

Contrôle neutronique de l'humidité des sols en surface

(Bassin versant de la Tafaina
République Malgache)

P. POURRUT
Ingénieur Hydrologue à l'O.R.S.T.O.M.

P. MOUTONNET
Ingénieur du Commissariat à l'Energie Atomique, Département de Biologie,
Service de Radio-Agronomie, en mission auprès du Laboratoire de Radio-Isotopes
de Tananarive.

Introduction

Une des préoccupations principales de l'hydrologue est de faire la part des influences respectives des différents paramètres agissant sur le ruissellement de surface. En milieu tropical, et plus particulièrement à Madagascar, l'étude du ruissellement revêt une importance particulière par le fait de l'intense pouvoir érosif des crues subites et parfois catastrophiques consécutives aux averses de la saison des pluies.

En plus des caractéristiques physiques propres à chaque bassin: pente, végétation, etc., le facteur primaire, et qui a priori semble principal, est la hauteur des précipitations. De très nombreuses études ont été faites à ce sujet et plus dernièrement par G. VUILLAUME [1]. Un autre paramètre paraît avoir une très grande importance: l'humidité préalable du sol en surface [2]. En effet, de deux averses identiques tombant l'une sur sol sec et l'autre sur sol très humide, la seconde devrait provoquer un ruissellement plus important. C'est à la mesure de ce paramètre humidité du sol en surface que nous nous sommes attachés sur une parcelle expérimentale du bassin versant O.R.S.T.O.M. de la Tafaina.

Les méthodes classiques de contrôle (prélèvements à la tarière par exemple) sont assez mal adaptées aux conditions de terrain et à la détermination, avant, pendant et après la pluie, de l'humidité instantannée de la couche superficielle du sol.

La mesure neutronique par contre, installée à poste fixe, permet un contrôle non destructif et continu de la teneur en eau. Le prototype (*) réalisé dans le cadre de cette étude dérive du dispositif polyvalent décrit par ailleurs [3].

1. Dispositif neutronique de contrôle de l'humidité

1.1. Description de l'appareil

Nous représentons le dispositif en figure 1. Il se compose:

— D'une source « S » de neutrons rapides (Am-Be de 300 m Ci) que l'on place 5 cm au-dessous de la surface du sol en bout de la tige porte-source « T »;

— D'un compteur de neutrons lents (3 Ne 12) à trifluorure de bore, placé dans une gaine protectrice scellée à l'araldite. Le tube compteur « C », placé à plat sur le sol, est solidaire de la tige porte-source. Les neutrons rapides émis sont ralentis essentiellement à l'occasion de chocs élastiques sur les noyaux hydrogène du milieu. Le flux de neutrons lents détecté en surface est proportionnel à la concentration hydrogène, c'est-à-dire à l'humidité volumique du sol. Pour une profondeur de source de 5 cm, la courbe d'étalonnage est linéaire jusqu'à 50 % Hv malgré une teneur élevée (13 %) d'eau de constitution. Le tube compteur est alimenté en haute tension par le câble blindé « CA » d'un mètre de longueur;

— D'un préamplificateur d'impulsions « PA » type 110 de la CGEI-Lepaute. Ce circuit transistorisé est introduit dans une gaine protectrice puis scellé aux deux bouts à l'araldite; pour réduire les effets liés aux variations de température et aux décharges électriques de la foudre, la plaquette est enterrée;

— D'un câble blindé « CL » à 4 brins de 6 mètres de longueur:

- 1) alimentation T H T,
- 2) alimentation 10 volts,
- 3) sortie impulsions,
- 4) masse;

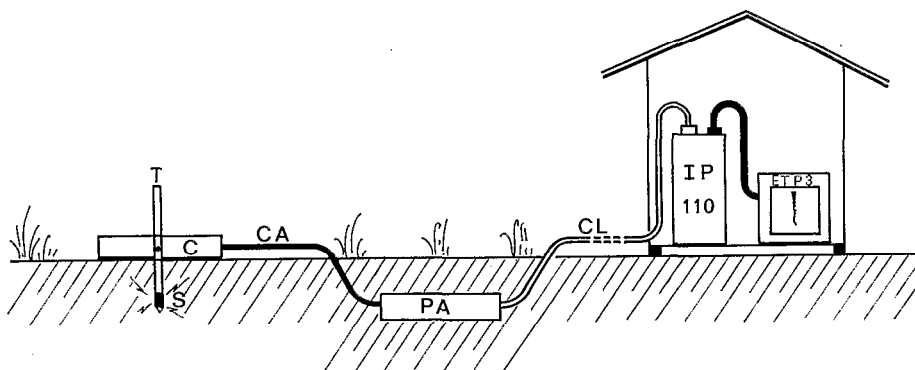
— D'un icromètre IP 110 CGEI-Lepaute fonctionnant sur batterie 6 volts. Cet ensemble assure l'alimentation du tube compteur et du préamplificateur; il traite les impulsions reçues et fournit dans la gamme 0 à 10 millivolts une tension proportionnelle à la vitesse de comptage;

— D'un enregistreur potentiométrique de terrain ETP 3 de SRAT. L'enregistrement de l'humidité du sol est effectué, avant, pendant et après la pluie. Seuls, l'IP 110 et l'ETP 3 bénéficient d'une protection contre les intempéries. Côté sonde, le montage très dépouillé qui a été retenu permet de suivre avec le minimum de perturbation l'évolution de l'humidité du sol en place. Cet ensemble électronique a fait ses preuves puisqu'il a fonctionné, pratiquement sans ennui, du 1^{er} novembre 1968 au 30 avril 1970.

1.2. Réponse de l'appareil aux gradients d'humidité

Il est bien certain que, dans les conditions de terrain, les tous premiers centimètres du sol se dessèchent ou s'humidifient beaucoup plus vite que les couches sous-jacentes.

(*) Une partie en a été réalisée sous contrat de recherche avec l'Agence Internationale de l'Energie Atomique de Vienne (Autriche).



Fi5. 1 — Ensemble neutronique de mesure de l'humidité du sol en surface.

Le problème des gradients d'humidité se pose avec acuité car on sait que le comptage final en surface est affecté par l'humidité des 20 cm de sol sous-jacent [3, 4] mais que la part prise par chaque tranche de sol est différente et varie suivant sa distance au compteur de neutrons lents. Bien que le dispositif neutronique employé ici permette de s'affranchir en partie de ces difficultés, nous avons néanmoins voulu chiffrer l'influence de chacune de ces tranches de sol, découpées suivant des épaisseurs de 2 cm, et connaître leur participation au comptage global.

L'étude a été conduite en laboratoire à l'aide du dispositif représenté figure 2. L'appareil de mesure est une sonde prototype [3] à source mobile. Les comptages sont effectués sur deux demi-fûts superposés de 70 cm de diamètre et 30 cm de hauteur, séparés par un disque creux d'aluminium de 2 cm d'épaisseur qui peut être plein d'air ou plein d'eau. Ce dispositif a l'avantage de faire varier la position relative d'une couche de sol matérialisée par le disque d'aluminium sans en changer la position réelle. En effet, le disque est percé en son milieu d'un trou de 2 cm permettant le passage de la source dans le fût inférieur qui contient un sol ferrallitique d'humidité parfaitement connue. Ce même sol, à la même humidité, sert à remplir le fût supérieur.

