

L'évapotranspiration de référence et son application en agrométéorologie

Pierluigi Calanca, Pascale Smith, Annelie Holzkämper et Christof Ammann,
Station de recherche Agroscope Reckenholz-Tänikon ART, 8046 Zurich

Renseignements: Pierluigi Calanca, e-mail: pierluigi.calanca@art.admin.ch, tél. +41 44 377 75 12



Vue du nord sur la parcelle expérimentale de Oensingen (prairie fauchée avec tracteur), où l'évapotranspiration a été mesurée durant plusieurs années. (Photo: ART)

Introduction

L'évapotranspiration potentielle est un paramètre important du cycle terrestre de l'eau. Elle désigne l'évaporation maximale possible, indépendamment de la quantité d'eau que les plantes ont effectivement à disposition. Elle est considérée comme l'indicateur du développement optimal de la végétation et joue un rôle capital pour l'évaluation des aptitudes climatiques d'une

région pour l'agriculture (Calanca et Holzkämper 2010). L'appréciation de l'évapotranspiration potentielle est nécessaire notamment pour estimer le besoin en irrigation de l'agriculture (Fuhrer et Jasper 2009).

Or, il n'est pas si simple de définir précisément l'évapotranspiration potentielle (Brutsaert 1982), car elle dépend non seulement des conditions de l'atmosphère et du sol, mais aussi des caractéristiques de la végétation. C'est la raison pour laquelle l'Organisation des

Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO) a introduit dans son rapport 56 sur l'irrigation et le drainage (Allen *et al.* 1998)¹ le concept d'évapotranspiration de référence (ET_0), c'est-à-dire l'évapotranspiration d'un peuplement végétal idéal, disposant d'eau à volonté (encadré 1).

A partir de l'évapotranspiration de référence ET_0 , la méthode FAO permet de déduire, à l'issue de deux autres étapes, les pertes en eau effectives des prairies et des terres arables par évapotranspiration. La première étape nécessite des connaissances sur l'état de la végétation (hauteur du peuplement et indice de surface foliaire), afin de déterminer le «coefficient cultural» K_c , et donc l'évapotranspiration du peuplement concerné dans de bonnes conditions d'irrigation. Pour la deuxième étape, il s'agit, sur la base d'un bilan hydrique simplifié de la zone racinaire, d'introduire une limitation éventuelle de l'évapotranspiration par la sécheresse. Le calcul de l' ET_0 s'effectue à l'aide de l'équation de Penman-Monteith (équation PM), considérée à plus d'un titre comme standard et recommandée par la FAO (Allen *et al.* 1998) comme unique formule de calcul. Des approches empiriques n'en restent pas moins très populaires dans la pratique, en Suisse également où les formules de Primault (1962 et 1981) et de Turc (1961) sont encore utilisées aujourd'hui par MétéoSuisse ou AGRO-METEO², la plateforme de vulgarisation Internet d'Agroscope.

Résumé ■ Le changement climatique place l'agriculture face à de nouveaux défis. Lorsqu'il s'agit de planifier les mesures d'adaptation, l'estimation du besoin en eau des prairies, des pâturages et des terres arables joue un rôle capital. L'évapotranspiration de référence, un concept introduit par l'Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO, *Food and Agriculture Organization*) dans les années 1990, définit le potentiel d'évaporation d'un couvert végétal standard abondamment approvisionné en eau. Elle se calcule à partir de l'équation dite de Penman-Monteith et peut, comme le montre la présente étude, représenter très précisément comment évolue l'évapotranspiration d'une prairie sur le Plateau suisse dans des conditions quasiment optimales.

