

ANALYSE DE LA DISPERSION DES MESURES NEUTRONIQUES

Application à la mesure de la variation du stock d'eau du sol sous deux graminées différentes

D. CARDON

Centre ORSTOM d'Adiopodoumé,
Adiopodoumé, Côte d'Ivoire

Présenté par M. Eldin

Abstract-Résumé

STUDY OF THE SCATTER OF NEUTRON MEASUREMENT DATA: APPLICATION TO THE MEASUREMENT OF VARIATION IN SOIL MOISTURE STORAGE FOR TWO DIFFERENT GRAMINEOUS CROPS.

At a given level in a given soil, neutron measurements show considerable scatter. This is due to the non-uniformity of the soil in situ and to the small volume explored by the probe during each measurement. To determine with the required accuracy the minimum number of measurements that need to be made in order to establish the variation in the moisture reserve of a given horizon, a statistical study was carried out of the variation in the measurements for three different levels. For this purpose four horizontal tubes 2.5 m long permitting 40 almost independent measurements were implanted per level studied. Each time the measurements were repeated at the same places. It was found that under these conditions it was necessary to make at least 70 independent measurements in order to evaluate the variation in the soil moisture reserve over a thickness of 2 m with a precision better than 5 mm; moreover, this did not take into account inaccuracies due to calibration and to the number of measurement levels that was of necessity restricted. The number of levels would be still greater if it were required to ascertain the soil moisture reserve in absolute terms. On the other hand, since the instrument error proved smaller than the soil error, it is possible to decrease the measurement time from 100 to 20 s without any trouble. Applying the previous results, two measuring posts were set up in Panicum maximum and Paspalum notatum cultures, which were kept near to the true maximum evapotranspiration: these posts were used to measure the variation in moisture reserve within the first two metres of soil. For each of the posts 13 horizontal tubes were implanted at eight different levels. The other terms in the water balance for the two crops were also measured, so that from knowledge of the variation in the soil moisture reserve the true maximum evapotranspiration was able to be derived. In both cases the results obtained were in agreement with the data obtained from a weighable evapotranspirometer, thus confirming the validity of the statistical study and the concept of climatic evapotranspiration.

ANALYSE DE LA DISPERSION DES MESURES NEUTRONIQUES - APPLICATION A LA MESURE DE LA VARIATION DU STOCK D'EAU DU SOL SOUS DEUX GRAMINEES DIFFERENTES.

A un niveau donné et dans un sol donné, les mesures neutroniques présentent une importante dispersion. Ceci est dû à l'hétérogénéité du sol en place et au faible volume exploré par la sonde au cours de chaque mesure. Afin de déterminer avec la précision recherchée le nombre minimal de mesures à effectuer pour connaître la variation du stock d'eau dans un certain horizon, on a effectué suivant trois niveaux différents une étude statistique de la variation de ces mesures. A cet effet quatre tubes horizontaux de 2,5 m de long, permettant une quarantaine de mesures quasi indépendantes, ont été implantés par niveau d'étude. D'une fois à l'autre les mesures ont été répétées aux mêmes endroits. Dans ces conditions il est apparu que pour apprécier la variation du stock d'eau du sol sur une épaisseur de 2 m à mieux de 5 mm près il était nécessaire d'effectuer au moins 70 mesures indépendantes; encore n'a-t-il pas été tenu compte des imprécisions dues à l'étalonnage et au nombre forcément limité de niveaux de mesure. Ce nombre serait plus grand encore si on désirait connaître le stock d'eau du sol en valeur absolue. Par contre, l'erreur instrumentale s'étant révélée très inférieure à celle due au terrain, on peut envisager sans inconvénient de faire passer le temps de chaque mesure de 100 s à 20 s. En application des résultats précédents on a installé sous cultures de Panicum maximum et Paspalum notatum maintenues au voisinage de l'ETRM (évapotranspiration réelle maximale) deux postes de mesure de la variation du stock d'eau dans les 2 premiers mètres du sol. Pour

chacun de ces postes 13 tubes horizontaux ont été implantés suivant 8 niveaux différents. Les autres termes du bilan hydrique des deux cultures étant mesurés par ailleurs, la connaissance de la variation du stock d'eau nous a permis d'obtenir la valeur de l'ETRM. Dans les deux cas les résultats obtenus ont été en accord avec ceux donnés par un évapotranspiromètre pesable, ce qui confirme la validité de l'étude statistique et celle du concept d'ETP climatique.

INTRODUCTION

A un niveau donné dans un sol donné les mesures neutroniques présentent une importante dispersion. Si on veut apprécier la variation du stock d'eau du sol à l'aide de la sonde à neutrons [1] un certain nombre de mesures doit être effectué par niveau; c'est ce nombre, en relation avec la précision désirée, que nous avons déterminé d'abord.

