

**COMITÉ INTERAFRICAIN
D'ÉTUDES HYDRAULIQUES**

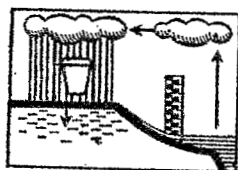
A. CASENAVE

N. GUIGUEN

**ETUDE DES CRUES DECENNALES DES PETITS
BASSINS FORESTIERS EN AFRIQUE TROPICALE**

**DETERMINATION DES CARACTERISTIQUES
HYDRODYNAMIQUES DE SOLS FORESTIERS**

CAMPAGNE 1977



OFFICE DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE ET TECHNIQUE OUTRE-MER

CENTRE D'ADIPODDUMÉ - CÔTE D'IVOIRE

B.P.V 51 - ABIDJAN



AVRIL 1978

D8
CAS

15.096

ETUDE DES CRUES DECENNALES DES PETITS
BASSINS FORESTIERS EN AFRIQUE TROPICALE :

DETERMINATION DES CARACTERISTIQUES HYDRODYNAMIQUES
DE SOLS FORESTIERS

CAMPAGNE 1977.

A. CASENAVE

Chargé de Recherches

N. GUIGUEN

Hydrologue



27 MARS 1979

D 8
CAS

15.096

Sommaire

Introduction

I. PRESENTATION DE L'ETUDE

- 1.1 Historique
- 1.2 Note préliminaire
- 1.3 Utilité du simulateur de pluie
- 1.4 Conclusion

II. CADRE DE L'ETUDE : LES BASSINS DE GUESSIGUE

- 2.1 Le bassin du Manso

III. LE SIMULATEUR DE PLUIE OU INFILTROMETRE p. 4

- 3.1 Objectifs de l'appareil
- 3.2 Principe de l'appareil
- 3.3 Caractéristiques d'utilisation
- 3.4 Etude de l'énergie cinétique des pluies simulées

IV. DISPOSITIF EXPERIMENTAL p 24

- 4.1 Etude pédologique
- 4.2 Choix et aménagement des parcelles de mesure

V. PROTOCOLE EXPERIMENTAL ET PROGRAMME DES ESSAIS p 31

VI. MESURES EFFECTUEES p 34

VII. RESULTATS OBTENUS p 40

- 7.1 Hydrogramme de ruissellement
- 7.2 Influence de la durée de l'averse sur l'hydrogramme
- 7.3 Données de base

VIII. ANALYSE DES PREMIERS RESULTATS p 47

- 8.1 Etude de la lame ruisselée
- 8.2 Etude de l'intensité maximale de ruissellement
- 8.3 Etude de la détention superficielle
- 8.4 Etude de la pluie d'imbibition
- 8.5 Conclusion

Conclusion p. 60

Bibliographie

Annexes

- Construction du simulateur
- Description des profils pédologiques
- Pluviométrie journalière.

Introduction

Le 9 septembre 1976, une convention portant sur l'étude des débits de crue decennale des bassins de superficie inférieure à 200 km² en zone forestière, était signée par le CIEH et l'ORSTOM.

La première tranche de cette étude couvrait deux opérations :

- L'établissement, à partir des données existantes, d'une note préliminaire donnant une méthode sommaire pour le calcul du débit maximal et du volume des crues décennales. Cette note a été publiée à la fin de l'année 1976.

- Des travaux de terrain permettant une meilleure approche de l'influence de la nature du sol sur le ruissellement. Cette étude des caractéristiques hydrodynamiques des sols forestiers a été entreprise en Côte d'Ivoire dans la région de GUESSIGUE. Le présent rapport rend compte des moyens mis en oeuvre, des mesures effectuées et des résultats obtenus au cours de la première campagne.

On doit souligner que ce travail n'a pu être mené à bien que grâce à la collaboration des chercheurs et techniciens pédologues du Centre ORSTOM d'Adiopodoumé et particulièrement J. ASSELINE et C. VALENTIN.

I. PRESENTATION DE L'ETUDE

1.1. Historique :

Lors de la rédaction en 1965, pour le C.I.E.H., de la note sur "l'estimation des débits de crues décennales des petits bassins d'Afrique Occidentale", l'ORSTOM a constaté que les coefficients de ruissellement des douze bassins forestiers déjà étudiés variaient dans des proportions telles, sans qu'il soit possible d'en déterminer exactement les causes, qu'il était impossible de choisir un coefficient pour le calcul de la crue decennale d'un bassin donné.

Depuis cette époque d'autres études ont été menées par l'ORSTOM, sur des bassins forestiers, sans apporter d'amélioration sensible à cette détermination des coefficients de ruissellement. Les travaux d'aménagement se multipliant en Afrique dans ces zones forestières, cette lacune devait être comblée. C'est pourquoi l'ORSTOM à la demande du C.I.E.H., a entrepris, dans un premier temps, la mise au point d'une note préliminaire permettant de rassembler l'ensemble des données disponibles en 1976 et d'en tirer des règles provisoires pour le calcul des caractéristiques de la crue décennale.

1.2. Note préliminaire :

Dans cette note est faite l'analyse de la totalité des informations, relatives à l'écoulement, recueillie sur 24 bassins représentatifs d'Afrique (Côte d'Ivoire, Cameroun, Congo, Gabon) et sur 3 bassins de Guyane. Si l'influence de la pente sur la forme de l'hydrogramme se dégage nettement de cette analyse, il n'en est pas de même quant au rôle de la nature des sols sur les variations des coefficients de ruissellement. Les bassins ont été classés en 6 catégories différentes en fonction de leur perméabilité ; si pour certains la classification est évidente, pour d'autres, faute de savoir exactement comment réagissent les sols, on les a classés plus en fonction du ruissellement observé que de critères pédologiques surs. Aussi est apparue la nécessité d'entreprendre des recherches sur le comportement hydrodynamique des différents épisodes pluvieux ; l'idéal à atteindre étant de pouvoir classer un bassin inconnu dans une des six catégories précédemment évoquées à la suite d'une simple reconnaissance pédologique.

1.3. Utilité du simulateur de pluie :

Le grand nombre de paramètres influençant le comportement hydrodynamique des sols en rend l'étude sur le terrain et sous pluie naturelle très délicate. Pour espérer analyser le rôle des différents facteurs (pluie, nature du sol, couverture végétale, etc...) et déterminer la part de chacun dans le résultat observé, il faut pouvoir

soit les éliminer un à un, soit, ce qui est encore préférable, pouvoir fixer à volonté leurs valeurs. Bien qu'on ne puisse espérer agir sur tous les facteurs, du moins peut-on essayer de quantifier l'influence des principaux. La pluie est l'un de ces principaux facteurs, d'où l'idée d'un simulateur de pluie permettant de fixer à volonté les caractéristiques des averses (intensité, durée et hauteur totale). Un tel dispositif existait en Côte d'Ivoire où il était utilisé par une équipe pluridisciplinaire (hydrologie, pédologie et radio-isotopes) du Centre ORSTOM d'Adiopodoumé. Il était cependant difficile d'envisager l'emploi de ce dispositif pour notre étude. En effet le second point délicat posé par l'étude des caractéristiques des sols résulte de la variabilité spatiale importante de ces caractéristiques. Le problème de la représentativité des mesures impose une alternative :

- soit multiplier les essais sur des surfaces réduites d'un même type de sol pour en tirer des valeurs moyennes, d'où la nécessité d'un appareillage léger et maniable,
- soit étudier une surface suffisamment étendue pour masquer l'influence de l'hétérogénéité, ce qui suppose un dispositif lourd et encombrant.

L'équipe d'Abidjan travaillant exclusivement en savane ou au contact forêt-savane avait opté pour la deuxième solution. Malgré les résultats prometteurs obtenus, il nous était impossible, vu la lourdeur du dispositif nécessitant des pistes accessibles aux camions, de vastes espaces découverts et une alimentation en eau abondante, d'espérer l'employer en zone de forêt d'accès beaucoup plus difficile. Seule la première solution nous restait accessible à condition de mettre au point un dispositif de simulation des pluies léger, facilement transportable, consommant peu d'eau, en un mot bien adapté aux conditions de travail plus contraignantes des zones forestières.

1.4. Conclusion :

Les études précédentes ont montré la nécessité de mesurer les caractéristiques hydrodynamiques des sols, particulièrement sur les bassins représentatifs forestiers ayant de forts coefficients de ruissellement et dont la classification à partir des critères pédologiques existants n'est pas évidente. Les avantages offerts pour ce type d'étude par un simulateur de pluie, bien adapté au milieu forestier sont à l'origine des mesures entreprises sur le bassin du Manso (Région de Guessigué).

II - CADRE DE L'ETUDE : LES BASSINS DE GUESSIGUE

Le service hydrologique de l'ORSTOM a été chargé, en 1959, par le Service du Génie Rural de Côte d'Ivoire, d'étudier les caractéristiques hydrologiques de la rivière AGNEBY. Dans le cadre de cette étude, trois bassins versants expérimentaux ont été installés et exploités pendant quatre ans, à proximité du village de Guessigué (fig. 1). Ces trois bassins versants (Sitou, Bafo, Manso) ont montré des coefficients de ruissellement très élevés pour la zone forestière. De plus leur classification à partir de critères pédologiques n'est pas évidente. C'est pour ces raisons qu'il a été décidé d'implanter les premiers essais au simulateur de pluie sur un de ces bassins. Les reconnaissances ayant montré que les bassins du Sitou et du Bafo étaient à l'heure actuelle très déforestés alors que celui du Manso, occupé en grande partie par la forêt classée du Yapo, avait été plus épargné par les cultures, ce dernier a été retenu pour les essais.

2.1. Le bassin du Manso

2.1.1. Description sommaire (fig. 2)

La station hydrométrique, installée au pont de la piste Agboville - Guessigué - Elovi, contrôle un bassin de 92,5 km². Ce bassin qui a une forme très compacte, assimilable à un carré de 10 km sur 10, est couvert à 70 % par la forêt naturelle. Cette forêt classée du Yapo est très dense et représente l'archétype des forêts que l'on peut trouver sur le bassin de l'Agneby (forêt hygrophile à Mapania). Le relief du bassin est assez mou ; les pentes transversales des thalwegs dépassent rarement 10 % et la pente moyenne du Manso peut être estimée à 1 à 1,5 %. Il en résulte des lits sinueux qui ne sont bien marqués qu'à l'aval du bassin. En saison des pluies, les eaux débordent dans le lit majeur qui forme un large marécage. Ces fonds de thalweg sont occupés par des sols hydromorphes qui contiennent une nappe phréatique permanente dont la profondeur ne dépasse guère 2 mètres à l'étiage et qui remonte pratiquement en surface pendant la saison des pluies. Du fait de la remontée de la nappe, ces sols sont totalement engorgés en saison des pluies et ruissellent de façon importante. Les pentes et les plateaux sont occupés par des sols ferrallitiques présentant très souvent un horizon gravillonnaire et argileux à faible profondeur.

2.1.2. Equipement et mesures

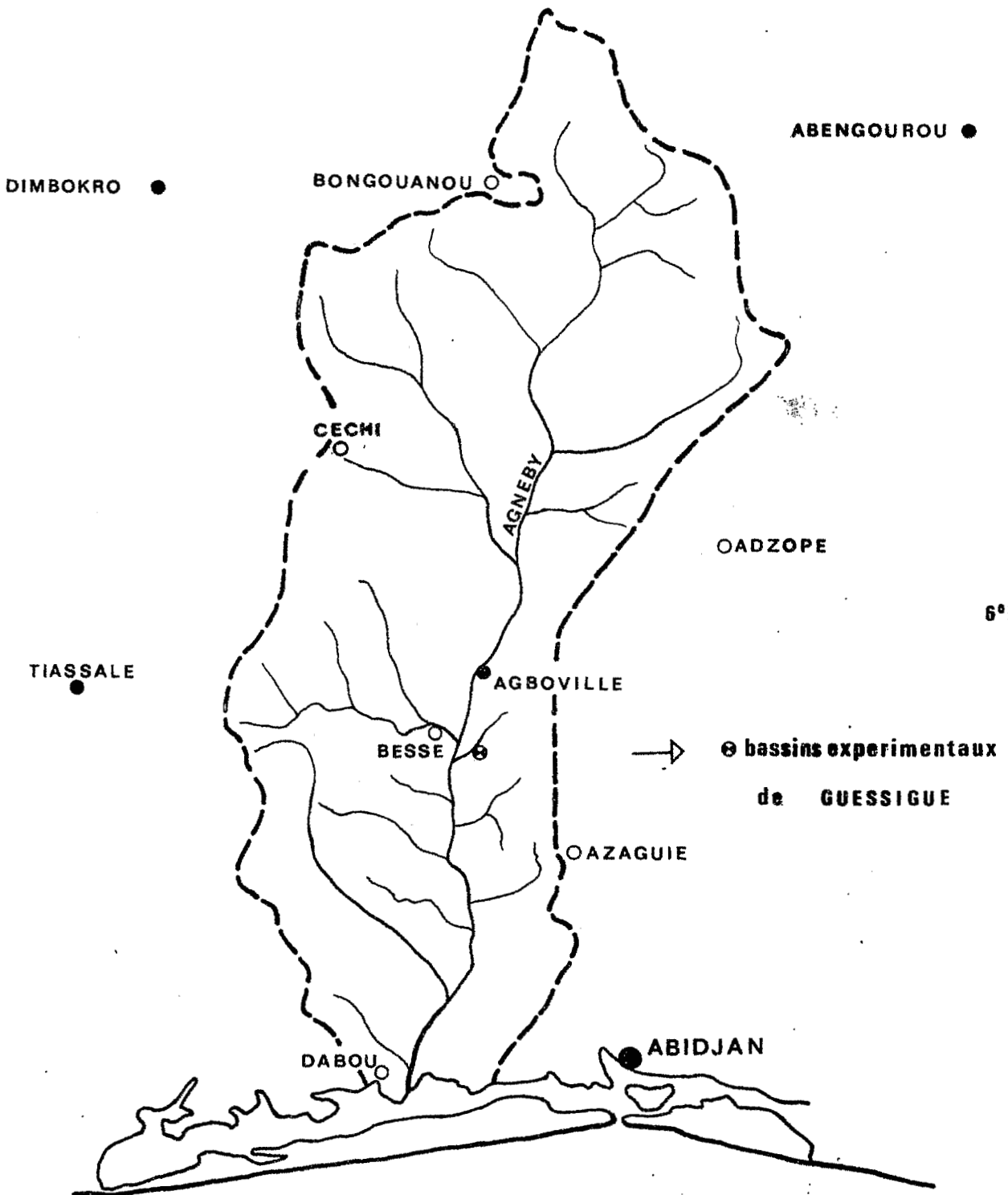
La station utilisée pour l'étude de 1959-1962 a été remise en état. Les échelles limnimétriques (0-4 m) ont été recalées et un élément de basses eaux (-1, 0) a été ajouté. L'enregistrement des hauteurs d'eau est assuré par un

Fig 1

BASSIN VERSANT de l'AGNEBY

situation des bassins de GUESSIGUE

7°N



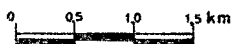
6°N

5°W 4°30W 4°W 3°30W

BASSIN DU MANSO

Fig. 2

- Courbes de niveau
- Réseau hydrographique
- - - Limite du bassin
- ⊙ Toposéquence étudiée

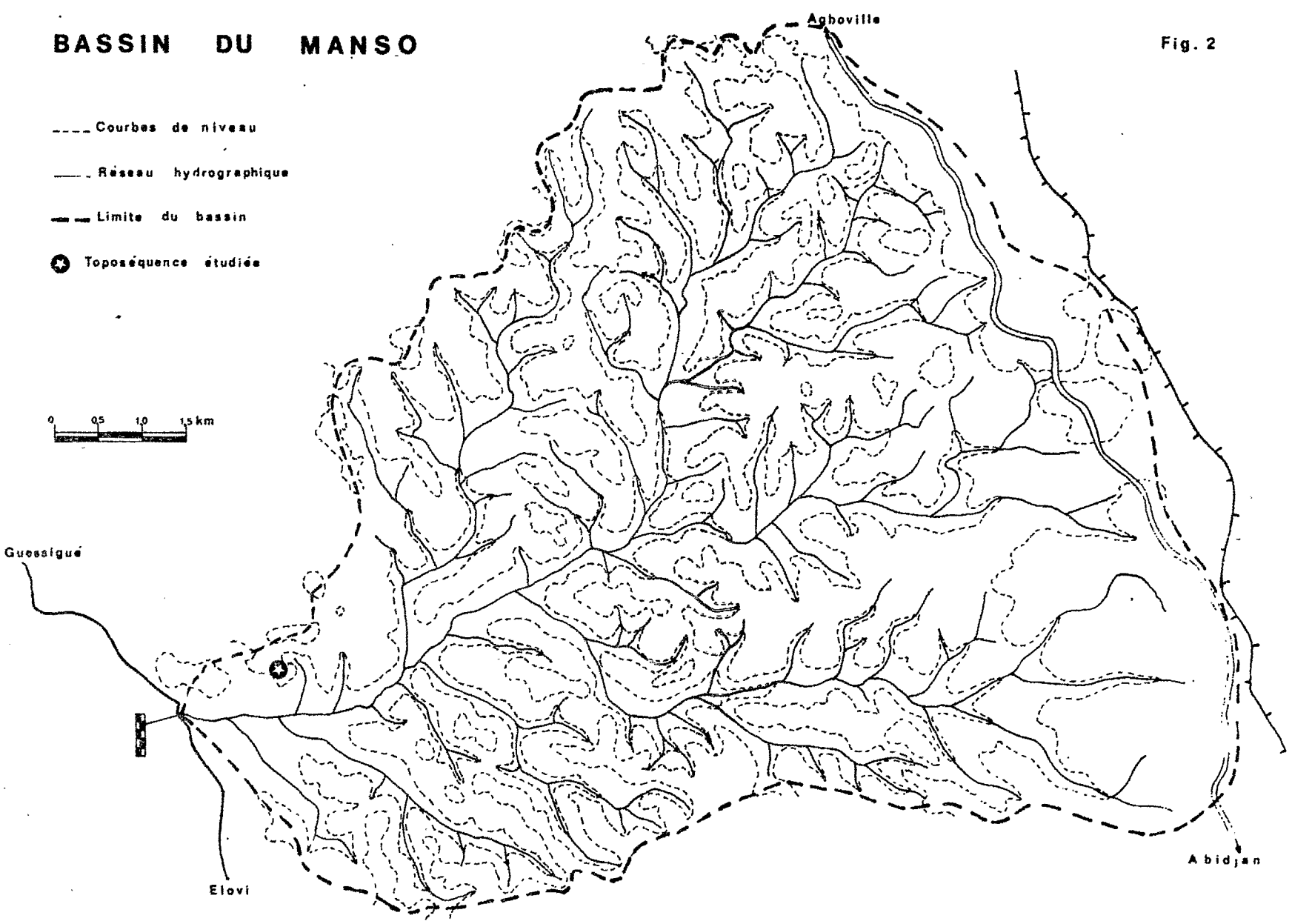


Guessigué

Agboville

Elovi

Abidjan



limnigraphe OTT type X à rotation hebdomadaire, fixé sur le bajoyer rive gauche du pont. Neuf jaugeages, dont les résultats sont donnés dans le tableau ci-après, ont été effectués afin de contrôler la validité de la courbe de tarage établie en 1962. Ces mesures ont confirmé que l'ancienne courbe est toujours valable pour les moyennes et les hautes eaux ; pour les basses eaux elles ont permis de mettre en évidence un important detarage (fig. 3).

Date	H cm	Q m ³ /s
20.07.1977	3,5	0,106
28.09.1977	152 - 144	5,86
28.09.1977	144 - 134	5,30
28.09.1977	119.- 116	4,40
28.09.1977	114 - 111	4,22
30.09.1977	176 - 162	6,98
06.01.1978	- 9,0	0,0173
07.03.1978	51 - 49	0,895
08.03.1978	20	0,323

Afin de situer les essais au simulateur de pluie par rapport aux pluies antérieures, un pluviographe à rotation journalière a été mis en place au sommet de la toposéquence étudiée. Un observateur relève tous les matins le seau du pluviographe. La pluviométrie journalière mesurée à ce poste est donnée en annexe.

Enfin un piezomètre a été implanté au bas de la toposéquence. Il permet de suivre les variations de niveau de la nappe phréatique. La profondeur de cette nappe est mesurée avant chaque essai au simulateur.

III - LE SIMULATEUR DE PLUIE OU INFILTROMETRE

3.1. Objectifs de l'appareil

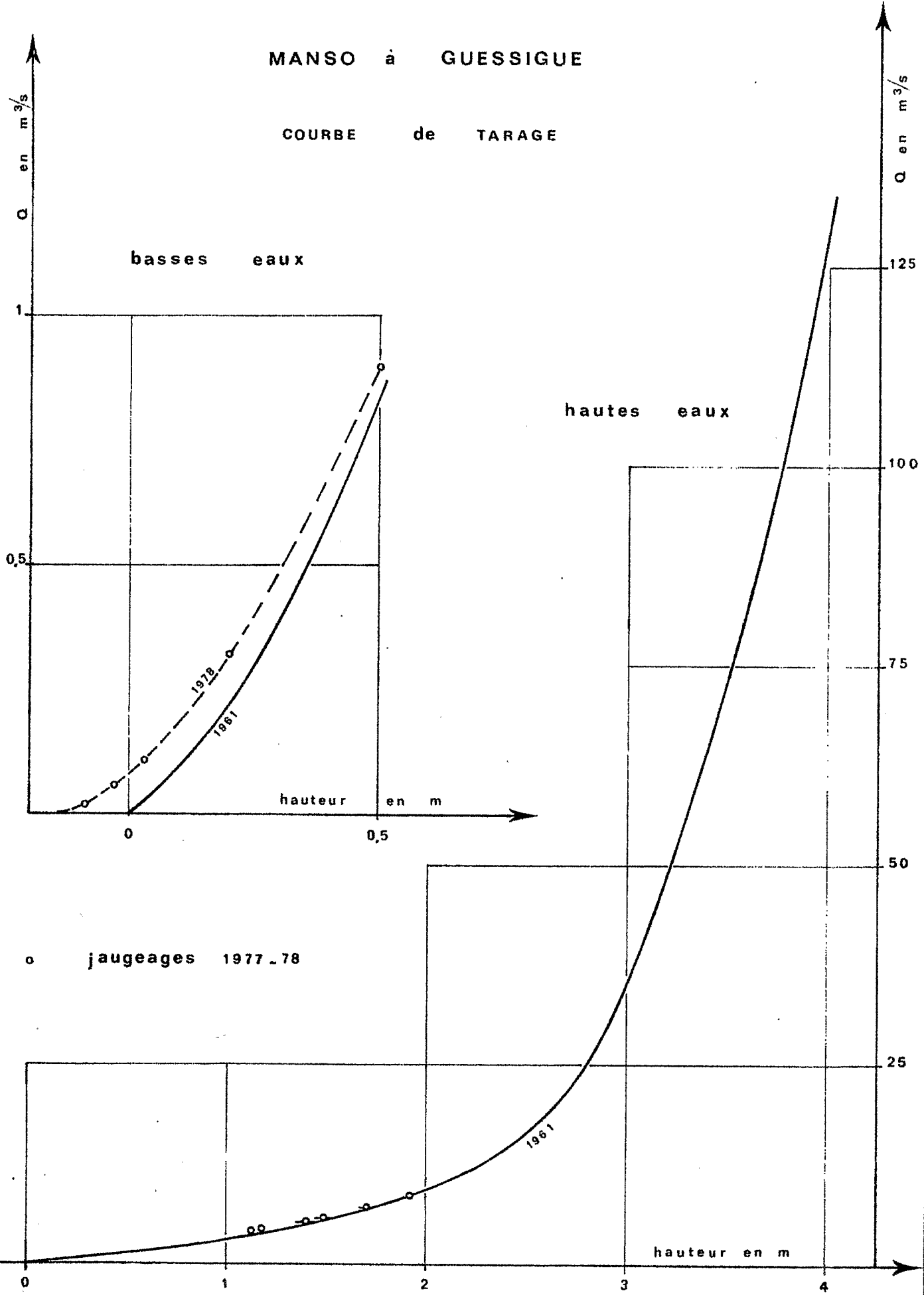
Cet appareil devant servir à tester les réactions des sols à un ou plusieurs épisodes pluvieux, il devait satisfaire, outre les exigences concernant sa mise en oeuvre (appareil léger, maniable, consommant peu d'eau, d'une construction et d'un emploi peu coûteux) aux impératifs suivants :

- réalisation de pluies artificielles parfaitement reproductibles

Fig.3

MANSO à GUESSIGUE

COURBE de TARAGE



- Réalisation de pluies dont les caractéristiques énergétiques (énergie cinétique des gouttes) soient les plus proches possible de celles des pluies naturelles.

- Réalisation de pluies similaires aux pluies naturelles ce qui suppose la possibilité de régler à tout moment, sans interruption, d'une manière progressive et continue, l'intensité de l'averse dans une gamme la plus large possible.

Aucun des appareils existant sur le marché ne répondait à ces trois conditions. L'infiltromètre de BERTRAND et PARR, d'un emploi courant aux U.S.A., s'il satisfait aux deux premières conditions, ne permet de simuler que trois intensités différentes (64, 83 et 117 mm/h). De plus ces variations d'intensité se faisant par un changement de gicleur, elles nécessitent une interruption de la pluie. Aussi était-il nécessaire de mettre au point un appareil nouveau qui, tout en conservant le principe de l'infiltromètre de Bertrand et Parr, permette en plus le réglage des intensités. Le laboratoire de pédologie expérimentale d'Adiopodoumé, bénéficiant de l'expérience acquise lors de la construction du grand simulateur, s'est chargé de la conception de cet appareil, dont la construction et la mise au point ont fait l'objet d'un rapport (J. ASSELINE, C. VALENTIN) d'où sont extraits la plupart des renseignements présentés dans les paragraphes suivants.

3.2. Principe de l'appareil (fig. 4)

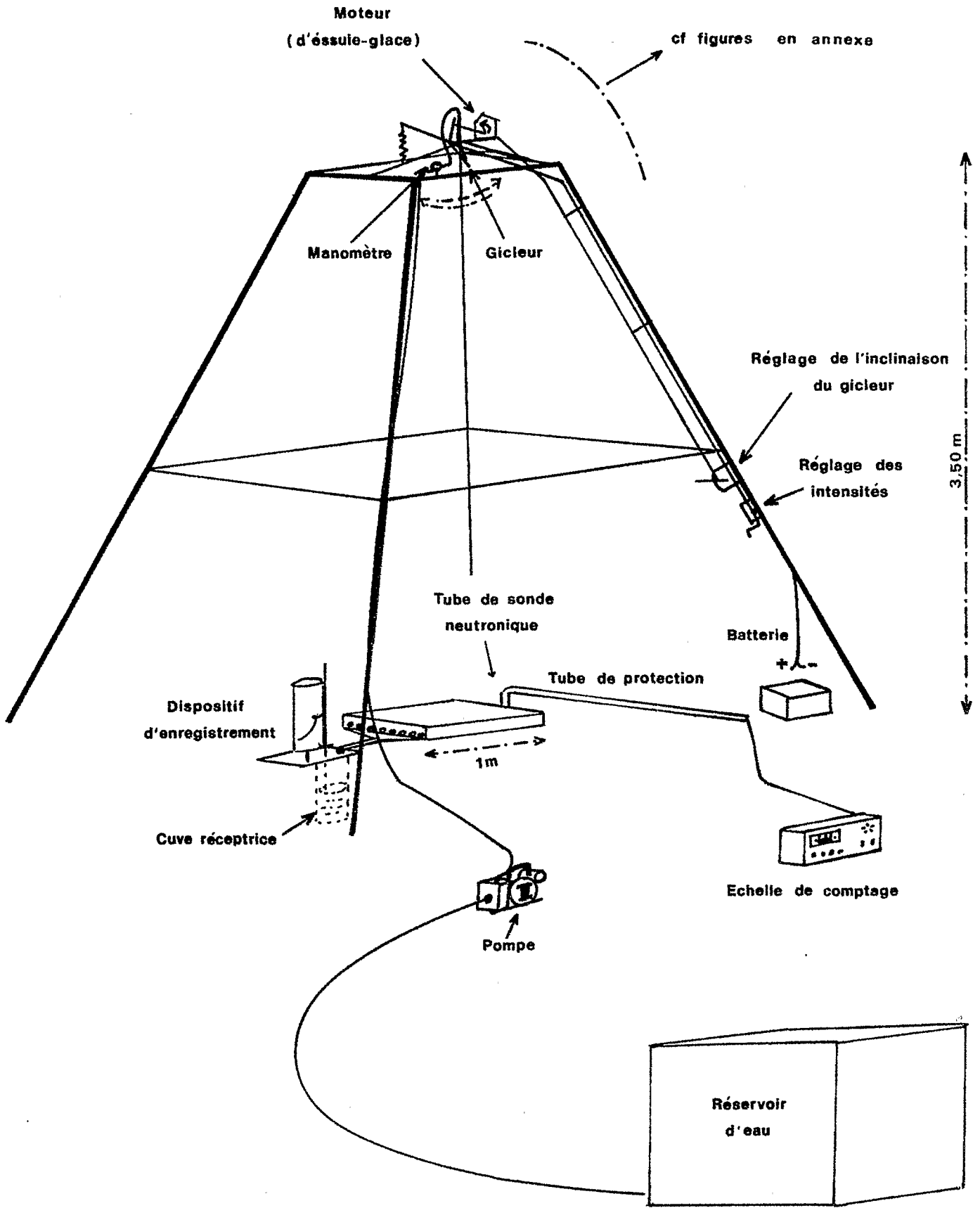
Le principe de la mesure consiste à arroser, avec une pluie artificielle de caractéristiques connues, une petite parcelle (1 m²) munie d'un dispositif de récupération par gravité de l'eau de ruissellement dont le volume est enregistré.

La parcelle est limitée par un cadre métallique enfoncé dans le sol d'environ 5 cm. La face aval du cadre est percée de trous au ras du sol et est munie d'un canal collecteur qui recueille le ruissellement. Ce canal débouche dans une cuve calibrée équipée d'un limnigraphe (OTT type VIII). Ce limnigraphe à grande vitesse d'avancement permet d'enregistrer les volumes de ruissellement cumulés avec une excellente précision puisqu'il est possible d'apprécier les temps à 10 secondes près et les lames ruissellées à 0,05 mm près. Un tube pour mesures neutroniques de l'humidité du sol est implanté environ 20 cm à l'amont de la parcelle. Grâce à un dispositif de protection il est possible de faire ces mesures non seulement avant et après, mais également au cours de la pluie.

Le système d'arrosage est fixé au sommet d'une tour, en forme de tronc de pyramide, de 3,5 mètres de haut. Cette tour permet, de plus, la fixation d'une bâche destinée à isoler la parcelle de l'action du vent. Le système d'arrosage est constitué d'un gicleur calibré monté sur un bras mobile. Un mouvement de balancement est imprimé à ce bras par un moteur d'essuie-glace, ce qui permet

FIG. N°4

SCHEMA DE L'INFILTROMETRE A ASPERSION



en faisant varier l'angle de balancement de modifier la surface arrosée et donc l'intensité sur la surface d' 1 m² étudiée. L'ensemble du mécanisme de balancement est monté sur un axe qui permet de centrer le gicleur au repos sur l'axe de la parcelle. L'alimentation en eau est assurée par une moto-pompe. Un manomètre installé au sommet de la tour permet de contrôler la pression d'admission de l'eau au gicleur.

Les détails de construction de l'appareil sont donnés en annexe.

