

REFERENCES

- Bernard, R., Soares, J. V. & Vidal Madjar, D. (1986) Differential bare field drainage properties from airborne microwave observations. *Wat. Resour. Res.* 22, 869-875.
- Bruckler, L. & Wilton, H. (1989) Use of remotely sensed soil moisture content as boundary conditions in soil-atmosphere water transport modeling. 2. Estimating soil balance. *Wat. Resour. Res.* 25 (12), 2437-2447.
- Chanzy, A. (en préparation) Couplage de mesures d'humidité de surface obtenue par l'addition de la fréquence avec des modèles simplifiés de bilan hydrique. Thèse de Doctorat, Institut National Agronomique de Paris-Grignon, France.
- Grant, D. R. (1975) Comparison of evaporation measurements using different methods. *Quart. J. Roy. Met. Soc.* 101, 543-550.
- Jackson, R. D., Reginato, R. J. & Iden, S. B. (1977) Wheat canopy temperature: a practical tool of evaluating water requirements. *Wat. Resour. Res.* 13, 651-656.
- Jackson, T. J. & Schmugge, T. J. (1989) Passive microwave remote sensing system for soil moisture: some supporting research. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 27 (2), 225-235.
- Passerat de Silans, A., Bruckler, L., Thony, J. L. & Vauchin, M. (1989) Numerical modeling of coupled heat and water flows during drying in a stratified bare soil. Comparison with field observations. *J. Hydrol.* 105, 109-138.
- Pertier, A. (1975) Etude physique de l'évapotranspiration dans les conditions naturelles. II. Expressions et paramètres dominant l'évapotranspiration réelle d'une surface "mince". *Agr. Agron.* 26 (2), 105-123.
- Seguin, B., Babel, S., Mongel, J. M. & Petit, Y. (1982) Utilisation de la thermographie IR pour l'estimation de l'évaporation régionale. I. Mise au point méthodologique sur le site de la Craie. *Agronomie* 2 (1), 7-16.
- Ulaby, F. T., Battilana, P. B. & Dobson, M. C. (1978) Microwave backscatter dependence on surface roughness, soil moisture and soil texture. I. Bare soil. *IEEE Trans. Geosci. Electron.* 16 (4), 286-295.
- Wilton, H. (1988) Couplage de mesures hyperfréquences en bande C et de modèles de transferts d'eau et de chaleur pour l'estimation du bilan hydrique sur sol nu. Thèse de Docteur Ingénieur de l'École Nationale Supérieure de Rennes, France.

Evaluation de l'évaporation à travers les sols par modélisation des profils isotopiques sous climat sahélien: exemple de la vallée du Niger

J. D. TAUPIN, L. DEYER, J. CH. FONTES

Laboratoire d'Hydrologie et de Géochimie Isotopique, Université Paris XI-Orsay, Bât. 504, F-91405 Orsay, France

