CONTROLE NEUTRONIQUE DE L'HUMIDITE DES SOLS EN SURFACE
APPLICATION SUR SOL FERRALLITIQUE TROPICAL
(BASSIN VERSANT DE LA TAFAINA - REPUBLIQUE MALGACHE)

P. POURRUT

P. MOUTONNET

M A I 1970.

CONTROLE NEUTRONIQUE DE L'HUMIDITE DES SOLS EN SURFACE

APPLICATION SUR SOL FERRALLITIQUE TROPICAL

(BASSIN VERSANT DE LA TAMAÏNA - REPUBLIQUE MALGACHE)

P. POURRUT*

P. MOUTONNET* *

* Ingénieur Hydrologue à l'O. R.S. T. O. M.

* * Ingénieur du Commissariat à l'Energie Atomique, Département de Biologie, Service de Radio-Agronomie, en mission auprès du Laboratoire de Radio-Isotopes de T A N A N A R I V E

S O M M A I R E

INTRODUCTION

1 - Dispositif neutronique de contrôle d'humidité

1.1. Description de l'appareil

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

2 - Etalonnage

3 - Résultats Obtenus

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

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

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

CONCLUSION

Bibliographie

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 et 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 pluviométrie. De très nombreuses études ont été faites à ce sujet et plus dernièrement par G. VUILLAUME (a). Un autre paramètre paraît avoir une très grande importance : l'humidité préalable du sol en surface (b). 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 ORSTOM 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 instantanée 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 (1) réalisé dans le cadre de cette étude dérive du dispositif polyvalent décrit par ailleurs (c).

(1) Une partie en a été réalisée sous contrat de recherche avec l'Agence Internationale de l'Energie Atomique de VIENNE (AUTRICHE)

../...

1 - DISPOSITIF NEUTRONIQUE DE CONTROLE D'HUMIDITE :

1.1. Description de l'appareil

Nous le représentons en figure N° 1. Il se compose :

- d'une source "S" de neutrons rapides (Am - Be de 300 m Ci) positionnée à 5 cm au-dessous de la surface du sol en bout de la tige porte-source "T" ;

- d'un compteur de neutrons lents (3 He 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 detecté 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 cable blindé "CA" d'un mètre de longueur.

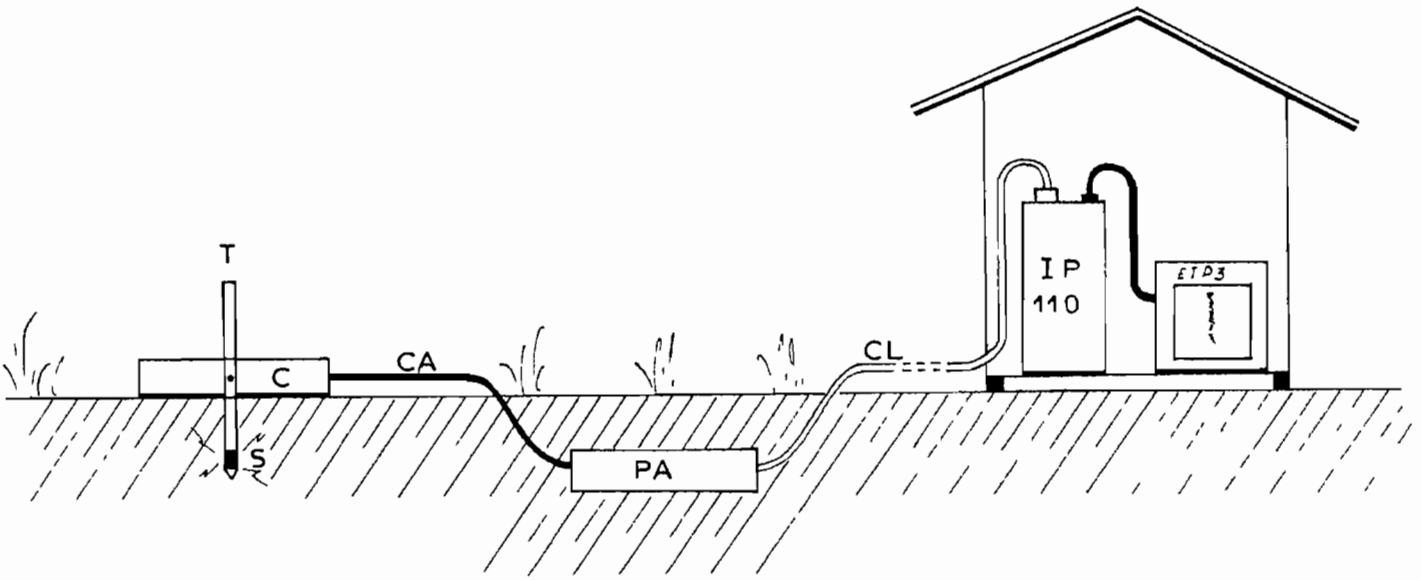
- d'un préamplificateur d'impulsions "PA" type 110 de la CGEI LEPAUTE. Ce circuit transistorisé est introduit dans une gaine protectrice puis scellé aux deux bouts à l'araldite ; pour réduire les effets liés aux variations de température et aux décharges électriques de la foudre, la plaquette est enterrée.

- d'un cable 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 ictomètre 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 m volts une tension proportionnelle à la vitesse de comptage

../...

FIGURE N°1 Ensemble neutronique de mesure de l'humidité du sol en surface



- d'un enregistreur potentiométrique de terrain ETP 3 de SRAP. 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 preuve d'une bonne fiabilité puisqu'il a fonctionné, pratiquement sans ennui, du 1er Novembre 1969 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 ; le problème des gradients d'humidité et leur influence sur la mesure neutronique, se pose alors avec acuité. On sait, en effet, que les mesures classiques (d,c) sont affectées par l'humidité des 20 cm de sol sous-jacent, mais que la part prise par chaque tranche de sol dans la détermination de la vitesse de comptage globale, varie suivant sa distance à la sonde sensible. Le dispositif neutronique à pointe, utilisé ici, permet de s'affranchir en partie de ces difficultés (f). Néanmoins, dans le cadre de cette étude nous avons voulu chiffrer le "poids" de chaque tranche de sol de 2 cm d'épaisseur - découpée depuis la surface jusqu'à 20 cm de profondeur - en matière de détermination du comptage global (g). L'étude a été conduite en laboratoire à l'aide d'un appareil prototype à source mobile décrit antérieurement (c). Les comptages sont effectués sur deux demi-fûts superposés de 70 cm de diamètre et 30 cm de hauteur. Le fond du fût supérieur est remplacé par un disque creux d'aluminium d'épaisseur 2 cm, qui est alternativement plein d'air et plein d'eau. Les comptages sont effectués pour 20, 18, 16...4, 2, 0 cm de terre au-dessus du disque creux, avec et sans eau. L'expérience a été conduite sur sol terrallitique porté successivement à 4 taux croissant d'humidité.

Pour une humidité définie, on étudie Δ %, variation relative de comptage, en fonction de xi (cm), distance du disque creux à la surface du sol.

../...

$$\Delta\ \% = \frac{I_{-} - Io}{Io}$$

Io vitesse de comptage en milieu infini,

Ii vitesse de comptage obtenue pour une courbe de sol d'épaisseur xi (cm).

Nous donnons en figure N° 2 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 :

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

s = surface de la bande comprise entre la courbe précédente et les parallèles à Δ d'abcisses xi et (xi + 2) ;

S = surface totale de l'aire délimitée par la courbe correspondante et les axes 0 _ et 0xi

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

On note ~~avec un positionnement de~~ qu'en plaçant la source dans le milieu, un approfondissement des mesures qui va de pair avec une bonne répartitition 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~~ 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 hydroxydes. 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.

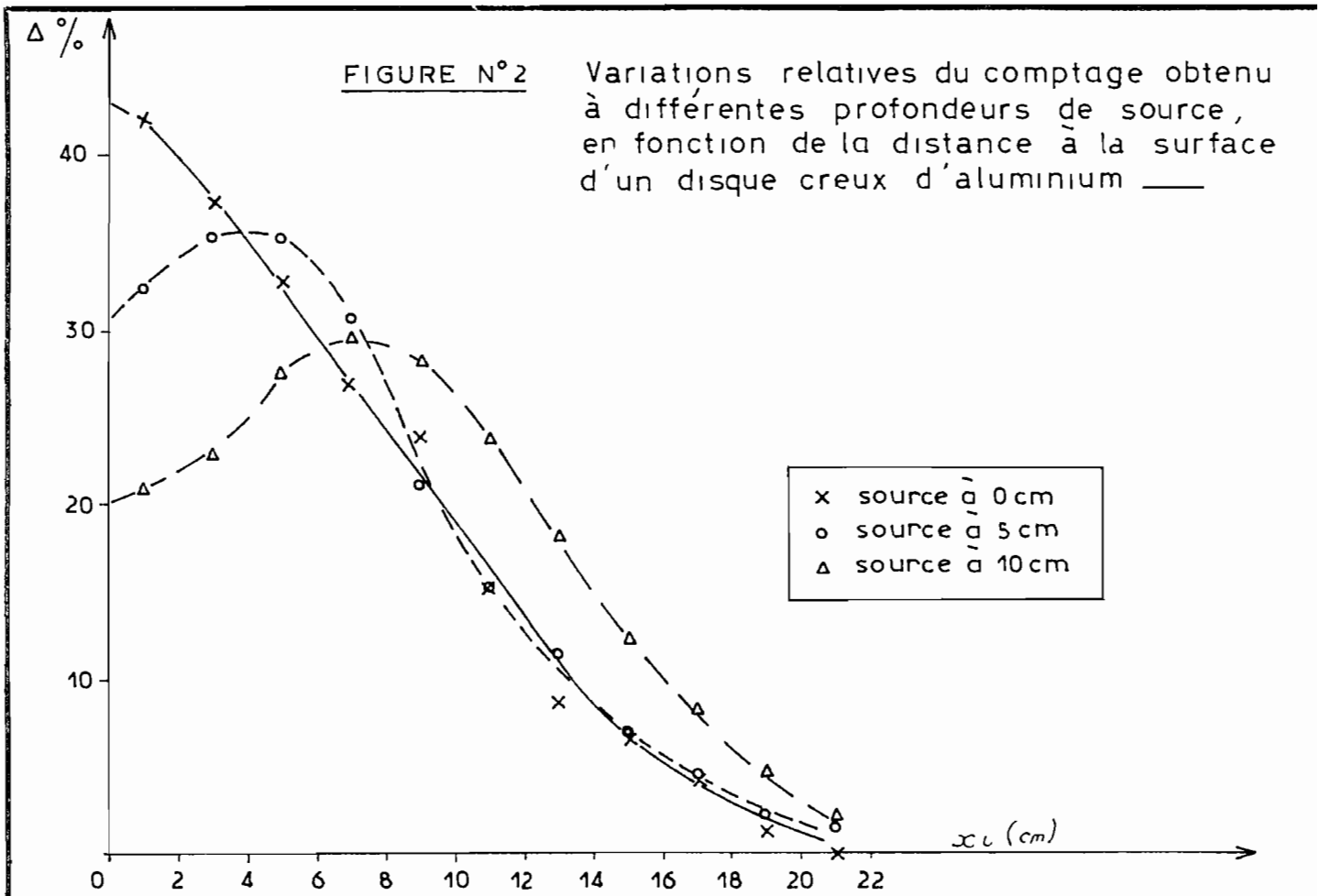


FIGURE N°2 Variations relatives du comptage obtenu à différentes profondeurs de source, en fonction de la distance à la surface d'un disque creux d'aluminium

