

APPLICATION DE L'ABSORPTION DES ONDES CENTIMÉTRIQUES A LA MESURE DE L'HUMIDITÉ DES VÉGÉTAUX

G. GOSSE ⁽¹⁾ et S. de PARCEVAUX

*Station Centrale de Bioclimatologie
Centre National de Recherches Agronomiques, 78-Versailles
Institut National de la Recherche Agronomique*

RÉSUMÉ

L'absorption sélective par l'eau des ondes hertziennes ($\lambda = 3$ cm) permet d'étudier, de façon non destructive, les variations de teneur en eau des végétaux. Dans le cas de cultures denses (*Linum usitatissimum*, *Fagopyrum esculentum*) la teneur en eau des couches supérieures de la végétation varie de façon importante (40 %) au cours de la journée. La cinétique de déshydratation de grandes feuilles isolées (*Polygonum cuspidatum* et *sacchalinense*, *Pelargonium zonale*) a été enregistrée. La précision, encore faible, peut et doit être améliorée.

SUMMARY

*The absorption of centimetric waves applied to
the measurement of plant humidity*

Water selective absorption of hertzian waves ($\lambda = 3$ cm) allows to study variations of plant water content in a non-destructive way. In the case of dense crops (*Linum usitatissimum*, *Fagopyrum esculentum*) the water content in the upper vegetation layer varies much (40 %) during the day. Dehydration kinetics of large isolated leaves (*Polygonum cuspidatum* et *sacchalinense*, *Pelargonium zonale*) have been recorded. Accuracy is low, but it must and can be improved.

⁽¹⁾ Adresse actuelle : Laboratoire de Bioclimatologie, Centre O.R.S.T.O.M d'Adiopodoumé, Abidjan (Côte d'Ivoire). Office de la Recherche Scientifique et Technique Outre-Mer.

INTRODUCTION

L'eau est au point de vue pondéral le constituant principal de la plante, jusqu'à huit fois la matière sèche pour les feuilles de Maïs à pleine turgescence (PARCEVAUX, 1963); aussi la teneur en eau d'un végétal et ses variations sont-elles intéressantes à connaître, car elles influent sur les échanges avec l'extérieur et la photosynthèse du végétal. Les moyens d'étude des variations de teneur en eau appartiennent à deux grands types de méthodes :

— Les méthodes destructives, par prélèvement d'un échantillon représentatif, puis passage à l'étuve à 100 °C. Elles ne sont pas particulièrement adaptées à l'étude de l'évolution de la teneur en eau au cours du temps, aussi plus récemment des méthodes non destructives ont-elles été mises au point.

— Les méthodes non destructives par absorption d'un rayonnement :

1° La bétamétrie a été utilisée pour étudier les variations de teneur en eau et de matière sèche d'une feuille. Le principe consiste à mesurer l'absorption d'un rayonnement β émis par une pastille de carbone radioactif. Les rayons β étant très mous, cette méthode ne semble pas pouvoir être envisagée au niveau d'une culture de plein champ (MEDERSKY, 1961; DAUDET, 1970).

2° La gammamétrie, basée sur l'absorption des rayons γ par l'eau et la matière sèche, a été étudiée et mise au point par le P^r UNGER de l'Institut de Quedlinburg (UNGER, 1958; DAUDET, 1970).

Cette absorption n'est pas sélective pour l'eau, mais, couplée à la suivante, elle permet une investigation intéressante car elle donne l'eau et la matière sèche.

3° L'absorption des ondes centimétriques a déjà été employée (KOSMIN, FILIPPOV, 1968) au niveau de la feuille. Le principe a été repris dans le cadre de la Station Centrale de Bioclimatologie (I.N.R.A.) par MASSIN en 1968, à l'échelle de la culture, puis en 1969 au niveau de la culture et de la feuille.

I. — RAPPELS CONCERNANT L'ABSORPTION DES ONDES ÉLECTROMAGNÉTIQUES

L'étude spectrale de l'absorption des ondes électromagnétiques par l'eau montre différentes bandes d'absorption notamment dans la gamme des ondes centimétriques ou hyperfréquences.

