

Oscillations journalières de la profondeur des nappes en l'absence de précipitations ⁽¹⁾

J. CALLÈDE, M. HALLAIRE * et F. A. DAUDET **

Service hydrologique, O.R.S.T.O.M.,
19, rue Eugène-Carrière
75018 Paris

* Département de Bioclimatologie,
Centre de Recherches agronomiques, I.N.R.A.,
78000 Versailles

** Station de Bioclimatologie,
Centre de Recherches agronomiques des Antilles, Domaine Duclos
97170 Petit Bourg (Guadeloupe)

Résumé

L'oscillation diurne de la profondeur de la nappe (fig. 1), observable en l'absence de précipitation est responsable de la variation journalière du débit des sources et des rivières.

L'amplitude de cette oscillation est d'autant plus grande que la nappe est proche de la surface, que l'enracinement de la végétation est profond et l'évapotranspiration potentielle élevée ; elle atteint fréquemment plusieurs cm et peut exceptionnellement dépasser 15 cm.

Sachant que le phénomène peut se produire en l'absence de circulation latérale (fig. 2), on a cherché une explication qui ne tienne compte que des flux et de la variation du potentiel selon la direction verticale.

Imaginant que les conditions d'équilibre sont à peu près réalisées en fin de nuit, les profils de potentiels matriciels au dessus de la nappe peuvent être alors représentés par des droites de pente unité (profils ψ_0 et ψ_1 , fig. 5), le vecteur translation $\psi_0 - \psi_1$ étant lié à la quantité d'eau cédée par le sol au cours du cycle $t_0 - t_1$. Quant aux profils intermédiaires, de jour (ψ_j), et de nuit (ψ_n), on peut les situer par rapport aux précédents en tenant compte de l'évolution journalière de la profondeur de la nappe (Z_N) et du sens du flux (per ascensum le jour, per descensum la nuit).

En première analyse, ces profils semblent indiquer que la quantité d'eau cédée par le sol, pendant tout ou partie de la phase diurne (profils $\psi_0 \rightarrow \psi_j$) est très supérieure à la quantité d'eau cédée au cours du cycle (profils $\psi_0 \rightarrow \psi_1$). Pour lever cette contradiction, il faut admettre que le potentiel efficace, ψ_e responsable des flux verticaux, peut prendre des valeurs inférieures à $\psi(\theta)$ (valeur de ψ déterminée en fonction de l'humidité θ en condition d'équilibre) lorsque le sol est soumis au dessèchement.

Cette étude confirmerait donc la notion de potentiel efficace introduite antérieurement sur la base du schéma de circulation de l'eau indiqué figure 6.

Du point de vue méthodologique, le phénomène étudié ici a des conséquences évidentes. On notera également que l'amplitude de l'oscillation indique dans quelle mesure la nappe contribue à l'alimentation hydrique de la végétation.

Les fluctuations journalières du débit des rivières ont été notées dans la plupart des régions du monde.

En en recherchant l'origine, on a pu vérifier (Mugge, 1954; Ronsch, 1965) qu'elles correspondaient à des oscillations de période journalière du débit au niveau même de

⁽¹⁾ Extrait de la Thèse de Docteur-Ingénieur de J. Callède soutenue le 30 juin 1977, à l'Université de Paris VI.

O. R. S. T. O. M. 28 NOV. 1978

Collection de Référence

n° B 9425 Hydro

la source, lorsque celle-ci est alimentée par une nappe de faible profondeur, que la végétation surmontant la nappe est profondément enracinée et, lorsqu'on se trouve par ailleurs en période sèche. Quelques auteurs enfin (Callède, 1977 ; Jaworski, 1968 ; Troxell, 1936 ; Tschinkel, 1963 ; Ubell, 1959 ; Voronin, 1973 ; White, 1932) ont étudié l'oscillation diurne de la nappe, oscillation observable dans les conditions précitées et responsable de la variation systématique du débit constatée à la source.

Nous limitant ici à l'oscillation de la nappe souterraine, nous décrirons le phénomène, indiquerons et critiquerons diverses explications fournies antérieurement et proposerons enfin une interprétation nouvelle fondée sur les processus de circulation de l'eau dans la frange capillaire.

I. — Description du phénomène

L'enregistrement piézométrique reporté figure 1 est un exemple parmi beaucoup d'autres, illustrant l'oscillation diurne de la nappe.

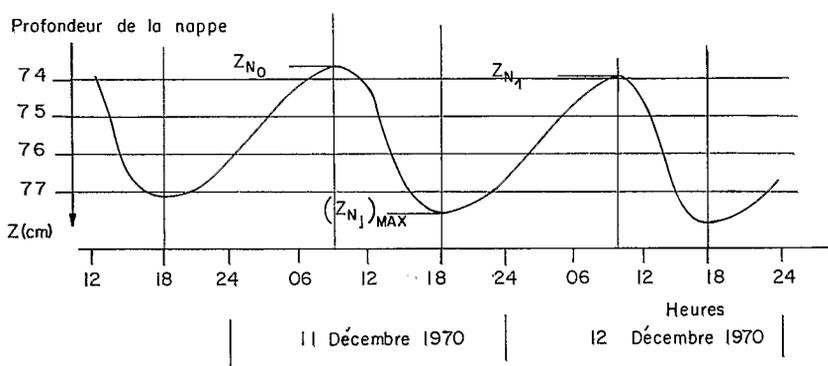


FIG. 1. — *Oscillation journalière de la nappe*
(observation de J. C. Olivry, Cameroun, les 11 et 12.12.70).
Diurnal oscillation of the water table.