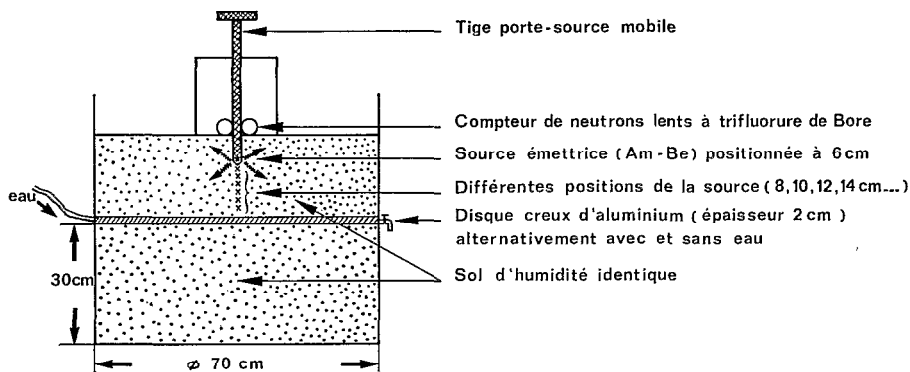


Fig. 2 — Dispositif de laboratoire pour l'étude des réponses de l'appareil aux gradients d'humidité.

Le rôle du disque creux est de créer, dans le milieu infini du sol d'humidité connue, une hétérogénéité. Celle-ci correspond à une tranche d'humidité volumique 0% (disque plein d'air) ou 100% (disque plein d'eau). Par rapport au comptage en milieu infini on a donc dans le premier cas un comptage par défaut et dans le second cas un comptage par excès. Ce déficit ou cet excédent sont variables suivant la situation relative de la couche hétérogène et suivant la position de la source dans le milieu. Les comptages sont effectués tous les 2 centimètres pour 20, 18, 16... 4, 2, 0 cm de sol au-dessus du disque creux plein d'air ou plein d'eau, en enlevant chaque fois dans le fût supérieur une tranche superficielle de terre de 2 cm. Chaque série de mesures comporte donc 20 comptages, 10 pour le disque plein d'air et 10 pour le disque plein d'eau.

L'expérience a été conduite successivement pour quatre taux d'humidité du sol différents. Pour une humidité définie et pour une position déterminée de la source on étudie $\Delta\%$, variation relative de comptage, en fonction de x_i (cm), distance du disque creux à la surface du sol.

$$\Delta\% = \frac{I_i - I_0}{I_0}$$

I_0 vitesse de comptage en milieu infini,

I_i vitesse de comptage obtenue pour une couche de sol d'épaisseur x_i (cm).

Nous donnons figure 3 les résultats obtenus aux profondeurs de source 0, 5 et 10 cm, sur un sol d'humidité volumique 15%.

Pour déterminer la participation de chaque couche à la vitesse de comptage global on détermine:

$$P = \frac{s}{S}$$

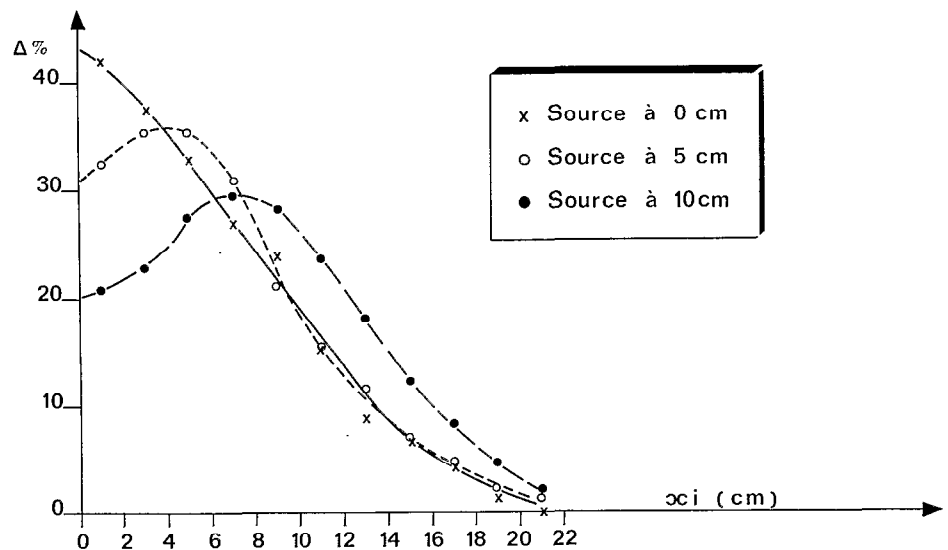


Fig. 3 — Variations relatives du comptage obtenu à différentes profondeurs de source, en fonction de la distance à la surface d'un disque creux d'aluminium.

s surface de la bande comprise entre la courbe précédente et les parallèles à 0Δ d'abscisses x_i et $(x_i + 2)$,

S surface totale de l'aire délimitée par la courbe correspondante et les axes 0Δ et $0x_i$.

Les moyennes des résultats obtenues au cours de 4 expériences successives sont données en figure 4, pour les 3 profondeurs de sources étudiées.

On note avec un positionnement de la source *dans* le milieu, un approfondissement des mesures qui va de pair avec une bonne répartition de l'importance jouée par chaque couche. La meilleure distribution est assurée pour une profondeur de source 10 cm, avec 80% du comptage global pris uniformément sur 12 cm de sol. En fait, dans ces conditions de géométrie, la courbe d'étalonnage de la sonde tend asymptotiquement vers une vitesse de comptage limite atteinte assez rapidement sur sols tropicaux riches en hydrogène. Le montage finalement retenu pour les études de terrain est équipé d'une source placée à 5 cm de profondeur: il donne, de façon sensiblement homogène, plus de 60% du comptage pour les 8 premiers cm de sol.

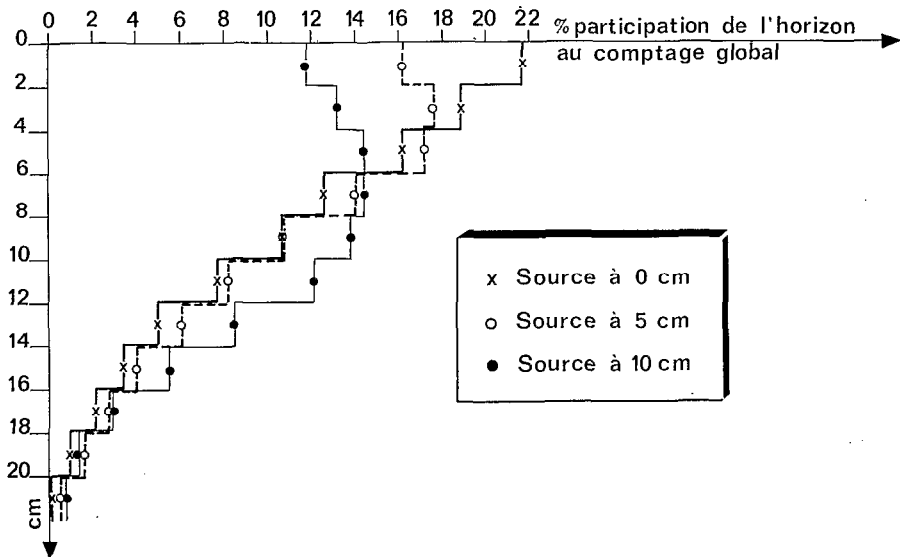


Fig. 4 — Participation des différentes couches du sol à la détermination de la vitesse de comptage globale.