3.3. Caractéristiques d'utilisation (d'après J. ASSELINE et C. VALENTIN)

3.3.1. Choix de la pression

Le choix de la pression dépend de plusieurs facteurs :

- Surface de garde

Pour que la surface de garde autour de la parcelle soit suffisante, il faut que la surface arrosée soit d'au moins 3 m². Des essais ont été faits pour déterminer la largeur arrosée en fonction de la pression d'admission de l'eau. On peut constater sur la figure 5 que pour conserver la surface de garde nécessaire, la pression ne doit pas être inférieure à 300 g/cm².

- Consommation en eau

Afin de conserver à l'appareil son caractère de maniabilité et sa facilité de transport et d'emploi, il était nécessaire de limiter au maximum la consommation en eau. Dans le tableau ci-après sont données les consommations en eau en fonction de la pression.

Pression en g/cm ²	Consommation en eau en l/h
250	380
300	410
350	470
400	510
450	545

- Régularité de l'intensité

Le gicleur a été testé à l'arrêt à 3,50 m du sol à différentes pressions ; ces essais ont montré qu'entre 250 et 600 g/cm², l'intensité mesurée sur une largeur d'un mètre, centrée sous le jet, est invariable alors que des variations ont été notées pour une pression inférieure à 250 g/cm².

Il ressort de ces essais que pour conserver une surface de garde suffisante, une intensité régulière et une consommation en eau minimale, il faut utiliser une pression d'admission d'eau comprise entre 300 et 350 g/cm².

3.3.2. Réglage des intensités

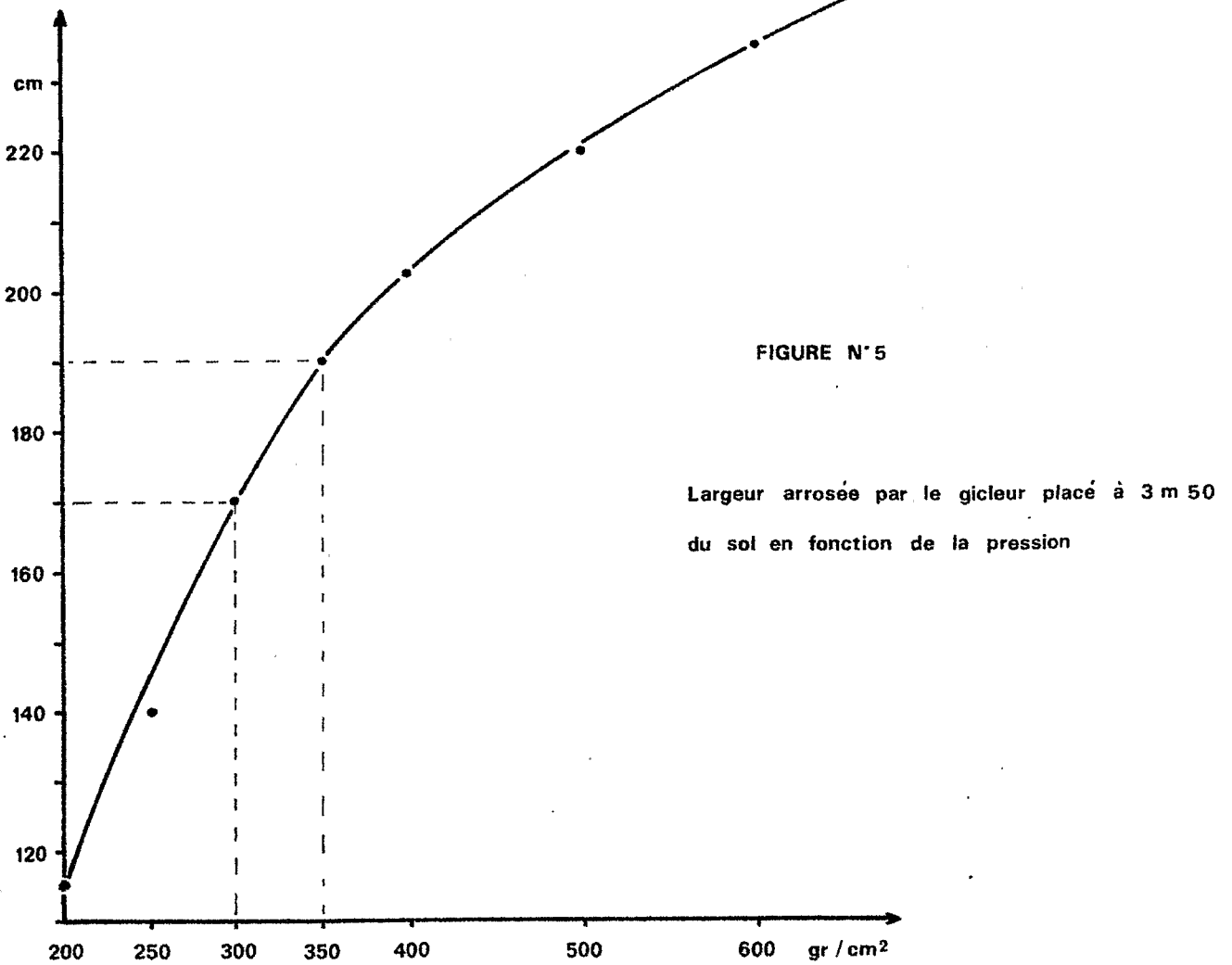
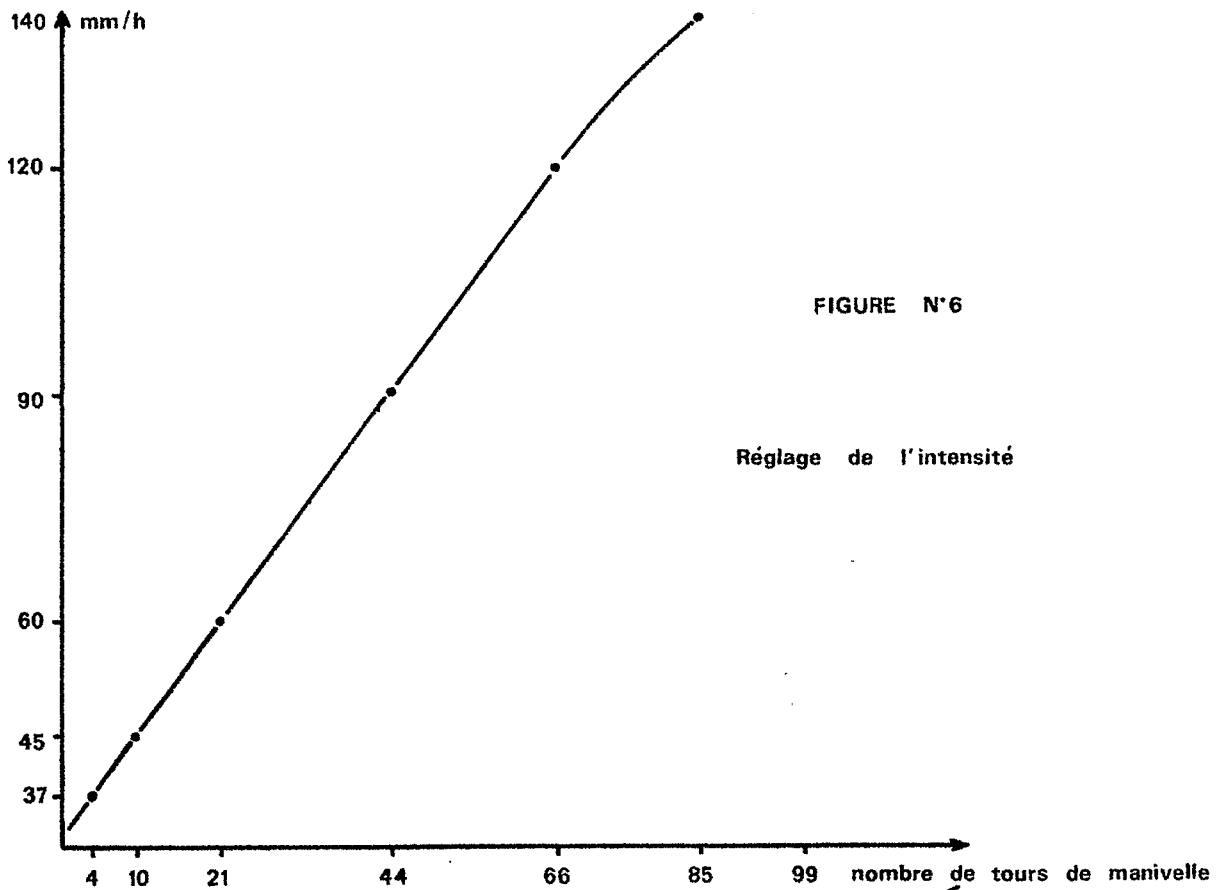
Si on immobilise le gicleur, situé à 3,5 mètres du sol, l'eau se répartit sur une ligne d'environ 25 cm d'épaisseur et dont la largeur est fonction de la pression (fig. 5). Cette largeur et l'amplitude du balancement imprimé au gicleur déterminent la surface arrosée et par voie de conséquence l'intensité sur la parcelle d'un m². En effet la surface arrosée augmentant ou diminuant, alors que la quantité d'eau utilisée reste constante, la parcelle de mesure reçoit plus ou moins d'eau. On trouvera dans le tableau ci-après, les valeurs de la surface mouillée au sol et de l'intensité sur la parcelle pour un certain nombre d'angles de balancement du gicleur.

Angle de balancement du gicleur en grades	Surface approximative mouillée au sol (sans bêche)* en m ²	Intensité sur la parcelle en mm/h
150	14	37
126	11,5	45
96	10	60
64	7	90
50	5	120
42	3,5	140

L'appareil a été étalonné avant son utilisation sur le terrain ; les intensités ont été mesurées et reportées en fonction du nombre de tours de la manivelle de sélection des intensités (fig. 6). Des marques ont été faites en face d'une aiguille repère (cf. figure en annexe), pour les intensités les plus couramment utilisées. L'appareil couvre une gamme d'intensité allant de 30 à 140 mm/h. Il faut cependant noter que dans sa conception actuelle, le fonctionnement n'est pas satisfaisant pour le balancement maximum du bras portant le gicleur (intensité minimale d'environ 30 mm/h). En effet le jet d'eau atteint le cadre supérieur de l'appareil (cadre 0 cf. figure en annexe) ce qui provoque des retombées d'eau dans la parcelle. Il sera nécessaire dans la prochaine version d'abaisser l'axe d'inclinaison par rapport à ce cadre afin de pallier à ce défaut. Notons d'autre part qu'en montant deux engrenages dont le rapport du nombre de dents serait voisin de 1 sur 2, au lieu de 1 sur 1,48 dans la version actuelle, on pourrait abaisser le seuil de l'intensité minimale bien en-dessous de 30 mm/h.

* Lors de l'emploi d'une bêche, la surface mouillée au sol est limitée à 6,5 m².

CARACTERISTIQUES DE L'INFILTROMETRE



Bien que l'appareil soit pré-réglé des mesures de contrôle de l'intensité sont faites en disposant un bac en tôle de 1 m² sur la parcelle. Le ruissellement (Kr = 100 %) est recueilli dans la cuve et le volume ruisselé est enregistré sur le limnigraphe. Cette méthode, bien que très précise, présente le défaut de n'être utilisable qu'avant et après la mesure, pour vérifier l'intensité lors d'un essai à intensité constante. La construction d'une gouttière étroite sur le périmètre de la parcelle reliée à un pluviographe, qui permettrait un enregistrement précis des intensités pendant toute la durée de l'averse, est à l'étude.

3.3.3. Mise en place de la parcelle d'essais

La mise en place du cadre d'un m² ne pose pas de problème, on doit cependant déterminer de façon assez précise la pente du sol afin de placer le côté troué du cadre rigoureusement en aval (l'emploi d'un niveau à bulle de maçon est suffisant). A l'aide d'un cadre renforcé, la tôle est enfoncée à la masse de manière à mettre la cornière d'arrêt et la ligne de trous au niveau de la surface du sol. Une petite rigole de 3 à 5 cm de profondeur doit être aménagée sous la gouttière réceptrice du ruissellement. Il est bien évident que l'on évite de piétiner la surface à étudier et la surface de garde, lors de la mise en place du cadre. Le cadre étant installé, on peut déterminer avec précision, à l'aide d'un mètre, d'un niveau et d'un double décimètre, la pente du terrain ainsi délimité.

Lors de l'étude de la toposéquence du Manso, on a observé des infiltrations plus importantes sur les parcelles nouvellement mises en place, l'enfoncement de la bordure en tôle perturbant le sol et créant des zones d'infiltration privilégiées. Cet effet disparaît après une première pluie. Etant donné le faible coût d'un cadre, la meilleure solution consiste à en construire un grand nombre et à les laisser en place si plusieurs mesures doivent être faites au même emplacement.

La cuve recueillant le ruissellement est installée dans une petite fosse (50 cm de profondeur sur 40 cm de diamètre), les pieds de l'appareil reposant sur un replat aménagé à 12 cm de profondeur. Afin de ne pas perturber l'enregistrement, il est important de s'assurer de l'horizontalité du limnigraphe. La cuve utilisée lors de notre étude, ne permet d'enregistrer une lame ruisselée que de 35 mm, ce qui oblige dans le cas de forts ruissellements à vidanger cette cuve. Pour ce faire nous avons utilisé une motopompe qui assure la vidange en environ 30 secondes.

3.3.4. Alimentation en eau

L'alimentation en eau du système d'arrosage est assurée par une petite motopompe (TAS Motor QCP 12 TANAKA KOGYO) dont le moteur est utilisé à faible rendement, le débit maximum de cette motopompe étant de 7.000 l/h.

La même motopompe est utilisée pour remplir, au point d'eau le plus proche, un réservoir de 600 l qui a été conçu de façon à être facilement transportable dans un véhicule léger (Land-Rover, 404 bâchée). Dans les zones ne disposant que de rares points d'eau, une citerne tractée de 1.500 à 2.000 l, serait préférable.

Malgré sa faible consommation horaire, l'emploi intensif du simulateur, pose des problèmes importants de ravitaillement en eau. Dans le cas de la toposéquence étudiée sur le bassin du Manso, un essai d'une heure sur chacune des 9 parcelles entraîne la consommation d'environ 4.000 litres d'eau. Le transport de telles quantités d'eau suppose l'existence de pistes carrossables jusqu'à proximité immédiate du lieu des essais. Dans le cas des études en zone forestière, où les pistes sont rares et souvent de qualité très médiocre, ce problème de ravitaillement en eau, est un facteur limitant du nombre des essais et des emplacements où ces essais sont possibles.

3.3.5. Conclusion

Une utilisation intensive du prototype de simulateur précédemment décrit a montré, malgré quelques défauts auxquels il sera facile de remédier dans la prochaine version, que le principe de l'appareil était excellent et répondait aux exigences formulées quant à la reproductibilité des pluies et aux réglages des intensités. Il restait à s'assurer que les pluies simulées ont des caractéristiques énergétiques similaires à celles des pluies naturelles. Ce problème a été étudié par C. VALENTIN à qui nous empruntons le compte-rendu de ces essais.

3.4. Etude de l'énergie cinétique des pluies simulées (C. VALENTIN)

3.4.1. Présentation de l'étude

L'infiltration dépend de l'intensité des pluies naturelles. Nous venons de voir les avantages d'obtenir des intensités connues et constantes pour l'étude de ce phénomène. Mais il serait hasardeux de se contenter d'étudier l'intensité comme seule caractéristique des pluies simulées. En effet une même intensité peut être obtenue avec des tailles de gouttes et des vitesses d'impact au sol extrêmement variées. Des simulateurs de pluies simples (RIOU, BOLI, BABOULE) utilisent des dispositifs formant des gouttes de même diamètre ; les simulateurs,

munis de gicleurs sélectionnés, visent à obtenir une répartition des gouttes plus proche de celle des pluies naturelles de même intensité. De même, les vitesses d'impact au sol diffèrent généralement d'un appareil à l'autre. Or ces deux paramètres : tailles des gouttes et vitesse d'impact au sol sont les principales composantes de l'énergie des gouttes de pluie. Si la connaissance de cette énergie cinétique est capitale pour l'analyse de l'érosion, elle ne doit pas être négligée, comme elle l'a souvent été, pour l'étude de l'infiltration. En effet c'est elle la principale responsable des modifications morphologiques de la surface du sol (formation d'une pellicule de battance très peu perméable par exemple). Aussi est-il nécessaire de s'assurer, lors de la mise au point d'un simulateur de pluies que les énergies cinétiques obtenues pour les différentes intensités sont bien du même ordre que celles des pluies naturelles correspondantes.

3.4.2. Tailles des gouttes

3.4.2.1. Méthodes existantes

De nombreuses études ont été entreprises pour déterminer le diamètre des gouttes, sous pluies naturelles comme sous pluies simulées (LAWS ; MEYER ; HUDSON).

On peut par exemple les photographier lors de leur chute, ou une fois recueillies dans un bain d'huile.

Certains auteurs ont utilisé des papiers filtres colorés par du bleu de méthylène ; les gouttes tombant dessus y laissent des auréoles dont les surfaces sont proportionnelles aux sections des gouttes.

D'autres chercheurs, plus nombreux, ont employé une technique plus rapide : on recueille les gouttes dans un bac de farine. Les agrégats ainsi formés, sont passés au four puis récoltés sur une batterie de tamis. Il existe une relation simple entre le diamètre de ces agrégats et celui des gouttes. Cette méthode, que nous avons utilisée, permet un gain de temps considérable par rapport à la précédente : les pesées des différentes fractions granulométriques demandent moins de temps que les mesures des diamètres de toutes les taches. Cette technique a permis d'obtenir des résultats semblables de la part de nombreux auteurs travaillant sur la taille des gouttes sous pluies naturelles ; elle paraît suffisamment fiable pour déterminer les caractéristiques de pluies simulées.

3.4.2.2. Prise et traitement des échantillons

On soumet à l'aspersion un parallépipède de farine (30 X 20 X 2,5 cm) contenu dans un bac pouvant être couvert ou découvert très rapidement.

La durée de l'exposition dépend de l'intensité ; elle est de l'ordre de une à trois secondes, afin de permettre la formation d'une masse suffisante d'agrégats (environ 3 g à sec) tout en laissant une probabilité faible pour plusieurs gouttes de tomber en un même point.

Les échantillons sont ensuite placés dans une étuve à une température de 105°C pendant 24 heures. On fait traverser alors à l'ensemble, farine + agrégats, une batterie de onze tamis : 200, 315, 400, 500, 630, 800, 1.000, 2.000, 3.150, 4.000 et 5.000 μ . La fraction inférieure à 200 μ , retenue par aucun tamis, et trop difficilement discernable de la farine, n'est pas prise en compte (son influence est infime sur l'énergie cinétique, (cf. plus loin). Les autres fractions sont pesées séparément. Une seule fraction concerne les agrégats dont le diamètre dépasse 5 mm. Mais nous verrons par la suite que cette taille n'est jamais atteinte sous les pluies simulées par l'infiltromètre.

3.4.2.3. Calibrage des gouttes

Il est nécessaire de connaître la relation permettant d'obtenir le diamètre des gouttes en fonction de la masse des agrégats ou en fonction de leur diamètre. Pour cela, on soumet les mêmes bacs de farine à l'impact de gouttes de masses et de diamètres connus.

Ces gouttes sont obtenues à partir de microseringues (type Hamilton) qui sont conçues pour former des gouttes de volume constant (2,5, 5,0 et 10, mm³). Pour les gouttes plus grosses, nous avons utilisé des pipettes de précision graduées de 10 en 10 mm³. Il n'a pas été possible de produire des gouttes de diamètre inférieur à 1.680 mm (masse = 2,5 mg), mais les résultats de Meyer tendent à montrer que la relation reste la même quelle que soit la taille des gouttes, y compris pour les plus petites.

Les essais ont été réalisés à 3,50 m du sol (hauteur correspondant à celle du gicleur) mais aussi à un mètre. HUDSON a signalé que la vitesse d'impact influait sur la taille des agrégats formés, mais cette action est faible : entre 30 et 80 % de la vitesse d'impact d'une goutte de pluie naturelle, le rapport masse de la goutte/masse de l'agrégat ne varie que de 4%. Nous avons trouvé un écart de 1% sur les diamètres d'agrégats formés après des chutes de 3,50 m et 1,0 m. Bien que travaillant ainsi à des vitesses d'impact inférieures aux vitesses limites, nous considérons que cette méthode permet une approximation suffisante pour le niveau de précision souhaité.

De même le nombre de diamètres testés est faible. En effet les études antérieures (BLANCHARD, MEYER) montrent une étroite corrélation entre les masses d'agrégats et celles des gouttes testées quelles que soient leur taille.

Lors de chaque essai, de 25 à 30 gouttes calibrées tombent sur la farine. La masse d'agrégats obtenue après séchage, et divisée par leur nombre donne la masse moyenne d'agrégats, correspondant à la taille de goutte testée.

Connaissant le volume de cette goutte, on en déduit son diamètre :

$$D(\text{mm}) = \frac{(6 V (\text{mm}^3))}{\pi}^{1/3}$$

En portant sur une feuille log-log les masses des agrégats en fonction des diamètres des gouttes, les points représentatifs s'alignent sur une droite d'équation :

$$Y = 34x + 1,12 \quad \text{avec } r = 0,99 \text{ (coefficient de regression)}$$

et $n = 7$ (cf. figure n° 7)

On en déduit immédiatement la relation :

$$De = 13,18 Mf^{0,34} \quad \text{avec } De = \text{diamètre de la goutte (mm)}$$

et $Mf = \text{masse de l'agrégat (mg)}$

Cette relation est proche de celle établie par BLANCHARD et celle de MEYER :

$$De = 14,56 Mf^{0,354}$$

Les différences obtenues entre ces auteurs provient vraisemblablement du type de farine utilisée. (Pour ces essais nous avons employé la farine de force "PS-15 type US" des Grands Moulins d'Abidjan).

Nous avons déterminé sa densité apparente afin de calculer le diamètre des agrégats :

$$Df = \frac{(6 Mf)}{\pi b}^{1/3} \quad \text{avec } Df (\text{mm}) : \text{diamètre de l'agrégat}$$

$Mf (\text{mg}) : \text{masse de l'agrégat}$

et $b : \text{densité de la farine}$

$$b = 0,93$$

Il est ainsi possible de connaître le diamètre des gouttes en fonction de celui des agrégats :

$$De = 0,985 Df^{1,02}$$

$\text{mm} \qquad \qquad \text{mm}$

Pour chaque classe de diamètre d'agrégats correspondant aux différents tamis, on peut ainsi évaluer le diamètre moyen des gouttes (cf. tableau ci-après). Il est supposé, comme le fait remarquer HUDSON qu'un nombre infime d'agrégats ont un diamètre supérieur à 6 mm sous pluies naturelles. Le diamètre moyen d'agrégats, pour la fraction supérieure à 5,0 mm, a donc été choisi arbitrairement à 5,5 mm.

CALIBRAGE DES GOUTTES

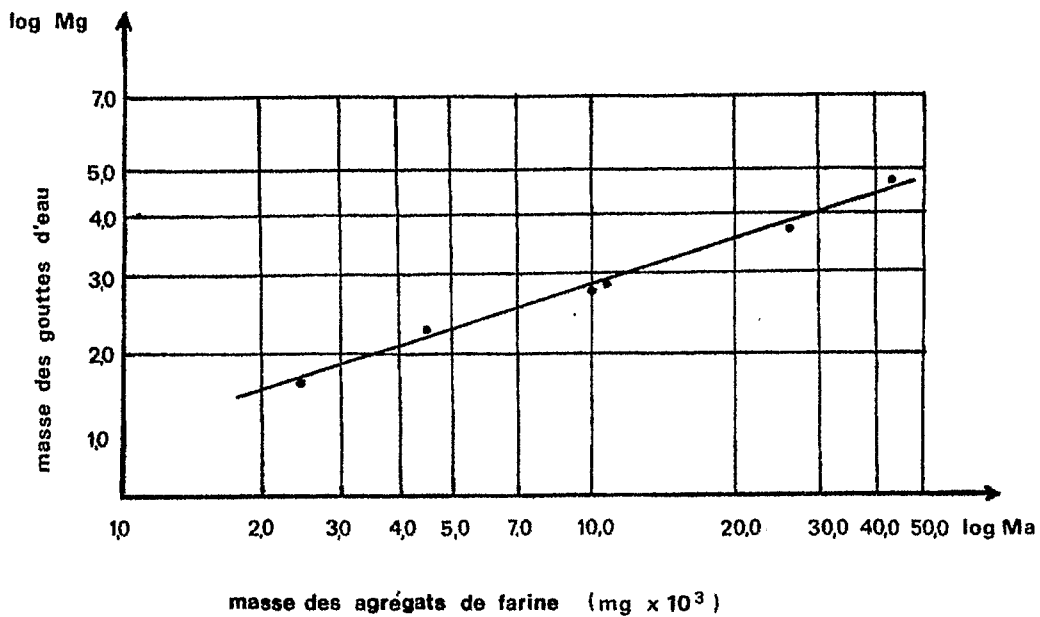


FIGURE N°7

RELATION ENTRE LE DIAMETRE MOYEN DES GOUTTES ET L'INTENSITE

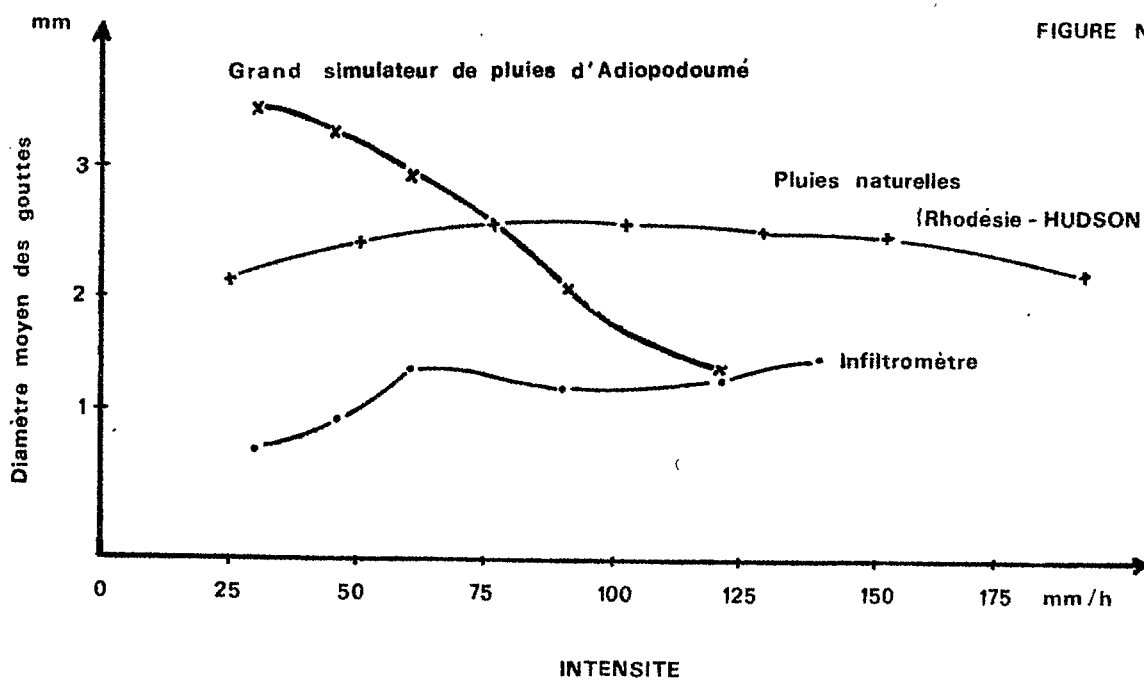


FIGURE N°10

Classes de tamis	0	200	315	400	500	630	800	1000	2000	3150	4000	5000
μ	200	315	400	500	630	800	1000	2000	3150	4000	5000	et +
Diamètres moyens d'agrégats	100	258	358	450	565	715	900	1500	2575	3575	4500	5500
Rayons moyens des gouttes	49	124	173	218	275	350	442	745	1293	1807	2285	2805

3.4.2.4. Résultats

Les courbes granulométriques cumulatives (fig 8 et 9) sont été tracées pour différentes intensités de pluies simulées, en portant en abscisses les diamètres des agrégats et en ordonnées les masses des différentes fractions granulométriques (exprimées en pourcentage cumulés de la masse totale). Les diamètres d'agrégats D_{25} , D_{50} et D_{75} correspondent à 25 %, 50 % et 75 % de la masse totale des agrégats. La relation précédemment obtenue

$$D_e = 0,985 D_f^{1,02}$$

(mm) (mm)
 permet de calculer les diamètres des gouttes correspondants. D_{50} , "diamètre moyen" est la valeur centrale caractérisant la taille des gouttes, D_{25} et D_{75} donnent une idée de leur répartition.