Parmi ces bandes, celle centrée sur trois centimètres est particulièrement intéressante pour plusieurs raisons :

— L'absorption observée est sélective vis-à-vis de l'eau et, notamment chez les végétaux, la matière sèche n'intervient pas.

— Cette absorption est la plus marquée de la gamme des ondes centimétriques (1 à 10 cm).

— Le matériel employé a été mis au point dans le domaine industriel; en effet, le principe est exploité pour des mesures d'humidité sur des matériaux homogènes

(béton, brique, beurre...). Sur ces matériaux, l'atténuation des ondes centimétriques suit la loi de Beer, c'est-à-dire qu'il existe une relation linéaire entre l'atténuation ($\text{Log} \frac{I}{I_0}$) et la teneur en eau.

$$I = I_0 e^{-\alpha x} \quad \text{Log} \frac{I}{I_0} = -\alpha x$$

atténuation

avec

I_0 = intensité maximale

I = intensité reçue après atténuation

α = coefficient d'atténuation

x = épaisseur d'eau réduite obtenue en supposant toute l'eau condensée en une lame parallèle aux cornets et interceptant tout le champ.

II. — APPAREILLAGE ET CONDITIONS D'EMPLOI

1. Appareillage (fig. 1)

L'appareil se compose d'un émetteur et d'un récepteur de type industriel (Philips).

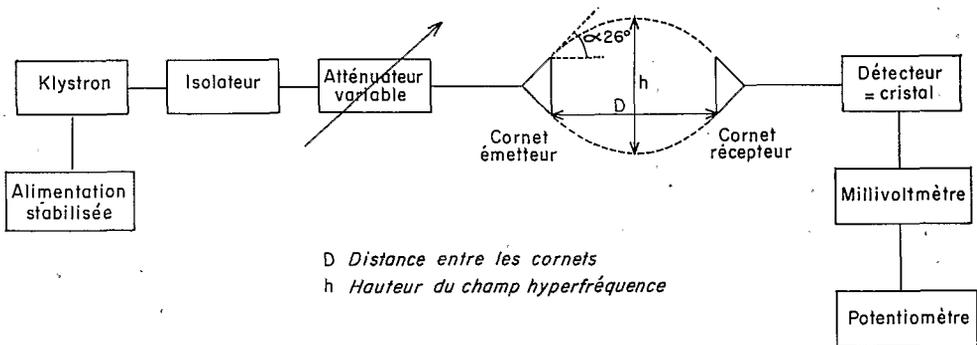


FIG. 1. — Schéma de l'appareillage.

a) L'émetteur est un générateur d'ondes centimétriques ou klystron alimenté par une alimentation stabilisée. La puissance P_0 émise (20 mW) par le klystron est faible : elle ne risque donc pas de perturber le bilan hydrique par une élévation de température. A la sortie du klystron, un isolateur évite le retour des ondes réfléchies parasites qui seraient nuisibles au bon fonctionnement du klystron. Ensuite, un atténuateur variable, c'est-à-dire une lame absorbante mobile dans le guide d'ondes, permet de fixer l'intensité maximale I_0 . L'ensemble est terminé par un cornet émetteur dont l'angle de sortie est $\alpha = 26^\circ$.

b) *Le récepteur* est composé d'un cornet récepteur identique à l'émetteur et d'un organe de détection ou cristal fonctionnant comme une diode. Le cristal présente une détection quadratique aux faibles intensités pour devenir linéaire aux fortes intensités, aussi est-il nécessaire, au cours des mesures, de rester dans la même gamme de détection et de préférence dans la zone quadratique. Le signal obtenu est envoyé sur un millivoltmètre, puis sur un potentiomètre muni d'un intégrateur mécanique.