2. Etalonnage

L'humidimètre à pointe a été installé dans une parcelle de ruissellement de 100 m². Cette parcelle est équipée d'un pluviographe à augets basculeurs CERF qui donne la répartition de la pluie dans le temps en même temps que la hauteur pluviométrique, et d'une cuve de collecte des eaux ruisselées de 4 m³ avec un enregistrement par limnigraphe Richard 1/3 qui donne le volume ruisselé ainsi que la forme du ruissellement [2].

Le sol de la parcelle est un sol ferrallitique remanié modal caractérisé par la présence d'une stone-line à 1 m de profondeur. Les horizons de surface ont été décrits comme suit:

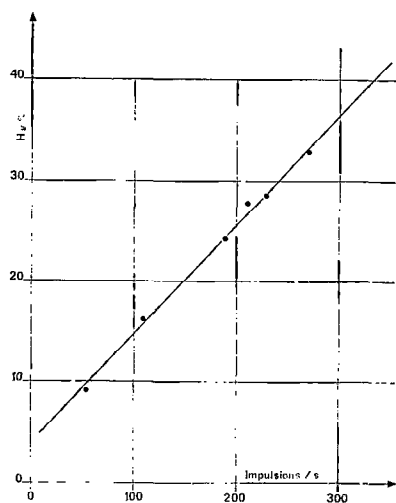


Fig. 5 — Etalonnage de l'humidimètre de surface à pointe, (Humidités volumiques partielles)

Comptage en impulsions/seconde	Moyenne de l'humidité volumique partielle des échantillons prélevés en %
54,0	9,22
109,5	16,20
189,0	24,30
210,0	27,80
228,0	28,60
270,0	32,80

3. Résultats obtenus

3.1. Evolution de l'humidité de surface au cours d'une averse. Comparaison avec les enregistrements de la pluviométrie et du ruissellement

0-10 cm :

- Horizon brun rouge humifère.
- Limono-argilo-sableux.
- Structure grumeleuse moyenne peu friable.
- Très poreux.
- Bon enracinement.

10-60 cm :

- Horizon rouge.
- Limono-argilo-sableux devenant limono-sableux en profondeur.
- Structure continue, sol assez compact en place.
- Porosité tubulaire assez forte.
- Enracinement faible

L'étalonnage a été effectué en septembre 1969 et mars 1970. En partant d'un sol sec et en l'humidifiant progressivement par des apports externes, nous avons, pour chaque point, effectué deux ou trois prélèvements apportés immédiatement en laboratoire et desséchés à 105 °C pour avoir l'humidité partielle. Les résultats ont été les suivants :

On trouvera la droite d'étalonnage figure 5. Ce graphique est établi pour des humidités volumiques partielles. Une dessiccation à 850 °C nous a donné les valeurs de l'eau de constitution qui, pour 14 échantillons, varient entre 12,23 % et 13,47 %.

On trouvera figure 6 d'une part l'enregistrement effectué à l'humidimètre de surface à pointe et d'autre part le hétérogramme de l'averse et l'histogramme de ruissellement collecté dans la cuve.

a) Comparaison avec le pluviogramme :

On constate que la sensibilité de la sonde est remarquable. L'augmentation de l'humidité démarre avant l'enregistrement au pluviographe, ce qui semble assez étrange à première vue, mais est en définitive normal lorsqu'on sait que le basculement de l'auge se fait pour une quantité de pluie égale à 0,5 mm. L'averse, qui semble donc sur le pluviogramme avoir débuté à 18 h 37, a en réalité commencé à 18 h 25. D'autre part la très légère recrudescence d'intensité pluviométrique notée entre 19 h 15 et 19 h 20 est également accompagnée d'une légère augmentation de la teneur en eau de surface.

b) Comparaison avec le limnigramme :

Celui-ci peut difficilement se comparer avec les enregistrements de la sonde et du pluviographe. En effet, contrairement à ce qui se passait précédemment, le phénomène est plus complexe : la réponse du ruissellement n'est pas immédiate, ce dernier étant le résultat de la convergence des eaux sur les 100 m² de la parcelle.

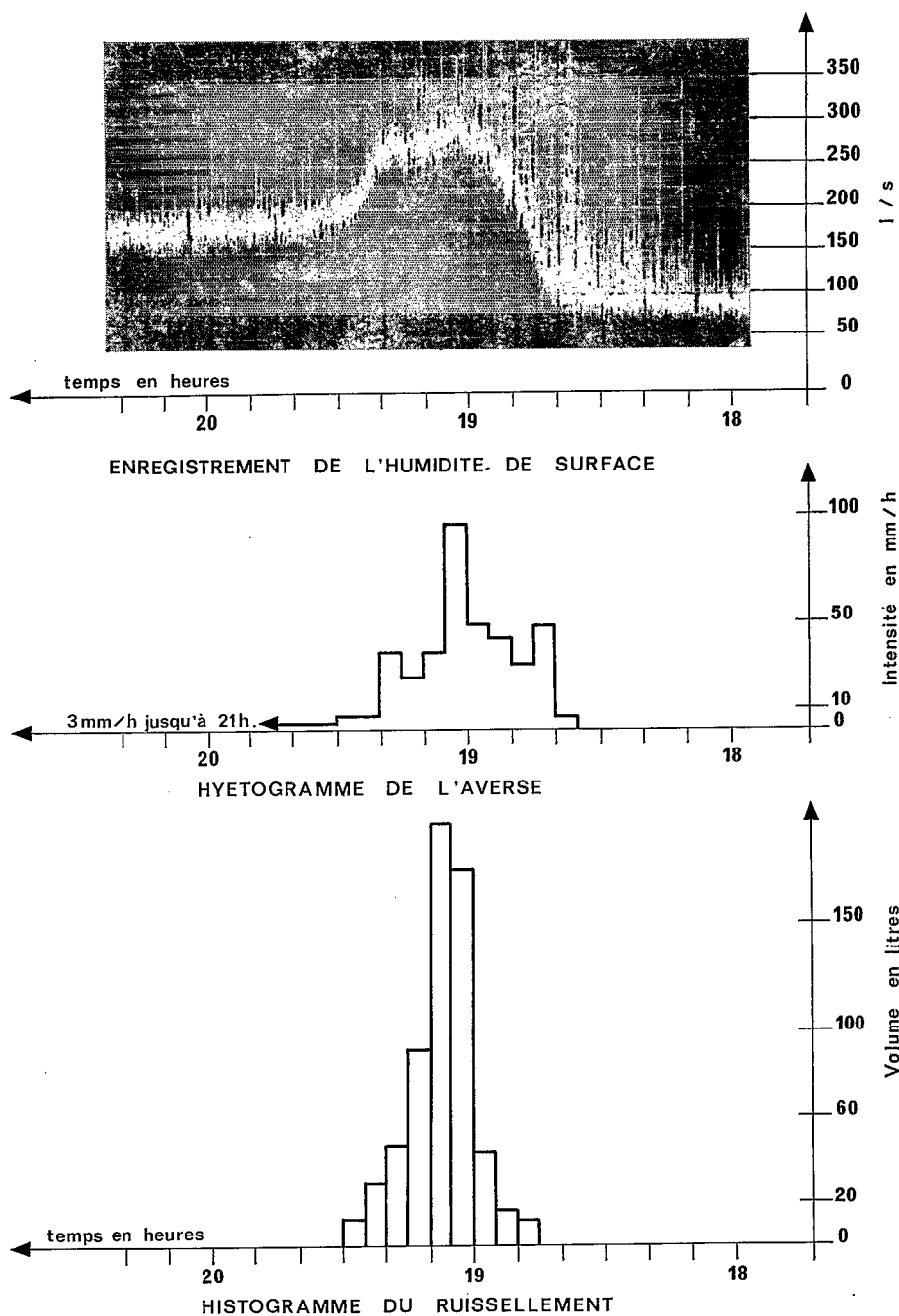


Fig. 6 — Comparaison des enregistrements du 4 Mars 1970.

