NOUVELLE INSTALLATION D'ENREGISTREMENT, PRÉCISE ET ÉCONOMIQUE, DE L'ÉVAPOTRANSPIRATION POTENTIELLE

par

M. Eldin

Maître de Recherches en Bioclimatologie (ORSTOM)

AVANT-PROPOS

C'est pour suivre avec précision, heure par heure, les variations de l'évapotranspiration potentielle (ETP) au cours de la journée, pour connaître la quantité d'eau reçue par un sol gazonné du fait des condensations nocturnes (rosée descendante) et, surtout, pour avoir une valeur sûre de l'ETP quotidienne, pouvant servir de référence pour diverses comparaisons, que nous avons mis au point le dispositif de mesure décrit ici. L'installation a été réalisée en 1966 au Centre ORSTOM d'Adiopodoumé près d'Abidjan (Côte-d'Ivoire).

Nous examinerons successivement les points suivants :

I) Situation du problème.
II) Schéma de l'installation.
III) Réalisation pratique du dispositif.
IV) Coût de l'installation.
V) Conduite des mesures.
VI) Conclusions.

La présente note a été rédigée surtout à l'intention des lecteurs intéressés par la réalisation d'un dispositif analogue. C'est la raison pour laquelle nous sommes entrés dans le détail de la description des divers organes de l'installation et que nous avons développé la partie concernant la conduite des mesures qui interviennent pour une part prépondérante dans la qualité des résultats susceptibles d'être obtenus. Cependant, le lecteur qui n'est pas intéressé par ces indications pratiques peut, sans inconvénient, sauter les chapitres III, IV et V.

I) SITUATION DU PROBLEME
RAISONS DU CHOIX DES DIMENSIONS DE L'EVAPOTRANSPIROMETRE

Le but recherché est une mesure précise de l'ETP « climatique » *. Rappelons que l'ETP correspond à la quantité d'eau maximale qu'un sol en végétation est susceptible d'évaporer et de transpirer, quand l'énergie disponible pour la vaporisation au niveau de la surface est le seul facteur limitant de cette évapotranspiration.

Pour qu'il en soit ainsi, il suffit de choisir une végétation homogène, active, recouvrant bien le sol et alimentée en eau de façon optimale. Dès que l'on tend vers ces conditions, l'expérience montre que, très vite, l'énergie disponible pour la vaporisation devient effectivement le seul facteur limitant et que l'on mesure alors une grandeur climatique.

* Bouchet (R.J.). Evapotranspiration réelle, évapotranspiration potentielle et production agricole. *Ann. Agron.*, 1963, 14 (5), 743-824.

Il faut noter, cependant, que la part de l'énergie d'origine atmosphérique qui est disponible pour la vaporisation dépend de la valeur de l'albédo de la surface étudiée. Pour que l'ETP ainsi mesurée soit un paramètre uniquement climatique, il y aurait lieu de définir une surface standard ayant un albédo bien déterminé. En attendant, il est important de préciser avec quelle surface (nature et allure de la végétation de couverture) la mesure est réalisée.

Pour des raisons de commodité, la plante de couverture que nous avons retenue (en zone équatoriale de la Côte-d'Ivoire) est du *Paspalum notatum*. Cette Graminée présente le grand avantage d'assurer une couverture dense et homogène du sol, de bien résister au piétinement et de supporter facilement des coupes fréquentes et rases.

Il s'agit donc de suivre les pertes et les gains en eau d'une surface de sol recouverte de *Paspalum notatum* et placée en conditions climatiques naturelles, sauf en ce qui concerne l'alimentation hydrique qui, nous venons de le voir, doit être assurée en permanence de façon optimale. Pour ce faire, la surface étudiée est celle d'un bac de profondeur suffisante pour que les racines disposent d'un volume assez grand de sol, maintenu à une humidité constamment proche de la capacité au champ, et d'un plan d'eau à une quarantaine de centimètres de la surface dans lequel certaines racines peuvent s'alimenter directement.

D'autre part, on se propose de faire une mesure d'ETP dite « climatique », c'est-à-dire qui soit extrapolable à l'échelle parcelllaire avec une bonne précision et à l'échelle de la petite région (quelques kilomètres carrés) sans risque d'erreur importante. C'est dire que la surface de mesure doit :

1) être assez grande pour que les petites hétérogénéités qui apparaissent malgré tout dans la réalisation de sa couverture ne fassent pas d'elle un échantillon non représentatif de la surface parcellaire ;

2) être incluse dans une surface (« anneau de garde ») constituée et traitée comme elle (même plante et même densité de couverture, même rythme et même hauteur de fauche, même dose et, en principe, même rythme d'irrigation) afin d'éviter la naissance d'échanges latéraux d'énergie par conduction et convection (« effets de bords ») entre ces deux surfaces. La taille que doit avoir l'anneau de garde est fonction de celle de l'évapotranspiromètre, du climat et de l'échelle à laquelle on veut travailler. Comme nous nous proposons de faire une mesure de l'ETP « climatique », il est nécessaire que le rapport de la surface de l'anneau de garde à celle de l'évapotranspiromètre soit relativement grand, 500 paraît être un minimum.

Face à tous ces impératifs, nous avons opté pour un évapotranspiromètre constitué par une cuve parallélépipédique de section horizontale carrée de 60 × 60 × 68 cm. La surface de l'évapotranspiromètre est donc de 3.600 cm^2. Elle est placée au niveau du sol, au centre d'un hectare de prairie artificielle de *Paspalum notatum* qui constitue son anneau de garde (photo 1) *. Le rapport de la surface de l'anneau de garde à la surface étudiée est donc : 10.000/0,36 # 28.000. Pour la mesure que nous voulons faire, il n'est pas indispensable, surtout sous climat équatorial humide, d'avoir un rapport aussi important et la surface de mesure gagnerait à être plus grande.

Mais compte tenu, d'une part, des moyens limités dont nous disposions et de notre désir de réaliser un dispositif peu coûteux, et, d'autre part, du fait que *Paspalum notatum* bien arrosé et bien taillé permet d'obtenir une couverture remarquablement homogène, même sur une aussi petite surface, nous avons conservé ces dimensions de 60 × 60 × 68 cm. Les 68 cm en hauteur sont utilisés de la façon suivante (pl. 1, fig. I) : 8 cm servent de garde au-dessus du sol pour éviter des échanges d'eau par ruissellement entre la surface de mesure et son environnement ; 40 cm de sol identique à celui que l'on trouve autour de l'évapotranspiromètre sont remis dans la cuve en respectant le plus possible le profil et la densité du sol en place. Les 20 derniers centimètres sont constitués, de bas en haut, par des cailloux, du gravier et du sable destinés à faciliter le drainage.

Un tuyau de drainage est disposé sur l'un des côtés de la cuve. Il est coudé de telle sorte que le drainage ne se produise que lorsque le plan d'eau au fond de la cuve atteint une hauteur correspondant au point haut du tuyau coudé. Cette hauteur est d'environ 20 cm au-dessus du fond de cuve et se situe à la base des 40 cm de sol en place. Une éprouvette graduée de 1 litre, en plastique, recueille l'eau de drainage.

Le problème étant de suivre les gains et les pertes en eau d'une telle cuve, la méthode pondérale nous est apparue comme l'une des plus simples utilisables. En effet, les pertes de poids de la cuve sont le fait de l'évaporation et du drainage. Ses gains de poids sont le fait de la pluie, de la rosée dite

* Voir en fin d'article les huit photographies et les quatre planches (fig. I à XII).

« descendante », visible ou occulte, des irrigations et de l'augmentation de poids sec des végétaux poussant sur la surface étudiée. Les transferts d'eau entre sol et plantes qui, avec l'évapotranspiration, sont responsables des variations de matière végétale fraîche, ne se traduisent par aucune variation de poids du système. La production de matière sèche de *Paspalum notatum* sur la surface de la cuve (0,36 m^2) est en moyenne de 3 à 4 g par jour, pendant que les pertes en eau par évapotranspiration atteignent en moyenne 1.400 à 1.500 g/jour. C'est dire que l'erreur faite en ne tenant pas compte de la production de matière sèche est parfaitement négligeable.

Par ailleurs, l'éprouvette graduée dans laquelle est recueillie l'eau de drainage est fixée directement sur la cuve (pl. 1, fig. I), en sorte que le passage de l'eau de drainage de la cuve dans l'éprouvette ne se traduit par aucune variation de poids du système cuve-éprouvette.

Nous avons donc :

en régime de condensation : le gain de poids du système est égal au montant des condensations ;

en régime d'évapotranspiration : la perte de poids du système est égal à la valeur de l'ETP ;

en régime de pluie, c'est-à-dire quand il pleut de façon continue : on peut considérer les condensations et l'évapotranspiration comme nulles. Le gain de poids dû à la pluie est enregistré et le dispositif fonctionne alors comme un pluviomètre très précis.

La pesée continue enregistrée du système cuve-éprouvette de drainage résoud donc bien le problème posé. Les dimensions données à notre évapotranspiromètre sont telles que son poids moyen est de l'ordre de 480 kg. Nous n'avons pas trouvé dans le commerce une bascule enregistreuse qui ait à la fois une charge d'environ 500 kg et une grande sensibilité. Nous avons donc fait appel à un système de contrepoids et choisi la bascule TESTUT, type 9099, capable d'enregistrer les variations de poids d'une charge maximale de 200 kg à 2 g près (phot. 7).