2. Conditions d'emploi

Le principe des mesures est de comparer l'intensité reçue après atténuation par le végétal à l'intensité maximale I_0 . Cette méthode globale ne vise pas à une étude analytique détaillée de l'absorption des hyperfréquences comme pourraient peut-être le permettre des mesures simultanées de taux d'ondes stationnaires. Le manque de précision qui en résulte est compensé par le faible encombrement et la bonne robustesse de l'appareil qui rendent son emploi au champ très aisé; mais par contre il est nécessaire de procéder à un étalonnage pour chaque cas particulier (cf. III).

Cette technique n'est pas une méthode de référence comme le sont les méthodes destructives, néanmoins elle permet de suivre des variations relatives de teneur en eau.

3. Volume exploré lors d'une mesure

Le volume exploré lors d'une mesure est fonction de l'écartement D des cornets et de leur angle d'ouverture α donné par le constructeur soit 26° . Pour un écartement D de 30 centimètres, la hauteur h du champ est de 15 centimètres et la largeur l est de 19 centimètres.

L'hétérogénéité du champ est importante dans un plan P parallèle au plan des cornets. La structure du champ est de type annulaire avec une zone de moindre absorption au centre suivie d'un maximum d'absorption qui décroît ensuite régulièrement vers les bords. Cette hétérogénéité explique en partie le dispositif expérimental employé par la suite (cf. III).

III. — APPLICATION DE LA MÉTHODE A UNE CULTURE EN PLACE

I. Technique et matériel de mesure

a) Technique

Le domaine d'application de la loi de Beer se limite à des matériaux homogènes, cette restriction va être déterminante dans le choix de la culture: celle-ci doit être dense, couvrante, « homogène ». Le Lin textile avec une densité de 2 100 pieds au mètre carré en est un bon exemple. Par contre, des cultures à grand développement (Maïs, Tournesol...) ne se prêtent guère actuellement à l'application d'une telle méthode.

Étant donné l'hétérogénéité de la culture et du champ électromagnétique, une mesure ponctuelle n'aurait aucune précision; on a pratiqué par balayage.

b) MASSIN (1968) a fait des mesures ponctuelles qui se recouvraient partiellement, puis par une moyenne glissante, il obtenait la valeur intégrée d'une tranche de végétation d'environ 15 centimètres de hauteur, 30 centimètres de largeur, sur une longueur de 2 mètres.

Cette année, le système a été allégé et la mesure pondérée a été obtenue par déplacement du matériel à vitesse constante et par intégration de la courbe d'atténuation (les variations étant faibles, une intégration linéaire est possible).

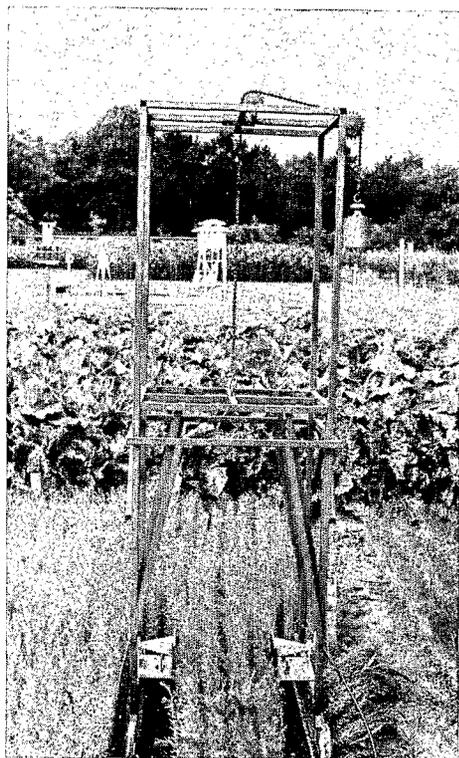


FIG. 2. — Montage au champ.

2. Étalonnage

L'étalonnage a été obtenu en comparant l'atténuation « hyperfréquences » à la quantité d'eau réelle mesurée par passage à l'étuve à 100 °C.