Encadré 1 | Propriétés de la surface de référence, Allen *et al.* (1998)

Hauteur du peuplement, h :	12 cm \equiv 0,12 m
Indice de surface foliaire, LAI:	24 h , avec h en m \equiv 2,88 m ² m ⁻²
Albédo, α :	0,23 \equiv 23 %
Résistance stomatique r_s :	100 s m ⁻¹
Résistance superficielle r_a :	2 r_s / LAI \equiv 70 s m ⁻¹
Résistance aérodynamique r_a :	208 / u_2 s m ⁻¹

¹Le rapport est également disponible sur Internet sous <http://www.fao.org/docrep/x0490e/x0490e00.htm> ou www.kimberly.uidaho.edu/ref-et/fao56.pdf

²<http://www.agrometeo.ch>

Encadré 2 | Formules sélectionnées pour le calcul de l'évapotranspiration potentielle

Penman-Monteith:

$$ET_{PM} = \frac{1}{\lambda} \left\{ \frac{\Delta (R_N - G) + 86400 \frac{\rho_a C_p}{r_a} (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma \left(1 + \frac{r_c}{r_a} \right)} \right\}$$

Priestley-Taylor (1972):

$$ET_{PT} = 1,26 \frac{1}{\lambda} \left\{ \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} (R_N - G) \right\}$$

Turc (1961):

$$ET_{Tu} = \frac{0,4}{30} (23,9 R_s + 50) \left(\frac{T}{T + 15} \right)$$

Primault (1962 et 1981):

$$ET_{Pr} = (1,03 - 0,01RH)(SSD + 2) j C$$

Dans ces équations, $\lambda = 2,5 \text{ MJ kg}^{-1}$ représente la chaleur latente d'évaporation, $C_p = 1,004 \times 10^{-3} \text{ MJ kg}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ la chaleur spécifique à pression constante, Δ ($\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$) la pente de la courbe de pression de vapeur saturante comme fonction de la température T ($^\circ\text{C}$) (équation 3), γ ($\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$) la constante psychrométrique (équation 2), R_N ($\text{MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$) le rayonnement net, G ($\text{MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$) le flux de chaleur du sol, ρ_a (kg m^{-3}) la densité de l'air, r_a (s m^{-1}) la résistance aérodynamique et r_c (s m^{-1}) la résistance du peuplement, e_s (kPa) la pression de vapeur saturante et e_a (kPa) la pression de vapeur réelle, R_s ($\text{MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$) le rayonnement global, RH (%) l'humidité relative, SSD (h d^{-1}) la durée d'ensoleillement, j (-) un facteur saisonnier et C (-) une correction de l'altitude. Dans toutes les formules, les valeurs numériques ont été choisies de manière à obtenir des mm d^{-1} pour l'évapotranspiration. L'équation de Primault (1962 et 1981) a été convertie à une base journalière pour les calculs.

Les méthodes de calcul empiriques sont moins exigeantes que l'équation PM en ce qui concerne les variables d'entrée (encadré 2) et peuvent très bien fournir de bons résultats à condition que les valeurs des paramètres aient été adaptées aux conditions locales. Leur application en dehors de la zone de validité paramétrée reste problématique.

L'objectif de cette étude est d'expliquer brièvement le calcul de l'évapotranspiration de référence ainsi que ses possibilités d'application. Nous montrerons avec quelle fiabilité l' ET_0 peut représenter l'évapotranspiration mesurée dans des conditions quasiment optimales. Par la suite, nous nous demanderons dans quelle mesure les approches simplifiées de Priestley et Taylor (1972), Primault (1962 et 1981) et Turc (1961) permettent d'obtenir un résultat similaire. Pour la comparaison, nous utilisons des mesures d'évapotranspiration et des variables déterminantes relevées à Oensingen (prairies de fauche, $47^\circ 17' \text{N}$, $07^\circ 44' \text{E}$, 450 m d'altitude, température annuelle moyenne de 9°C , moyenne des précipitations annuelles de 1100 mm) dans le cadre d'un essai en plein champ mis en place sur plusieurs années (Ammann *et al.* 2009).

L'intention n'est pas de présenter la théorie en détails, ni de répertorier toutes les formules empiriques. Sur ce point, nous renvoyons aux publications de Brutsaert (1982), Schrödter (1985) et Jensen *et al.* (1990).

Historique

Le concept d'évapotranspiration potentielle a probablement été introduit par Thornthwaite (1948; Brutsaert 1982). Compte tenu des données disponibles à l'époque, il a établi une formule purement empirique, utilisée aujourd'hui encore aux Etats-Unis pour surveiller les cas de sécheresse³.