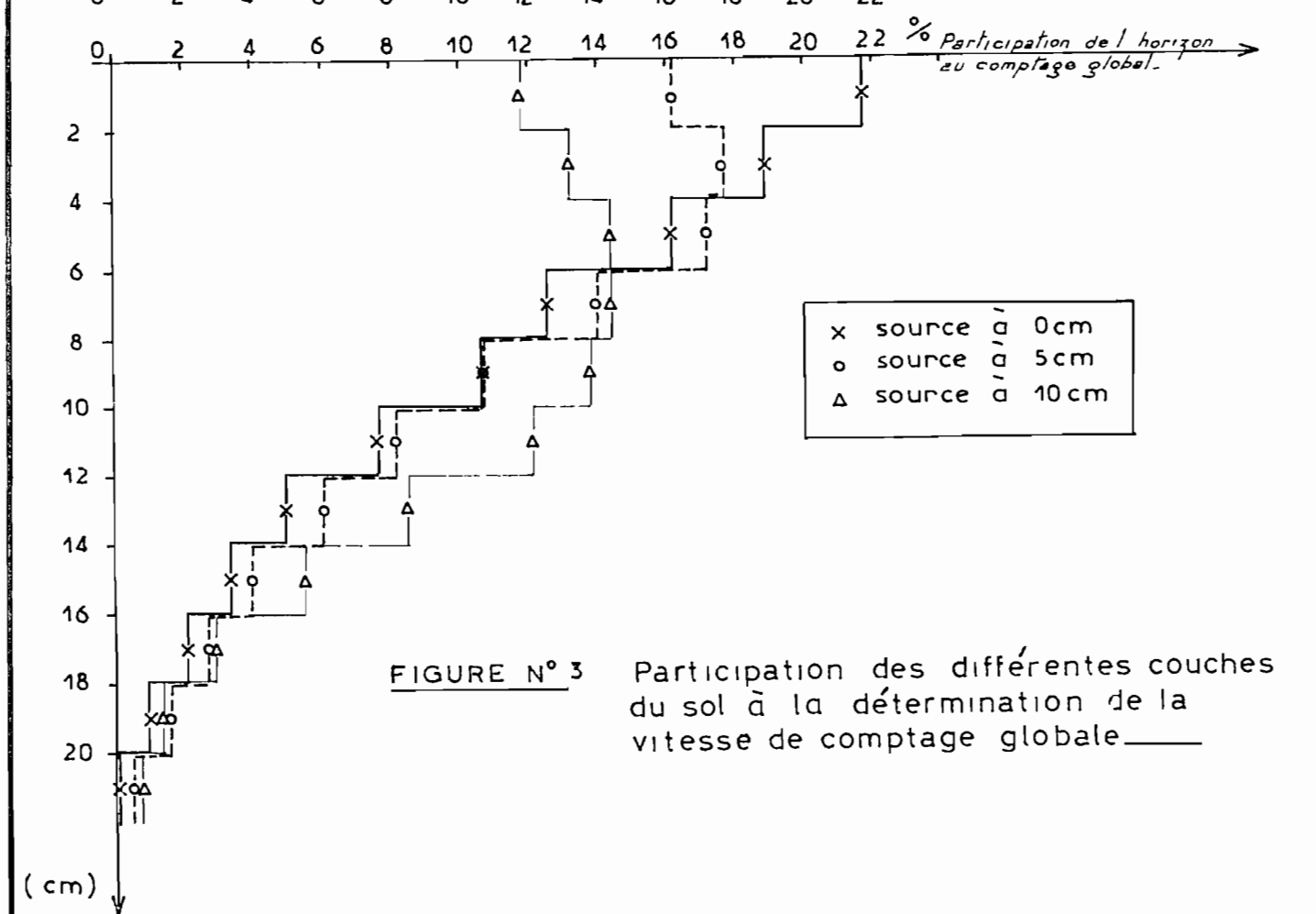


FIGURE N° 3 Participation des différentes couches du sol à la détermination de la vitesse de comptage globale

2 - ETALONNAGE

L'humidimètre à pointe a été installé dans une parcelle de ruissellement de 100 m2. Elle 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 de 4 m3 avec enregistrement par un limnigraphe MICHARD 1/3 qui donne le volume ruisselé ainsi que la forme du ruissellement (b).

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

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.

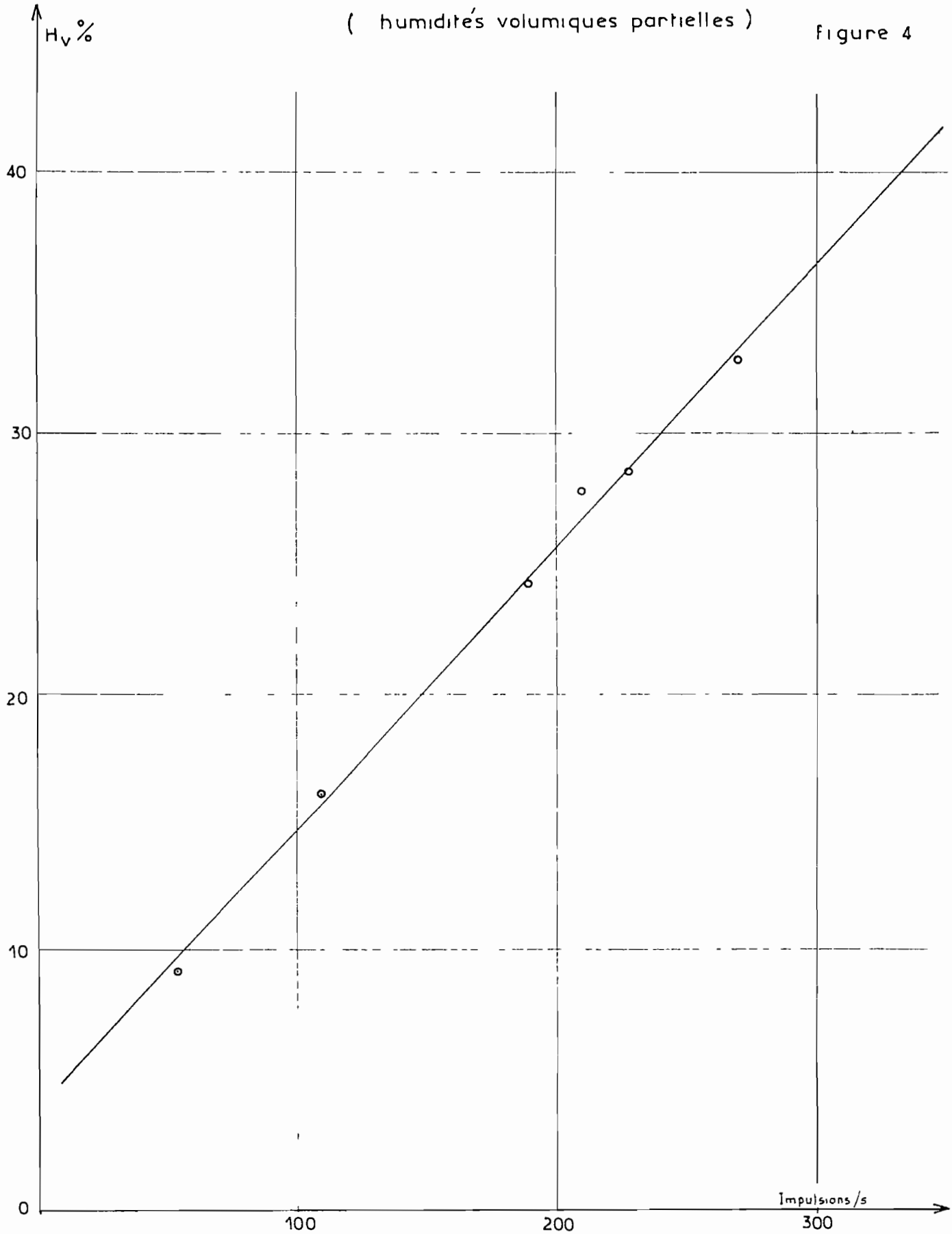
L'étalonnage a été effectué en Septembre 1969 et Mars 1970. En partant d'un sol sec et en l'humidifiant progressivement par des apports externes, nous avons, pour chaque point, effectués deux ou trois prélèvements apportés immédiatement en laboratoire et desséchés à 105°C pour avoir l'humidité partielle.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

../...

ETALONNAGE DE L'HUMIDIMETRE DE SURFACE A POINTE

(humidités volumiques partielles)

figure 4



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

On trouvera la droite d'étalonnage en Figure N° 4. 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, varie entre 12,23 % et 13,47 %.

3 - RESULTATS OBTENUS

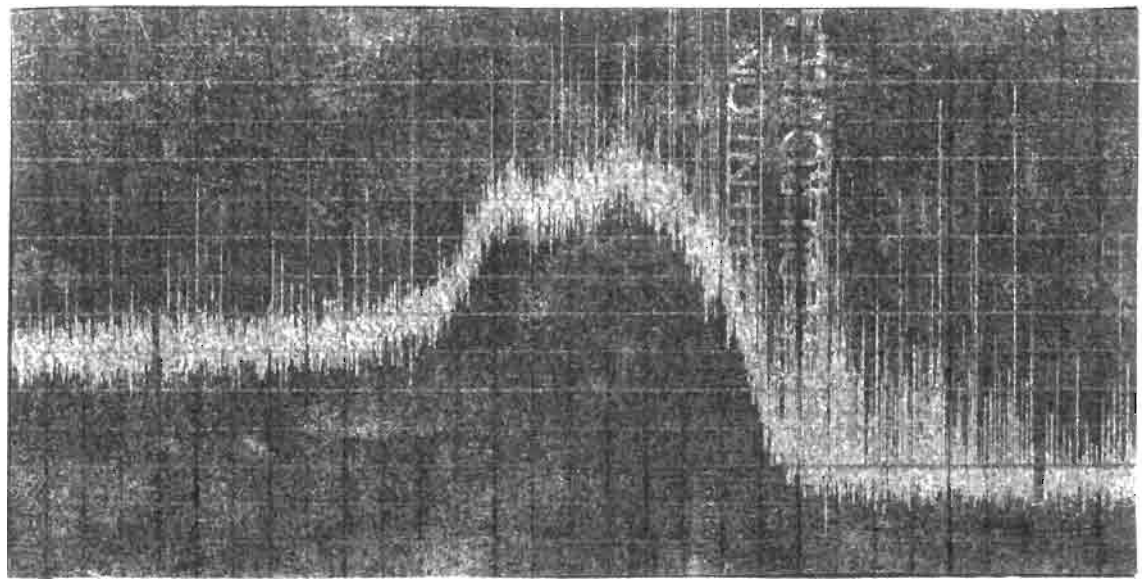
3.1. Evolution de l'humidité de surface au cours d'une averse - Comparaison avec les enregistrements ~~pluviométriques~~ de la pluviométrie et du ruissellement.