Le tableau ci-dessous présente ces différentes valeurs :

Intensités (mm/h)	37	45	60	90	120	140
D_{25} (mm)	0,47	0,61	1,03	0,89	0,79	1,01
D_{50} (mm)	0,84	1,06	1,49	1,34	1,35	1,67
D_{75} (mm)	1,22	1,59	2,10	2,07	2,16	2,47

Utilisant une pression constante, la seule source de variation du diamètre des gouttes provient du balancement du gicleur. Il s'opère, en effet, un tri des gouttes : à faible intensité, le balancement est maximal et les grosses gouttes tombent très loin de la parcelle. Au fur et à mesure que le balancement diminue, une proportion plus grande de gouttes de fort diamètre tombe sur la surface étudiée (gouttes de 2000 à 3150 μ d'après la figure n° 8). A partir de 60 mm/h l'équilibre est atteint et la distribution du diamètre des gouttes varie peu en fonction de l'intensité. A partir de 120 mm/h, on assiste à une nouvelle augmentation. La proportion des petites gouttes (de 0 à 400 μ) devient très petite. Du fait du balancement faible aux fortes intensités se produit-il une ventilation moins grande des gouttes ? Le fractionnement des gouttes à la sortie du gicleur serait alors moins facilité par une force centrifuge plus faible, ou bien s'agit-il d'un artéfact ? : la densité des gouttes au sol augmente la probabilité pour que plusieurs gouttes

**DIAMETRE DES GOUTTES OBTENUES AU SOL PAR L'INFILTROMETRE
POUR DIVERSES INTENSITES**

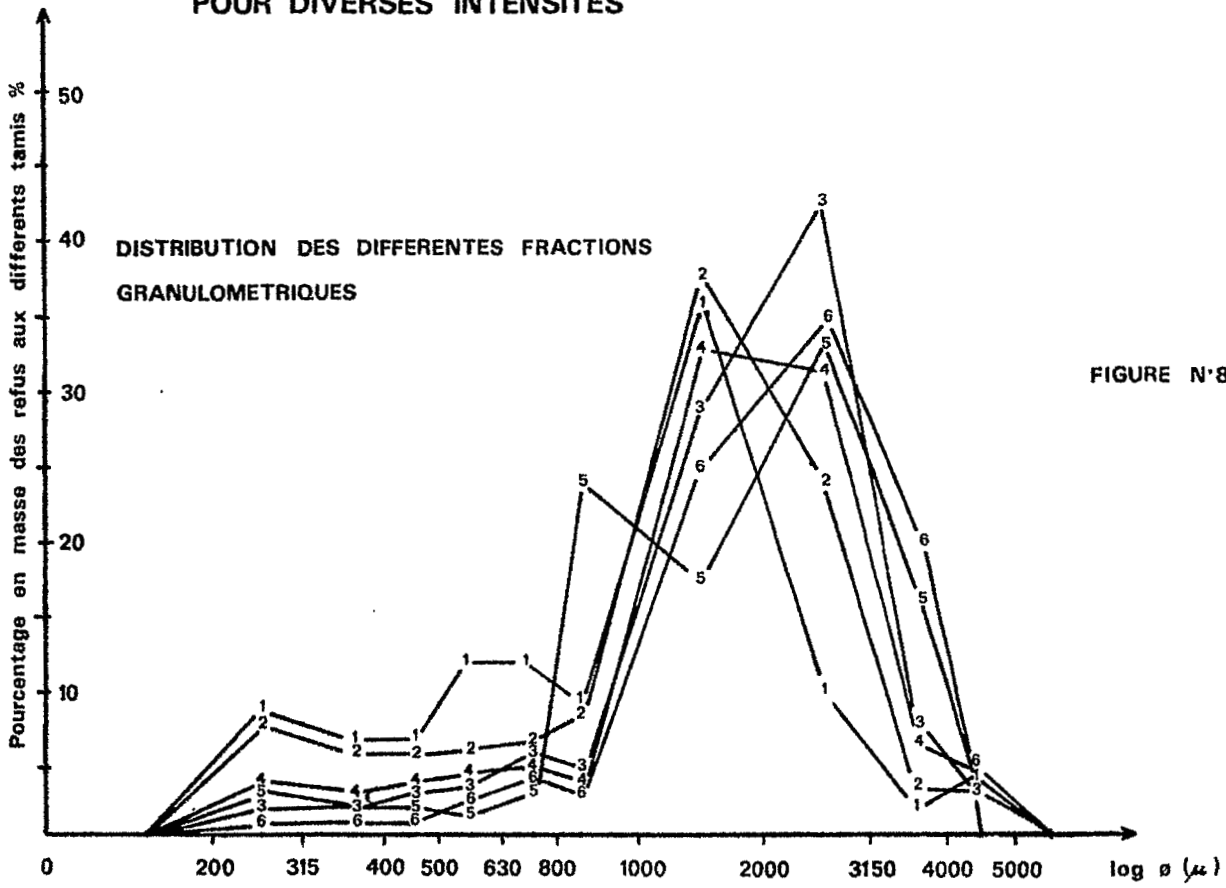


FIGURE N°8

INTENSITES

- 1 37 mm / h
- 2 45 mm / h
- 3 60 mm / h
- 4 90 mm / h
- 5 120 mm / h
- 6 140 mm / h

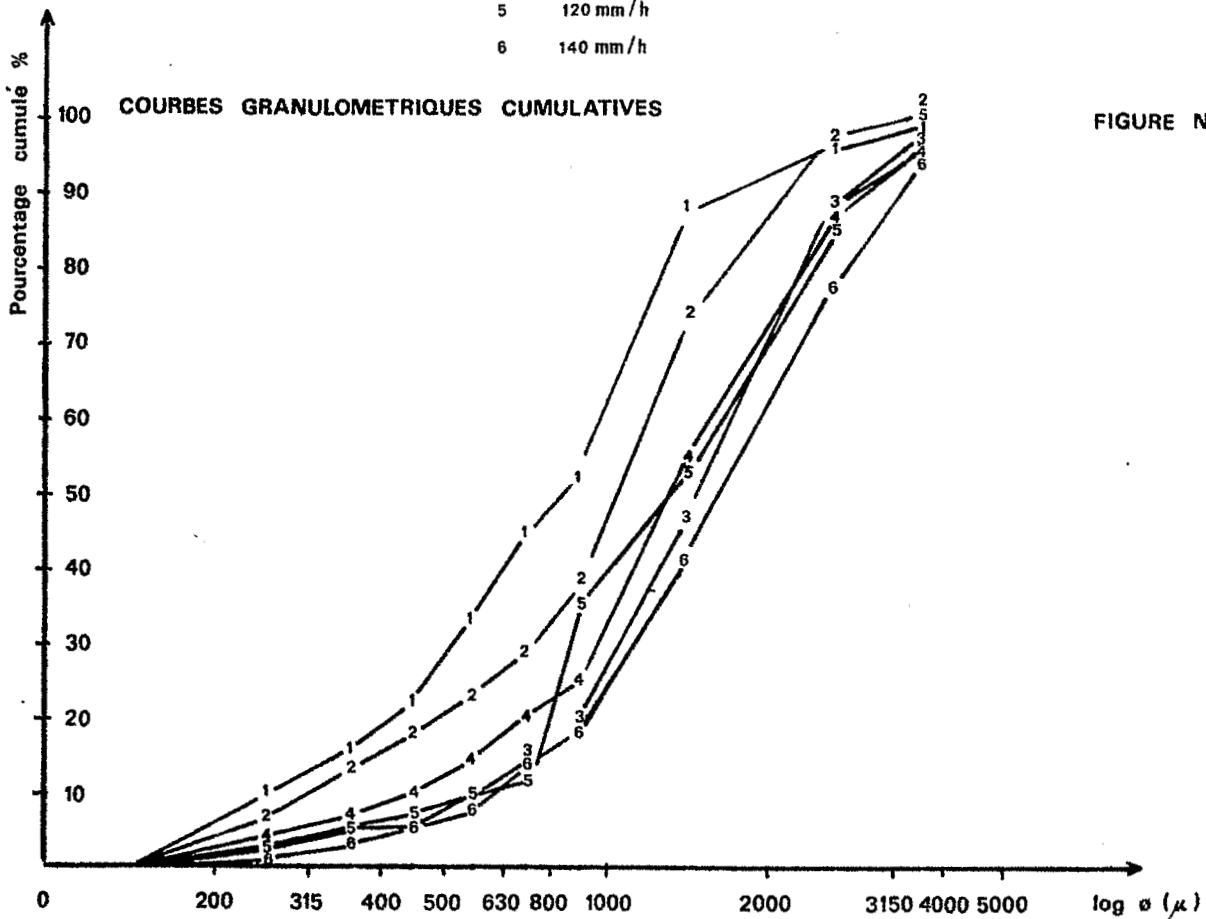


FIGURE N°9

tombent en un même point. On compterait alors pour un seul agrégat, de masse importante, l'agglomération de plusieurs.

3.4.2.5. Comparaison avec les pluies naturelles

La variabilité du diamètre des gouttes pour une même intensité est élevée sous les pluies naturelles. Ne disposant pas encore suffisamment de résultats à Adiopodoumé, nous utilisons, comme références, les données obtenues par HUDSON en Rhodésie.

La comparaison des courbes (figure n° 10) montre une nette différence entre les pluies naturelles et les pluies simulées. Le diamètre moyen des gouttes obtenues sous ce gicleur, à la pression de 300 g/cm² ne représente que de 40 à 60 % celui trouvé par HUDSON sous les pluies naturelles.

Or il n'est pas possible de corriger ce défaut par variation de pression: une pression plus basse réduirait la surface de garde ; une pression plus élevée provoquerait une diminution de la taille des gouttes par pulvérisation et augmenterait la consommation en eau.

Si ces résultats paraissent faibles par rapport à ceux trouvés par HUDSON, nous verrons par la suite qu'ils sont très proches de ceux obtenus par d'autres auteurs sous pluies naturelles.

3.4.3. Vitesse d'impact au sol

3.4.3.1. Présentation du problème

Considérons v_0 la vitesse initiale radiale à la sortie du gicleur et v_t la vitesse tangentielle due à son balancement. La résultante v_i de ces deux vitesses est telle que :

$$v_i^2 = v_0^2 + v_t^2$$

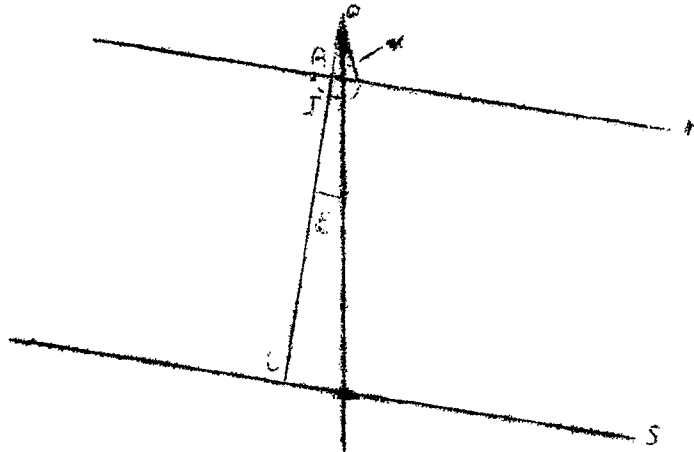
Effectuons deux simplifications :

- nous admettons que toutes les gouttes interceptées par la parcelle d'essai sont toutes animées de la même vitesse initiale v_i et sont issues d'un même plan H, parallèle au plan S du sol celui-ci étant assimilé à une surface plane. Notons que H et S ne sont pas horizontaux mais que le réglage d'inclinaison permet à H de rester parallèle à S ;

- cette simplification nous semble acceptable ; elle sous-entend que la vitesse de balancement du gicleur reste constante pour les positions les plus proches de la verticale et que la variation relative de la hauteur du gicleur

reste faible. Le demi-angle α , correspondant à l'aspersion effective de la parcelle est de l'ordre de 20° (avec une variation de 15 à 30° environ suivant les intensités).

Schéma n° 1



Soit ϵ l'angle que font H et S avec l'horizontale. Pour une pente de 5 % cet angle vaut environ 3° .

$$\overline{OJ} - \overline{OA} = \overline{OJ} (1 - \cos (\alpha + \epsilon))$$

Or $\alpha + \epsilon \neq 23^\circ$

$$\overline{OJ} = 0,20 \text{ m}$$

d'où :

$$\overline{OJ} - \overline{OA} : 0,016 \text{ m}$$

or $\overline{IJ} = 3,50 \text{ m}$

d'où :

$$\frac{\overline{OI} - \overline{OA}}{\overline{IJ}} = 0,46 \%$$

On voit par conséquent que l'erreur ainsi causée par cette simplification est très faible. Elle semble donc justifiée.

Nous assimilerons les gouttes d'eau à des points matériels libres et mobiles dans le champ de la pesanteur, soumis à leur seul poids et non à la résistance de l'air (en un premier temps). Nous considérons que chaque goutte est lancée du plan H avec une vitesse initiale v_i d'orientation variable.

Ecrivons que l'augmentation de l'énergie cinétique est égale à la diminution du potentiel :

$$1/2 m v_s^2 - m v_i^2 = mgh$$

$$d'où \quad v_s = \sqrt{v_i^2 + 2gh}$$

avec : h = distance entre les deux plans H et S (hauteur en m)
 vs = vitesse d'impact sur la parcelle (m/s)
 v0 = composante radiale de la vitesse initiale Vi (m/s)
 vt = composante tangentielle de vi (m/s).

On a ainsi :

$$(1) \quad v_s = \sqrt{v_0^2 + v_i^2 + 2gh}$$

Afin de déterminer la vitesse d'impact au sol, il convient donc de préciser au préalable les composantes de la vitesse initiale :

v_0 et v_i

3.4.3.2. Vitesse tangentielle v_i :

La vitesse de balancement est supposée constante pour les angles d'aspersion effective de la parcelle. Pour déterminer cette vitesse de balancement pour chaque intensité, on a mesuré, dans chaque cas, l'angle balayé par le gicleur en une période T. Celui-ci étant entraîné par un moteur à mouvement de rotation uniforme, la période T reste constante.

$$(T = \frac{53}{60} ; T = 1,13 \text{ seconde})$$

On a :

$$v_t = \omega \cdot R.$$

(m/s) (rad./s .m)

$$v_t = \frac{\gamma}{T} \cdot R$$

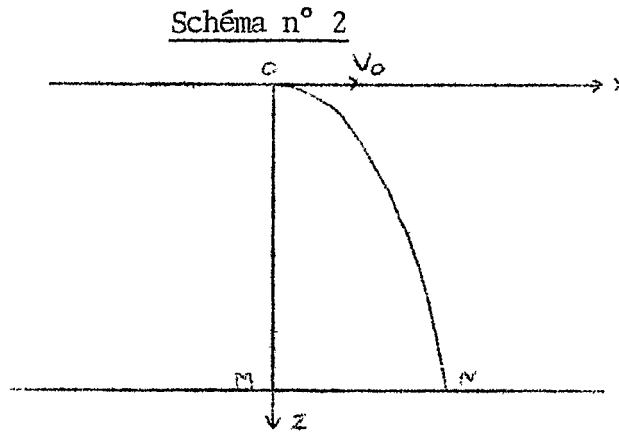
avec ω = vitesse angulaire de balancement (rad./s)

et R = distance du centre de balancement à l'extrémité du gicleur. R = 0,20 m.

Intensités (m/s)	(grades)	γ (radians)	v_i (m/s)
37	300	4,71	0,83
45	252	3,96	0,70
60	192	3,02	0,53
90	128	2,01	0,36
120	100	1,57	0,28
140	82	1,29	0,23

3.4.3.3. Vitesse radiale v_0

Un point libre et mobile lancé avec une vitesse horizontale au-dessus d'un plan S décrit une parabole avant de toucher ce plan :



La composante de la vitesse initiale v_i étant nulle suivant l'axe Oz, et celle de l'accélération g étant nulle suivant l'axe Ox, on a :

$$v_0 = \frac{dx}{dt}$$

d'où, au temps t :

$$x = \int_0^t v_0 dt$$

et

$$z = \int_0^t g t dt$$

quand $t = 0$ x et z sont nuls, d'où

$$x = v_0 t$$

et $z = 1/2 g \cdot t^2$, on en déduit :

$$v_0 = x \sqrt{g/2z}$$

En mesurant \overline{MN} (cf. schéma n° 2), et connaissant OM la hauteur de chute, on a :

$$v_0 = \overline{MN} \sqrt{\frac{g}{2 \cdot \overline{OM}}}$$

Cette relation ne tient pas compte de la résistance de l'air. En réalité, la distance \overline{MN} mesurée est inférieure à la distance théorique. Cette vitesse initiale v_0 est donc minorée.

Notons que MEYER a utilisé une méthode proche de celle-ci : au lieu de mettre le gicleur à l'horizontale, il l'a pointé vers le haut, à la verticale et a mesuré la hauteur h atteinte par le jet.

On a alors : $v_0 = \sqrt{2 gh}$.

Cette méthode ne tient pas compte non plus de la résistance de l'air ; en outre elle est très peu précise : il est en effet très difficile de déterminer la hauteur moyenne atteinte par les gouttes ; cette hauteur dépend de leur taille.

La méthode ici utilisée permet de déterminer de façon précise la distance moyenne \overline{MN} :

on place dans l'axe du gicleur, placé à l'horizontale une batterie de 18 pluviomètres de même surface d'ouverture (400 cm²). On opère, à l'abri du vent pendant 10 minutes. De chaque pluviomètre, on déduit l'intensité reçue à la distance \overline{MN} correspondante. Les figures n° 11 et 12 donnent la distribution de ces intensités en fonction de la distance MN, ainsi que cette distribution en pourcentage cumulé. Ce dernier graphique permet d'apprécier la distance \overline{MN}_{50} telle que 50 % de l'eau tombe en-deça et 50 % au-delà.

Pour une hauteur de gicleur de 3,50 m, on trouve $\overline{MN}_{50} = 3,10$ m ; on en déduit :

$$v_0 = 3,10 \sqrt{9,81 \cdot 2 \cdot 3,50}$$

$$v_0 = 3,67 \text{ m/s}$$

$$\text{en prenant } g = 9,81 \text{ m/s}^2$$

3.4.3.4. Vitesses limites

Nous n'avons pas tenu compte jusqu'ici de la résistance de l'air. Soit ϕ (v) cette force :

$$\phi (v) = k.s.v^2$$

avec k un coefficient dépendant de la forme du projectile, s sa section et v sa vitesse. Lorsque cette résistance atteint la même valeur numérique que son poids, l'accélération devient nulle et sa vitesse reste constante. C'est sa vitesse limite dans l'air. v_1 :

$$k.s.v_1^2 = mg$$

$$\text{d'où } v_1^2 = mg/k.s$$

$$\text{avec } k = \frac{C\rho}{2}$$

$$\rho = \text{masse spécifique de l'air. } \rho = 0,0012$$

$$C = 0,45 \text{ pour les sphères; on assimilera les gouttes à des sphères de rayon R}$$

ainsi :

$$v_1 = \sqrt{2m g / s.C.\rho}$$

DETERMINATION DE LA VITESSE RADIALE MEDIANE

Répartition des Intensités en fonction de la distance au gicleur

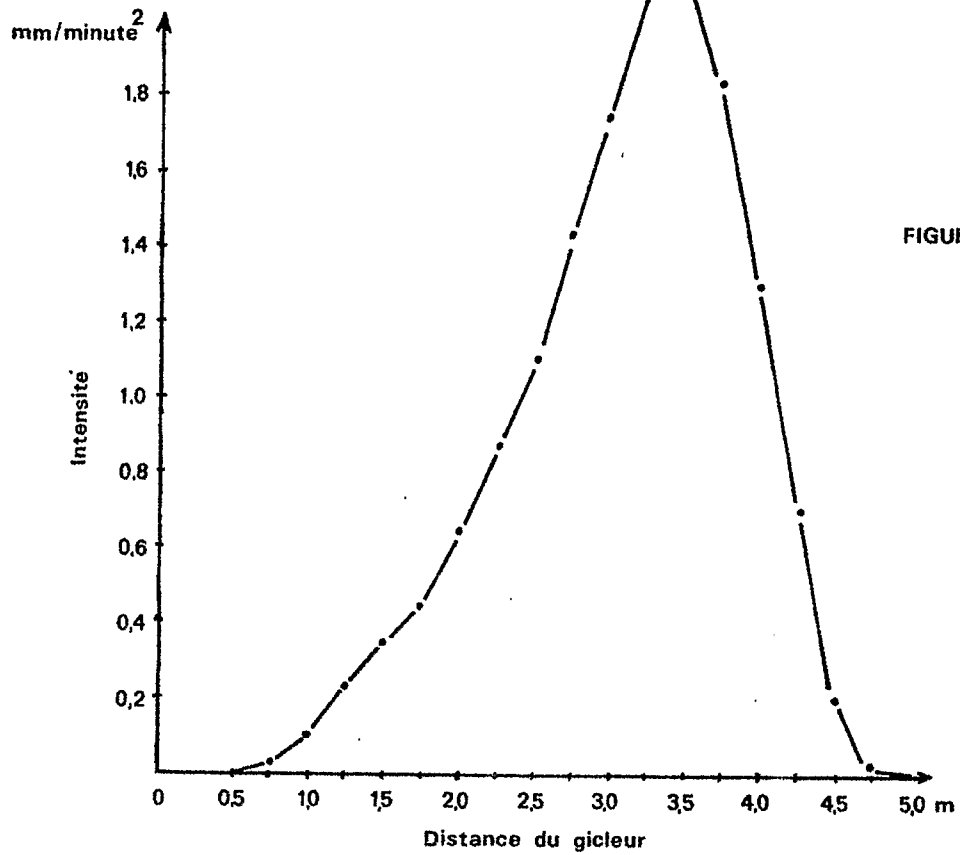


FIGURE N°11

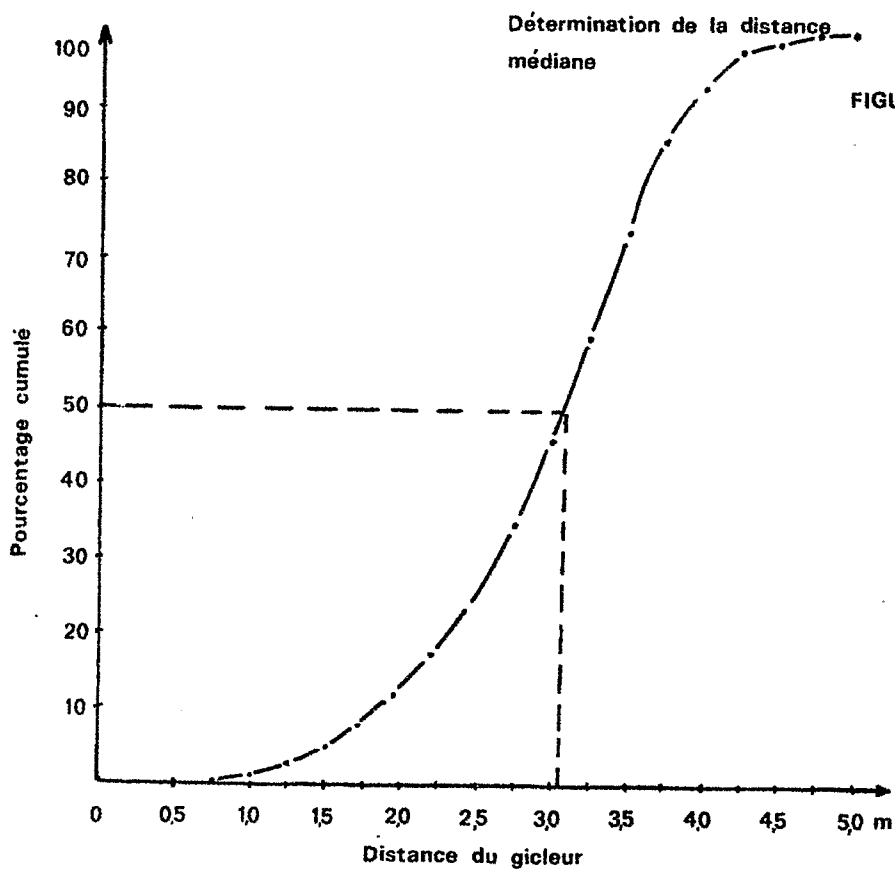


FIGURE N°12

Pour une sphère de densité = 1 :

$$m = \frac{4}{3} \pi R^3$$

$$\text{et } s = \pi R^2$$

d'où finalement :

$$v_1 = \frac{(2 \cdot R \cdot 4 \text{ g})^{0.5}}{3 \cdot C \cdot \rho}$$

$$v_1 = 220.1 (R)^{0.5}$$

Ainsi peut-on calculer la vitesse limite correspondant à chaque classe granulométrique de diamètre de goutte (tableau ci-après) :

Classe de tamis (μ)	0	200	315	400	500	630	800	1000	2000	3150	4000
	200	315	400	500	630	800	1000	2000	3150	4000	5000
Rayon moyen des gouttes (μ)	49	124	173	218	275	350	442	745	1293	1807	2285
Vitesse limite dans l'air (m/s)	1,54	2,45	2,89	3,25	3,65	4,12	4,62	6,01	7,91	9,36	10,52

3.4.3.5. Vitesse d'impact au sol

Calculons pour chaque intensité, les vitesses d'impact au sol, sans tenir compte des vitesses limites, et donc de la résistance de l'air. On applique la formule (1) du paragraphe 3.4.3.1.

Intensités (mm/h)	vitesses radiales (m/s)	Vitesses tangentiels (m/s)	Vitesses d'impact au sol (m/s)
37	3,67	0,83	9,10
45	3,67	0,70	9,09
60	3,67	0,53	9,08
90	3,67	0,36	9,07
120	3,67	0,28	9,07
140	3,67	0,23	9,07

Notons que seules les gouttes dont le rayon dépasse 1,3 mm atteignent le sol avec une vitesse égale à la vitesse calculée. Pour les gouttes plus petites, la vitesse d'impact est égale à la vitesse limite correspondant à leur rayon (cf. tableau).

Rayon des gouttes (μ)	Intensités (mm/h)						V_s souspluies naturelles
	37	45	60	90	120	140	
49	1,54	1,54	1,54	1,54	1,54	1,54	0,25
124	2,45	2,45	2,45	2,45	2,45	2,45	0,72
173	2,89	2,89	2,89	2,89	2,89	2,89	0,98
218	2,75	2,75	2,75	2,75	2,75	2,75	1,60
275	3,65	3,65	3,65	3,65	3,65	3,65	2,80
350	4,12	4,12	4,12	4,12	4,12	4,12	3,30
442	4,62	4,62	4,62	4,62	4,62	4,62	4,10
745	6,01	6,01	6,01	6,01	6,01	6,01	5,40
1293	7,91	7,91	7,91	7,91	7,91	7,91	7,47
1807	9,10	9,09	9,08	9,07	9,07	9,07	8,59
2285	9,10	9,09	9,08	9,07	9,07	9,07	9,14
2805	9,10	9,09	9,08	9,07	9,07	9,07	9,22

Vitesses d'impact au sol (m/s) en fonction des intensités et des tailles de gouttes.

3.4.3.6. Comparaison avec les pluies naturelles

Nous avons porté dans la dernière colonne du tableau précédant les vitesses d'impact relevées sous pluies naturelles (GUNN et KINZER ; LAMS cités par WISCMEIER et SMITH). Pour les gouttes de faibles et très faibles diamètres, les valeurs obtenues par les auteurs américains sont très nettement inférieures aux vitesses limites calculées ici. En effet, pour les gouttes très fines tombant des nuages, la chute doit suivre une loi complexe du fait des turbulences de l'air (importance de vent, des courants ascendants, etc...). Pour les gouttes de plus fort diamètre, les seules à intervenir effectivement sur l'énergie cinétique (cf. plus loin), les vitesses obtenues empiriquement sous pluies naturelles et celles calculées sous infiltromètre sont du même ordre (écart de 1 à 5 %) (cf. figure n° 13). Notons que les vitesses d'impact sous cet infiltromètre sont beaucoup plus proches des pluies naturelles que celles obtenues par BERTRAND et PARR (de l'ordre de 5 m/s).

3.4.4. Energie cinétique

3.4.4.1. Calculs et résultats

Connaissant les diamètres des gouttes et leurs vitesses d'impact au sol, il est possible d'en déduire l'énergie cinétique (E_c (J) = $1/2 M$ (KG) v^2 (m^2/s^2)).

Pour obtenir l'énergie cinétique correspondant à 1 mm de pluie par m^2 , nous avons cumulé les énergies de chaque classe granulométrique.

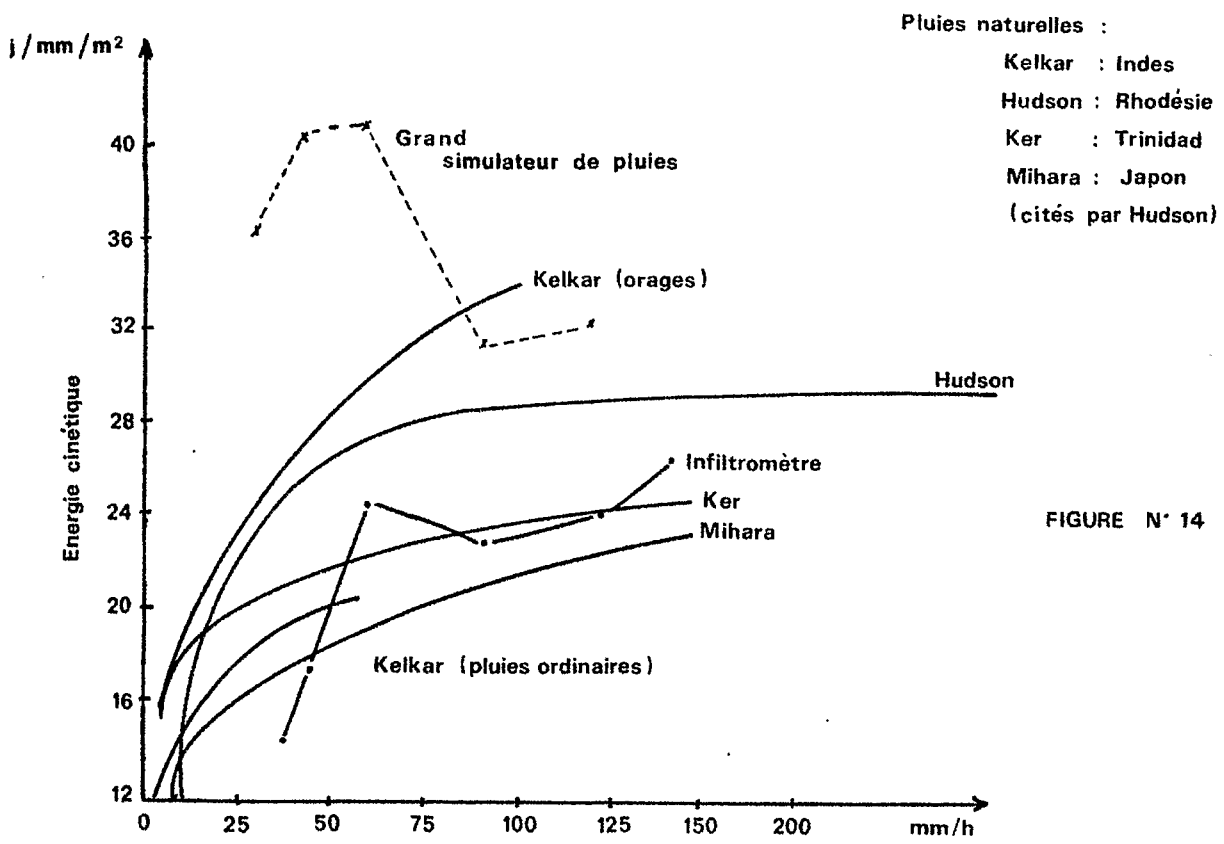


FIGURE N° 14

RELATION ENTRE L'ENERGIE CINETIQUE ET L'INTENSITE DES PLUIES NATURELLES ET SIMULEES

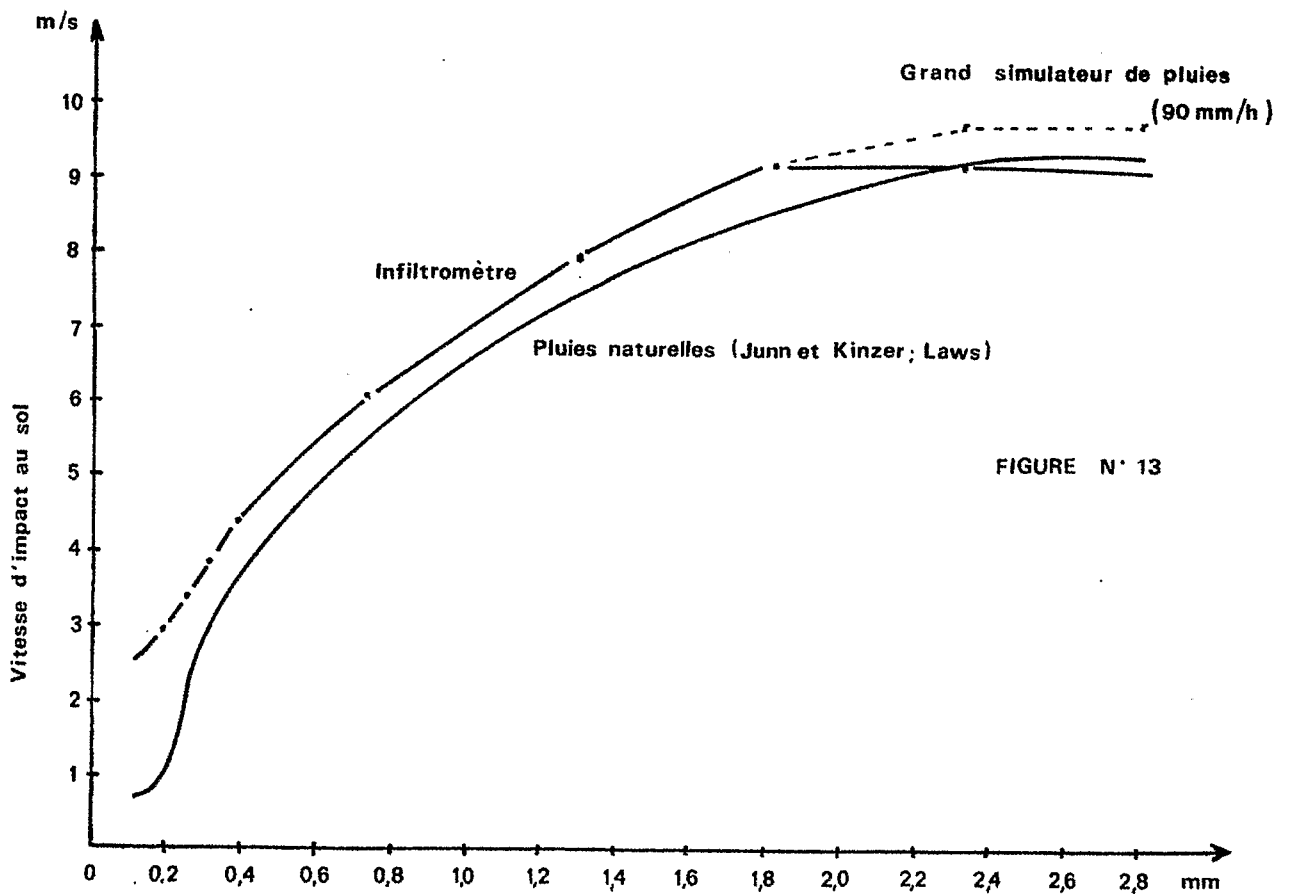


FIGURE N° 13

RELATION ENTRE LES VITESSES D'IMPACT AU SOL ET LE RAYON DES GOUTTES

Les résultats sont présentés dans le tableau ci-après.