Mais ce sont Penman (1948) et plus tard Monteith (1965), qui ont défini les principes théoriques conduisant au développement d'une méthode de calcul physique. L'équation PM qui porte leur nom (encadré 2) constitue aujourd'hui encore la base des simulations du processus d'évapotranspiration, ainsi que de la méthode développée par la FAO (Allen *et al.* 1998). Elle tient compte à la fois des conditions données par le bilan énergétique

³ <http://drought.unl.edu/dm/monitor.html>

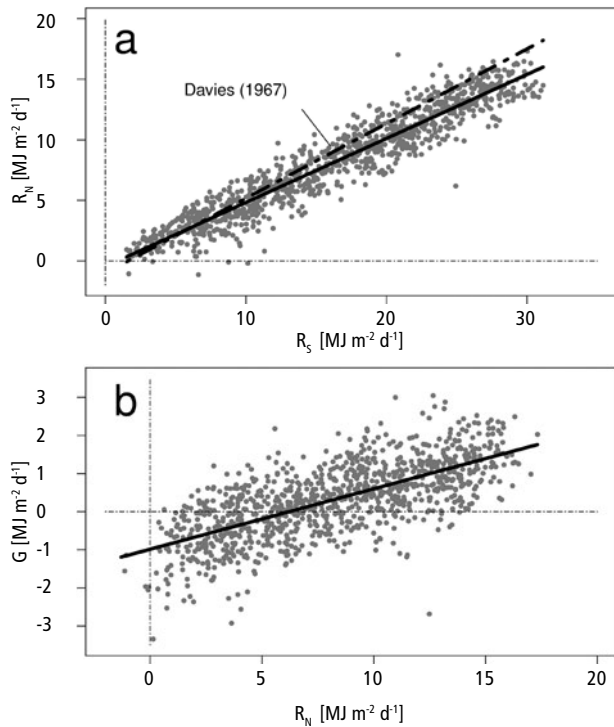


Figure 1 | Relation entre le rayonnement net (R_N) et le rayonnement global (R_s) (a), et entre le flux de chaleur du sol (G) et le rayonnement net (R_N) (b) à Oensingen. Moyennes journalières observées pendant les mois d'avril à octobre de 2005 à 2009. Les lignes pleines représentent les droites de régression: a) $R_N = 0,529 R_s - 0,466$ avec $r^2 = 0,89$; b) $G = 0,159 R_N - 0,987$ avec $r^2 = 0,48$. De plus, dans le diagramme a) la relation de Davies (1976, éq. 4) est indiquée par une ligne pointillée.

pour la surface du sol et des processus d'échange qui déterminent le flux de vapeur d'eau entre la végétation et l'atmosphère.

A peu près à la même époque, Slatyer et McIlroy (1961) ont publié une monographie dans laquelle ils ont introduit le concept d'équilibre d'évaporation. Il s'agit de la dissipation d'eau potentielle dans une atmosphère en équilibre avec le sous-sol, compte tenu d'un apport constant d'énergie. Ce concept a fourni une base théorique à d'autres développements, notamment aux études de Priestley et Taylor (1972) sur l'évaporation dans des conditions d'advection minimale. La formule qu'ils ont proposée (encadré 2) s'est imposée autant dans la pratique que dans la recherche.

Les premières études systématiques sur l'évapotranspiration potentielle en Suisse remontent à Primault (1962). Convaincu que ni l'approche de Thornthwaite (1948), ni celle de Penman (1948) ne pouvaient donner

⁴ Primault n'était peut-être pas conscient que les mauvais résultats obtenus avec l'équation de Penman (1948) venaient avant tout d'un paramétrage insuffisant. En effet, à l'époque, Penman a actualisé plusieurs fois les valeurs des paramètres (cf. p. ex. Brutsaert 1982)

de résultats convenables dans les conditions suisses⁴, il a développé sa propre formule de calcul, utilisée encore aujourd'hui par MétéoSuisse sous une forme légèrement adaptée (Primault 1981; encadré 2). En Suisse, une autre formule est encore utilisée. Il s'agit de celle de Turc (1961; encadré 2). Bien qu'elle soit considérée comme une équation empirique, elle représente en principe une forme de l'évaporation en conditions d'équilibre et est donc équivalente à l'équation de Priestley et Taylor (1972).

