



HAL
open science

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

Charles Valancogne, François-Alain Daudet

► To cite this version:

Charles Valancogne, François-Alain Daudet. 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. *Annales Agronomiques*, 1977, 28 (2), pp.137-157. hal-02730801

HAL Id: hal-02730801

<https://hal.inrae.fr/hal-02730801>

Submitted on 2 Jun 2020

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

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

Ch. VALANCOGNE et F. A. DAUDET

avec la collaboration technique de A. FOUÉRE

Laboratoire de la Chaire de Bioclimatologie et d'Ecologie de l'Institut National Agronomique
Paris-Grignon, I.N.R.A., 16, rue Claude-Bernard
75231 Paris Cedex 05

Résumé

L'utilisation de micropsychromètres à effet Peltier et de tensiomètres a permis l'étude des variations de potentiel matriciel du sol sous une culture de maïs dans l'espace et dans le temps (fig. 1 et 2).

Malgré les précautions prises à la suite de travaux antérieurs, une oscillation journalière du potentiel pouvant atteindre 4 bars (fig. 3) se manifeste qui ne peut être attribuée ni à des effets thermiques, ni seulement à une variation de teneur en eau consécutive à l'évapotranspiration. L'évolution du potentiel aux différentes profondeurs (fig. 4) au cours d'un été, a mis en évidence l'existence de remontées d'eau capillaires de la profondeur vers les zones desséchées par la culture. Une grande variabilité horizontale a été constatée provenant en partie de l'hétérogénéité introduite par la culture en ligne du maïs, et de la distribution aléatoire des racines. Une bonne description du « climat hydrique » dans le sol implique donc plusieurs mesures.

Des mesures simultanées de l'humidité volumique par la méthode neutronique ont permis d'observer la relation existant entre le potentiel et l'humidité. Aucun effet d'hystérésis significatif n'a pu être mis en évidence (fig. 6 et 7), mais il apparaît que l'extrapolation au terrain des relations potentiel-humidité établies en laboratoire sur des prélèvements de sol (fig. 6a, 6b) doit être faite avec prudence, d'où l'intérêt de disposer de techniques de mesure directe du potentiel matriciel et de l'humidité.

En annexe est présenté le système d'acquisition de données conçu pour traiter directement sur ordinateur les données psychrométriques nécessaires au calcul du potentiel matriciel (fig. 8 et 9).

I. — Introduction

Le potentiel hydrique est une donnée fondamentale car il caractérise l'état de sécheresse d'un milieu.

L'activité physiologique des plantes se réduit progressivement lorsque l'état de sécheresse des tissus augmente. L'intensité des transferts d'eau dans le sol, du sol vers la plante dépend des gradients de potentiel sur le trajet de l'eau, d'où l'intérêt de décrire la distribution spatiale et la variation dans le temps du potentiel hydrique du sol.

Une première étude méthodologique réalisée en 1973 a montré qu'il est possible de mesurer le potentiel hydrique du sol dans tous le domaine de variation résultant du dessèchement par les cultures, au moyen de micropsychromètres à effet Peltier (Valan-cogne et Daudet, 1974). L'utilisation *in situ* de cette méthode connue depuis déjà long-temps (Spanner, 1951) n'a pas fait, dans le monde, l'objet de beaucoup de publications. On pouvait donc craindre l'existence de difficultés insurmontables.

L'existence d'une forte fluctuation journalière est en effet apparue, mais il s'est avéré qu'une part importante de celle-ci traduisait un effet du gradient de tempéra-ture dans le sol. Une mise en place horizontale du micropsychromètre permettait de réduire considérablement cet effet.

En outre, l'emploi de plusieurs psychromètres placés à une même profondeur nous a montré la grande hétérogénéité de la distribution du potentiel. Par conséquent, de nombreuses mesures sont nécessaires, ce qui rend souhaitable l'automatisation des mesures en sorte que leur traitement puisse être fait directement sur ordinateur.

Les micropsychromètres à effet Peltier sont apparus comme un complément indis-pensable des tensiomètres. Ces derniers en effet se désamorcent pour des potentiels hydriques faibles (inférieurs à — 0,8 bar), mais dans leur domaine de fonctionnement ils sont beaucoup plus précis que les micropsychromètres.

Après cette étude, nous nous sommes donc proposés de passer à l'exploitation en routine des micropsychromètres à effet Peltier afin de décrire les variations de poten-tiel sous une culture de maïs. Un système automatique avec enregistrement numérique sur ruban perforé a été construit afin de traiter rapidement sur un ordinateur la masse de données recueillies.

Comme il est assez facile également d'enregistrer les informations tensiométriques, le potentiel hydrique est donc désormais une grandeur dont l'évolution au cours du temps peut être suivie quelle que soit la gamme considérée.

Les mesures d'humidité sont par contre toujours délicates et leur automatisation n'est guère possible. La question se pose donc d'utiliser les mesures de potentiel pour suivre aussi finement que possible le bilan hydrique au cours du temps, à l'aide de la relation potentiel matriciel-humidité. Sur de longues périodes, l'existence d'un phéno-mène d'hystérésis peut rendre difficile la transposition indiquée. Mais sur des inter-valles de temps de l'ordre de quelques jours (sauf cas d'infiltration d'eau importante à la suite d'une pluie ou d'un arrosage), on peut sans doute l'appliquer sans grand risque.

Dans l'étude que nous présentons ici, des mesures d'humidité du sol ont été effec-tuées régulièrement au cours de la saison et la relation potentiel-humidité du sol peut ainsi être déterminée expérimentalement *in situ* ; or cette relation apparaît très diffé-rente de celle établie en laboratoire. Ce résultat qui sera plus particulièrement abordé dans la discussion, souligne encore l'intérêt des mesures directes de potentiel.

II. — Matériel et méthode

L'étude menée durant l'été et l'automne 1974, sur une culture de maïs non irriguée en sol de limon profond à la Minière près de Versailles, a consisté à mesurer le poten-tiel ψ_m par les méthodes psychrométriques et tensiométriques, et l'humidité par la méthode neutronique.

2.1. — Mesures psychrométriques

Cette méthode consiste à mesurer l'humidité et la température de l'air en équilibre avec l'eau du sol, d'où l'on déduit directement le potentiel matriciel ψ_m , sous réserve que le potentiel osmotique soit négligeable.

Le capteur employé, son fonctionnement et un système automatique avec enregistrement analogique ont été décrits précédemment (Valancogne et Daudet, 1974). Ce dernier a été modifié pour sortir les résultats sous forme numérique afin de faire un traitement direct sur ordinateur (cf. Annexe).

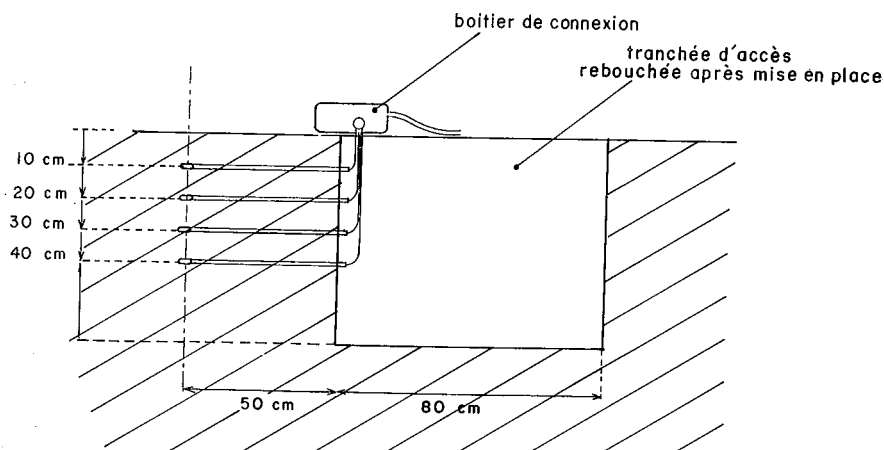


FIG. 1. — Installation dans le sol des micro-psychromètres à effet Peltier.