Si l'on repère deux profondeurs successives Z_{N_0} et Z_{N_1} de la nappe à son point le plus haut, à 24 h d'intervalle, on note une baisse générale du niveau ($Z_{N_1} - Z_{N_0}$) de l'ordre ici de 0,3 cm par jour. Mais, à cette variation d'échelle saisonnière, se superpose une oscillation nyctémérale dont l'amplitude atteint ici 3,5 cm ; ainsi, l'abaissement de la nappe au cours d'une fraction de la journée ($Z_{N_j} - Z_{N_0}$) est plus de dix fois supérieur à l'abaissement journalier.

On notera également sur l'exemple illustré par la figure 1 que la nappe est à son niveau le plus haut vers 9 h, le plus bas vers 18 h.

Une confirmation du phénomène peut être donnée par l'écoulement des lysimètres après un apport d'eau excédentaire, en début de journée.

On constate en effet (fig. 2) que si le drainage s'arrête en fin de matinée (temps t_2 , fig. 2), témoignant ainsi de l'abaissement de la nappe au dessous de l'exutoire, il reprend très généralement dans la soirée (temps t_3 , fig. 2) témoignant alors du rehaussement de la nappe. Une telle observation réalisée en case et en l'absence par consé-

quent de flux latéraux, indique que dans l'explication de l'oscillation diurne, il n'y a lieu de prendre en considération que les flux verticaux.

N' DJAMENA 8-1-68

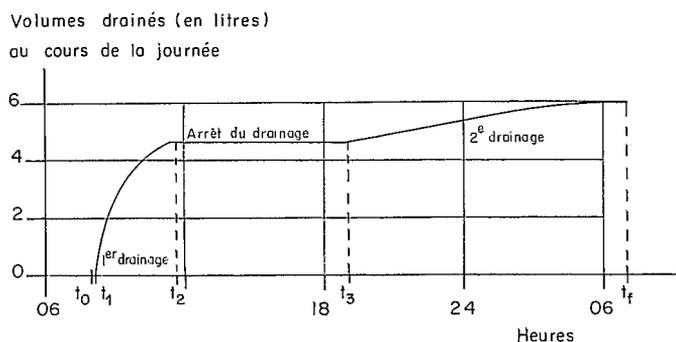


FIG. 2. — Somme des quantités d'eau écoulées d'un évapotranspiromètre après une irrigation appliquée au temps t_0 .

Water volumes flowing from an evapotranspirometer after an irrigation applied at the time t_0 .

Revenant aux enregistrements piézométriques dont la figure 1 ne donnait qu'un exemple, on notera que la phase, caractérisée figure 1 par les deux heures de la journée 9 h et 18 h se retrouve à 1 heure près dans la quasi totalité des cas, du moins en région tropicale où la durée du jour reste toujours voisine de 12 heures. Le rapport de l'amplitude à la baisse moyenne journalière peut souvent atteindre 10 comme il apparaît figure 1. Quant à l'amplitude, elle est susceptible de varier de 0 à quelque 15, exceptionnellement 20 cm. Avoisinant 0 en période pluvieuse, l'amplitude de l'oscillation observée en l'absence de précipitation apparaît d'autant plus importante :

- que la nappe est proche de la surface ;
- que le développement racinaire est plus important. Ainsi, dans des conditions par ailleurs sensiblement identiques (même sol sableux, nappe à 80 cm de profondeur) Jaworksi, en Pologne, a pu noter une amplitude de 2 cm sous prairie, 3 cm sous pomme de terre, 16 cm sous peuplier ;
- que le rayonnement et par corollaire, l'amplitude de température, le déficit de saturation en milieu de journée, les gradients de température, le déficit de saturation en milieu de journée, les gradients de température dans le sol et l'évapotranspiration potentielle sont élevés.

II. — Etude critique des explications antérieures

Pour mémoire, indiquons tout d'abord que si l'on a évoqué parfois certains facteurs autres que la température et l'évapotranspiration, qui présentent des variations cycliques systématiques de périodicité journalière (pression atmosphérique, marées terrestres, parfois vent) leur action n'a finalement pu être retenue.

Il en est de même de la dilatation des puits supportant les limnigraphes, sous l'effet des variations de température.

En fait l'abaissement de la nappe durant la journée est la conséquence évidente de l'évapotranspiration et de la suction radicaire qu'elle provoque dans la frange capillaire. Ce qui reste à expliquer, c'est pourquoi et comment la nappe se relève en l'absence de tout apport extérieur.

On se limitera à mentionner les deux explications données respectivement par Ubell et Olivry.

Le schéma explicatif d'Ubell (1959) revient à supposer l'existence d'un flux de vapeur selon la direction verticale, flux qui résulterait du gradient de température dans le sol et pourrait conduire à la réalimentation de la nappe à partir des réserves sus-jacentes.