II) SCHEMA DE L'INSTALLATION

L'évapotranspiromètre E repose, par deux couteaux C_1 et C_2, sur le fléau du contrepoids (pl. 1, fig. II et III). Ce fléau F repose lui-même sur un couteau C_3 porté par un pilier en béton P. A l'autre extrémité du fléau F est suspendu un contrepoids CP, par l'intermédiaire d'un étrier et d'un couteau C_4. Ce contrepoids CP est posé sur le plateau de la bascule B qui enregistre ses variations de poids apparent. Un socle en béton S sert de butée et permet de poser la cuve lorsqu'on veut la désolidariser du fléau F (réparation, réglages, etc.).

L'équilibre des forces s'établit ainsi (pl. 1, fig. IV) : l et L étant les longueurs des bras de levier du système de contrepoids, le poids P de la cuve exerce à l'autre extrémité du fléau une force f telle que :

$$P \times l = L \times f \qquad \text{soit } f = \frac{Pl}{L}$$

Le contrepoids CP, de poids propre $F > f$, utilise une fraction de F pour équilibrer la force f. La résultante de ces deux forces $p = F - f$ est le poids apparent du contrepoids sur le plateau de la bascule. Dans notre montage, nous avons :

$$P \# 480 \text{ kg}, \quad \frac{l}{L} \# 1/3, \quad f \# 160 \text{ kg}$$

$$F \# 200 \text{ kg}, \quad p = F - f \# 40 \text{ kg}$$

La bascule travaille donc loin de sa charge maximale (200 kg). On a : $p = F - f = F - \frac{Pl}{L}$.

F, l et L étant des constantes du montage, toute variation de poids ΔP de P se traduit, sur le plateau de la bascule, par une variation Δp de p telle que : $\Delta p = - \frac{l}{L} \Delta P$.

Ce résultat appelle deux remarques :

les pertes de poids de la cuve ($\Delta P < 0$) se traduisent par une variation positive de Δp. L'évapotranspiration s'inscrit donc positivement sur le diagramme de la bascule ;

la sensibilité σ du dispositif est égale à la sensibilité propre s de la bascule, multipliée par $\frac{L}{l}$:

$$\sigma = \frac{L}{l} s \# 3 s$$

On peut choisir sur la bascule plusieurs sensibilités comprises entre 2 g et 24 g/mm de diagramme. Le plus souvent, nous utilisons la sensibilité s = 6 g/mm qui donne : $\sigma \# 18$ g/mm. Pour des études plus fines, on peut utiliser s = 2 g/mm, qui donne : $\sigma \# 6$ g/mm.

III) REALISATION PRATIQUE DU DISPOSITIF

A) L'ABRI SOUTERRAIN

La figure V (vue de dessus), la figure VI (coupe verticale transversale) et la figure II (coupe verticale longitudinale) donnent la forme et les dimensions de l'abri. Les murs sont construits en parpaings de 15 cm de large, sur une dalle D_1 en béton armé de 10 cm d'épaisseur. Une autre dalle D_2 analogue forme le toit de l'abri, sauf dans la partie qui se trouve juste au-dessus du fléau du contrepoids ; celle-ci, plus haute que le reste du toit, ne supporte qu'une dizaine de centimètres de sol. Elle est constituée par une dalle D_3 en béton armé de 5 cm d'épaisseur (phot. 2). Le socle S et le pilier P sont en béton. Un trou d'homme, pouvant se fermer par un couvercle amovible, permet de descendre dans l'abri (fig. V et phot. 2). Une cheminée, réalisée en tôle de fer de 2 mm d'épaisseur, permet le passage de la partie supérieure de la cuve. Les dimensions de cette cheminée sont telles qu'un jour de 2 cm est ménagé entre ses parois verticales et celles de la cuve. Des rebords r, soudés à angle droit à la base de la cheminée, permettent à celle-ci de reposer sur la dalle D_3 (fig. II, V et VI). Un chapeau amovible h, dont les bords forment un angle de 45° avec les parois de la cuve, vient s'appuyer sur les bords supérieurs de cette dernière, empêchant la pluie de pénétrer dans l'abri (fig. VI).

On pouvait craindre que cet abri ne perturbe les échanges thermiques de la cuve. On verra plus loin que ceux-ci ne sont guère modifiés par rapport aux conditions normales.

B) LA CUVE

C'est un parallélépipède rectangle de 60 × 60 × 68 cm réalisé en tôles de fer de 3 mm d'épaisseur, soudées à l'arc électrique. Les côtés sur lesquels sont soudés les supports de couteaux sont renforcés par une plaque en fer de 15 × 53 cm et de 5 mm d'épaisseur (phot. 5). Les figures VII et VIII donnent la forme et les dimensions des supports de couteaux. Ces derniers sont soudés sur les plaques de renfort de la cuve.

Deux tuyaux de vidange munis de robinets ont été prévus de part et d'autre de la cuve. Un robinet R_1, situé tout à fait à la base de celle-ci, permet une vidange complète (phot. 5). Il reste toujours fermé pendant les mesures d'ETP. L'autre robinet R_2, prolongé par un tuyau coudé dont la hauteur du coude détermine celle du plan d'eau dans la cuve, reste toujours ouvert au cours des mesures (fig. X).

La cuve, ainsi que le fléau du contrepoids, a été protégée contre l'oxydation par une galvanisation à chaud (projection de zinc fondu au pistolet, après sablage des surfaces à traiter).

C) LE DISPOSITIF DE CONTRE-POIDS

Le schéma du dispositif est donné par la figure II. Le fléau du contrepoids, dont la forme et les dimensions se lisent sur la figure III, est réalisé en fer en U de 80 mm. Les parties AB, CD, BD et les renforts BE et DE sont constitués d'un simple fer à U sur champ (vue de face de la figure VII et photos 4 et 5). Le grand bras PG est réalisé par deux fers en U, soudés l'un à l'autre, bords à bords (phot. 6).

Tous les couteaux (C_1, C_2, C_3 et C_4) sont constitués par des lingots parallélépipédiques de section carrée (1 cm de côté) en acier ultra-rapide. Ces couteaux reposent sur le fléau du contrepoids par l'intermédiaire de petites plaques en acier sur lesquelles une gorge en forme de V ouvert à 140° a été taillée pour recevoir l'arête du couteau correspondant (phot. 4).

La forme et les dimensions des supports de couteaux sont données par les figures de la planche III et par les photos 4, 5 et 6. Les supports des couteaux C_1, C_2 et C_3 sont réalisés en plaque de fer de 10 mm d'épaisseur. Le couteau C_3 supporte l'ensemble du dispositif. Son support est soudé sur une plaque de fer de 10 mm d'épaisseur, elle-même portée par quatre goujons scellés dans le béton du pilier P et serrée entre quatre écrous et quatre contre-écrous (fig. VIII et phot. 5). Les trous de cette plaque sont ovalisés, si bien que ce dispositif permet de régler l'orientation et la hauteur du fléau F et l'horizontalité du couteau C_3. Le couteau C_4 supporte le contrepoids CP. Il est monté dans un étrier dont la forme et les dimensions sont données par la figure IX et la photo 6. Les parties A et B de cet étrier sont constituées de deux tranches d'acier STUB de 50 mm de diamètre et 30 mm d'épaisseur. La partie C est réalisée en acier STUB de 20 mm de diamètre, coudé à chaud en forme de U et dont les deux extrémités sont soudées sur les parties A et B. Ces dernières sont percées en leur centre de deux trous de 14,1 mm de diamètre, dans lesquelles le couteau C_4 est introduit en force de telle sorte que l'un des plans diamétral du couteau soit dans le plan du U de la partie C.

Le contrepoids CP est constitué par des blocs de plomb posés sur une plaque de fer rectangulaire munie à ses quatre coins d'œillets dans lesquels passent des câbles en acier inoxydable servant à la suspendre à l'étrier (phot. 7). Ces câbles sont équipés de tendeurs permettant de régler leur tension de telle sorte que la plaque de fer porte bien à plat sur le plateau de la bascule enregistreuse.

D) LA BASCULE

Sa forme et ses dimensions apparaissent sur les figures II et V ainsi que sur la photo 7. Il s'agit d'une bascule enregistreuse TESTUT T. 9099 dont les caractéristiques sont les suivantes :

charge maximale : 200 kg ;
sensibilité : s = 2, 6, 12, 18 ou 24 g/mm de diagramme ;
tablier de 600 × 450 mm ;
enregistrement sur cylindre de 300 mm de hauteur et 240 mm de circonférence.

Les variations de masse sont inscrites dans le sens de la hauteur et les temps dans le sens horizontal. La vitesse du moteur d'entraînement du cylindre enregistreur est de 1 tour en 24 heures. Cinq jeux de pignons permettent d'obtenir, à partir de cette vitesse du moteur, 9 vitesses de rotation du cylindre enregistreur comprises entre 1 tour en 1/5 de jour et 1 tour en 5 jours. Nous avons choisi une vitesse de 1 tour en 12 heures.