Les mesures ont été faites sur deux cultures d'aspects et de densités différentes, en l'occurrence le Lin (juillet 1969) et le Sarrasin (août 1969).

L'examen des droites d'étalonnage (fig. 3) montre une différence significative entre les pentes (— 0,32 pour le Lin, — 0,675 pour le Sarrasin). Cette différence

s'explique par un effet de géométrie et une homogénéité différente des cultures. Le Sarrasin est plus homogène et donne à quantité d'eau égale une absorption plus grande; de plus l'importance relative des tiges et des feuilles n'est pas la même pour les deux cultures. La différence dans les droites d'étalonnage confirme bien l'hypothèse émise au paragraphe II.2.

La précision obtenue pour le Sarrasin $\pm 0,1$ mm est nettement meilleure que celle du Lin $\pm 0,3$ mm, ceci provenant très probablement des améliorations effectuées avant l'utilisation sur le Sarrasin du système d'entraînement du chariot et, d'autre part, de difficultés accidentelles dans les prélèvements du Lin.

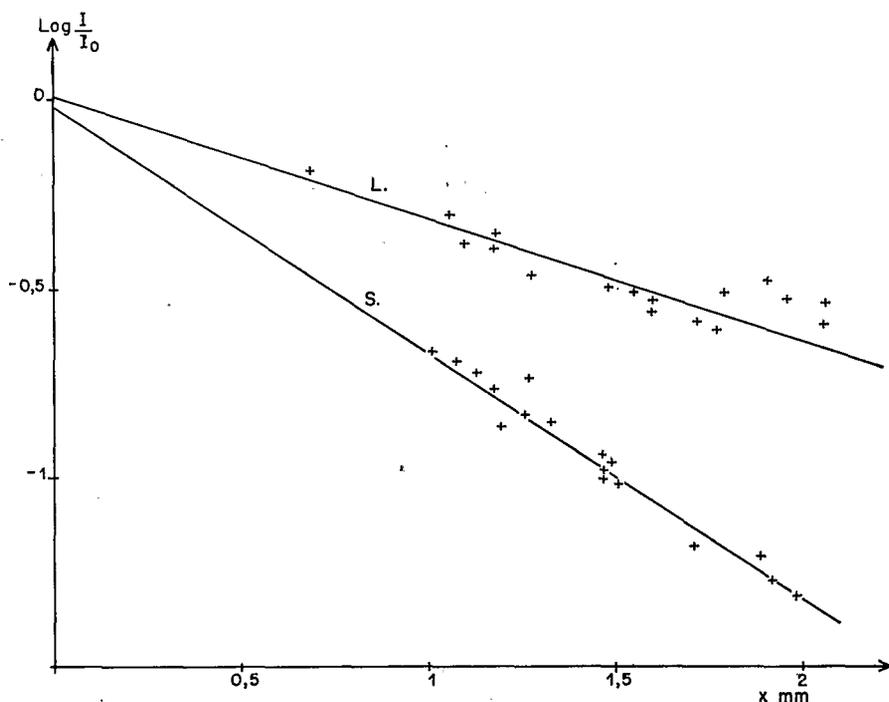


FIG. 3. — Courbes d'étalonnage obtenues au champ, sur le Lin (L.) et sur le Sarrasin (S.).

3. Résultats — Discussion

Les variations de teneur en eau d'une culture au cours d'une journée sont obtenues par des mesures à intervalles rapprochés.

a) *Mesure sur le Lin (juillet 1969)*. — Les mesures ont été faites sur une culture de Lin, semée tardivement, juste avant le stade floraison. L'exploration dans la culture a été réalisée par tranche de 15 centimètres correspondant à la hauteur du champ électromagnétique calculée au paragraphe précédent (fig. 4).