Le stock d'eau du sol est un terme essentiel du bilan hydrique de la plante. Nous avons suivi son évolution sous deux couverts graminéens différents à l'aide des méthodes neutroniques, le nombre de tubes de sondage neutronique à planter ayant été déduit de l'étude précédente. En l'absence de drainage et connaissant les apports d'eau nous avons pu mesurer l'évapotranspiration réelle maximale (ETRM) de ces deux cultures. Les résultats obtenus ont ensuite été comparés à ceux donnés par un évapotranspiromètre pesable implanté dans une des deux parcelles d'essai.

1. ANALYSE DE LA DISPERSION DES MESURES NEUTRONIQUES

Afin d'éviter toute confusion ultérieure il convient de définir très clairement la variable aléatoire sur laquelle a porté notre étude.

En un point donné, soit X une mesure neutronique réalisée au temps t. Soit X' la même mesure réalisée au temps t'. Posons

$$x = X' - X$$

x représente à un coefficient près la mesure de la variation d'humidité volumique au point considéré.

C'est sur les populations de x qu'a porté notre étude.

Dans un premier temps nous avons analysé la dispersion des valeurs de x à 3 niveaux (-25 cm, -75 cm, -125 cm). Ensuite, en faisant quelques hypothèses, nous en avons déduit un protocole de mesures de la variation du stock d'eau du sol donnant la précision recherchée. Dans tous les calculs qui vont suivre le risque d'erreur accepté est de 5%.

1.1. Dispositif expérimental

Le terrain sur lequel nous avons fait les expériences est un sol formé de sables tertiaires à fort pourcentage de sables grossiers en surface, l'enrichissement en éléments fins étant progressif à partir de 50 cm de profondeur.

Pour chaque niveau d'étude 4 tubes horizontaux de 2,5 m de long ont été implantés. Dans chaque tube les mesures ont été effectuées de 20 cm en 20 cm. Ainsi nous avons pu disposer d'échantillons quasi indépendants d'effectif compris entre 40 et 50.

TABLEAU I. MOYENNES \bar{x} ET ECARTS TYPES s' DES SERIES DE MESURES DE $x = X' - X$ EFFECTUEES A TROIS PROFONDEURS DIFFERENTES

-25 cm			s' moyen = 5,7 coups/s		
s'	5,5	4,4	5,1	3,9	5,6
\bar{x}	-11,0	29,2	9,5	23,7	-15,0
s'	6,7	4,0	5,9	6,6	5,3
\bar{x}	1,6	38,3	-89,1	-13,8	11,5
s'	4,3	7,5	6,6	4,6	5,4
\bar{x}	40,7	20,8	-67,5	24,9	-65,4
s'	6,4	5,3	7,2	5,2	9,5
\bar{x}	50,12	2,2	-38,3	-37,4	-54,9
-75 cm			s' moyen = 4,5 coups/s		
s'	1,6	4,1	2,8	4,9	2,7
\bar{x}	-1,3	2,8	3,4	1,9	1,36
s'	11,5	5,5	4,7	4,8	2,7
\bar{x}	15,8	-7,1	6,9	-84,5	0,0
-125 cm			s' moyen = 4,8 coups/s		
s'	4,3	5,1	4,1	8,4	2,5
\bar{x}	-3,8	13,9	6,2	-2,5	-0,6
s'	4,1	3,3	4,0	5,1	7,7
\bar{x}	3,2	7,4	7,1	-0,6	5,0

1.2. Etude de l'écart type σ de la population étudiée, résultats expérimentaux

De ces échantillons nous avons tiré l'estimation s' de l'écart type σ des populations étudiées et ceci pour différentes conditions d'humidité (tableau I). A un niveau donné la valeur prise comme estimation de σ est la moyenne des valeurs de s' . D'autre part, à chaque profondeur, nous avons considéré que les populations de x suivaient une loi normale; un test χ^2 appliqué à certaines d'entre elles a d'ailleurs confirmé cette hypothèse. (Ceci ne serait plus vrai si à la place des x on avait étudié la population des X .)

Dans ces conditions nous avons tenté d'analyser l'influence des différents facteurs sur la valeur de l'écart type σ des populations de x .

Deux types de facteurs ont été considérés:

- les paramètres liés au principe et au fonctionnement de la sonde,
- ceux liés à l'hétérogénéité du sol en place.

Ces deux types de facteurs sont indépendants; la loi suivie par les x est supposée gaussienne, nous sommes donc dans les conditions d'additivité des variances et nous avons:

$$\sigma^2 = S^2 + S_a^2 \quad (1)$$

variance totale = variance due au terrain + variance due à la sonde

Nous connaissons σ^2 ; S_a^2 a été estimé en répétant un grand nombre de fois la même mesure neutronique. Ainsi, pour un comptage de l'ordre de 200 coups/s pendant 100 s, nous avons obtenu

$$S_a^2 = 4 \text{ (coups}^2/\text{s}^2)$$

Tirons du tableau I les différentes valeurs de σ .

niveau	-25 cm	-75 cm	-125 cm
σ^2 (coups ² /s ²)	36	25	25
σ (coups/s)	6	5	5

On en déduit immédiatement les valeurs de S^2 pour les différents niveaux.

