

UTILISATION DU PYRANOMÈTRE SPHÉRIQUE A CONDENSATION DU TYPE BELLANI POUR LA MESURE DU RAYONNEMENT GLOBAL ET LA CONDUITE DES IRRIGATIONS EN BASSE-COTE-D'IVOIRE

M. ELDIN

Maître de Recherches en Bioclimatologie
(ORSTOM)

par

B.-A. MONTENY

Chargé de Recherches en Bioclimatologie
(ORSTOM)

I. INTRODUCTION

Le rayonnement solaire global devient une donnée agroclimatologique de plus en plus couramment utilisée. Il est intéressant de pouvoir disposer d'un pyranomètre*, simple, robuste, peu encombrant, peu coûteux, ne nécessitant pas d'alimentation électrique et susceptible d'intégrer la valeur instantanée du rayonnement global sur une période de l'ordre de la journée ou de la demi-journée.

Le pyranomètre sphérique, totalisateur, à condensation, du type Bellani, répond parfaitement à ces exigences. C'est pourquoi nous avons entrepris, au Centre ORSTOM d'Adiopodoumé, près d'Abidjan, de tester la validité des résultats fournis par cet appareil.

II. DESCRIPTION DU PYRANOMETRE

Les pyranomètres que nous avons utilisés étaient constitués (fig. 1) de deux sphères concentriques percées et prolongées vers le bas par un tube de verre, gradué dans sa partie inférieure. La surface extérieure de la sphère interne, en verre ou en métal, est noircie avec une peinture qui se comporte presque comme un corps noir pour le spectre des rayonnements solaires (0,3 à 3 μ).

La sphère externe, en verre, est transparente à ce même rayonnement. On réalise le vide entre les deux sphères pour éviter les échanges de chaleur par conduction et convection entre celles-ci.

La sphère interne contient un liquide volatile, généralement de l'alcool ou de l'eau distillée. Un léger vide y est réalisé pour faciliter l'évaporation du liquide.

* Pyranomètre : appareil destiné à la mesure du rayonnement solaire global.

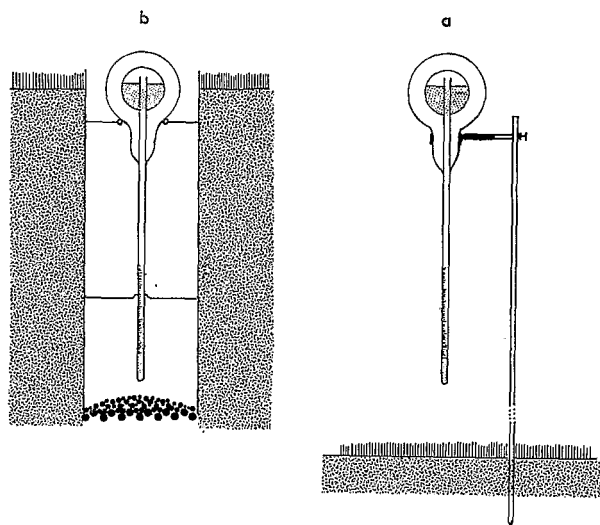


Fig 1

III. PRINCIPE DE L'APPAREIL

Le rayonnement solaire (direct et diffus) incident à la sphère interne « noircie » est absorbé en totalité (corps noir) par cette dernière. Une partie de l'énergie absorbée est dissipée par le rayonnement propre de la sphère interne et le restant est transmis au liquide volatile qu'elle contient. Il y a alors vaporisation d'une quantité de liquide correspondant à cette énergie. La vapeur produite va se condenser dans le tube gradué en verre, situé à la partie inférieure de l'appareil et en équilibre thermique avec l'air ambiant.

L'appareil est construit et installé de manière à ce que :

1) le rapport de l'énergie utilisée pour la vaporisation à l'énergie radiative d'origine solaire incidente sur la boule interne reste constant quand le rayonnement incident varie ;

2) ce rapport soit le plus grand possible (meilleure efficacité thermique, c'est-à-dire meilleure sensibilité de l'appareil).

La première condition ne semble remplie que dans certaines limites d'utilisation à préciser. La deuxième est en grande partie réalisée sur les pyranomètres du type Bellani récents, qui ont une efficacité thermique supérieure à 75 %. Cette performance a été obtenue par des améliorations successives :

- COURVOISIER et WIERZEJEWSKI (1958) augmentent la conductivité thermique de la sphère interne par adjonction au verre d'une couche de métal (chrome ou cuivre) ;
- actuellement, on parvient à sceller une sphère métallique dans le verre (PEREIRA, 1960).

IV. MISE EN PLACE

Nous avons utilisé deux modèles de pyranomètres sphériques à distillation du type Bellani, qui correspondent à deux montages différents :

a) PYRANOMÈTRE BELLANI DE L'OBSERVATOIRE DE DAVOS (SUISSE).