Le niveau 1, soit de 5 à 20 centimètres au-dessus du sol, est le plus pauvre

en eau, parce que formé de tiges et de feuilles sénescentes; les variations de teneur en eau y sont amorties, ce qui était prévisible. Pour les niveaux 2 et 3, formés de tiges et de feuilles jeunes, la teneur en eau est plus forte. Les variations sont grandes et hautement significatives entre 13 heures et 17 h 30. La dépression de l'après-midi se prolonge assez tard (18 h); cela laisse supposer que la régulation stomatique a été faible.

Il est nécessaire de conclure avec prudence, car les points de mesure sont trop espacés dans le temps.

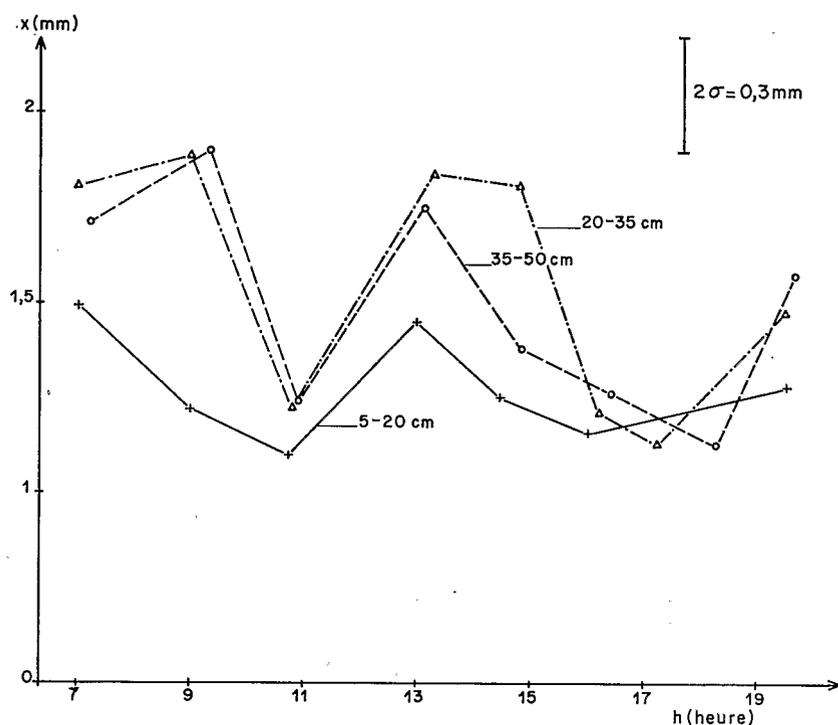


FIG. 4. — Variations d'épaisseur d'eau réduite (x) au cours d'une journée (30-7-69) obtenues sur le *Lin*.

b) *Mesure sur le Sarrasin (août 1969)*. — Afin de mieux suivre les phénomènes, les mesures sur Sarrasin ont été faites à deux niveaux et à 10 minutes d'intervalles (fig. 5).

Les deux courbes sont sensiblement parallèles; l'épaisseur d'eau réduite est supérieure dans le cas du niveau 3, la densité foliaire y étant supérieure. Une forte dépression, de l'ordre de 40 p. 100, se retrouve aux deux niveaux vers 16 heures; elle se prolonge tard, ce qui laisse supposer, comme pour le *Lin*, que l'ouverture stomatique se prolonge dans la soirée. La réhydratation est rapide, ce qui semble correspondre à une fermeture stomatique et une forte absorption racinaire.

c) *Discussion.* — La méthode reste perfectible surtout au point de vue technologique comme le montre l'augmentation de la précision obtenue sur Sarrasin. Aussi, l'effort est-il porté sur le dispositif mobile, en particulier la diminution des