Ce qu'il est malgré tout très intéressant de noter est le début du ruissellement qui correspond à une humidité voisine de 20% et à une hauteur pluviométrique d'environ 4 mm.

On constate, pour la dizaine d'enregistrements complets en notre possession

que le ruissellement débute toujours lorsque l'humidité de surface est proche de 20% à une unité près. Il semble que ce soit l'humidité-seuil à partir de laquelle le ruissellement commence.

D'autre part, pour atteindre cette humidité-seuil en saison des pluies et quelle que soit l'humidité préalable, toute averse d'intensité supérieure à 10 mm/h commence à ruisseler avant d'atteindre la hauteur pluviométrique de 6 mm et souvent au bout de 2 à 3 mn. Ceci expliquera partiellement ce que nous exposons plus loin au chapitre 3.3.

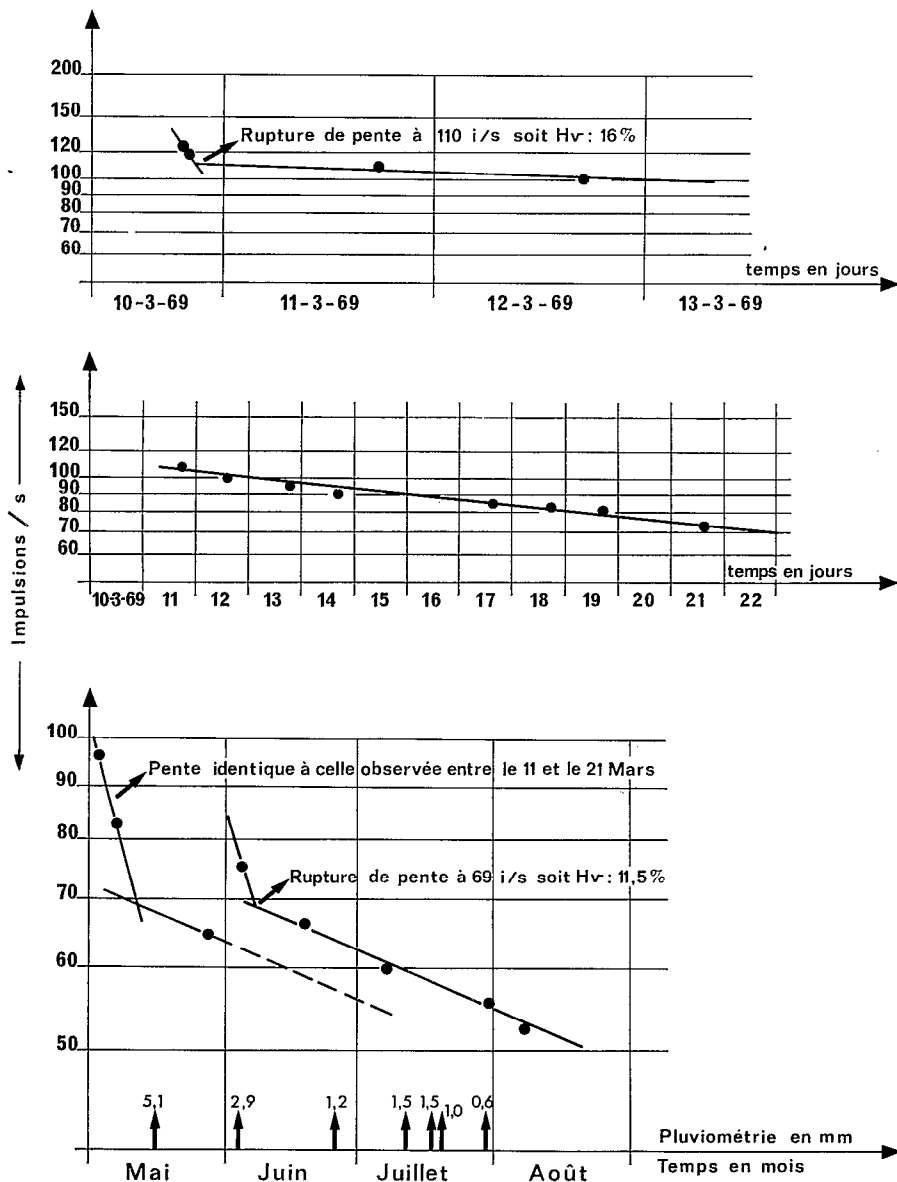


Fig. 7 — Décroissance de l'humidité du sol en surface (mois de mars et saison sèche 1969).

3.2. Décroissance de l'humidité de surface en dehors de tout apport pluviométrique

Sur les mesures effectuées après les averses et pendant les jours de sécheresse (fig. 7), on note un certain nombre de facteurs constants.

a) Immédiatement après une averse:

Lorsque l'eau de ruissellement est entièrement écoulee, on observe:

— Au départ, une décroissance exponentielle des humidités, de pente assez forte et correspondant à une cinétique rapide (fig. 6, 1^{re} partie), vraisemblablement due au départ vers les couches sous-jacentes de l'eau occupant les gros pores du sol.

— Puis, à partir de 110 i/s une cinétique plus lente, à décroissance toujours exponentielle (fig. 7, 1^{re} et 2^e partie), conséquence de l'évapotranspiration.

Cette valeur de 110 i/s, en dehors de tout apport pluviométrique supplémentaire, est, pour la parcelle, une constante qui se retrouve pour toutes les mesures que nous avons faites. Elle est caractéristique du sol et pourrait correspondre à l'humidité de la capacité de rétention (h et i).

b) Pendant les mois de saison sèche:

Immédiatement après la saison des pluies on note:

— Tout d'abord la même décroissance des humidités que celle observée à partir de 110 i/s, décroissance qui correspond à la dernière averse.

— Au bout d'une douzaine de jours et alors que le comptage se situe aux alentours de 70 i/s soit 11,5% Hv, on observe une seconde cassure: la pente devient à nouveau plus faible et cette baisse de la teneur en eau se poursuit ainsi pendant plusieurs mois, toujours exponentiellement, jusqu'à la prochaine saison des pluies (fig. 7, 3^e partie).

L'humidité correspondant à cette nouvelle rupture de pente devrait, elle aussi, être caractéristique du sol. Elle est vraisemblablement voisine de l'humidité p.F 4.2.

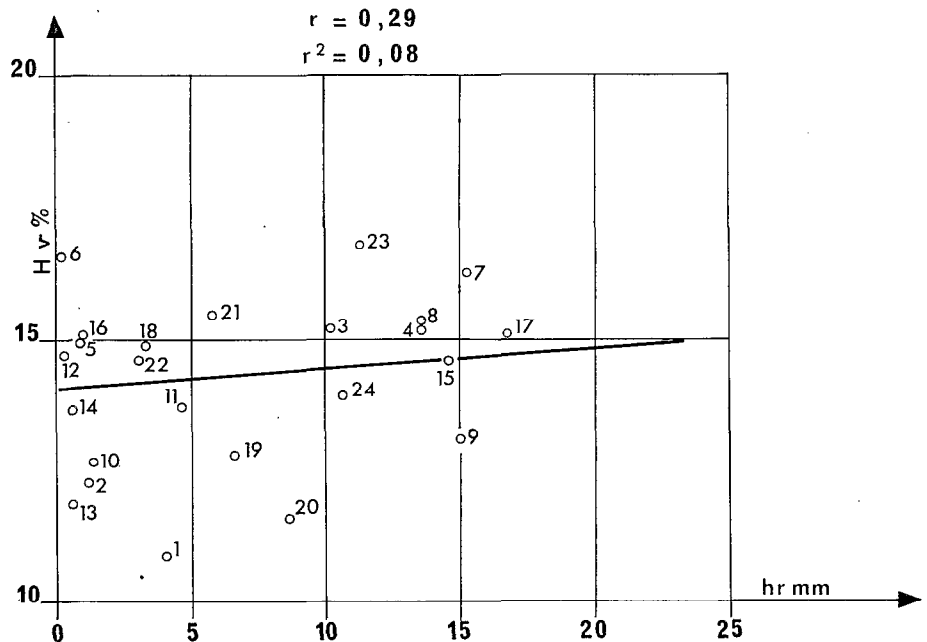


Fig. 8 — Correlation entre la lame d'eau ruisselée et l'humidité préalable du sol.