On trouvera en Figure N° 5, d'une part l'enregistrement effectué à l'humidimètre de surface à pointe et d'autre part le hyètogramme de l'averse et l'histogramme de ruissellement collecté dans la cuve.

a) Comparaison avec le ~~pluviogramme~~ hyétogramme :

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'auget 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.

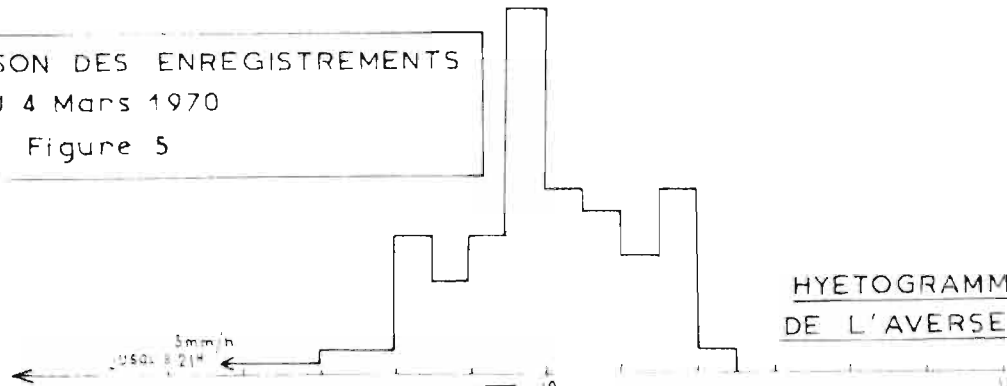
../...

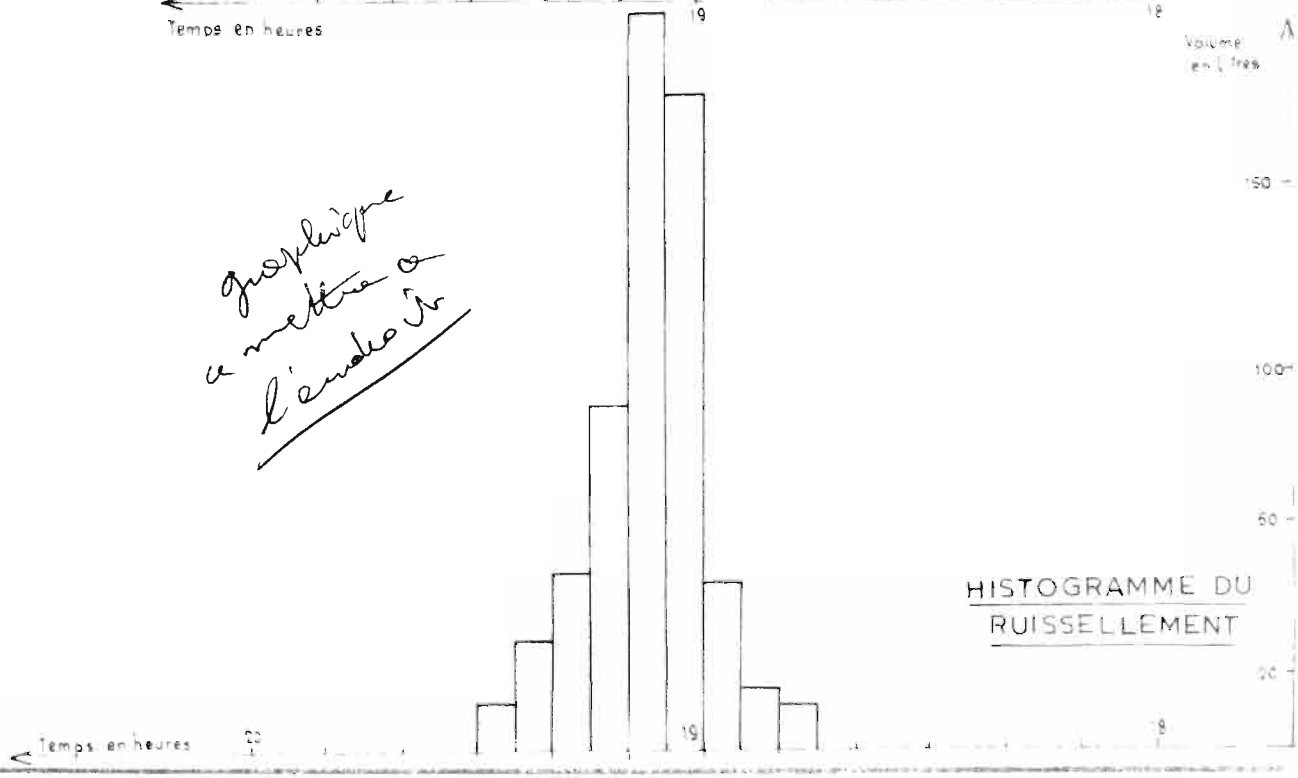


ENREGISTREMENT DE L'HUMIDITE DE SURFACE

Temps en heures

COMPARAISON DES ENREGISTREMENTS
DU 4 Mars 1970
Figure 5





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.

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 mm. Ceci expliquera partiellement ce que nous exposons plus loin au chapitre 3.3

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 sècheresse (figure N° 6) on note un certain nombre de ~~facteurs constants~~. particularités que l'on retrouve ~~sur tout~~ dans chaque cas.

a) Immédiatement après une averse :

Lorsque l'eau de ruissellement est entièrement écoulée on observe :

- au départ, une décroissance exponentielle des humidités, de pente assez forte et correspondant à une cinétique rapide (fig 6, 1ère 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 6, 1ère et 2ème partie), conséquence de l'évapotranspiration -

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

b) Pendant les mois de saison sèche :

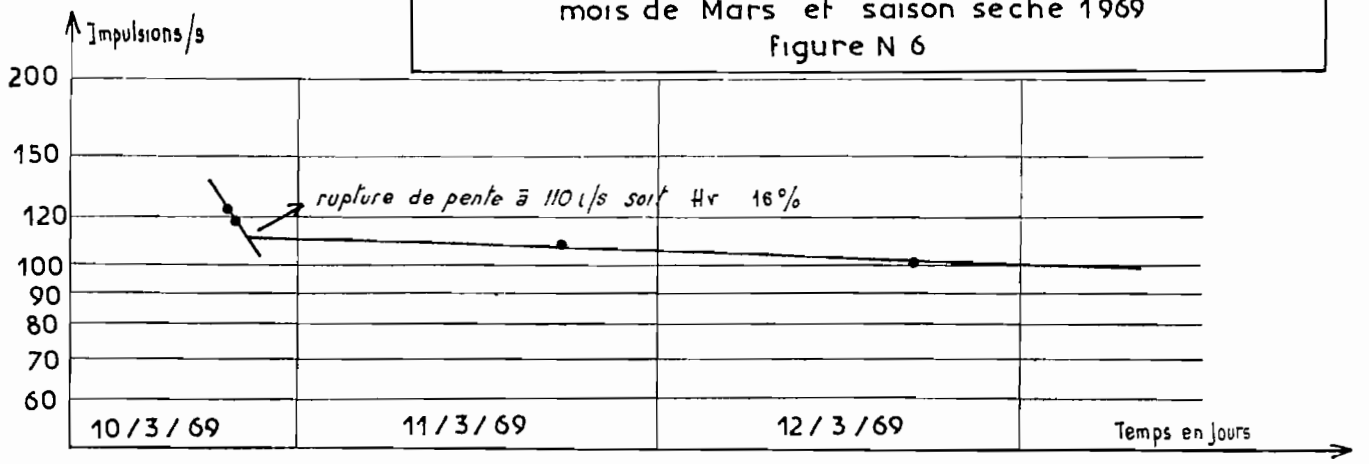
Immédiatement après la saison des pluies on note :

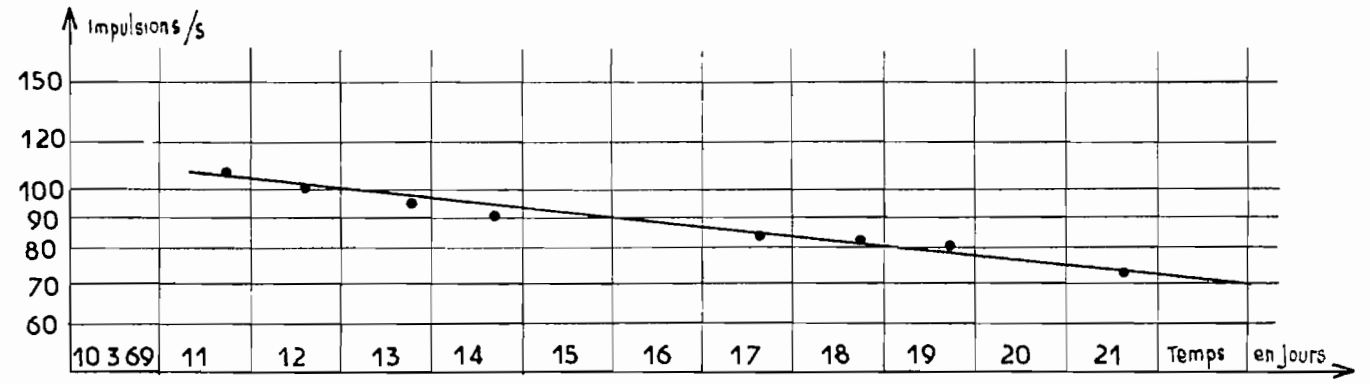
- tout d'abord la même décroissance des humidités que celle observée à partir de 110 i/s, décroissance qui correspond à la dernière averse.