La sphère interne est en verre, recouverte d'une couche de chrome ou de cuivre. Son volume est de 36 ml et contient de l'alcool.

Ce pyranomètre est destiné à être monté sur un support à 160 cm environ au-dessus du sol (fig. 1 a).

b) PYRANOMÈTRE BELLANI FABRIQUÉ PAR BAIRD ET TATLOCK (ANGLETERRE).

La sphère interne est en métal (cuivre) peinte en noir et scellée dans le verre qui constitue le reste de l'appareil. Son volume est de 42 ml et contient de l'eau distillée.

Ce pyranomètre est destiné à être monté au ras du sol, comme indiqué sur la figure 1 b.

V. COMPARAISON DES PYRANOMETRES BELLANI A UNE THERMOPILE DE MOLL (KIPP ET ZONEN)

Cette comparaison pose un problème théorique, car le pyranomètre Bellani est un récepteur sphérique et la thermopile de Moll est un récepteur plan. Le coefficient d'étalonnage K du pyranomètre Bellani, donné par le constructeur (avec un coefficient de variation en fonction de la température ambiante), est le rapport de l'énergie radiative d'origine solaire reçue en moyenne par unité de surface de la sphère interne de l'appareil au volume V de distillat résultant de l'absorption de cette énergie. Ce volume est exprimé par la hauteur h de distillat dans le tube gradué de l'appareil.

La densité de flux de rayonnement solaire global D_B^G reçue en moyenne (car chaque unité de surface de la sphère interne du Bellani ne reçoit pas, en fait, la même densité de flux) par unité de surface réceptrice est donc :

$$D_B^G = K \times h$$

K est donné par le constructeur en cal. cm⁻². cm⁻¹ de hauteur de distillat. Si h est exprimé en cm. j⁻¹, on obtient :

$$D_B^G \text{ en cal. cm}^{-2} \cdot \text{j}^{-1}$$

Le passage de la densité de flux radiatif reçue par unité de surface plane horizontale à celle reçue par unité de surface sphérique n'est pas simple. En attendant de pouvoir disposer d'une théorie complète satisfaisante, nous nous sommes efforcés, au moyen des résultats obtenus, de mettre en évidence les différents facteurs qui rendent ce terme de passage variable d'un jour à l'autre ou d'une période de l'année à l'autre.

Des mesures journalières avec un pyranomètre Bellani (modèle Davos) et un pyranomètre Moll sont effectuées à Adiopodoumé depuis trois ans.

Les moyennes décennales obtenues ont été portées sur la figure 2. La corrélation est bonne et la relation $R_g = f(h)$ d'apparence linéaire.

Ces valeurs décennales contiennent des valeurs journalières très diverses (faibles et fortes). Aussi, dans le but de tester la linéarité de la réponse du Bellani, nous avons regroupé les valeurs h de distillats obtenus par classes ; les moyennes des valeurs h de chaque classe et les moyennes de R_g correspondantes ont été calculées et sont données dans le tableau I.

TABLEAU I

Hauteur de distillat (h en cm.)		Rayonnement solaire corres- pondant (cal. cm ⁻² j ⁻¹)	$\alpha = \frac{R_g}{h}$
Classes	Moyenne des classes		
10,0-14,9	13,3	216	16,2
15,0-19,9	17,9	284	15,9
20,0-24,9	22,7	364	16,0
25,0-29,9	27,3	452	16,5
30,0-34,9	31,8	543	17,1

Ces résultats ont permis de construire la courbe de la figure 3.

On note la bonne linéarité de la réponse du Bellani pour des rayonnements globaux ne dépassant pas 400 cal. cm⁻² j⁻¹ ; pour les valeurs supérieures, la réponse du Bellani devient moins que proportionnelle (K augmente). En supposant K constant, on sous-estime, par exemple, un rayonnement solaire de 550 cal. cm⁻² j⁻¹ d'environ 8 %.

Soit α le coefficient qui permet de passer de la hauteur h de distillat mesurée sur un Bellani au rayonnement global R_g mesuré avec un pyranomètre du type Moll :

$$R_g = \alpha \cdot h$$

Le tableau I et la figure 4 donnent les valeurs de α par classes des valeurs de h. Le coefficient α est à peu près constant pour les valeurs de h comprises entre 10 cm et 25 cm de distillat, mais augmente assez vite pour les valeurs plus importantes de h.