Il apparait que seules les gouttes dont le diamètre dépasse 0,9 mm participent vraiment à la constitution de l'énergie cinétique. Dans le cas de l'infiltromètre, ce sont les gouttes dont le diamètre est compris entre 0,9 mm et 3 mm qui interviennent le plus (60 à 80 % de l'énergie cinétique totale).

Notons l'intérêt de tenir compte de la taille des gouttes dans l'évaluation de l'énergie cinétique. Si nous avons supposé que toutes les gouttes atteignaient le sol avec la même vitesse, nous aurions eu, pour une intensité de 140 mm/h :

$E_c = 41,13 \text{ J/m}^2/\text{mm}$ au lieu de $26,23 \text{ J/m}^2/\text{mm}$ et pendant une heure :

$E_c = 5758 \text{ J/m}^2/\text{h}$ au lieu de $3671 \text{ J/m}^2/\text{h}$ soit une erreur d'environ 60 % par excès !

Les résultats présentés ici sont obtenus cependant avec une incertitude : la vitesse radiale a été minorée. Mais l'introduction d'une erreur à ce niveau de calcul ne se manifeste que pour les gouttes dont le diamètre excède 3 mm (en-dessous les vitesses d'impact v_s sont égales aux vitesses limites). MEYER n'a pas tenu compte non plus de cette légère sous estimation. Nous considérons, par conséquent, que les résultats donnent une précision suffisante pour être comparée aux énergies cinétiques sous pluies naturelles.

Classes de diamètres (mm)	Pourcentage en masse (%)						Energie cinétique (Joules/mm de pluie/m ²)					
	37	45	60	90	120	140	37	45	60	90	120	140
200 - 0.315	8,51	7,07	2,13	3,58	2,58	1,70	0,255	0,212	0,063	0,107	0,077	0,051
315 - 0.400	6,38	5,05	1,83	2,63	2,06	1,51	0,266	0,211	0,076	0,110	0,086	0,063
400 - 0.500	6,38	5,05	1,83	3,10	2,06	1,89	0,425	0,336	0,122	0,206	0,137	0,126
500 - 0.630	10,64	5,05	2,74	4,77	1,55	2,83	0,708	0,336	0,183	0,318	1,032	0,184
630 - 0.800	10,64	6,06	5,41	5,97	3,09	5,09	0,903	0,514	0,466	0,507	0,262	0,432
800 - 1.000	8,51	8,08	4,57	4,06	23,71	3,96	0,908	0,862	0,488	0,433	2,530	0,422
1000 - 2.000	35,11	37,37	28,05	32,32	17,01	24,34	6,341	6,749	5,066	5,837	3,072	4,396
1000 - 3.150	9,57	23,23	42,38	30,79	32,47	34,53	2,993	7,267	13,258	9,632	10,158	11,043
1500 - 4.000	1,06	3,03	7,62	7,88	15,46	18,30	0,439	1,252	3,141	3,241	6,359	7,257
1000 - 5.000	3,19	0,00	3,35	5,01	0,00	5,85	1,321	-	1,381	2,061	-	2,406
Energie cinétique par mm de pluie (J/mm/m ²)							14,6	17,5	24,2	22,5	23,7	26,2
Energie cinétique par heure (J/h/m ²)							538,8	786,1	1454,6	2020,7	2845,6	3671,6

Classes granulométriques, intensités de pluies et Energies cinétiques

3.4.4.2. Comparaison avec les pluies naturelles

De nombreux auteurs ont essayé d'évaluer l'énergie cinétique développée sous pluies naturelles. Aucun n'a utilisé de procédé direct. Tous ont dû passer au préalable par la détermination de la taille des gouttes et une évaluation des vitesses d'impact (mesures directes ou calcul des vitesses limites). Or la taille médiane des gouttes, pour une intensité donnée subit d'importantes variations suivant la nature de la pluie (pluies d'orages ou normales). KELKAR distingue ainsi les pluies communes des pluies courtes et violentes. D'après HUDSON les variations sont plus fortes sous faibles intensités que sous les grandes (à partir de 75 mm/h). Mais il reconnaît que le nombre d'échantillons dans ce cas est de toute façon toujours plus limité (faible fréquence des fortes intensités).

Une des difficultés majeure rencontrée dans ce type d'expérimentation réside dans la détermination précise de l'intensité au moment de la prise d'échantillon. Il faut pouvoir disposer d'un pluviographe à mouvement rapide et constant, grâce auquel on peut repérer, d'une manière sûre l'instant où l'on opère.

De plus, il faudrait pouvoir prendre des échantillons à tout moment, y compris lors d'un violent orage la nuit ... Cette difficulté a été résolue par HUDSON qui a mis au point un appareil de prélèvement automatique (le procédé utilisé est celui des agrégats de farine).

HUDSON donne un graphique portant les résultats de divers auteurs. Nous y avons reporté la courbe correspondant à l'infiltromètre. Cette courbe recoupe assez bien celle obtenue par KER à Trinidad, à partir de 60 mm/h (cf. figure n° 14).

Parmi les différences observées par les divers auteurs, il est hélas impossible de distinguer ce qui provient des climats sous lesquels les travaux ont été menés et ce qui est dû aux diverses méthodes employées.

Quoiqu'il en soit, il semble possible de pouvoir dire que les énergies cinétiques obtenues par cet infiltromètre sont du même ordre que celles trouvées sous pluies naturelles. Nous avons trouvé des vitesses d'impact proches de celles trouvées par des méthodes photographiques par LAWS sous pluies naturelles. Les tailles des gouttes sont inférieures aux données de HUDSON, mais nous ne disposons pas des résultats des autres auteurs. Trouvant des énergies cinétiques et des vitesses d'impact voisines des leurs, il est très probable que les tailles des gouttes en diffèrent peu.

Nous présentons ci-après la comparaison, la plus défavorable, entre les énergies cinétiques sous infiltromètre et sous pluies naturelles en Rhodésie (HUDSON).

Intensités (mm/h)	Ec_s sous infil- tromètre (J/m ² /mm)	Ec_n sous pluies naturelles (J/mm ² /mm)	Ec_s/Ec_n %
37	14,5	27,5	57
45	17,5	26,7	66
60	24,2	27,7	87
90	22,4	28,8	78
120	23,7	29,0	82
140	26,2	29,1	90

Energies cinétiques sous pluies naturelles (Rhodésie)
et sous pluies simulées (infiltrromètre).

Ces résultats sont comparables à ceux obtenus par MEYER pour son simulateur de pluies : $Ec_s/Ec_n = 77\%$ à 50 mm/h. Ils sont meilleurs que ceux de BERTRAND et PARR : $Ec_s/Ec_n \approx 50\%$.

L'infiltrromètre produit des énergies cinétiques d'autant plus proches de celles des pluies naturelles que les intensités sont élevées.

Notons enfin qu'une expérimentation vient d'être mise en place à Adiopodoumé (Côte d'Ivoire) pour connaître les énergies cinétiques des pluies de la région d'Abidjan. Le nombre trop limité d'échantillons pour l'instant prélevés interdit d'en tirer des conclusions hâtives. Il semblerait toutefois que l'on obtienne des résultats assez proches de ceux d'HUDSON en Rhodésie.

IV - DISPOSITIF EXPERIMENTAL

On admet généralement que les principaux facteurs influençant le ruissellement, outre l'intensité et la durée de l'averse, sont : la nature du sol, l'état d'humectation initial du sol, la pente et la couverture végétale.

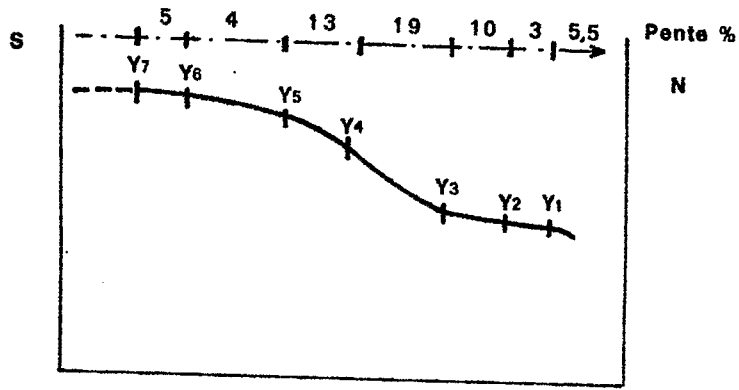
Le dispositif de mesure à mettre en place devait permettre l'étude de chacun de ces paramètres indépendamment des autres.

Le simulateur de pluie permet de fixer l'intensité et la durée de la pluie et de faire varier, par des arrosages successifs l'état d'humectation du sol. Il nous fallait donc trouver un emplacement de mesure présentant des variations de pente pour un même sol et au moins deux types de sols nettement différenciés. Le facteur couverture végétale est très difficile à quantifier. Seuls deux états sont faciles à définir et ont été retenus dans le cadre de cette étude : présence (végétation naturelle) ou absence (sol artificiellement dénudé) de végétation. Des reconnaissances sur le bassin du Manso ont permis de trouver une toposéquence répondant à nos besoins et de plus représentative de la région tant par les sols rencontrés que par le modelé. Cette toposéquence longue d'environ 500 m pour une dénivellation de 34 m (fig. 15) peut se décomposer du point de vue modelé en :

- Un sommet d'interfluve plan convexe (pente 4-5 ‰)
- Une pente de raccordement convexo-concave (pente 13-19 ‰)
- Un bas de versant concave (pente 3 ‰).

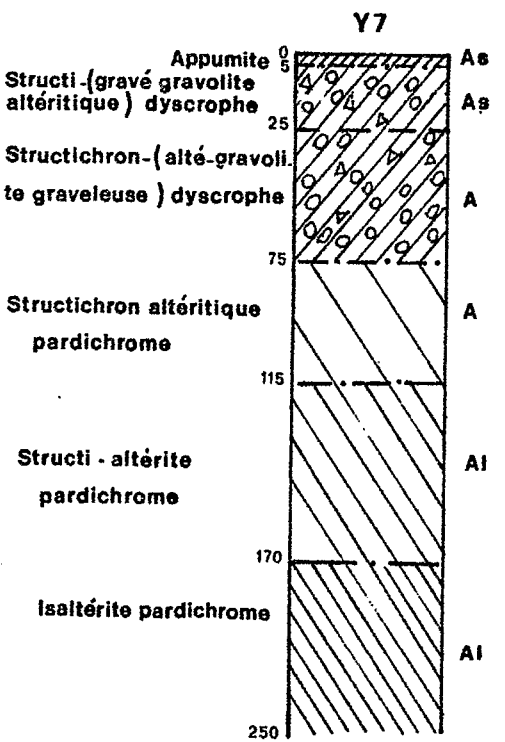
4.1. Etude pédologique

Sept fosses pédologiques ont été creusées le long de la toposéquence afin de déterminer la nature exacte des sols. La description en a été faite par C. VALENTIN. Pour cette description, la nouvelle terminologie typologique, mise au point par les pédologues de l'ORSTOM (CHATELIN et coll.) pour les sols ferrallitiques a été employée, l'ancienne classification, basée sur des concepts génétiques, s'étant à l'usage, révélée totalement inadaptée aux besoins des hydrologues. La terminologie typologique n'est pas une nouvelle classification, mais un langage basé sur un partage sémantique, chaque niveau de diagnose correspondant à un champ sémantique. La description des sols repose sur 3 niveaux de diagnose ; Un diagnostic primaire qui identifie l'horizon (on distingue 7 horizons majeurs dans les sols ferrallitiques), un diagnostic secondaire basé sur la structure et des diagnostics complémentaires portant sur la couleur, la texture, la composition minéralogique etc... Les diagnostics sont basés sur des critères objectifs purement descriptifs et non interprétatifs. Les néologismes retenus au niveau de chaque diagnose pouvant fournir un affixe, un substantif et un adjectif, permettent une combinatoire et une quantification. Cette nouvelle typologie s'avère beaucoup plus

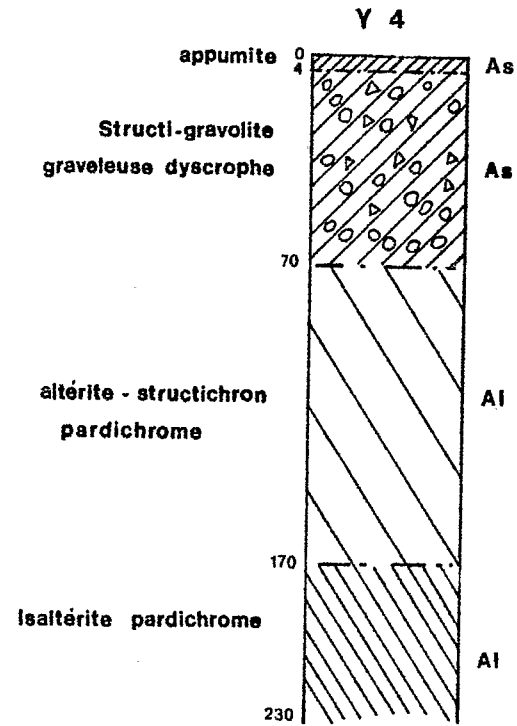


latitude : 5° 43 N
 longitude : 4° 06 W
 roche mère : Schiste

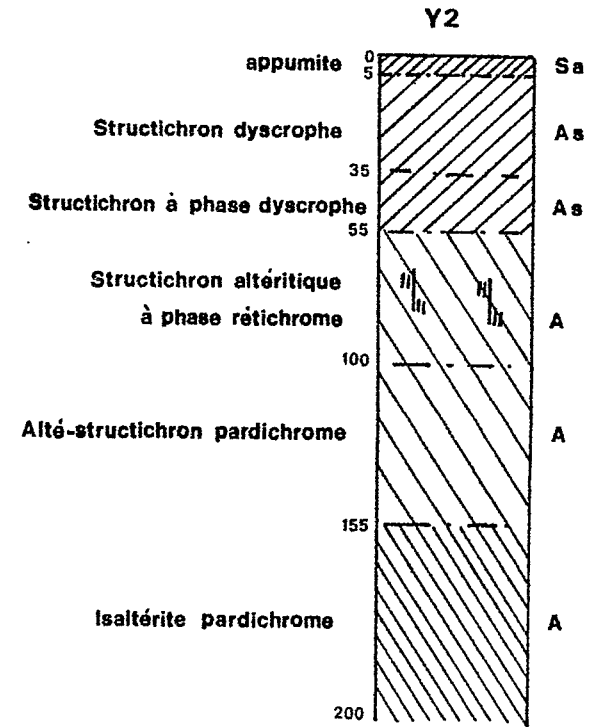
Lepto-apexol sur structi- (grave-gravolite altéritique) dyscrophe



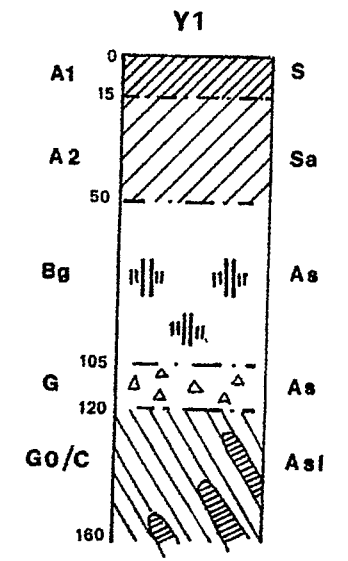
Lepto-apexol sur structi-gravolite dyscrophe



Dendro-apexol sur alté-structichron pardichrome



Sol hydromorphe peu organique à gley de profondeur



efficace que l'ancienne classification dans de nombreux domaines, entre autre pour l'étude de phénomènes dépendant des caractéristiques physiques des sols.

4.1.1. Description des sols (fig. 15)

On distingue 3 segments différents le long de la toposéquence

- Sommet d'interfluve et versant : Profils Y7, Y6, Y5, Y4 et Y3. Extension 460 m.

Les appumites argilo sableux peu épais recouvrent des horizons gravillonnaires dont le développement décroît avec la pente. L'isaltérite apparaît à une profondeur de 1,70 m. Les structures des horizons gravillonnaires passent de massives au sommet à polyédriques subanguleuses en aval. Couleur du structichron gravolitique (Y7) 5-YR 4/6 (brun rougeâtre).

Segment de pédoplasation.

- Bas de versant : Profil Y2. Extension 50 m.

Les appumites peu épais sablo argileux recouvrent un structichron non gravillonnaire. Des traces de réticromation apparaissent entre 0,55 et 1,00 m entre le structichron dyscrophe et l'alté-structichron. La structure des structichron est polyédrique. Couleur du structichron altéritique à phase réticrome : 2,5 YR 5/6 (rouge), 25 % de taches 2,5 YR 6/8 (rouge) et 10 % de taches 10 YR 6/8 (jaune brunâtre).

Segment de réticromation.

- Fond du thalweg : Profil Y 1, Extension 10 m.

L'horizon humifère sableux épais recouvre un horizon de gley apparaissant à 0,50 m. Les horizons humifères ont une structure grenue alors que les horizons sous jacents ont une structure anguleuse à massive. Couleur du Bg : 2,5 Y 7/0 (gris clair), 30 % de taches 7,5 YR 5/8 (brun vif).

Segment hydromorphe.

La description détaillée des 7 profils est donnée en annexe, ainsi que la définition des termes nouveaux employés.

4.1.2. Analyse des sols

Des analyses des principales caractéristiques physico-chimiques des différents horizons des profils Y1, Y2, Y3 et Y7 ont été effectuées. Les résultats en sont donnés dans les tableaux 1 à 4. On remarquera d'une part, la similitude existant entre les profils 7 et 3 faisant partie d'un même segment et d'autre part

que les profils 1 et 2, bien qu'appartenant à deux segments différents donc à deux types de pédogénèse, sont du point de vue des caractéristiques physico-chimiques assez proches l'un de l'autre.

Profil Y1

Tableau 1

Limites de l'horizon en cm	0 - 15	15 - 50	50 - 105	105 - 120	120 - 160
Refus total (> 2 mm) en %	0,1	0,6	0,1	53,8	18,2
Texture en % du sol sec à 35°C					
Argile (0-2 μ)	10,8	10,3	13,9	16,0	17,4
Limons fins (2-20 μ)	11,3	12,6	11,3	8,2	11,8
Limons grossiers (20-50 μ)	23,0	26,7	24,3	12,9	10,2
Sables fins (50-200 μ)	40,9	36,5	37,2	23,4	17,5
Sables grossiers (200-2000 μ)	11,3	13,0	12,5	38,3	44,2
Matière organique totale	3,5	0,5			
Structure en % du sol à sec à 105°C					
Densité réelle	2,48	2,63	2,49	2,58	2,64
Stabilité struct. max	0,6				
Agrégats alcool	26,1				
" eau	21,3				
" benzène	24,5				
Limites mécaniques en % du sol à sec à 35°C					
Limite liquidité	29,6				
Limite plasticité	impossible				
point d'adhésivité	24,2				
Matière organique en % du sol sec à 35°C					
C (Webley et Black)	20,16	2,85			
N (Technicon)	1,95	0,23			
C/N	10,3	12,4			

Profil Y 2

Tableau 2

Limites de l'horizon en cm	0 - 5	5 - 35	35-55	55-100	100-155	155-220
Refus total (> 2 mm)	0,7	0,1	0,1	0,1	1,8	0,1
Texture						
Argile	11,3	13,9	24,5	32,4	29,5	27,6
Limons fins	9,5	10,3	10,3	8,9	10,5	9,7
Limons grossiers	18,9	20,9	15,7	15,4	13,9	15,2
Sables fins	38,3	33,8	26,1	23,2	27,7	24,5
Sables grossiers	18,1	20,5	22,2	19,4	18,8	22,2
Matière organique totale	3,0	0,7				
Structure						
Densité réelle	2,81	2,55	2,51	2,58	2,60	2,60
Stabilité struct. max.	0,9					
Agrégats alcool	33,6					
" eau	28,1					
" benzène	25,9					
Limites mécaniques						
Limite liquidité	28,5					
Limite plasticité	impossible					
Point d'adhésivité	24,3					
Matière organique						
C	17,36	3,92				
N	1,53	0,32				
C/N	11,4	12,3				

Tableau 3

Profil Y 3

Limites de l'horizon en cm	0 - 7	7 - 20	20 - 50	50 - 90	90 - 220
Refus total (> 2 mm)	4,8	1,7	58,8	2,8	0,1
Texture					
Argile	25,0	28,9	38,4	34,7	22,1
Limons fins	10,5	10,3	12,1	14,7	21,8
Limons grossiers	14,4	14,1	9,2	11,9	14,7
Sables fins	28,1	24,1	15,7	15,3	16,9
Sables grossiers	15,5	20,6	22,9	22,8	24,3
Matière organique totale	5,8	2,0			
Structure					
Densité réelle	2,47	2,55	2,58	2,78	2,70
Stabilité struct. max.	0,3				
Agrégats alcool	61,7				
" eau	49,4				
" benzène	47,5				
Limites mécaniques					
Limite liquidité	46,3				
Limite plasticité	impossible				
Point d'adhésivité	40,0				
Matière organique					
C	33,54	11,52			
N	2,10	1,28			
C/N	16,0	9,0			

Tableau 4

Profil Y 7

Limites de l'horizon en cm	0 - 5	5 - 25	25-75	75-115	115-170	170-250
Refus total (> 2 mm)	8,0	73,2	43,5	55,9	4,9	1,7
Texture						
Argile	19,2	23,7	36,6	46,8	42,3	43,7
Limons fins	10,5	9,7	10,3	9,7	16,6	14,2
Limons grossiers	20,2	19,1	13,8	8,8	8,5	12,1
Sables fins	29,5	26,7	17,9	10,8	12,5	12,5
Sables grossiers	16,3	18,5	20,6	21,5	16,7	13,8
Matière organique totale	4,5	2,9				
Structure						
Densité réelle	2,53	2,57	2,64	2,78	2,62	2,65
Stabilité struct. max.	0,3					
Agrégats alcool	57,5					
" eau	43,0					
" benzène	42,1					
Limites mécaniques						
Limite liquidité	33,2					
Limite plasticité	25,6					
Point d'adhésivité	28,5					
Matière organique						
C	26,13	16,81				
N	2,10	1,40				
C/N	12,4	12,0				

4.2. Choix et aménagement des emplacements de mesure

Nous basant sur l'étude pédologique et sur la nature du modelé, nous avons choisis trois emplacements de mesure permettant d'étudier l'influence de la nature du sol et de la pente sur le ruissellement. Les deux premiers sont implantés sur le même type de sol (sol ferrallitique avec horizon gravillonnaire et argileux à faible profondeur) mais l'un sur pente d'environ 10 % et l'autre sur une pente de l'ordre de 20 %. Le troisième se situe en bas de versant sur un sol hydromorphe (fig. 15).

Afin de pouvoir faire des essais avec des intensités ou des durées de l'averse différentes sur un même type de sol et pour un même état d'humectation initial, sur chacun des trois emplacements choisis, trois parcelles de mesure ont été installées (fig. 16). Ce sont donc au total neuf parcelles, dont les principales caractéristiques sont résumées dans le tableau ci-après, qui ont été mises en place.

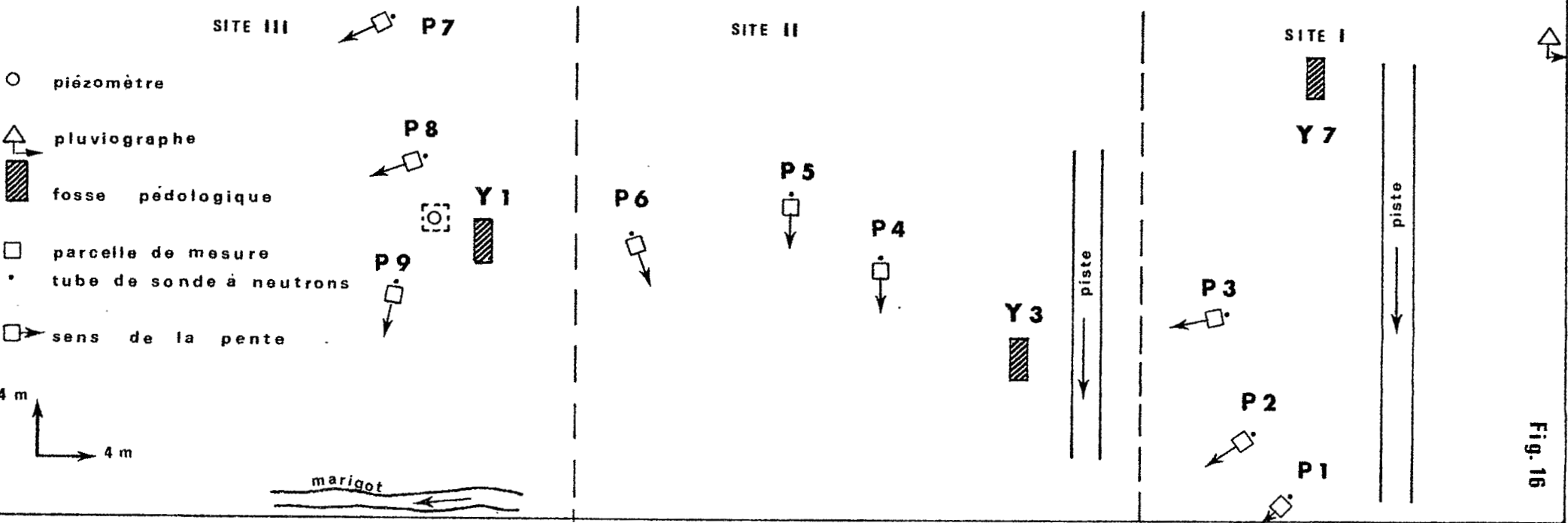
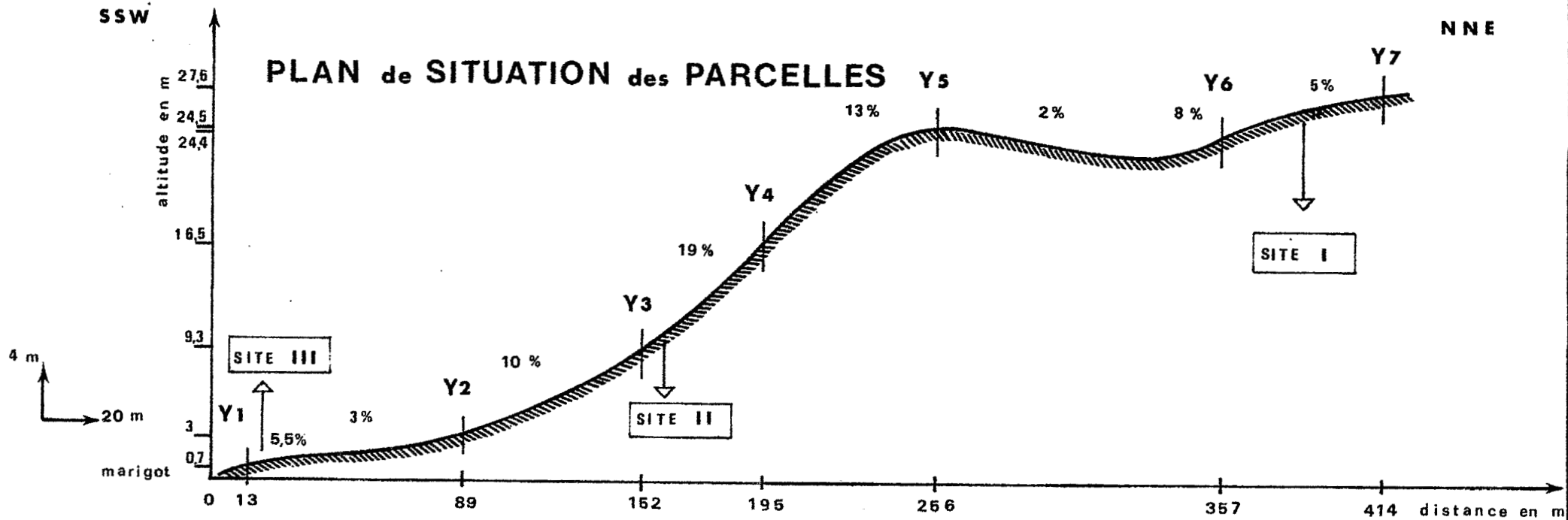
N° de la parcelle	Situation	Nature du sol	Profil pédo. de référence	Pente en %
1	haut de versant	Sol ferrallitique	Y 7 - Y 6	11,0
2	"	"	"	9,0
3	"	"	"	9,5
4	pente de raccordement	"	Y 3	19,5
5	"	"	"	19,0
6	"	"	"	19,5
7	bas de versant	Sol hydromorphe	Y 1	4,0
8	"	"	"	4,5
9	"	"	"	6,0

Chacune des parcelles d'un mètre carré est équipée d'un cadre métallique qui délimite la zone étudiée et recueille le ruissellement. Pour les deux premières pluies simulées nous ne disposions que de 6 cadres. Les 3 cadres du site 2 ont été implantés en Octobre et seul celui de la parcelle 6 a été déplacé avant la deuxième mesure, le ruissellement observé lors de la première pluie étant très faible par rapport à celui des parcelles 4 et 5. Les trois cadres restant ont été utilisés lors des deux premières pluies sur les sites 1 et 3. A la fin de la deuxième pluie simulée (4 - 11) ils ont été laissés sur le site 3, trois nouveaux cadres étant mis en place sur le site 1 avant la troisième pluie (16 - 11). Le dispositif, alors complet, n'a plus été modifié jusqu'à la fin de la campagne. Des tubes pour mesures neutroniques de l'humidité du sol ont été

SSW

NNE

PLAN de SITUATION des PARCELLES



- piézomètre
- ▲ pluviographe
- ▨ fosse pédologique
- parcelle de mesure
- tube de sonde à neutrons
- ◻ sens de la pente

Fig. 16

installés début Octobre à une dizaine de centimètres à l'amont de chaque parcelle. De même, à l'aval de chacune des parcelles, une fosse destinée à la cuve recueillant le ruissellement a été aménagée. Un tel dispositif permet une rotation rapide, puisque seul le simulateur de pluie est à déplacer d'une parcelle à l'autre.

Comme nous l'avons déjà signalé (2.1.2.), le dispositif de mesure a été complété par un pluviographe à augets basculants, situé au sommet de la toposéquence, qui a enregistré toute les averses naturelles se produisant pendant la période des essais, et par un piezomètre, implanté en bas du versant, à proximité immédiate des parcelles 7,8 et 9 (fig. 16) permettant de suivre les variations de niveau de la nappe phréatique.