Cette interprétation ne semble pas pouvoir être retenue :

Même en tenant compte du flux liquide provoqué par les gradients de température (thermodiffusion) et qui s'ajoute au flux vapeur, les gradients de température observés au-delà de quelques décimètres sont bien trop faibles pour pouvoir provoquer des remontées de la nappe aussi importantes que celles que l'on a pu observer.

D'autre part, ce flux *per descensum* étant d'origine étrangère au flux *per ascensum* qui provoque l'abaissement de la nappe, on ne comprendrait pas pourquoi la nappe remonte dans tous les cas d'une hauteur à peu près équivalente à son abaissement.

Le schéma d'Olivry (fig. 3) consiste à faire intervenir deux flux liquides : le flux *per ascensum* provoqué par la suction radicaire (lequel tend à abaisser la nappe) et le flux latéral dirigé vers la rivière ou la source, lequel tend à rehausser la nappe et est d'autant plus important que celle-ci s'est abaissée sous l'effet de la suction. Dès lors, les oscillations constatées résulteraient d'une variation systématique, avec changement de signe, de la différence des deux flux.

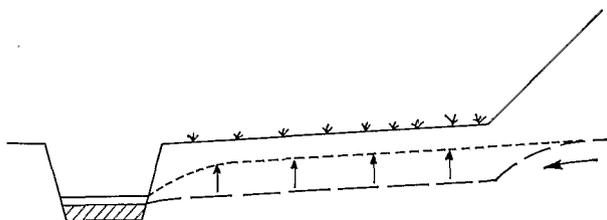


FIG. 3. — Profils de la nappe en travers de la rivière.

Profiles of the water table across the river.

Ce schéma ne peut être lui non plus retenu, ne serait-ce que parce qu'il ne peut s'appliquer aux cases lysimétriques où l'on retrouve cependant le même battement de la nappe, comme le montre la figure 2. Si les flux latéraux peuvent perturber l'oscillation diurne, ils n'en sont pas la cause ; aussi n'en tiendrons-nous pas compte dans l'explication proposée ci-après.

III. — Le schéma explicatif proposé

Pour la raison indiquée ci-dessus, l'explication proposée ici exclura les transferts latéraux tels que ceux résultant d'un drainage oblique, et s'appuiera sur les profils et les flux examinés uniquement sur la verticale du lieu considéré.

a) L'évolution journalière des profils de potentiel matriciel

Nous porterons l'attention sur l'évolution journalière des profils de potentiel matriciel ψ en fonction de la profondeur z .

Notant que la profondeur de la nappe Z_N est celle où le potentiel est nul, on peut par le raisonnement, imaginer la forme du profil dans les horizons sus-jacents à différents moments du nyctémère.

Considérons d'abord les moments où la nappe est au plus haut (profondeurs Z_{N0} et Z_{N1} , fig. 1) c'est-à-dire vers le début de la matinée ; admettons que, suite au rééquilibrage qui s'est fait durant la nuit, les profils traduisent alors un état proche de l'équilibre, c'est-à-dire l'absence de flux. Cet état correspond à un potentiel total

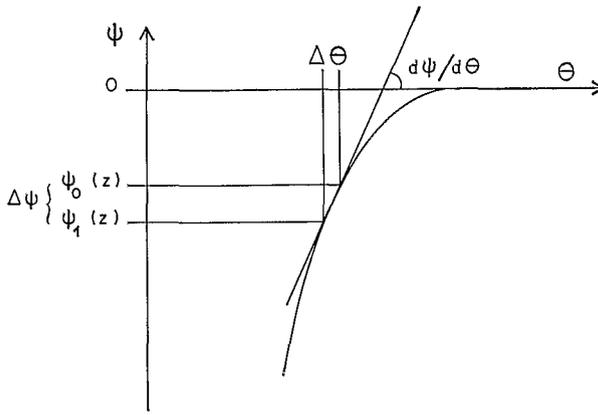


FIG. 4. — Relation $\psi(\theta)$.

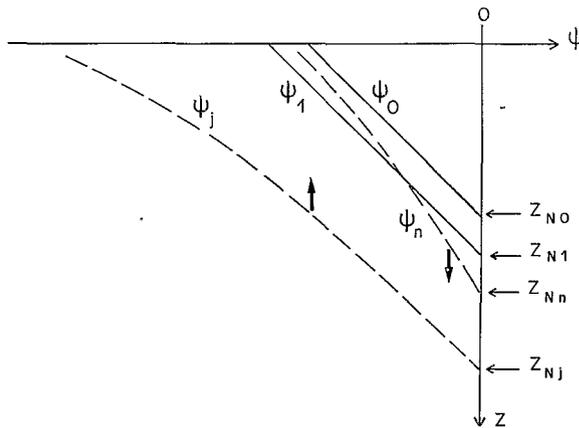


FIG. 5. — Evolution journalière des profils de potentiel matriciels :

ψ_0 et ψ_1 : profils successifs d'équilibre,

ψ_j et ψ_n : profils intermédiaires correspondant aux phases jour (ψ_j) et nuit (ψ_n) (les flèches indiquent le sens du transfert).