L'équation FAO56

L'équation PM (encadré 2) peut être mise sous la forme suivante (FAO56) compte tenu des propriétés de la surface de référence (encadré 1):

$$ET_0 = \frac{0,408 \Delta (R_N - G) + \gamma \frac{900}{T + 273,15} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma (1 + 0,34 u_2)} \quad (1)$$

sachant que R_N désigne le bilan radiatif ou le rayonnement net ($\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$), G le flux de chaleur du sol ($\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$), T la température de l'air ($^{\circ}\text{C}$), e_s la pression de vapeur saturante, e_a la pression de vapeur réelle (kPa) et u_2 la vitesse du vent (m s^{-1}). De plus,

$$\gamma = \frac{C_p p}{\varepsilon \lambda} \quad (2)$$

représente la constante psychrométrique ($\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$) comme fonction de la pression atmosphérique p (kPa) avec les paramètres $C_p = 1,004 \times 10^{-3} \text{ MJ } ^{\circ}\text{C}^{-1} \text{ kg}^{-1}$ (chaleur spécifique à pression constante), $\varepsilon = 0,622$ (rapport des masses molaires de la vapeur d'eau et de l'air sec), et $\lambda = 2,5 \text{ MJ kg}^{-1}$ (chaleur latente d'évaporation), tandis que

$$\Delta = \frac{de_s}{dT} \quad (3)$$

représente la pente de la courbe de pression de vapeur saturante comme fonction de la température ($\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$).

Pour évaluer l'équation (1), il est nécessaire de disposer des valeurs horaires ou journalières des variables en entrée. Tandis que les mesures de T (et par conséquent de e_s , e_a , u_2 et p) sont effectuées de manière standard dans le cadre des réseaux de mesures de MétéoSuisse et d'AGROMETEO, le bilan radiatif et le flux de chaleur du sol ne sont que rarement observés directement. Par conséquent, il est important de les estimer le plus précisément possible, car, ils déterminent environ deux tiers du potentiel d'évaporation.

Une compilation des formules utilisées pour le calcul de R_N et G à partir des données météorologiques se trouve également dans Allen *et al.* (1998). Pour la pra-

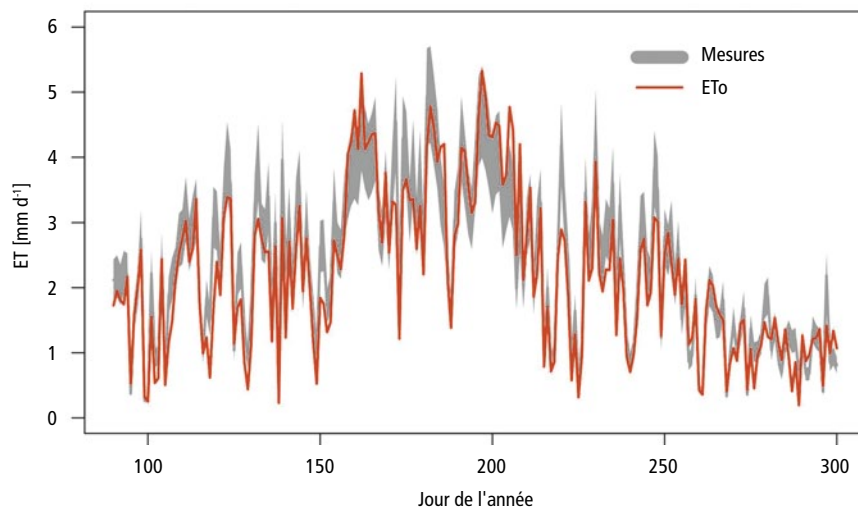


Figure 2 | Evolution de l'évapotranspiration journalière sur le site d'Oensingen pendant la période d'avril à octobre 2006. En gris : évapotranspiration mesurée, avec comme hypothèse une incertitude relative des mesures de $\pm 15\%$; en rouge : évapotranspiration de référence.

tique, il serait souhaitable de trouver des méthodes plus simples. Pour déterminer R_N , l'approche de Davies (1967) s'impose au premier abord. Dans les limites de la période végétative, Davies part d'une relation linéaire indépendante du climat entre le rayonnement global R_s et le rayonnement net R_N . La linéarité tient à ce que les flux radiatifs à ondes longues (comme fonction de la température absolue élevée à la puissance quatre) varient nettement moins dans le temps que ceux à ondes courtes. L'albédo d'une surface avec couvert végétal sans neige peut également être considéré comme relativement constant.