« Le servo-moteur est sollicité par le signal provenant du système de détection de l'équilibre constitué d'une cellule photorésistante et de sa lampe entre lesquelles se déplace le drapeau détecteur d'équilibre placé sur le fléau. Celui-ci est maintenu en oscillation constante de part et d'autre de sa position d'équilibre statique. Dans ces conditions on obtient une sensibilité accrue, la position d'équilibre statique du fléau, dans la définition duquel interviennent des forces de frottement, étant remplacée par une position d'équilibre dynamique dans lequel les forces de frottement sont constamment compensées par l'apport d'énergie auxiliaire du servo-moteur. »

Nous avons adjoint à cette bascule un dispositif d'asservissement électrique opérant automatiquement une translation des courbes enregistrées lorsque le style inscripteur arrive en fin de course, en haut ou en bas du diagramme. Ce dispositif, dont la figure XII donne le schéma, est décrit plus loin au chapitre V, paragraphe B.

E) LE SYSTEME DE DRAINAGE

Le schéma du système de drainage est donné par la figure X et son fonctionnement est décrit au chapitre V, paragraphe C. Le tuyau coudé est en cuivre et son diamètre intérieur est de 12 mm. L'éprouvette graduée de 1 litre et les tuyaux du siphon sont en matière plastique.

F) LE DESSICCATEUR D'AIR

Pour la bonne conservation de la bascule enregistreuse, on a installé dans l'abri souterrain un dessiccateur d'air qui maintient l'air de l'abri à une humidité relative voisine de 60 %. Un ventilateur fait circuler l'air de l'abri d'abord sur la source froide de l'appareil où il perd son humidité par condensation, puis sur la source chaude. C'est donc une ambiance d'air chaud et sec qui est entretenue dans

l'abri. Le compresseur du dessiccateur, qui chauffe beaucoup en fonctionnement, a été placé dans une cheminée contiguë à l'abri et séparée de celui-ci par une double cloison de polystyrène expansé (fig. XI et phot. 2 et 7). Malgré cette précaution, la température de l'air de l'abri atteint 33° C, ce qui est gênant, car cet air chaud vient chauffer toute la partie inférieure de la cuve et constitue pour cette dernière une source d'énergie parasite, susceptible de fausser par excès les mesures d'ETP.

Cet inconvénient a été presque entièrement pallié en disposant une cloison en bois qui sépare l'abri souterrain en deux parties : une partie contenant le dessiccateur d'air et la bascule, l'autre, non climatisée, contenant la cuve (fig. V). Une porte permet de passer d'un compartiment à l'autre. On ne l'ouvre qu'un bref instant chaque jour pour aller relever le drainage.

Ces précautions prises, la température de l'air du compartiment non climatisé reste à peu près stable au voisinage de 29° C. La température du sol environnant l'évapotranspiromètre, à 30 cm de profondeur, sous *Paspalum*, varie au cours de l'année entre 27° C et 31° C. C'est dire qu'à aucun moment les conditions de température autour de la cuve ne s'éloignent beaucoup des conditions naturelles de température du sol à 30 cm (profondeur moyenne du bac).

Enfin, pour qu'un gradient de température naturel puisse s'établir dans le bac, les parois de ce dernier sont recouvertes de plaques de polystyrène expansé de 20 mm d'épaisseur.

Des mesures de température réalisées avec des thermocouples enterrés à 1 et 10 cm de profondeur, au milieu, sur les bords et à l'extérieur de la cuve (à 3 m de celle-ci), n'ont pas fait apparaître, pour l'une ou l'autre profondeur, de différence significative entre les trois verticales étudiées. On peut donc admettre que les échanges thermiques par conduction entre le sol et sa surface sont peu différents sur l'évapotranspiromètre et sur l'anneau de garde. La mesure n'est donc pas faussée, comme on aurait pu le craindre, par des échanges de chaleur anormaux.

IV) COUT DE L'INSTALLATION

L'installation a été réalisée en 1966 au Centre ORSTOM d'Adiopodoumé, près d'Abidjan. Les prix donnés ici sont donc ceux pratiqués en 1966, en Côte-d'Ivoire. Hormis la bascule et le dessiccateur d'air, l'ensemble du dispositif a été réalisé par les ateliers du centre et par l'équipe de maçonnerie.

	(F CFA)
ABRI : parpaings, ciment, béton, main-d'œuvre	80.000
CUVE et CONTREPOIDS : fer, acier, galvanisation, main-d'œuvre	30.000
BASCULE ENREGISTREUSE, rendue à Abidjan	325.000
DESSICCATEUR	45.000
Total	480.000

Il est clair qu'en France la réalisation d'une installation semblable coûterait plus cher en main-d'œuvre et moins cher en matériel, si bien qu'on peut estimer son prix de revient aux environs de 9.000 F français (1966).

V) CONDUITE DES MESURES

Le cycle adopté est journalier. Il commence à 7 h. 30 le matin et se termine à 7 h. 30 le lendemain matin.

A) IRRIGATIONS

L'arrosage de la surface de mesure s'effectue tous les jours à 18 heures (sauf s'il y a eu dans la journée une pluie importante $\geqslant$ 4 mm). Suivant l'époque de l'année, on apporte, à l'éprouvette, 1.500 à 2.500 cm^3 d'eau sur les 3.600 cm^2 de la surface. L'irrigation de l'anneau de garde se fait à la rampe oscillante, à une dose à peu près égale à celle apportée sur l'évapotranspiromètre. Cette irrigation se fait de nuit, entre 20 heures et 23 heures, qui est une période de la journée où l'on n'observe généralement ni évapotranspiration ni condensation importantes.

La surface de l'évapotranspiromètre est protégée de l'eau, pendant la durée de l'irrigation de l'anneau de garde, par une petite tente en film plastique. Pour des raisons d'ordre pratique, il n'est pas possible d'effectuer cette irrigation chaque nuit (mise en œuvre et déplacements de la rampe oscillante). En saison sèche, elle a lieu deux nuits par semaine. Nous ne pensons pas introduire d'erreur importante en procédant de cette façon, car des comparaisons sur *Paspalum*, entre ETP et ETR, nous ont montré que, même en saison sèche, l'ETR ne décrochait pratiquement pas de l'ETP pendant les quatre premiers jours suivants un arrosage important.

B) PLUIES

Le début, la durée, la vitesse et le montant des pluies sont enregistrés sur le diagramme de la bascule. A titre de contrôle, les pluies sont également recueillies dans quatre pluviomètres Association répartis autour de la surface de mesure, à 4 m de celle-ci. Ils sont légèrement enterrés dans le sol, de telle sorte que les bagues des pluviomètres soient à 25 cm au-dessus du sol. Elles dépassent donc toujours le haut de la strate de *Paspalum*, tout en étant le plus bas possible pour limiter au maximum les remous d'air sur les pluviomètres. Le *Paspalum* assure une couverture suffisamment dense pour qu'il n'y ait aucune projection de particules de sol dans les pluviomètres, même par pluies très violentes.

Il arrive, en particulier lorsque le style enregistreur de la bascule est au bas du diagramme (qui est sa position normale de départ lorsqu'on pose un diagramme vierge), qu'une pluie importante fasse descendre le style à sa position la plus basse et qu'il soit ainsi bloqué en fin de course jusqu'à ce que, par le jeu du drainage et de l'évapotranspiration, la perte de poids du système pesé soit suffisante pour qu'il se remette à inscrire l'évapotranspiration. Pour pallier cet inconvénient, nous avons adjoint à la bascule le dispositif suivant (pl. 4, fig. XII) :

Le support du style enregistreur vient, en fin de course vers le bas, fermer un contact électrique qui provoque la mise en marche d'un moteur. Par l'intermédiaire d'un fil et d'une poulie, ce moteur dépose un à un des poids de 1 kg sur le plateau de la bascule jusqu'à ce que le style enregistreur remonte. Le contact s'ouvre alors et le moteur s'arrête. En fin de course vers le haut (ETP ou drainage plus important que prévu), un autre contact commande la rotation du moteur en sens contraire (inversion de phase). Les poids de 1 kg sont alors soulevés et retranchés un à un du contrepoids jusqu'à ce que le style enregistreur redescende. Grâce à ce dispositif, le style enregistreur ne reste jamais bloqué en fin de course, ni vers le haut ni vers le bas, et l'enregistrement des variations de poids du système n'est jamais interrompu plus de quelques secondes.

C) DRAINAGE

L'arrosage de la surface de l'évapotranspiromètre ayant lieu à 18 heures, le drainage s'opère pendant la nuit. Il est toujours terminé à 7 h. 30 (sauf pluie nocturne) et comme l'évapotranspiration est très faible, nulle ou le plus souvent négative pendant la nuit, on a le matin, à 7 h. 30, des conditions relativement bien définies : drainage terminé, sol à la capacité au champ, plan d'eau à sa hauteur maximale. Il est donc possible d'effectuer par bilan hydrique une mesure de l'ETP quotidienne, qu'il est intéressant de comparer aux résultats obtenus par pesée.

Le drainage est recueilli dans une éprouvette graduée de 1 litre, solidaire de la cuve, et ne provoque donc pas de variation de poids du système. La valeur de ce drainage est lue tous les matins, à 7 h. 30, sur l'éprouvette. Cette dernière est ensuite vidée et le poids de l'eau drainée s'inscrit sur le diagramme de la bascule.