Diurnal evolution of the profiles of matrix potential :

ψ_0 and ψ_1 : successive profiles of equilibrium,

ψ_j and ψ_n : intermediary profiles which are corresponding to the daytime (ψ_j) and the night (ψ_n) (the arrows indicate the direction of the transfer).

($\psi - Z$) constant à tous les niveaux ; ainsi, au-dessus de la nappe où $\psi = 0$, les profils $\psi(Z)$ seront représentés par les droites de pente unité indiquées figure 5 (profil $\psi_0(Z)$ au temps t_0 quand la nappe est à la profondeur Z_{N_0} et profil $\psi_1(Z)$ au temps $t_1 = t_0 + 1$ jour, quand la nappe est à la profondeur Z_{N_1}).

On notera que le vecteur translation $\Delta\psi$ qui fait passer de $\psi_0(Z)$ à $\psi_1(Z)$ est égal à l'abaissement journalier moyen de la nappe $Z_{N_0} - Z_{N_1}$ (soit 0,3 cm dans le cas représenté figure 1).

Compte tenu de la relation caractéristique du sol, existant entre le potentiel matriciel ψ et l'humidité volumique θ (fig. 4), on peut relier à la variation $\Delta\psi$ ainsi constatée une variation d'humidité $\Delta\theta$.

A un niveau donné Z où le potentiel matriciel varie systématiquement :

de la valeur $\psi_0(Z) = Z - Z_{N_0}$

à la valeur $\psi_1(Z) = \psi_0(Z) + \Delta\psi = Z - Z_{N_1}$,

la variation d'humidité sera donnée par

$$\Delta\theta = \Delta\psi \left(\frac{d\psi}{d\theta} \right)^{-1} \quad (1)$$

$d\psi/d\theta$ représentant la pente de la courbe $\psi(\theta)$ (fig. 4) à l'intérieur de la gamme de variation $\psi_0, \psi_1 = \psi_0 + \Delta\psi$ du potentiel considéré (pente qui sur les gammes $\Delta\psi$ de 1 voire quelques cm peut être considérée comme constante).

Ainsi le stock d'eau Q cédé par le sol (c'est-à-dire l'évapotranspiration en l'absence de tout autre apport) peut être relié au vecteur translation $\Delta\psi$ par :

$$Q = ETR = \int_{Z_N}^0 \Delta\psi \left(\frac{d\psi}{d\theta} \right)^{-1} dZ. \quad (2)$$

Cherchons maintenant à situer les profils intermédiaires de milieu de journée et de nuit.

De jour : l'expérience montrait (fig. 1) que de jour, et en particulier en fin d'après midi, la profondeur de la nappe atteignait une valeur Z_{N_j} nettement supérieure à Z_{N_0} ou Z_{N_1} . Cette profondeur nous donne un point du profil $\psi_j(Z)$ recherché, le point ($\psi = 0$; $Z = Z_{N_j}$) (fig. 5).

Mais le *raisonnement* nous incite à penser que contrairement au cas précédent, la pente du profil sera supérieure à l'unité puisque la succion radiculaire crée un flux *per ascensum*.

Ainsi est-on amené au tracé d'un profil $\psi_j(Z)$ tel que celui représenté figure 5, entièrement « à gauche » du profil $\psi_1(Z)$: à toute profondeur le potentiel ψ atteint des valeurs plus faibles que celles observées en fin de cycle. Ce profil exprime entre autres choses que, si l'abaissement diurne de la nappe ($Z_{N_j} - Z_{N_0}$) est par exemple dix fois plus grand que l'abaissement journalier moyen ($Z_{N_1} - Z_{N_0}$), l'abaissement diurne de potentiel $\psi_0 - \psi_j$ à toute profondeur Z sera plus que dix fois supérieur à l'abaissement moyen journalier de potentiel $\Delta\psi = \psi_0 - \psi_1$. Ainsi, l'application de la formule (2) indiquerait une perte en eau du sol durant la phase diurne plus de dix fois supérieure à la perte en eau sur l'ensemble du nychémère ; nous reviendrons plus loin sur ce résultat contradictoire.

De nuit : L'expérience montrait (fig. 1) que la nappe remonte tout le long de la nuit pour atteindre la profondeur Z_{N_1} le matin suivant. Retenons une profondeur Z_{N_n}

intermédiaire entre Z_{Nj} et Z_{N1} et portons sur le graphique de la figure 5 le point ($\psi = 0, Z = Z_{Nn}$) comme point de départ d'un profil nocturne $\psi_n(Z)$.

Si l'on suppose que les transferts ont alors lieu de haut en bas, comme le laisse supposer la remontée de la nappe, il faut admettre que la pente est inférieure à l'unité ce qui conduit à un tracé tel que celui représenté par ψ_n (fig. 5).

L'évolution des profils intermédiaires (ψ_j et ψ_n) entre les deux profils d'équilibre (ψ_0 et ψ_1) laisse apparaître une contradiction que nous avons déjà relevée et qu'il convient de lever.