V - PROTOCOLE EXPERIMENTAL ET PROGRAMME DES ESSAIS

Dans le cadre de la présente étude, l'utilisation du simulateur de pluie avait pour but principal de caractériser l'influence de la nature du sol sur le ruissellement. Il était donc nécessaire de déterminer préalablement l'influence des autres facteurs intervenant dans les processus de ruissellement. Grâce au simulateur et au dispositif de mesure mis en place, il était possible de tester chacun des paramètres indépendamment des autres par un programme d'essais dont le détail est indiqué ci-après.

- Etude de l'influence de l'intensité de la pluie sur le ruissellement

Le même jour (état d'humectation initial du sol identique) les trois parcelles d'un même site (même nature du sol et même pente) sont soumises à une pluie simulée de même durée mais d'intensité différente pour chaque parcelle.

- Durée de la pluie

Conditions identiques à celles de l'essai précédent : même jour, trois parcelles d'un même site mais pluie d'intensité constante et de durée variable suivant les parcelles. Un seul essai de ce type a été effectué, à titre de contrôle, puisque, comme nous le verrons plus loin, l'étude de l'influence de la durée de la pluie peut se faire à partir d'une seule averse de longue durée.

- Etat d'humectation initial du sol

Sur une même parcelle, simulation de plusieurs averses, d'intensité et de durée identiques, à des périodes différentes (saison sèche - saison des pluies). Il est également possible en saison sèche, de faire varier l'état d'humectation du sol, en simulant des pluies successives, de mêmes caractéristiques, séparées par un bref intervalle de temps.

- Pente

Le même jour, pluies simulées de même intensité et même durée sur les parcelles de haut et milieu de versant.

- Couverture végétale

Ce facteur, semblant peu différent sur les neuf parcelles et évoluant lentement dans le temps, a été considéré, à priori, comme étant une constante pendant la durée des essais.

Les différents essais décrits précédemment peuvent bien sur être combinés entre eux afin d'en limiter le nombre au maximum. Le programme schématisé dans le tableau suivant est théoriquement suffisant pour étudier toutes les variables, si on le répète pour différents états d'humectation du sol.

Site		I			II			III		
Parcelle		1	2	3	4	5	6	7	8	9
Caractéristiques de la pluie *	Durée	Identique pour toutes les parcelles								
	Intensité	I ₁	I ₂	I ₃	I ₁	I ₂	I ₃	I ₁	I ₂	I ₃

* Toutes les pluies sont simulées le même jour.

Pour les premiers essais nous voulions obtenir le maximum de valeurs et comme de plus il est matériellement impossible, du fait des problèmes de ravitaillement en eau, d'effectuer les 9 pluies simulées le même jour, le programme d'essais réellement adopté a été le suivant :

Sites		I			II			III		
Jour	Parcelles	1	2	3	4	5	6	7	8	9
	J	J + 1	I ₁	I ₂	I ₃	I ₁	I ₂	I ₃	I ₁	I ₂
J + 2	J'	I ₂	I ₃	I ₁	I ₂	I ₃	I ₁	I ₂	I ₃	I ₁
J' + 1	J' + 2	I ₃	I ₁	I ₂	I ₃	I ₁	I ₂	I ₃	I ₁	I ₂
J''	J'' + 1	I ₃	I ₁	I ₂	I ₃	I ₁	I ₂	I ₃	I ₁	I ₂
J'' + 2										

... / ...

Pour ces essais le protocole utilisé a été le suivant :

- Durée de la pluie : 1 heure
- $I_1 = 60 \text{ mm/h}$
- Intensités : $I_2 = 90 \text{ mm/h}$
- $I_3 = 120 \text{ mm/h}$

Ces essais ont malheureusement mis en évidence des différences importantes quant à l'aptitude au ruissellement, entre les différentes parcelles d'un même site. Nous avons alors pensé que, malgré la faible distance séparant les parcelles, ces différences provenaient de l'hétérogénéité du sol. Pour mettre en évidence ce nouveau facteur "hétérogénéité du sol" il nous fallait simuler, le même jour une pluie identique sur chacune des trois parcelles d'un même site. Le sol étant très sec à la période des essais (Janvier - Février) il nous était possible en effectuant deux pluies identiques, séparées d'un bref intervalle de temps, d'obtenir deux valeurs correspondant à deux états d'humectation préalable très différents. Le protocole retenu a donc été le suivant : pluie d'intensité I pendant 30 minutes, arrêt de 20 minutes puis seconde pluie d'intensité I pendant 30 minutes. Afin d'estimer l'influence possible de l'intensité d'arrosage, trois séries d'essais suivant le protocole précédent ont été faites avec des intensités de 60, 90 et 120 mm/h. L'intervalle de 15 jours entre deux séries de mesures, permettait au sol de revenir à un état très sec avant la mesure suivante.

Pour déterminer l'importance du paramètre "couverture végétale", une dernière série de mesures a été entreprise au début du mois de Mars, sur les parcelles dont on avait préalablement supprimé la végétation. Afin de ne pas bouleverser la structure superficielle du sol, les herbes ont été coupées au ciseau au ras du sol et les feuilles mortes tombées à l'intérieur des parcelles ont été enlevées, sans toucher à la litière. Le protocole adopté pour cette série de mesure a été le suivant : pluie de 30 minutes à 90 mm/h, arrêt de 20 minutes suivie d'une pluie de 30 minutes à 45 mm/h. (Nous avons prévu d'appliquer le même protocole que pour la série précédente, mais une pluie naturelle de 91 mm, tombée la veille des premiers essais, nous a amené à modifier ce protocole puisqu'il n'était plus possible d'avoir un sol très sec pour la 1ère pluie).

Pour chacune des pluies simulées des mesures d'humidité du sol ont été faites à la sonde à neutrons suivant le protocole suivant :

- 1ère série (pluie de 1 h)
 - Mesure avant la pluie
 - Mesures 15, 30 et 45 minutes après le début de la pluie
 - Mesure à la fin de la pluie (60 mm)
 - Mesure environ 1 heure après la fin de la pluie.

... / ...

- 2 et 3 ème série (2 pluies de 30 minutes)

- Mesure avant la pluie
- Mesures 5 et 20 minutes après le début de la pluie
- Mesure à l'arrêt de la pluie (30 mn)
- Mesures identiques pour la deuxième pluie de 30 mn
- Mesure entre 1 et 2 h après la fin de la seconde pluie.

VI - MESURES EFFECTUEES

Au total 119 pluies simulées ont été effectuées sur les 9 parcelles. Les caractéristiques de ces pluies sont données dans les tableaux 5 à 13 où sont reportés :

Colonne 1 : Le numéro de référence de l'averse

Colonne 2 : La date de l'essai

Colonne 3 : L'heure de début de l'averse

Colonne 4 : La hauteur totale P_u de l'averse (en mm) obtenue en multipliant la durée de la pluie par son intensité moyenne. Toutes les pluies simulées ayant des intensités supérieures à 45 mm/h et étant donc susceptibles de ruisseler, l'emploi du sigle P_u , généralement réservé à la pluie dite "utile" se justifie.

Colonne 5 : La hauteur P_e de la pluie efficace (en mm) définie comme la fraction de la pluie ayant effectivement ruisselé

$$P_e = I_m \times t_e$$

Colonne 6 : L'intensité moyenne I_m de l'averse (en mm/h) qui est la moyenne des valeurs mesurées lors des deux contrôles faits systématiquement avant et après la pluie à l'aide du bac en tôle (cf. 3.3.2.)

Colonne 7 : Durée totale de l'averse t_u (en mn)

Colonne 8 : Durée de la pluie efficace t_e (en mn)

Colonne 9 : hauteur, en mm, P_i de la pluie dite "d'imbibition" :

$$P_i = P_u - P_e.$$

Les pluies n° 1, 2, 4, 7 et 8 ont été interrompues pour permettre la vidange de la cuve, le dispositif de vidange par motopompe n'étant pas encore mis en service.

Site I
Parcelle I

Tableau 5

N°	Date	heure	Pu mm	Pe mm	Im mm/h	tu mn.sec	te mn.sec	Pi mm
1	12.10.77	10 h 55	109,3	102,5	116,1	56,30*	53,00	6,8
10	02.11.77	11 h 57	24,0	13,5	90,0	16,00	9,00	10,5
19	16.11.77	14 h 20	87,2	84,3	87,2	60,00	58,00	2,9
28	01.12.77	8 h 08	57,9	53,1	57,9	60,00	55,00	4,8
37	21.12.77	8 h 24	46,6	42,7	(1)	30,00	27,30	3,9
46	18.01.78	8 h 20	45,0	43,2	90,0	30,00	28,50	1,8
47	18.01.78	9 h 10	45,0	43,5	90,0	30,00	29,00	1,5
64	01.02.78	8 h 00	30,0	27,0	60,0	30,00	27,00	3,0
65	01.02.78	8 h 50	30,0	28,0	60,0	30,00	28,00	2,0
84	22.02.78	8 h 00	62,0	59,9	124,0	30,00	29,00	2,1
85	22.02.78	8 h 54	62,0	60,4	124,0	30,00	29,15	1,6
102	08.03.78	7 h 47	47,0	45,4	94,1	30,00	29,00	1,6
103	08.03.78	8 h 37	20,6	19,6	41,3	30,00	28,30	1,0

* Lire 56 minutes 30 secondes

(1) Pluie à intensité variable 60,138 et 72 mm/h chacune pendant 10 mn

Site I
Parcelle 2

Tableau 6

N°	Date	heure	Pu mm	Pe mm	Im mm/h	tu mn.sec	te mn.sec	Pi mm
2	12.10.77	14 h 56	76,6	73,1	76,6	60,00	57,15	3,5
11	02.11.77	13 h 18	45,0	34,5	90,0	30,00	23,00	10,5
20	16.11.77	11 h 49	61,0	59,0	61,0	60,00	58,00	2,0
29	01.12.77	10 h 33	120,0	116,7	120,0	60,00	58,20	3,3
38	21.12.77	10 h 44	43,5	40,6	58,0	45,00	42,00	2,9
48	18.01.78	10 h 30	43,9	41,7	87,8	30,00	28,30	2,2
49	18.01.78	11 h 20	43,9	41,7	87,8	30,00	28,30	2,2
66	01.02.78	10 h 05	29,2	24,4	58,5	30,00	25,00	4,8
67	01.02.78	10 h 55	29,2	26,8	58,5	30,00	27,30	2,4
86	22.02.78	10 h 10	61,0	56,9	122,0	30,00	28,00	4,1
87	22.02.78	11 h 00	61,0	59,5	122,0	30,00	29,15	1,5
104	08.03.78	10 h 05	45,9	43,6	91,8	30,00	28,30	2,3
105	08.03.78	10 h 55	24,4	23,4	48,8	30,00	28,45	1,0

... / ...

Site I
Parcelle 3

Tableau 7

N°	Date	heure	Pu mm	Pe mm	Im mm/h	tu mn.sec	te mn.sec	Pi mm
3	12.10.77	13 h 01	51,4	47,1	51,4	60,00	55,00	4,3
12	02.11.77	16 h 17	86,7	85,2	86,7	60,00	59,00	1,5
21	16.11.77	8 h 47	108,3	106,5	108,3	60,00	59,00	1,8
30	01.12.77	13 h 36	90,0	87,7	90,0	60,00	58,30	2,3
39	21.12.77	12 h 40	46,2	42,3	(1)	30,00	27,30	3,9
50	18.01.78	12 h 56	45,2	42,4	90,5	30,00	28,10	2,8
51	18.01.78	13 h 49	45,2	43,4	90,5	30,00	28,50	1,8
68	01.02.78	12 h 26	30,0	26,5	60,0	30,00	26,30	3,5
69	01.02.78	13 h 16	30,0	28,5	60,0	30,00	28,30	1,5
88	22.02.78	12 h 27	61,0	59,0	122,0	30,00	29,00	2,0
89	22.02.78	13 h 17	61,0	59,5	122,0	30,00	29,15	1,5
106	08.03.78	12 h 28	46,1	44,6	92,3	30,00	29,00	1,5
107	08.03.78	13 h 18	23,6	22,8	47,2	30,00	29,00	0,8

(1) Pluie à intensité variable 60, 120 et 90 mm/h chacune pendant 10 mn.

Site II
Parcelle 4

Tableau 8

N°	Date	heure	Pu mm	Pe mm	Im mm/h	tu mn.sec	te mn.sec	Pi mm
4	13.10.77	11 h 17	117,1	111,5	111,5	63,00	60,00	5,5
13	03.11.77	9 h 38	23,7	22,1	94,7	15,00	14,00	1,6
22	17.11.77	14 h 24	90,3	88,8	90,3	60,00	59,00	1,5
31	02.12.77	8 h 33	60,0	59,0	60,0	60,00	59,00	1,0
40	22.12.77	8 h 03	46,2	44,7	92,4	30,00	29,00	1,5
52	19.01.78	8 h 03	45,6	44,1	91,3	30,00	29,00	1,5
53	19.01.78	8 h 53	45,6	44,1	91,3	30,00	29,00	1,5
70	02.02.78	8 h 10	30,5	27,9	61,0	30,00	27,30	2,6
71	02.02.78	9 h 00	30,5	29,2	61,0	30,00	28,45	1,3
90	23.02.78	8 h 02	61,0	59,0	122,0	30,00	29,00	2,0
91	23.02.78	8 h 52	61,0	59,5	122,0	30,00	29,15	1,5
108	09.03.78	7 h 53	46,1	43,8	92,3	30,00	28,30	2,3
109	09.03.78	8 h 43	21,9	21,0	43,9	30,00	28,45	0,9

... / ...

Site II
Parcelle 5

Tableau 9

N°	Date	heure	Pu mm	Pe mm	Im mm/h	tu mn.sec	te mn.sec	Pi mm
5	13.10.77	14 h 06	86,5	79,3	86,5	60,00	55,00	7,2
14	03.11.77	11 h 25	45,0	43,5	90,0	30,00	29,00	1,5
23	17.11.77	11 h 36	62,6	61,5	62,6	60,00	59,00	1,1
32	02.12.77	10 h 47	120,0	118,7	120,0	60,00	59,20	1,3
41	22.12.77	9 h 43	44,1	41,9	(1)	30,00	28,30	2,2
54	19.01.78	10 h 07	42,6	40,5	85,2	30,00	28,30	2,1
55	19.01.78	10 h 57	42,6	41,2	85,2	30,00	29,00	1,4
72	02.02.78	10 h 20	30,0	28,0	60,0	30,00	28,00	2,0
73	02.02.78	11 h 10	30,0	28,7	60,0	30,00	28,45	1,3
92	23.02.78	10 h 08	59,0	57,0	118,0	30,00	29,00	2,0
93	23.02.78	11 h 02	59,0	57,5	118,0	30,00	29,15	1,5
110	09.03.78	10 h 08	45,0	43,5	90,0	30,00	29,00	1,5
111	09.03.78	10 h 58	22,6	22,0	45,2	30,00	29,15	0,6

(1) Pluie à intensité variable 60, 120 et 90 mm/h chacune pendant 10 mn.

Site II
Parcelle 6

Tableau 10

N°	Date	heure	Pu mm	Pe mm	Im mm/h	tu mn.sec	te mn.sec	Pi mm
6	13.10.77	16 h 06	68,2	55,8	62,0	66,00	54,00	12,4
15	03.11.77	14 h 40	90,5	89,7	90,5	60,00	59,30	0,8
24	17.11.77	8 h 23	113,5	112,5	115,4	59,00	58,30	1,0
33	02.12.77	13 h 48	92,3	90,8	92,3	60,00	59,00	1,5
42	22.12.77	12 h 18	44,4	42,9	59,2	45,00	43,30	1,5
56	19.01.78	12 h 23	44,2	36,8	88,3	30,00	25,00	7,4
57	19.01.78	13 h 13	44,2	43,2	88,3	30,00	29,20	1,0
74	02.02.78	12 h 42	29,5	26,8	59,0	30,00	27,15	2,7
75	02.02.78	13 h 32	29,5	28,5	59,0	30,00	29,00	1,0
94	23.02.78	12 h 32	60,0	58,0	120,0	30,00	29,00	2,0
95	23.02.78	13 h 22	60,0	58,7	120,0	30,00	29,20	1,3
112	09.03.78	12 h 31	44,4	43,3	88,9	30,00	29,15	1,1
113	09.03.78	13 h 21	21,8	21,2	43,6	30,00	29,15	0,6

... / ...

Site III
Parcelle 7

Tableau 11

N°	Date	heure	Pu mm	Pe mm	Im mm/h	tu mn.sec	te mn.sec	Pi mm
7	14.10.77	10 h 22	116,9	112,0	120,0	58,30	56,00	4,9
16	04.11.77	10 h 35	50,4	47,6	(1)	45,00	42,30	2,8
25	18.11.77	8 h 38	91,1	88,1	91,1	60,00	58,00	3,0
34	03.12.77	8 h 03	60,5	57,0	60,5	60,00	56,30	3,5
43	23.12.77	8 h 20	43,6	38,7	58,1	45,00	40,00	4,9
58	20.01.78	8 h 07	45,0	41,5	90,0	30,00	27,40	3,5
59	20.01.78	8 h 57	45,0	42,5	90,0	30,00	28,20	2,5
76	03.02.78	8 h 03	28,8	25,4	57,6	30,00	26,30	3,4
77	03.02.78	8 h 53	28,8	26,4	57,6	30,00	27,30	2,4
96	24.02.78	8 h 03	60,5	58,0	121,0	30,00	28,45	2,5
97	24.02.78	8 h 53	60,5	58,5	121,0	30,00	29,00	2,0
114	10.03.78	8 h 51	45,0	43,5	90,0	30,00	29,00	1,5
115	10.03.78	9 h 41	22,5	21,2	45,0	30,00	28,15	1,3

(1) Pluie à intensité variable 45,8 - 61,0 et 94,7 mm/h chacune pendant 15 mn.

Site III
Parcelle 8

Tableau 12

N°	Date	heure	Pu mm	Pe mm	Im mm/h	tu mn.sec	te mn.sec	Pi mm
8	14.10.77	12 h 40	103,5	97,5	90,0	69,00	65,00	6,0
17	04.11.77	12 h 44	47,0	42,3	94,1	30,00	27,00	4,7
26	18.11.77	11 h 00	59,0	56,3	59,0	60,00	57,15	2,7
35	03.12.77	10 h 02	124,1	122,0	124,1	60,00	59,00	2,1
44	23.12.77	10 h 10	43,8	33,6	(1)	30,00	23,00	10,2
60	20.01.78	10 h 14	45,2	42,9	90,5	30,00	28,30	2,3
61	20.01.78	11 h 04	45,2	42,2	90,5	30,00	28,00	3,0
78	03.02.78	10 h 07	29,3	27,3	58,6	30,00	28,00	2,0
79	03.02.78	10 h 57	29,3	27,3	58,6	30,00	28,00	2,0
98	24.02.78	10 h 10	61,0	57,9	122,0	30,00	28,30	3,1
99	24.02.78	11 h 00	61,0	57,9	122,0	30,00	28,30	3,1
116	10.03.78	11 h 12	46,5	44,2	93,1	30,00	28,30	2,3
117	10.03.78	12 h 02	22,5	21,0	45,0	30,00	28,00	1,5

(1) Pluie à intensité variable 60, 120 et 90 mm/h chacune pendant 10 mn.

Site III
Parcelle 9

Tableau 13

N°	Date	heure	Pu mm	Pe mm	Im mm/h	tu mn.sec	te mn.sec	Pi mm
9	14.10.77	15 h 02	62,3	55,3	62,0	60,30	53,30	7,0
18	04.11.77	14 h 56	35,4*	26,9	92,3	23,00	17,30	8,5
27	18.11.77	13 h 18	120,0	117,0	120,0	60,00	58,30	3,0
36	03.12.77	11 h 45	87,7	83,8	92,3	57,00	54,30	3,9
45	23.12.77	12 h 05	45,5	43,2	91,1	30,00	28,30	2,3
62	20.01.78	12 h 29	45,0	42,7	90,0	30,00	28,30	2,3
63	20.01.78	13 h 19	45,0	42,0	90,0	30,00	28,00	3,0
80	03.02.78	12 h 18	30,0	26,5	60,0	30,00	26,30	3,5
81	03.02.78	13 h 08	30,0	24,0	60,0	30,00	24,00	6,0
82	14.02.78	15 h 41	30,5	27,4	61,0	30,00	27,00	3,1
83	14.02.78	16 h 31	30,5	27,9	61,0	30,00	27,30	2,6
100	24.02.78	12 h 22	61,0	57,9	122,0	30,00	28,30	3,1
101	24.02.78	13 h 12	61,0	57,9	122,0	30,00	28,30	3,1
118	10.03.78	13 h 23	45,6	41,0	91,3	30,00	27,00	4,6
119	10.03.78	14 h 13	22,7	19,7	45,4	30,00	26,00	3,0

* Pluie interrompue par une averse naturelle

VII - RESULTATS OBTENUS

7.1. Hydrogramme de ruissellement

Lors de chaque pluie simulée, on enregistre la courbe des volumes ruisselés cumulés. Les variations de pente de cette courbe permettent le calcul des débits de ruissellement instantanés qui peuvent être reportés en fonction du temps pour dessiner l'hydrogramme de ruissellement. En pratique les hydrogrammes sont représentés de la manière suivante : en abscisse sont portés les temps en minutes avec pour origine l'heure de début de la pluie, et en ordonnée les intensités de la pluie I , du ruissellement R et de l'infiltration F exprimées en millimètres par heure. On obtient des hydrogrammes dont l'aspect est voisin de celui de l'hydrogramme théorique reproduit sur la figure 17.

L'examen des hydrogrammes permet de constater qu'ils peuvent se décomposer, si l'averse est suffisamment longue, en quatre phases, chacune étant représentée par une portion de courbe différente.

- La première de ces phases, caractérisée par un ruissellement nul est dite phase d'imbibition. Elle commence au début de la pluie ($t = 0$) et se termine à l'apparition du ruissellement ($t = t_i$). Elle est caractérisée par la hauteur de la pluie P_i , dite pluie d'imbibition, qui est absorbée par la parcelle avant le déclenchement du ruissellement.

- Lors de la seconde phase, dite phase transitoire, on observe une courbe de ruissellement croissante en forme de S aux courbures plus ou moins prononcées. La forme de cette courbe traduit un régime transitoire qui résulte principalement de la diminution de l'intensité d'infiltration.

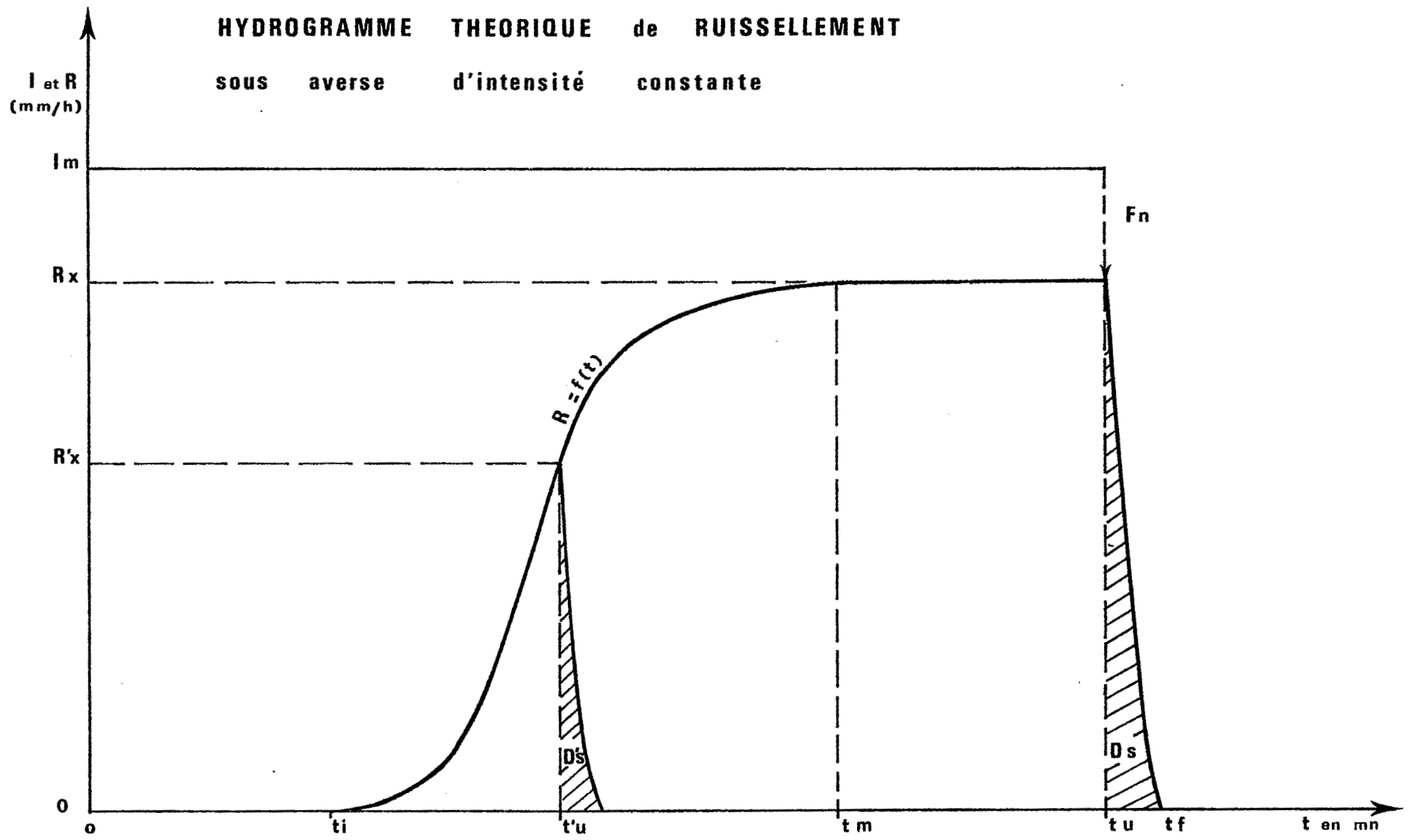
- Entre les temps t_m (fin du régime transitoire) et t_u (fin de la pluie), on constate l'apparition d'un palier quasiment horizontal dans la courbe de ruissellement, dénotant l'établissement d'un régime permanent pour l'infiltration et le ruissellement. A cette valeur maximale de l'intensité de ruissellement, désignée par le symbole R_x , correspond bien évidemment, une intensité minimale d'infiltration. $F_n = I_m - R_x$.

- Dès la fin de la pluie, on note une décroissance progressive du ruissellement qui devient nul au temps t_f . C'est la phase de vidange. Dans ce qui suit, la lame d'eau correspondant à cet écoulement est désignée par le symbole D_s (détention superficielle).

L'analyse théorique de ces 4 phases a été faite par A. LAFFORGUE à partir des hydrogrammes obtenus avec le grand simulateur de pluie.

Fig. 17

HYDROGRAMME THEORIQUE de RUISSELLEMENT
sous averse d'intensité constante



J.R.S.T.O.M. Service Hydrologique

DESSINE PAR N.G.

R.C.I. N°

Imp. 1953 A-1-1-80

7.2. Influence de la durée de l'averse sur l'hydrogramme

On peut constater sur la figure 17 que la lame d'eau ruisselée correspondant à une averse de durée t_u est $L_r = \int_0^{t_u} R(t) dt + D_s$. On montrera plus loin que $D_s = K R_x$ avec $K =$ constante. Si l'averse avait été interrompue au bout d'un temps $t'u < t_u$ on aurait eu de même

$$L'r = \int_0^{t'u} R(t) dt + KR'x$$

On peut donc pour chaque essai, déterminer la courbe de variation de la lame ruisselée en fonction du temps. Dans le cas de pluies simulées à intensité constante, un changement de variable $t_u = \frac{P_u}{I_m}$, permet l'expression de la lame ruisselée en fonction de la hauteur de la pluie utile.

7.3. Données de base

Dans les tableaux 14 à 22 sont reportées les principales caractéristiques des hydrogrammes de ruissellement, à savoir :

- Colonne 1 à 3 : Le n° de référence, la hauteur totale et l'intensité moyenne de l'averse génératrice du ruissellement
- Colonne 4 : La lame ruisselée totale L_r
- Colonne 5 : La lame infiltrée $L_i = P_u - L_r$
- Colonne 6 : Le coefficient de ruissellement utile $K_{ru} = 100 \frac{L_r}{P_u}$
- Colonne 7 : Le coefficient de ruissellement efficace $K_{re} = 100 \frac{L_r}{P_e}$
- Colonne 8 : La lame d'eau D_s correspondant à la détention superficielle
- Colonne 9 : L'intensité maximale du ruissellement R_x
- Colonne 10 : L'intensité minimale d'infiltration $F_n = I_m - R_x$

Site I
Parcelle 1

Tableau 14

N°	Pu mm	Im mm/h	Lr mm	Li mm	Kru %	Kre %	Ds mm	Rx mm/h	Fn mm/h
1	109,3	116,1	61,4	47,9	56,2	59,9	0,70	86,7	29,4
10	24,0	90,0	0,9	21,6	3,8	7,5	0,07	8,0	82,0
19	87,2	87,2	52,6	34,6	60,3	62,4	0,70	61,0	26,2
28	57,9	57,9	19,3	38,6	33,3	36,3	0,30	29,7	28,2
37	46,6	(1)	6,9	39,7	14,8	16,1	0,10	36,0	57,2
46	45,0	90,0	14,0	31,0	31,1	32,4	0,20	31,8	58,2
47	45,0	90,0	17,2	27,8	38,2	39,5	0,25	36,0	54,0
64	30,0	60,0	2,5	27,5	8,3	9,3	0,10	6,9	53,1
65	30,0	60,0	5,6	24,4	18,7	20,0	0,10	11,8	48,2
84	62,0	124,0	12,5	49,5	20,2	20,9	0,10	29,9	94,1
85	62,0	124,0	19,5	42,5	31,4	32,3	0,275	42,3	81,7
102	47,0	94,1	35,4	11,6	75,3	78,0	0,50	83,7	10,4
103	20,6	41,3	14,2	6,4	68,9	72,4	0,20	31,0	10,3

(1) Pluie à intensité variable

Site I
Parcelle 2

Tableau 15

N°	Pu mm	Im mm/h	Lr mm	Li mm	Kru %	Kre %	Ds mm	Rx mm/h	Fn mm/h
2	76,6	76,6	41,1	35,5	53,6	56,2	0,60	56,2	20,4
111	45,0	90,0	10,0	35,0	22,2	29,0	0,40	42,0	48,0
20	61,0	61,0	32,8	28,2	53,8	55,6	0,50	39,6	21,4
29	120,0	120,0	91,0	29,0	75,8	78,0	0,70	101,4	18,6
38	43,5	58,0	2,4	41,1	5,5	5,9	0,10	6,6	51,4
48	43,9	87,8	21,0	22,9	47,8	50,3	0,30	47,4	40,4
49	43,9	87,8	22,9	21,0	52,2	54,9	0,30	53,7	34,1
66	29,2	58,5	2,5	26,7	8,6	10,2	0,05	7,8	50,7
67	29,2	58,5	6,5	22,7	22,3	24,2	0,10	15,6	42,9
86	61,0	122,0	23,8	37,2	39,0	41,8	0,30	56,2	65,8
87	61,0	122,0	38,7	22,3	63,4	65,0	0,50	82,7	39,3
104	45,9	91,8	36,9	9,0	80,4	84,6	0,60	82,7	9,1
105	24,4	48,8	21,2	3,2	86,9	90,6	0,40	43,4	5,4

... / ...