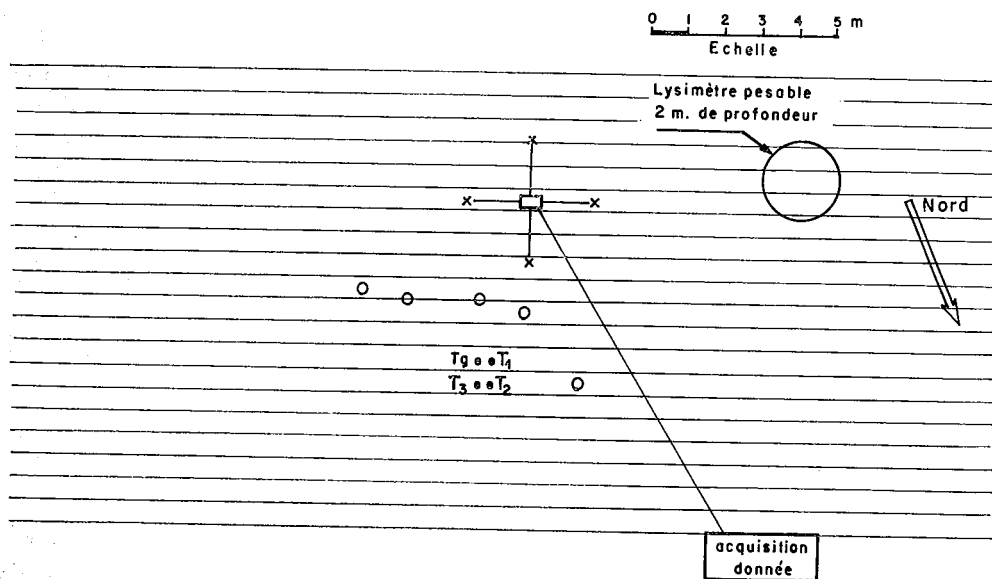


FIG. 2. — Plan du dispositif expérimental : les lignes horizontales de la figure représentent les lignes de maïs.

- x micro-psychromètres,
- tensiomètres,
- tubes d'accès pour les mesures neutroniques.

Les micropsychromètres à effet Peltier ont été fixés au bout de cannes en PVC de 50 centimètres de long. Compte tenu de l'étude précédente déjà citée (1974), la disposition horizontale a été adoptée afin de minimiser les effets des gradients de température. La mise en place a été effectuée à partir d'une tranchée dans des trous d'accès forcés aux dimensions des capteurs. Ce procédé permet de réduire les perturbations et les anomalies qui pourraient en résulter dans la distribution de racines. L'observation du système racinaire et du sol lors de l'enlèvement des capteurs a permis de vérifier l'absence de prolifération racinaire anormale qui aurait pu fausser la description de la distribution du potentiel que nous nous étions proposés de faire.

Les psychromètres furent installés à 4 profondeurs (10, 20, 30, 40 centimètres) selon 4 verticales (fig. 1), 2 sur la ligne de maïs, et 2 dans l'interligne. Les emplacements dans la parcelle expérimentale sont indiqués à la figure 2.

Les cycles de mesures étaient déclenchés automatiquement à des fréquences comprises habituellement entre 6 et 12 par jour.

2.2. — Mesures tensiométriques

Rappelons que dans un tensiomètre, on mesure, à l'aide d'un manomètre, la dépression qui s'installe dans un volume d'eau en équilibre à travers une bougie poreuse avec le potentiel matriciel du sol. Les systèmes diffèrent par le type de manomètre employé (lecture directe, électrique, enregistreur, etc...) et par sa place par rapport à la bougie poreuse. Les résultats présentés ici ont été obtenus par lecture directe sur des tensiomètres commercialisés, munis d'un manomètre Bourdon.

Le dispositif expérimental tensiométrique était constitué de 4 tensiomètres à lecture directe, 2 à 80 centimètres et 2 à 90 centimètres de profondeur, situés au milieu de 2 interlignes de la culture de maïs, à environ 30 centimètres [les uns des autres, comme indiqué à la figure 2. Dans la mesure du possible, les lectures étaient effectuées une fois par jour.

En outre, nous avons essayé un système d'enregistrement grâce à l'emploi d'un capteur de pression placé au niveau de la bougie poreuse. Ces données peuvent être particulièrement utiles lorsque le potentiel présente des variations brusques à la suite d'une pluie ou d'une irrigation. Ce dispositif présente en outre l'avantage que, supprimant la colonne d'eau, on s'affranchit de l'effet parasite de la température.

Ces tensiomètres enregistreurs, mis en service plus tard, furent utilisés essentiellement pour contrôler certaines observations faites avec les tensiomètres classiques.

2.3. — Mesures neutroniques

Un humidimètre à neutron HP 310 avec échelle de comptage ECP 310 fut utilisé pour mesurer l'humidité du sol. Cinq tubes d'accès de 2 mètres de long permettaient des mesures jusqu'à 1,65 mètre de profondeur : trois dans l'interligne et deux sur la ligne (cf. fig. 2). Les comptages neutroniques étaient effectués de 10 centimètres en 10 centimètres (Daudet et Valancogne, 1976).

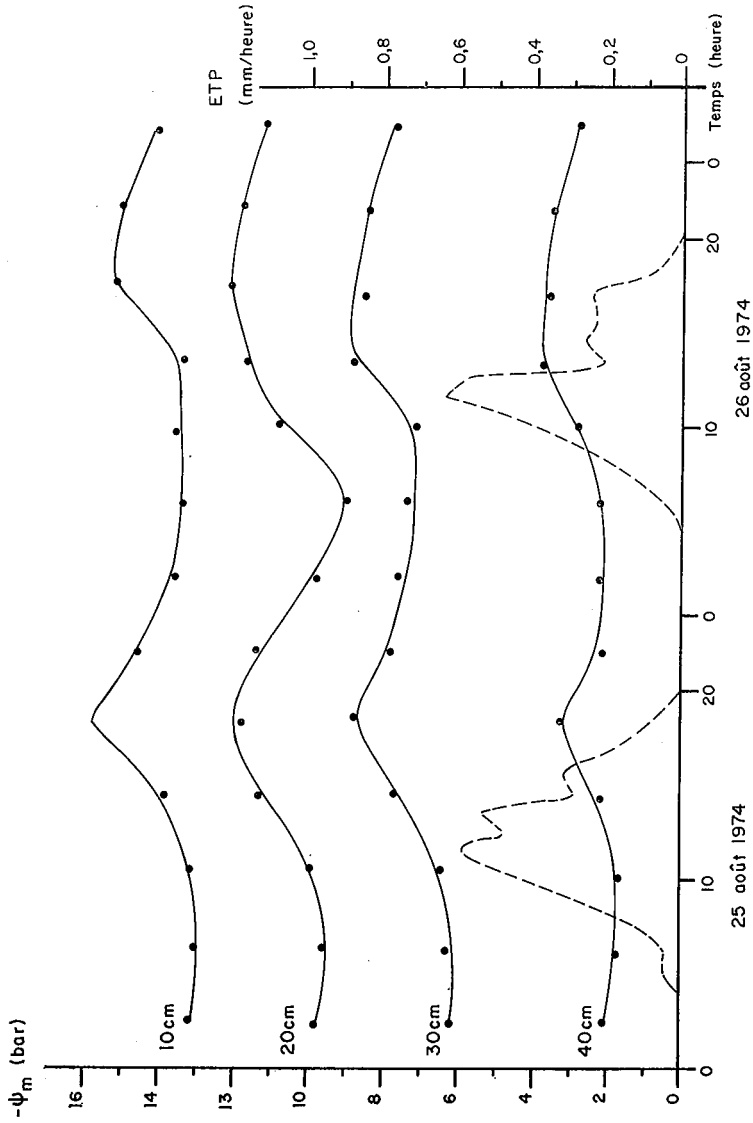


FIG. 3. — Variations journalières du potentiel mesuré à l'aide de micropsychromètres à effet Pellier à différentes profondeurs dans la zone racinaire.

III. — Résultats

3.1. — Variations journalières du potentiel matriciel

Les mesures psychrométriques font apparaître une variation périodique pratiquement synchrone quelle que soit la profondeur. Quelques exemples sont rapportés sur la figure 3. On soulignera l'importance de cette amplitude journalière qui peut parfois atteindre 3 à 4 bars (soit $3 \cdot 10^3$ à $4 \cdot 10^3$ centimètres d'eau). La valeur absolue du potentiel croît de 9-12 heures jusque dans la soirée et diminue au cours de la nuit.