La contradiction est la suivante : Si les quantités d'eau cédées ou gagnées par le sol sont bien reliées aux variations de potentiel $\Delta\psi$ par la formule (2), il faut admettre que la perte en eau Q sur l'ensemble du nyctémère (profils $\psi_0 - \psi_j$) résulte :

- d'une perte égale à NQ (avec $N > 10$) durant la phase diurne (profils $\psi_0 - \psi_j$),
- puis d'un gain égal à $(N - 1) Q$ durant la nuit (profils $\psi_j - \psi_1$).

La disparition puis la réapparition de cette quantité d'eau $(N - 1) Q$ en l'absence de tout apport extérieur ne peuvent être retenues comme plausibles.

b) Signification des potentiels matriciels en phase diurne

Pour lever la contradiction, il faut admettre que les transpirations élevées en phase diurne et les succions qu'elles développent alors au niveau racinaire sont capables de créer de façon quasi instantanée un état de tension de l'eau dans le sol et que dans ces conditions, le potentiel ψ peut atteindre des valeurs inférieures (supérieures en valeur absolue) à la valeur $\psi(\theta)$ définie en conditions d'équilibre. S'il en est bien ainsi, la variation de potentiel observée à un niveau ne traduirait pas forcément une variation concomitante de l'humidité et en particulier l'accroissement systématique de ψ du jour à la nuit (profils ψ_j et ψ_n , fig. 5) ne signifie pas que l'humidité augmente à tout niveau.

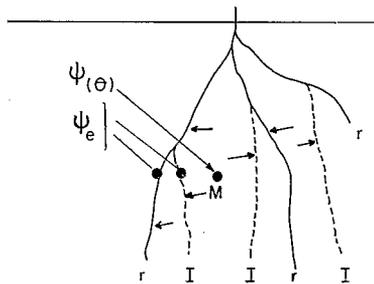


FIG. 6. — Schéma supposé de la circulation de l'eau dans les sols en voie de dessèchement, montrant :

- les voies de circulation macroscopique de l'eau (r : racine ; I : itinéraires privilégiés dans le sol) ;
- les flux par microdiffusion (flèches) correspondant au dessèchement du sol et conduisant à un potentiel efficace ψ_e (en I et r) plus faible que $\psi(\theta)$.

Hypothetical scheme of the transfer of water in drying soil showing :

- macroscopical transfer paths of the water (r : roots ; I : privileged paths in soil),
- microscopical flows (arrows) which cause the drying of the soil and lead to an effective potential (near I and r) lower than $\psi(\theta)$.

Un schéma proposé antérieurement (Hallaire, 1963) et que nous rappellerons brièvement en fournit une explication : admettons que le débit macroscopique selon la verticale ait lieu selon des itinéraires privilégiés qui sont les racines d'une part (voies r , fig. 6) mais également l'ensemble des points du sol de moindre résistance (voies I , fig. 6) ; tenons compte en outre de la microdiffusion qui a pour effet d'alimenter à tout niveau ces itinéraires (I et r) et simultanément de provoquer le dessèchement des mailles délimitées par les voies I et r ; on peut alors écrire que le potentiel, dit efficace, ψ_e au niveau de I ou r est égal au potentiel matriciel $\psi(\theta)$ au cœur des mailles (point M , fig. 6) corrigé d'un terme qui exprime la chute de potentiel liée à la microdiffusion ; enfin, si l'on admet en première approximation qu'il y a proportionnalité entre ce terme correctif et la variation de teneur en eau $d\theta/dt$ (négative dans le cas du dessèchement) on aboutit à la formule :

$$\psi_e = \psi(\theta) + K d\theta/dt. \quad (3)$$

Selon ce schéma, et comme le fait apparaître la formule (3), le potentiel efficace ψ_e se confondrait avec $\psi(\theta)$ lorsque l'équilibre est réalisé ($d\theta/dt = 0$). Cela signifie que les profils d'équilibre $\psi_0(Z)$ et $\psi_1(Z)$ représentés figure 5 exprimeraient réellement la variation de $\psi(\theta)$ et que l'écart entre les deux profils serait bien lié à la quantité d'eau cédée par le sol sur l'ensemble de la période (0 — 1) comme l'indique l'équation (2).

En phase diurne, par contre, lorsque la transpiration provoque le dessèchement du sol ($d\theta/dt < 0$), le potentiel efficace ψ_e prendrait des valeurs inférieures à $\psi(\theta)$, l'écart étant d'autant plus important que la vitesse de dessèchement ($-d\theta/dt$) est plus grande ; ainsi l'abaissement important de ψ constaté de jour puis l'accroissement de même ordre durant la nuit résultent :

- non pas d'un abaissement puis d'un accroissement de l'humidité,
- mais d'un accroissement, puis d'une diminution de la vitesse de dessèchement.

L'application de la formule (2) pour évaluer l'évolution du stock d'eau dans le sol conduirait ici à des résultats profondément erronés.

Ainsi, globalement et en première approximation, le schéma de circulation de l'eau dans le sol en voie de dessèchement (fig. 6) et la notion de potentiel efficace qui en découle rendent bien compte de l'évolution journalière des profils de potentiels supposés ($\psi_0 \rightarrow \psi_j$ et $\psi_j \rightarrow \psi_n$, fig. 5) et corrélativement de la variation de la profondeur à laquelle le potentiel est nul c'est-à-dire de la profondeur de la nappe.