niveau	-25 cm	-75 cm	-125 cm
S^2 (coups ² /s ²)	32	21	21

Si nous faisons varier le temps de comptage de 100 s à 25 s, S^2 ne serait pas modifié; par contre la variance due au fonctionnement de l'appareil serait multipliée par 4 (résultat classique voir [2]) et deviendrait

$$S_a'^2 = 4 S_a^2$$

En appliquant l'équation (1) on en déduirait immédiatement la variance σ'^2 des populations de x aux différents niveaux pour un comptage de 25 s et de l'ordre de 200 coups/s.

niveau	-25 cm	-75 cm	-125 cm
σ'^2 (coups ² /s ²)	48	37	37
σ' (coups/s)	6,9	6,1	6,1

A titre indicatif signalons que dans notre terrain une variation de comptage de 15,66 coups/s correspond à une variation du stock d'eau de 1 mm pour une épaisseur de sol de 10 cm.

Sans être négligeable l'effet de la division par quatre du temps de comptage reste faible. On peut donc avec profit envisager une réduction du temps de comptage au bénéfice du nombre de mesures, étant entendu que la variance due à la sonde ne saurait tout de même excéder celle due au terrain.

1.3. Mise au point du protocole de mesures

Nous calculerons d'abord le nombre de mesures nécessaires pour connaître l'humidité à un niveau donné avec la précision recherchée. Nous en déduirons ensuite le nombre minimal de mesures pour apprécier la variation du stock d'eau du sol.

Appelons $1/\alpha$ le coefficient d'étalonnage de la sonde dans le terrain considéré. Pour la précision que nous recherchons à chaque niveau appelons ΔH la variation maximale acceptable d'humidité volumique exprimée en %. L'erreur maximale admissible sur le comptage sera alors

$$\Delta N = \alpha \cdot \Delta H$$

La population de x suivant une loi normale on en déduit immédiatement le nombre n de mesures nécessaires

$$n \geq \left(\frac{\sigma}{\Delta N} u_{0,975} \right)^2 = \left(\frac{\sigma}{\alpha \cdot \Delta H} u_{0,975} \right)^2$$

où $u_{0,975}$ est le quantile d'ordre 0,975 de la loi normale centrée réduite.

Ici $\alpha = 15,66$. Posons $\Delta H = 0,25\%$ d'humidité volumique, soit $\Delta N \approx 4$; pour les 3 niveaux étudiés on obtient alors:

<u>niveau</u>	<u>-25 cm</u>	<u>-75 cm</u>	<u>-125 cm</u>
nombre minimal de mesures	9	7	7

Afin de poursuivre notre étude deux nouvelles hypothèses sont nécessaires:

a) Nous supposons que la mesure neutronique est représentative de l'humidité volumique d'une certaine épaisseur de sol, cette épaisseur ne pouvant toutefois excéder 25 cm.

b) Nous considérons qu'à partir de 1 m l'hétérogénéité du sol reste la même quelle que soit la profondeur.

Pour simplifier la présentation de ce qui va suivre nous prendrons les niveaux de mesure équidistants et nous appellerons h le nombre mesurant en dm l'épaisseur de sol comprise entre deux de ces niveaux.

Soit p niveaux équidistants. Au $i^{\text{ème}}$ niveau, posons:

- n_i = nombre de mesures
- σ_i = écart type de ces mesures
- x_{ij} = $j^{\text{ème}}$ mesure effectuée
- \bar{x}_i = moyenne des x_{ij}

Alors

$$\sum_{i=1}^p \bar{x}_i = Z$$

représente à un coefficient près la variation du stock d'eau du sol [1]. Les x_{ij} sont des variables aléatoires gaussiennes indépendantes dont nous connaissons la variance. Par conséquent Z est une variable aléatoire gaussienne dont nous pouvons calculer la variance σ_z^2 .

Compte tenu des valeurs obtenues pour les σ_i^2

$$\sigma_z^2 = \sum_{i=1}^p \frac{\sigma_i^2}{n_i}$$

Choisissons les n_i tels que tous les σ_i^2/n_i prennent une valeur constante.

Remarque: $n_i = \frac{\sigma_i^2}{\alpha^2 \cdot \Delta H^2} u_{0,975}^2$ (paragr. précédent)

$$\text{soit } \frac{\sigma_i^2}{n_i} = \frac{\alpha^2 \cdot \Delta H^2}{u_{0,975}^2}$$

Imposer à σ_i^2/n_i d'être constant revient à choisir ΔH le même pour tous les niveaux.