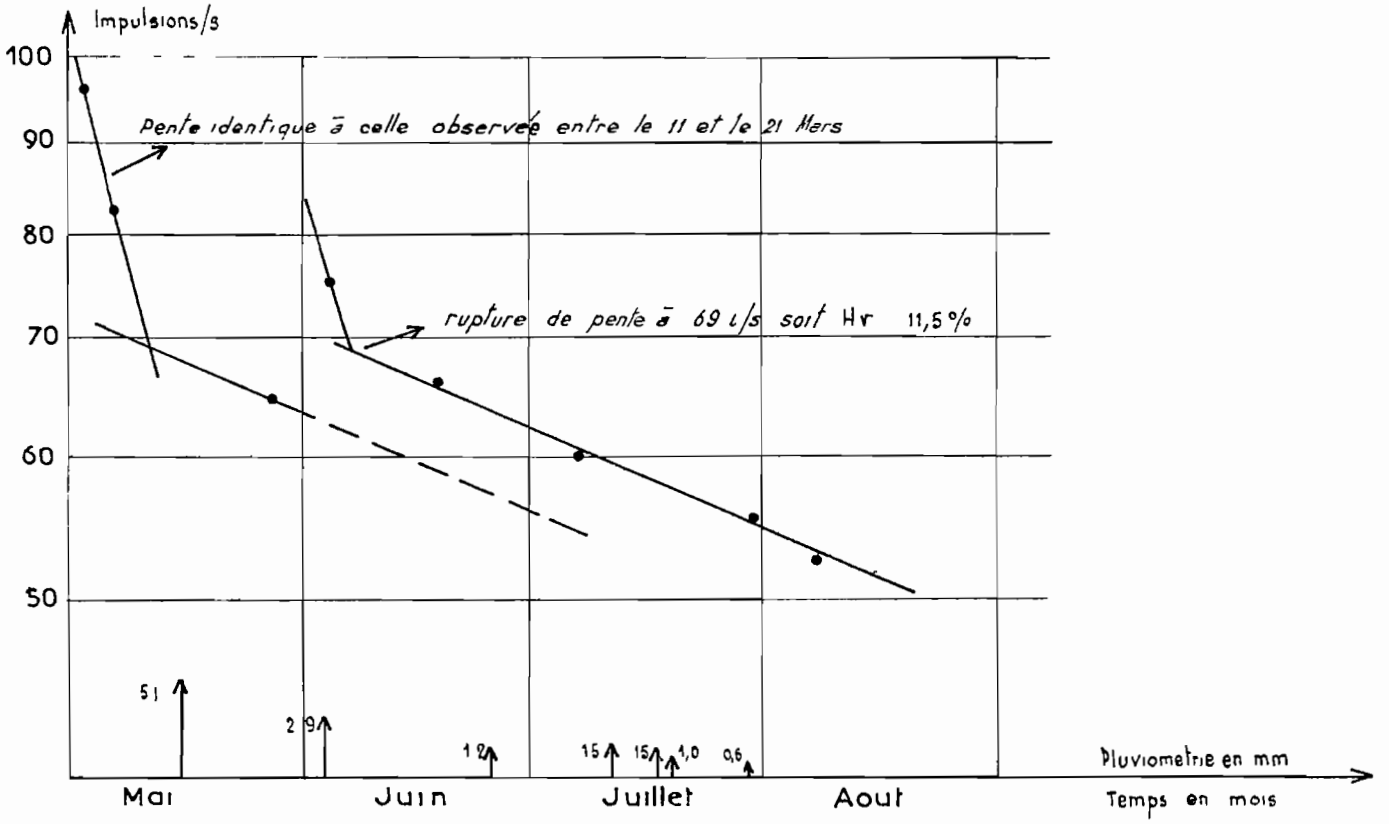
- au bout d'une douzaine de jours et alors que le comptage se situe aux alentours de 70 i/s soit 11,5 % Hv, la pente devient à nouveau plus faible et cette baisse de la teneur en eau se poursuit ainsi

d'humidité volumique ../...

DECROISSANCE DE L'HUMIDITE DU SOL EN SURFACE
mois de Mars et saison sèche 1969
figure N 6







pendant plusieurs mois, toujours exponentiellement, jusqu'à la prochaine saison des pluies (fig 6, 3ème partie).

Cette nouvelle rupture de pente, correspondant à une humidité déterminée, devrait elle aussi être caractéristique du sol. Elle est vraisemblablement voisine de l'humidité p.I 4,2.

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

On pense à priori que l'humidité préalable du sol doit avoir une influence importante sur le ruissellement, en particulier la tranche superficielle qui est directement en contact avec la pluie. 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 resumées au tableau N° 1, page suivante.

Si l'on examine

~~Nous examinerons~~ en premier lieu le rapport direct existant entre l'humidité préalable et la lame d'eau ruisselée hr mm. ~~La~~ on trouve une corrélation ~~existant~~ entre ces deux facteurs ~~est~~ extrêmement lâche très lache puisque le coefficient de corrélation r est égal à 0,29 et son carré voisin de 0,08 (fig N°7). 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 hauteur pluviométrique, suivant des découpages différents, et nous verrons ensuite si l'humidité préalable améliore ou non la corrélation établie. Dans la détermination du hauteur

on sait en effet, d'où que l'analyse des bassins représentatifs qu'en général

Nous ferons intervenir en premier lieu la hauteur pluviométrique totale Pt mm enregistrée au pluviographe (fig N° 8). La corrélation, quoique encore assez lache, r = 0,76 et r^2 = 0,58, est cependant nettement plus significative que pour l'humidité préalable . Nous allons essayer de

../...

Figure N 7

Correlation entre la lame d'eau ruisselée et l'humidité préalable du sol

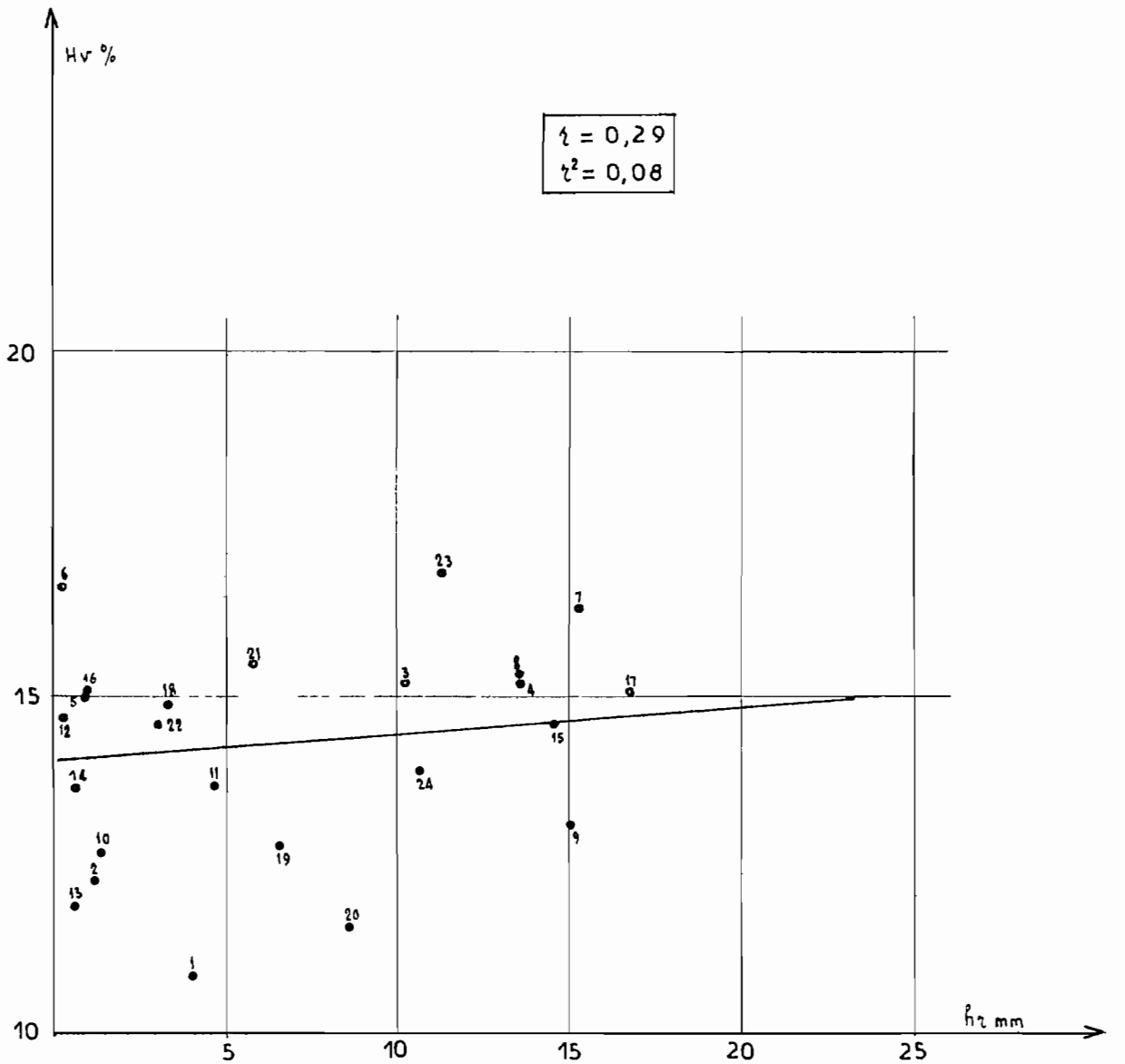


figure N 8

Correlation entre la pluviométrie totale et la lame d'eau ruisselée

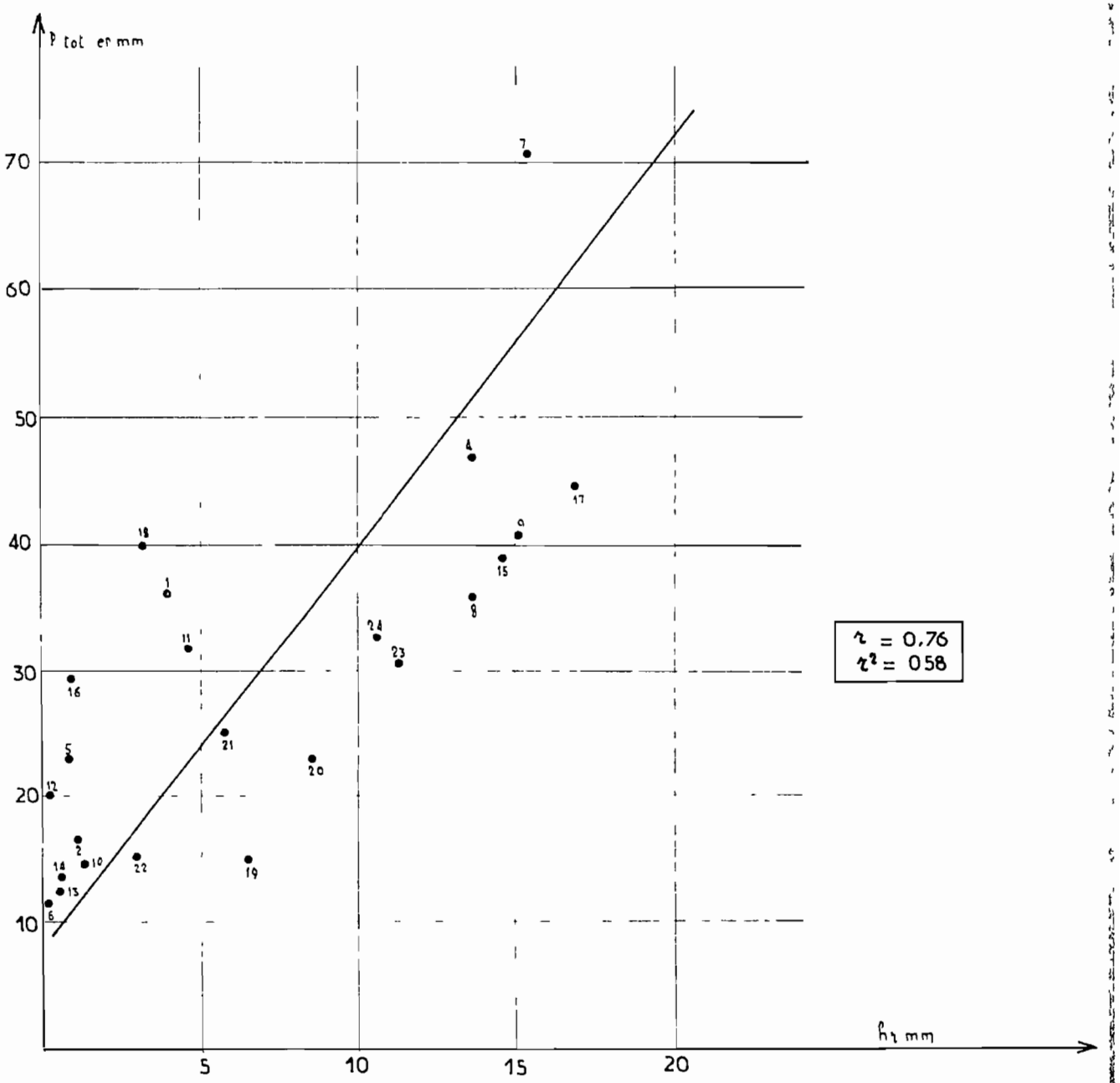


TABLEAU N° 1

N°	Date	Hr mm	C j/s	Hv %	Pt mm	Pi 10 mm	Pe 10 mm	Po 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	93,0	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	102,5	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

../...

