

UN PYRANOMÈTRE LINÉAIRE DESTINÉ A LA MESURE DU RAYONNEMENT SOUS COUVERT VÉGÉTAL (*)

J. C. COMBRES (1), R. BONHOMME, Ch. BALDY, Ch. GOILLOT (2)
et S. de PARCEVAUX

avec la collaboration technique de J. P. LE BUHAN

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

RÉSUMÉ

Un pyranomètre linéaire destiné aux mesures de rayonnement dans un couvert végétal est décrit dans ce texte. Son principe consiste à mesurer l'écart de température entre deux surfaces l'une noire, l'autre blanche. Les thermocouples sont obtenus par photogravure d'une résistance en constantan et dépôt électrolytique de cuivre (fig. 1 et 2).

Le pyranomètre a une sensibilité de $30 \mu\text{V W}^{-1} \text{m}^2$ ($20 \text{ mV cal}^{-1} \text{cm}^2 \text{min}$) et un temps de réponse de 3,8 s. La résistance interne est voisine de 13Ω . Aucun effet sensible de la température sur la réponse de l'appareil n'est remarqué.

SUMMARY

A linear pyranometer to be used for radiation measurements in a canopy

This paper describes a linear pyranometer to be used for radiation measurements in a canopy. Its principle consists in measuring the difference of temperature between two surfaces, one being black, the other white. Thermocouples are obtained by photo-engraving on a constantan resistance and by electrolytical copper deposit.

Its sensitivity is $30 \mu\text{V W}^{-1} \text{m}^2$ ($20 \text{ mV cal}^{-1} \text{cm}^2 \text{mn}$) and its lapse of response is 3,8 s. Its internal resistance is about 13Ω . No sensible influence of temperature on the response of this apparatus has been noticed.

(*) Cet article représente une partie du rapport de stage du D.E.A. de Météorologie Dynamique présenté par J. C. COMBRES (1970).

(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.

(2) Section de Métrologie.

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

Collection de Référence

n° 6522 1/973

11 DEC. 1973

INTRODUCTION

En écologie, une bonne connaissance du microclimat lumineux est essentielle. Dans le cas des végétaux, notamment, le rayonnement joue un rôle prépondérant tant pour la photosynthèse que pour la transpiration. L'équilibre et la cinétique des écosystèmes dépendent, en grande partie, de la répartition et de l'évolution de l'énergie solaire dans le couvert végétal.

En agronomie, ce facteur climatique est pour une grande part responsable du rendement final. La production de matière sèche d'une culture est liée à l'énergie absorbée par le système assimilateur. A ce point de vue, seules les radiations comprises dans la bande spectrale allant de 0,3 à 0,7 μm sont efficaces.

En agronomie aussi bien qu'en écologie, il est essentiel de pouvoir mesurer correctement l'énergie incidente à chaque niveau du couvert végétal. Les appareils utilisés se répartissent en deux grandes classes :

1. *Les appareils à capteurs sélectifs.* — Leur sensibilité dépend de la longueur d'onde du rayonnement qui leur est soumis.

Dans cette catégorie entrent les appareils à cellule photoélectrique active ou passive. Certaines d'entre elles (cellules au sélénium par exemple) ont une sensibilité spectrale voisine de celle de l'œil humain. Leur réponse rend compte de la sensation de luminosité perçue par un être humain (d'où leur succès auprès des éclairagistes) et non de l'énergie totale incidente. Pour une même énergie, une variation de la composition spectrale du rayonnement provoque une variation de la réponse de ces appareils.

De telles modifications sont la règle lors de la pénétration du rayonnement dans un couvert végétal (BONHOMME et VARLET-GRANCHER, 1970). Ce type d'appareil, séduisant par son faible prix de revient, ne peut donc convenir à cause de cet inconvénient irréductible.

2. *Les appareils à capteurs non sélectifs.* — Ils sont en réalité peu sélectifs dans une large étendue spectrale.

Leur principe consiste à mesurer la température d'un corps noir qui reçoit et absorbe le rayonnement.

Dans cette catégorie se placent les thermopiles, qu'il est convenu d'appeler pyranomètres lorsqu'elles servent à mesurer le rayonnement global. Leur sélectivité est déterminée par le revêtement utilisé (qui est le véritable transformateur d'énergie) et par l'enveloppe transparente, généralement de verre, dans laquelle doit être placé l'élément sensible pour le protéger des intempéries.