Posons

$$\frac{\sigma_i^2}{n_i} = \sigma^{*2}$$

Alors

$$\sigma_z^2 = p \sigma^{*2}$$

ΔH étant exprimée en %, si nous appelons ΔS_1 la variation du stock d'eau en mm de hauteur d'eau de la $i^{\text{ème}}$ tranche de sol d'épaisseur h en dm, nous avons

$$\Delta S_1 \text{ (mm)} = \Delta H \text{ (\%)} \cdot h \text{ (dm)}$$

Soit

$$\Delta S_1 = \frac{\bar{x}_i}{\alpha} \cdot h$$

et pour les p tranches considérées

$$\Delta S = \frac{h}{\alpha} \sum_{i=1}^p \bar{x}_i = \frac{h}{\alpha} \cdot Z$$

où ΔS est la variation du stock d'eau du sol. On en tire

$$\sigma_{\Delta S} = \frac{h}{\alpha} \sigma_z = \frac{h}{\alpha} \sqrt{p} \cdot \sigma^*$$

Si δ est la profondeur de sol exploré par la sonde, nous avons

$$\delta = p \cdot h \quad \text{et} \quad \sigma_{\Delta S} = \frac{\delta}{\sqrt{p}} \frac{\sigma^*}{\alpha}$$

Application numérique

Soit une épaisseur de sol de 2 m ($\delta = 20$ dm), et soit $p = 8$ le nombre de niveaux d'étude.

En effectuant 9 mesures à -25 cm et 7 mesures à tous les autres niveaux nous aurons:

$$\sigma^* \approx 4 \text{ coups/s}$$

et par conséquent

$$2 \sigma_{\Delta S} = 2 \frac{20}{\sqrt{8}} \cdot \frac{4}{15,66} \approx 2 \text{ mm}$$

Il y a 95% de chances que l'erreur absolue sur ΔS n'excède pas 2 mm.

Pour avoir la variation du stock d'eau du sol à 2 mm près un minimum de 58 mesures pour tout le profil est donc nécessaire.

Ce nombre est considérable surtout si on tient compte de l'homogénéité relative du terrain étudié. D'autre part le temps écoulé entre la première et la dernière mesure ne saurait excéder 2 à 3 heures. Si nous voulons atteindre une précision optimale il faut réduire le temps de chaque mesure afin d'en multiplier le nombre.

2. UTILISATION DE LA SONDE DANS LA MESURE DE L'EVAPOTRANSPIRATION

Dans ce chapitre nous comparons les mesures de l'ETRM de 2 graminées, Paspalum notatum et Panicum maximum, obtenues par les méthodes neutroniques aux résultats donnés par une bascule enregistreuse mesurant l'évapotranspiration réelle maximale de Paspalum.

2.1. Dispositif expérimental de détermination de l'ETRM mesurée à la sonde à neutrons

Dans le dispositif adopté nous nous sommes fixé une erreur maximale admissible de 2 mm dans l'estimation de la variation du stock d'eau du sol avec la sonde à neutrons. Les résultats du paragraphe précédent nous ont permis de fixer le nombre de mesures à effectuer par niveau.

Au cours de l'étude précédente nous avons admis implicitement que Z représentait le stock d'eau du sol. Cette hypothèse est tout à fait justifiée lorsque entre deux niveaux de mesure la variation de l'humidité est une fonction linéaire de la profondeur; elle l'est beaucoup moins lorsqu'il existe à un niveau donné une brusque variation de l'humidité en particulier dans le cas de la réhumectation d'un sol sec. C'est pourquoi entre 25 et 75 cm de profondeur nous avons d'une part diminué l'intervalle entre niveaux, d'autre part effectué un nombre de mesures sensiblement supérieur au nombre calculé.

Si un terrain est homogène la variabilité des mesures neutroniques n'apparaît pas plus grande à l'échelle de la parcelle qu'à l'échelle de quelques mètres carrés [3]. Pour cette raison nos tubes de sondage neutronique ont été implantés horizontalement sous une surface de 5 m² choisie pour être représentative de la parcelle, l'accès aux tubes se faisant par une fosse hors de la surface du travail. Ce dispositif présente l'avantage d'éviter le piétinement du terrain par l'observateur.

2.1.1. Détail du dispositif

Trois tubes ont été implantés à 25 cm de profondeur; deux tubes ont été implantés aux niveaux -40 cm, -55 cm, -75 cm; un seul tube aux niveaux -100 cm, -125 cm, -150 cm, -175 cm; soit un total de 13 tubes de 2,5 m de longueur.

Dans chaque tube horizontal 8 mesures ont été effectuées de 20 cm en 20 cm à partir du fond du tube, soit un total de 96 mesures.

Pour des raisons pratiques (chronométrage manuel) nous avons pris un temps de comptage égal à une minute.

2.1.2. Prélèvements en surface

Afin de connaître l'humidité de 0 à 15 cm profondeur, la sonde à neutrons étant inopérante en surface, nous avons effectué à la tarière au cours de chaque journée de mesure 12 prélèvements de terre aux environs immédiats de l'aire de travail. Dans cette couche le terrain est composé de sables très grossiers dont l'humidité varie peu d'une fois à la suivante sauf dans le cas d'apports d'eau récents (moins de 48 h). Nos mesures ayant lieu 4 jours après les irrigations nous pensions obtenir dans les 15 premiers cm la variation de stock d'eau du sol à mieux de 1 mm près, soit 0,66% d'humidité volumique.