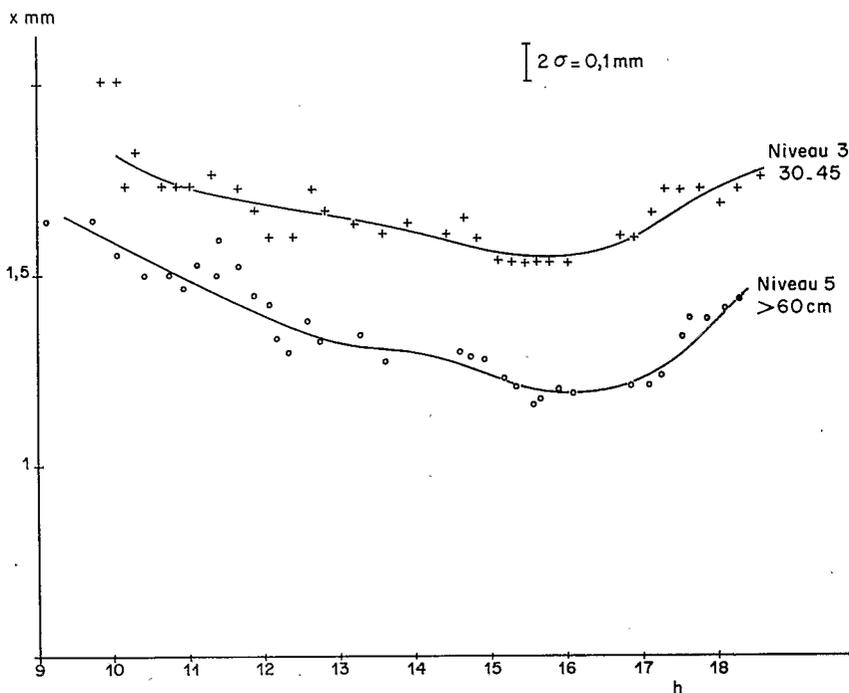


FIG. 5. — Variations d'épaisseur d'eau réduite (x) au cours d'une journée (7-8-69) obtenues sur le Sarrasin.

frottements et l'allègement du chariot, mais aussi sur un système d'intégration, à temps de réponse plus faible (utilisation d'un intégrateur digital logarithmique). Ce dispositif nécessite une adaptation d'impédance entre le cristal et l'intégrateur.

IV. — APPLICATION DE LA MÉTHODE AU NIVEAU DE LA FEUILLE

I. Intérêt et technique de mesure

Il est possible, avec le dispositif utilisé à l'échelle de la culture (fig. 1), mais monté sur un socle fixe, d'étudier les variations de la teneur en eau au niveau d'une feuille. La feuille est introduite entre les cornets, dans un plan P repéré par rapport aux cornets; si l'on veut obtenir une mesure valable, la feuille doit intercepter tout le champ des ondes centimétriques. L'étude ne pourra donc porter que sur de grandes feuilles (Maïs, Tournesol, Bananier, *Polygonum cuspidatum*...).

Les mesures ont été faites sur buvard, feuilles de Tournesol et de *Polygonum cuspidatum*.

2. *Étalonnage*

Les courbes d'étalonnage ont été construites en comparant l'atténuation à la quantité d'eau réelle contenue dans la feuille et déterminée par pesée (fig. 6).

Remarques :

a) il existe une courbe d'étalonnage par matériau, le buvard étant celui qui, à quantité d'eau égale, présente l'absorption la plus forte;