En cas de fortes pluies, il peut se produire au cours de la journée un drainage supérieur à la contenance de l'éprouvette. Aussi, celle-ci est-elle munie d'un siphon qui s'amorce lorsque le volume d'eau drainée atteint 800 cm^3 (pl. 4, fig. X). L'éprouvette se vide alors d'un seul coup et le système cuve-éprouvette perd 800 g brutalement (en 30 secondes environ). Sur le diagramme, cette perte de poids se traduit par un déplacement quasi vertical du style enregistreur, d'une longueur correspondant à une variation de poids de 800 g et qu'il est donc très facile d'interpréter.

Le début, la fin, le volume et la vitesse du drainage peuvent être enregistrés en intercalant l'auget basculeur d'un pluviographe entre l'extrémité du tuyau de drainage de la cuve et l'entonnoir surmontant l'éprouvette (pl. 4, fig. X). Nous avons utilisé l'auget basculeur et le système d'enregistrement d'un pluviographe RICHARD NG. 5650, après avoir lesté l'auget basculeur de façon à ce qu'il bascule pour un volume d'eau recueillie de 10 cm^3 (au lieu de 20 cm^3 à l'origine). Il est, en effet, nécessaire que le retrait d'eau opéré par l'auget au détriment du système pesé et son brusque retour

au moment du basculement de l'auget correspondent à une variation de poids suffisamment faible pour passer inaperçue sur le diagramme d'enregistrement de la bascule, et pour obtenir une bonne précision sur l'heure et la vitesse du drainage. Nous n'avons pas réussi à obtenir un basculement régulier de l'auget pour un poids d'eau recueilli de 5 g qui serait préférable à 10 g.

D) FAUCHE

La fauche de la prairie-anneau de garde est pratiquée au girobroyeur, en même temps que la taille à la cisaille à gazon sur l'évapotranspiromètre, chaque fois que le *Paspalum* atteint à peu près 20 cm de haut. Taille et fauche ramènent la hauteur du gazon à environ 10 cm.

E) AMENDEMENTS

L'anneau de garde reçoit les apports d'engrais minéraux suivants :

deux fois par an, en avril et septembre : 400 kg/ha d'engrais complet (12.12.17 ou 10.8.18) ;

deux fois par an, en juillet et novembre : 250 kg/ha de sulfate d'ammoniaque.

L'évapotranspiromètre reçoit, aux mêmes périodes, des doses d'engrais deux fois plus faibles, car l'eau de drainage étant utilisée en priorité pour l'arrosage quotidien de la surface de mesure, il n'y a pas de pertes d'éléments minéraux par lessivage, comme cela se produit sur l'anneau de garde.

F) DEPOUILLEMENT DES RESULTATS

Une fois par trimestre, à un moment de la journée où les variations naturelles du poids de la cuve sont très faibles (19 ou 20 heures, par exemple), un poids de 5 kg est déposé sur la cuve et le déplacement correspondant du style enregistreur de la bascule est mesuré. Cette opération permet de déterminer avec précision la sensibilité σ du dispositif, c'est-à-dire de connaître à quelle variation de poids de l'évapotranspiromètre correspond un déplacement d'un millimètre du style enregistreur sur le diagramme de la bascule. L'objet de cette mesure est aussi de vérifier que cette sensibilité n'a pas varié d'une fois à l'autre.

Rappelons ici que :

$$\sigma = \frac{L}{l} s \text{ avec } s = \text{sensibilité propre de la bascule}$$

et que, dans notre montage, nous avons :

$$s = 6 \text{ g/mm}, \quad \frac{L}{l} \# 3, \quad \sigma \# 18 \text{ g/mm}$$

La hauteur disponible du diagramme enregistreur étant de 300 mm, l'amplitude des variations de poids enregistrable en utilisant toute la hauteur du diagramme est donc de : $300 \times 18 = 5.400$ g.

C'est pourquoi, lors de la détermination exacte de σ, nous déposons un poids de 5 kg sur la cuve afin d'utiliser au mieux la hauteur du diagramme et d'obtenir une bonne précision sur la valeur de σ. Sachant qu'un apport ou un départ d'eau correspondant à une hauteur de 1 mm sur la surface de la cuve se traduit par une variation de 360 g du poids de celle-ci, il est facile d'exprimer σ en millimètres de hauteur d'eau reçue ou perdue par la surface de la cuve pour un déplacement de 1 mm du style enregistreur :

$$\sigma \# \frac{18}{360} = \frac{5}{100} \text{ mm eau/mm diagramme}$$

Comme on peut facilement apprécier l'amplitude du déplacement du style enregistreur au millimètre près, les mesures effectuées sont exactes à 5/100 près, en hauteur d'eau sur la cuve.

Avec $s = 2$ g/mm, on peut obtenir : $\sigma \# \frac{1,7}{100}$ mm eau/mm diagramme.

Ainsi, avec $\sigma \# 18$ g/mm, l'examen et le dépouillement du diagramme enregistreur permettent :

1) De connaître le montant de l'ETP à 5/100 mm près sur une période quelconque. Il est évident que plus la période est courte, plus la précision est mauvaise. Au milieu de la journée, en période de forte évapotranspiration, on peut mesurer l'ETP, quart d'heure par quart d'heure, à environ 20 % près, et heure par heure à environ 5 % près. Les valeurs quotidiennes d'ETP, même pour des journées à faible évapotranspiration, sont toujours obtenues à mieux que 2 % près.

2) De calculer la vitesse de l'ETP. La pente de la tangente à la courbe enregistrée en un point de celle-ci donne, en effet, une bonne approximation de la vitesse de l'ETP à l'instant correspondant au point considéré. En particulier, par journée ordinaire, sans pluie, l'évapotranspirogramme a l'allure d'une sigmoïde, dont il est assez facile de déterminer le point d'inflexion pour obtenir la plus grande vitesse d'évapotranspiration atteinte dans la journée.

3) De déterminer le montant, l'heure et la durée des apports d'eau par pluie ou par condensation de vapeur d'eau.

IV) CONCLUSIONS

Le dispositif et la méthode que nous venons de décrire permettent de connaître à 5/100 mm près, ou si on le désire à 2/100 mm près, les hauteurs d'eau perdues ou reçues par une surface de sol en végétation, en régime d'ETP. La sensibilité de l'installation est suffisante pour que l'on puisse suivre heure par heure, avec une bonne précision, l'évolution de l'ETP au cours de la journée, et que l'on puisse évaluer correctement le montant de la rosée descendante déposée au cours de la nuit. Les résultats ainsi obtenus constituent une base sérieuse pour :

la comparaison avec d'autres méthodes de mesure de l'ETP (par bilan hydrique, par exemple) ;

la comparaison avec les valeurs d'ETP calculées par diverses formules climatiques ;

la comparaison ETP/ETR ;

les études de corrélation entre ETP et les divers facteurs de climat pris isolément ou par groupes.

Nous avons entrepris l'étude de ces diverses comparaisons, depuis 1964, à partir des mesures d'ETP obtenues par bilan hydrique sur une batterie de huit évapotranspiromètres et, depuis un an, à partir des mesures d'ETP obtenues par le dispositif de pesée décrit ici. Une deuxième note, en cours de rédaction, fera la synthèse des résultats obtenus.

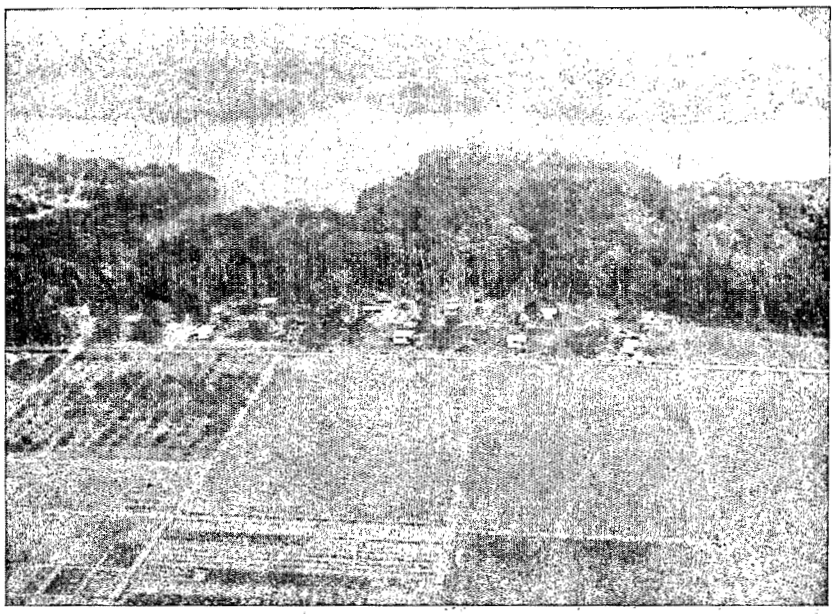


Photo 1. Vue aérienne de la parcelle affectée à la section de Bioclimatologie : moitié inférieure (100 × 100 m) du rectangle de prairie dans lequel on aperçoit le parc météorologique. Dans le bas de la parcelle, on distingue la rampe d'irrigation barrant la parcelle dans le sens de la largeur. L'évapotranspiromètre pesé est installé à peu près au milieu de la parcele, à mi-distance entre le parc météorologique et la rampe.