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 :

Pi 10 = hauteur totale pluviométrique dont l'intensité est supérieure à 10 mm/h

Pe 10 = total pluviométrique excédentaire à l'intensité de 10 mm/h (exemple fig N° 9 pour l'averse du 13.1.69)

Pe e = total pluviométrique corrigé faisant intervenir les différentes intensités, supérieures à 10mm/h coef.1
-"- à 20mm/h coef.1,5
-"- à 30mm/h coef.2

Nous avons dans tous les cas tracé la courbe moyenne puis calculé le coefficient de corrélation hr observé/ hr tracé. Nous avons obtenu les résultats suivants, le calcul de r étant effectué à partir de la formule ci-après :

$$r = \frac{N\sum xy - \sum x \sum y}{\sqrt{\left[N\sum x^2 - (\sum x)^2\right]\left[N\sum y^2 - (\sum y)^2\right]}}$$

hr / Pi 10 (fig 10) $r = 0{,}916$
$r^2 = 0{,}84$

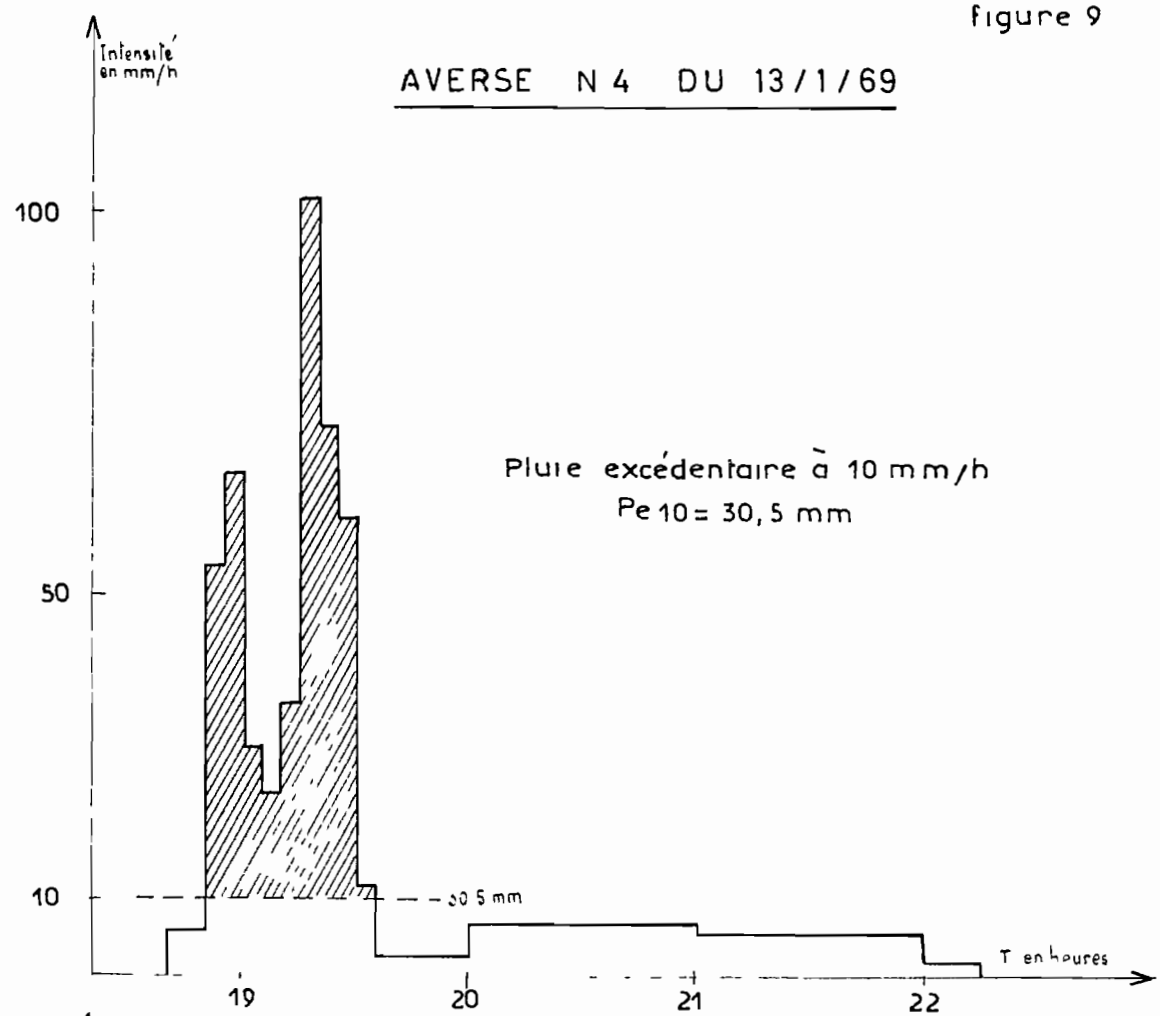
hr / Pe e (fig 11) $r = 0{,}925$
$r^2 = 0{,}86$

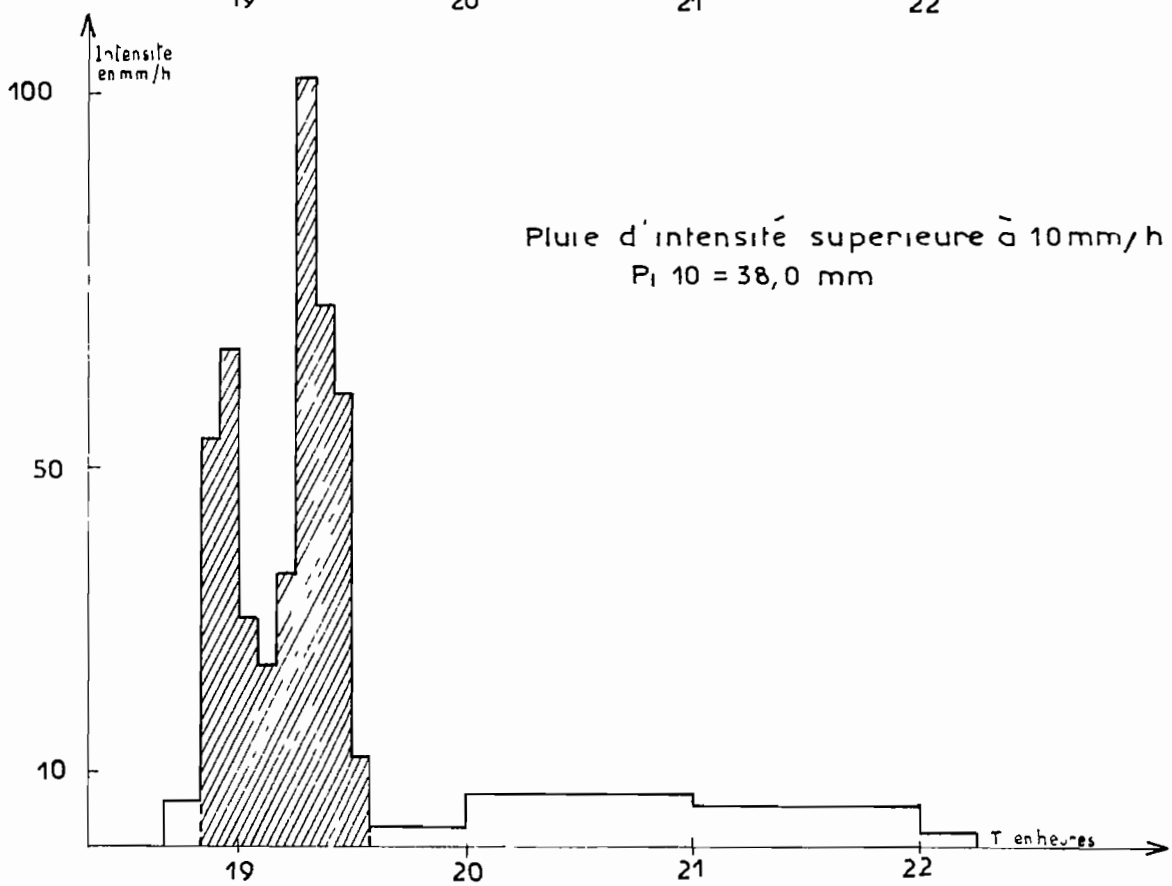
hr / Pe 10 (fig 12) $r = 0{,}942$
$r^2 = 0{,}89$

../...