De nombreux pyranomètres sont commercialisés. Les plus courants sont ceux adoptés par les services météorologiques : piles de MOLL-GORCZYNSKI en Europe occidentale, piles EPPLEY aux États-Unis.

Ces appareils d'un prix de revient élevé présentent une surface réceptrice de trop petites dimensions pour être employés dans un couvert végétal.

En effet la présence de taches d'ombre et de soleil, de surfaces respectives variables, entraîne une grande hétérogénéité. Il est dès lors intéressant d'avoir

un capteur de bonne sensibilité dont la taille permette d'obtenir directement une valeur moyenne de la densité de flux de rayonnement incident.

Le pyranomètre qui va être décrit a été conçu pour répondre à ces exigences. Son faible prix de revient permet en outre de multiplier les points de mesure.

A. — CONSTRUCTION DE L'APPAREIL

I. — PRINCIPE

Comme pour le pyranomètre Eppley, le principe consiste à mesurer l'écart de température entre deux surfaces exposées : l'une noire, absorbant le rayonnement, l'autre blanche le réfléchissant.

Cette mesure est réalisée par un ensemble de thermocouples connectés en série dont les jonctions sont alternativement placées sous la surface noire et sous la surface blanche.

Les « thermocouples » sont obtenus par un dépôt électrolytique discontinu de cuivre sur un fil de constantan (fig. 1).

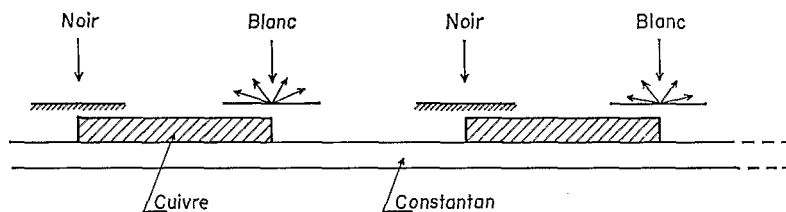


FIG. 1. — Schéma de principe du pyranomètre.

II. — HISTORIQUE

Pour la première fois en 1912, HILL (cité par LECOMTE, 1950) indiqua un procédé ingénieux pour fabriquer de tels thermocouples placés en série. Un fil fin de constantan qui sert de cathode est enroulé sur un cylindre isolant. Ce dernier, placé horizontalement, est immergé jusqu'à son axe dans un bain électrolytique.

Après dépôt de cuivre, les thermocouples ainsi réalisés présentent, sur deux génératrices diamétralement opposées du cylindre, l'équivalent des « jonctions » habituellement obtenues par soudure.

Cette technique fut reprise et améliorée par MONTEITH (1959) et SZEICZ (1964) ainsi que par de nombreux autres auteurs.

III. — TECHNIQUE DE FABRICATION

1. Matériel de base.

Un fabricant de circuits imprimés fournit une résistance de constantan, plaquée sur un isolant et obtenue par photogravure. Le support fin en résine époxy d'épaisseur voisine de 0,16 mm a 30 centimètres de long et 1 centimètre

de large. Le placage en constantan de section rectangulaire a 0,6 mm de large et 50 μm d'épaisseur. Le circuit est constitué d'une suite de 75 créneaux dont la résistance totale est voisine de 30 Ω (fig. 2).

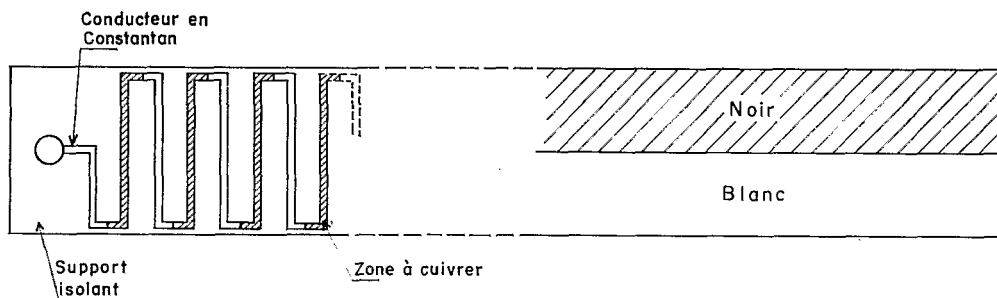


FIG. 2. — Configuration du circuit.