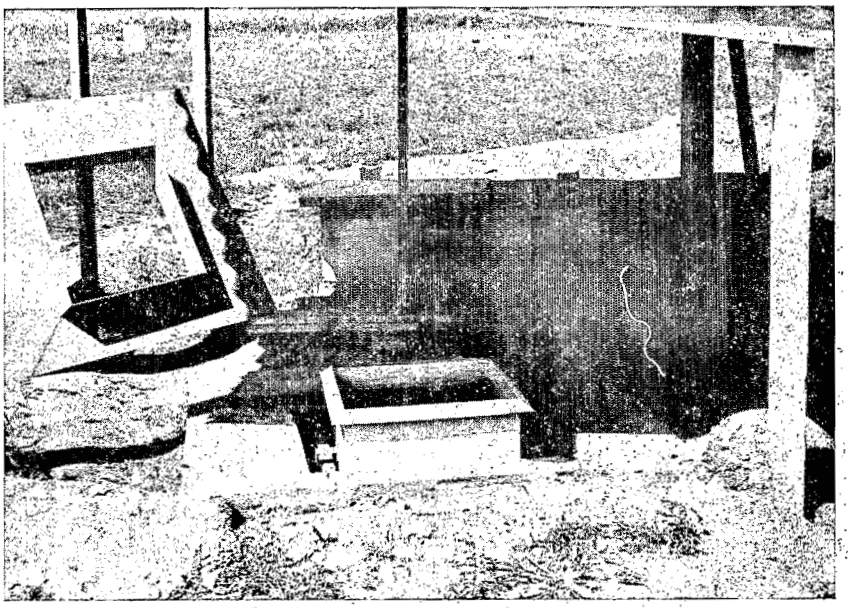


Photo 2. Vue de l'installation pendant les travaux. Au centre, la cuve et son chapeau. De part et d'autre, on distingue les supports des couteaux C_1 et C_2 et une partie du fléau du contre-poids. La cheminée métallique, debout sur la gauche de la photo, n'est pas encore en place sur la dalle D_3, dont on voit bien la forme. Au fond à droite, le trou d'homme fermé par son couvercle et, sur sa gauche, la cheminée d'aération du compresseur du dessiccateur d'air.

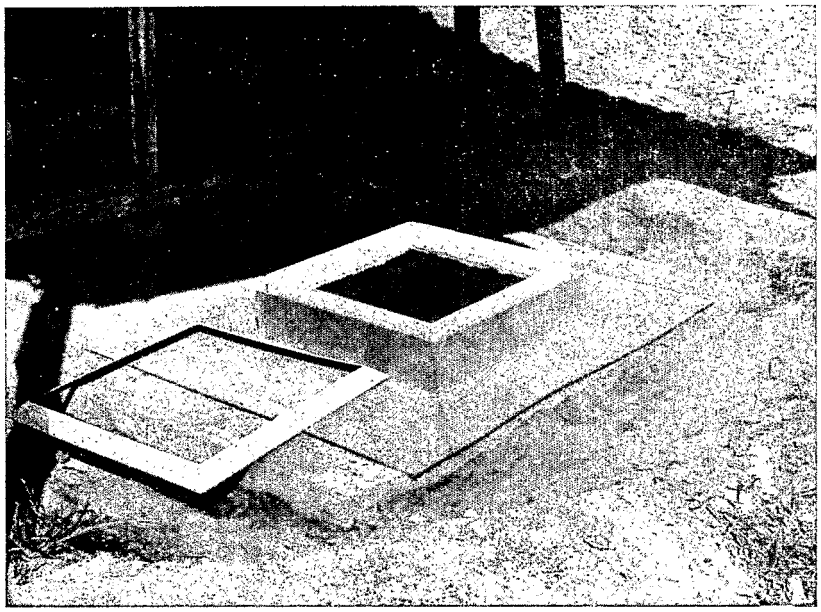


Photo 3. La cheminée de la cuve est en position sur la dalle D_3, laissant un espace libre de 2 cm tout autour de la partie supérieure des parois de la cuve. Au fond à gauche, le trou d'homme est ouvert.

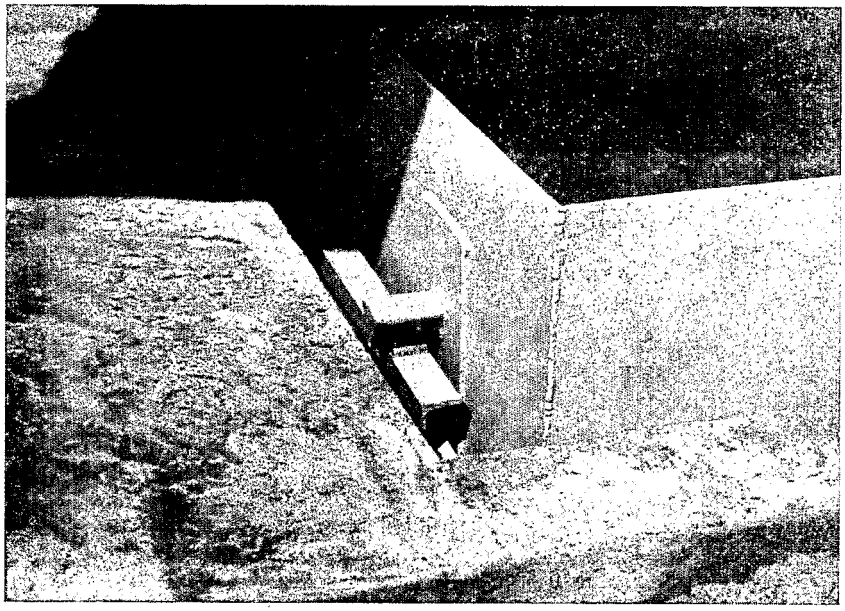


Photo 4. On distingue facilement sur cette photo :

une des plaques de renfort de la cuve ;
un des supports de couteau soudé sur cette dernière ;
le couteau C_1 et la petite plaque d'acier lui servant de coussinet ;
l'un des bras du U du fléau du contre-poids.

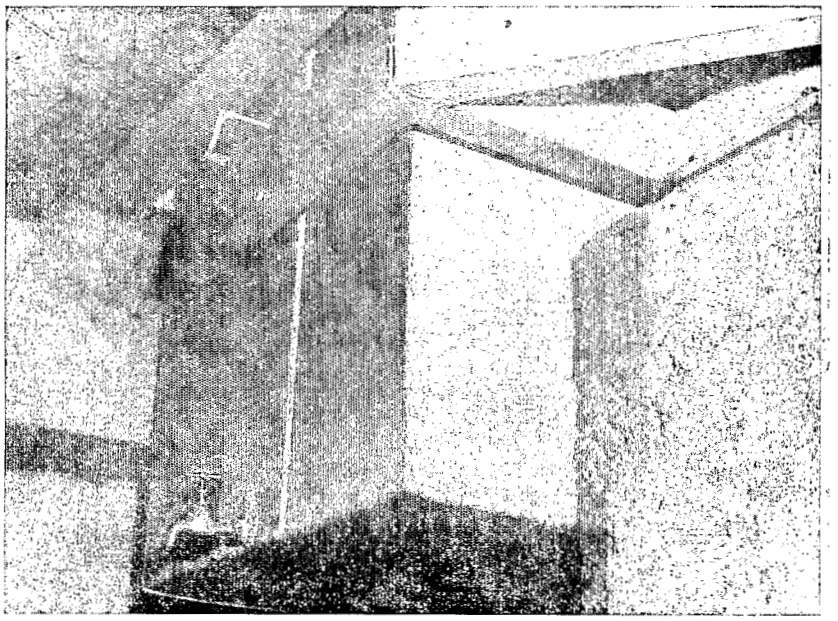


Photo 5. De l'intérieur de l'abri souterrain, on aperçoit :

l'un des bras du U du fléau du contre-poids ;

un des côtés de la cuve, avec sa plaque de renfort, son support de couteau et son robinet de vidange totale R_1 ;

en haut à gauche, le rebord de la cheminée de la cuve qui est en place sur la dalle D_3 ;

en haut à droite, sur le pilier P, les goujons de fixation et la plaque supportant le couteau C_3.