Site I
Parcelle 3

Tableau 16

N°	Pu mm	Im mm/h	Lr mm	Li mm	Kru %	Kre %	Ds mm	Rx mm/h	Fn mm/h
3	51,4	51,4	9,1	42,3	17,7	19,3	0,20	14,9	36,5
12	86,7	86,7	11,4	75,3	13,1	13,4	0,30	23,7	63,0
21	108,3	108,3	40,4	67,9	37,3	37,9	0,40	48,6	59,7
30	90,0	90,0	32,9	57,1	36,5	37,5	0,30	49,3	40,7
39	46,2	(1)	6,9	39,3	14,9	16,3	0,10	32,4	60,1
50	45,2	90,5	9,1	36,1	20,1	21,5	0,10	20,6	69,9
51	45,2	90,5	10,1	35,2	22,3	23,3	0,10	23,1	67,4
68	30,0	60,0	3,0	27,0	10,0	11,3	0,025	10,3	49,7
69	30,0	60,0	5,9	24,1	19,7	20,7	0,10	12,2	47,8
88	61,0	122,0	19,1	41,9	31,3	32,3	0,25	49,0	73,0
89	61,0	122,0	26,8	34,2	43,9	45,0	0,40	55,8	66,2
106	46,1	92,3	37,9	8,2	82,2	85,0	0,50	80,0	12,3
107	23,6	47,2	18,2	5,4	77,1	79,8	0,25	38,7	8,5

(1) Pluie à intensité variable

Site II
Parcelle 4

Tableau 17

N°	Pu mm	Im mm/h	Lr mm	Li mm	Kru %	Kre %	Ds mm	Rx mm/h	Fn mm/h
4	117,1	111,5	48,9	68,2	41,7	43,8	0,70	73,5	38,0
13	23,7	94,7	8,3	15,4	35,0	37,5	0,20	46,7	48,0
22	90,3	90,3	40,3	50,0	44,6	45,4	0,30	52,2	38,1
31	60,0	60,0	27,2	32,8	45,3	46,1	0,30	37,3	22,7
40	46,2	92,4	10,3	35,9	22,3	23,0	0,275	34,0	58,4
52	45,6	91,3	19,9	25,7	43,6	45,1	0,30	49,3	42,0
53	45,6	91,3	25,2	20,4	55,3	57,1	0,375	57,1	34,2
70	30,5	61,0	12,4	18,1	40,6	44,4	0,20	28,6	32,4
71	30,5	61,0	16,3	14,2	53,4	55,8	0,30	33,5	27,5
90	61,0	122,0	31,5	29,5	51,6	53,4	0,375	67,9	54,1
91	61,0	122,0	39,1	21,9	64,1	65,7	0,50	80,9	41,1
108	46,1	92,3	37,0	9,1	80,3	84,5	0,60	83,7	8,6
109	21,9	43,9	16,8	5,1	76,7	80,0	0,20	35,1	8,8

... / ...

Site II
Parcelle 5

Tableau 18

N°	Pu mm	Im mm/h	Lr mm	Li mm	Kru %	Kre %	Ds mm	Rx mm/h	Fn mm/h
5	86,5	86,5	12,3	74,2	14,2	15,5	0,10	17,5	69,0
14	45,0	90,0	13,1	31,9	29,1	30,1	0,20	29,7	60,3
23	62,6	62,6	26,8	35,8	42,8	43,6	0,30	33,3	29,3
32	120,0	120,0	77,1	42,9	64,2	64,9	0,525	85,7	34,3
41	44,1	(1)	14,1	30,0	32,0	33,6	0,20	48,0	67,3
54	42,6	85,2	10,0	32,6	23,5	24,7	0,15	29,3	55,9
55	42,6	85,2	14,0	28,6	32,9	34,0	0,20	31,8	53,4
72	30,0	60,0	4,7	25,3	15,7	16,8	0,10	14,3	45,7
73	30,0	60,0	8,8	21,2	29,3	30,7	0,20	18,6	41,4
92	59,0	118,0	15,8	43,2	26,8	27,7	0,20	36,7	81,3
93	59,0	118,0	29,4	29,6	49,8	51,1	0,50	58,1	59,9
110	45,0	90,0	33,5	11,5	74,4	77,0	0,40	75,8	14,2
111	22,6	45,2	18,4	4,2	81,4	83,6	0,30	38,7	6,5

(1) Pluie à intensité variable

Site II
Parcelle 6

Tableau 19

N°	Pu mm	Im mm/h	Lr mm	Li mm	Kru %	Kre %	Ds mm	Rx mm/h	Fn mm/h
6*	68,2	62,0	0,7	67,5	1,0	1,3	0	1,5	60,5
15	90,5	90,5	23,5	67,0	25,9	26,2	0,30	28,6	61,9
24	113,5	115,4	63,2	50,3	55,7	56,2	0,80	79,1	36,3
33	92,3	92,3	40,8	51,5	44,2	44,9	0,40	52,9	39,4
42	44,4	59,2	7,6	36,8	17,1	17,7	0,10	15,2	44,0
56	44,2	88,3	14,2	30,0	32,1	38,6	0,30	45,8	42,5
57	44,2	88,3	26,1	18,1	59,0	60,4	0,40	56,2	32,1
74	29,5	59,0	13,0	16,5	44,1	48,5	0,30	31,3	27,7
75	29,5	59,0	17,2	12,3	58,3	60,3	0,30	35,3	23,7
94	60,0	120,0	36,5	23,5	60,8	62,9	0,45	80,0	40,0
95	60,0	120,0	40,3	19,7	67,2	68,6	0,50	80,9	39,1
112	44,4	88,9	34,8	9,6	78,4	80,4	0,50	76,6	12,3
113	21,8	43,6	16,8	5,0	77,1	79,2	0,30	35,6	8,0

* Le ruissellement observé lors de ce premier essai étant très faible par rapport à celui des parcelles 4 et 5, la parcelle 6 a été déplacée. Tous les autres essais ont été fait sur le nouvel emplacement.

Site III
Parcelle 7

Tableau 20

N°	Pu mm	Im mm/h	Lr mm	Li mm	Kru %	Kre %	Ds mm	Rx mm/h	Fn mm/h
7	116,9	120,0	79,2	37,7	67,7	70,7	1,00	106,0	14,0
16	50,4	(1)	30,2	7,4	59,9	63,4	0,50	75,0	19,7
25	91,1	91,1	61,4	29,7	67,4	69,7	1,10	69,2	21,9
34	60,5	60,5	29,5	31,0	48,8	51,7	0,60	37,5	23,0
43	43,6	58,1	7,0	36,6	16,0	18,1	0,25	19,5	38,6
58	45,0	90,0	7,1	37,9	15,8	17,1	0,30	29,0	61,0
59	45,0	90,0	28,2	16,8	62,7	66,3	0,95	67,9	22,1
76	28,8	57,6	1,8	27,0	6,3	7,1	0,05	4,8	52,8
77	28,8	57,6	14,6	14,2	50,7	55,3	0,40	35,6	22,0
96	60,5	121,0	15,7	44,8	25,9	27,1	0,50	52,5	68,5
97	60,5	121,0	41,4	19,1	68,4	70,8	1,20	86,7	34,3
114	45,0	90,0	34,0	11,0	75,5	78,2	0,95	80,0	10,0
115	22,5	45,0	16,1	6,4	71,5	75,9	0,50	34,8	10,2

(1) Pluie à intensité variable

Site III
Parcelle 8

Tableau 21

N°	Pu mm	Im mm/h	Lr mm	Li mm	Kru %	Kre %	Ds mm	Rx mm/h	Fn mm/h
8	103,5	90,0	49,0	54,5	47,3	50,2	1,00	62,0	28,0
17	47,0	94,1	9,8	37,2	20,8	23,2	0,60	38,5	55,6
26	59,0	59,0	10,5	48,5	17,8	18,6	0,60	28,6	30,4
35	124,1	124,1	78,8	45,3	63,5	64,6	1,10	96,0	28,1
44	43,8	(1)	8,3	35,5	18,9	24,7	0,30	38,3	81,7
60	45,2	90,5	2,0	43,2	4,4	4,7	0,10	8,7	81,8
61	45,2	90,5	8,8	36,4	19,5	20,8	0,30	24,2	66,3
78	29,3	58,6	1,0	28,3	3,4	3,7	0,00	4,0	54,6
79	29,3	58,6	6,3	23,0	21,5	23,1	0,20	19,6	39,0
98	61,0	122,0	8,4	52,6	13,8	14,5	0,20	28,0	94,0
99	61,0	122,0	32,2	28,8	52,8	55,6	0,65	75,0	47,0
116	46,5	93,1	28,5	18,0	61,3	64,5	0,80	75,0	18,1
117	22,5	45,0	16,5	6,0	73,3	78,6	0,40	38,5	6,5

(1) Pluie à intensité variable

... / ...

Site III
Parcelle 9

Tableau 22

N°	Pu mm	Im mm/h	Lr mm	Li mm	Kru %	Kre %	Ds mm	Rx mm/h	Fn mm/h
9	62,3	62,0	8,7	53,6	14,0	15,1	0,40	29,0	33,0
18	35,4	92,3	3,6	31,8	10,2	13,4	0,40	31,0	61,3
27	120,0	120,0	83,6	36,4	69,7	71,4	1,50	113,4	6,6
36	87,7	92,3	57,8	29,9	65,9	69,0	0,80	85,7	6,6
45	45,5	91,1	5,2	40,3	11,4	12,0	0,40	45,5	45,6
62	45,0	90,0	2,9	42,1	6,4	6,8	0,10	12,6	77,4
63	45,0	90,0	29,3	15,7	65,1	69,8	1,10	75,0	15,0
80	30,0	60,0	0,5	29,5	1,7	1,9	0,00	1,8	58,2
81	30,0	60,0	2,2	27,8	7,3	9,2	0,10	8,5	51,5
82	30,5	61,0	0,8	29,7	2,6	2,9	0,00	2,4	58,6
83	30,5	61,0	14,9	15,6	48,8	53,4	0,60	45,0	16,0
100	61,0	122,0	14,0	47,0	22,9	24,2	0,70	69,9	52,1
101	61,0	122,0	45,1	15,9	73,9	77,9	1,20	101,4	20,6
118	45,6	91,3	15,0	30,6	32,9	36,6	0,40	55,4	35,9
119	22,7	45,4	10,9	11,8	48,0	55,3	0,30	29,5	15,9

... / ...

VIII - ANALYSE DES PREMIERS RESULTATS

8.1. Etude de la lame ruisselée

Comme nous l'avons dit précédemment, il est possible, à partir d'une averse assez longue, de tracer la courbe représentative des variations de la lame ruisselée en fonction de la pluie utile. Notons que lorsque le palier de ruissellement est atteint, cette courbe est une droite d'équation $L_r = A (P_u - P_o)$ avec $A = \frac{R_x}{I_m}$. Notons que P_o est la pluie correspondant au temps de montée de la crue.

Pour toutes les pluies simulées, les lames ruisselées ont été calculées de 5 en 5 minutes et reportées en fonction de la pluie utile. Nous nous proposons d'étudier les variations de la lame ruisselée en fonction de différents facteurs.

811.1. Influence de la couverture végétale

Nous avons décidé, afin de rester le plus proche possible des conditions naturelles, de ne pas toucher à la végétation existant sur les parcelles pendant toute la durée des essais. Il en est résulté une certaine dispersion des résultats qui ne pouvait provenir que de l'influence de la couverture végétale. Ce facteur est apparu à la vue des mesures successives comme étant variable non seulement dans l'espace, mais aussi dans le temps (feuilles mortes tombant sur les parcelles). Afin de tenter de mettre en évidence, l'importance de ce facteur, une mesure, a été faite sur un sol "démudé" (cf. paragraphe V) le 8, 9 et 10 Mars. Les lames ruisselées mesurées, sur les 9 parcelles, lors de la 1ère averse, ont été reportées sur les figures 18, 19 et 20 avec en parallèle les lames ruisselées correspondant aux pluies du 18, 19 et 20 Janvier (2ème averse). Toutes ces pluies ont des caractéristiques identiques ($t_u = 30$ mn, $I_m = 90$ mm/h) et les mesures neutroniques montrent que l'état d'humectation du sol était très voisin avant ces deux averses. La seule différence, entre ces deux essais, pour une même parcelle, réside donc dans l'état de la couverture végétale. Ces graphiques appellent les commentaires suivants :

- La parcelle 9 présente une réaction anormale, puisque contrairement à ce qui est observé sur toutes les autres parcelles, la lame ruisselée sur sol nu est inférieure à celle mesurée sous couverture végétale naturelle. Nous avons déjà constaté pour cette parcelle un changement total de comportement lors de la pluie simulée du 3-2, raison pour laquelle nous avons recommencé cette mesure le 14-2. Alors qu'avant le 3-2, elle présentait des coefficients de ruissellement similaires à ceux de la parcelle 7 et supérieurs à ceux de la parcelle 8, à partir de cette date, le ruissellement qui y est mesuré est tantôt très

Influence de la végétation sur la lame ruisselée

site 1

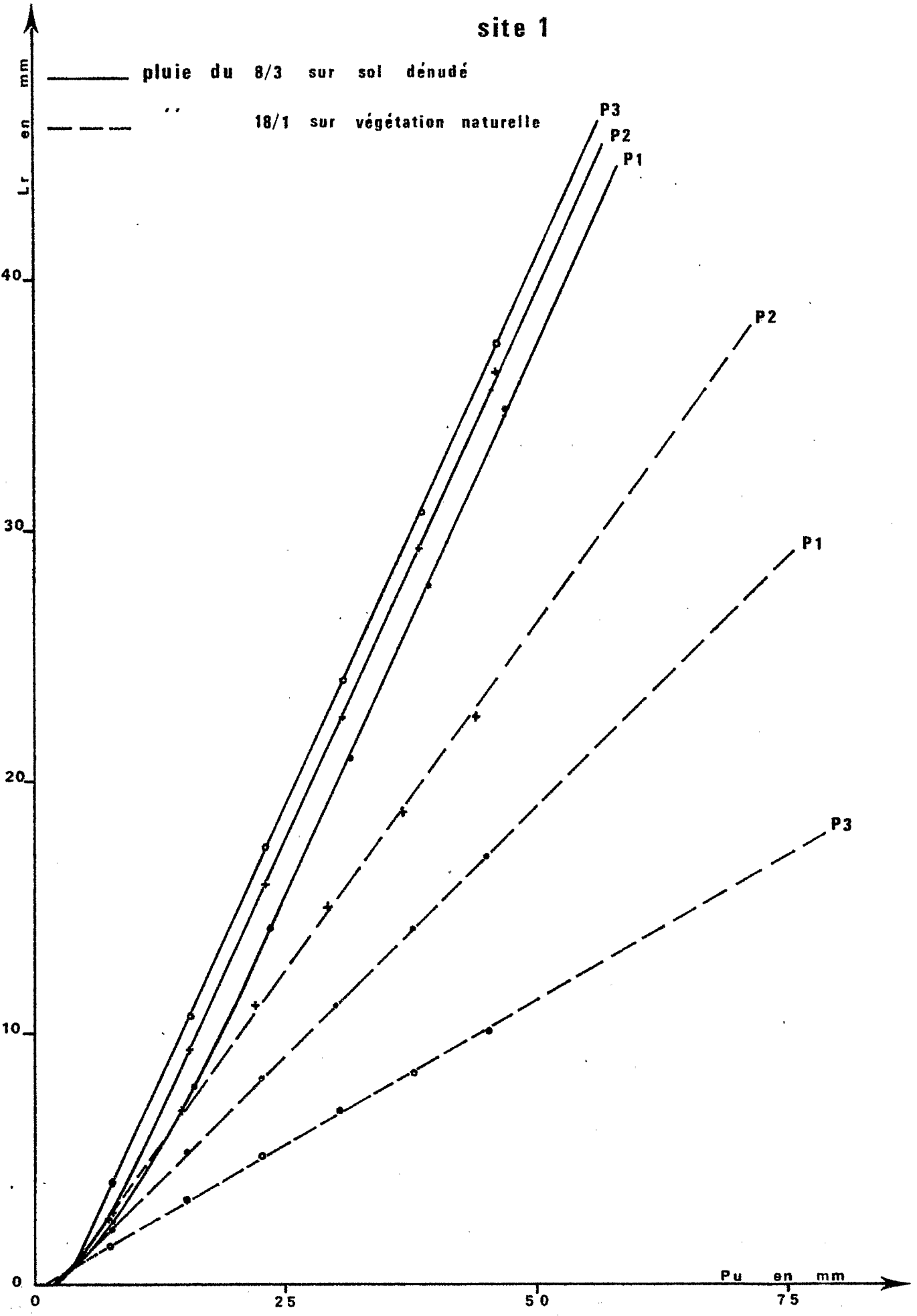
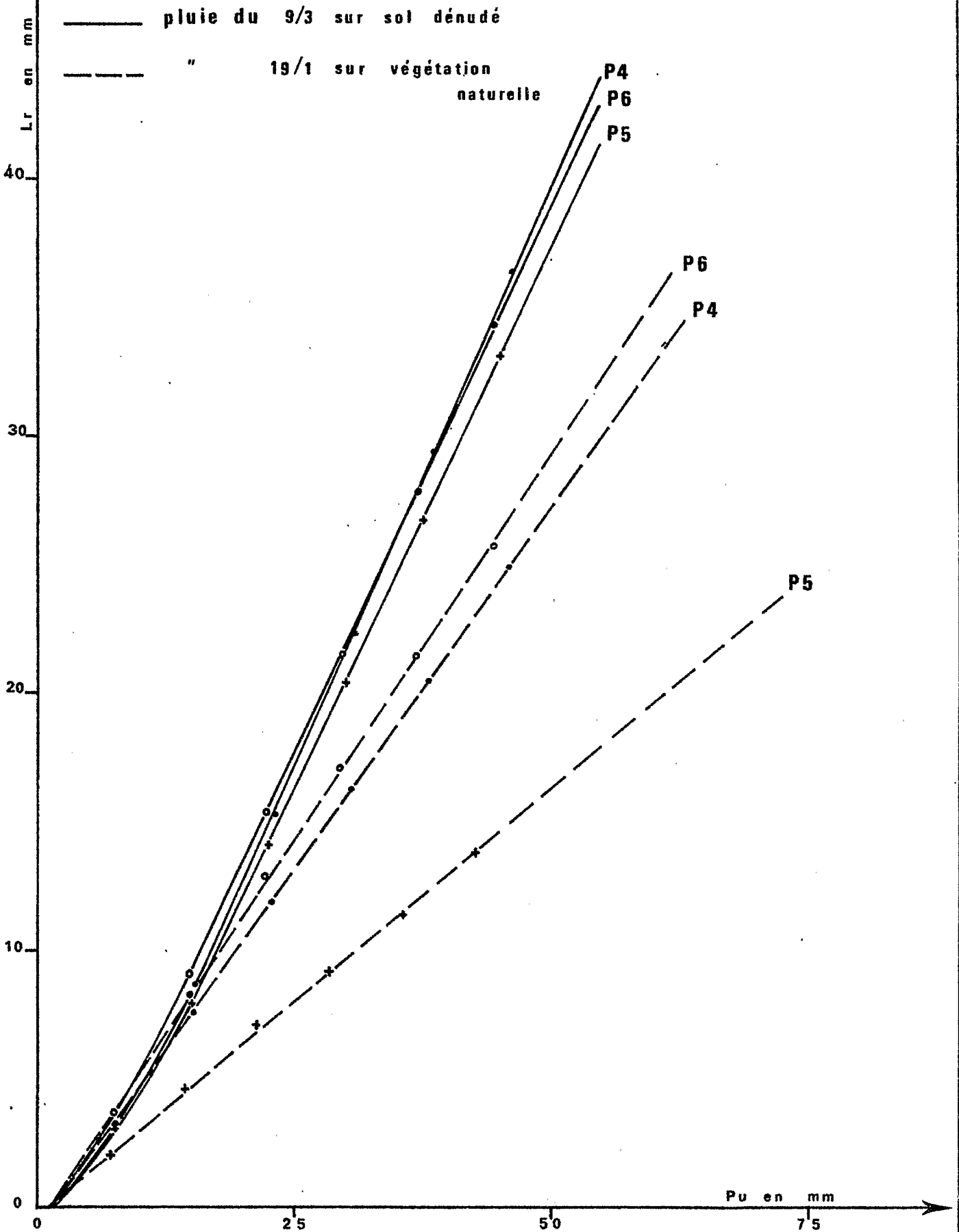


Fig. 19

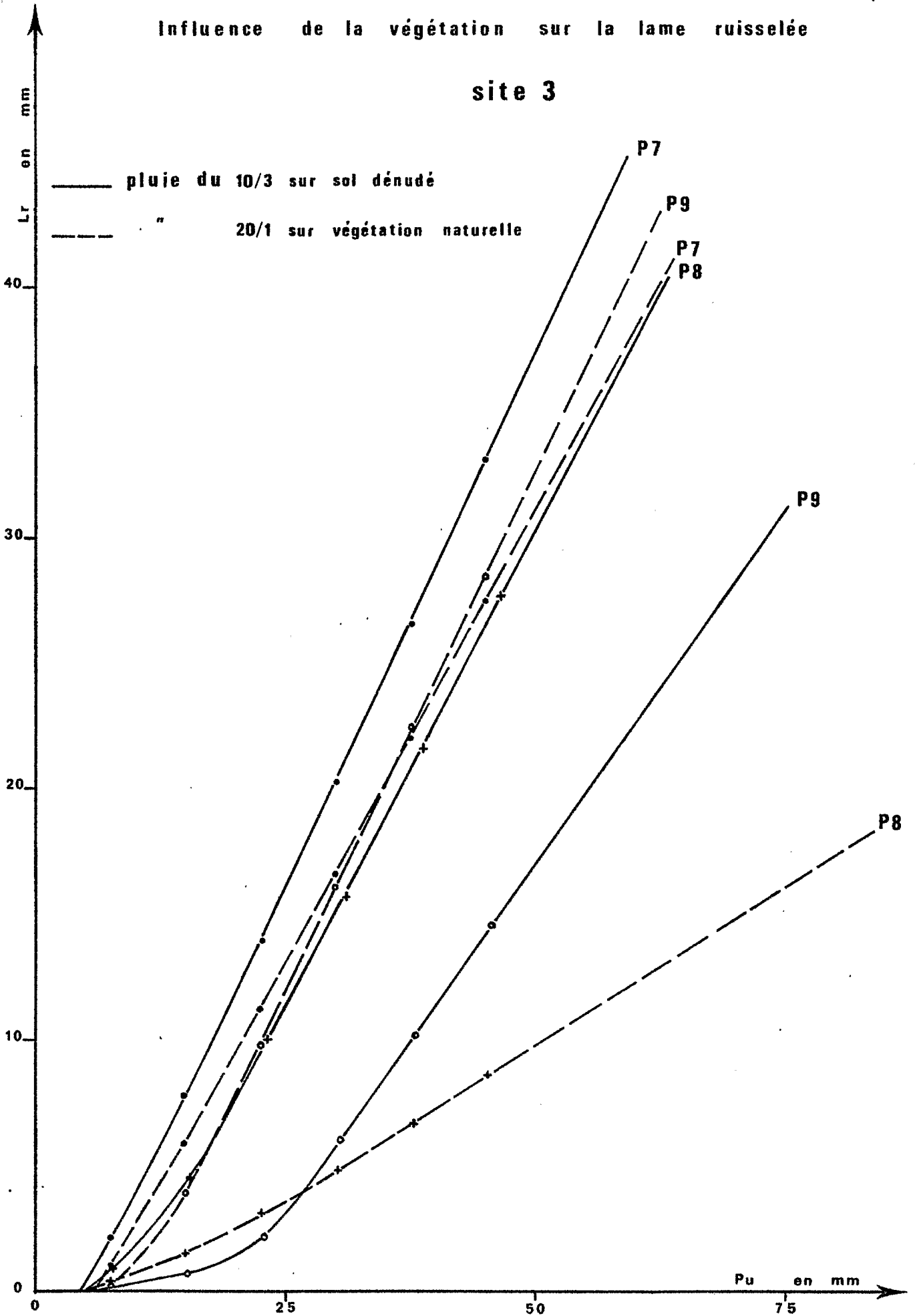
Influence de la végétation sur la lame ruisselée

site 2



Influence de la végétation sur la lame ruisselée

site 3



fort (2ème averse du 14-2, pluies du 24-2) tantôt très faible (1ère pluie du 14-2, pluies du 3-2 et 10-3) sans que nous ayons pu trouver une explication à ce comportement aberrant.

- Alors que sous végétation naturelle, les relations Lr (Pu) des trois parcelles d'un même site sont représentées par un faisceau de droites fortement divergentes, sur sol nu, les droites sont à peu près parallèles. L'hétérogénéité dans l'aptitude au ruissellement, observée lors des mesures précédentes, entre parcelles d'un même site, provient donc en majeure partie des différences de couverture végétale.

- La comparaison des droites Lr (Pu) sur sol nu et sous végétation, montre pour toutes les parcelles (parcelle 9 exceptée) une très importante augmentation de la lame ruisselée sur sol nu, mettant en évidence l'influence primordiale de la couverture végétale sur la hauteur de la lame ruisselée.

8.1.2. Influence de la pente

On peut constater sur les figures 18 et 19 que la pente et l'abscisse à l'origine des droites Lr (Pu) des parcelles 1 à 6, sur sol nu, sont très voisines. Bien que nous ne disposions que d'un seul essai permettant des comparaisons entre parcelles, il semble que l'influence de la pente sur la hauteur de la lame ruisselée soit négligeable sur des parcelles de 1 mètre de long, au moins dans la gamme des pentes testées. Des mesures ultérieures nous permettront de savoir si cette conclusion est valable quelle que soit l'intensité de la pluie ou l'état d'humectation préalable du sol.

8.1.3. Influence de l'hétérogénéité et de la nature du sol

- Pour les pluies sur sol dénudé, tous les autres facteurs pouvant influencer le ruissellement étant identiques pour les 3 parcelles d'un même site, les différences observées entre les droites Lr (Pu) ne proviennent que de l'hétérogénéité du sol. On peut constater que l'influence de ce facteur est très faible pour les sites 1 et 2 et nettement plus forte pour le site 3 (parcelles 7 et 8). Cette hétérogénéité plus importante du site 3, s'explique par sa position en bas de versant sur des colluvions dont la granulométrie est beaucoup moins homogène que celle de sols situés sur la pente.

- La comparaison des droites Lr (Pu) des 3 sites met en évidence :

- . La similitude des sites 1 et 2 situés sur le même type de sol.
- . Un léger changement dans la pente et l'abscisse à l'origine

des droites du site 3 par rapport à celles des sites 1 et 2. Cette différence minime pour la parcelle 7, plus accentuée pour la parcelle 8, traduit l'influence de la nature du sol. Il faut noter que tous les sols présentaient, avant les pluies des 8, 9 et 10 Mars, un état d'humectation préalable très élevé (pluie naturelle de 91 mm le 7-3) et que dans ce cas, comme nous le verrons plus loin, tous ces sols ruissèlent bien. Il est probable que les différences entre lames ruisselées auraient été beaucoup plus importantes sur des sols secs. Les essais futurs nous renseigneront sur ce point. Notons toutefois que l'influence de l'hétérogénéité et de la nature du sol semble sans commune mesure avec celle de la couverture végétale et qu'il est possible de caractériser cette influence par la pente et l'abscisse à l'origine de la droite Lr (Pu).

8.1.4. Influence de l'état d'humectation des sols

Nous avons montré l'importance de la couverture végétale sur la hauteur de la lame ruisselée. L'étude de l'influence de l'état d'humectation des sols ne peut se faire que pour un même état de la végétation, donc pour des pluies simulées ayant été faites le même jour. Nous avons reporté sur les figures 21 à 23, les courbes Lr (Pu) correspondant aux pluies des 18, 19 et 20 Janvier. Rappelons que le protocole observé pour ces pluies était le suivant : pluie de 90 mm/h pendant 30 minutes, arrêt de 20 minutes puis nouvelle pluie de 90 mm/h pendant 30 minutes. La dernière pluie sur les parcelles avant cette mesure étant les pluies simulées des 21, 22 et 23 Décembre, les sols étaient très secs avant la première averse. Le temps d'arrêt entre les deux averses étant très court, les sols étaient très humides avant la 2ème averse. Nous disposons donc de deux courbes Lr (Pu) correspondant à des états d'humectation préalable du sol très différents.

Ces figures mettent en évidence les faits suivants :

- L'influence de l'état d'humectation préalable du sol est très variable selon les sites. Relativement faible et comparable pour les sites 1 et 2, elle est nettement plus forte pour le site 3. Les pluies simulées du 1 au 3-2 et du 22 au 24-2 où le protocole était le même, mais avec des intensités de 60 et 120 mm/h, montrent que cette influence variable selon la nature du sol se retrouve quelle que soit l'intensité. Ce fait est bien mis en évidence par le tableau suivant où sont reportés les pourcentages d'augmentation de la lame ruisselée entre un sol sec et le même sol humide, pour une pluie utile de 50 mm.