2. Réalisation d'un thermocouple.

La principale difficulté consiste à obtenir un dépôt de cuivre adhérent parfaitement au constantan, et dont les propriétés physiques soient voisines de celles du métal massif.

a) *Préparation des circuits.* — Un nettoyage très soigné du constantan est absolument nécessaire. Parmi les différents procédés mécaniques ou chimiques essayés, seul le microsablage avec des grains de 50 μm , à travers un masque, a donné des résultats satisfaisants.

Les surfaces très propres ainsi obtenues doivent être manipulées avec précautions et cuivrées rapidement pour éviter une oxydation superficielle. Les parties ne devant pas recevoir de cuivre sont préalablement recouvertes d'un vernis isolant de protection très adhérent au métal, non poreux, et ne s'altérant pas dans le bain électrolytique (1).

b) *Électrolyse.* — La cuve à électrolyse est un cylindre de 12 centimètres de diamètre et 40 centimètres de hauteur permettant de placer vingt circuits simultanément sur ses génératrices. L'anode verticale, en cuivre électrolytique pur, est dans l'axe du cylindre.

On utilise une solution acide 0,6 M de sulfate de cuivre de qualité « pour coulométrie » (2).

La densité de courant ($\frac{i}{S}$), pour un tel bain, doit être comprise entre 20 et 200 Am^{-2} .

Le rendement électrolytique est alors proche de 0,98 et le cuivre déposé a des propriétés voisines de celles du métal massif.

(1) Référence « Strip Mask » distribué par Meca Norma.

(2) La solution de qualité « pour coulométrie » est : pour 1 litre d'eau bipermutée dégazée :
— 150 g de $\text{Cu SO}_4 \cdot 5 \text{H}_2\text{O}$;
— additionnée de 50 cm^3 d'acide sulfurique pur, 50 cm^3 d'alcool à 95° GL.

c) *Épaisseur de cuivre.* — L'épaisseur de dépôt (e) est liée à la densité de courant et au temps (t) d'électrolyse par la loi de Faraday :

$$e = \frac{1}{96500} \frac{M}{z d} i t$$

M et d sont respectivement la masse molaire et la densité du cuivre.

Mais le rendement de l'électrolyse (Rt) n'est pas égal à 1. L'épaisseur réelle e' est : $e' = e \times Rt$ et peut être évaluée par une mesure de la résistance en fin d'électrolyse. Nous verrons plus loin (§ C) comment choisir l'épaisseur du cuivre.

Remarque. — La résistance du circuit ($\approx 30 \Omega$) est élevée par rapport à celle du bain (1Ω). La figure 3 montre que la résistance au passage du courant est plus grande en A (bain et circuit : $r + R$) qu'en B (bain seul : r). Il en résulte un dépôt plus intense en B qu'en A.

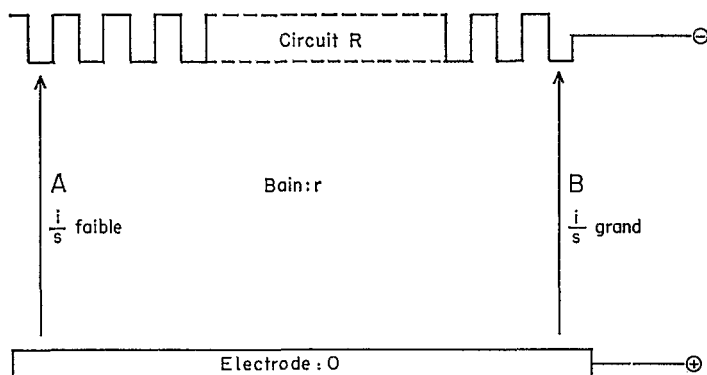


FIG. 3. — Variation de l'épaisseur de cuivre déposée le long du circuit : schéma de principe.

Une meilleure configuration du circuit au départ remédie à cet inconvénient : deux bandes de constantan, de faible résistance, sont reliées aux créneaux et leur confèrent une résistance identique et faible.

3. Choix des revêtements.

Les propriétés optiques des revêtements déterminent les qualités de l'appareil. A ce sujet, il convient de choisir correctement l'absorbance des surfaces, leurs propriétés optiques et la stabilité de leurs caractéristiques.

a) Pouvoir absorbant

Surface absorbante. — L'idéal serait de réaliser un corps noir parfait, c'est-à-dire ayant une absorbance indépendante de λ et égale à l'unité.