Sur la base des données provenant de quatorze stations dans le monde converties en $\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$, Davies (1967) a proposé l'équation suivante:

$$R_N = 0,617 R_s - 1,004 \quad (4)$$

qui reflète assez bien la relation observée sur le Plateau suisse sur le site d'Oensingen (fig. 1a). Il est possible d'obtenir une meilleure concordance en adaptant les paramètres de régression aux données de mesures locales ou régionales ($R_N = 0,529 R_s - 0,466$; $r^2 = 0,89$), ce que montre également la figure 1a.

En ce qui concerne le flux de chaleur du sol, Allen *et al.* (1998) recommandent de fixer G égal à zéro pour le calcul de l' ET_0 sur une base journalière, ce qui se justifie car les flux de chaleur entre le jour et la nuit sont opposés et se compensent. Les données d'Oensingen mon-

trient toutefois qu'il est plus pertinent d'exprimer G sous la forme d'une fonction linéaire de R_N (fig. 1b). La droite de régression correspondante ($G = 0,159 R_N - 0,987$; $r^2 = 0,48$) est largement conforme à la règle de base souvent utilisée en microclimatologie, $G \approx 0,1 R_N$.

Méthode

Evaluation

Nous avons testé l'équation (1), en comparant les valeurs calculées pour ET_0 avec les mesures de l'évapotranspiration réelle sur le site d'Oensingen (fig. 2). Il s'agit de données relevées en 2006 à l'aide de la technique dite d'Eddy-Covariance (Neftel *et al.*, 2005) et dont le taux d'erreur relative est de 15%.

Le choix de l'année 2006 s'explique pour deux raisons. La première est que cette année-là, les conditions d'humidité du sol ont été pratiquement optimales durant toute la période végétative et que les conditions environnementales correspondaient donc à la définition de l'évapotranspiration de référence. La deuxième est que l'indice de surface foliaire était rarement supérieur à $3 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$, soit souvent proche des $2,88 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$ fixés dans la définition de la surface de référence (encadré 1).

Les résultats de la figure 2 montrent qu' ET_0 reproduit bien l'évapotranspiration mesurée durant la période d'avril à octobre. De ce fait, la méthode de calcul de l'évapotranspiration de référence peut être recommandée sans réserve pour la pratique. On peut néanmoins se