Fig. 21

Influence de l'humidité du sol sur la lame ruisselée

site 1

pluies du 18/1

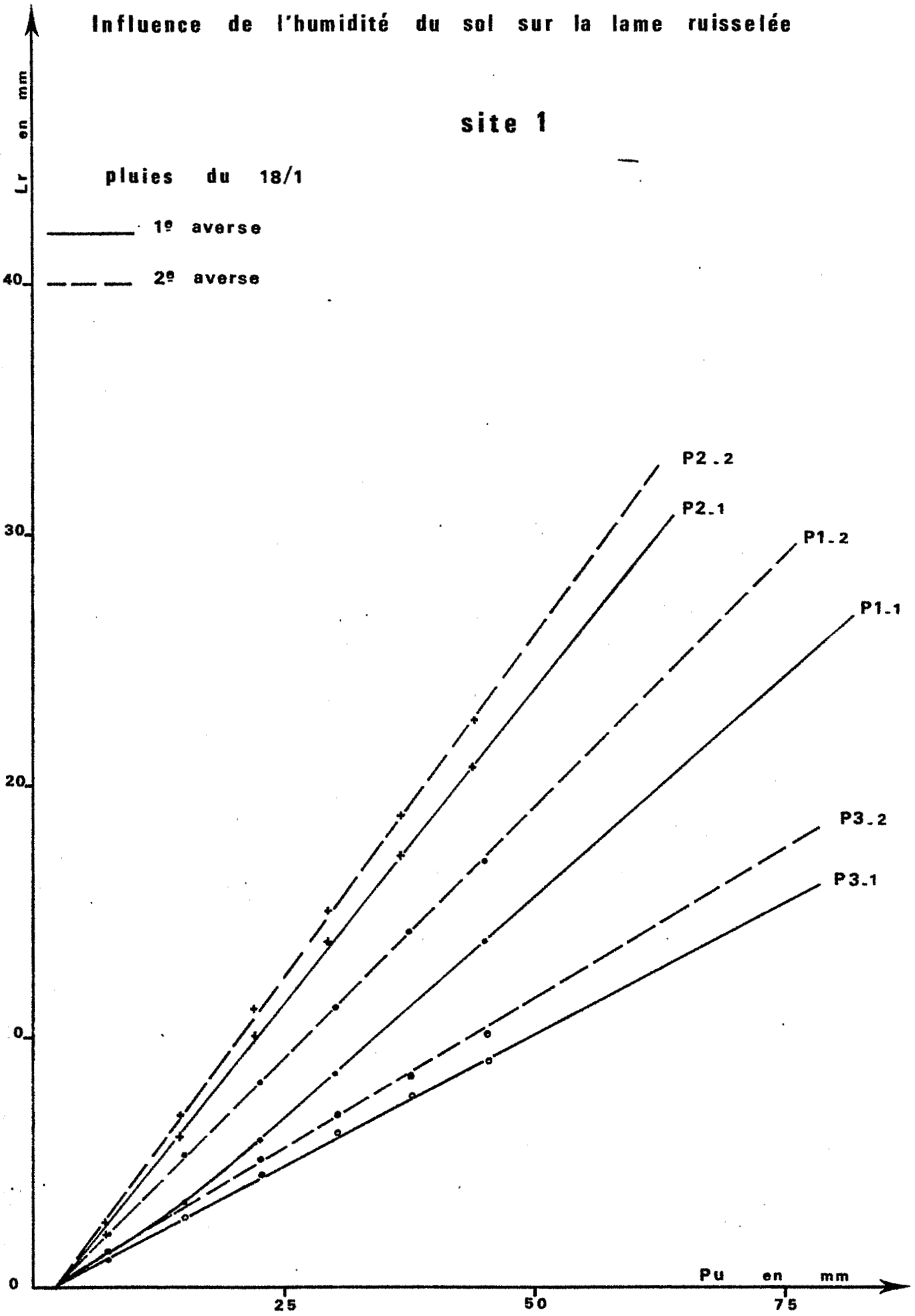


Fig. 22

Influence de l'humidité du sol sur la lame ruisselée

site 2

pluies du 19/1

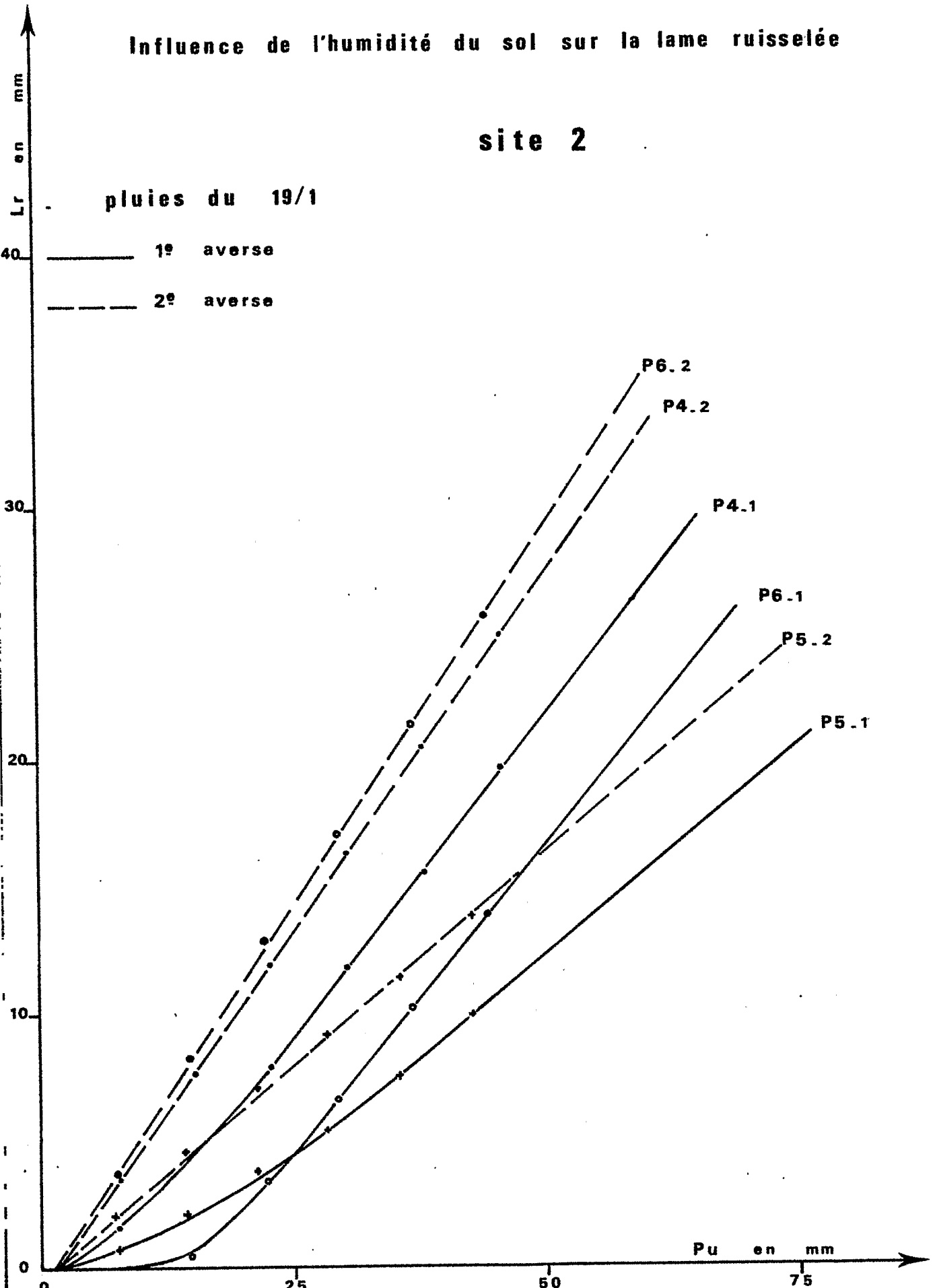
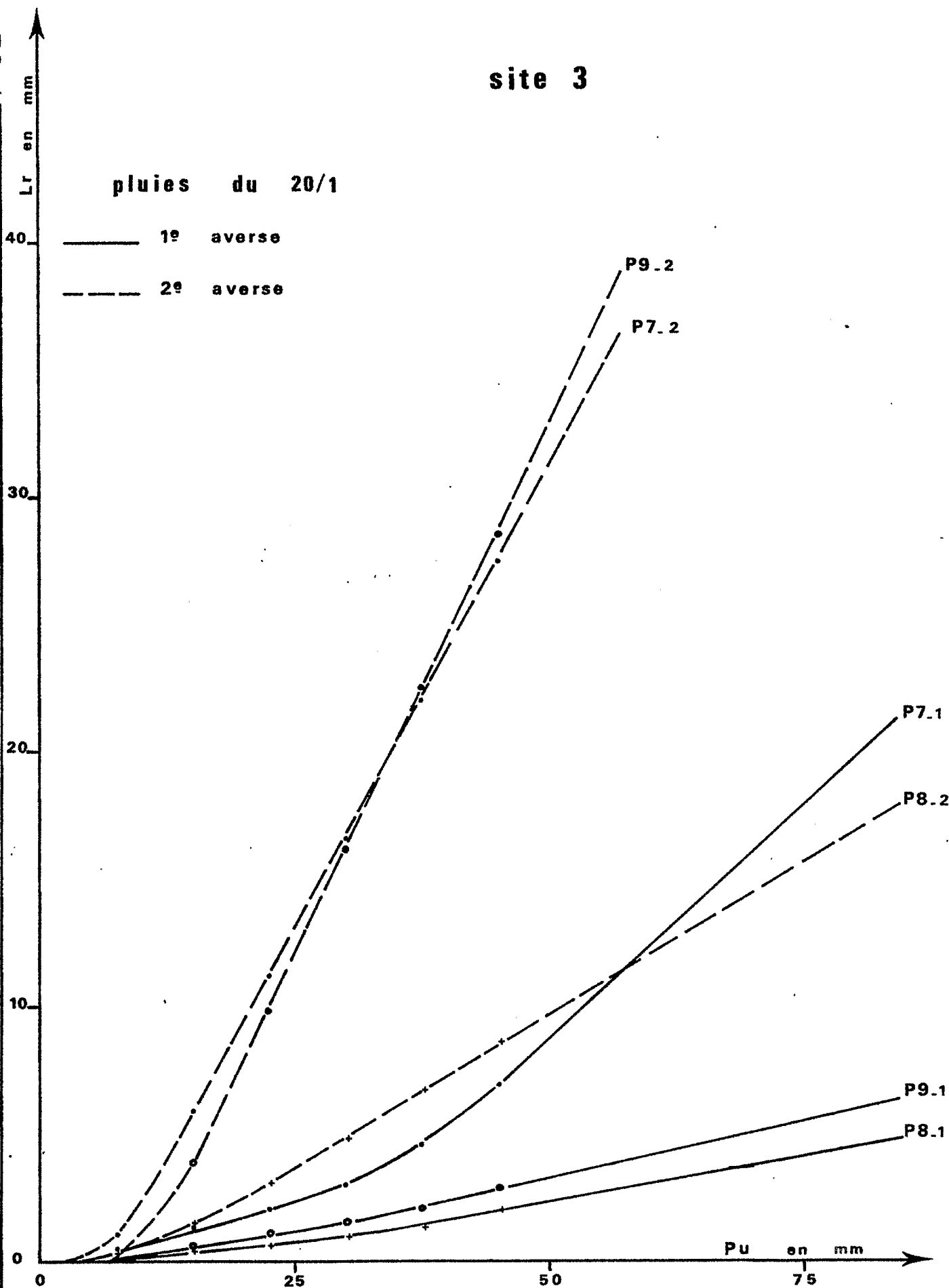


Fig. 23

Influence de l'humidité du sol sur la lame ruisselée

site 3

pluies du 20/1



Parcelle n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Moyenne Site I	Moyenne Site II	Moyenne Site III
60	76	135	34	28	60	26	598	529	1405	82	38	844
90	23	8	15	26	37	72	279	341	955	16	45	525
20	56	67	39	26	89	12	204	340	372	42	42	305

Il est difficile de conclure sur l'influence relative de l'état d'humectation entre les sites 1 et 2 car les légères différences observées peuvent provenir d'une différence de couverture végétale, mais entre les sites 1, 2 et le site 3, la différence est trop nette pour provenir de la seule influence de la végétation et doit donc être attribuée à la nature du sol.

- La portion courbe de la relation Lr (Pu) est plus ou moins longue selon les sites, traduisant le fait que la hauteur de pluie nécessaire pour atteindre le palier de ruissellement varie selon la nature du sol. Cette différence est très visible pour la 1ère averse sur sol sec. Alors que le palier est atteint rapidement pour les parcelles du site 1, il faut une pluie nettement plus importante avant d'arriver au palier sur le site 2 et surtout sur le site 3 où le palier n'est pas encore atteint à la fin de la pluie. Ces différences s'estompent entre les sites 1 et 2 sur sol humide, où le palier est atteint très rapidement, mais restent nettes avec le site 3, comme on peut le constater dans le tableau suivant où sont reportées les pluies utiles correspondant au début du palier (averses du 18, 19 et 20 janvier).

Parcelles		1	2	3	4	5	6	7	8	9
Pu	Sol sec	17,5	12,5	7,5	22,5	35,0	30,0	>45,0	>45,0	>45,0
mm	Sol humide	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	15,0	22,5	15,0

Les essais du 1, 2, 3 et 22, 23, 24 Février montrent que quelle que soit l'intensité cette différence de comportement entre les sites persiste. Elle est à rapprocher des caractéristiques pédologiques. On constate sur les sols du site 1, la présence, à très faible profondeur (environ 5 cm), d'un horizon gravillonnaire et argileux. Cet horizon qui existe sur le site 2 mais à une profondeur plus grande (20 à 30 cm) a disparu sur le site 3. L'allure des courbes Lr (Pu) s'explique si l'on admet que cet horizon gravillonnaire et argileux joue un rôle de barrière vis-à-vis de l'infiltration, après saturation de l'horizon sus-jacent.

Lors d'une pluie sur un sol hétérogène dont les différents horizons ont des perméabilités très différenciées, deux cas peuvent se produire lors du passage du front d'humectation d'un horizon à l'horizon sous jacent : ou bien la perméabilité de cet horizon est supérieure à celle de l'horizon sus jacent et c'est l'horizon supérieur qui contrôle l'infiltration, ou bien la perméabilité de l'horizon supérieur à saturation est supérieure à celle de l'horizon sous jacent et l'infiltration est contrôlée par ce dernier. La différence dans les hauteurs de pluie, tombées sur les parcelles avant la stabilisation du ruissellement, sur les sites 1 et 2 provient de l'épaisseur plus importante sur le site 2 de l'horizon supérieur qu'il est nécessaire de saturer avant que l'infiltration et donc le ruissellement soit contrôlée par l'horizon gravillonnaire. L'absence de cet horizon, donc de barrière à proximité de la surface, sur le site 3 explique que la hauteur de pluie préalable au régime permanent y soit beaucoup plus élevée. Ce rôle de l'horizon gravillonnaire et argileux est bien mis en évidence par la forme des hydrogrammes que nous avons observés sur les différents sites. Sur la figure 24 nous avons schématisé ces différentes formes obtenues pour des pluies débutant sur sol sec, avec en regard de chaque schéma un hydrogramme réellement observé. On peut constater que l'aspect est très différent selon l'emplacement de la mesure. Sur le site 1, la courbe de ruissellement débute par une très brève portion de courbe suivie d'une montée brutale quasiment rectiligne puis du palier. Sur le site 2 on note une augmentation progressive du ruissellement, puis un premier palier légèrement ascendant suivi d'une seconde montée généralement plus brutale que la première, précédant un deuxième palier. Les hydrogrammes du site 3 sont caractérisés par une montée progressive et régulière du ruissellement avant d'atteindre le palier. Il ne faut pas perdre de vue pour interpréter ces graphiques, qu'à toute variation du ruissellement correspond une variation de même valeur mais de sens inverse de l'infiltration. Le schéma que nous proposons pour expliquer ces différentes formes est le suivant :

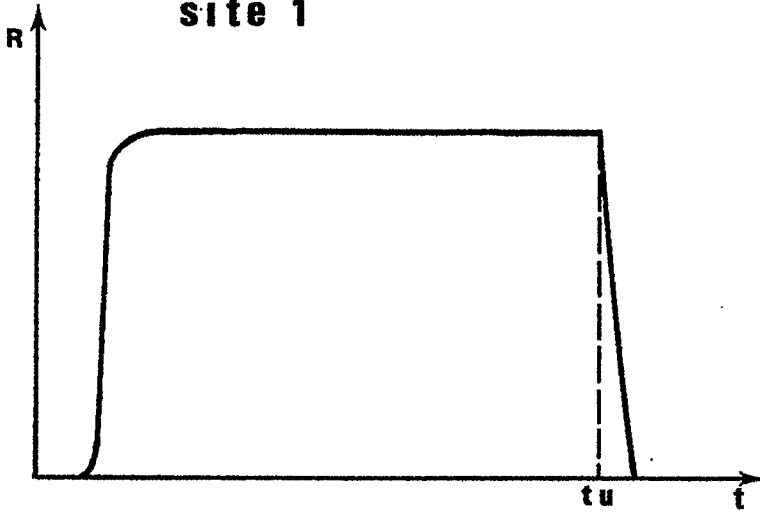
- Site 1. La première portion de courbe correspond à la saturation de l'horizon supérieur qui est très rapide étant donnée sa faible épaisseur. Le front d'humectation atteint ensuite l'horizon gravillonnaire et argileux moins perméable. L'humectation provoque l'imperméabilisation rapide de la partie supérieure de cet horizon entraînant une brusque croissance du ruissellement. Une fois la partie supérieure de l'horizon arrivée à saturation, c'est elle qui contrôle l'infiltration qui atteint son régime permanent.

- Site 2. Le phénomène est le même, mais décalé du fait de la plus grande épaisseur de l'horizon superficiel. La première courbe ascendante du ruissellement correspond à l'humectation progressive de cet horizon supérieur qui contrôle l'infiltration. Le premier palier correspond à un régime permanent

Fig. 24

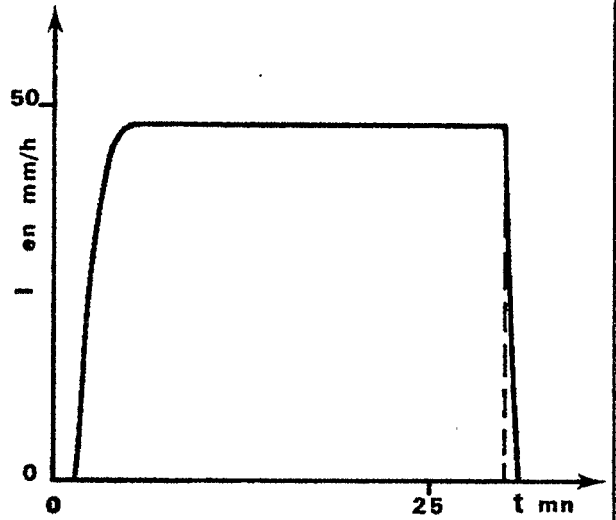
FORMES DES HYDROGRAMMES

site 1

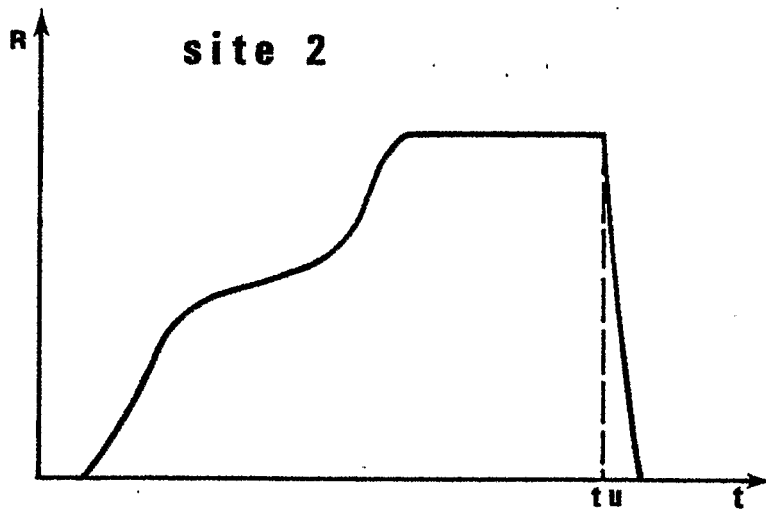


P2

pluie du 18.1.1978
Im = 87,8 mm/h

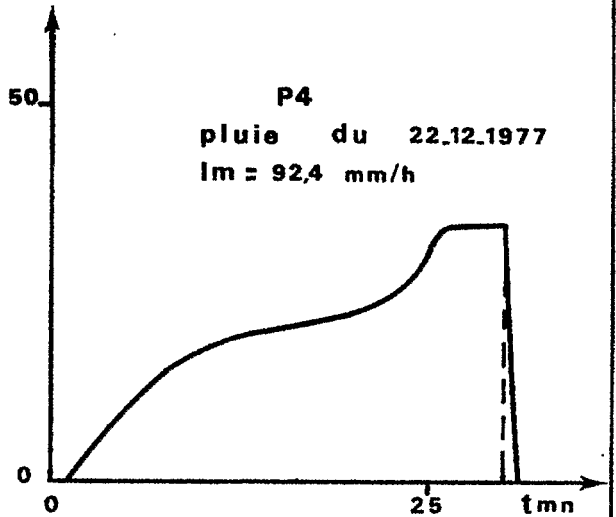


site 2

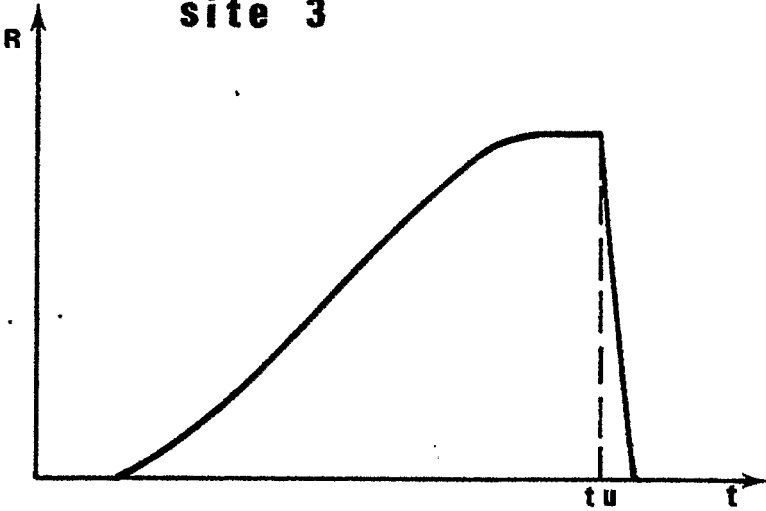


P4

pluie du 22.12.1977
Im = 92,4 mm/h

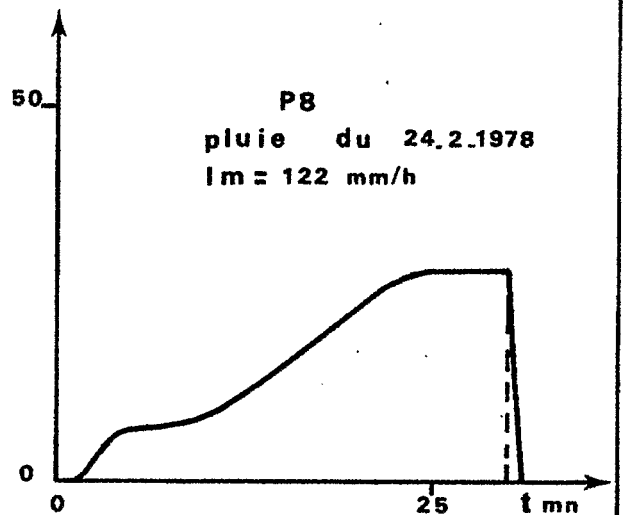


site 3



P8

pluie du 24.2.1978
Im = 122 mm/h



de l'infiltration résultant de la saturation du premier horizon et permet donc de connaître certaines de ses caractéristiques hydrodynamiques (Rx, Fn). On devrait également observer ce premier palier sur le site 1, mais il est généralement masqué par la montée brutale du ruissellement. Ce n'est que pour les essais à faible intensité que l'on peut constater son existence. Après saturation de l'horizon supérieur, le front d'humectation atteint le sommet de l'horizon argileux qui contrôle alors l'infiltration. Il lui correspond la deuxième montée de la courbe de ruissellement puis le deuxième palier, lorsque la partie supérieure de cet horizon arrive à saturation.

- Site 3. Le front d'humectation ne rencontrant pas de brusque diminution de perméabilité, on n'observe pas de cassure dans la courbe de montée du ruissellement comme sur les sites 1 et 2, mais une montée régulière résultant de la diminution progressive de la capacité d'infiltration de la parcelle du fait de l'humectation. La courbe schématisée est une courbe lissée, la montée réelle se faisant sous forme de marches d'escalier légèrement décalées correspondant aux réactions successives des différents horizons. Les perméabilités des horizons étant assez voisines, la montée semble régulière. Seule la réaction de l'horizon de surface nettement plus perméable est toujours visible et correspond à la première "marche" (cf. pluie du 24-2 sur P8).

- Il est difficile à partir de ces essais, étant donné l'influence de la couverture végétale, de hiérarchiser l'aptitude au ruissellement des différents sols, mais on peut affirmer que, même sous végétation naturelle, ils ruissellent tous très bien lorsqu'ils sont saturés (saturation de tout le profil pour le site 3, saturation de l'horizon gravillonnaire et argileux pour les sites 1 et 2). Il suffit pour s'en assurer de voir les très forts coefficients de ruissellement que nous avons obtenus dans ces conditions. Seule la pluie nécessaire pour déclencher ce ruissellement varie selon les sites. Une pluie isolée peut entraîner un fort ruissellement sur le site 1, mais si elle n'est pas de hauteur suffisante pour saturer l'horizon superficiel, le ruissellement sera beaucoup moins fort sur le site 2 à fortiori sur le site 3. Il n'est pas étonnant qu'au cours de la saison des pluies lorsque les épisodes pluvieux se succèdent, maintenant à saturation l'horizon argileux, et que la remontée de la nappe phréatique provoque la saturation des sols de bas de pente, on observe un très fort ruissellement de l'ensemble du bassin.

8.1.5. Influence de l'intensité de la pluie

Les pluies des 18, 19 et 20 Janvier, 1, 2, 3, 22, 23 et 24 Février ont été simulées suivant le même protocole mais avec des intensités respectives de 90, 60 et 120 mm/h. Nous avons choisi une parcelle de chaque site et nous

avons reporté sur les figures 25 et 26 les courbes Lr (Pu) relatives à la première et seconde averse. Ces pluies ayant été effectuées sur végétation naturelle, il est difficile de quantifier l'influence de l'intensité de la pluie sur la lame ruisselée, même pour une parcelle donnée, la couverture végétale ayant varié entre ces différentes pluies. C'est ainsi que sur la parcelle 1, contrairement à ce que nous avons observé sur toutes les autres parcelles, le ruissellement est plus faible avec l'intensité de 120 mm/h qu'avec 90 mm/h. Cette diminution du ruissellement provient très probablement d'une augmentation de la surface couverte par les feuilles mortes. On peut cependant retenir de ces graphiques que :

- La lame ruisselée augmente avec l'intensité de la pluie mais seuls des essais sur sol dénudé nous permettrons de déterminer la forme de la relation liant ces deux facteurs.

- L'influence de l'intensité ne semble pas varier avec l'état d'humectation du sol. Les écarts observés entre les courbes correspondant aux différentes intensités sont du même ordre de grandeur sur sol sec et sur sol humide.

- Il semble que l'influence de l'intensité soit plus grande sur les sites 1 et 2 que sur le site 3. Il convient cependant d'être très prudent, ces différences pouvant provenir d'une évolution différente de la couverture végétale selon les parcelles. Des essais ultérieurs nous fixerons sur ce point.

8.1.6. Conclusions sur l'étude de la lame ruisselée

Nous avons tenté de délimiter l'influence des différents facteurs pouvant agir sur le ruissellement. Bien que cette analyse soit restée plus qualitative que quantitative, du fait de l'influence considérable et variable dans le temps et l'espace, de la couverture végétale on peut cependant dégager de cette étude les conclusions suivantes :

- La lame d'eau ruisselée croît avec la pluie utile. Lorsque le régime permanent est atteint, cette croissance est linéaire.

- La hauteur de la lame ruisselée augmente avec l'état d'humectation préalable du sol. Cette augmentation faible sur certains sols peut être très importante sur d'autres.

- La lame ruisselée croît aussi avec l'intensité de la pluie, mais dans des proportions qui semblent également variables selon les sols.

- L'influence de l'hétérogénéité du sol varie en fonction des emplacements des mesures, mais semble dans tous les cas relativement faible

Fig. 25

Influence de l'intensité sur la lame ruisselée

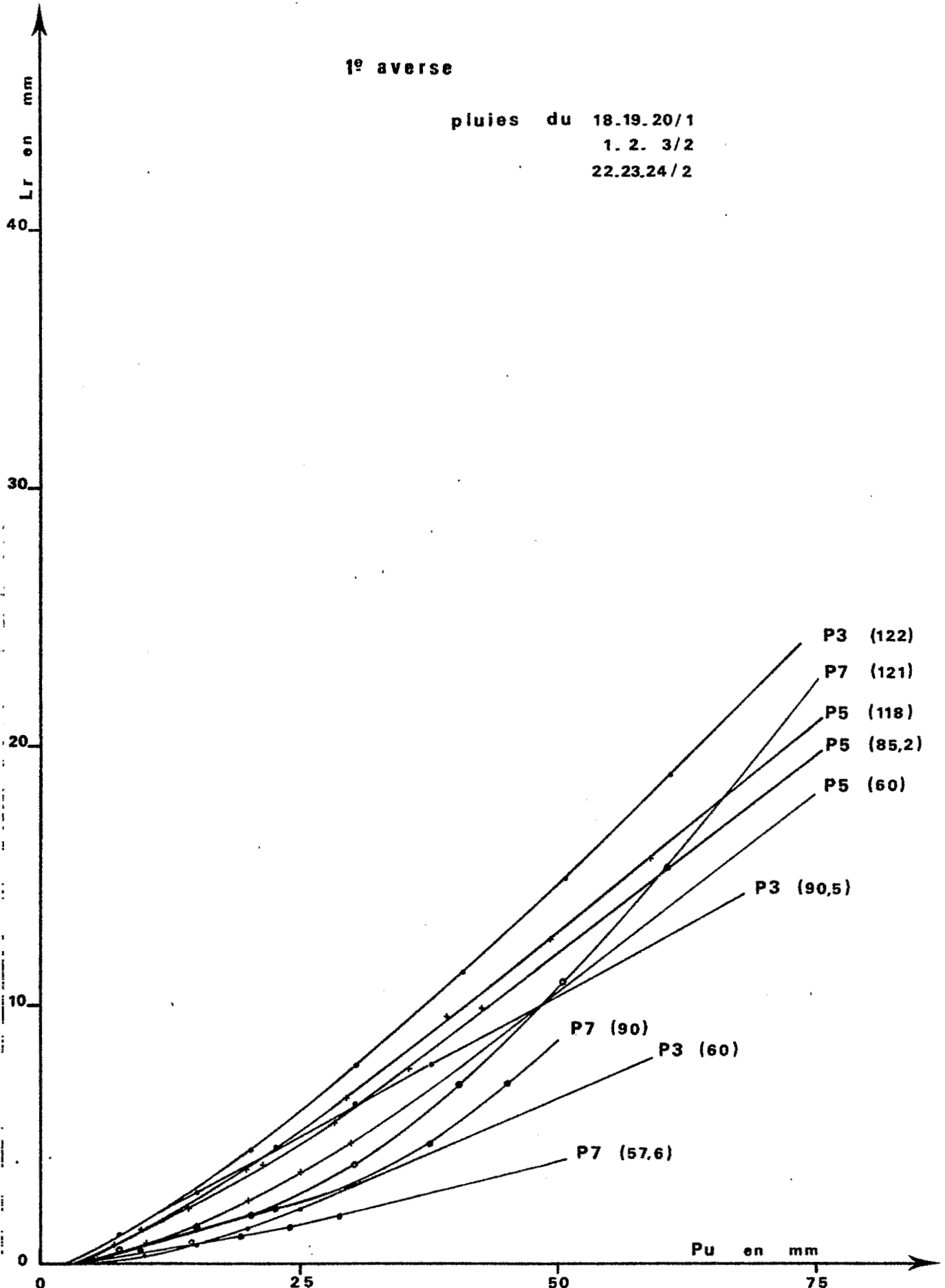
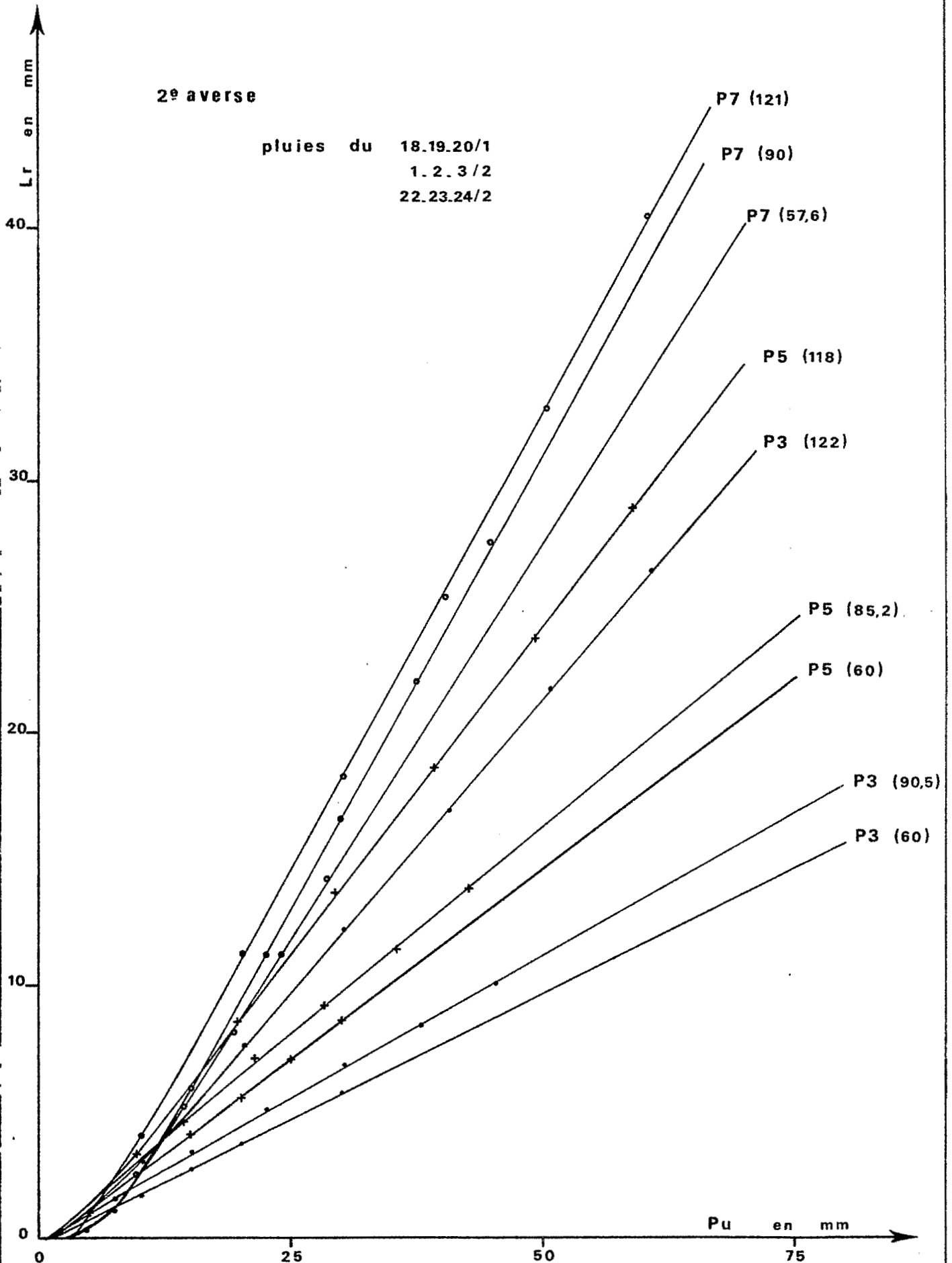


Fig. 26

Influence de l'intensité sur la lame ruisselée

2^e averse

pluies du 18.19.20/1
1.2.3/2
22.23.24/2



par rapport à celle de la plupart des autres facteurs. Par contre l'influence de la nature du sol sur la lame ruisselée peut ne pas être négligeable.