De nombreux travaux ont été effectués sur les noirs de carbone ou métalliques. Seul le noir de fumée est utilisé par les métrologistes, mais ne peut convenir dans le cas présent. De bons résultats sont tout de même obtenus avec des peintures. L'Optical Black Parson's Lacquer a été choisi bien qu'il ne corresponde pas à l'optimum (FAUGÈRE, 1965) (1).

(1) Depuis, le noir 3M a été retenu.

Surface réfléchissante. — De la même manière, cette surface devrait être parfaitement blanche, c'est-à-dire avoir une réflectance indépendante de λ et égale à l'unité.

La réalisation est plus délicate quand on utilise une peinture blanche. Les meilleures ont une absorbance qui croît dans le proche infra-rouge (30 à 50 % à 3 μm) à cause du liant.

La peinture « blanc super couvrant » distribuée par Méca Norma a été choisie surtout pour ses excellentes qualités d'adhérence. Des mesures de réflectance actuellement en cours permettront d'améliorer le choix.

La peinture pourrait également être remplacée par un dépôt métallique sous vide. Dans ce cas, la réflectance serait presque indépendante de λ sans toutefois être égale à l'unité. Mais alors les autres propriétés de ces surfaces soulèvent de nouvelles difficultés.

b) *Propriétés optiques des surfaces.* — Le rayonnement réfléchi par les surfaces va à nouveau se réfléchir sur l'enveloppe de verre et venir augmenter le flux de rayonnement descendant. Il faut que ces réflexions multiples soient indépendantes de l'angle d'incidence du rayonnement. Ceci n'est vrai que si les revêtements sont parfaitement diffusants.

c) *Stabilité.* — Les propriétés citées ci-dessus doivent rester constantes ou du moins varier peu au cours du temps.

Il existe par exemple un « étalon » blanc de réflectance spectrale constante supérieure à 0,95 dont l'emploi est impossible dans le cas présent car ses propriétés varient en quelques heures, à cause d'un liant très photosensible.

Par ailleurs, les revêtements utilisés doivent être d'emploi facile et posséder une très bonne adhérence au métal et à la résine époxy. Cette adhérence est améliorée par un léger microsablage de toute la surface à peindre.

4. Montage

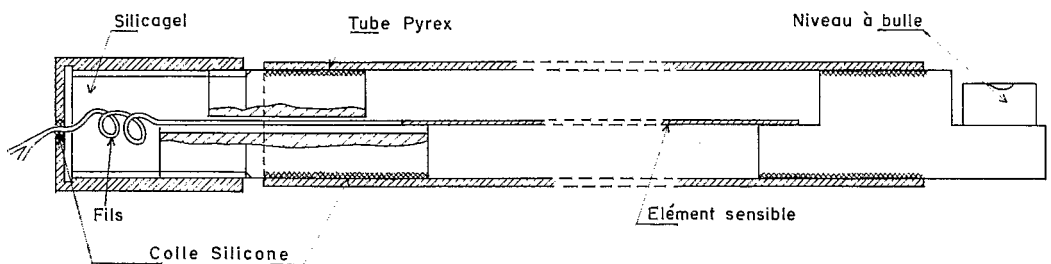


FIG. 4. — Montage du pyranomètre.

L'élément sensible ainsi fabriqué est placé au centre d'un tube de verre de 15 millimètres de diamètre et 1,5 mm d'épaisseur, et fixé par tension entre deux supports collés au verre (fig. 4). Afin d'obtenir un plan relativement bien défini on vérifie le parallélisme des deux supports. Un niveau à bulle est ensuite collé sur l'un d'eux.

Un récipient contenant du silicagel assure la dessiccation de l'atmosphère intérieure de l'instrument.

Le rayonnement venant du bas est arrêté par une feuille d'aluminium collée sur la face inférieure du tube.

B. — CARACTÉRISTIQUES DE L'APPAREIL

Une partie de ces caractéristiques a été déterminée à UCCLE à l'Institut Royal Météorologique de Belgique.

I. — GAMME D'UTILISATION ET SENSIBILITÉ SPECTRALE

Lorsque les peintures sont correctement choisies, la gamme d'utilisation de l'appareil est limitée par la transmission spectrale (T_λ) de l'enveloppe de verre. Pour le verre pyrex utilisé tout le rayonnement solaire est capté entre 0,3 et 3 μm .