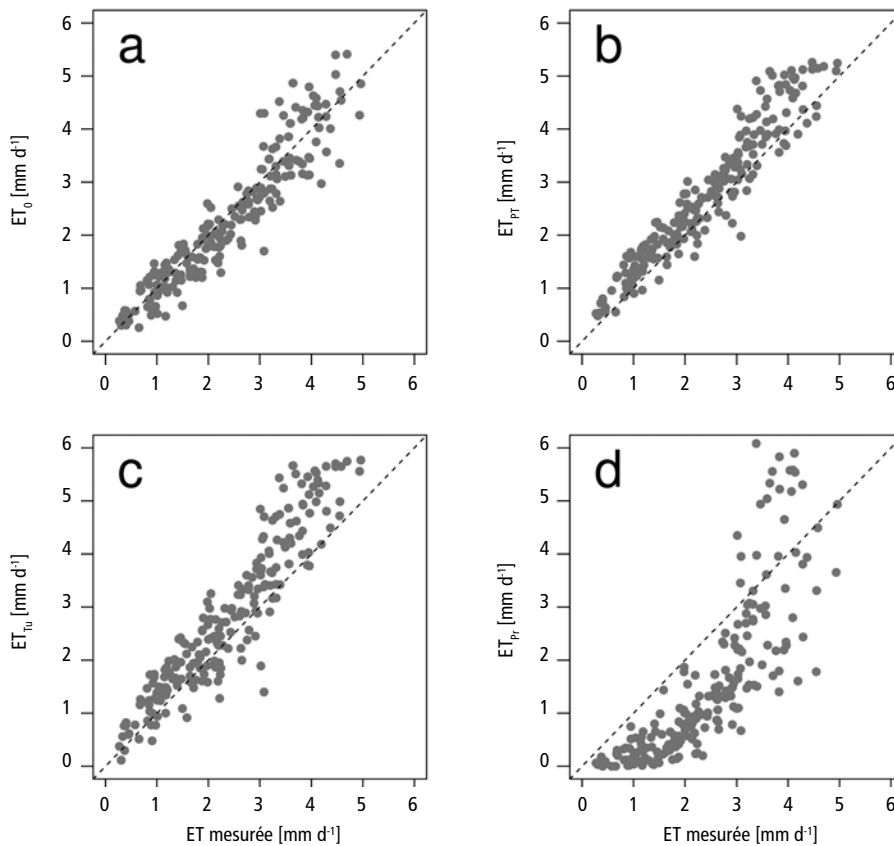


Figure 3 | Comparaison des résultats de quatre formules avec l'évapotranspiration mesurée sur le site d'Oensingen. Moyennes journalières pour la période d'avril à octobre 2006. a) Evapotranspiration de référence ($r^2 = 0,88$); b) Priestley-Taylor ($r^2 = 0,91$); c) Turc ($r^2 = 0,87$); et, d) Primault ($r^2 = 0,67$). L'évaluation de l'évapotranspiration de référence et de Priestley-Taylor a été réalisée sur la base des paramétrages pour R_n et G tirés de la figure 1.

demander si des méthodes de calcul plus simples (p. ex. Priestley et Taylor 1972) ou empiriques (Turc 1961; Primault 1962 et 1981) pourraient également fournir des résultats comparables. Sous la forme de diagrammes de dispersion, la figure 3 présente une comparaison directe de différentes formules de détermination avec les mesures effectuées à Oensingen. Il est possible d'identifier quelques tendances.

La formule de Priestley et Taylor (1972) aboutit à un résultat relativement semblable à celui de l'équation FAO56, ce qui n'est pas étonnant car le terme lié au rayonnement dans l'équation (1) contribue pour environ deux tiers au potentiel d'évaporation, phénomène qui est pris en compte indirectement dans la formule de Priestley et Taylor (1972) par le facteur 1,26. La formule de Turc (1961) a elle aussi fourni des résultats similaires. Nous avons déjà mentionné dans le chapitre «Historique» que Turc (1961) ainsi que Priestley et Taylor (1972) sont en principe équivalents. Par conséquent, ce résultat n'a rien de surprenant non plus.

Il reste l'approche de Primault (1962 et 1981), qui reproduit le moins bien l'évapotranspiration observée. Les raisons qui expliquent ce résultat peuvent être de nature différente. D'une part, le choix des variables déterminantes joue un rôle. La durée d'ensoleillement, qui, autrefois, était la seule grandeur de rayonnement mesurée, exerce une influence moins directe sur l'évapotranspiration que R_s ou R_n . D'autre part, les mesures d'évapotranspiration dont disposait Primault à l'origine pour la mise au point empirique de sa formule, étaient sans doute chargées d'une part d'incertitude relativement importante. C'est la raison pour laquelle il serait opportun de procéder à une nouvelle évaluation des valeurs des paramètres.

Pour estimer les besoins éventuels en irrigation (Fuhrer et Jasper 2009) il est intéressant de comparer les différentes approches en termes de pertes d'eau cumulées pendant la période végétative. Pour la période d'avril à octobre 2006, les mesures effectuées à Oensingen ont donné un résultat total de 501 mm. Les résultats



Figure 4 | Système dit d'Eddy-Covariance pour la mesure de l'évapotranspiration, constitué d'un anémomètre à ultrasons et d'un capteur à infrarouges. (Photo: ART)

correspondants pour l'évapotranspiration de référence selon FAO56, d'une part avec un paramétrage local pour R_N et G , d'autre part avec R_N selon Davies (1967) et $G = 0$, s'élèvent à 483 et 566 mm. Des calculs analogues avec les formules de Priestley-Taylor (1972), Turc (1961) et Primault (1962 et 1981) ont donné respectivement des valeurs de 574, 596 et 337 mm. Ceci montre que l'évapotranspiration de référence est celle qui s'écarte le moins des mesures sur le terrain, même en ce qui concerne les pertes totales.