Y. GUERO

Département des Sciences du Sol, Faculté Agronomique de Niamey, Niger

B. OUSMANE

Département de Géologie, Faculté des Sciences, BP 10662, Niamey, Niger

P. VACHIER

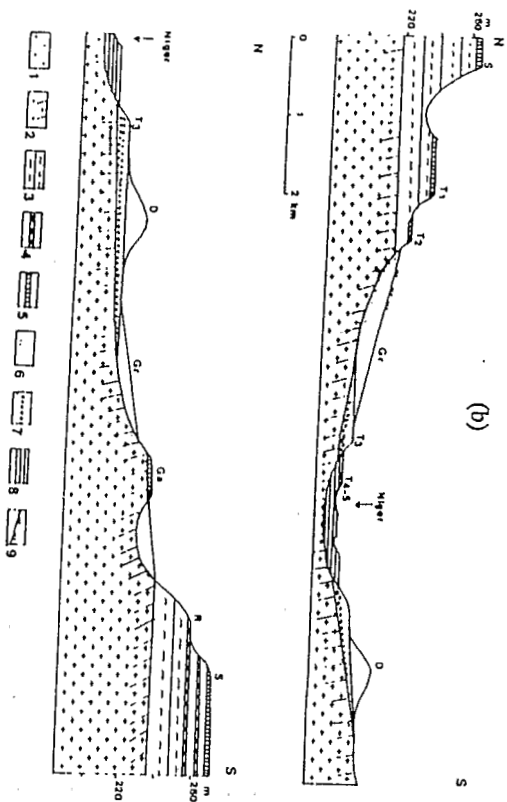
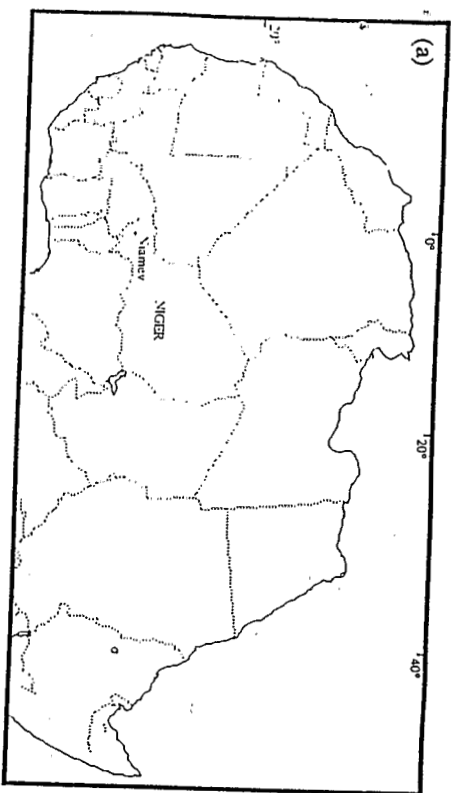
Département Sciences du Sol, Institut National de Recherche Agronomique, Grignon, France

Résumé Sous climat semi-aride ou aride, l'eau du sol tend à montrer un profil caractéristique de teneurs en deutérium et oxygène 18. Le traitement de Barnes & Allison permet une quantification de l'évaporation d'un sol contenant une nappe, dans des conditions de flux permanent ou quasi-permanent, à l'échelle locale en tenant compte des différents paramètres du sol (porosité, humidité volumique du profil, tortuosité etc.), ainsi que des variations de composition isotopique en profondeur. Différents types de sols de la Vallée du Niger (sableux, sablo-limoneux et sablo-argileux), à niveaux de nappe très variables ont été étudiés. La plupart des caractéristiques physiques de ces sols ont été mesurées (humidité volumique, densité, porosité) ou estimées (tortuosité). Ces valeurs ont ensuite été prises en compte dans la modélisation. Les valeurs calculées des lames d'eau évaporée à travers les sols s'échelonnent dans une gamme importante entre 7 mm an⁻¹ sous 5 m de couvert sablo-argileux et 115 mm⁻¹ sous 0,6 m de couvert sableux grossier.

CADRE GENERAL

La zone d'étude se situe au Niger occidental dans la région de Niamey et plus particulièrement sur les anciennes terrasses quaternaires du fleuve Niger entre 13,6°-14,5°N et 1°-2°E (Fig. 1). Ces terrasses sont bordées à l'est par les sédiments tabulaires gréseux à ciment argileux du Continental Terminal et à l'ouest essentiellement par des massifs granitiques et des sédiments schisteux tectonisés d'âge précambrien (Machens, 1973). Cinq niveaux de terrasses ont





- légende**
- 1 : socle
 - 3 : continental terminal
 - 5 : cuirasse ferrugineuse
 - 7 : graviers
 - 9 : encroûtement à tubulaires
 - R : recouvrement à tubulaires
 - Gr : glacis structural
 - T1, T2 : terrasses anciennes
 - T4, T5 : terrasses récentes
 - 2 : socle altéré (lithomarge)
 - 4 : bancs ferrugineux à oolithes
 - 6 : sable
 - 8 : argille
 - S : surface fini-Ct
 - D : dune fossile
 - Gr : glacis récent
 - T3 : terrasse moyenne

Fig. 1 Localisation de la zone d'étude (a), et morphologie (b) des terrasses du Niger dans la région de Nanney (Ousseini & Morel, 1989).