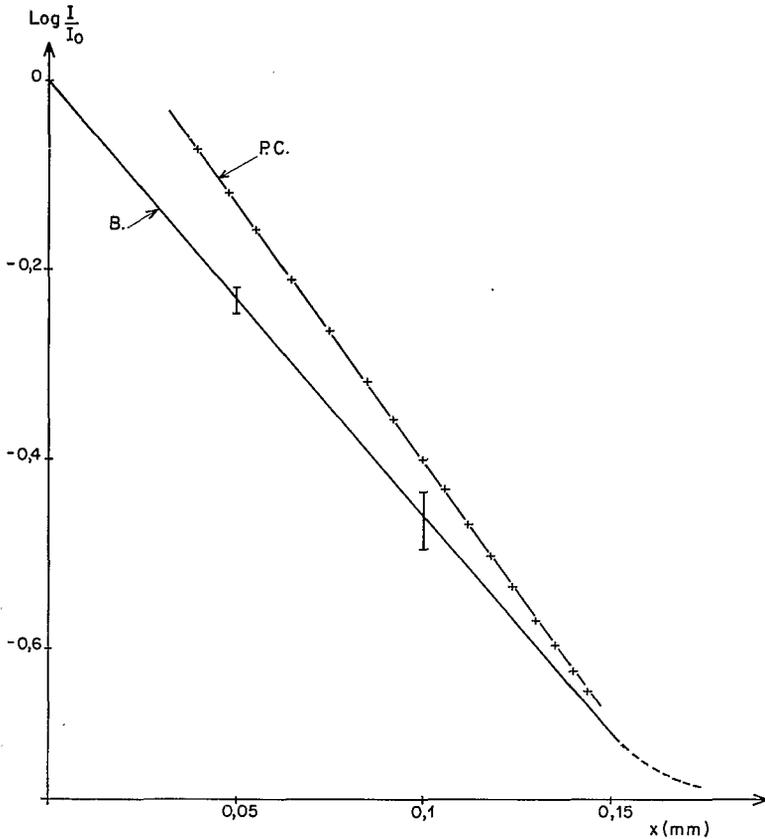


FIG. 6. — Courbes d'étalonnage donnant l'atténuation $\left(\text{Log } \frac{I}{I_0}\right)$ en fonction de l'épaisseur d'eau réduite (x), pour une feuille isolée de *Polygonum cuspidatum* (P.C.) et de papier buvard (B).

b) les droites d'étalonnage pour les feuilles ne passent pas par l'origine; l'anomalie résulte :

- de l'hétérogénéité transversale de la densité de flux des ondes centimétriques;
- de l'hétérogénéité des feuilles, les nervures étant plus riches en eau que le limbe;

c) la précision obtenue sur le buvard, calculée à partir de huit étalonnages, est bonne ($\frac{d\alpha}{\alpha} = 7 \cdot 10^{-2}$);

d) aux fortes atténuations, la courbe s'écarte de la droite; ce phénomène restant encore inexpliqué.

3. Résultats — Discussion

Des cinétiques de déshydratation ont été faites au laboratoire (fig. 7) sur du papier buvard, et des feuilles de *Polygonum cuspidatum*, *P. sacchalinese* et de *Pelargonium zonale*. Les mesures réalisées au laboratoire peuvent être facilement étendues à des feuilles *in situ*.

Ces cinétiques montrent des différences remarquables en fonction de l'état d'ouverture des stomates. La concordance entre les déterminations « hyperfréquences » et « eau réelle par pesée » est satisfaisante ainsi que le montrent les deux ensembles de points de la figure 7.