Remarque: Pour convertir l'humidité pondérale obtenue à la tarière en humidité volumique nous avons supposé la densité sèche du sol en surface voisine de 1,5.

2.1.3. Mesures des apports d'eau

Les apports d'eau ont été mesurés dans chaque parcelle à l'aide d'une batterie de 4 pluviomètres limitant la surface de travail. Dans le cas de la pluie la précision obtenue est très suffisante. Il n'en va pas de même pour les irrigations qui ont lieu par aspersion. Même en plaçant les sprinklers le plus judicieusement possible il n'est pas rare d'avoir entre les 2 pluviomètres extrêmes des écarts de 20% pour une irrigation de 20 mm. C'est donc là une importante source d'erreur et nous l'estimons à 2 mm en moyenne.

2.2. Expérimentation et résultats

Les mesures ont été effectuées chaque semaine au cours de la grande saison sèche des années 1972 et 1973:

en 1972 du 14 février au 2 mai

en 1973 du 4 janvier au 25 avril.

Les valeurs de référence de l'ETRM pour le Paspalum ont été donnés par un évapotranspiromètre pesable très précis [4].

Au cours de l'année 1973, une pluie survenant à la suite d'une irrigation ayant plusieurs fois occasionné du drainage, nous avons dû éliminer les mesures de l'ETRM effectuées à la sonde sous Paspalum (ou ETRM-sonde Paspalum) pour les périodes suivantes: du 22 janvier au 20 février et du 19 mars au 25 avril.

En l'absence de drainage et de ruissellement nous pouvons écrire:

$$\text{ETRM} = P \pm \Delta S$$

où P = précipitations + irrigations
et ΔS = variation du stock d'eau du sol.

L'erreur maximale obtenue est au plus égale à la somme des erreurs sur chacun des termes soit:

- 5 mm en cas d'irrigation
- 3 mm s'il n'y a pas d'irrigation.

Nos mesures étant hebdomadaires, l'ETRM moyenne journalière est donc connue respectivement à 0,7 mm ou 0,4 mm près suivant le cas.

L'ensemble des résultats obtenus a été reporté sous forme d'histogrammes donnant l'ETRM moyenne journalière pour les différentes périodes de mesure (fig. 1). En plus, dans le cas du Panicum les dates de coupe ont été mentionnées.

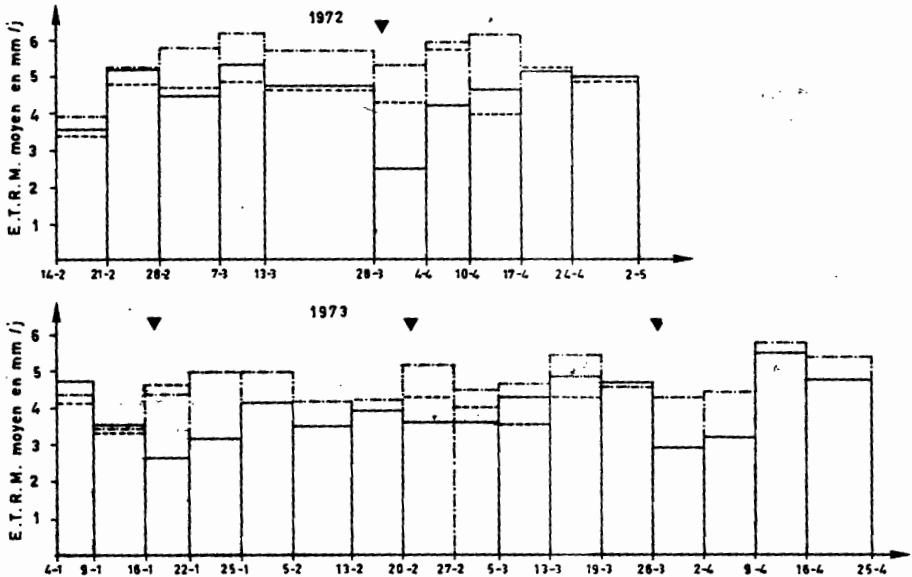


FIG. 1. Comparaison des valeurs d'évapotranspiration réelle maximale (ETRM) obtenues d'une part par usage de la sonde à neutrons sous deux graminées différentes et d'autre part par pesée enregistrée d'un évapotranspiromètre de Paspalum notatum.

▼: coupe sur Panicum; ——— ETRM sonde Panicum; - - - - - ETRM sonde Paspalum; ······ ETRM bascule.

D'une façon générale, nous constatons que les valeurs données par la bascule sont supérieures de 15% environ aux valeurs de l'ETRM-sonde-Paspalum. Le côté systématique de cet écart nous amène à penser qu'il s'agit là d'une différence effective de consommation.