été reconnus (ont été creusés général induré sont dépourvus de matériaux compétence de

L'aire de soumise à l'insèche de direction nord- en fonction engendrent da courte saison précipitée sur (Météorologie représentative moyenne annuelle 4°C. L'humidité des masses d'air cours de l'année septembre, Mé

METHODOL

Le principe de nappe. Cette pas de prélève Les échantillo élanches, à fin sur la ph porosité sur la ph La phase une températ piégeage à l'az isotopes se fa l'erreur sur la deutérium.

PRINCIPE D

Un sol conten en équilibre d teneurs en is Généralement développement

intervient essentiellement sous forme vapeur. La courbe isotopique présente alors deux parties distinctes:

- Une zone d'enrichissement d'allure exponentielle à concavité vers le bas entre la nappe et une profondeur z_{ef} située à quelques dizaines de centimètres sous la surface; cette portion du profil correspond à un transit d'eau sous forme mixte, vapeur et liquide.
- Une zone à évolution plus ou moins linéaire ou à légère concavité vers le bas entre z_{ef} et la surface où les teneurs en isotopes lourds diminuent vers le haut; le transit d'eau dans cette partie sèche du profil se produit sous forme vapeur. La diminution des teneurs est ici due à un mélange par diffusion avec une vapeur d'eau atmosphérique appauvrie en isotopes lourds.

Le plan correspondant au maximum de l'enrichissement en isotopes lourds à la cote z_{ef} est le front d'évaporation.

La modélisation isotopique de ce système (Barnes & Allison, 1983, 1984) à partir du modèle de Philip & De Vries (1957), permet une évaluation de la perte évaporatoire E de la nappe à travers les deux zones du sol en régime permanent. Les variables et paramètres sont pour chaque niveau: teneurs isotopiques de l'eau du sol δ , humidité volumique θ , porosité n , tortuosité τ , masse volumique de l'eau ρ_w , teneur en vapeur d'eau du sol N_{sat} ; d'autre part il est nécessaire de connaître l'humidité relative de l'air h_{am} , la diffusivité de l'isotope i dans l'air D_{am}^i , la diffusivité de l'isotope i dans l'eau D_{liq}^i .

Pour la zone de transit mixte, l'équation du profil isotopique s'écrit:

$$(\delta_i - \delta_i^{ref}) = (\delta_i^{ef} - \delta_i^{ref}) \exp[f(z)/Z_i] \tag{1}$$

avec:

$$f(z) = \bar{\theta} \int_{z_{ef}}^z dz / [\theta + N_{sat} * D_{am} * (n - \theta) / (\rho_w * D_{liq}^i)]$$

dans laquelle $\bar{\theta}$ est l'humidité volumique moyenne et Z_i est la distance de diffusion de l'espèce isotopique dans le sol.

Une représentation graphique logarithmique permet de connaître Z_i que l'on peut reporter dans l'équation du taux d'évaporation:

$$E = D_{liq}^i * \tau * \theta / Z_i \tag{2}$$

Pour la zone de transfert d'eau sous forme vapeur, le taux d'évaporation est donné par l'équation:

$$E = (1 - h_{am}) * N_{sat} * D_{am} * \tau * (n - \theta) / \rho_w * z_{ef} \tag{3}$$

La comparaison des teneurs en oxygène 18 et en deutérium apporte des informations supplémentaires sur l'état évaporatoire du sol. L'évaporation, contrairement à la condensation, qui est un processus à l'équilibre et dépend seulement de la température, est un processus hors équilibre. L'enrichissement isotopique à l'évaporation est plus ou moins intense et dépend des paramètres

atmo
et d
(Gra
chac
1961
dont
pent
de t
d'év
de l
est t

RES

Qua
-
-
-
Deu
noye
a p
ains

Car

Les
moy
en
(Na
Till
fleur
den
Nar
égal
gros
(tex
mer
infé
méc
vari
gare

sable moyen en profondeur (texture médiane jusqu'à 0,60 m, 150 μm et 40 μm au-dessous). La mesure de la masse volumique donne une valeur moyenne de 1,35 g cm^{-3} pour une porosité de 40%.