Parmi les raisons à invoquer pour expliquer ce phénomène, on peut citer :

1) L'influence de la température de l'air ambiant. Pour les faibles amplitudes de température enregistrées en Basse-Côte-d'Ivoire, cet effet ne peut expliquer que des variations de l'ordre de 1 % à 2 % ;

2) L'influence de la déclinaison du soleil. La réponse du pyranomètre du type Moll dépend de l'angle zénithal Z du soleil, ce qui n'est pas le cas pour le pyranomètre Bellani. Il faut donc s'attendre à une variation de α en fonction de Z , c'est-à-dire en fonction de la période l'année.

Le tableau II donne les valeurs décadaires de α ainsi que la moyenne mensuelle de ces valeurs

pour les années 1968, 1969 et 1970. Sur la figure 5, on a porté pour chaque mois de l'année la valeur moyenne de α et la valeur moyenne de $\cos(\varphi-\delta)$. Il y a, dans l'ensemble, un bon parallélisme entre les variations de ces deux grandeurs qui explique bien les fluctuations saisonnières de α . Cependant, la concordance n'est pas très bonne pour les mois de mai à septembre qui sont les mois de grande saison des pluies et de petite saison sèche. Ces mois se caractérisent par un ciel nuageux, c'est-à-dire par la faible proportion du rayonnement direct dans le rayonnement global. Il y a donc, vraisemblablement, une influence importante de la valeur du rapport rayonnement direct/rayonnement global sur la valeur de α , qui diminue ce rapport.