3.3. Influence de l'humidité préalable du sol sur le ruissellement

On pense généralement que l'humidité préalable du sol, en particulier celle de la tranche superficielle qui est directement en contact avec la pluie, doit avoir une influence importante sur le ruissellement. Nos mesures viendront confirmer ou infirmer cette hypothèse, à savoir si ce paramètre est déterminant ou seulement secondaire sur le volume ruisselé.

De novembre 1968 à mars 1970, nous avons à notre disposition 24 enregistrements complets des différents phénomènes: pluviométrie, écoulement à l'exutoire et humidité préalable du sol avant l'averse. On trouvera ces diverses valeurs résumées dans le tableau I, page suivante.

Nous examinerons en premier lieu le rapport direct existant entre l'humidité préalable et la lame d'eau ruisselée hr exprimée en mm. La corrélation observée entre ces deux facteurs est très lâche, puisque le coefficient de corrélation r est égal à 0,29 et son carré voisin de 0,08 (fig. 8). Il semble donc qu'un facteur principal, plus important que l'humidité de surface, intervienne sur le volume ruisselé. Nous examinerons donc en premier lieu l'influence de la pluviométrie, suivant des découpages différents, et nous verrons ensuite si l'humidité préalable améliore ou non la corrélation établie.

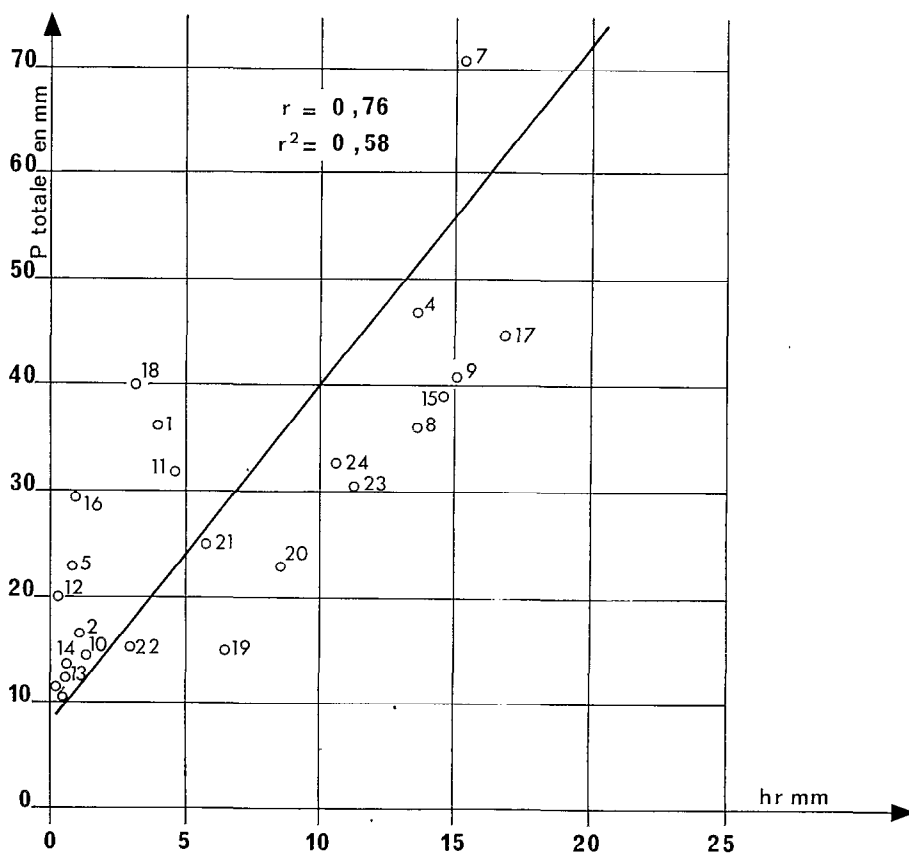


Fig. 9 — Corrélation entre la pluviométrie totale et la lame d'eau ruisselée.

Nous ferons intervenir en premier lieu, la pluviométrie totale P_t mm enregistrée au pluviographe (fig. 9). La corrélation, quoique encore assez lâche, $r = 0,76$ et $r^2 = 0,58$, est cependant nettement plus significative que pour l'humidité préalable. Nous allons essayer de l'améliorer en faisant intervenir la répartition dans le temps de cette pluviométrie, c'est-à-dire l'intensité de la pluie. Après avoir essayé plusieurs possibilités, nous retiendrons en définitive les facteurs suivants:

TABLEAU I

N°	Date	Hr mm	C $\frac{s}{S}$	Hv %	Pt mm	Pi 10 mm	Pe 10 mm	Pc e mm
1	13-11-68	4,0	64,5	10,9	36,3	31,0	23,0	37,6
2	6-12-68	1,1	76,5	12,3	16,4	15,5	9,8	13,6
3	27-12-68	10,2	103,5	15,2	49,0	—	—	—
4	13- 1-69	13,6	103,5	15,2	46,8	38,0	30,5	48,0
5	14- 1-69	0,8	102,0	15,0	23,0	4,0	2,7	3,0
6	5- 2-69	0,2	117,0	16,6	11,3	3,5	1,9	2,5
7	6- 2-69	15,3	114,0	16,3	70,6	52,0	34,2	52,5
8	11- 2-69	13,6	105,0	15,3	36,0	34,0	20,5	27,8
9	19- 2-69	15,0	84,0	13,1	40,8	41,0	33,4	56,5
10	6- 3-69	1,3	81,0	12,7	14,5	13,0	10,5	17,3
11	8- 3-69	4,6	90,0	13,7	31,8	27,0	19,5	29,5
12	10- 3-69	0,2	99,0	14,7	20,0	2,5	0,9	0,9
13	22- 3-69	0,5	73,5	11,9	12,4	10,0	4,7	4,7
14	1-12-69	0,6	90,0	13,7	13,5	8,5	6,5	10,8
15	11-12-69	14,5	98,0	14,6	39,0	37,0	32,1	58,1
16	16-12-69	0,9	101,5	15,1	29,5	10,0	5,7	7,1
17	18-12-69	16,8	102,5	15,1	44,6	39,5	33,0	58,4
18	23-12-69	3,2	101,0	14,9	40,0	18,5	11,5	14,9
19	7- 1-70	6,5	127,5	17,8	14,9	15,0	14,2	23,6
20	19- 1-70	8,5	117,0	16,6	22,8	25,0	20,2	32,7
21	25- 1-70	5,8	106,5	15,5	25,0	24,5	19,0	27,0
22	3- 2-70	3,0	98,0	14,6	15,1	13,5	10,2	17,1
23	7- 2-70	11,3	119,0	16,8	30,7	30,0	22,5	34,6
24	17- 2-70	10,6	91,5	13,9	34,9	33,0	26,3	43,2

$P_{i 10}$ = hauteur totale pluviométrique dont l'intensité est supérieure à 10 mm/h.