On soulignera enfin que la chute de potentiel au-dessous de la valeur $\psi(\theta)$ sous l'effet du dessèchement du sol a été vérifiée expérimentalement par la technique de mesure micropsychrométrique dans les conditions de laboratoire (Rhaïem, 1972) et au champ (Daudet et Valancogne, 1977). Le potentiel efficace introduit primitivement pour rendre compte des transferts observés à l'échelle macroscopique et considéré à nouveau dans le cas présent pour interpréter les variations de profondeur de nappe, correspond donc bien au potentiel directement mesurable *in situ*.

c) Discussion

Si l'explication fournie ci-dessus rend compte de façon à peu près satisfaisante des faits rapportés par l'expérience, il reste à expliquer un décalage systématique entre l'oscillation de la nappe et la variation journalière de l'ETR. En effet, si le taux de

dessèchement du sol ($-d\theta/dt$) demeurerait proportionnel, à tout niveau, à l'ETR instantanée et si d'autre part, le potentiel efficace était donné de façon rigoureuse par l'équation (3), la nappe devrait atteindre son niveau supérieur, non pas à 9 h, mais en début de nuit et y demeurer jusqu'au lever du jour ; de même elle atteindrait son niveau inférieur non pas à 18 h mais vers 14 h.

Pour expliquer cette réponse différée de la nappe aux variations de l'ETR, on peut noter entre autres choses :

— que le taux de dessèchement du sol ($-d\theta/dt$) est forcément déphasé par rapport à l'ETR en raison de la mobilisation du stock d'eau contenu dans le végétal, stock qui diminue en début de journée pour réaugmenter le soir et durant la nuit ;

— que la capacité en eau c des itinéraires (I ou r) n'est pas forcément négligeable vis-à-vis de la capacité C des mailles. Dans ces conditions, la réalisation du gradient de potentiel, selon MI (gradient de potentiel nécessaire pour assurer le taux de dessèchement voulu au cœur des mailles), implique la perte d'une certaine quantité d'eau au niveau de c ; il en résultera un certain délai avant que le potentiel efficace en I ou en r atteigne la valeur voulue pour assurer au cœur même de la maille le transfert correspondant à $\theta d/dt$.

Nous soulignerons à cet égard la distinction qui s'impose entre :

— le modèle supposé de circulation de l'eau (fig. 6) qui suffit pour expliquer qualitativement qu'en phase de dessèchement ($d\theta/dt < 0$), les potentiels qui régissent en fait les transferts verticaux sont inférieurs à $\psi(\theta)$,

— et l'expression, approximative et discutable, de ce potentiel, telle qu'elle est donnée par l'équation (3).

Il convient également de remarquer que la lente évolution de la nappe (et par conséquent, de l'ensemble du profil $\psi(Z)$) durant toute la nuit et le début de la matinée indique que l'équilibre n'est jamais tout à fait atteint. Ainsi les profils ψ_0 et ψ_1 introduits figure 5 comme points de départ de notre raisonnement doivent-ils être considérés en fait, non comme les profils réels de fin de nuit, mais simplement comme l'expression d'un équilibre vers lequel tend le profil de potentiel durant la nuit.

Conclusions

En conclusion de cette étude, on soulignera tout d'abord les erreurs grossières que l'on peut commettre lorsque l'on cherche à évaluer à partir de mesures instantanées, un débit moyen journalier. Cette remarque s'applique aussi bien au débit d'une rivière ou d'une source, que d'un puits peu profond, d'un réseau de drainage, d'un lysimètre ou d'un évapotranspiromètre.

De même, une mesure instantanée journalière du potentiel, sur un tensiomètre par exemple, risque de ne fournir qu'une indication très inexacte de l'évolution du potentiel hydrique d'un jour à l'autre.

Sur un plan plus fondamental, l'évolution journalière des profils de potentiels (que l'on est obligé d'admettre si l'on veut tenir compte de la variation journalière de la profondeur de la nappe et du sens des flux), confirme l'hypothèse avancée antérieurement que, dans un sol soumis au dessèchement, le potentiel efficace ψ_e , responsable des transferts macroscopiques, peut être très inférieur au potentiel $\psi(\theta)$

défini en fonction de l'humidité moyenne θ de la couche considérée. A défaut d'une explication plus élaborée, le modèle proposé antérieurement et qui revient à distinguer (fig. 6) les micro et les macrotransferts conduit à une interprétation satisfaisante.

Si l'oscillation journalière du niveau de la nappe ou du potentiel à un niveau donné peut être la source d'erreurs dont il convient de s'affranchir, par contre cette oscillation est susceptible de fournir des informations précieuses. En particulier, la possibilité d'alimentation hydrique d'un couvert végétal à partir de la nappe serait importante à connaître mais il est extrêmement difficile de l'apprécier. Il est intéressant de noter que l'oscillation diurne indiquée constitue pour le moins un indice des remontées capillaires à la frange racinaire.