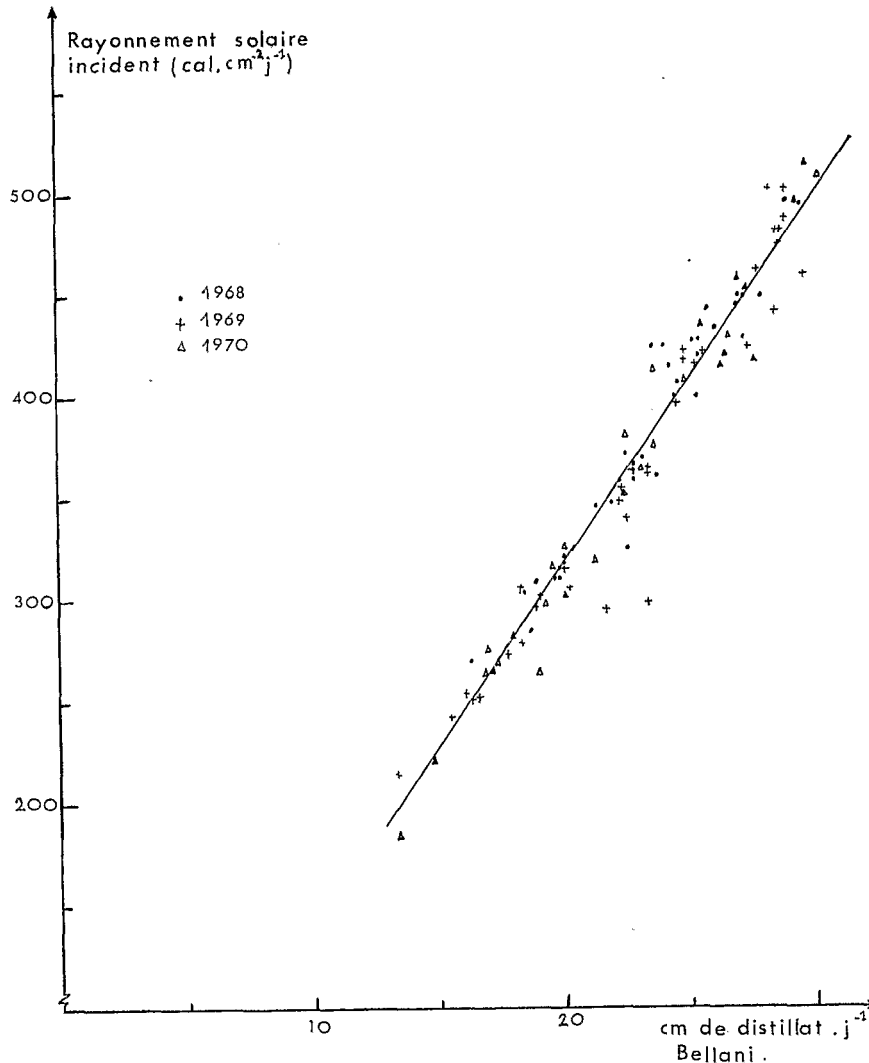


Fig. 2

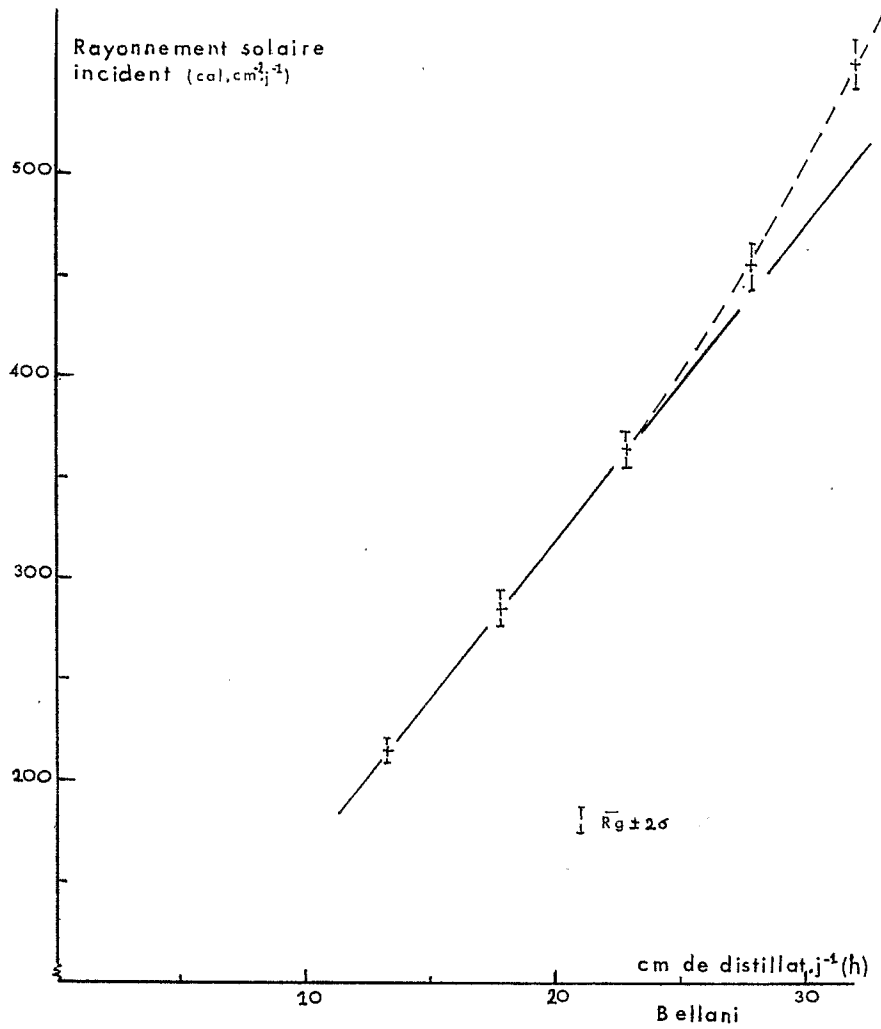


Fig. 3

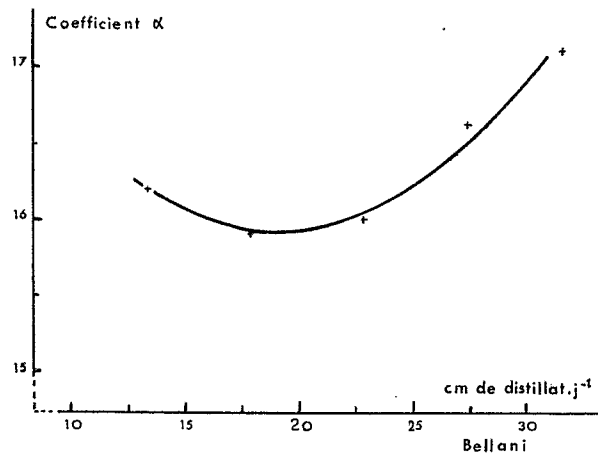
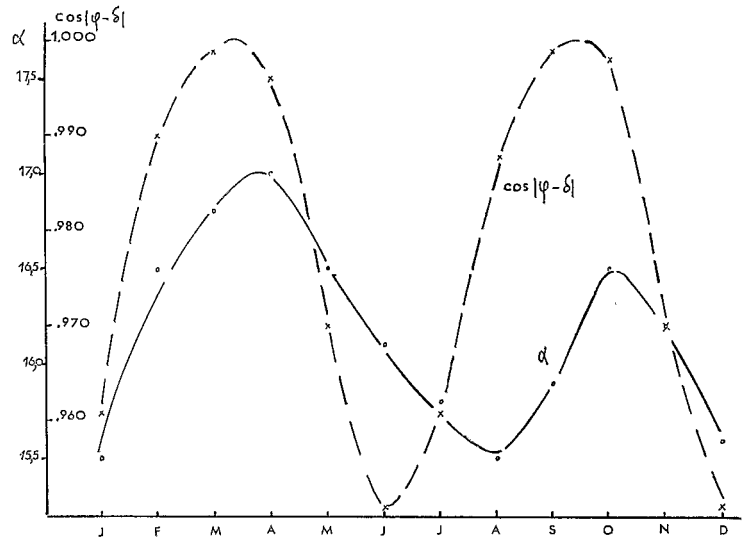