figure 9

AVERSE N 4 DU 13/1/69





Le dernier paramètre, total pluviométrique excédentaire à l'intensité de 10 mm/h, était 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. Nous allons faire intervenir celui-ci comme correctif et voir dans quelle mesure la corrélation est améliorée (fig N° 13)

hr / Pe 10 corrigé Hv % $r = 0,97$

$r^2 = 0,94$

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

$r = 0,99$

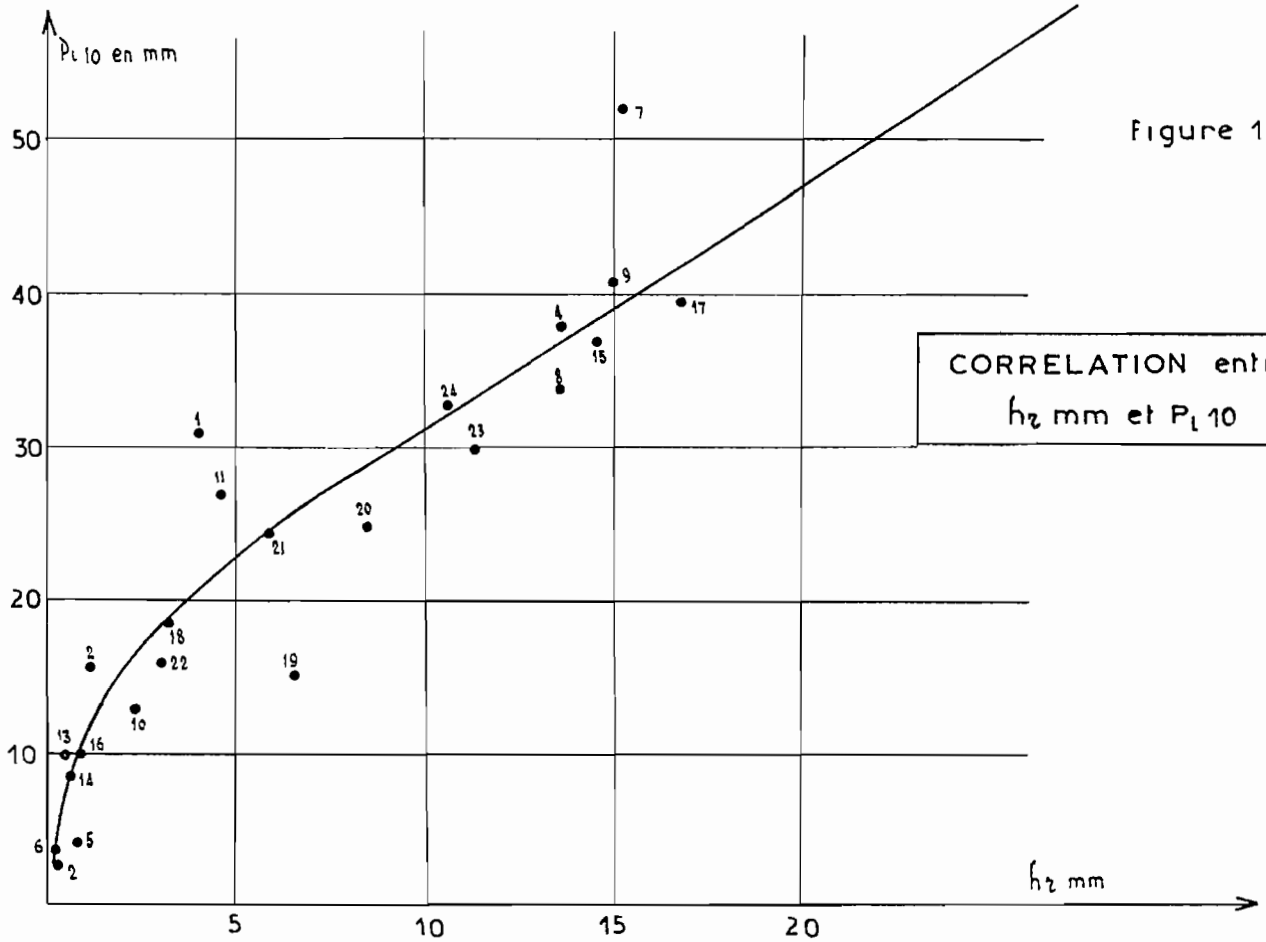
$r^2 = 0,98$

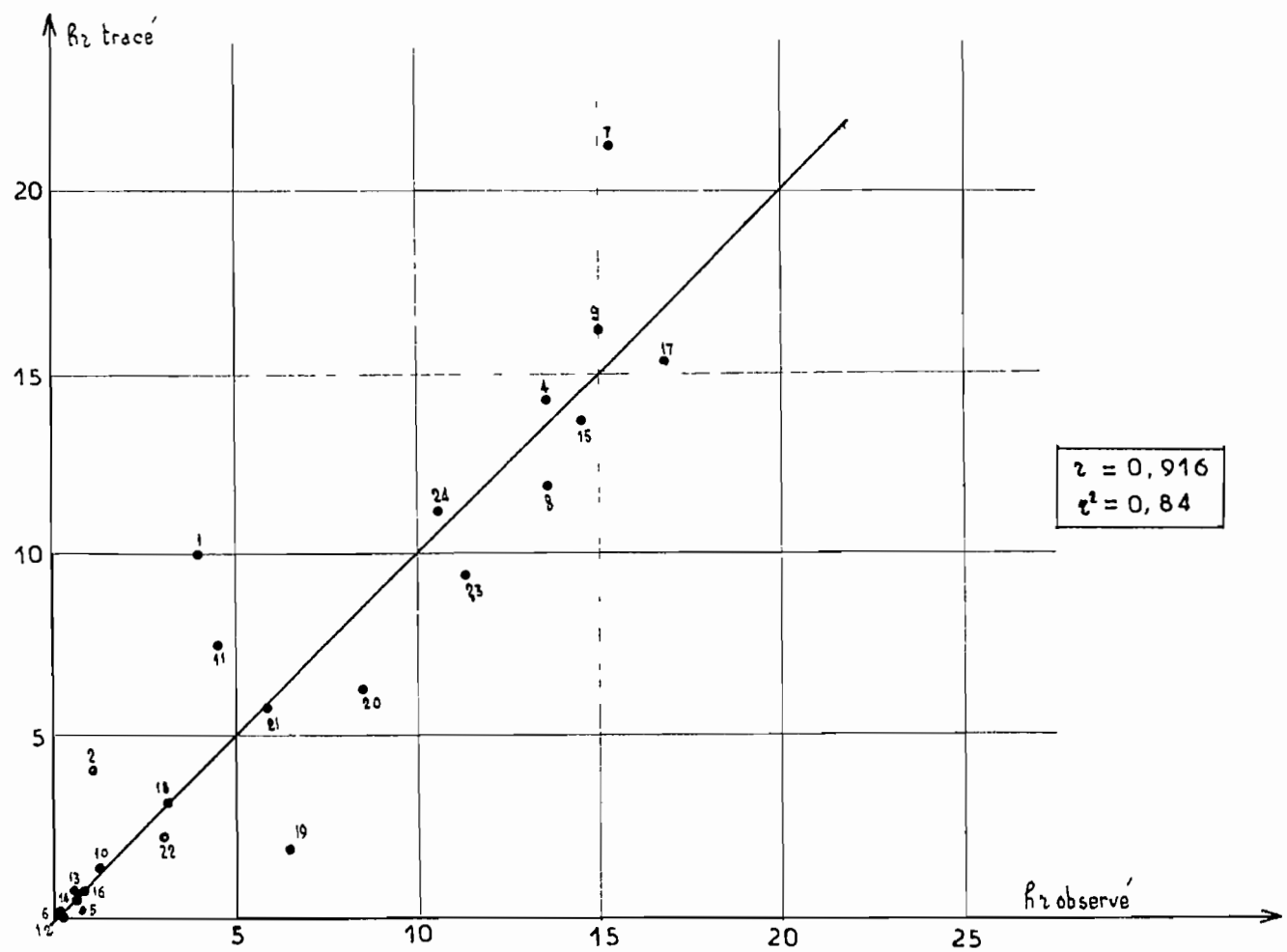
On voit donc que, en définitive, le paramètre humidité préalable du sol sur les 10 premiers centimètres, bien que non négligeable, n'est pas aussi déterminant que nous pouvions le penser avant d'avoir fait ces mesures. Cela provient très probablement du fait que la hauteur de pluie nécessaire pour atteindre l'humidité-seuil à partir de laquelle se forme le ruissellement (paragraphe 3 - 1) est, en saison des pluies et pour une intensité de 10 mm/h, assez faible.

L'humidité préalable joue donc un rôle assez important pour les faibles pluies mais ce rôle diminue au fur et à mesure que le total pluviométrique des averses est plus fort.