$P_{e 10}$ = total pluviométrique excédentaire à l'intensité de 10 mm/h (exemple fig. 10 pour l'averse du 13 janvier 1969).

$P_{c e}$ = total pluviométrique corrigé faisant intervenir les différentes intensités, supérieures à 10 mm/h coef. 1; à 20 mm/h coef. 1,5; à 30 mm/h coef. 2.

Nous avons dans tous ces cas tracé la courbe moyenne puis calculé le coefficient de corrélation hr observé/hr tracé.

On obtient:

$$h_r / P_{i 10} \text{ (fig. 10) } r = 0,916$$

$$r^2 = 0,84$$

$$h_r / P_{c e} \text{ (fig. 11) } r = 0,925$$

$$r^2 = 0,86$$

$$h_r / P_{e 10} \text{ (fig. 12) } r = 0,942$$

$$r^2 = 0,89$$

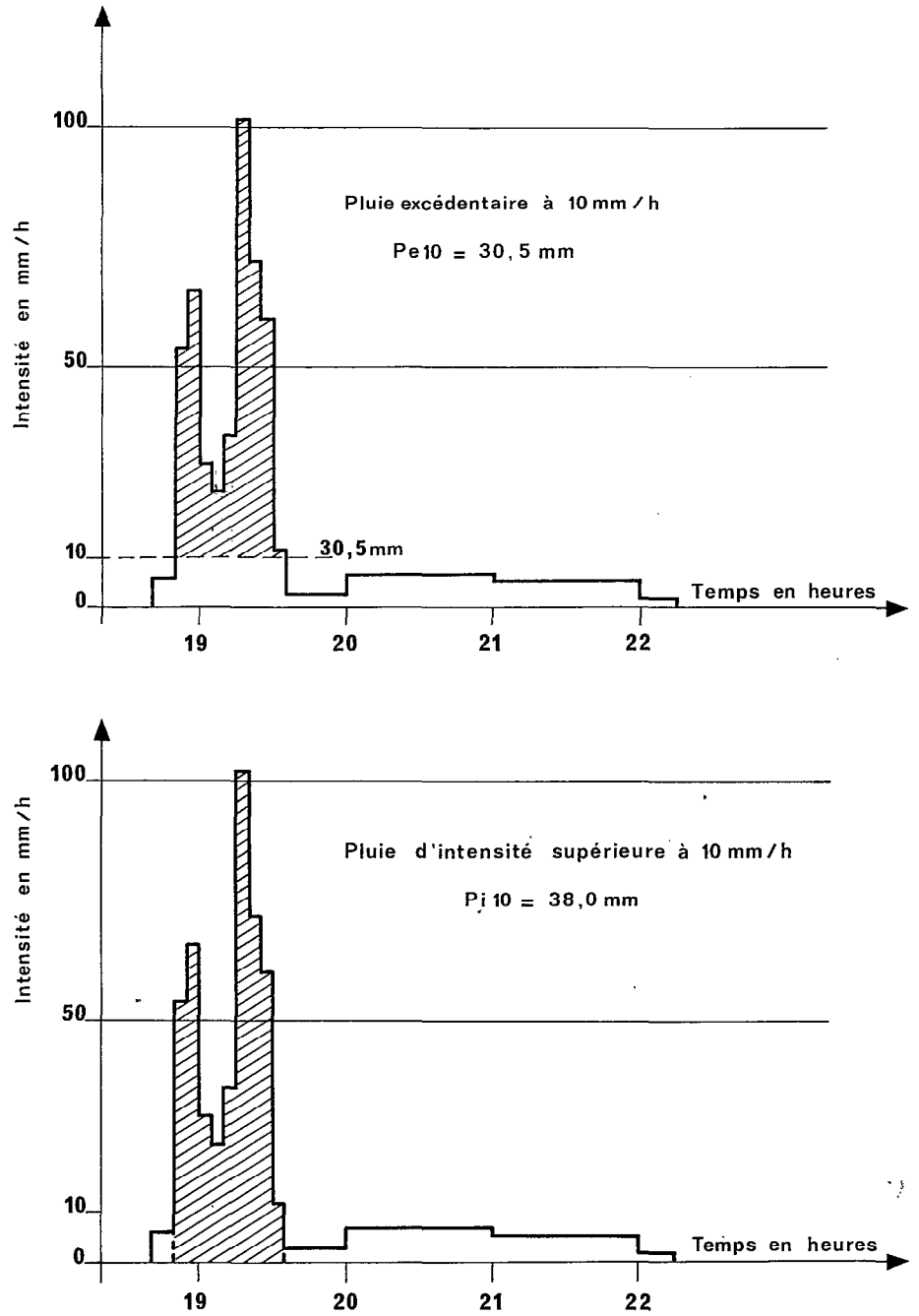


Fig. 10 — Averse n° 4 du 13 Janvier 1969.

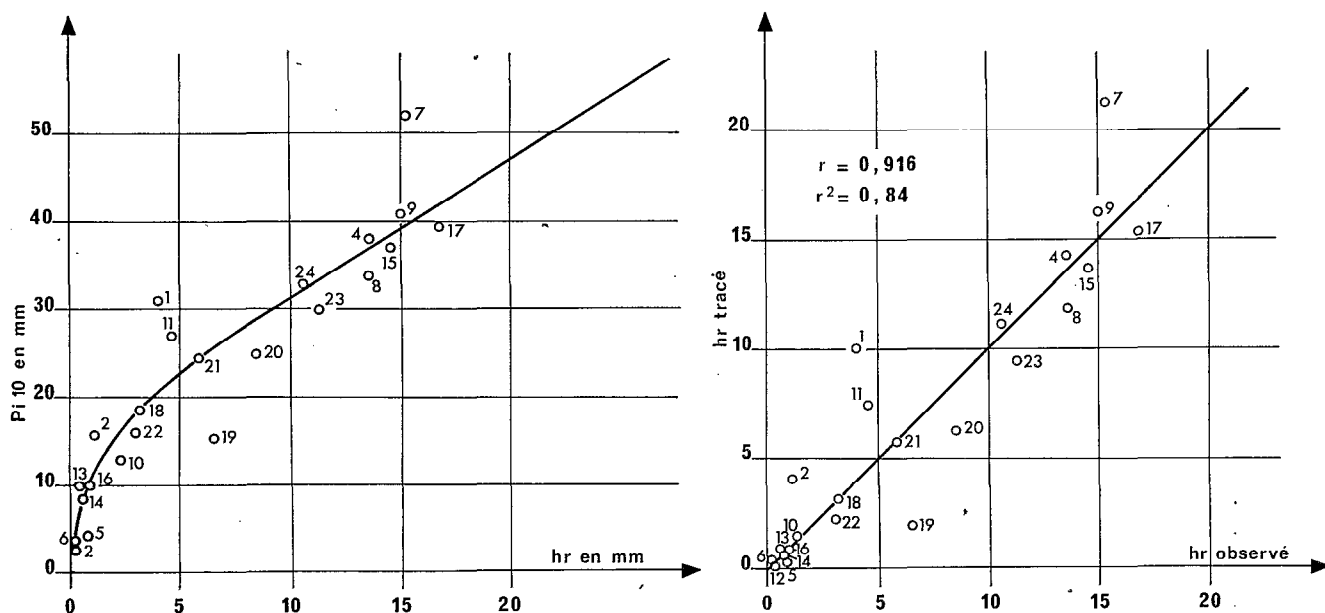


Fig. 11 — Correlation entre hr mm et Pi 10.