La sensibilité spectrale de l'instrument (s_λ) est donnée par :

$$s_\lambda = (a_{N\lambda} - a_{B\lambda})T_\lambda$$

$a_{N\lambda}$ et $a_{B\lambda}$ sont respectivement l'absorbance spectrale du noir et du blanc. Les valeurs calculées sont représentées figure 5, le blanc étant de l'oxyde de titane. Cette courbe est caractéristique des pyranomètres comportant des surfaces noires et blanches.

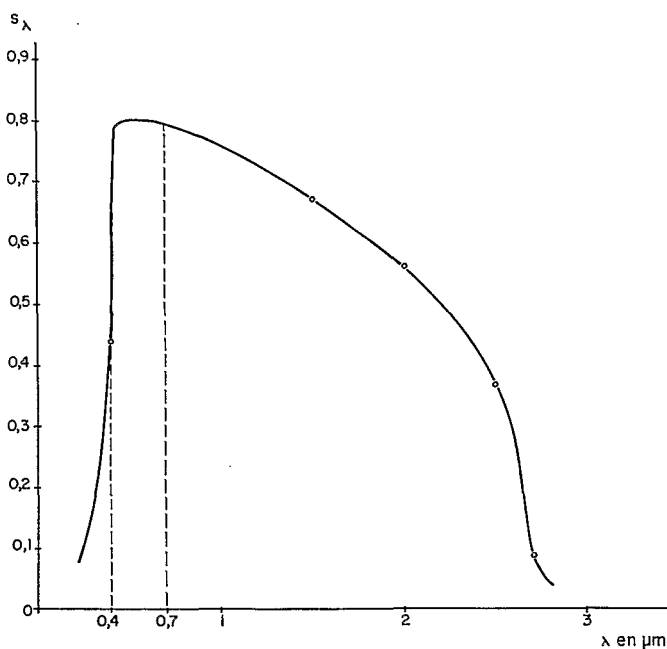


FIG. 5. — Sensibilité spectrale du pyranomètre (calculée).
Facteurs physiques de la biosphère. — 1970.

Pour les travaux de photosynthèse, il est possible d'ajouter des filtres qui permettent d'obtenir la sensibilité spectrale recherchée.

II. — FACTEURS CORRECTIFS

1. Effet de la température

La température n'influe pas sensiblement sur la réponse de l'appareil dans la gamme habituelle des températures d'utilisation (fig. 6). On peut penser que l'instrument est insensible au rayonnement thermique du verre (les peintures blanches ont une grande absorbance dans l'infra-rouge au-delà de $5 \mu\text{m}$).

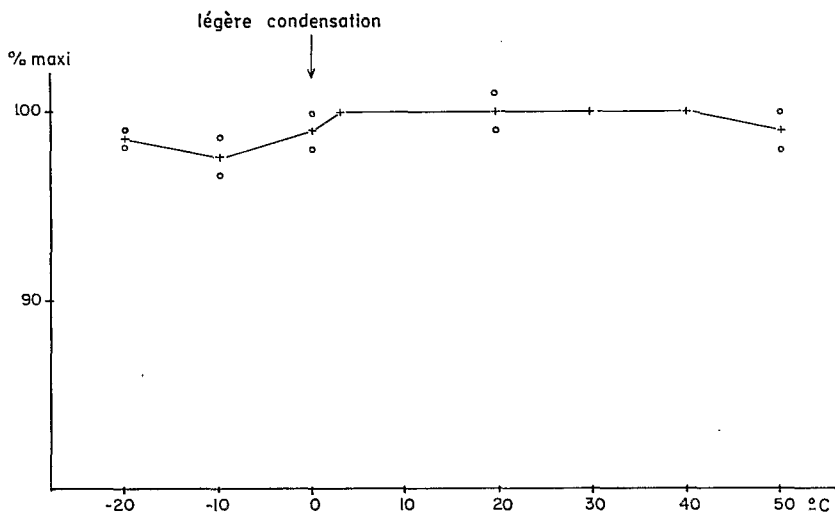


FIG. 6. — Variation de la réponse en fonction de la température.

2. Effet de la position de la source

Le tube de verre ne possède pas de centre de symétrie. La réflexion du rayonnement est alors fonction de la position de la source. Il reste à tester l'importance de ce facteur correctif avant de pouvoir étalonner correctement le pyromètre avec un minimum de mesures.

Toutefois ce facteur perd de l'importance dans le cas des mesures de rayonnement diffus. Ceci se remarque sur la figure 7 : pour de faibles énergies solaires (temps couvert) les points sont moins dispersés que pour de fortes énergies (avec rayonnement direct).