Teneur en eau et en isotopes (Figs 2 à 5)

Des conditions de sécheresse d'au moins deux mois ont précédé les prélèvements. On peut donc penser que les réserves hydriques du sol, issues de la saison des pluies antérieure, ont été fortement réduites (voire éliminées) et que l'établissement du profil hydrique dans la zone non saturée est, en grande partie, régi par les propriétés hydrodynamiques du sol. Les profils de teneur en eau montrent tous un faciès évaporé avec une forte diminution de bas en haut, mais on constate que la profondeur de la nappe et la texture du sol influent fortement sur l'humidité moyenne du profil et sur l'humidité en surface.

La forme des profils de teneurs en oxygène 18 et en deutérium montrent tous une courbe d'allure exponentielle caractéristique de la présence dans le sol d'une zone de transit évaporatoire mixte (eau + vapeur). On peut aussi noter la présence, sur deux profils (Narnardé Goungou I et Tillabéri) d'une zone de flux en phase vapeur dans les premiers centimètres du sol (Fig. 2(a) et Fig. 5).

Les deux sondages effectués à Narnardé Goungou, à des périodes différentes, montrent une évolution nette (Fig. 2). La variation de teneurs en oxygène 18 pour les deux profils est identique et s'étale sur plus de 12‰ (-4,3‰ teneur de la nappe à + 8‰ teneur du front d'évaporation). La différence de forme entre ces deux profils résulte principalement du temps conduit à l'établissement d'une zone de transit en phase vapeur de plus en plus importante au cours du temps, ce qui a pour effet de translater verticalement le front d'évaporation (Walker et al., 1988).

Relation oxygène 18-deutérium (Fig. 6)

Les droites d'évaporation des différents profils semblent converger vers une même zone de la droite des précipitations locales. Cela montre une alimentation commune de ces nappes par de l'eau, dont la teneur isotopique correspond aux précipitations des mois de juillet à septembre, Taupin (1990).

Les valeurs des pentes des profils de Narnardé Goungou, Tillabéri et km 85 (entre 145 et 240) rendent bien compte de conditions d'évaporation de nappe à travers un sol non saturé et révèlent un état de sécheresse avancé des profils de sols (Allison et al., 1983). On note toutefois, que la pente de la relation $\delta^2\text{H}-\delta^{18}\text{O}$ du profil de Narnardé Goungou en novembre est plus faible qu'en avril, bien que le profil soit plus humide. Il est fort probable que le mélange, à chaque niveau du sol d'une part du flux issu de la nappe et de résidus d'événements pluvieux en cours d'évaporation, à la suite de la dernière saison des pluies, conduit à une distribution des points

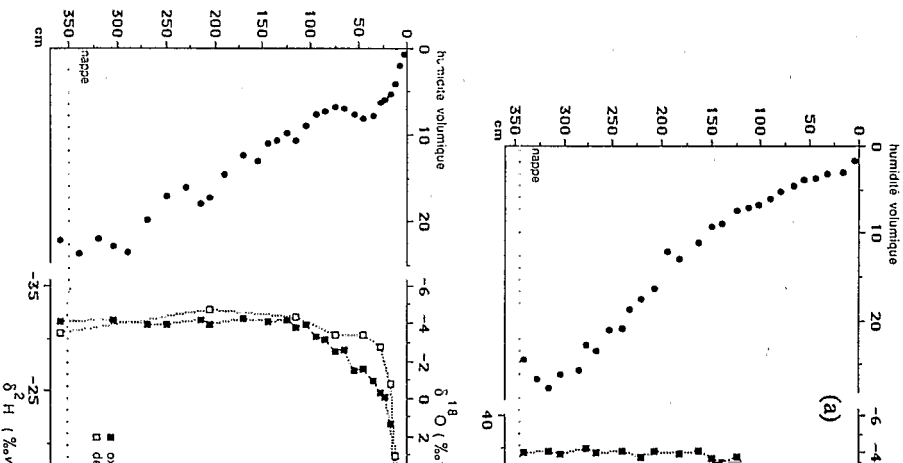


Fig. 2 Profils des teneurs en Narnardé Goungou: (a) avril comparaison des deux profils de t

correspondant à une pente plus faible pour la saison des pluies (Fontes et al., 1986).