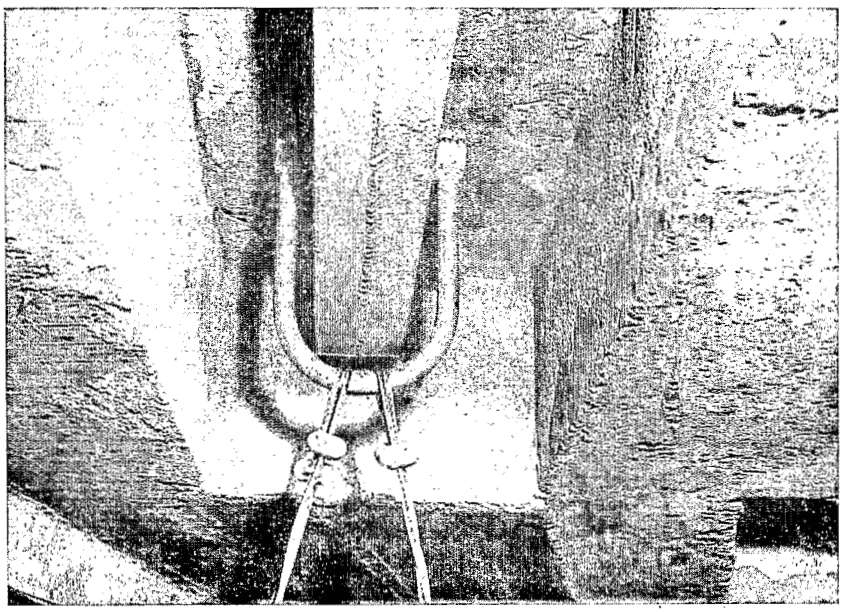


Photo 6. Cette photo de l'extrémité (côté bascule) du fléau du contre-poids met en évidence :

la dénivellation existant entre la dalle D_1 (au-dessus du fléau) et la dalle D_2 ;

la soudure liant les deux fers en U qui constituent la partie rectiligne du fléau ;

l'étrier de suspension du contre-poids avec ses câbles en acier inoxydable.

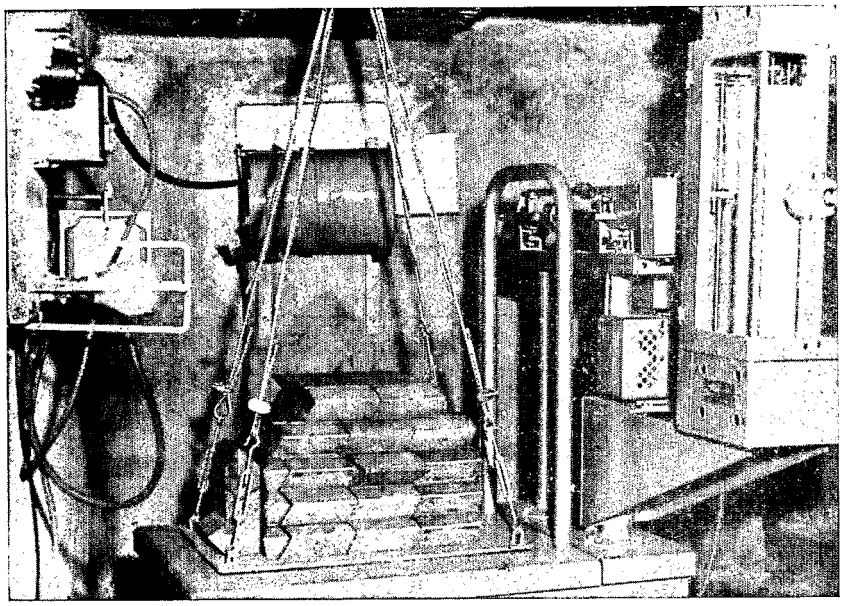


Photo 7. On peut distinguer sur cette photo :

la bascule avec son enrégistreur, au premier plan à droite ;

les blocs de plomb du contre-poids ; la plaque sur laquelle ils sont posés est portée par le plateau de la bascule, elle est aussi suspendue par quatre câbles au fléau du contre-poids.

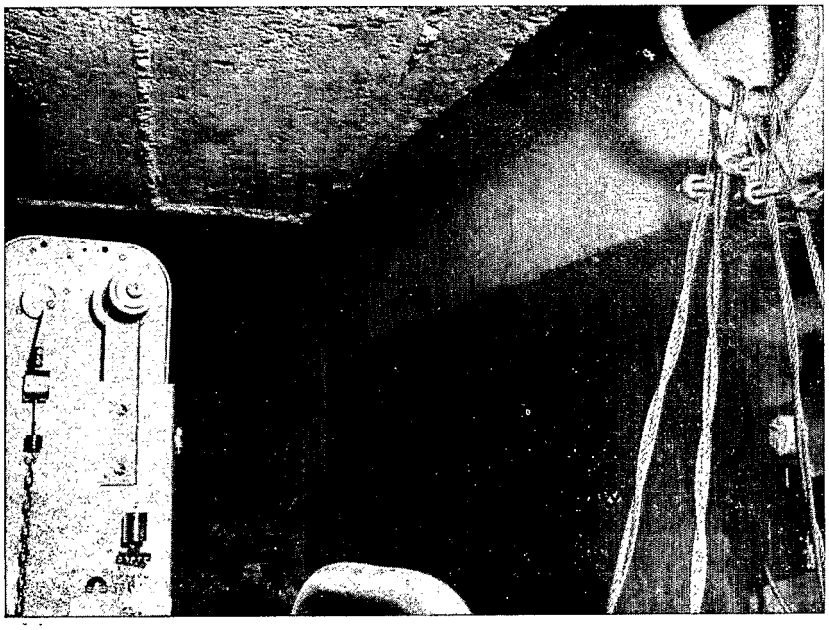


Photo 8. Cette photo permet d'apercevoir :

au fond à droite, la cuve avec son tuyau coudé de drainage ;

en haut à gauche, la plaque de support du couteau C_3 avec ses goujons scellés dans le pilier P et ses écrous et contre-écrous de serrage.

Planche I

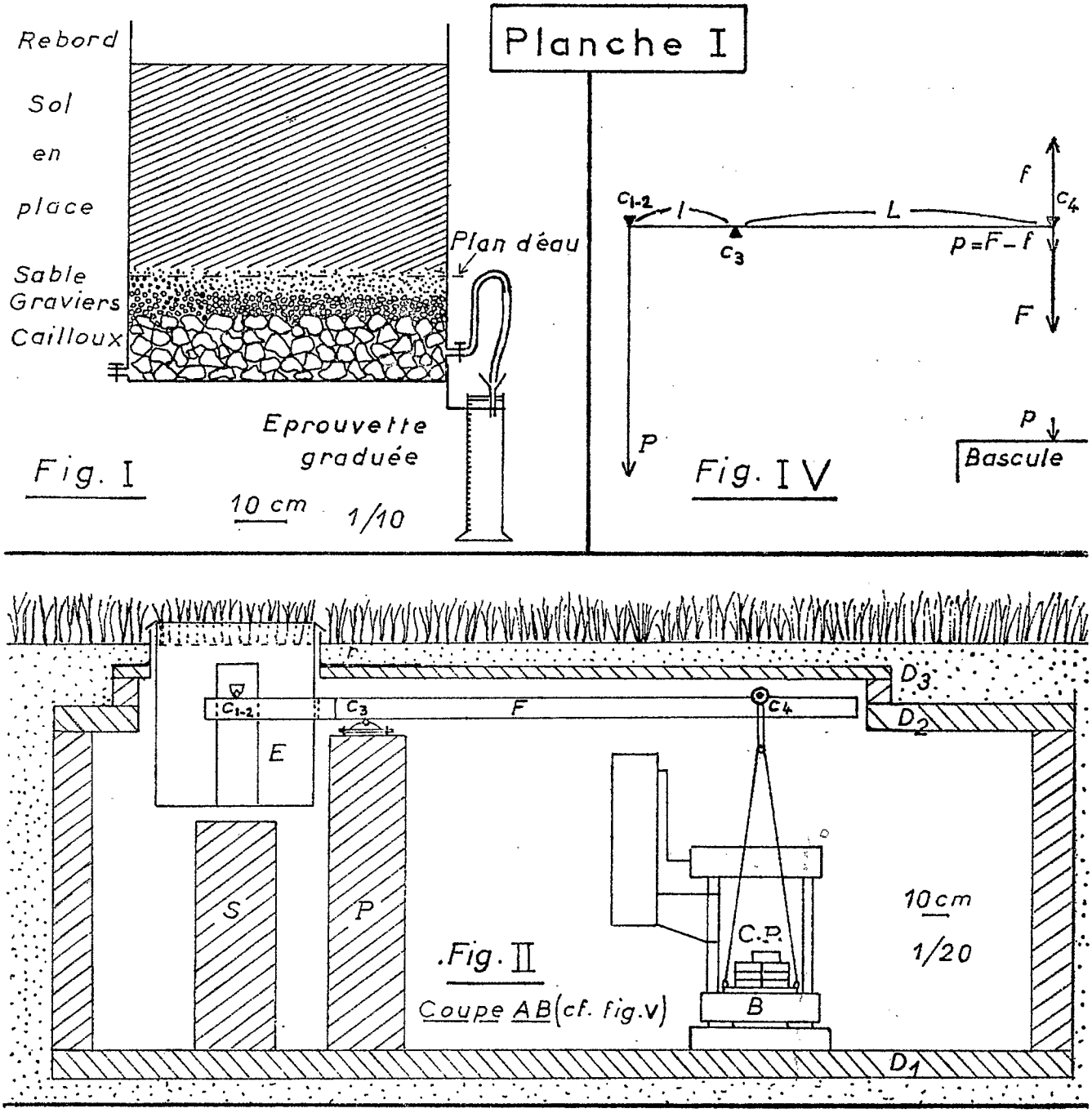
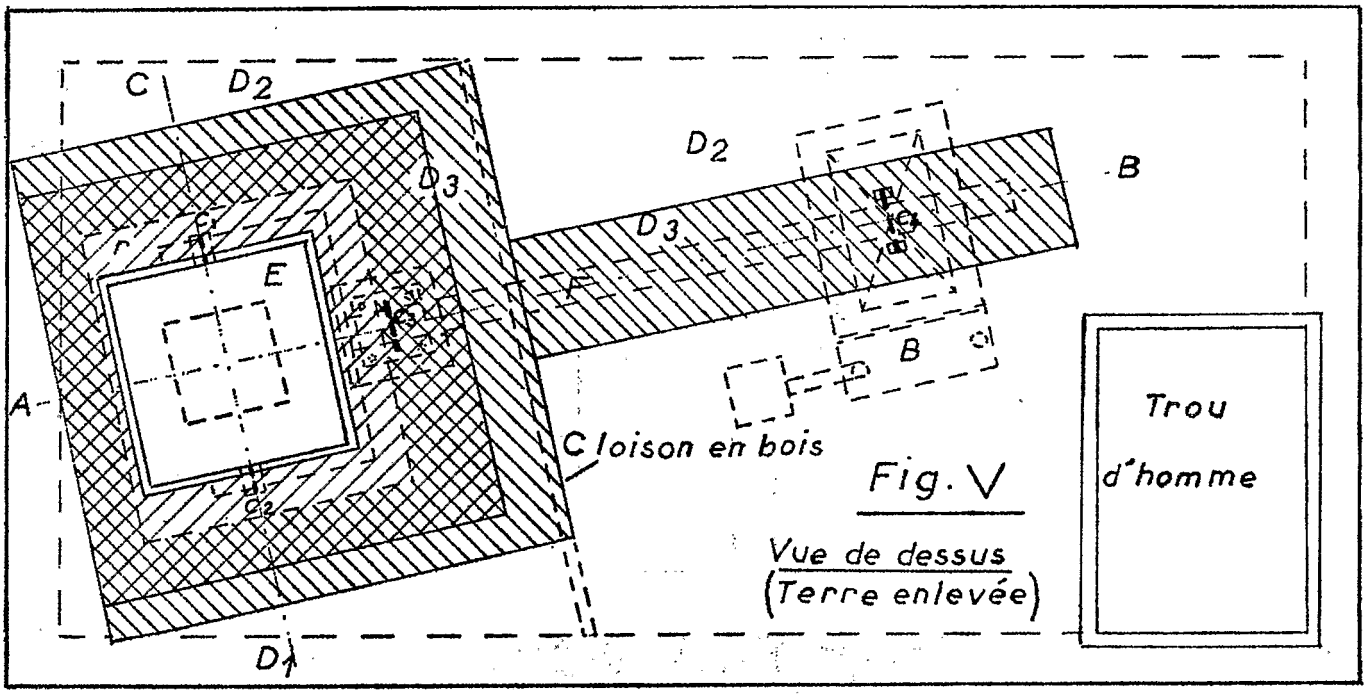