Figure 10

CORRELATION entre h_r mm et P_L 10





$r = 0,916$
$r^2 = 0,84$

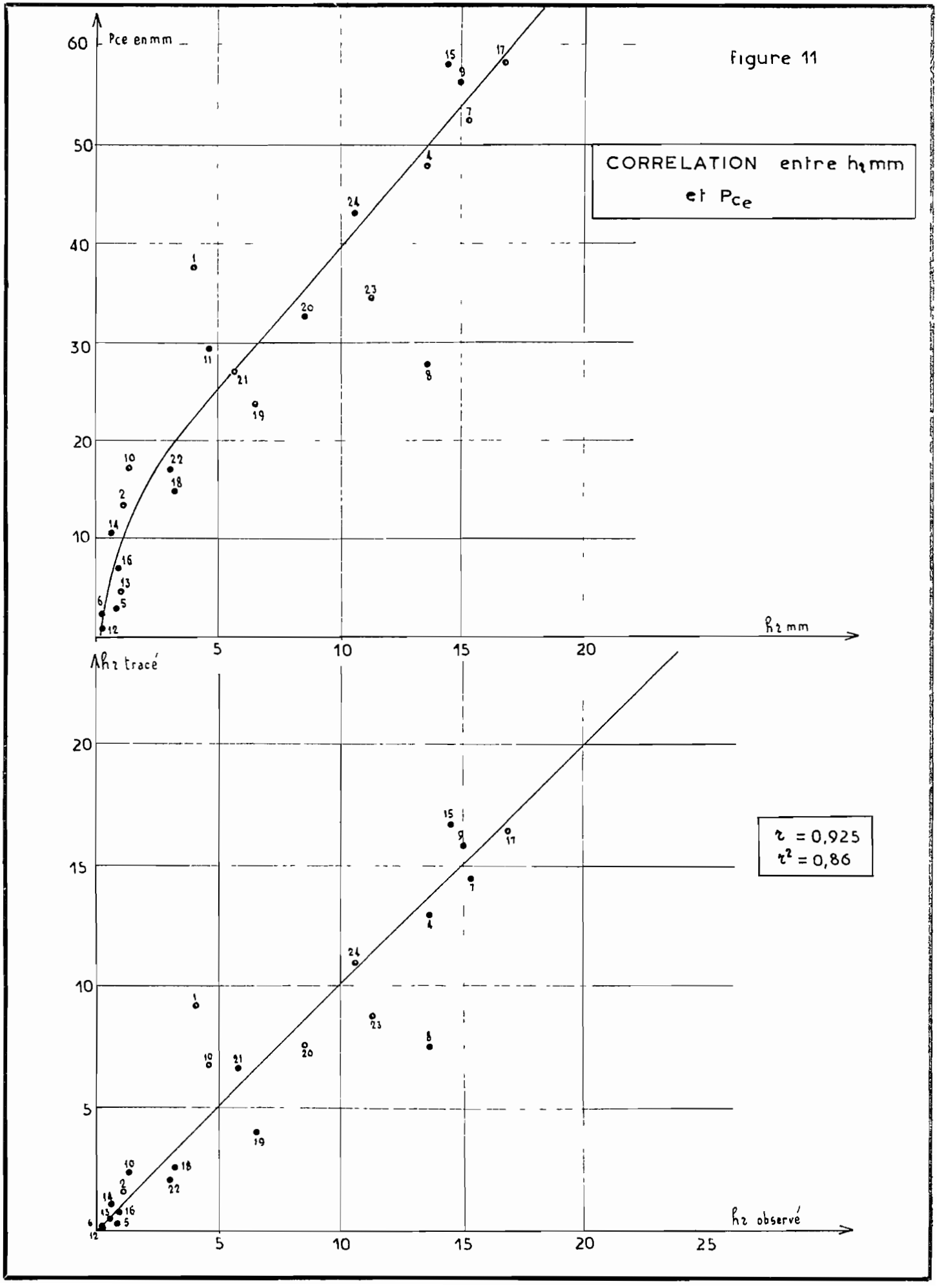
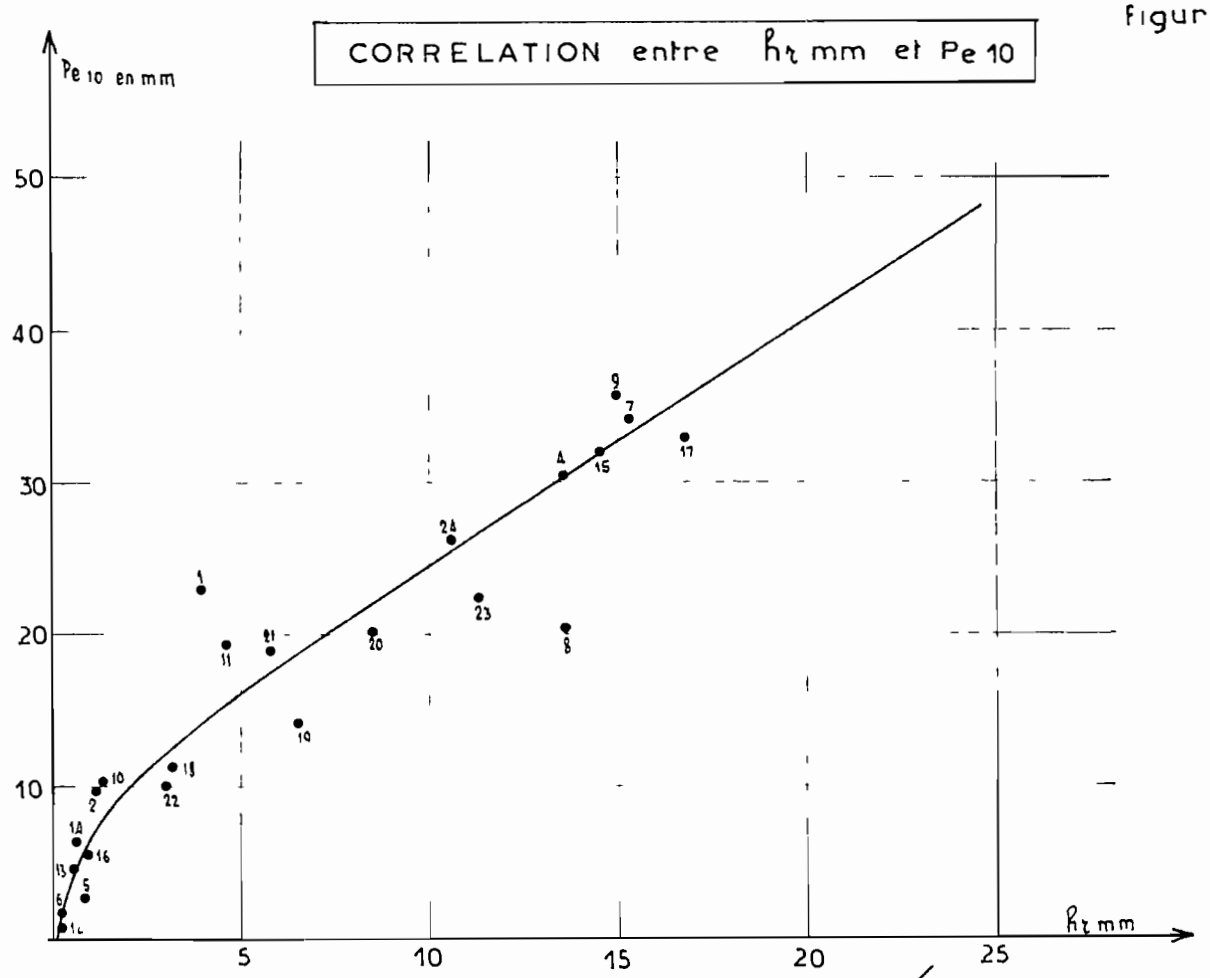
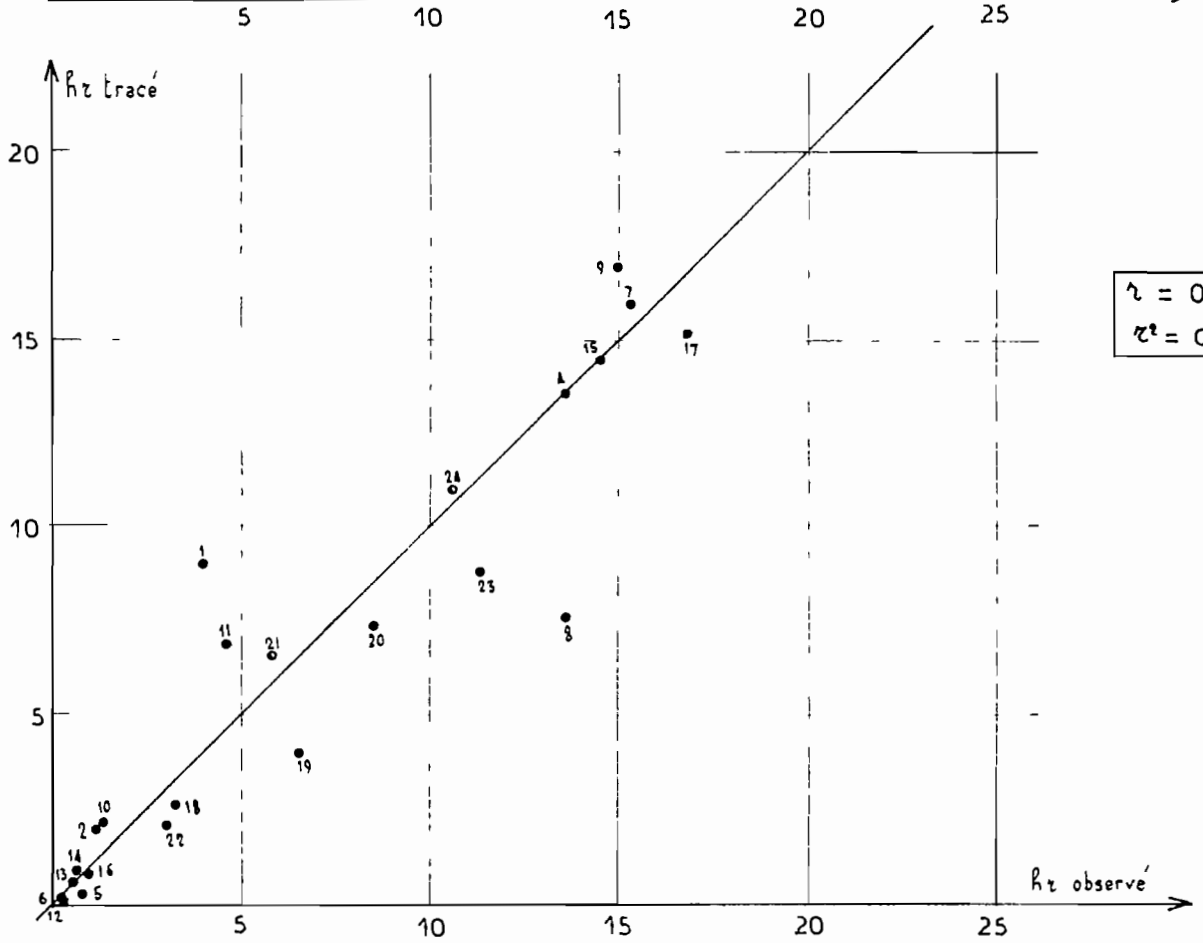


Figure 11
CORRELATION entre h_2 mm et P_{ce}
Pce en mm
h_2 mm
h_2 tracé
h_2 observé
$r = 0,925$
$r^2 = 0,86$