La relation $\delta^2\text{H}-\delta^{18}\text{O}$, du profil de riz en revanche une pente un peu plus élevée compte de son état largement plus humide et une texture favorisant le transit de l'eau sou

Modélisation des profils isotopiques d'oxygène

La variation de température dans le sol

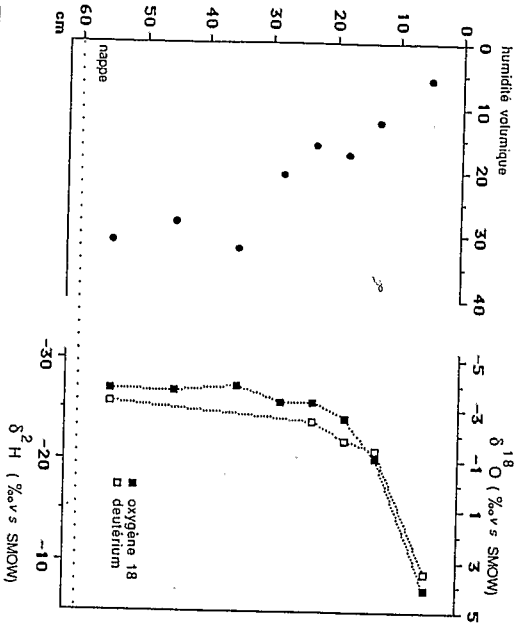


Fig. 3 Profil des teneurs en eau et en isotopes au site du km 85.

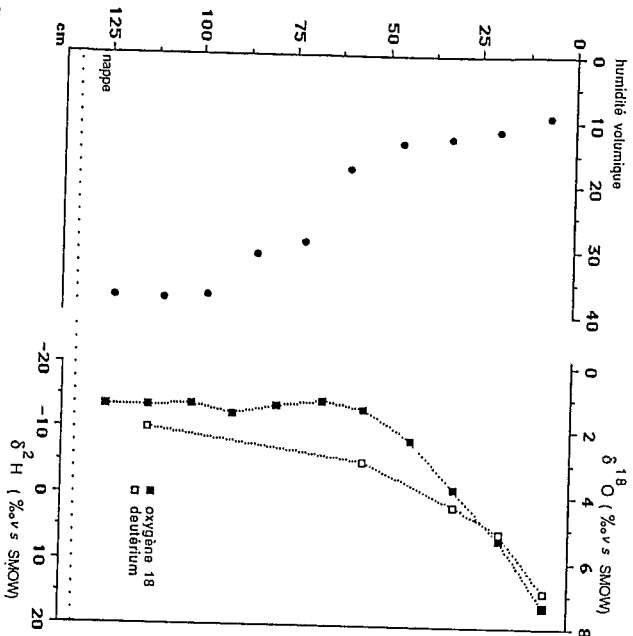


Fig. 4 Profil des teneurs en eau et en isotopes au site de Namari Goungou.

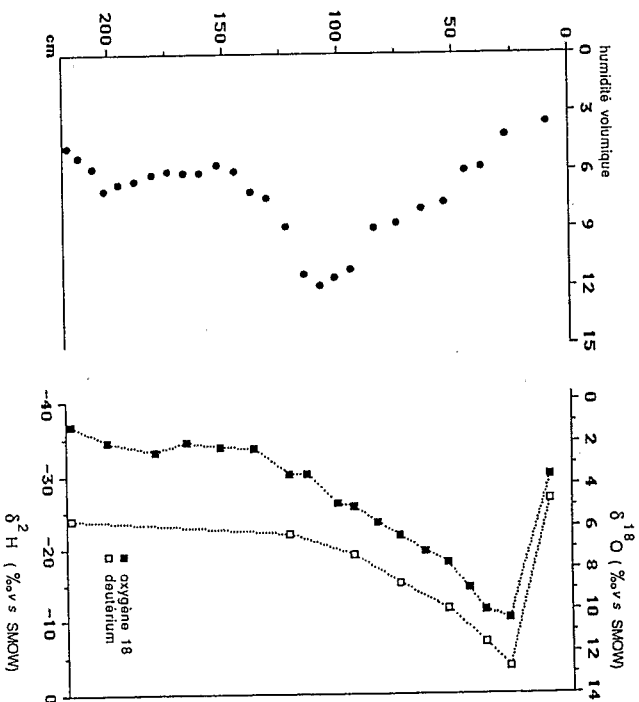


Fig. 5 Profil des teneurs en eau et en isotopes au site de Tillabéri.