Rebord
Sol
en
place
Sable
Graviers
Cailloux
Plan d'eau
Eprouvette
graduée
10 cm
1/10
Fig. I
C_{1-2}
l
L
C_3
C_4
f
p=F-f
F
P
Fig. IV
p
Bascule
D_3
D_2
D_1
E
S
P
C.P.
B
10 cm
1/20
Fig. II
Coupe AB (cf. fig. V)
A
C_1
B
C_3
C_4
F
E
G
C
C_2
D
Fig. III
10 cm
1/20

Planche II

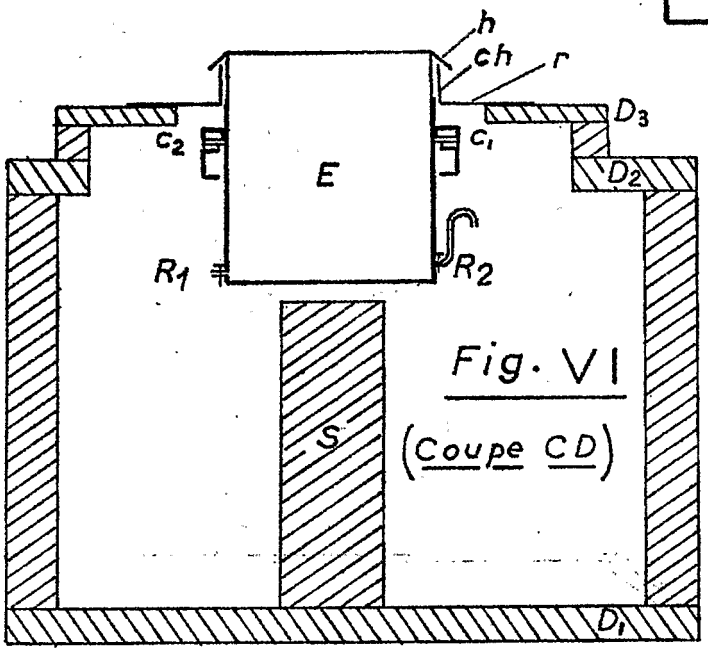


Rebords r de la cheminée de la cuve

Dalle D_3

Zone d'appui de r sur D_3

10cm 1/20



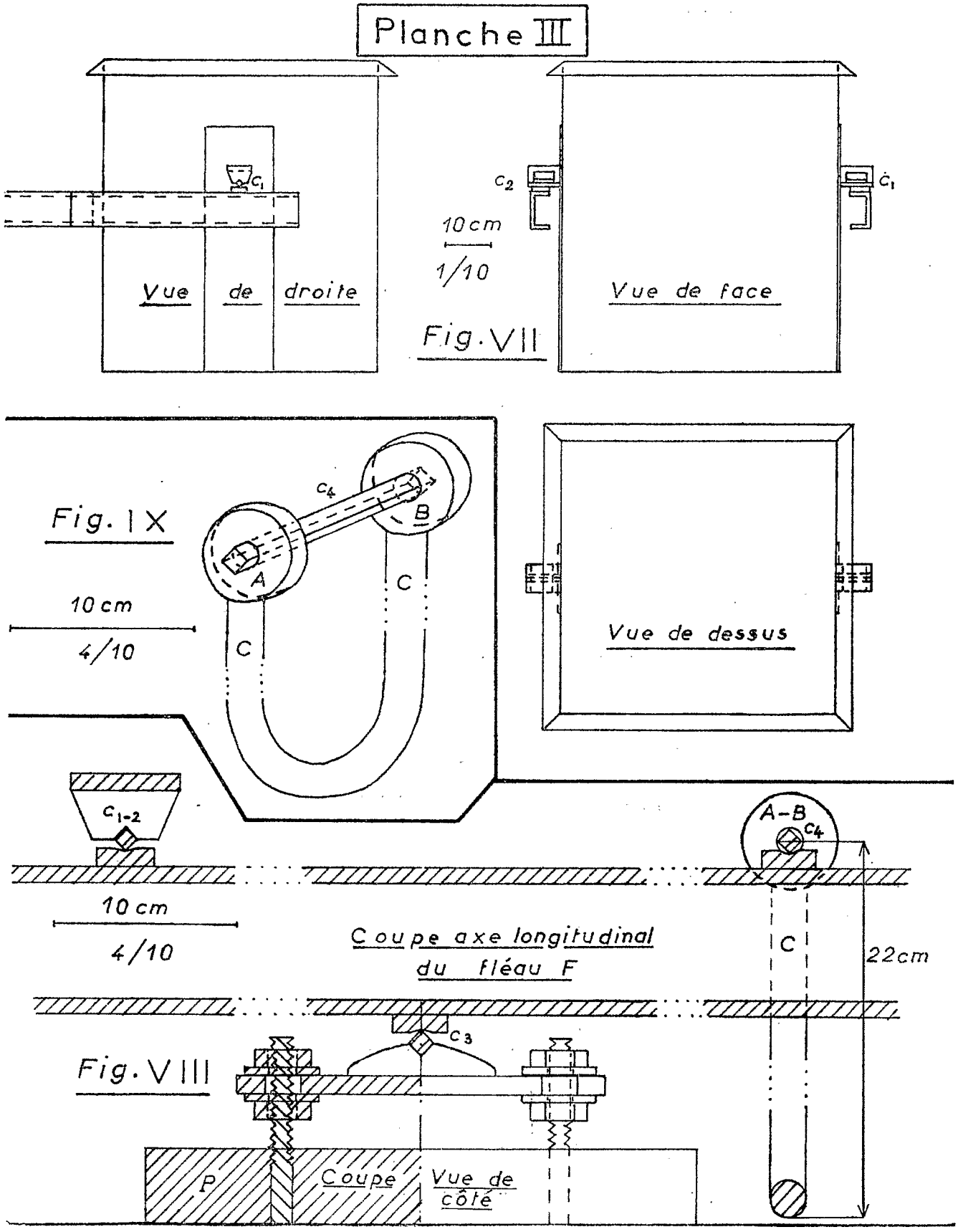


Planche III
Vue de droite
Vue de face
10 cm
1/10
Fig. VII
Fig. IX
10 cm
4/10
Vue de dessus
10 cm
4/10
Coupe axe longitudinal du fléau F
22cm
Fig. VIII
Coupe
Vue de côté