Aux profondeurs plus importantes où étaient implantés les tensiomètres, quelques contrôles durant certaines journées ont indiqué une légère variation journalière, d'amplitude pouvant atteindre 0,02 bar. Ce phénomène n'ayant pas été retrouvé avec les tensiomètres enregistreurs équipés de capteurs de pression installés aux mêmes profondeurs, on peut penser qu'il résultait d'une action des variations de température sur la colonne d'eau des tensiomètres classiques.

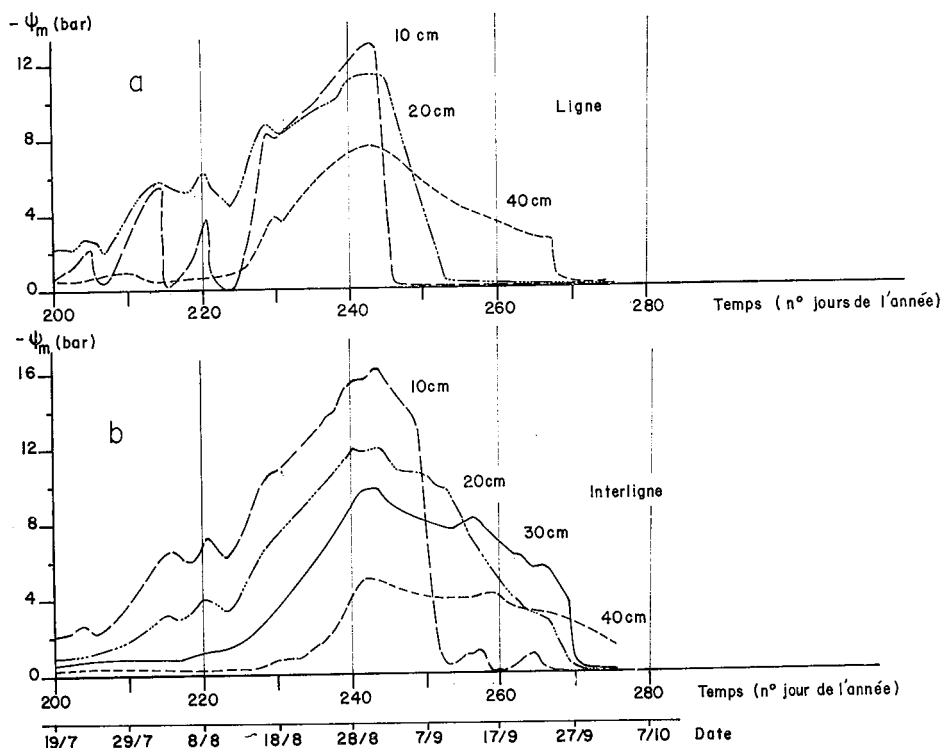
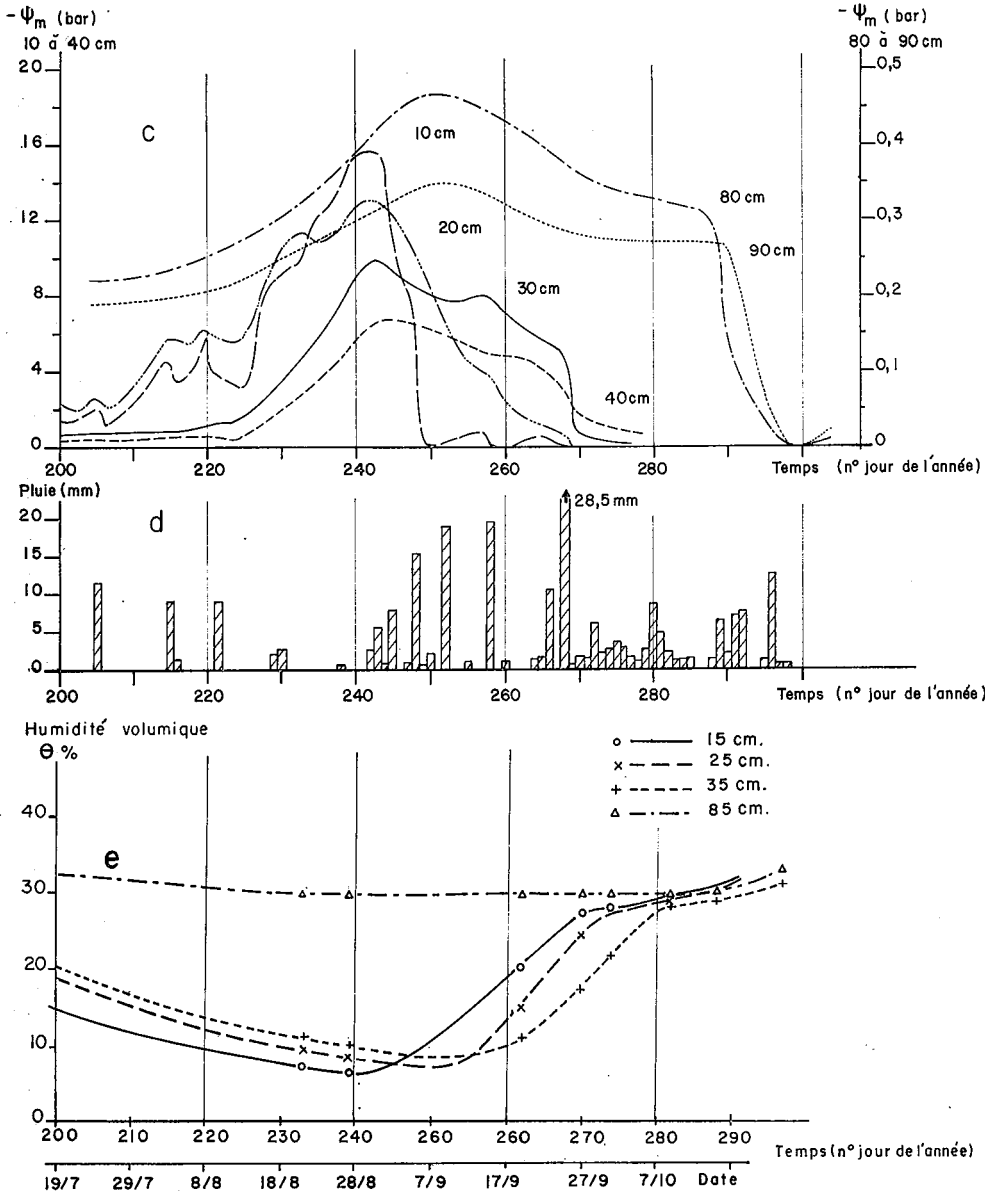


FIG. 4. — Variations dans le temps et en fonction de la profondeur

- a) potentiel matriciel dans la ligne,
- b) potentiel matriciel dans l'interligne,



du potentiel matriciel, de l'humidité et de la pluviométrie :

- c) potentiel matriciel moyen (lignes et interlignes),
- d) pluviométrie,
- e) humidité volumique.

3.2. — Variations saisonnières du potentiel matriciel

Pour mettre en évidence les variations saisonnières du potentiel, il faut éliminer les variations journalières citées précédemment, soit en ne conservant que les valeurs mesurées à une heure donnée de la journée (la nuit par exemple), soit encore en calculant une moyenne journalière par profondeur à partir de toutes les mesures d'une journée. C'est cette dernière méthode que nous avons adoptée ; les résultats pour 2 profils, l'un dans l'interligne, l'autre dans la ligne, sont rapportés figure 4, ainsi que la moyenne des profils.

IV. — Discussion

4.1. — Interprétation de l'oscillation journalière du potentiel matriciel

Le premier facteur que l'on serait tenté de mettre en cause, compte tenu de la mesure psychrométrique, est bien sûr la température.

On sait toutefois que l'oscillation thermique journalière dans le sol s'amortit très rapidement en profondeur en même temps qu'elle subit un déphasage. Ainsi, à 40 centimètres de profondeur, en moyenne, la température varie en opposition de phase avec celle de la surface (retard de 12 heures) et l'amplitude thermique y est environ 20 fois plus faible. Le fait qu'aucun déphasage bien net (fig. 3) n'apparaisse en profondeur en ce qui concerne la variation diurne du potentiel matriciel indique que la plus grande part de cette variation résulte d'un phénomène autre que thermique.