Résultats et discussion

Nous avons expliqué le concept d'évapotranspiration de référence et discuté l'application de l'équation FAO56. Nous avons montré que cette approche était en mesure de reproduire fidèlement l'évapotranspiration d'une prairie du Plateau suisse mesurée dans des conditions quasiment optimales.

Les formules empiriques peuvent donner des résultats tout à fait utilisables pour des applications pratiques, comme l'a montré l'exemple d'Oensingen. La formule de Primault, la plus mal classée ici, pourrait aboutir à des résultats nettement meilleurs grâce à une nouvelle évaluation des paramètres et à l'introduction

de facteurs de correction (saison et altitude, cf. encadré 2). Par contre, il est évident que de telles approches pourront difficilement permettre d'estimer l'évapotranspiration potentielle à l'avenir sur la base de scénarios climatiques, car dans ce cas, la validité des paramètres actuels ne sera plus garantie.

En relation avec le changement climatique, quatre aspects doivent être pris en compte: (i) l'augmentation de la température; (ii) la baisse de l'humidité de l'air que cela pourra entraîner pendant la journée; (iii) une modification potentielle du régime de rayonnement; (iv) les effets de la hausse des concentrations de CO_2 dans l'atmosphère, qui permettent une utilisation plus efficace de l'eau par les plantes. L'équation PM peut sans problème tenir compte de tous ces facteurs. L'équation FAO56 qui en découle le peut elle aussi, dans la mesure où les paramètres numériques sont adaptés à une réduction de la résistance stomatique due au CO_2 (encadré 1)⁵.

Conclusions

Etant donné le peu de données disponibles, les approches empiriques étaient tout à fait justifiées autrefois. Mais aujourd'hui, plus rien ne devrait empêcher de passer à des méthodes de détermination physiques, car les données nécessaires sont soit directement disponibles ou peuvent être déduites avec une précision suffisante de valeurs de mesures opérationnelles, comme nous l'avons montré ici.

Dans le contexte de la présente étude, il n'a pas été nécessaire d'approfondir l'évaluation de l'évapotranspiration selon Allen *et al.* (1998) en tenant compte d'un coefficient cultural K_c , car pendant la période sélectionnée, les caractéristiques de la végétation correspondaient à peu près à celles de la surface de référence. Ce point doit néanmoins être décidé au cas par cas. Il reste encore à étudier si la méthode FAO peut être appliquée de manière standard pour évaluer le besoin en eau des cultures fruitières et des vignes, soit dans des situations où la disposition des plantes impacte autant sur les propriétés des surfaces que sur les caractéristiques aérodynamiques de la surface évaporante. ■

Remerciements

Nos recherches sur le régime d'évapotranspiration des terres arables et des herbages ont lieu en partie dans le cadre des projets suivants: ACQWA (7^e programme cadre de l'UE), AGWAM (Programme national de recherche PNR61, Gestion durable de l'eau) et AGRISK (Pôle de recherche national Climat, PRN Climat). Nous remercions l'Office fédéral de météorologie et de climatologie (MétéoSuisse) pour la mise à disposition des données météorologiques opérationnelles.

⁵ Pour l'estimation de l'évapotranspiration effective selon la FAO (Allen *et al.*, 1998), il est également nécessaire d'adapter le coefficient de cultural K_c à cause de l'utilisation plus efficiente de l'eau par les plantes.

Riassunto**L'evapotraspirazione di riferimento e la sua applicazione nella meteorologia agricola**

Il cambiamento climatico pone l'agricoltura di fronte a nuove sfide. Considerato il potenziale di evaporazione, nel programmare le misure d'adeguamento è particolarmente importante valutare il fabbisogno idrico di prati, pascoli e superfici campicole. L'evapotraspirazione di riferimento, un concetto introdotto negli anni novanta dall'Organizzazione delle Nazioni Unite per l'alimentazione e l'agricoltura (FAO) e presentato nella presente pubblicazione, definisce il potenziale di evaporazione da una vegetazione standard abbondantemente approvvigionata d'acqua. Essa viene calcolata sulla base della cosiddetta formula di Penman-Monteith e, come mostrato in questo lavoro, riproduce fedelmente l'evapotraspirazione osservata in condizioni pressoché ottimali in un prato dell'Altipiano svizzero.