Mais il y a lieu de souligner que l'investigation suggérée ici peut concerner des échelles d'espace très différentes :

Dans une parcelle comportant une collection d'espèces diversifiées (arboretum par exemple), l'oscillation diurne de la profondeur de la nappe doit pouvoir renseigner sur les facultés de la végétation, située à proximité immédiate du puits de mesure, à prélever l'eau de la nappe. Par contre, cette même faculté devra être rattachée à un couvert d'une certaine étendue si la mesure porte sur l'amplitude diurne du débit relevé à l'exutoire d'un réseau de drainage ou au niveau d'une source.

A l'échelle du laboratoire enfin, sur colonnes de sol et dans le cadre d'études touchant à la physiologie de la croissance des racines ou à la sélection des plantes, le battement d'une nappe à une (ou des) profondeur(s) donnée(s), sous l'effet d'une brusque variation de transpiration, peut constituer éventuellement un intéressant moyen de contrôle.

Reçu pour publication en mai 1978.

Summary

Diurnal oscillations of the water table level during dry periods

The diurnal oscillation of the water table level (fig. 1) which occurs during dry periods, is the cause of the diurnal variation of the flow of the springs and the rivers.

The amplitude of this oscillation increases when the water table is closer to the surface, when the roots are deeper and when the potential evapotranspiration is higher ; it often reaches some cm and exceptionally exceeds 15 cm.

As this phenomenon occurs even when there is no lateral movement (fig. 2), the explanation which we have looked for, only takes into account the vertical flow and vertical potential gradients.

If equilibrium is approximately reached at the end of the night, then the matrix potential profiles above the water table are straight lines, the slope of which is unity (see ψ_0 and ψ_1 , fig. 5), the translation vector $\psi_0 - \psi_1$ being related to the water losses of the soil during the whole period ($t_0 - t_1$). It is possible to draw approximately the intermediary profiles $\psi_3(z)$ and $\psi_n(z)$, knowing the diurnal variation of the water table level (where $\psi = 0$) and the direction of the transfer (per ascensum during the day time, per descensum during the night).

In a first analysis, these profiles appear to indicate that the water losses of the soil during the diurnal phase ($\psi_0 - \psi_1$) are more important than the losses during the whole period ($\psi_0 - \psi_1$).

This contradiction is explained if we assume that the effective potential (the variation of which determines vertical transfer) may reach lower values than $\psi(\theta)$ (the value which is given as a function of water content θ under equilibrium conditions) when the soil is undergoing drying. So this study confirms the notion of the effective potential which had previously been introduced on the bases of the transfer model shown in figure 6.

The methodological consequences of this phenomenon are evident. On the other hand, we note that the amplitude of the diurnal oscillation indicates how important is the contribution of the water table in the water consumptive use of the canopy.

Zusammenfassung

Tagesschwankungen des Grundwasserstands in Ermangelung von Niederschlägen

Die in Ermangelung von Niederschlägen beobachtete Tagesschwankung des Grundwasserstands (Abb 1) verursacht die tägliche Variation der Abflussmenge der Quellen und Flüsse.

Die Weite dieser Schwankung ist um so grösser als der Grundwasserspiegel der Oberfläche nahe liegt, als die Bewurzelung der Vegetation tief und die potentielle Evapotranspiration hoch sind ; sie erzielt oft mehrere Zentimeter und kann ausnahmsweise 15 Zentimeter übertreffen.

Da wir wissen, dass die Erscheinung ohne seitlichen Umlauf entstehen kann (Abb 2), wurde eine Erklärung gesucht, die nur Wasserflüsse und Potentialänderung gemäss der vertikalen Richtung berücksichtigt.

Wenn man annehmen darf, dass die Gleichgewichtsbedingungen am Ende der Nacht beinahe zustande gebracht sind, können die Profile des Matrixpotentials oberhalb des Grundwasserspiegels mit Geraden mit Einheitsgefälle, (ψ_0 und ψ_1 Profile Abb 5) wiedergegeben sein, sein, da der Verschiebungsvektor $\psi_0 - \psi_1$ mit der vom Boden abgegebenen Wassermenge während des $t_0 - t_1$ Zyklus verbunden ist. Die Zwischenprofile bei Tage (ψ_d) und nachts (ψ_n) können gegenüber den vorhergehenden angenommen werden unter Berücksichtigung der täglichen Evolution des Grundwasserstands (Z_n) und der Wasserflussrichtung (per ascensum bei Tage und per descensum nachts).

In erster Analyse scheinen diese Profile darauf hinzuweisen, dass die von Boden abgegebenen Wassermenge während der ganzen Tagesphase oder eines Teils davon ($\psi_0 \rightarrow \psi_d$) Profile sehr viel höher ist als die während des Zyklus abgegebene Wassermenge ($\psi_0 \rightarrow \psi_1$ Profile). Um diesen Widerspruch zu beseitigen, muss man annehmen, dass das für die vertikalen Wasserflüsse verantwortliche wirksame Potential ψ_e Werte erreichen, kann die niedriger als $\psi(0)$ liegen (ein Wert von ψ , der im Hinblick auf die Feuchtigkeit unter Gleichgewichtsbedingungen bestimmt wird), wenn der Boden der Entwässerung unterworfen ist.

Diese Untersuchung würde also den Begriff des wirksamen Potentials bestätigen, der aufgrund des auf Abb 6 vorgestellten Wasserumlaufplans vorher eingeführt worden ist.