Deux explications de ce phénomène peuvent être avancées:

a) Dans un évapotranspiromètre la plante puise l'eau dans une nappe; son alimentation est sans cesse optimale; il n'est pas sûr qu'il en soit de même dans une parcelle irriguée une ou deux fois par semaine. Il est possible que le transport de l'eau du sol vers la feuille ne soit pas assez rapide même en sol très humide pour faire face aux vitesses très élevées d'évapotranspiration atteintes parfois au milieu de la journée (de l'ordre de 1 mm/h).

b) Très souvent nous avons constaté que le Paspalum était mieux développé à l'intérieur de l'évapotranspiromètre qu'à l'extérieur et de ce fait avait tendance à déborder les limites de l'appareil malgré des tailles fréquentes. Une surface interceptant les rayons du soleil supérieure à la surface dans laquelle puisent les racines est peut-être à l'origine d'un excès apparent de consommation et d'une légère surestimation de l'ETP par lysimètre pesé.

Si nous comparons maintenant l'ETRM-sonde-Paspalum à l'ETRM-sonde-Panicum nous constatons qu'après chaque coupe le Panicum consomme nettement moins que le Paspalum. Cette différence s'explique aisément, le Panicum ne recouvrant alors qu'une fraction de la surface de la parcelle. Elle s'estompe d'ailleurs au cours des semaines suivantes. En fin de croissance le Panicum semble consommer légèrement plus que le Paspalum, en liaison vraisemblablement avec des indices foliaires importants (entre 6 et 8 m² de feuillage pour 1 m² de sol).

CONCLUSION

Les résultats obtenus nous permettent d'affirmer que dans des conditions optimales d'alimentation le Panicum et le Paspalum consomment à peu près la même quantité d'eau. Ceci constitue une bonne vérification du concept d'évapotranspiration potentielle (ETP) climatique.

D'autre part, à condition de s'en tenir à la précision calculée, l'ensemble de nos résultats apparaît tout à fait cohérent. D'une semaine à l'autre le stock d'eau du sol a cependant été sujet à de fortes variations (jusqu'à 50 mm). Les mesures d'ETRM nous permettent donc également une vérification indirecte de la validité de l'étude exposée dans la première partie.

On peut toutefois se demander si un tel dispositif n'est pas un peu lourd pour les résultats obtenus. Certes, en contrôlant mieux les apports d'eau nous pourrions espérer connaître l'ETRM moyenne journalière à mieux de 0,4 mm près; mais cette précision reste faible à côté de celle donnée par les évapotranspiromètres pesables, si commodes d'emploi.

En fait la sonde à neutrons nous a également permis d'avoir d'autres renseignements difficiles à obtenir par une autre méthode (évolution des profils hydriques) mais surtout les mesures faites in situ donnent l'évaporation effective de la parcelle, et non la quantité d'eau perdue par un appareil précis, mais ne reproduisant qu'approximativement les conditions naturelles.

REMERCIEMENTS

L'humidimètre à neutrons a pu être utilisé grâce au protocole de coopération établi entre le CEA et l'ORSTOM le 22 mai 1964. Nous exprimons ici toute notre gratitude au personnel du CEA en service au Laboratoire des radio-isotopes, notamment MM. Marini, Guyon, Bois et Blanc, pour leur collaboration active et efficace.

REFERENCES

- [1] MARCESSE, J., Exploitation des mesures neutroniques, Note technique du CEA (1970).
- [2] MARCESSE, J., Revue de l'eau (1963).
- [3] PEYREORTE, P., Communication personnelle.
- [4] ELDIN, M., Techniques d'étude des facteurs de la biosphère, Numéro spécial des Annales agronomiques de l'INRA (1970) 273.

DISCUSSION

G. VACHAUD: There is at least an apparent contradiction between Mr. Cardon's conclusion, that one should make frequent but brief counts, and the usual belief that for any nuclear process it is better to count a long time, even if this means making the counts less frequent than they might otherwise be.

M. ELDIN: There is of course no doubt about the fact that, the longer one counts, the more accurate the result will be. But I think you have not quite grasped Mr. Cardon's point; perhaps if I explain it again I can show you that the contradiction is only apparent. The problem is as follows: we have only two or three hours to perform a series of measurements on the basis of which a mean vertical bulk moisture profile is to be established. Should we make only a few measurements, counting in each case for a long time, or should we make more numerous measurements and be satisfied with shorter counts? The value of Mr. Cardon's statistical study, I believe, lies in his having shown that the variance attributable to the functioning of the probe increases relatively little when counting time is reduced, whereas the variance due to the heterogeneity of the soil diminishes rapidly when the number of measuring points is increased. Obviously, one must not go to extremes, and in particular one must not let the variance from the probe become greater than that from the soil. For the soil studied here, Mr. Cardon came to the conclusion that minimum total variance was attained with 102 one-minute counts at 102 different points in the ground.

G. VACHAUD: Thank you. I had in fact misunderstood the argument. But I disagree, I am afraid, with Mr. Cardon's fundamental hypothesis. He believes that a reduction of stock in the unsaturated zone is due to vaporation, whereas I believe, along with many others, that it is due to the combined effects of evaporation and drainage by percolation. Only ensiometric studies would be able to remove the uncertainty; but in the meantime I fear that Mr. Cardon's assumption yields estimates of evaporation which are high by 10 to 30%.