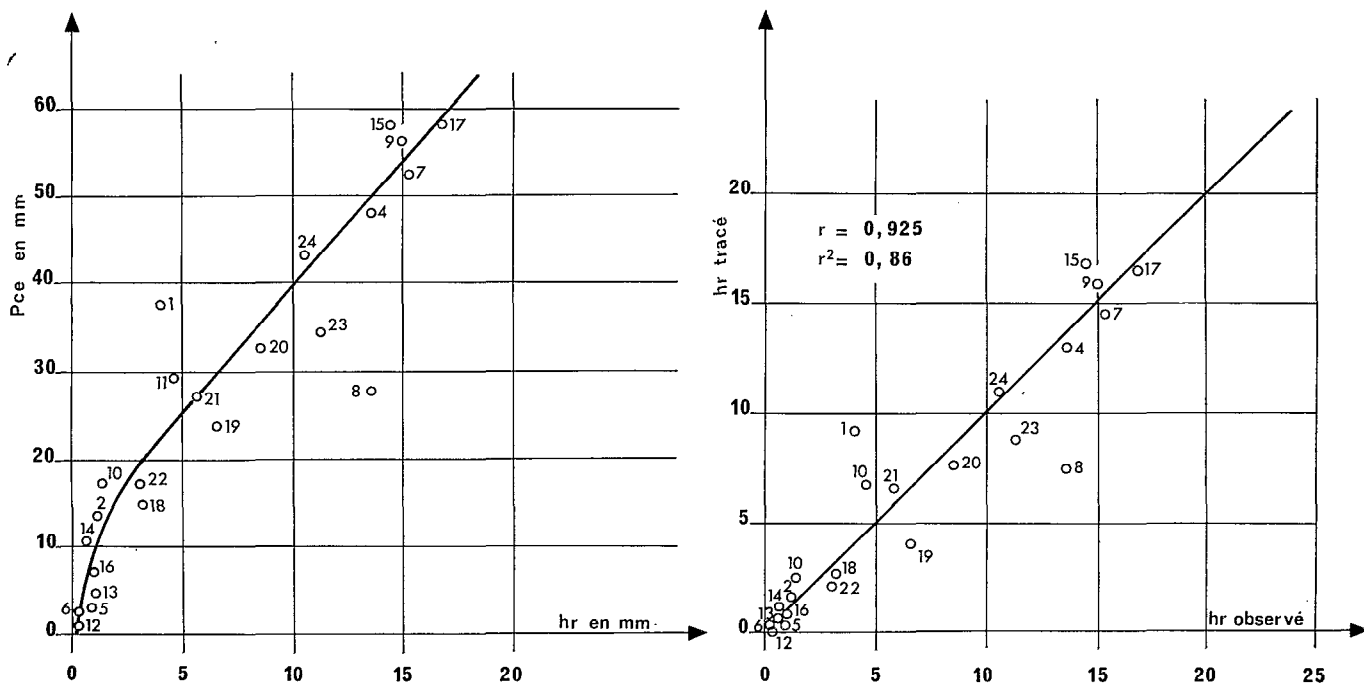


Fig. 12 — Correlation entre hr mm et Pce.

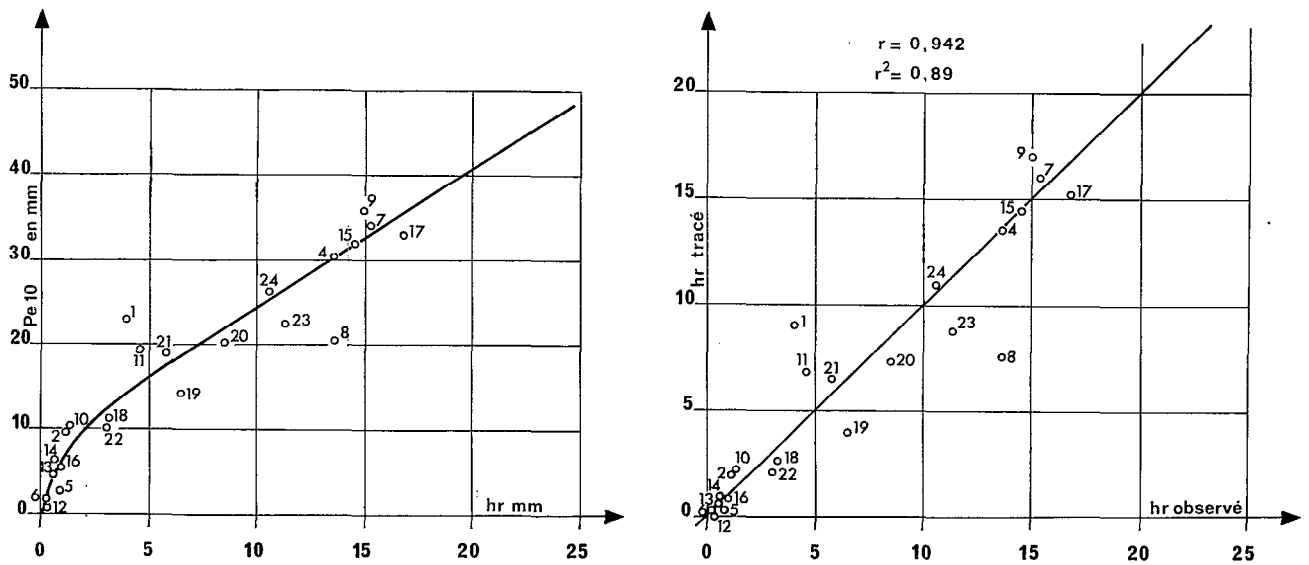


Fig. 13 — Correlation entre hr mm et Pe 10.

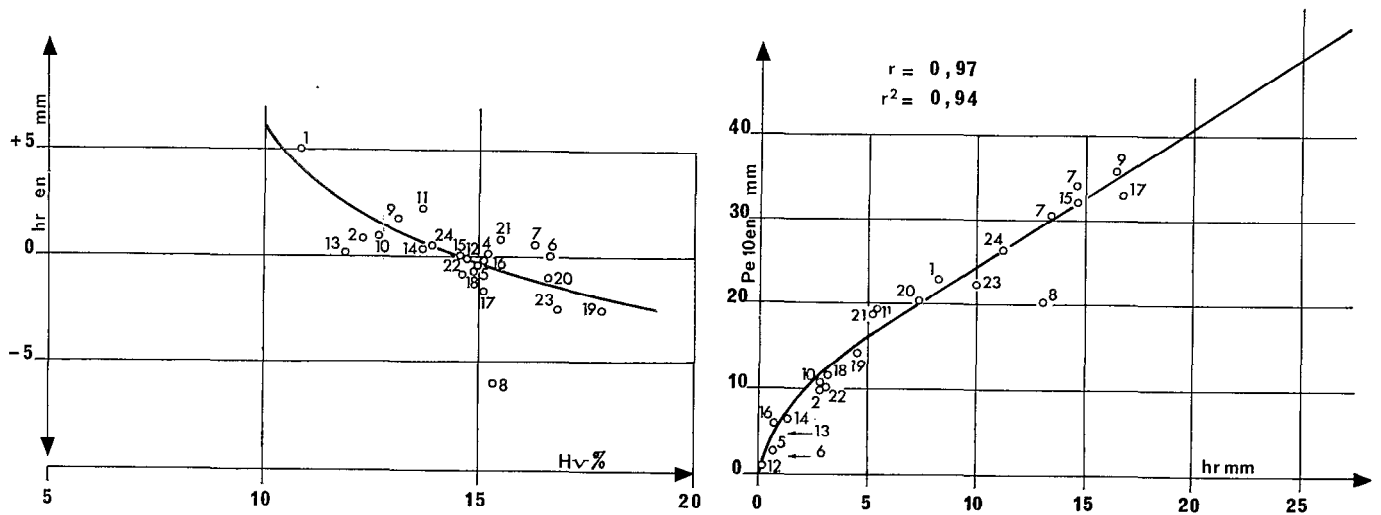


Fig. 14 — Correction de la correlation hr / Pe 10 par Hv %.