Fig. 4

TABLEAU II
VALEURS DÉCADAIRES ET MENSUELLES
DU COEFFICIENT D'ÉTALONNAGE α (EN CAL. CM⁻². CM⁻¹)

	1 ^{re} décade	2 ^e décade	3 ^e décade	Valeurs mensuelles
Année 1968				
Janvier	14,5	15,8	16,2	15,5
Février	16,1	18,3	16,2	16,9
Mars	16,5	17,0	16,7	16,7
Avril	16,6	17,0	17,1	16,9
Mai	17,1	17,1	16,5	16,9
Juin	16,5	16,4	16,0	16,3
Juillet	15,7	16,0	15,9	15,9
Août	15,7	16,8	15,4	16,0
Septembre	16,3	16,8	16,4	16,5
Octobre	16,7	17,7	16,6	17,0
Novembre	16,7	15,6	15,9	16,1
Décembre	15,9	15,8	15,4	15,7
Année 1969				
Janvier	14,8	16,0	16,1	15,7
Février	16,2	16,7	16,8	16,6
Mars	16,5	16,9	17,1	16,8
Avril	17,4	16,6	17,9	17,3
Mai	16,5	16,9	15,4	16,3
Juin	16,8	15,4	15,5	15,9
Juillet	16,0	15,7	15,9	15,9
Août	15,3	15,9	15,9	15,7
Septembre	16,4	15,9	15,2	15,8
Octobre	15,8	15,6	15,2	15,5
Novembre	15,7	15,6	17,2	16,2
Décembre	15,5	—	—	15,5
Année 1970				
Janvier	15,1	15,7	15,1	15,3
Février	16,0	16,0	15,7	15,9
Mars	16,6	17,0	16,8	16,8
Avril	17,6	16,4	15,9	16,7
Mai	15,2	17,8	16,1	16,4
Juin	16,2	16,0	16,4	16,2
Juillet	15,4	15,6	16,2	15,7
Août	15,6	13,7	15,4	14,7
Septembre	15,0	15,4	15,7	15,4
Octobre	17,2	16,9	—	—
Novembre	—	—	—	—
Décembre	—	—	—	—



= Variation saisonnière du coefficient α en rapport avec la variation annuelle de $\cos|\varphi-\delta|$ =

Nota : Si Z = angle zénithal du soleil, δ = déclinaison du soleil, φ = latitude du lieu ($\approx 5^\circ$ N pour Abidjan), et AH = angle horaire du soleil, on a : $\cos Z = \sin \varphi \cdot \sin \delta + \cos \varphi \cdot \cos \delta \cdot \cos (AH)$

Pour une journée entière la grandeur de $\cos Z$ peut être caractérisée par sa valeur à midi T.S.V. (AH=0) :

On a alors : $\cos Z = \cos (\varphi - \delta) = \cos |\varphi - \delta|$

Gomme : $R^G = R^d + R^D \cos Z$, avec R^d = rayonn^t = Solaire diffus
 R^D = rayonn^t = Solaire direct.
 R^G et par suite

il faut s'attendre à voir varier

$$\alpha = \frac{R^G}{h}, \text{ avec } \cos |\varphi - \delta|$$

Fig. 5

3) L'influence des fortes quantités de distillat h, c'est-à-dire des fortes valeurs de rayonnement global. Quand le volume du liquide contenu dans la sphère interne du Bellani diminue, le passage de la chaleur accumulée par cette sphère par absorption du rayonnement solaire au liquide à évaporer s'effectue plus difficilement (surface d'échange plus réduite). Il faut donc s'attendre, à rayonnement solaire constant, à voir la température d'équilibre de la sphère interne aug-

menter lorsque la quantité du liquide diminue. Par suite, les pertes par rayonnement propre (infra-rouge) de la sphère interne vont augmenter et l'efficacité thermique du Bellani diminuer. On peut ainsi expliquer les fortes valeurs de α obtenues pour les valeurs élevées de h et de Rg.

Les valeurs mensuelles moyennes de α données au tableau III intègrent cette influence, en même temps que les variations saisonnières.

TABLEAU III
VALEURS ET MOYENNES MENSUELLES
DU COEFFICIENT D'ÉTALONNAGE α (EN CAL. CM⁻². CM⁻¹)
(Moyennes sur 3 ans)

	1968	1969	1970	Moyennes
Janvier	15,5	15,7	15,3	15,5
Février	16,9	16,6	15,9	16,5
Mars	16,7	16,8	16,8	16,8
Avril	16,9	17,3	16,7	17,0
Mai	16,9	16,3	16,4	16,5
Juin	16,3	15,9	16,2	16,1
Juillet	15,9	15,9	15,7	15,8
Août	16,0	15,7	14,7	15,5
Septembre	16,5	15,8	15,4	15,9
Octobre	17,0	15,5	17,0	16,5*
Novembre	16,1	16,2	—	16,2*
Décembre	15,7	15,5	—	15,6*
Valeurs annuelles	16,4	16,0	16,0	16,1

* Deux ans.