Il y a tout lieu de penser qu'elle est due à un autre phénomène périodique, donc très probablement à la variation journalière de l'évapotranspiration (représentée en tireté sur la fig. 3) et qu'elle reflète avec un minimum de déphasage et de déformation (dus au sol lui-même, et aussi au temps de réponse des micropsychromètres) la variation de la succion au niveau des racines de la culture.

En effet, l'évapotranspiration entraîne une absorption d'eau par les racines à divers niveaux dans le sol. Le sol se dessèche progressivement autour des racines tout au long de la journée, et durant la nuit, en l'absence de transpiration, ce dessèchement peut faire place à une certaine réhumectation à partir des zones plus humides.

Nous avons donc recherché la relation existant entre l'amplitude de potentiel observée et l'ETP journalière. Nous avons retenu pour cela une période de dessèchement continu durant laquelle les précipitations ont toujours été suffisamment faibles pour ne pas entraîner de réhumectation à 10 centimètres de profondeur (12 août au 30 août 1974). La corrélation obtenue est significative, mais faible, si l'on considère l'ensemble des emplacements à une profondeur donnée. Il en ressort que l'ETP seule n'explique qu'environ 10 à 20 p. 100 de la variance totale de l'amplitude journalière de potentiel.

En fait, seule une part de l'eau de l'évapotranspiration est issue d'une tranche déterminée du sol. La contribution de cette tranche dépend de la disponibilité de l'eau qu'elle contient, donc de la densité des racines et de la conductivité hydraulique du sol qui diminue avec le potentiel matriciel. C'est pourquoi nous avons introduit le potentiel matriciel moyen de la journée, en testant deux types de relation entre l'amplitude de potentiel, l'ETP journalière et le potentiel matriciel moyen de la journée, $\Delta\psi = a + b \cdot \text{ETP} + c\psi$ et $\Delta\psi = a \cdot \text{ETP}^b \cdot \psi^c$.

On constate que cette dernière forme qui paraît plus satisfaisante du point de vue physique donne des résultats un peu meilleurs. La prise en compte du potentiel matriciel avec l'ETP journalière n'explique toutefois la variance totale de l'amplitude que pour une part de l'ordre de 15 à 50 p. 100.

Cette étude nous confirme que la liaison entre l'amplitude de potentiel observée, l'ETP et le potentiel matriciel est loin d'être simple. Ce que l'on sait de la complexité des mécanismes de transferts de l'eau dans le sol, laisse penser qu'une approche purement statistique en l'absence d'un modèle physique est mal adaptée.

Nous avons calculé à partir de la relation potentiel matriciel-humidité $\psi_m(\theta)$ établie *in situ* (cf. § 3.4), la variation de stock d'eau qui correspondrait à l'amplitude de potentiel observée. Les résultats montrent que pour la tranche 5-45 centimètres, cette variation calculée (cf. tabl. 1) est systématiquement très supérieure à l'évapotranspiration réelle mesurée pour la journée. Ainsi l'amplitude journalière de potentiel est supérieure à celle qui résulterait simplement du dessèchement du sol, compte tenu de sa relation $\psi_m(\theta)$. On peut se demander si ce désaccord ne résulte pas de l'hystérésis puisqu'en régime d'alternance de dessèchement et de réhumectation et pour une même variation de teneur en eau, le potentiel matriciel varie plus fortement que lors d'un dessèchement continu. Il est impossible actuellement de se prononcer sur ce point.

TABLEAU 1

Comparaison de l'évapotranspiration réelle mesurée et de la variation de la réserve d'eau dans la tranche 5-45 cm correspondant à l'oscillation journalière du potentiel matriciel mesuré, calculée d'après la relation potentiel matriciel-humidité.

Dates	Variation de la réserve d'eau dans la tranche 5-45 cm (mm)	ETR mesurée (mm)
15/8/1974. . . .	6,0	4,8
25/8/1974. . . .	7,0	2,9
26/8/1974. . . .	6,2	3,9

Le résultat trouvé peut enfin être rapproché d'autres résultats expérimentaux tendant à prouver que la relation obtenue en condition d'équilibre ne s'applique pas lorsque le sol se dessèche rapidement et que Hallaire (1964) a tenté d'expliquer en avançant l'hypothèse du « potentiel efficace » (celui-ci correspondrait au potentiel matriciel augmenté d'un terme correctif fonction de la vitesse de dessèchement). Cette hypothèse repose sur la considération d'un double système de diffusion de l'eau dans le sol ; un système de petite échelle (glomérules de sol, par exemple) assure l'alimentation d'un réseau d'itinéraires privilégiés où s'effectuent les mouvements d'eau macroscopiques tels qu'on peut les observer par les techniques habituelles. Des observations de Rhaiem (1972) tendent à confirmer ce point de vue.

Il est certain que les micropsychromètres employés ici sont situés dans des zones où peuvent régner de très forts gradients de potentiel résultant de la succion des racines. Leur plus grande dimension est en effet de l'ordre d'un centimètre alors que la densité des racines peut dépasser, là où nous les avons utilisés, 1 centimètre de longueur de racines par centimètre cube du sol.

Il se peut donc que les psychromètres fournissent une information plus voisine du

« potentiel efficace » dans les itinéraires privilégiés constitués par les racines que de l'état moyen de liaison de l'eau dans le sol. Dès lors, les valeurs de potentiel matriciel ψ_m représentatives du degré de liaison de l'eau dans le sol correspondraient aux mesures réalisées en fin de nuit lorsque l'évapotranspiration est nulle depuis plusieurs heures et que le potentiel s'est plus ou moins réhomogénéisé au voisinage des racines.

4.2. — Variations saisonnières et variabilité spatiale du potentiel matriciel

Interception de l'eau par les plants de maïs.

La figure 4 montre une différence marquée dans l'évolution des profils de potentiel selon que l'on considère les lignes ou les interlignes de maïs. Lors des pluies, la valeur absolue du potentiel matriciel des couches superficielles diminue beaucoup plus rapidement et plus intensément dans les lignes. Cette observation met en évidence l'interception de l'eau de pluie par les feuilles de maïs. Celles-ci interceptent et dirigent les eaux de pluie vers les pieds. Ainsi les lignes de maïs reçoivent plus d'eau que les interlignes. Ce phénomène est d'ailleurs également mis en évidence par la rigole qui tend à former spontanément sur la ligne, lors des averses importantes.

Variabilité de la distribution de l'eau dans l'espace et de l'activité racinaire.

Nous avons déjà signalé des différences systématiques dans la répartition de l'eau dans le sol dues à l'interception de l'eau par les feuilles. La vitesse de variation du potentiel à un niveau donné, qui traduit en particulier l'action desséchante des racines, varie selon la verticale considérée (cf. courbes *a* et *b*, fig. 4). C'est ainsi qu'après des épisodes pluvieux qui ramènent le potentiel au voisinage de 0, à 10 centimètres de profondeur sur les lignes, la valeur absolue du potentiel au niveau des lignes croît plus rapidement que dans les interlignes. Cela traduit un prélèvement préférentiel aux points les plus humides où l'eau est plus mobile.

La comparaison des deux profils correspondant à la même situation (soit ligne, soit interligne) montre également des différences de répartition et d'évolution du potentiel. La localisation de l'eau dans le sol et son exploitation par les racines sont donc très hétérogènes. Une description du potentiel hydrique et de l'activité des racines devra nécessairement tenir compte de ces hétérogénéités.

Cette hétérogénéité horizontale du potentiel doit entraîner l'existence de flux multidimensionnels à des échelles de l'ordre de 10 centimètres.

Si l'on fait abstraction des variations aléatoires dans la direction horizontale des lignes de maïs, on peut envisager une description bidimensionnelle du système sol-plante. Notons toutefois qu'en dehors des périodes immédiatement consécutives à un épisode pluvieux, le dessèchement se poursuit d'une façon assez indépendante de l'effet ligne-interligne. Une analyse unidimensionnelle selon la profondeur peut alors se justifier au moins en première approximation. L'expérience montre alors que 4 mesures simultanées, à un même niveau, conduisent à une incertitude sur la moyenne de l'ordre de 0,5 à 1,5 bar (cf. fig. 5).