Summary**Reference evaporation and its application in agrometeorology**

Climate change places the agriculture in front of new challenges. An assessment of the water requirement of grassland, pasture and arable land on the basis of the evapotranspiration potential plays a central role in the planning of adaptation measures. The reference evaporation, a concept introduced in the 1990's by the Food and Agriculture Organization (FAO) and presented in this paper, defines the evaporation potential of standard vegetation with an abundant water supply. It is determined on the basis of the so-called Penman-Monteith equation and, as demonstrated here, is able to accurately reproduce the evolution of the evaporative flux from grassland as observed on the Swiss Plateau under virtually optimum conditions.

Key words: reference evapotranspiration, evapotranspiration potential, Penman-Monteith equation, crop water requirements, climate change.

Bibliographie

- Allen R. G., Pereira L. S., Raes D. & Smith M., 1998. Crop Evapotranspiration. Guidelines for Computing Crop Water Requirements. FAO Irrigation and Drainage Paper 56. Food and Agriculture Organization (FAO) of the United Nations, Rome, 300 p.
- Ammann C., Neftel A., Spirig C., Leifeld J. & Fuhrer J., 2009. Stickstoff-Bilanz von Mähwiesen mit und ohne Düngung. *Agrarforschung* **16** (9), 348–353.
- Brutsaert W., 1982. Evaporation into the Atmosphere. D. Reidel Publishing Company, Dordrecht, 299 p.
- Calanca P. & Holzkämper A., 2010. Conditions agrométéorologiques du Plateau suisse de 1864 à 2050. *Recherche Agronomique Suisse* **1** (9), 320–325.
- Davies J. A., 1967. A note on the relationship between net radiation and solar radiation. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.* **93**, 109–115.
- Fuhrer J. & Jasper K., 2009. Bewässerungsbedürftigkeit von Acker- und Grasland im heutigen Klima. *Agrarforschung* **16**, 396–401.
- Jensen M. E., Burman R. D. & Allen R. G. (eds), 1990. Evapotranspiration and Irrigation Water Requirements. ASCE Manuals and Reports on Engineering Practice No. 70. American Society of Civil Engineers, New York, 332 p.
- Monteith J. L., 1965. Evaporation and environment. pp. 205–234. In: G. E. Fogg (ed.) Symposium of the Society for Experimental Biology, The State and Movement of Water in Living Organisms, Vol. 19, Academic Press, Inc., NY.
- Neftel A., Ammann C., Calanca P., Flechard C., Fuhrer J., Leifeld J. & Jocher M., 2005. Treibhausgasquellen und -senken: Die «Kyoto-Wiese». *Agrarforschung* **12**, (8), 356–361.
- Priestley C. H. B. & Taylor R. J., 1972. On the assessment of surface heat flux and evaporation using large-scale parameters. *Monthly Weather Review* **100**, 81–92.
- Primault B., 1962. Du calcul de l'évapotranspiration. *Arch. Met. Geoph. Biocl. Series B* **12**, 124–150.
- Primault B., 1981. Extension de la validité de la formule suisse de calcul de l'évapotranspiration. *Bericht der Schweizerischen Meteorologischen Anstalt (MeteoSchweiz)* **103**, 1–8.
- Schrödter H., 1985. Verdunstung. Anwendungsorientierte Messverfahren und Bestimmungsmethoden. Springer-Verlag, Berlin, 186 p.
- Slatyer R. O. & McIlroy I. C., 1961. Practical Microclimatology. Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation (CSIRO), Melbourne, Australia, 310 p.
- Thornthwaite, C. W., 1948. An approach toward a rational classification of climate. *Geograp. Rev.* **38**, 55–94.
- Turc L., 1961. Evaluation des besoins en eau d'irrigation, évapotranspiration potentielle, formule simplifiée et mise à jour. *Ann. Agron.* **12**, 13–49.