3. Isosensibilité des thermocouples

En déplaçant un spot rectangulaire le long de la surface réceptrice, on constate que les éléments centraux sont plus sensibles que ceux des extrémités. Ce défaut est dû à la variation de l'épaisseur de cuivre et doit être réduit dans les prochaines fabrications grâce à la modification indiquée au paragraphe A III 2c.

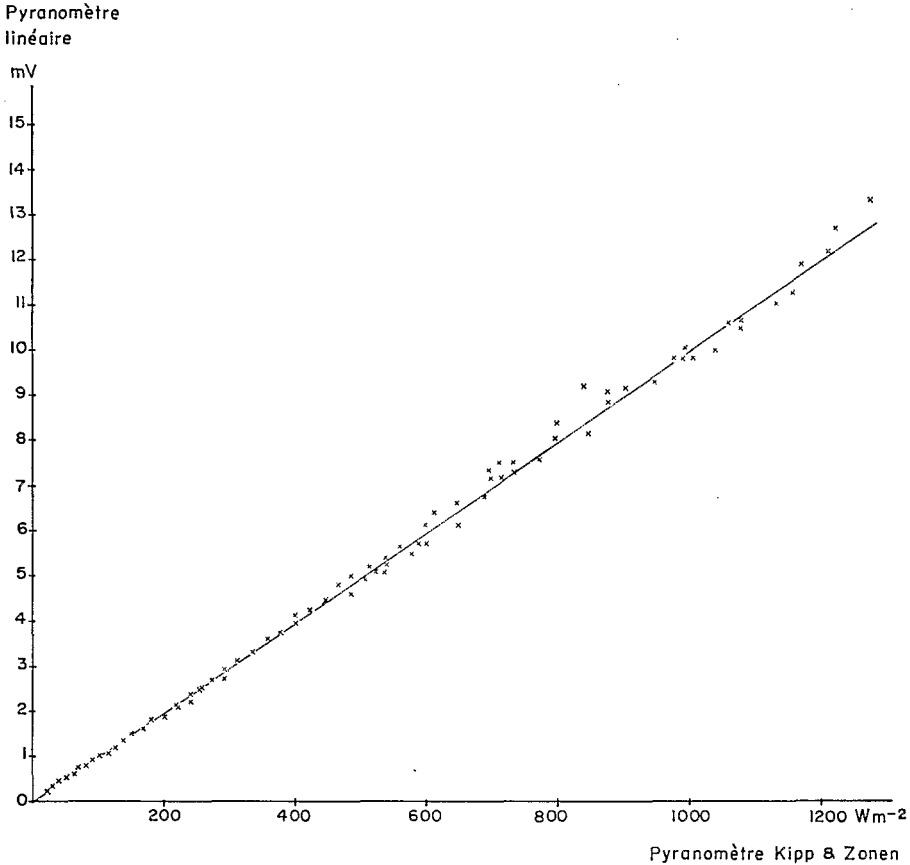


FIG. 7. — Comparaison des réponses instantanées du pyranomètre INRA et de la pile de MOLL.

III. — ÉTALONNAGE

Une comparaison globale de la réponse instantanée du pyranomètre avec celle d'une pile de Moll, portant sur plusieurs journées et plusieurs types de temps a été réalisée (fig. 7). L'appareil utilisé, d'ancienne fabrication, a une sensibilité de $10 \mu\text{V W}^{-1} \text{m}^2$ ($7 \text{ mV cal}^{-1} \text{cm}^2 \text{min}$). Celle des appareils actuels est de $30 \mu\text{V W}^{-1} \text{m}^2$ et ces valeurs ne représentent pas encore l'optimum que l'on peut atteindre.

IV. — TEMPS DE RÉPONSE

La réponse de ce capteur à un signal lumineux carré (mesurande) suit au départ la loi classique :

$$E = E_M (1 - e^{-\frac{t}{\tau}}) \text{ avec } \tau = 3,7 \text{ s (fig. 8)}$$

E : réponse à l'instant t

E_M : valeur imposée par le mesurande

τ : constante de temps.

Puis elle s'en écarte légèrement par suite de l'influence devenue prépondérante de phénomènes non linéaires tels que la convection et le transfert de chaleur à l'intérieur du tube. Si l'on mesure alors le temps de réponse on obtient pour $E = 0,95 E_M$, $T = 15 \pm 1$ s, valeur en fait très voisine de celle que l'on obtiendrait pour une réponse exponentielle ($3\tau = 14,8$ s).