4.3. — Ascension capillaire

L'examen de la figure 4 montre qu'au début de la réhumectation superficielle par les pluies de septembre (à partir du jour n° 242), les niveaux 30 et 40 centimètres

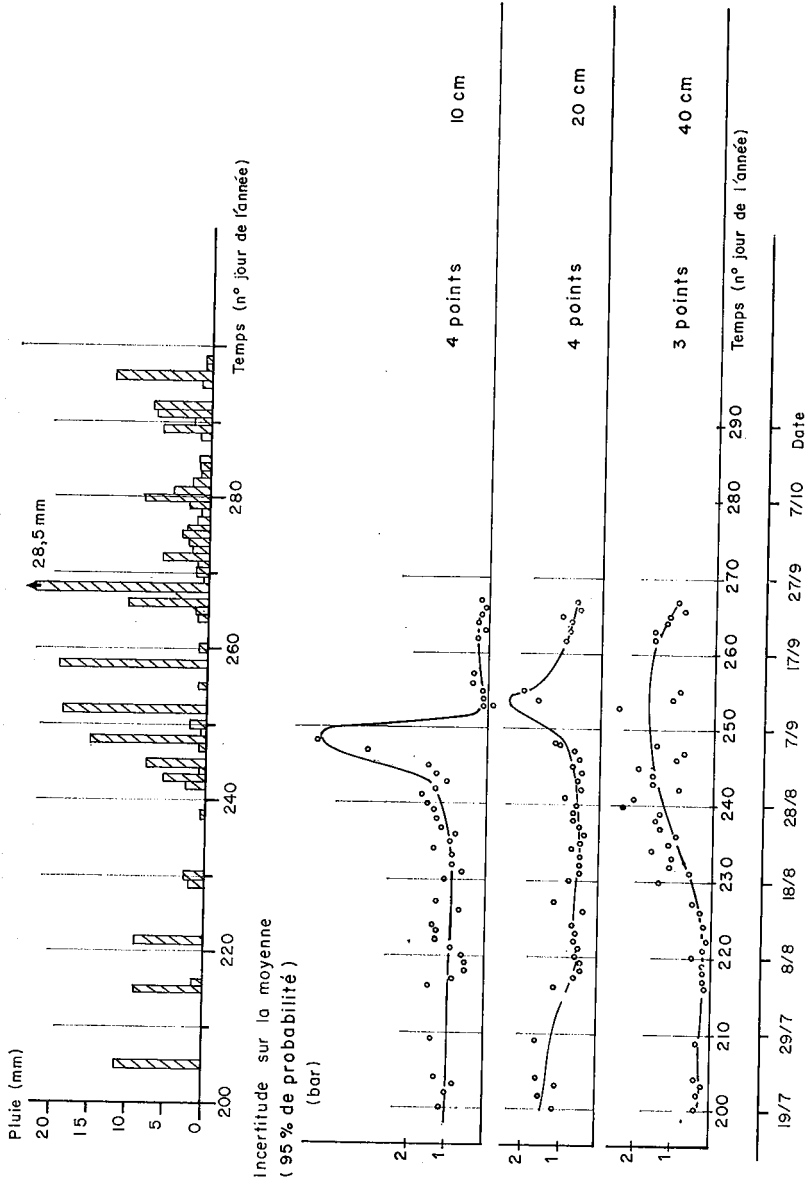


FIG. 5. — Evolution de l'incertitude sur la moyenne journalière de potentiel à une profondeur donnée au cours de la saison (probabilité 95 p. 100)

commencent à se réhumidifier bien que le niveau 20 centimètres en cours de réhumectation sous l'effet des pluies soit encore plus sec. Ce phénomène s'observe sur tous les profils ; il ne peut donc être dû à des apports d'eau latéraux et ne s'explique que par les remontées d'eau des couches inférieures du sol. Ce transfert *per ascensum* masqué durant toute la phase du dessèchement du sol par une intense absorption racinaire, apparaît lorsque les pluies importantes ont mouillé abondamment la surface du sol entraînant une absorption préférentielle en surface.

Ainsi, l'absorption racinaire de la culture dans une tranche du sol ne peut être assimilée sans risque d'erreur importante à la variation du stock d'eau ; sa détermination implique une estimation des flux d'eau verticaux.

4.4. — Relation potentiel-humidité

Nous avons établi *in situ* la relation potentiel matriciel-humidité volumique $\psi_m(\theta)$ pour diverses couches de terrain, en reliant les mesures du potentiel matriciel par les méthodes tensiométriques et psychrométriques, et les mesures d'humidité par la méthode neutronique.

On a reporté sur la figure 6a la relation $\psi_m(\theta)$ pour la tranche 15-25 centimètres, en indiquant l'intervalle de confiance sur ψ_m (probabilité 95 p. 100) ; cette incertitude sur ψ_m résulte de la variabilité spatiale (systématique et aléatoire) et de la variation systématique du potentiel au cours de la journée. Sur la figure 6b, sont indiquées pour la même tranche de sol, les relations entre l'humidité et les valeurs maximales et minimales de potentiel observées au cours de la journée.

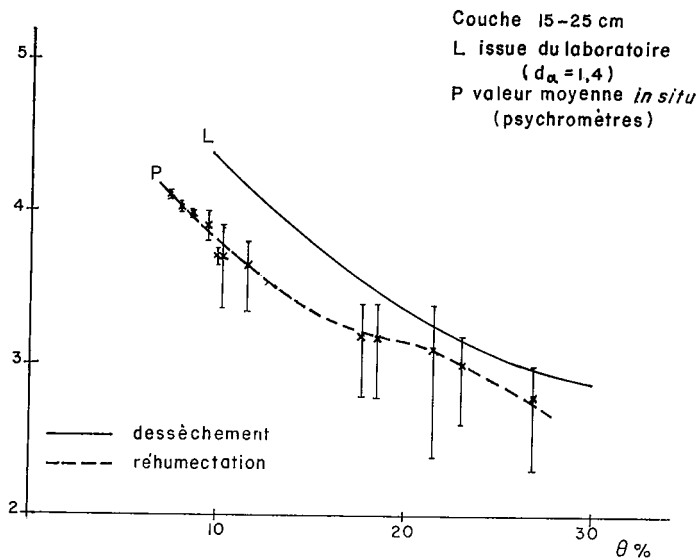
Sur les graphiques 6a et 6b, est indiquée en outre (courbe L), la relation $\psi_m(\theta)$ obtenue en laboratoire par la méthode d'extraction sous pression. La comparaison entre les courbes obtenues en laboratoire (L) et *in situ* supposerait que les échantillons de sol traités en laboratoire ne soient pas remaniés et qu'en particulier, la densité apparente d_a soit la même que pour le sol en place.

En fait, on sait que cet effet de la densité apparente sur la relation $\psi_m(H)$ (H, humidité pondérale) est faible, du moins pour les sols limoneux aux humidités inférieures à la capacité au champ. Ainsi, ayant retenu la densité apparente de 1,4 (valeur relevée *in situ* pour la tranche 15-25 centimètres) pour transposer les courbes $\psi_m(H)$ obtenues en laboratoires en courbes $\psi_m(\theta)$, on pouvait s'attendre à ce que, en dépit de l'incertitude relative à d_a , les relations $\psi_m(\theta)$ obtenues en laboratoires et *in situ* soient quasiment les mêmes pour des valeurs de ψ_m inférieures à — 1 bar.

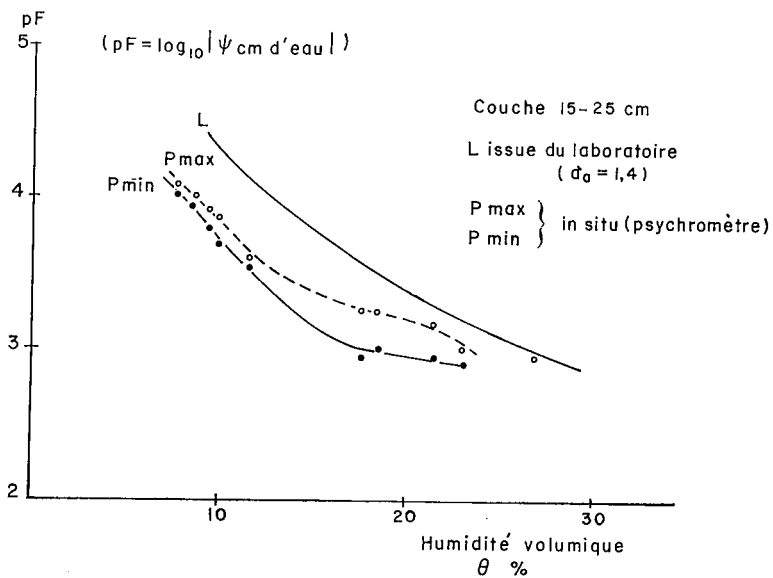
Or, on constate que l'humidité relevée sur le terrain pour un même potentiel matriciel, est très sensiblement inférieure à celle obtenue en laboratoire.