Planche IV

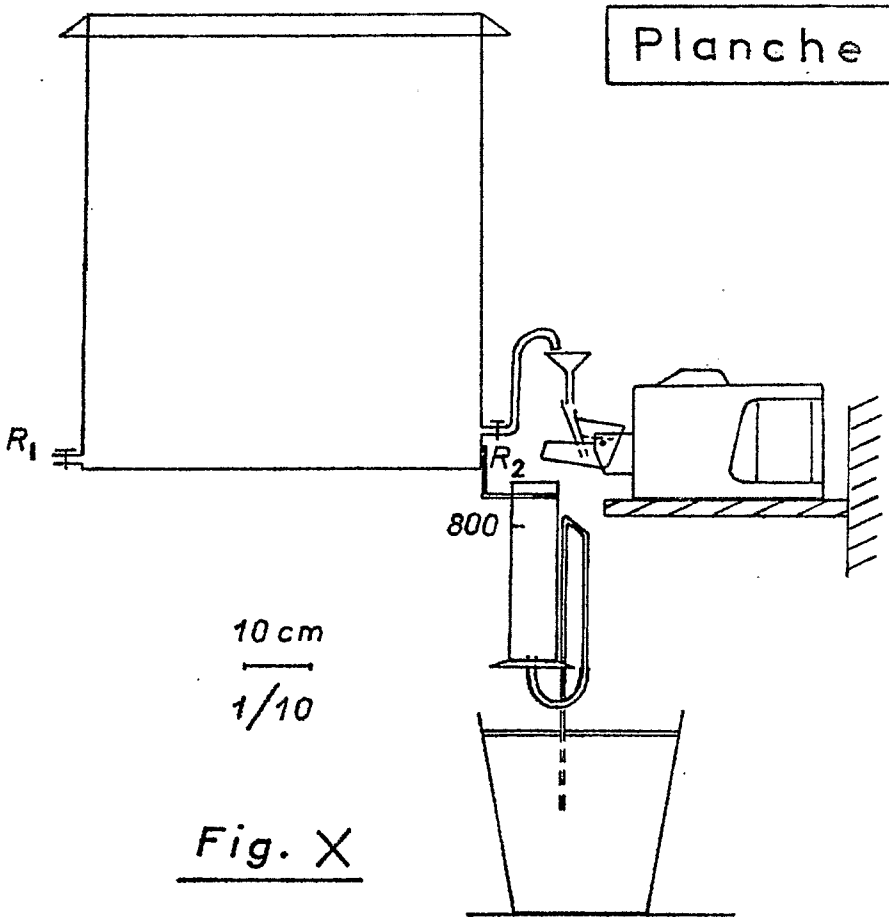


Fig. X

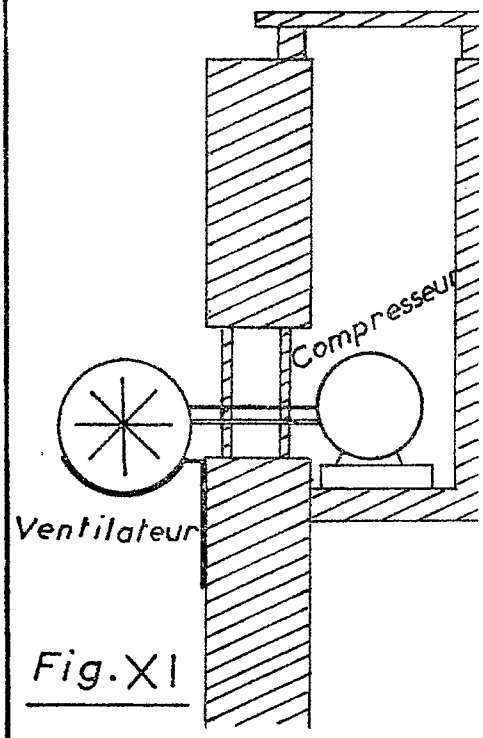
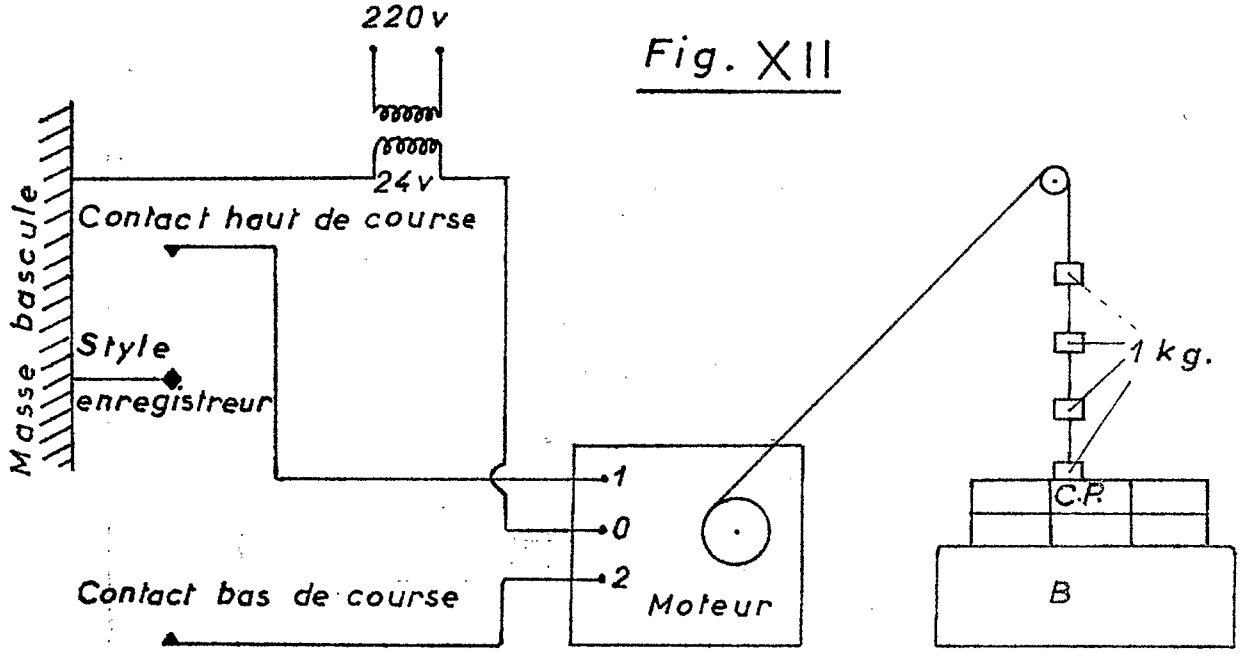


Fig. XI

Fig. XII



RESUME. — *L'Auteur décrit de façon détaillée une installation peu onéreuse de mesure continue de l'évapotranspiration potentielle (ETP) permettant d'en enregistrer avec précision les variations au cours de la journée et de connaître la quantité d'eau reçue par un sol engazonné du fait des condensations nocturnes (rosée « descendante »).*

Les quantités d'eau reçues ou perdues par la surface évapotranspirante (sol recouvert de Paspalum notatum*), exprimées en hauteur d'eau, peuvent être mesurées à 0,02 mm près.*

Une telle installation peut rendre de grands services à ceux qui désirent avoir une mesure de référence sûre de la grandeur de l'ETP quotidienne et à ceux qui veulent travailler à une échelle de temps encore plus fine (ETP horaire, par exemple).

SUMMARY.—*A NEW PRECISE ECONOMICAL RECORDER INSTALLATION FOR THE MEASUREMENT OF POTENTIAL EVAPOTRANSPIRATION.*

The Author describes in details a cheap installation for the continuous measurement of Potential Evapotranspiration (PET). The use of this installation in a grass-plot makes possible the recording of very small variations of PET during the day, and the measurement of dew fall during the night.

The amount of water received or lost by the evaporating surface (soil covered with Paspalum notatum*) expressed as heigh of water column, can be measured with an accuracy of 2/100 mm.*

Such an installation may be useful not only to those who would like to have a sure reference measure of the total amount of daily PET, but also to those who would like to have a knowledge of hourly PET.

RESUMEN. — *NUEVO EQUIPO PARA MEDIR CON PRECISION Y EN CONDICIONES ECONOMICAS, LA EVAPOTRANSPIRACION POTENCIAL (ETP).*

El Autor da una descripción pormenorizada de un equipo poco costoso para medir de modo continuo la evapotranspiración potencial (ETP), registrando con precisión las variaciones durante el día, lo que permite conocer la cantidad de agua recibida por un suelo cubierto de una cesped por causa de las condensaciones nocturnas (rocío « descendiente »).

Las candidades de agua recibidas o perdidas por la superficie evapotranspirante (suelo cubierto por Paspalum notatum*) expresadas en altura de agua, se pueden medir con una aproximación de 0,02 mm.*

El equipo descrito puede resultar utilísimo cuando se quiere obtener una medida de referencia segura de la ETP diaria, o cuando se quiere emplear una escala de tiempo más precisa (ETP horaria, por ejemplo).

L'AGRONOMIE
TROPICALE

Extrait du n° 11
NOVEMBRE 1968

NOUVELLE INSTALLATION D'ENREGISTREMENT, PRÉCISE ET ÉCONOMIQUE, DE L'ÉVAPOTRANSPIRATION POTENTIELLE

par
M. ELDIN
Maître de Recherches en Bioclimatologie (ORSTOM)

1293 4