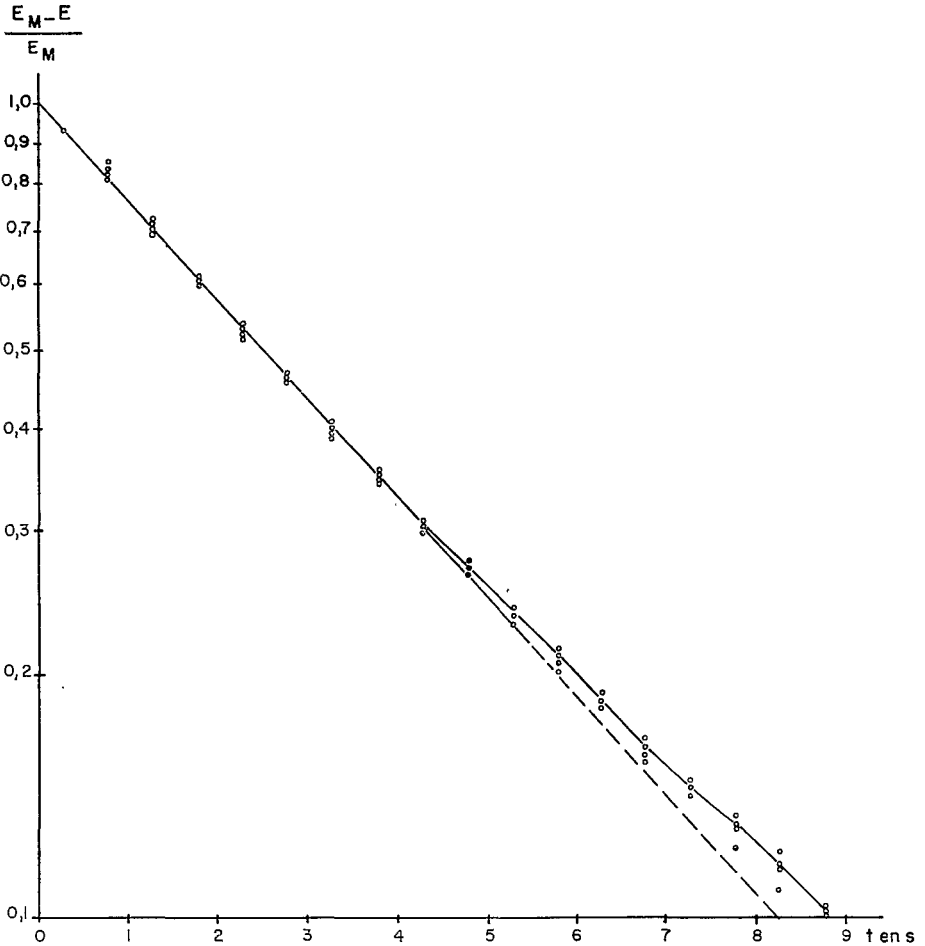


FIG. 8. — Temps de réponse en coordonnées semi-logarithmiques.

V. — FIDÉLITÉ

L'absorption du rayonnement ainsi que de nombreux autres facteurs (hydratations, oxydations...) provoquent des modifications des caractéristiques des peintures. Il s'en suit une variation régulière de la sensibilité de l'instrument qui ne peut être décelée qu'après plusieurs années de tests.

VI. — COMPARAISON AVEC D'AUTRES APPAREILS

Les valeurs citées au tableau 1 ont été tirées des travaux de SZEICZ (1968), ANDERSON (1967), BENER (1950) et DOGNIAUX et PASTIELS (1955). Parmi les appareils existants, ce pyranomètre se distingue par sa bonne sensibilité, sa faible résistance interne et une constante de temps favorable, mais doit présenter un effet très marqué de l'azimut de la source, dû à son enveloppe cylindrique.

TABLEAU 1

Pyranomètres	Sensibilité appr.	Résistance interne appr.	Temps de réponse ⁽¹⁾	Facteur de tempé- rature	Enveloppe protectrice	
	mV cal ⁻¹ cm ² min.	Ω	secondes	% (°C) ⁻¹	Nombre	Forme
KIPP	8	8	4,5	0,17	2	sphériques
EPPLEY	7	100	4	non sensible	1	sphérique
STERN	2	5	2	?		
ROTHAMSTED	5	13	20	0,12	1	sphérique
ANDERSON	8	?	5,3	0,22	1	sphérique + diffuseur
LINTRONIC	15	90	10	0,21	1	sphérique
I.N.R.A.	20	13	3,7	non sensible	1	cylindrique

⁽¹⁾ E = 0,63 E_M.