Le dernier paramètre, total pluviométrique excédentaire à l'intensité de 10 mm/h, étant celui qui donne la relation la plus satisfaisante, nous le retiendrons en définitive comme facteur principal masquant le facteur secondaire de l'humidité préalable des 10 premiers centimètres du sol. On a fait alors intervenir celui-ci comme correctif en utilisant la méthode des résidus; et on obtient:

$$r = 0,97$$

$$r^2 = 0,94$$

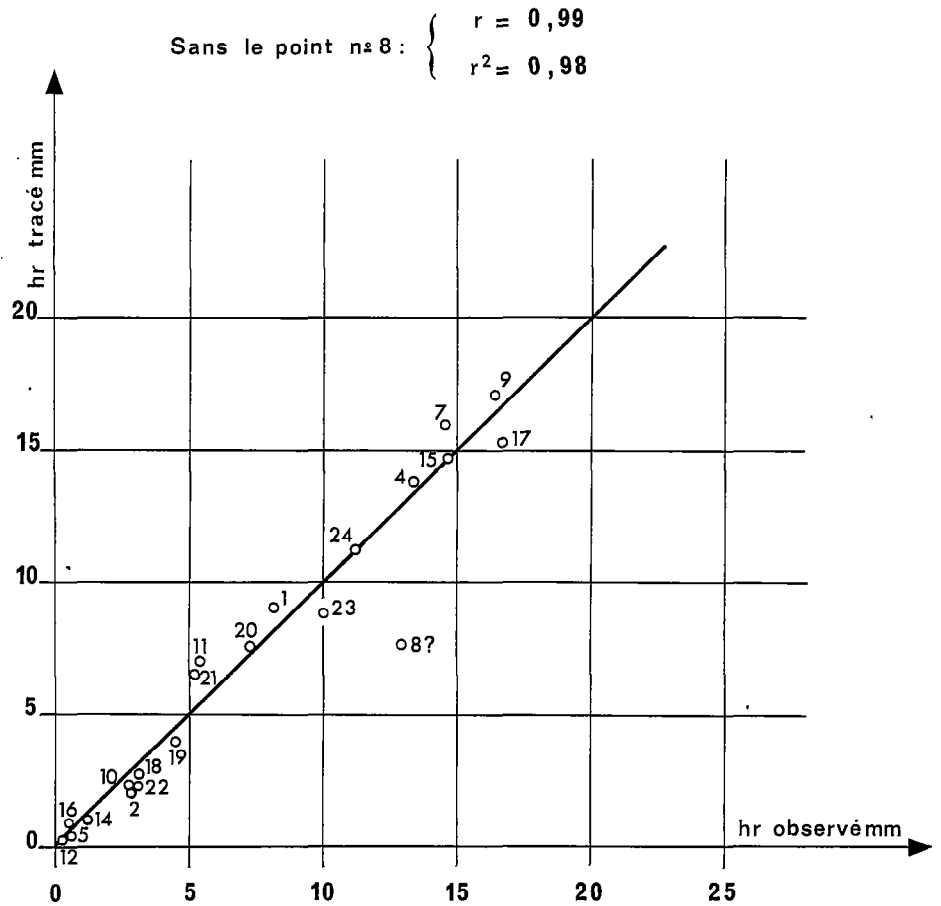


Fig. 15 — Correlation hr / Pe 10 corrigée Hv %.

Cette corrélation est très bonne et, en éliminant le point n° 8 qui semble aberrant et est peut-être dû à une erreur de lecture dans la cuve de collecte de la parcelle, nous obtenons en définitive:

$$\begin{aligned} r &= 0,99 \\ r^2 &= 0,98 \end{aligned}$$

L'humidité préalable joue en fait un rôle assez important pour les faibles pluies, mais son influence relative diminue au fur et à mesure que le total pluviométrique des averses est plus fort.

Conclusion

Ce prototype d'humidimètre de surface, mis au point par P. MOUTONNET, utilisé sous des conditions climatiques très dures, a donné entière satisfaction. Simple et robuste, il nous a permis de suivre parfaitement les diverses variations de la teneur en eau aussi bien en saison sèche que sous les averses les plus violentes.

Les résultats obtenus, lors de l'expérimentation de P. POURRUT, ont montré que

l'humectation préalable du sol a sur le ruissellement une influence moins importante que l'auteur pouvait le penser. Il s'agit là d'une conclusion qui s'applique strictement au type de sol étudié et ne saurait être étendue à d'autres sols.

Dans l'avenir, il faudrait envisager l'exploration d'une tranche de sol plus importante, de l'ordre de 50 cm, son rôle sur l'écoulement de surface étant peut-être plus important que la faible épaisseur de 10 cm choisie arbitrairement a priori. Il faudrait également multiplier l'expérimentation sur d'autres types de sol.

Bibliographie

- [1] VUILLAUME (G.) – 1969 – Bassins versants représentatifs de Kountkouzout (République du Niger). Etude analytique du ruissellement et de l'érosion. *ORSTOM*, Paris, 139 p., 26 fig.
- [2] POURRUT (P.) – 1968 – Utilisation pratique de l'humidimètre à neutrons pour les mesures hydrologiques. Premiers résultats obtenus sur le B.V. de la Tafaina (Madagascar). *Cah. ORSTOM sér. Hydrol.*, vol. V, n° 2, pp. 15-31.
- [3] MOUTONNET (P.) – 1969 – Une méthode neutronique de mesure de l'humidité des sols en surface. *Ijari*, vol. 20.
- [4] DE VRIES (J.), KING (K.) – 1961 – Note on the volume of influence of a neutron surface moisture probe. *Can J. Soil. Sci.*, 41, 253.
- [5] VAN BAVEL – 1961 – Neutrons measurement of surface soil moisture. *J. Géophys. Res.*, 66, 4193.
- [6] CARIOU, DELTOMBE, WAJDENFELD – 1969 – Etude des caractéristiques d'un humidimètre neutronique à pointe. Org. Techn. Reg. Des Ponts et Chaussées. Fiche Programme n° 62099.
- [7] PEYBERNARD et DUFRESNE – 1967 – Etude de la sonde KIATEC HDM 4. Rapport interne du laboratoire central des Ponts et Chaussées.
- [8] MARCESSE (J.) – 1967 – Déterminations in situ des capacités de rétention d'un sol au moyen de l'humidimètre à neutrons. Isotopes. Radiations techniques. A.I.E.A., Vienne.
- [9] POURRUT (P.) – 1970 – Détermination de certaines caractéristiques hydrodynamiques des sols par utilisation de méthodes neutroniques. *Cah. ORSTOM sér. Hydrol.*, vol. VII, n° 1, pp. 37-64.