M. ELDIN: I wish Mr. Cardon were here to reply to your comments. For my own part, I agree that there may be downward drainage which is wrongly counted as evapotranspiration. Let me point out, however, that

at the beginning of the dry season, when these measurements are started, the soil as a whole is close to saturation and is subsequently maintained at that point by bi-weekly irrigation, so calculated (from actually measured evapotranspiration) as to bring the soil close to saturation without giving rise to vertical movements of free water. In these conditions I doubt whether these downward movements brought about by a difference of water potential could take on significant values. Another thing that should be noted is that the $\dot{E}TRM^1$ values obtained with the neutron probe are in fairly good agreement with those taken directly from evapotranspirometer readings.

As regards tensiometer measurements, I shall suggest to Mr. Cardon that he should include them in his experimental program; although tensiometers are not entirely above criticism either.

D. HILLEL: Part of the argument between Mr. Vachaud and Mr. Eldin bears on an important principle, one to which we have devoted much attention in our work. Mr. Eldin notes a diminution of soil water content between one date and another; and, because beyond a certain level there seems to be no change in soil water, he assumes that all the water lost from the zone above must have been lost through evapotranspiration. This is a wrong assumption, because it is typical to find a zone beneath the root zone where the water content seems to remain fairly constant but where in fact water is conducted powerfully. We find that about 10% of the field water balance — and sometimes as much as 20 or 30%, depending on the irrigation regime — flows through the subsoil in this manner. There is a gravitational gradient acting through this zone, so that the flow is normally downward, but there may also be an upward flow in response to suction gradients set up by the uptake of water by plant roots. Thus there is, generally, a drainage component in the field water balance which should not be ignored. This is in fact what protects us, in many of the irrigated regions of the world, against an excessive build-up of salts in the root zone.

C. DANCETTE: I am always a little bit surprised when people try to get too much accuracy in applied agronomy, and hence in agricultural research. Whatever the accuracy of rainfall measurements may be, rainfall itself remains essentially non-uniform. And in irrigation one has to be very clever indeed to gauge water inputs to within better than 20%. In short I prefer, for this type of study, the approach taken by Mr. Peyremorte of ITCF, who simply asks himself, for a given type of soil, how many replications are needed in order to get accuracies of, say, 10, 15 or 25% in water balance determinations; and I should add that I have no illusions about obtaining an accuracy better than 10%. For the rest, I believe, with Mr. Eldin, that the water balance method can be quite accurate when one is dealing with an originally very dry profile, close to the permanent wilting point.

M. ELGIN: I am wondering whether a capillary movement upwards, from a wetter to a drier zone, can be significant in sandy soils such as those with which Mr. Cardon was dealing.

D. HILLEL: We have measured the potential gradients acting below the root zone over the period of an entire irrigation season. Some days after an irrigation is applied, we find that a downward gradient greater than the gravitational gradient is established. This then damps down; and if the irrigation is infrequent (intervals of a month or longer) we begin to find

¹ $\dot{E}TRM$ = real or actual measured evapotranspiration.

upward gradients towards the end of the cycle, i.e. shortly before the next irrigation is due. When irrigation is applied again, the pattern repeats itself.

Much of course depends on the frequency of irrigation and on the cropping pattern. Generally, however, as a first approximation, we may say that there is a zone below the root zone which remains at a fairly constant soil moisture content, that the gradient in this zone is nearly always gravitational, and that the flow is accordingly downward and approximately equal to the hydraulic conductivity. Therefore, by measuring hydraulic conductivity as a function of water content initially in the profile, and, later, by using a neutron moisture meter and following the water content below the root zone, we can get a first estimate of the rate of drainage and integrate this over a period of time. We have found that it averages out roughly at 1 mm/day in an irrigation system where potential evapotranspiration during the irrigation season is about 10 mm/day.

There are admittedly some periods, however, especially with a high water table, when a capillary movement upward into the root zone occurs.

P. MOUTONNET: We were talking a while ago about counting time; what we ought to consider in fact is the number of counts we need, so that the counting time can be adapted to that.

M. ELDIN: Yes, I agree completely. Perhaps I passed a little too quickly over this question of counting time. In support of his theory concerning optimized measurements of water stock variations, Mr. Cardon merely cites a classical result, namely that the variance due to the probe is increased by a factor of four when the counting time is reduced from 100 to 25 s (the probe is assumed to be giving about 200 counts/s in both cases).

M. NORMAND: Could you tell us how the tubes were put in place, and in particular whether the soil was perturbed? Were soil densities measured?

M. ELDIN: The tubes were inserted into the soil horizontally in holes made with an auger, of a diameter very slightly less (about 1 mm) than that of the tubes themselves. A year was allowed to pass before the measurements were made, so that the earth was returned to contact with the tubes by the drainage resulting from some 2200 mm of rainfall (two rainy seasons). Soil densities were measured along each horizontal tube by means of a gamma density gauge to obtain an idea of the density distribution.