VI. UTILISATION PRATIQUE DU PYRANOMETRE BELLANI (DAVOS)

A) Mesure du rayonnement global Rg.

Il s'avère qu'en prenant les valeurs moyennes mensuelles de α données au tableau III, on peut prétendre, avec un Bellani installé en Basse-Côte-d'Ivoire, mesurer le rayonnement solaire global quotidien à 5-10 % près.

B) Détermination de l'évapotranspiration. Contrôle des irrigations.

En Basse-Côte-d'Ivoire, le rayonnement solaire global semble être le facteur limitant essentiel de l'évapotranspiration potentielle (ETP) d'une surface engazonnée (*Paspalum notatum*). De fait, nous avons trouvé, pour Adiopodoumé, une corrélation

étroite ($r = 0,94$) entre les valeurs quotidiennes de h et de l'évapotranspiration potentielle obtenue par pesée enregistrée d'un lysimètre (ELDIN, 1968-1969).

On remarque (fig. 6) que cette corrélation est linéaire, sauf pour les fortes valeurs de h . On peut prendre, sans risque de grosse erreur :

$$\text{ETP (Paspalum)} \approx k \times h$$

Le coefficient de proportionnalité k dépend, bien sûr, du pyranomètre Bellani utilisé et de la façon dont il est installé. Pour l'appareil que nous avons testé, nous avons trouvé $k = 0,13$, d'où