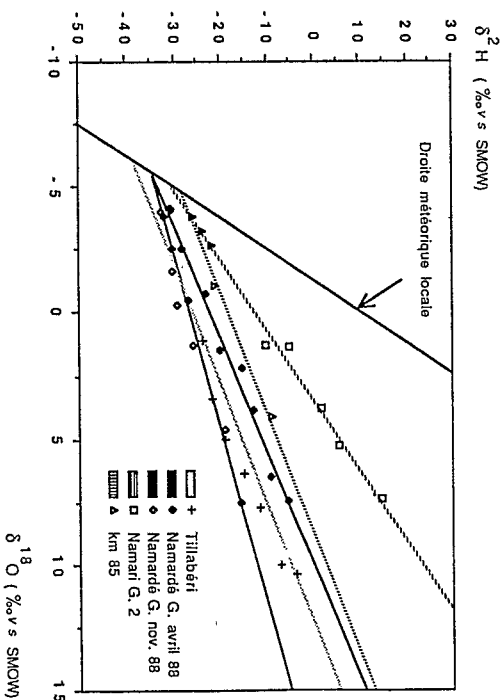


Fig. 6 Relation oxygène 18-deutérium des différents profils.

paramètres vont, en revanche, jouer un rôle mineur car, plus la nappe profonde, plus le transfert de l'eau sous forme liquide vers la surface est difficile et plus cela favorise l'établissement d'une épaisseur importante asséchée en surface, cette dernière ralentissant d'autant plus l'évaporation.

En comparant ces résultats à d'autres études isotopiques antérieures réalisées sous des climats à forte évaporation (Allison & Barnes Colin-Kaczala, 1986; Christmann & Sonntag, 1987; Grunberger, 1989; 1990) on constate que les taux d'évaporation de ces sols en état d'équilibre, se répartissent sur une courbe logarithmique en fonction de la profondeur (Fig. 7). Cette courbe peut être subdivisée en deux principales:

— Pour une profondeur de nappe jusqu'à environ 2 m, le taux d'évaporation est important car, il est régi par les propriétés du sol et, d'eau va se faire préférentiellement sous forme liquide.

— Au-dessous de 2 m, le taux d'évaporation diminue fortement en fonction de la profondeur de la nappe facilitant la mise en place d'une zone de phase vapeur, ce qui va diminuer l'évaporation.

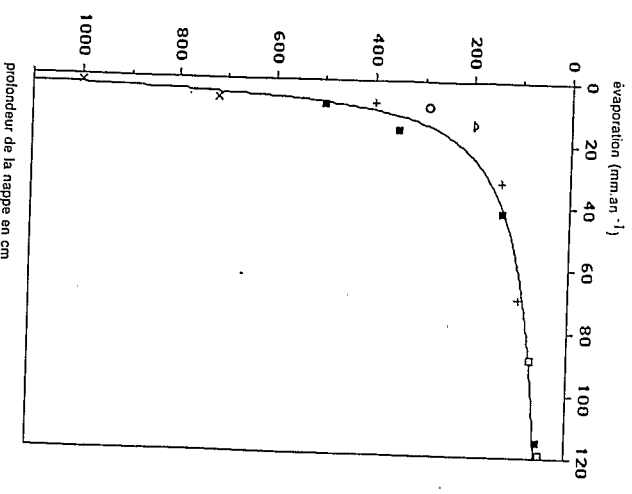


Fig. 7 Evaporation de nappe calculée dans différentes régions à régime évaporatoire (■: cette étude; □: données de Barnes & Allison en Australie du Sud, 1985; x: Colin-Kaczala au Sud septentrional, 1986; Δ: Christmann & Sonntag à l'est du Sud, 1987; +: Grunberger à l'île de la Réunion, 1989; ○: Woods Australie du Sud, 1990).