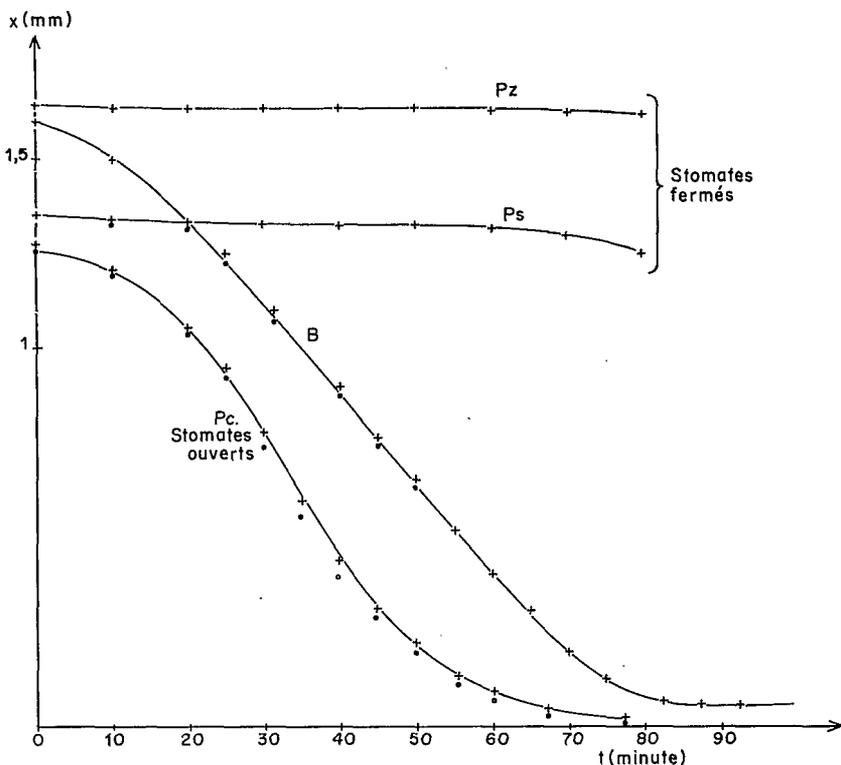


FIG. 7. — Cinétiques de déshydratation obtenues sur des feuilles de *Pelargonium zonale* (Pz), *Polygonum sacchalinese* (Ps), *Polygonum cuspidatum* (Pc) et du papier buvard (B).

$+$ eau « hyperfréquence »,
 \bullet eau réelle obtenue par pesée.

La méthode semble particulièrement exploitable au laboratoire au niveau d'une feuille. La précision obtenue est correcte, mais pourrait être améliorée si l'on parvenait à éliminer l'effet de l'hétérogénéité de la densité de flux et de la répartition de l'eau dans le buvard ou dans la feuille, répartition qui peut varier d'une expérience à l'autre; on pourrait y parvenir à l'aide d'un dispositif mobile, alternatif ou rotatif.

CONCLUSION

La méthode employée a permis de mettre en évidence des variations significatives très importantes au cours de la journée; variations de 40 p. 100 qui n'étaient guère signalées jusqu'à présent. Il convient encore d'améliorer la précision de la méthode et de mieux en définir les limites.

L'hétérogénéité du milieu ne permet pas une approche théorique des phénomènes liés à l'absorption; en particulier des mesures du taux d'ondes stationnaires n'auraient probablement pas de signification dans ces conditions. La méthode employée n'est donc qu'une méthode relative mais facile à mettre en œuvre à condition de réaliser un étalonnage pour chaque cas particulier. Ses principaux avantages résident dans ce qu'elle n'est pas destructive et qu'elle est utilisable dans les conditions naturelles.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- DAUDET F.-A., 1970. La gammamétrie et son application à l'étude de l'humidité des sols. In : *Techniques d'étude des facteurs physiques de la biosphère*, I.N.R.A., Paris, 325-338.
- KOSMIN P. L., FILIPPOV P. L., 1968. Use of radar frequencies in non contact determination of leaf and stem moisture content. *Soviet Plant Physiol.*, 15 (1), 152-156.
- MASSIN B., 1968. *Essai sur l'écologie du Lin*. Rapport Interne de Stage, Station Centrale de Bioclimatologie, I.N.R.A.
- MEDERSKY H. Y., 1961. Determination of internal water status of plants by β -ray-gauging. *Soil Science*, 92, 143-146.
- PARCEVAUX S. de, 1963. Transpiration végétale et production de matière sèche. Essai d'interprétation en fonction des facteurs du milieu. In: *L'eau et la Production végétale*, I.N.R.A., Paris, 63-150.
- UNGER K., 1963. Experimentelle Untersuchungen mit Hilfe von ionisierenden Strahlen und Neutronen zur Bestimmung der Witterungsbedingten Wachstumsintensität von Kulturpflanzen am natürlichen Standort. *Veröffentlichungen Inst. Agrarmeteor., Karl Marx Universität*, II, 2, 135 p.
-

**TECHNIQUES D'ÉTUDE
DES FACTEURS PHYSIQUES
DE LA BIOSPHÈRE**
- extrait -

- 3 MARS 1972

1970

O. R. S. T. O. M.

Collection de Référence

n° 5264 Bot.