut au moins plus de quatre jours de forte transpiration (cf. le 25 juillet) - mais moins de huit (cf. le 1<sup>er</sup> août) - pour que l'ETR soit inférieure à l'ETP. En revanche, lorsque le stock d'humidité dans le sol a déjà été entamé (cf. à la mi-mai et à la mi-juin 1980), quelques jours de forte transpiration - moins de cinq semble-t-il (cf. les 13 mai et 15 juin 1980) - suffisent à faire diminuer le rapport entre ETR et ETP.

Ainsi, tout en gardant présent à l'esprit que la diminution du rapport entre ETR et ETP est progressive, il semble bien, au vu des exemples présentés ci-dessus, qu'en été, l'ETR devienne inférieure à l'ETP après une période de cinq jours de forte transpiration. Le rapport entre l'ETR et l'ETP est alors voisin de 0,85.

Ceci rejoint en partie les observations faites en 1977 par P. Everbecq qui a mesuré l'ETR d'une tourbière pendant 9 jours consécutifs. Au cours de cette période, l'ETR a diminué de façon relativement progressive (passant de plus de 5 mm/j à moins de 2 mm/j), mais la diminution la plus sensible s'est produite entre le premier et le cinquième jour, les autres conditions (et notamment l'énergie reçue) restant égales<sup>(10)</sup>. C'est d'ailleurs à ce moment que cet auteur a noté des signes d'assèchement de la végétation.

D'autres valeurs d'évapotranspiration réelle, notamment de journées de l'été 1981 et 1982, sont actuellement en cours de traitement ; leur analyse en séquence continue permettra de préciser les différents rapports mis en évidence dans cette étude.

---

<sup>(10)</sup> La nappe aquifère était à un niveau élevé au début de la période d'observation du fait des pluies abondantes tombées au mois de juin et plus particulièrement à la fin de ce mois (35 mm les 5 derniers jours de juin).

## VI. — CONCLUSIONS

L'évapotranspiration réelle ou effective (ETR) d'une pessière évaluée par la méthode du bilan global d'énergie peut dépasser l'évapotranspiration potentielle (ETP) calculée par la formule de Penman à partir de paramètres climatiques mesurés en site dégagé (parc météorologique). Ceci résulte de conditions micro-climatiques propres au milieu forestier et notamment, comme cela ressort de la comparaison des vitesses du vent en site dégagé et au-dessus des cimes (fig. 6), d'une rugosité plus importante à la cime des arbres. Cette rugosité accroît la turbulence ce qui, du fait d'un brassage de l'air plus important, favorise l'évapotranspiration (*sensu lato*).

Des moyens de contrôle ont été mis en oeuvre ; ils confirment ces résultats. Ainsi, l'évaporation mesurée dans un bac évaporatoire installé à la cime des arbres est systématiquement plus forte que celle d'un bac installé dans un parc météorologique.

D'autre part, les températures de l'air au-dessus de la pessière sont, lorsqu'il y a forte évaporation, inférieures à celles qui sont mesurées en site dégagé. Ceci démontre que l'énergie consommée pour la plus forte évaporation des résineux (chaleur latente) se fait au détriment d'un réchauffement de l'air (chaleur sensible), l'atmosphère pouvant même, dans certains cas, rétrocéder des calories (fig. 2).

Trois gammes de rapports entre l'ETR et l'ETP ont été mises en évidence, suivant qu'au cours de la journée considérée il y a seulement transpiration, seulement évaporation de la lame d'eau interceptée par le couvert forestier, ou les deux ensembles. Toutefois, en période estivale, après quelques jours de forte transpiration (environ cinq), l'évapotranspiration réelle des résineux devient inférieure à l'évapotranspiration potentielle, ce qui résulte d'un épuisement partiel des stocks d'eau. L'analyse de cas complémentaires qui sont actuellement en cours de traitement, permettra d'affiner les valeurs et les conditions d'application des rapports mis en évidence dans cette étude. Ainsi, la pondération de l'ETP journalière par un rapport adéquat apportera une plus grande précision à un des postes clé des bilans hydriques, permettant de la sorte une élaboration plus fiable de ces derniers.

D'autre part, il semble qu'il subsiste, dans certains cas, une imprécision lorsque l'énergie disponible utilisée dans la formule de Penman est évaluée à partir de paramètres climatiques simples. A cet égard, nous avons pu constater que l'application de la formule de Penman, où l'énergie disponible est évaluée grâce à un bilanmètre, pourrait réduire les écarts entre évapotranspiration réelle et potentielle.

## BIBLIOGRAPHIE

- ALEXANDRE J., 1977. — Le bilan de l'eau dans le Miomba, *Bull. Soc. Géogr. Liège*, 13, pp. 107-126.
- ALEXANDRE J. et PETIT F., 1983. — *Etudes des processus climatologiques intervenant dans le bilan hydrologique. Rapport des études intégrées des problèmes hydrologiques et forestiers sur le versant septentrional des Hautes-Fagnes*, Laboratoire de Géographie physique de l'Université de Liège. Inédit, 87 p.
- BRUTSAERT W.H., 1982. — *Evaporation into the atmosphere*, Reidel Publ. Comp., Dordrecht, 299 p.
- BULTOT F. et DUPRIEZ G.L., 1973. — L'évaporation d'un bac d'eau libre. Sa signification restreinte. *Jour. of Hydrol.*, 20, pp. 83-95.
- DEFLANDRE A., 1977. — *Climatologie et végétation dans la vallée de la Schwalm moyenne*, Mémoire de licence en Sciences géographiques, Université de Liège. Inédit, 213 p.
- ERPICUM M., 1979. — Le climat de vallée en Haute-Belgique. Analyse en fonction des types de temps, *Bull. Soc. Géogr. Liège*, 15, pp. 143-155.
- EVERBECQ P., 1977. — *Observations climatologiques dans une tourbière des Hautes-Fagnes*, Mémoire de licence en Sciences géographiques, Université de Liège. Inédit, 115 p.
- GALOUX A., 1973. — *La chênaie mélangée calcicole de Virelles-Blaimont. Flux d'énergie radiante, conversions et transferts dans l'éco-système*. Station de recherches des Eaux et Forêts, Groenendael, Série A, 14, 124 p.
- RIOU C., 1975. — *La détermination pratique de l'évaporation*, Mémoire ORSTOM, n° 80, Paris, 236 p.
- RONDOU P., 1979. — *Evaluation de l'évaporation au Mont Rigi*, Mémoire de licence en Sciences géographiques, Université de Liège. Inédit, 93 p.
- SOREE M., 1980. — *Facteurs naturels du débit d'une rivière des Hautes-Fagnes. Essais d'adaptation de modèles*, Mémoire de licence en Sciences géographiques, Université de Liège. Inédit, 161 p.
-