Le décalage observé est trop considérable pour être dû seulement à un effet de la densité apparente. Peut-être faut-il mettre en cause, soit le remaniement des échantillons de sol correspondant à des modifications de la distribution des pores et à un réarrangement des particules, lors du prélèvement et de la mise en saturation en laboratoire, soit un phénomène d'hystérésis, le sol en place se desséchant et s'humidifiant constamment alors que les mesures de laboratoire sont effectuées en partant de la saturation. En fait, il n'a pas été possible, dans les limites de la période étudiée, de mettre en évidence un phénomène d'hystérésis dans la relation potentiel-humidité obtenue aux humidités relativement faibles avec la méthode psychrométrique. De même, dans la tranche plus profonde (80-90 centimètres) à humidité plus élevée et

$pF \text{ (} pF = \log_{10} |\Psi_{cm} \text{ d'eau}| \text{)}$



a)



b)

FIG. 6. — Comparaison entre la relation potentiel matriciel-teneur en eau $\Psi_m(\theta)$ issue du laboratoire (courbe L) et celle établie *in situ* avec les micropsychromètres (courbe P) :

- a) valeurs moyennes du potentiel *in situ* et incertitude sur la moyenne (probabilité 95 p. 100) ;
- b) valeurs extrêmes résultant de la variation journalière.

équipée de tensiomètres, la relation ne présente pas une hystérésis bien significative (fig. 7).

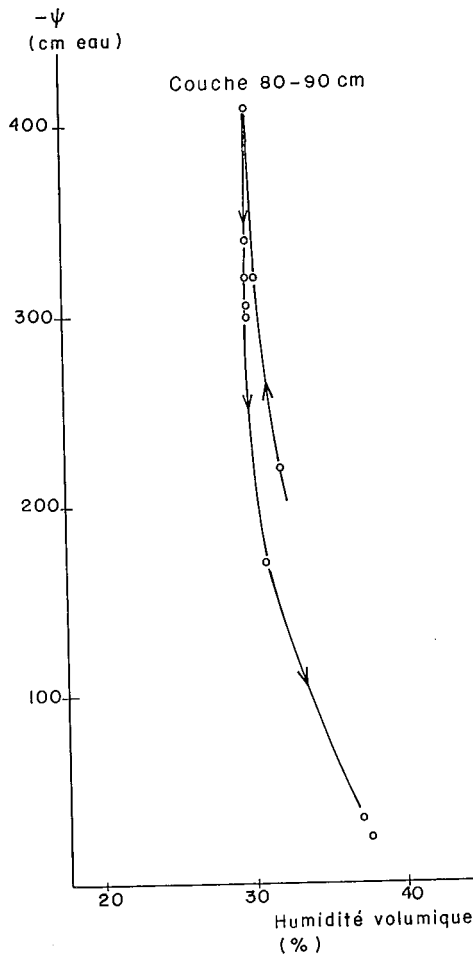


FIG. 7. — Relation potentiel matriciel-humidité établie in situ avec les tensiomètres.

L'impossibilité de transposer au champ les relations potentiel-humidité établies en laboratoire, la méconnaissance de l'ampleur des phénomènes d'hystérésis affectant cette relation *in situ* (que l'on sait assez grande en laboratoire) justifient les mesures directes et indépendantes du potentiel matriciel et de l'humidité.

V. — Conclusion

Il ressort des mesures de potentiel de l'eau du sol réalisées dans un champ de maïs au cours de l'été 1974, à l'aide de micropsychromètres et de tensiomètres, que la variabilité spatiale du potentiel matriciel est très grande dans la zone exploitée par les

racines. Elle résulte en partie de l'effet « entonnoir » des feuilles de maïs. Dès lors, si le climat hydrique du sol peut être caractérisé par un potentiel moyen, le problème d'échantillonnage demeure important. Pour que l'intervalle de confiance de cette moyenne soit assez petit, il faut un nombre de mesures plus ou moins grand suivant l'hétérogénéité : pour la culture de maïs, 4 mesures nous donnent un intervalle de confiance de l'ordre de 0,5 à 1,5 bar. La caractérisation du climat hydrique par une moyenne peut être insuffisante si l'on ne prend pas en compte l'hétérogénéité.

La méthode micropsychrométrique est assez fine pour mettre en évidence des variations du potentiel durant la journée, mais l'intérêt de ces observations est limité en raison de la difficulté que nous avons d'interpréter cette oscillation.

Une part de cette variation journalière peut résulter aussi d'une action des gradients de température. Malgré toutes les précautions prises pour en minimiser les effets (horizontalité des micropsychromètres), les capteurs perturbent toujours les transferts de vapeur d'eau. Il y a tout lieu de penser que les erreurs en résultant sont faibles. Des expériences en laboratoire, avec ou sans plantes, permettront peut-être de préciser cette question.

Le vieillissement des micropsychromètres n'apparaît qu'exceptionnellement à l'échelle d'une saison, mais une diminution du coefficient d'étalonnage peut être constatée au bout d'un an, probablement due à une détérioration de la soudure du thermocouple.

Ainsi est-il préférable de déterrer au moins une fois par an les micropsychromètres et d'en refaire l'étalonnage.

Les micropsychromètres à effet Peltier constituent malgré tout un bon outil pour mesurer le potentiel matriciel en complément des tensiomètres. Ils sont particulièrement adaptés pour les études de fonctionnement du système racinaire. Leur mise en œuvre n'est pas trop difficile bien qu'elle nécessite un étalonnage.

Il apparaît enfin que l'extrapolation au champ de la relation potentiel-humidité établie en laboratoire pose un problème. Cela renforce donc l'intérêt de disposer de techniques de mesure *in situ* du potentiel.

Reçu pour publication en janvier 1977.

Summary

Study *in situ* of the water potential under a maize culture with a system of automatic measurement by a micropsychrometer with Peltier effect

The use of micropsychrometers with Peltier effect and tensiometers made possible the study of the variations in soil matrix potential under a maize culture in space and time (fig 1 and 2).

In spite of the cares adopted after previous works, a daily oscillation of the potential which may reach 4 bars (fig 3) is observed which can be attributed neither to thermic effects nor only to a variation of water content caused by evapotranspiration. The evolution of the potential at the different depths (fig 4) during a summer revealed the existence of capillary water uplifting from the depth towards the zones dried up by the culture. A great horizontal variability was stated which is due partly to the heterogeneity introduced by maize line culture and partly to the random root distribution. A good description of the « water climate » in soil requires therefore several measurements.

The simultaneous measurement of the voluminal humidity through the neutron method enabled to observe the relationship of the potential and the humidity. No significant hysteresis effect could be stated (fig 6 and 7), but it appears that the extrapolation of the relationships of potential and humidity

stated on soil samples under laboratory conditions to the field (fig 6a, 6b) must be cautiously undertaken, which stresses the interest of knowing techniques for measuring directly matrix potential and humidity.

In the appendix the system of data acquisition meant for processing directly with a computer the psychrometric data necessary to obtain the matrix potential (fig 8 and 9) is presented.

Zusammenfassung

In situ Untersuchung des Wasserpotentials unter einer Maiskultur mit Hilfe eines automatischen mit einem vom Peltiereffekt betätigten Mikrofeuchtigkeitsmesser ausgestatteten Messsystems

Die Anwendung von vom Peltiereffekt betätigten Mikrofeuchtigkeitsmessern und Tensiometern erlaubte, die Schwankungen des Bodenmatrixpotentials unter einer Maiskultur im Hinblick auf Raum und Zeit zu studieren (Abb. 1 und 2).