$$\text{ETP (Paspalum)} \approx 0,13 \times h$$

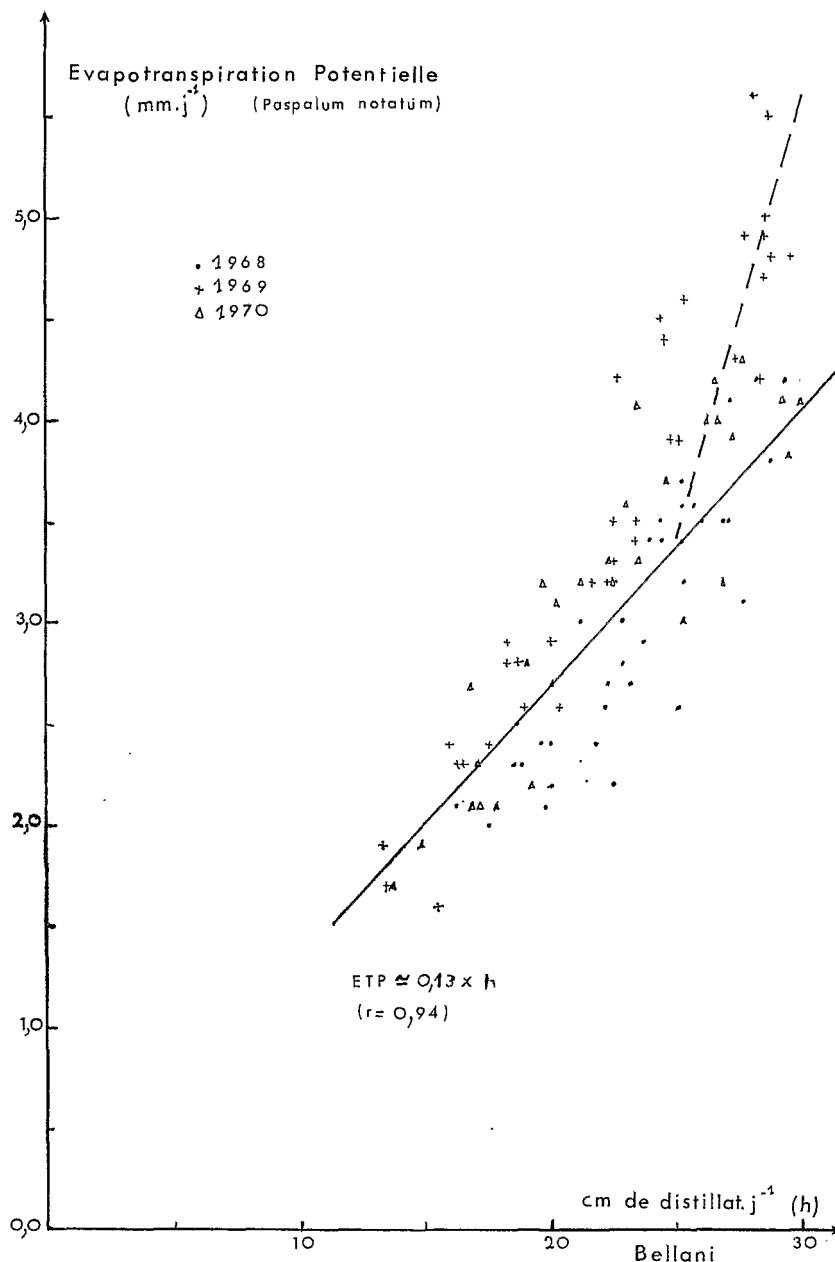


Fig. 6

A partir de cette formule extrêmement simple, on peut obtenir les valeurs quotidiennes de l'évapotranspiration potentielle d'un gazon à partir de la mesure journalière, h , d'un pyranomètre Bellani. Il est alors facile de déterminer les doses et les rythmes d'irrigation à apporter sur une culture pour la maintenir au voisinage d'un régime permanent d'évapotranspiration potentielle, en supposant que l'ETP de la culture considérée est peu différente de celle du *Paspalum notatum*.

L'irriguant note chaque jour la valeur de h et, éventuellement, celle de la pluviométrie, P . Il calcule : $ETP = k \times h$ (où k est la valeur du coefficient de proportionnalité du pyranomètre utilisé).

Le déficit hydrique climatique (D) de la journée est obtenu en faisant : $D = ETP - P$. Cette valeur de D est portée sur un diagramme comme indiqué sur la figure 7 et dans le tableau IV.