A. POULOVASSILIS: I might point out that there is one situation where the difference in soil water content shown by two successive water content profiles can be taken as equal to the evapotranspiration losses. This is the case of infiltration and redistribution of water in a dry soil where the hydraulic conductivity below the wetting front is zero.

M. ELDIN: Thank you for your comment. It does not apply to Mr. Cardon's measurements, however, which were started at the end of a rainy season, i.e. at a time when the soil was close to saturation.

GENERAL DISCUSSION

Y. BARRADA (Scientific Secretary): Mr. Lal has raised an interesting general question, namely that the use of the neutron moisture meter may not be very helpful when the soil profile is stratified and certain layers contain stones in different concentrations. Perhaps some of you would like to comment on this point.

M. DE BOODT: The essential thing, in using the neutron moisture probe, is to use common sense too. Obviously it is bound to be very difficult to handle the probe in stony, layered soil because the first requirement for good measurements is that the access tube should fit properly in the soil. We have tried various ways of inserting it in stony soil, but have never obtained satisfactory results. As I pointed out earlier, hydrogen molecules close to the probe contribute much more to the measurement than those one or two or five millimeters away, so unless there is a good fit all round the access tube, the reading will not be meaningful. For the time being, therefore, our answer is to revert to conventional methods when we encounter circumstances where it is difficult to insert the access tube properly.

E.R. CHRISTENSEN: Another complication, if you are using the gamma density gauge in combination with a neutron moisture probe, is that the spheres of importance are usually different.

H.W. SCHARPENSEEL: Even in stony soils it is often possible to drive the access tube in with a pneumatic vibrator; we have done this, but since it is so difficult to standardize procedures in these soils we have never devised a control measurement that would indicate to us the magnitude of the error committed. Has anyone else had experience with this type of "forceful" insertion of the access tube?

Y. BARRADA: I might just say that stony soil puts great difficulties in the way of any method of measurement, even when we want to measure the soil moisture content by sampling. The difficulty is not limited to the neutron moisture meter and its use.

D. HILLEL: If you want to determine the moisture content regularly in a stony soil, it is easier to drill once to insert an access tube than to drill repeatedly to take samples; much easier in fact. A colleague in Israel tried drilling an oversized hole, placing the access tube at the centre of this hole and then refilling around the tube with approximately the same kind of soil - using perhaps a bit more of the fine material, a slurry of the fine material, with smaller stones and approximately the same volume ratio, to fill in the gap. He found this to be a fairly satisfactory method of inserting access tubes into stony soils. So, as Mr. Barrada has said, the difficulties presented by stony soils apply to any kind of moisture determination; in my opinion they are in fact minimized by the use of the neutron technique.

R. LAL: I certainly appreciate Mr. Barrada's bringing out this point. Most of the physical measurements which we learn at school and which we generally apply to homogeneous soils are rather difficult to apply directly to these very heterogeneous tropical soils. That is one point. A second point is that the soil itself affects the thermalization of the neutron count. Owing to the different concentrations of stones in different layers, there is great variability in the density of the soil profile, and this is a problem which we don't yet know how to tackle. Essentially what you determine by inserting a neutron probe is the relative change in moisture content over a period of time, rather than absolute changes in moisture content.

W.R. GARDNER: It is a deficiency in our soil physics concepts, not in the neutron method, that we have not really come to grips with the problem of how to deal with a soil which has different values for various parameters in different places. This is something we should work hard on if our analyses are to become more meaningful. But I think the question has perhaps been put in the wrong way: we should ask ourselves not "How do we make the neutron method work in these soils?" but "How do we make these soils understandable?"; and then we can ask whether the neutron method is an appropriate tool for obtaining a better understanding of them.

D.R. NIELSEN: Even if we know the distribution of water content with depth in a soil on which we are growing a crop, we must still ask ourselves what are we going to do with the information. The neutron method does give us one additional means of gauging the amount and quality of the water entering a field, and the amount and quality of the water leaving the root zone. Despite the defects of the method this is valuable information. Basically what we want to do is to preserve and enhance agriculture over a long period. And it seems to me that with the neutron meter, using perhaps some of the approximations which Mr. Gardner has put forward during the past ten years, and gradually gaining a better understanding of soil variability, we can make good progress towards this goal.

PROCEEDINGS SERIES

ISOTOPE AND RADIATION TECHNIQUES
IN SOIL PHYSICS
AND IRRIGATION STUDIES 1973

PROCEEDINGS OF A SYMPOSIUM
ON ISOTOPE AND RADIATION TECHNIQUES
IN STUDIES OF SOIL PHYSICS, IRRIGATION AND DRAINAGE
IN RELATION TO CROP PRODUCTION
JOINTLY ORGANIZED BY THE
INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY
AND THE
FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION
OF THE UNITED NATIONS,
AND HELD IN
VIENNA, 1 - 5 OCTOBER 1973

INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY
VIENNA, 1974