Trotz der nach Voruntersuchungen getroffenen Vorsichtsmaßnahmen gibt es eine tägliche Schwankung des Potentials, die 4 Bars erreichen konnte (Abb 3), und die weder auf thermische Effekte noch auf ein nur durch Evapotranspiration bedingten Variation des Wassergehalts zurückgeführt werden kann. Die Potentialentwicklung zu den verschiedenen Tiefen (Abb 4) im Laufe des Sommers erwies das Vorhandensein von kapillaren Wasseranstiegen aus der Tiefe in Richtung der durch die Kultur getrockneten Zonen. Eine grosse horizontale Variabilität wurde beobachtet, die teils aus der von Maisreihenkultur bedingten Heterogenität und teils aus der zufälligen Wurzelverteilung stammt. Eine ausreichende Beschreibung des «Wasserklimas» im Boden verlangt demzufolge mehrere Messungen.

Gleichzeitige Messungen der Volumenfeuchtigkeit mit der Neutronenmethode erlauben, die Beziehung zwischen dem Potential und der Feuchtigkeit zu beobachten. Kein bezeichnender Hysteresiseffekt wurde dargelegt (Abb 6 und 7) aber es scheint dass die Extrapolation auf Feldverhältnisse der im Laboratorium auf Bodenproben festgestellten Potential-Feuchtigkeit Beziehungen (Abb 6a, 6b) mit Vorsicht gemacht werden muss, was das Verfügen über Techniken zur direkten Messung des Matrixpotentials und der Feuchtigkeit wünschenswert macht.

In der Anlage wird ein Datenerfassungssystem vorgestellt, das in der Lage ist, die zur Erreichung des Matrixpotentials notwendigen Feuchtigkeitsmesserdaten mit der Datenverarbeitungsanlage direkt zu behandeln.

РЕЗЮМЕ

Изучение *in situ* водного потенциала под культурой кукурузы, с помощью автоматизированной системы измерения микропсихрометром с эффектом Пельтье.

К. ВАЛАНКОГНЬ, Ф. А. ДОДЕ.

Применение микропсихрометров с эффектом Пельтье, и тензиометров, позволило изучить изменения в пространстве и времени матричного потенциала под культурой кукурузы (Рис. 1 и 2).

Несмотря на принятые после опыта пред'идущих работ меры предосторожности, дневные колебания потенциала достигали 4-х бар (Рис. 3), и их невозможно было отнести, ни за счет тепловых эффектов, ни за счет изменения содержания воды, вызванного эвапотранспирацией. Эволюция потенциала на различных глубинах (Рис. 4) в течении лета выявила существование капиллярных под'емов влаги из глубин к зонам осушенным культурой. Констатирована была также и сильная горизонтальная изменчивость, частично вызванная гетерогенностью культуры кукурузы рядками и случайным расположением корней. Для точного описания «водного климата» необходимо, значит, провести несколько измерений.

Одновременные измерения об'емной влажности методом нейтронных влагомеров позволили вывести соотношение существующее между потенциалом и влажностью. Никакого выразительного эффекта гистерезиса не было выявлено (Рис. 6 и 7), но оказалось что экстраполяция на почвы соотношения потенциал/влажность, полученного в лабораторных условиях, на почвенных образцах (Рис. 6а и 6б), должна проводиться с осторожностью, откуда и интерес иметь в своем распоряжении весь технический материал необходимый для прямого измерения как матричного потенциала, так и влажности.

В приложении предлагается система получения психрометрических данных, необходимых при вычислении матричного потенциала, предназначенных для прямой обработки на электронной вычислительной машине.

Références bibliographiques

- DAUDET F. A., VALANCOGNE Ch., 1976. Mesure des flux profonds de drainage ou de remontées capillaires ; leur importance dans le bilan hydrique. *Ann. agron.*, **27** (2), 165-182.
- HALLAIRE M., 1964. *Le potentiel efficace de l'eau dans le sol en régime de dessèchement*. In *L'eau et la production végétale*. I.N.R.A., Paris, 27-62.
- 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. Sc. Paris, Série D*, t. **274**, 3194-3196.
- SPANNER D. C., 1951. The Peltier effect and its use in the measurement of suction pressure. *Bot.*, **2**, 145-168.
- VALANCOGNE Ch., DAUDET F. A., 1974. Adaptation de la technique micropsychrométrique à l'enregistrement du potentiel hydrique dans le sol en place : problèmes posés par la température. *Ann. agron.*, **25** (5), 733-751.

Voir aussi la bibliographie du dernier article ci-dessus

Annexe

Enregistrement numérique des données micropsychométriques nécessaires à la détermination du potentiel hydrique du sol

Un dispositif automatique de mesure du potentiel hydrique *in situ* basée sur une méthode psychrométrique avec enregistrement analogique a été décrit dans un article

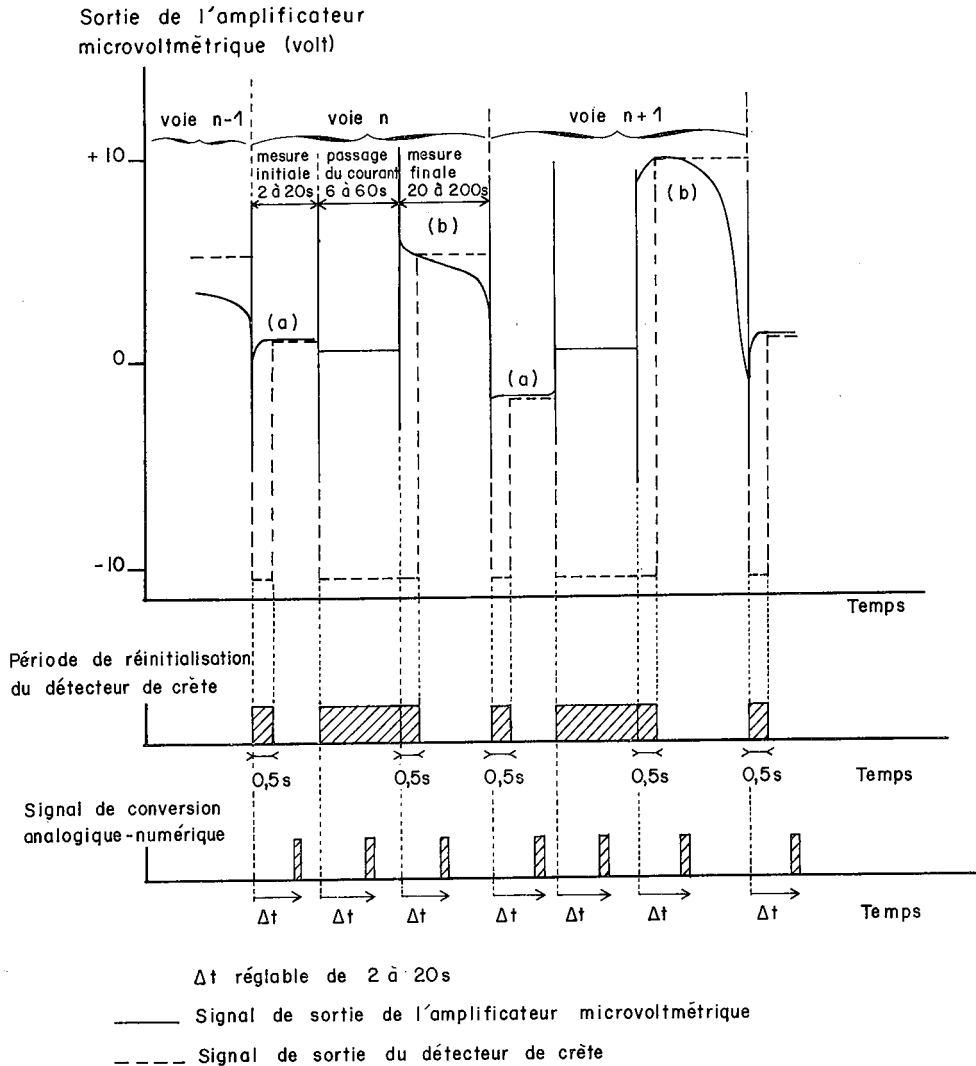


FIG. 8. — Signaux analogiques provenant du dispositif psychrométrique et leur traitement par un détecteur de crête en vue de l'enregistrement numérique des informations : (a) f.é.m. du thermocouple psychrométrique sec ; (b) f.é.m. du thermocouple humide ; pendant la phase de passage du courant est effectuée la mesure de température du psychromètre (c).

précédent ⁽¹⁾. La multiplication des points de mesure imposée par l'hétérogénéité de la distribution du potentiel dans la zone racinaire, et la plus grande fréquence des mesures nécessitée par l'existence d'une variation journalière du potentiel nous ont amenés à adopter un enregistrement numérique permettant un dépouillement automatique sur ordinateur.