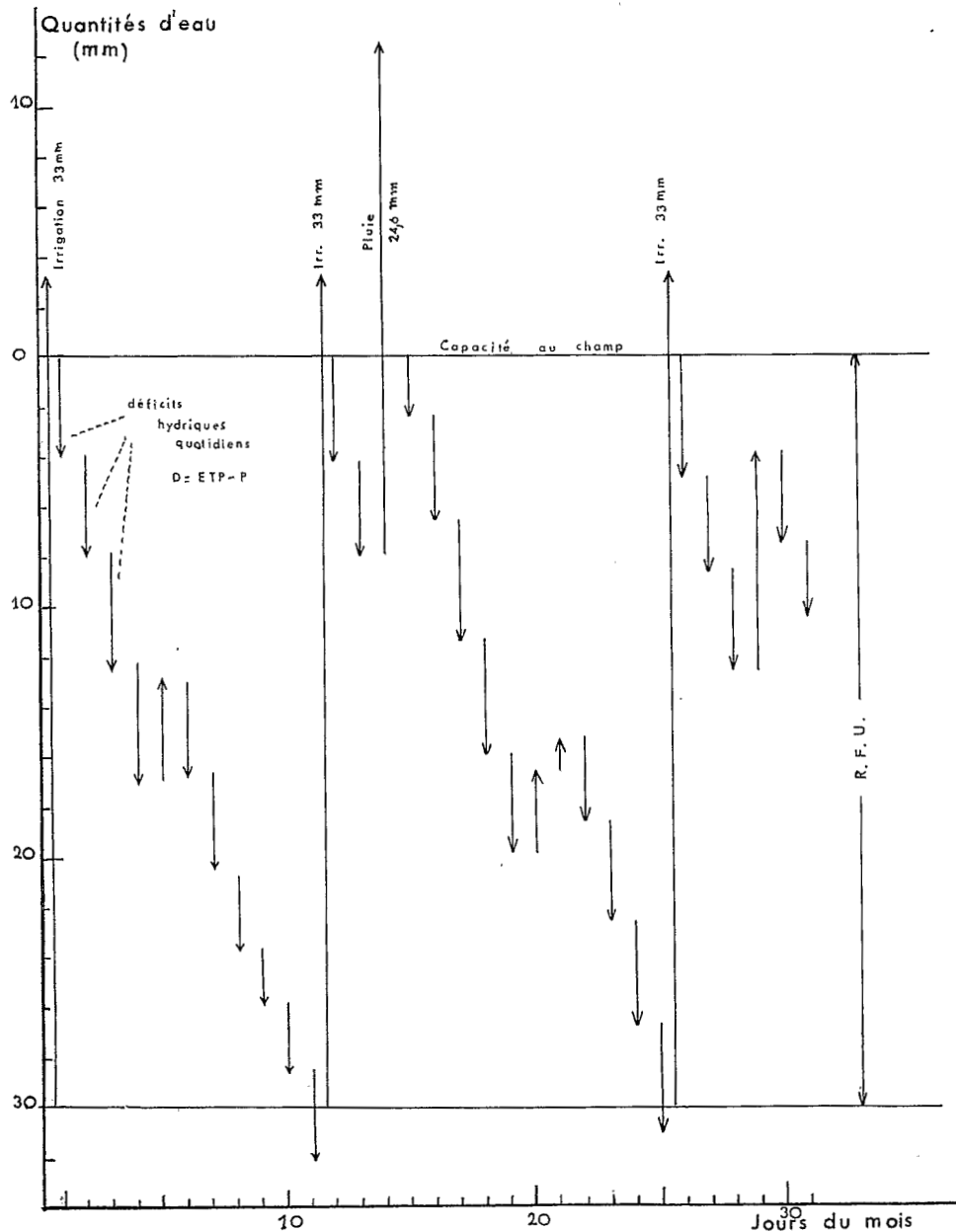


Fig. 7

Jour après jour, ces valeurs de déficit hydrique quotidien se cumulent pour atteindre la réserve en eau du sol, facilement utilisable par la culture.

Cette réserve en eau est à déterminer pour chaque type de sol et de culture considérés (30 mm dans le cas de la figure 7).

TABLEAU IV
CONDUITE DES IRRIGATIONS

Dates	Hauteur en cm	ETP = $0,13 \times H$ en mm	P en mm	D en mm	Σ D en mm
					Irrigation
1	31	4,0	0	4,0	4,0
2	29	3,8	0	3,8	7,8
3	35	4,6	0	4,6	12,4
4	36	4,7	0	4,7	17,1
5	17	2,2	6,3	— 4,1	13,1
6	28	3,6	0	3,6	16,7
7	30	3,9	0	3,9	20,6
8	24	3,1	0	3,1	23,7
9	32	4,2	2,0	2,2	25,9
10	21	2,7	0	2,7	32,1
11	27	3,5	0	3,5	28,6
					Irrigation
12	36	4,6	0	4,6	4,6
13	28	3,6	0	3,6	8,2
14	29	3,8	24,6	— 26,8	-12,6 ← perdue
15	19	2,5	0	2,5	2,5
16	32	4,2	0	4,2	6,7
17	37	4,8	0	4,8	11,5
18	35	4,6	0	4,6	16,1
19	30	3,9	0	3,9	20,0
20	14	1,8	8,2	— 3,4	16,6
21	22	2,9	4,1	— 1,2	15,4
22	26	3,4	0	3,4	18,8
23	31	4,0	0	4,0	22,8
24	31	4,0	0	4,0	26,8
25	33	4,3	0	4,3	31,1
					Irrigation
26	38	4,9	0	4,9	4,9
27	29	3,8	0	3,8	8,7
28	31	4,0	0	4,0	12,7
29	22	2,9	11,6	— 8,7	4,0
30	28	3,6	0	3,6	7,6
31	22	2,9	0	2,9	10,5

On déclenche alors une irrigation dont la dose correspond à la valeur du déficit hydrique cumulé atteint (30 mm environ dans notre cas) majorée de 10 % pour être certain de ramener le sol à la capacité au champ.

Lorsque la capacité au champ est atteinte (réserve en eau intégralement reconstituée), toute l'eau reçue en excédent (pluie très abondante, par exemple) est considérée comme perdue pour la culture (ruissellement et drainage en profondeur).

Il faut noter que les doses et rythmes d'irrigation ainsi déterminés ne s'appliquent qu'à une culture couvrant bien le sol, c'est-à-dire dont les surfaces d'échanges sont suffisantes pour ne pas constituer un facteur limitant l'évapotranspiration [on a alors : ETM (culture) = ETP (culture)].

Si ce n'est pas le cas, l'évapotranspiration maximale ETM (culture) de la culture reste inférieure à l' ETP (culture) et les doses d'irrigation calculées par la méthode précédente sont trop fortes.

VII. CONCLUSIONS

Le pyranomètre du type Bellani apparaît comme un appareil agroclimatologique extrêmement intéressant en zone intertropicale humide. Nous poursuivons son étude pour essayer de calculer les coefficients de correction à lui appliquer pour rendre encore plus précis les résultats qu'il permet d'obtenir.

4.

L'AGRONOMIE TROPICALE

—
Extrait du Vol. XXVII, n° 3
MARS 1972
—

UTILISATION DU PYRANOMÈTRE SPHÉRIQUE A CONDENSATION DU TYPE BELLANI POUR LA MESURE DU RAYONNEMENT GLOBAL ET LA CONDUITE DES IRRIGATIONS EN BASSE-COTE-D'IVOIRE

M. ELDIN
Maître de Recherches en Bioclimatologie
(ORSTOM)

par

B.-A. MONTENY
Chargé de Recherches en Bioclimatologie
(ORSTOM)

11 AOUT 1972
O. R. S. T. O. M.
Collection de Référence
n° 5612 Agr.

Eldin