C. — DISCUSSION : OPTIMALISATION

Le circuit de constantan étant donné, une question se pose concernant l'incidence sur la sensibilité de l'épaisseur du dépôt de cuivre.

La présence d'un conducteur continu en constantan sous le cuivre provoque un shunt électrique, une « boucle », qui diminue la sensibilité du thermocouple. Son effet perd de l'importance quand l'épaisseur de cuivre augmente. On dit alors que le rendement électrique du thermocouple (r_e) croît.

Mais les échanges de chaleur entre les surfaces noire et blanche par conduction thermique le long des conducteurs, croissent également avec l'épaisseur de cuivre. L'écart de température entre les soudures diminue de ce fait. On dit que le rendement thermique (r_T) décroît.

La sensibilité maximale sera obtenue pour une valeur de l'épaisseur de cuivre telle que le produit $r = r_e \cdot r_T$ soit maximal.

D'une manière plus générale, on peut jouer sur le rendement thermique en faisant varier la section du conducteur en constantan, ou sur la sensibilité totale en modifiant le nombre de thermocouples.

De plus la sensibilité n'est qu'une composante du facteur de mérite. L'optimisation est en cours sur programme pour augmenter ce facteur de mérite.

Actuellement, la technique de fabrication est suffisamment souple et maîtrisée pour permettre de concevoir la réalisation de capteurs de formes, dimensions et caractéristiques variées, adaptés à chaque type de mesure.

Une première série de ces pyranomètres a été essayée pendant la campagne de mesures de l'été 1969, dans une culture de maïs. Les mesures relatives d'extinction du rayonnement diffus ont donné des résultats cohérents et satisfaisants qui concordent bien avec les données publiées par d'autres chercheurs.

Ce type d'appareil, relativement bon marché, paraît pouvoir rendre de grands services. S'il est souhaitable pour l'approche de la photosynthèse d'une culture, il peut également s'avérer très utile en écologie tant végétale qu'animale. Muni d'un petit intégrateur coulométrique par exemple, on peut obtenir un ensemble autonome peu coûteux qui semble bien adapté aux mesures sur le terrain.

REMERCIEMENTS

Nous tenons à remercier particulièrement M. R. DOGNIAUX et son équipe, de l'Institut Royal Météorologique de Belgique, de l'aide apportée pour la mesure de certaines des caractéristiques de l'appareil.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- ANDERSON M. C., 1967. The role of heat transfer in the design and performance of solarimeters. *J. Appl. Meteor.*, **6**, (5), 941-947.
- BENER P., 1950. Untersuchung über die Wirkungsweise des Solarigraphen Moll-Gorczyński — Beiträge zur Strahlungsmessmethodik III. *Arch. f. Meteor. Geophys. u. Bioklimat.*, **2** (3), 188-249.
- BONHOMME R., VARLET GRANCHER C., 1970. (En préparation).
- DOGNIAUX R., PASTIELS R., 1955. Techniques modernes de mesure de l'éclairement énergétique solaire. Publications série B, n° 16. *Inst. Roy. Météor. Belgique*, 49 p.
- FAUGÈRE J. F., 1965. Mesure spectrale de l'absorptance solaire. *Centre national d'Études spatiales*, Paris, Note technique 2, 20 p.
- LECOMTE J., 1950. Instruments et méthodes pour la mesure de l'énergie rayonnante. In: « *Techniques générales du laboratoire de physique* », J. SURUGE, éditeur C.N.R.S., p. 11-104.
- MONTEITH J. L., 1959. Solarimeter for field use. *J. Sci. Instrum.*, **36**, 341-346.
- SZEICZ G. et al., 1964. Tube solarimeter to measure radiation among plants. *J. Appl. Ecol.*, **1** (1), 169-174.
- SZEICZ G., 1968. Measurement of radiant energy. In: « *Measurement of environmental factors in terrestrial ecology* ». 8th Symp. British. Ecol. Soc., Reading, 1967, p. 109-130.

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

1970

INSTITUT NATIONAL DE LA RECHERCHE AGRONOMIQUE
149, rue de Grenelle - Paris-7^e

6502