Die hier untersuchte Erscheinung hat eindeutige Auswirkungen auf die Methodologie. Es ist auch bemerkenswert, dass die Schwankungsweite anzeigt, in welchem Umfang der Grundwasserspiegel zu der Wasserbesorgung der Vegetation beiträgt.

РЕЗЮМЕ

Суточные колебания уровня подземных вод в отсутствии дождевых осадков.

Ж. КАЛЛЕД, М. ХАЛЛИЕР, Ф. А. ДОДЕ.

Дневные колебания глубины уровня подземных вод (Рис. 1), наблюдающиеся в отсутствии дождевых осадков ответственны за суточные изменения водного режима источников и рек.

Амплитуда этих колебаний зависит от близости уровня подземных вод к поверхности глубины укоренения растительности и величины потенциальной эвапотранспирации ; она часто достигает нескольких сантиметров и, в исключительных случаях, может превысить 15 см.

Зная, что явление это может происходить при отсутствии бокового движения, была сделана попытка объяснить его с принятием во внимание потоков и изменений потенциалов только в вертикальном направлении.

Если предположить что к концу ночи достигаются приблизительно равновесные условия, профили матричных потенциалов над водной скатертью можно изобразить прямыми склона единицы (профили ψ_0 и ψ_1 , рис. 5), причем вектор поступательного движения $\psi_0 - \psi_1$ будет связан с количеством влаги отданной почвой в течении цикла $t_0 - t_1$. Что же касается промежуточных профилей, дневных (ψ_d) и ночных (ψ_n), они могут быть определены по отношению к предыдущим, принимая во внимание суточную эволюцию глубины уровня (Z_n) и направления потока (восходящий - днем, нисходящий - ночью).

Поверхностный анализ этих профилей как будто указывает, что количество влаги отданной почвой в течении части, или целой дневной фазы (профили $\psi_0 - \psi_d$) значительно превышает количество отданное в течении полного цикла (профили $\psi_0 - \psi_1$). Чтобы объяснить это противоречие необходимо допустить что эффективный потенциал ψ_e , ответственный за вертикальные потоки может быть меньше величины $\psi(0)$ (величина ψ , определенная в

зависимости от влажности θ в равновесном состоянии) в случаях, когда почва подвержена высыханию.

Данная работа подтверждает как будто понятие эффективного потенциала, введенного раньше, на основе схемы движения воды, указанной на рис. 6.

С точки зрения методологической, изучаемое явление имеет явные последствия. Необходимо также отметить что амплитуда колебаний указывает степень участия подземных вод в водном питании растений.

Références bibliographiques

- CALLÈDE J., 1977. *Oscillations journalières du débit des rivières en l'absence de précipitations*, Thèse de Docteur-ingénieur, Paris VI, 141 p.
- HALLAIRE M., 1963. Le potentiel efficace de l'eau dans le sol en régime de dessèchement, *Ann. agron.*, **14** (4), 393-428.
- JAWORSKI J., 1968. Evapotranspiration of plants and fluctuations of the ground water table. *AISH, Symposium de Wageningen*, Vol. II, n° 83, 730-39.
- MUGGE R., 1954. Aufzeichnung von luftdruck und erdbebenwellen mit hilfe von brunnen-spiegeln. *AISH, Assemblée générale de Rome*, Vol. II, n° 37, 49-52.
- OLIVRY J. C., 1970. *Variations journalières de débit des rivières Bamiléké en période de tarissement. Saison sèche 69-70. Mesures et interprétation*. ORSTOM. Yaoundé.
- RHAIEM H., 1972. Mesures comparées du potentiel matriciel de l'eau dans le sol en cours de dessèchement et à l'équilibre ; vérification de l'existence d'un potentiel efficace. *C. R. Acad. Sci.*, **274**, 3194-3196.
- RONSCH H., 1965. Tagesgänge im Abfluss und deren meteorologische Ursachen. *Z. Meteorol.*, Band 20, Heft 11/12, 364-371.
- TROXELL H. C., 1936. The diurnal fluctuation in the ground-water and flow of the Santa Ana River and its meaning. *Transactions American Geophysical Union*, **17**, 496-504.
- TSCHINKEL H. M., 1963. Short-term fluctuation in stream flow as related to evaporation and transpiration. *J. Geol. Res.*, **68** (24), 6459-6469.
- UBELL K., 1959. Moisture movement in unsaturated (three phases) soils with special regard to the utilisation of lysimeter observations. *AISH, Symposium de Hannoversch-Munden*, Vol. II, n° 49, 153-65.
- VALANCOGNE Ch. et DAUDET F. A., 1977. Etude *in situ* du potentiel hydrique sous une culture de maïs à l'aide d'un système automatique de mesure à micropsychromètre à effet Peltier. *Ann. agron.*, **28** (2), 137-157.
- VORONIN N. A., 1973. Ground water regime in the sands of arid regions. *Pochvovedenie*, n° 5, 82-92.
- WHITE W. N., 1932. A method of estimating ground-water supplies based on discharge by plans and evaporation from soil. *US Geological Survey. Water-supply Paper*, 659 A. Washington.