Le ruban perforé a été retenu comme support d'enregistrement car son utilisation est compatible avec la plupart des ordinateurs ou calculateurs de bureau.

La mise sous forme numérique des données de tension électrique des micro-psychromètres à effet Peltier nous a amenés à modifier l'appareillage antérieur.

1. Informations à enregistrer.

Trois informations sont nécessaires pour déterminer le potentiel hydrique :

a) *La force électromotrice (f.é.m.) initiale du thermocouple psychrométrique.* Cette f.é.m. est sensiblement constante à l'échelle de quelques secondes.

b) *La f.é.m. du thermocouple psychrométrique humide après condensation d'eau sur la soudure résultant du refroidissement obtenu par effet Peltier :* cette valeur varie au cours du temps en raison des phénomènes thermiques transitoires et avec la disparition progressive de l'eau par évaporation. On peut retenir pour le dépouillement la valeur maximale de la f.é.m. suivant la phase de passage du courant et le pic de tension résultant de la commutation « courant-mesure » (cf. fig. 8). Pour être valable, cette convention doit aussi être retenue lors de l'étalonnage des micro-psychromètres.

c) *La f.é.m. du thermocouple joint au thermocouple psychrométrique* qui sert à déterminer la température nécessaire pour corriger le coefficient d'étalonnage du micro-psychromètre. Cette f.é.m. ne varie pas sensiblement au cours des quelques secondes nécessaires à la mesure.

2. Obtention des informations numériques.

La conversion des informations analogiques (a) et (c) en informations numériques ne pose pas de problèmes puisqu'elles ne varient pas sensiblement au cours du temps nécessaire à la mesure. Mais un dispositif spécial est nécessaire pour enregistrer l'information (b). Compte tenu de la convention retenue ci-dessus, l'installation d'un détecteur de crête à la sortie de l'amplificateur microvoltmétrique solutionne le problème. Le signal de sortie d'un tel dispositif suit le signal d'entrée tant que ce dernier croît, et se bloque à la valeur maximale lorsque celui-ci décroît.

Toutefois ce détecteur de crête doit être enclenché après la pointe de tension transitoire résultant de la commutation « courant-mesure » (0,5 seconde environ) afin de ne pas retenir cette information qui n'a aucun intérêt. Après un temps de l'ordre de 5 secondes, on est pratiquement sûr que l'information (b) a été enregistrée par le détecteur de crête ; il suffit alors d'opérer la conversion analogique-numérique. Le fonctionnement du détecteur de crête est indiqué sur la figure 8.

⁽¹⁾ Valancogne Ch. et Daudet F. A., 1974. Adaptation de la technique micro-psychrométrique à l'enregistrement du potentiel hydrique dans le sol en place : problèmes posés par la température. *Ann. agron.*, 25, (5), 733-751.

3. Principe de fonctionnement du système (fig. 9).

Comme dans le système antérieur, une unité de programmation commande la commutation de voie ainsi que le branchement du psychromètre sur l'amplificateur microvoltmétrique ou sur une source de courant.

Après chaque commutation permettant soit de scruter un nouveau psychromètre, soit de relier le micropsychromètre à l'amplificateur microvoltmétrique ou à une source de courant, on déclenche, avec un certain retard réglable ⁽¹⁾ de 1 à 20 secondes, la conversion numérique des informations analogiques provenant du détecteur de

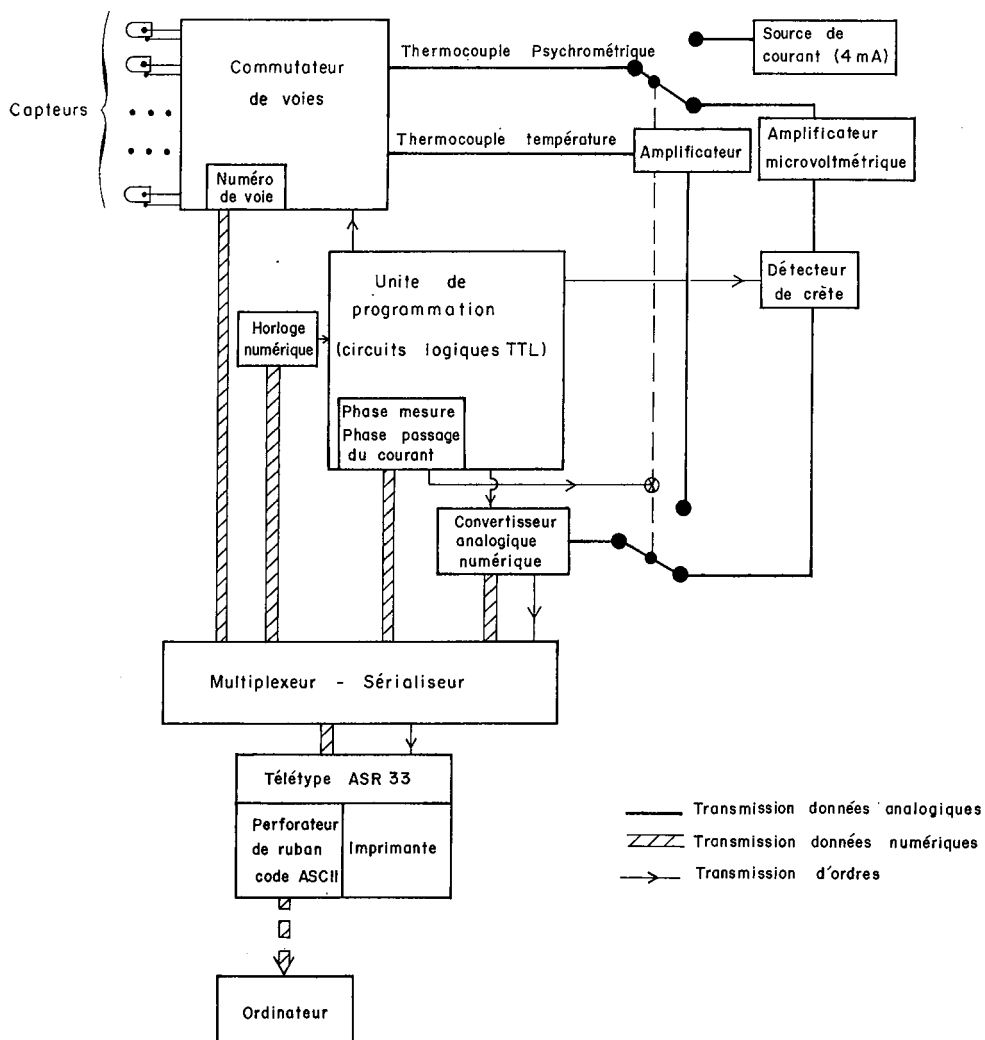


FIG. 9. — Représentation schématique du système d'acquisition de données psychrométriques.

(¹) Ce retard est fonction du comportement des micropsychromètres à la fin de l'humidification. Ce comportement dépend en grande partie de l'intensité du courant employé pour le refroidissement par effet Peltier.

crête, ou de l'amplificateur de tension du thermocouple servant à la mesure de la température (durant la phase de passage du courant) (fig. 8). La conversion analogique/numérique achevée, un ordre d'impression est envoyé. Les informations numériques de temps données par une horloge numérique, de numéro de voie fournies par le commutateur de voie d'état du psychromètre (phase de mesure, phase de passage du courant), de tension provenant du convertisseur analogique/numérique sont mises en série (multiplexeur, sérialiseur) puis simultanément imprimées et perforées sur ruban de papier en code ASCII (le plus couramment utilisé).

Le ruban perforé est ensuite dépouillé sur ordinateur. Un programme permet l'élimination des erreurs qui pourraient résulter d'un mauvais fonctionnement du système automatique de mesure.