Figure 12

CORRELATION entre hr mm et Pe 10





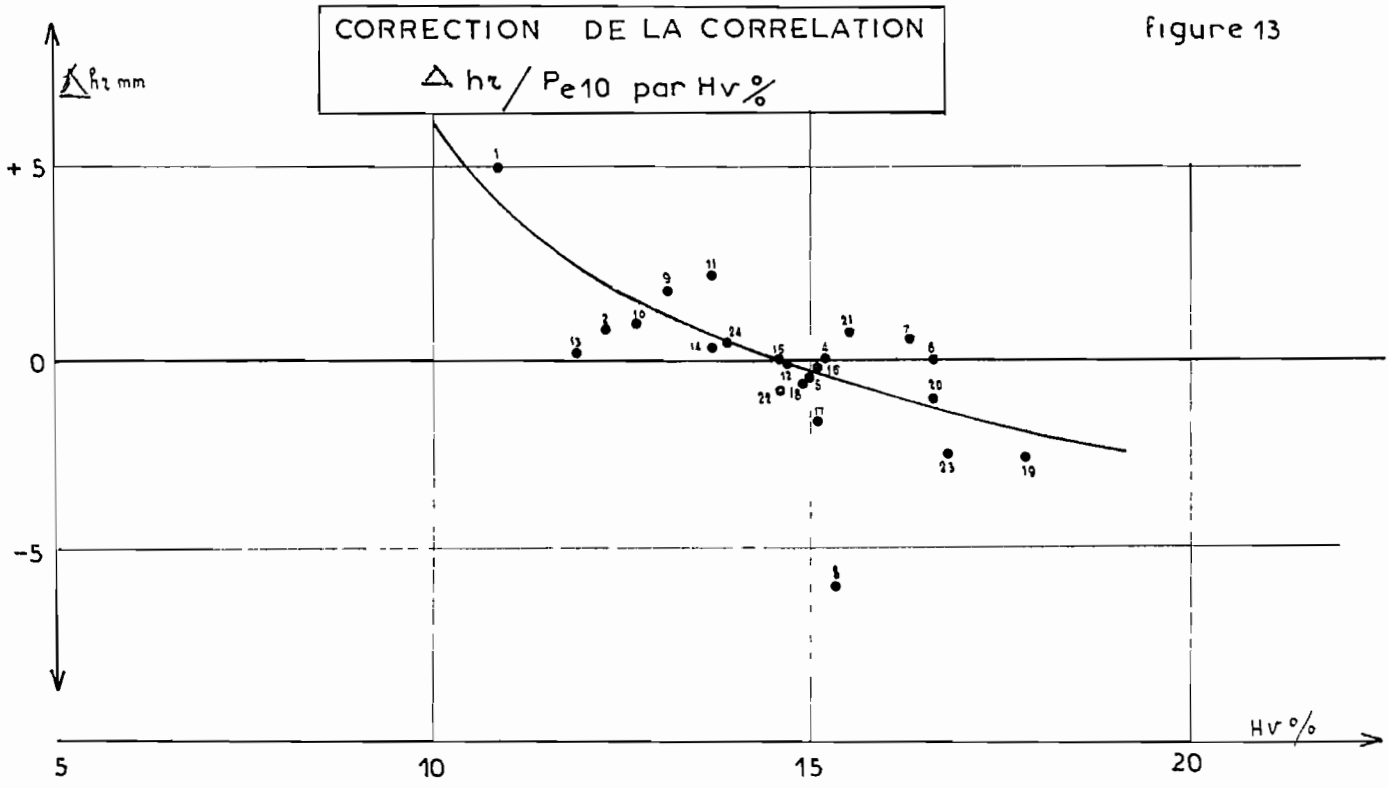
$r = 0\ 942$

$r^2 = 0,89$

figure 13

CORRECTION DE LA CORRELATION

$\Delta h_r / P_{e10}$ par H_v %



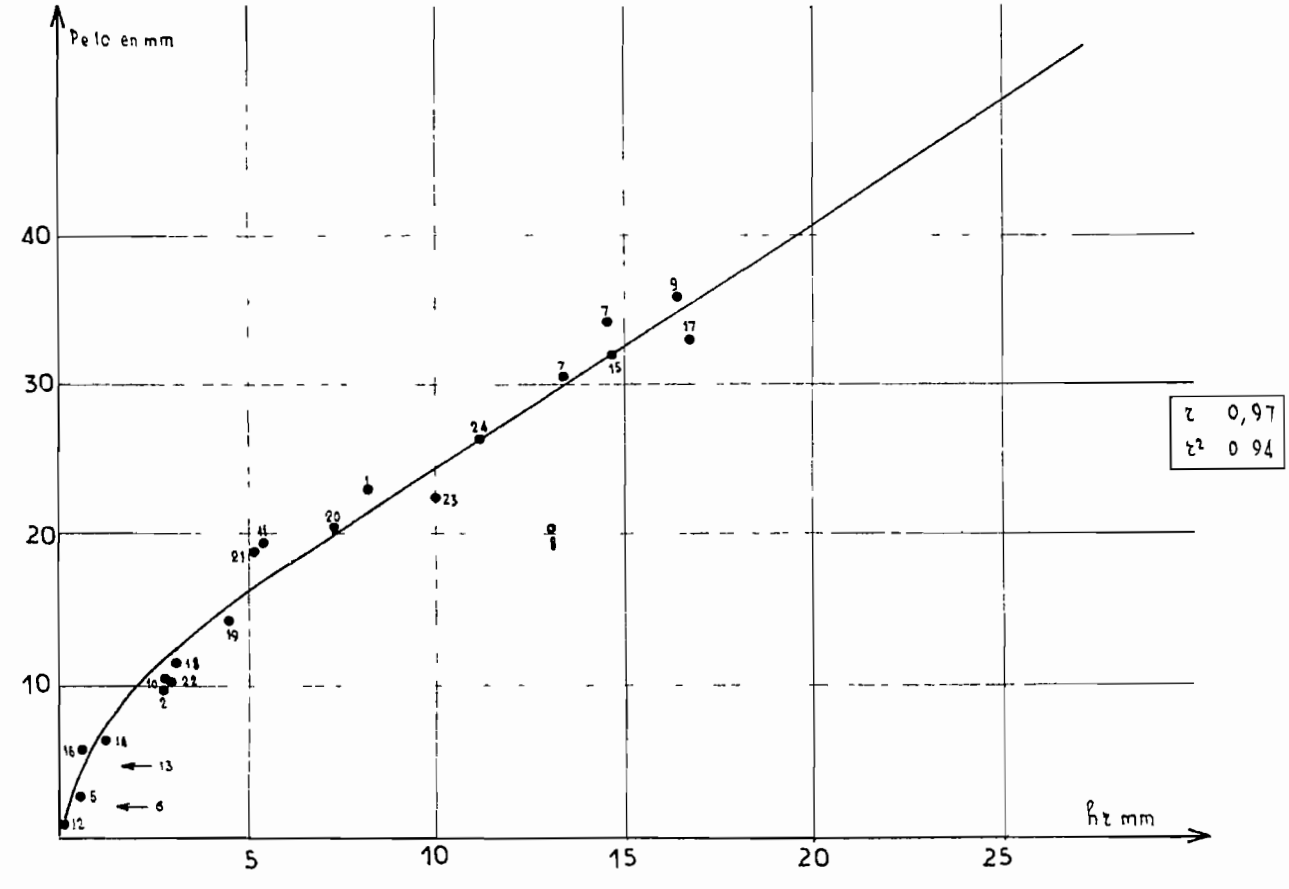
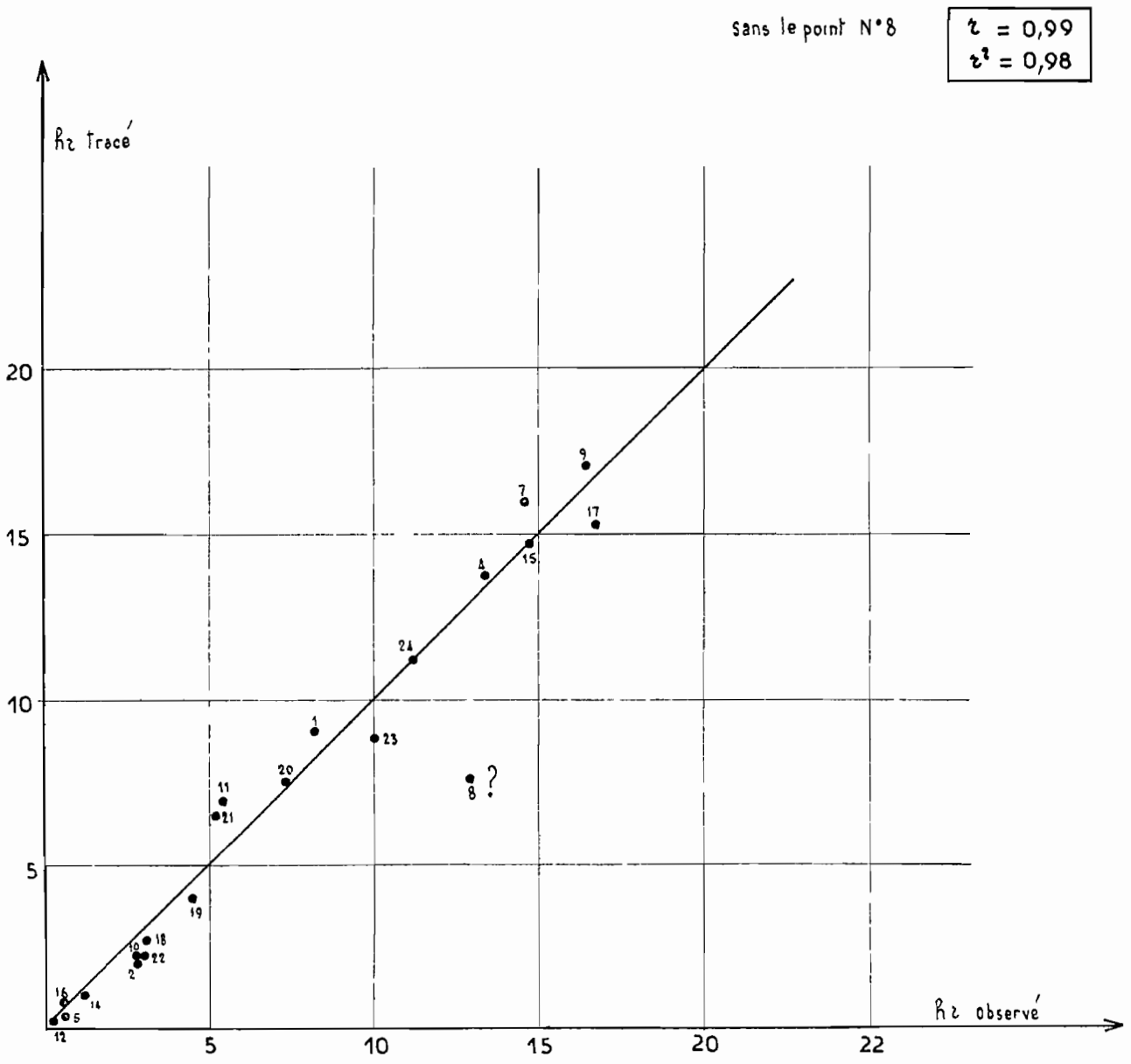


figure 14

Correlation hz / Pe 10 corrigée Hv %



CONCLUSION

Ce prototype d'humidimètre (mise au point P. MOUTONNET) de surface, 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 (collecte et exploitation P. POURRUT), bien qu'infirmant notre idée primitive, puisque nous avons démontré que l'influence de l'humidité des 10 premiers centimètres du sol n'est un facteur ~~mais~~ secondaire du ruissellement, sont cependant très positifs. Nous pensons que, pour l'avenir, il faudrait envisager l'exploration d'une tranche de sol plus importante, de l'ordre de 50 centimètres, son rôle sur l'écoulement de surface étant peut-être plus important que la faible épaisseur de 10 cm choisie arbitrairement à priori.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

a) G. VUILLAUME - Etude Analytique du Ruissellement et de l'Erosion. Rapport du Service Hydrologique de l'ORSTOM Novembre 1969.

b) P. POURRUT - "Utilisation pratique de l'humidimètre à neutrons pour les mesures hydrologiques - Premiers résultats obtenus sur le B.V. de la TARAINA - MADAGASCAR"
Cahiers ORSTOM, Série Hydro, Vol V, N° 2, 1968.

c) P. MOUTONNET - Une méthode neutronique de mesure de l'humidité des sols en surface. IDARI, vol 20, 1969.

d) De VRIES J. and KING K. - Note on the volume of influence of a neutron surface moisture probe. Can J. Soil. Sci. 41, 253 (1961)

e) VAN BAVEL - Neutron measurement of surface soil moisture. J. Géophys. Res. 66, 4193 (1961)

f) CARIOU, DELTOMBE, WAJDENFELD - Etude des caractéristiques d'un humidimètre neutronique à pointe.
Fiche programme N° 62 099. Mai 1969.
Organisme Technique Régional des Ponts & Chaussées.

g) PEYBERNARD & DUPRESNE - Juillet 1967 étude de la sonde KIATEC H D M 4 - Rapport interne du laboratoire central des Ponts et Chaussées.

h) J. MARCESSE - "Détermination in situ des capacités de rétention d'un sol au moyen de l'humidimètre à neutrons"
Isotop au Radiations Techniques - A.I.E.A - VIENNE 1967

i) P. POURRUT - "Détermination de certaines caractéristiques hydrodynamiques des sols par utilisation de méthodes neutroniques"
Cahiers ORSTOM, série hydrologie - à paraître 1970.