- La pente du sol ne paraît pas avoir d'influence sur la hauteur de la lame ruisselée, du moins pour des parcelles de 1 mètre de long.

- Le rôle de la couverture végétale sur la hauteur de la lame ruisselée est primordial. C'est, et de beaucoup, le facteur dont l'influence est la plus marquée.

8.2. Etude de l'intensité maximale de ruissellement R_x

Tout ce qui a été dit précédemment au sujet des pentes A des droites L_r (Pu) peut être repris à propos de l'intensité maximale de ruissellement puisque $A = \frac{R_x}{I_m}$. Il nous paraît cependant utile de revenir sur ce point, pour mettre en évidence, l'intérêt des pluies à intensité variable pour l'étude de ce paramètre. Nous avons pris comme exemple de ce type de pluie simulée, celle du 4-11-77 sur la parcelle 7. Le protocole suivi, pour cette pluie a été le suivant : pluie à 95 mm/h pendant 15 minutes puis pluie à 60 mm/h pendant 15 minutes enfin pluie à 45 mm/h pendant 15 minutes. Les changements d'intensité ont été faits sans arrêt de la pluie. Nous avons reproduit sur la figure 27 le hétérogramme de cette averse, l'hydrogramme résultant ainsi que les relations R_x et F_n en fonction de I et la droite L_r (Pu) que l'on peut tirer de ce type d'essai. On peut voir que :

- L'intensité maximale de ruissellement croît de façon linéaire avec l'intensité de la pluie. Les points représentatifs s'alignent correctement sur une droite d'équation $R_x = 0,94 (I - 15)$

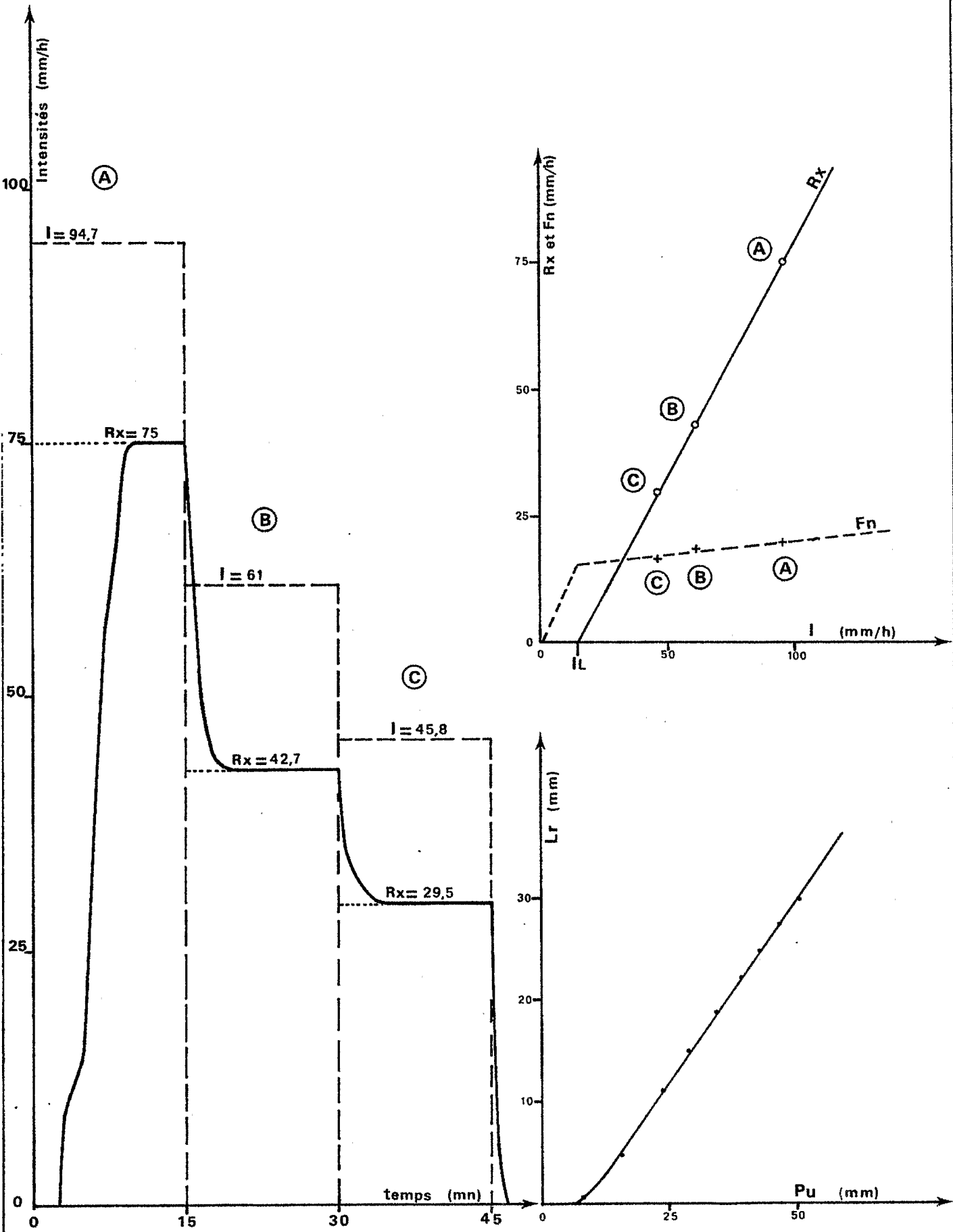
- Etant donné que $F_n = I - R_x$, l'équation de la droite F_n (I) est
$$F_n = 0,06 I + 14,1.$$

- L'abscisse à l'origine de la droite R_x (I), $I_l = 15$ mm, représente une intensité limite au-dessous de laquelle il est impossible d'obtenir un ruissellement. Cette intensité limite est à rapprocher de celle utilisée en hydrologie analytique pour définir la pluie utile.

- Ces équations et cette intensité limite ne sont bien sûr valables que pour un état d'humidité du sol et de la végétation donné. On peut cependant étudier l'évolution de ces droites et de I_l en fonction de l'état d'humectation initial du sol, si on simule, en partant d'un sol sec, le même jour donc pour un même état de la végétation, plusieurs pluies à intensité variable séparées par un bref intervalle de temps. D'autre part, si on simule ces mêmes pluies sur

Fig. 27

EXEMPLE DE PLUIE A INTENSITE VARIABLE



deux parcelles situées à proximité l'une de l'autre, l'une dénudée servant de référence, l'autre sous couverture végétale naturelle, on peut pour des essais espacés dans le temps s'affranchir du facteur couverture végétale. Il faut cependant prévoir dans le programme un dernier essai sur les deux parcelles dénudées afin de chiffrer l'influence de l'hétérogénéité du sol. Ces pluies à intensité variable permettent donc d'étudier Rx et Fn en fonction de plusieurs facteurs à partir d'un nombre de pluies simulées très réduit.

8.3. Etude de la détention superficielle Ds

Sur les figures 28 et 29 ont été reportées les valeurs de Ds en fonction de Rx pour toutes les pluies simulées et sur chacune des parcelles. On peut voir que, malgré une certaine dispersion résultant très probablement de l'influence de la couverture végétale, il existe une tendance très nette à la proportionnalité entre Ds et Rx. L'expression de cette tendance est donnée par la relation

$$D_s = T_d \cdot R_x$$

dans laquelle Td est un coefficient caractéristique de la parcelle, ayant la dimension d'un temps, raison pour laquelle A. LAFFORGUE le désigne par " Temps de détention de la parcelle".

Ces valeurs de Td (en heures) ont été calculées pour chaque parcelle et sont regroupées dans le tableau ci-après :

Parcelle	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Td en h	0,0068	0,0070	0,0062	0,0064	0,0066	0,0070	0,0136	0,0105	0,0107

On peut constater que les valeurs de Td correspondant aux sites 1 et 2 sont très proches les unes des autres, traduisant une influence négligeable de la pente du sol sur la détention superficielle pour la gamme des pentes testées et pour des parcelles de 1 mètre de long. Il existe par contre une différence sensible entre les sites 1 et 2 et le site 3 mettant en évidence le rôle de la nature du sol sur la détention superficielle. On se doit cependant d'être très prudent dans cette conclusion, les variations observées pouvant également provenir de la différence de pente entre les sites dont le rôle n'est peut-être pas négligeable pour les faibles pentes, ou de la couverture végétale bien que les points représentatifs des essais sur sol dénudé s'alignent sans dispersion notable sur les droites tracées.

DETENTION SUPERFICIELLE

Fig. 28

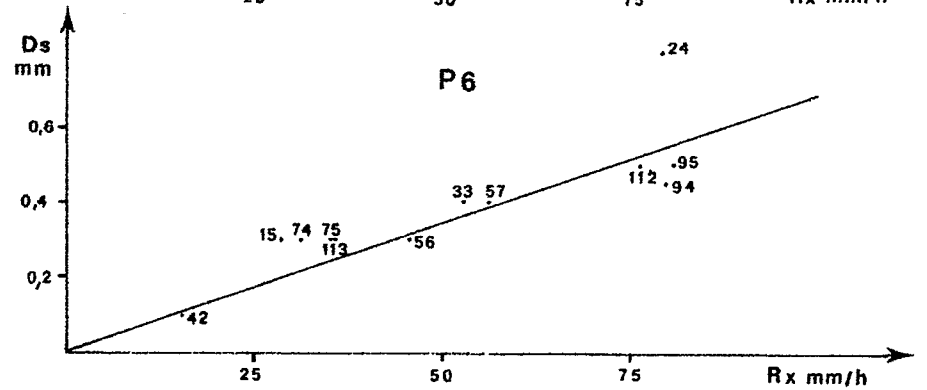
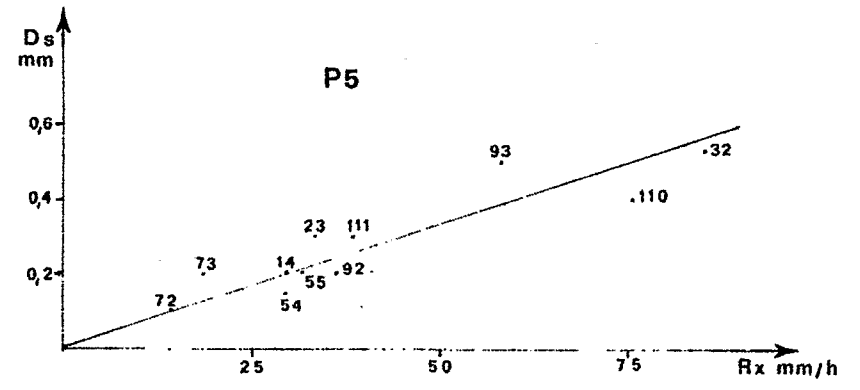
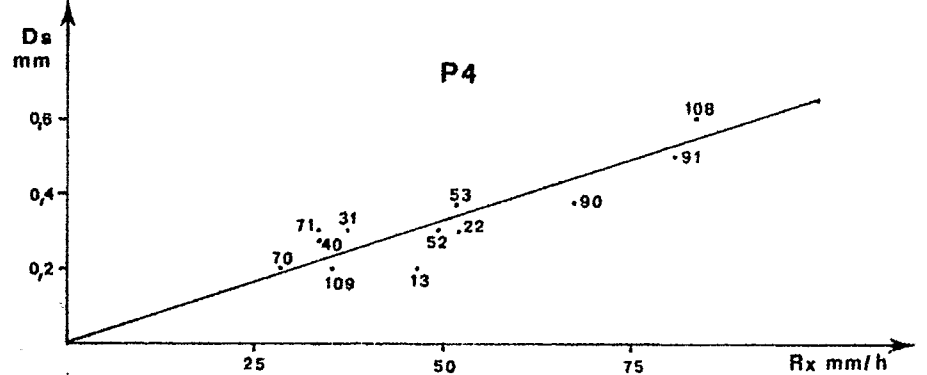
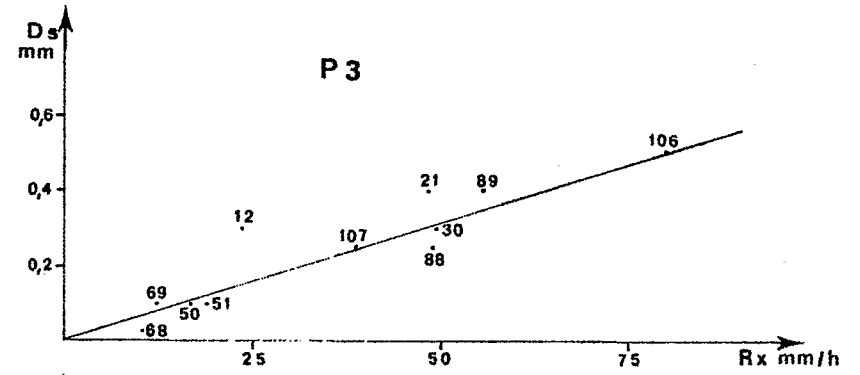
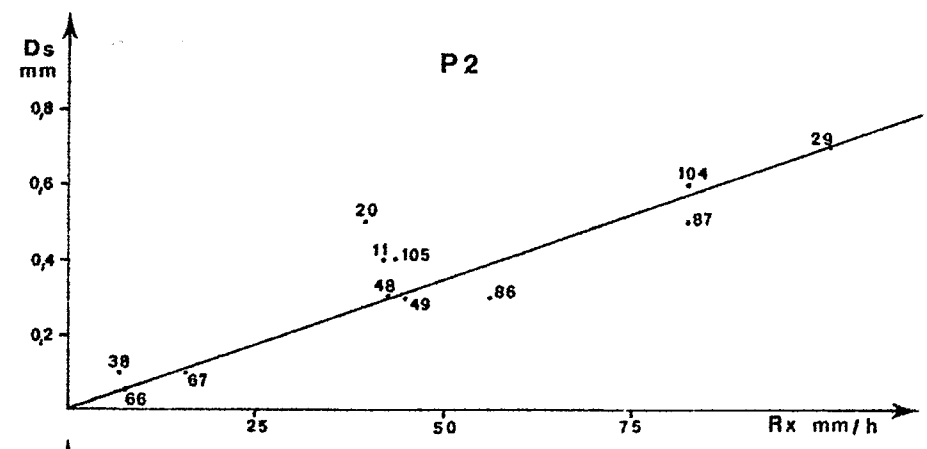
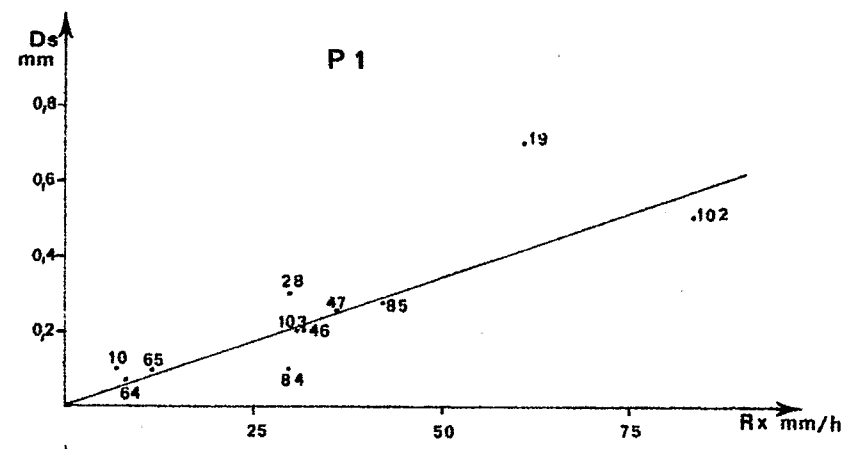
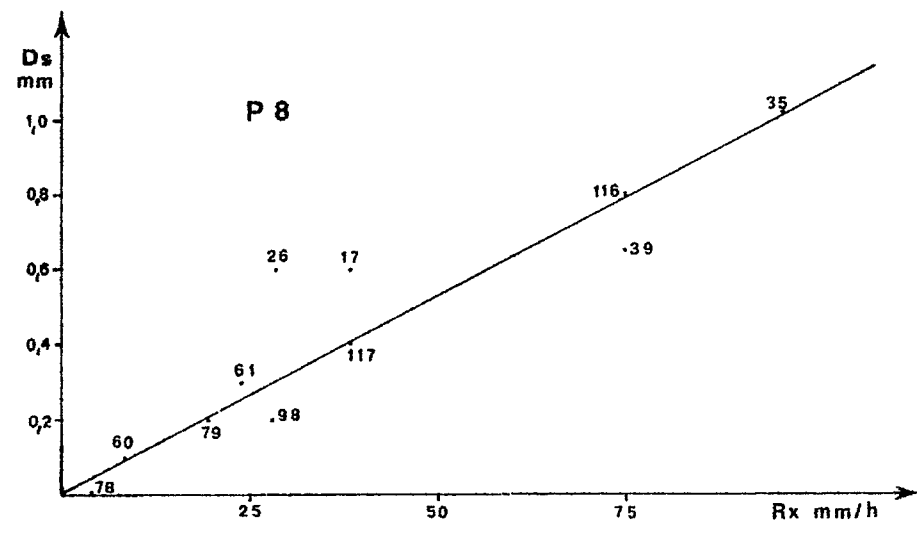
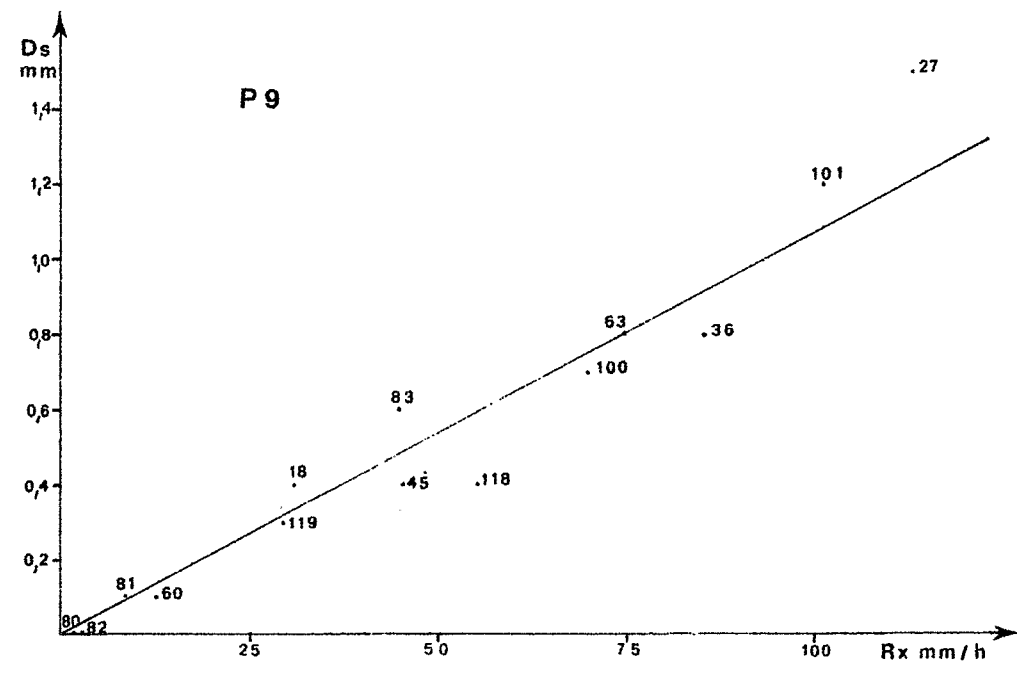
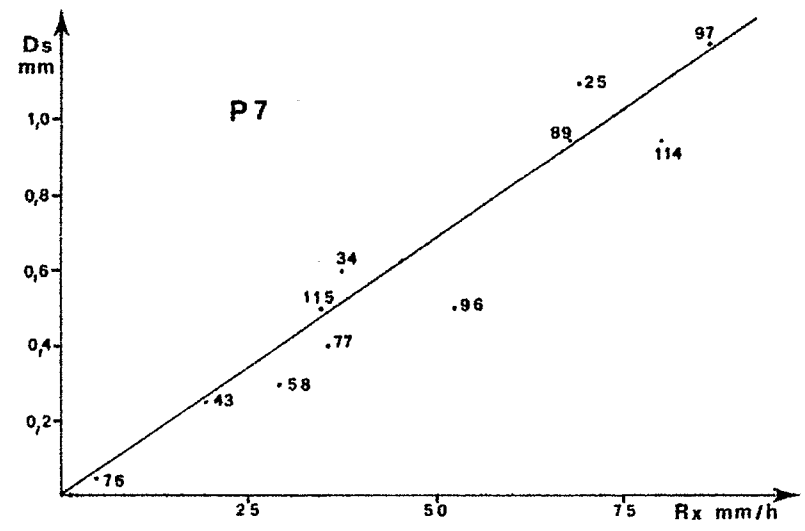


Fig. 29

DETENTION SUPERFICIELLE



8.4. Etude de la pluie d'imbibition Pi

La pluie d'imbibition mesurée sur nos parcelles est à rapprocher de la notion de "pluie limite de ruissellement" souvent employée en hydrologie, dont on sait qu'elle varie généralement avec l'humidité du sol. Pour savoir s'il en était de même pour Pi, il nous fallait d'abord trouver un paramètre caractérisant l'humidité du sol. Ne disposant pas des courbes d'étalonnage de la sonde à neutrons, il nous était impossible de calculer les humidités volumiques. On sait cependant que la relation, liant l'humidité volumique et le nombre d'impulsions mesuré à la sonde à neutrons, est linéaire et qu'on peut donc se servir de ce nombre d'impulsions pour caractériser l'état d'humidité d'un niveau. Plusieurs types de sonde ayant été utilisés au cours de nos mesures, afin d'homogénéiser les résultats, toutes les valeurs mesurées ont été ramenées à celle d'une sonde théorique de référence donnant 1000 i/s dans l'eau. En représentant l'humidité par cette valeur corrigée N du nombre d'impulsions, nous avons essayé diverses regressions entre Pi et l'humidité de différents niveaux N 20 cm, N 30 cm etc. Les résultats présentant une certaine dispersion nous avons ensuite corrélé Pi avec les sommes N 20 + N 30, N 20 + N 30 + N 40 etc. et nous avons retenu comme représentative de l'humidité du sol, la somme permettant la meilleure corrélation. Il s'agit de la somme des impulsions corrigées entre 20 et 50 cm de profondeur H = N 20 + N 30 + N 40 + N 50. Les valeurs de H correspondant à la mesure neutronique effectuée avant chaque pluie simulée sont données dans le tableau ci-après en face du n° de l'averse

P 1	P 2		P 3		P 4		P 5		P 6		P 7		P 8		P 9		
	H	n°	H	n°	H	n°	H	n°	H	n°	H	n°	H	n°	H	n°	
-	2	-	3	-	4	-	5	1322	6	-	7	-	8	-	9	1416	
1	1107	11	1205	12	990	13	1386	14	1261	15	1610	16	1548	17	1428	18	1356
2	1141	20	1301	21	1053	22	1383	23	1377	24	1764	25	1602	26	1562	27	1401
3	1112	29	1173	30	928	31	1324	32	1280	33	1693	34	1382	35	1296	36	1342
4	1058	38	933	39	800	40	1249	41	1327	42	1580	43	1387	44	1361	45	1138
5	928	48	820	50	693	52	893	54	1063	56	1063	58	1055	60	1068	62	899
6	1057	49	1113	51	962	53	1201	55	1287	57	1248	59	1312	61	1248	63	1141
7	914	66	804	68	665	70	866	72	1049	74	1092	76	1115	78	1024	80	897
8	962	67	987	69	884	71	978	73	1250	75	1215	77	1344	79	1163	81	1051
9	908	86	877	88	733	90	911	92	1121	94	1110	96	1051	98	942	82	1080
10	1026	87	1081	89	907	91	1110	93	1317	95	1177	97	1347	99	1279	83	1093
11	1099	104	1093	106	911	108	1234	110	1242	112	1413	114	1569	116	1531	100	1119
12	1157	105	1174	107	1061	109	1361	111	1397	113	1414	115	1621	117	1561	101	1355
																118	1411
																119	1565

Les relations $P_i(H)$ sont représentées sur les figures 30, 31 et 32. Ces figures appellent les commentaires suivants :

- Sur les parcelles du site I, les points représentatifs des 3 ou 4 premières pluies sont situés nettement au-dessus de la courbe $P_i(H)$. Rappelons que sur ce site, les cadres n'ont été implantés définitivement qu'à la troisième pluie simulée. Cette mise en place a été rendue difficile, par la présence à faible profondeur, de l'horizon gravillonnaire dans lequel la base des cadres a été enfoncée. Il est probable que ces fortes valeurs de la pluie d'imbibition, résultent de cette mise en place des cadres qui malgré les précautions prises, perturbe le sol, provoquant des zones d'infiltration privilégiées. Il aura fallu deux pluies sur ces parcelles avant que le sol ne se stabilise. Ensuite les points représentatifs s'alignent sans dispersion notable autour de courbes d'allure similaire sur les 3 parcelles, qui mettent en évidence une décroissance de la pluie d'imbibition lorsque l'humidité du sol augmente. Cette décroissance assez rapide pour les faibles humidités, devient faible et quasi-linéaire pour les valeurs moyennes et fortes de l'humidité du sol.

- Sur le site 2, l'allure de la courbe $P_i(H)$ varie selon les parcelles. Alors que sur les parcelles 4 et 6 à une décroissance assez brusque de P_i pour les faibles humidités fait suite une stabilisation des valeurs de la pluie d'imbibition, sur la parcelle 5 on note une décroissance lente et régulière de P_i quand l'humidité du sol augmente.

- Sur le site 3, il n'existe pas de corrélation entre P_i et H , pas plus d'ailleurs qu'avec les autres facteurs que nous avons essayés (humidité à différentes profondeurs, intensité de la pluie, niveau de la nappe, temps séparant l'averse considérée de l'averse précédente).

8.5. Conclusion

L'analyse sommaire des premiers résultats a montré que :

- Les principaux facteurs influençant le ruissellement, pour un type de sol donné, sont : la couverture végétale, l'état d'humectation préalable du sol et l'intensité de la pluie.

- Si l'on veut déterminer la forme des liaisons unissant le ruissellement à ces différents paramètres, il faut s'affranchir du facteur couverture végétale dont les variations spatiales et temporelles entraînent une forte dispersion des résultats.

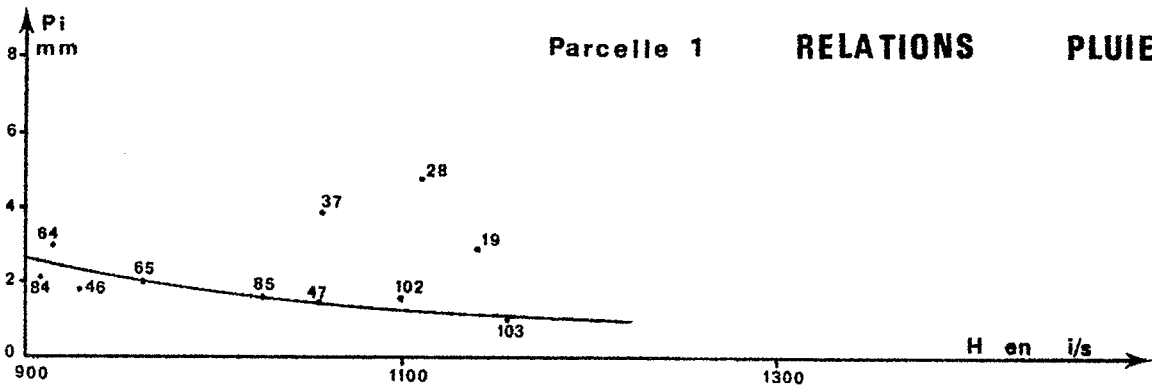
Fig. 30

O.R.S.T.O.M. Service Hydrologique

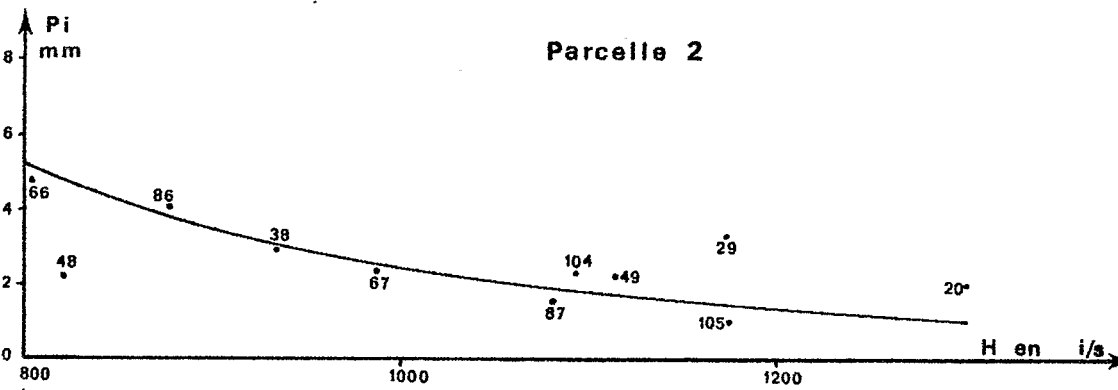
DESSINE PAR

R.C.I. N°

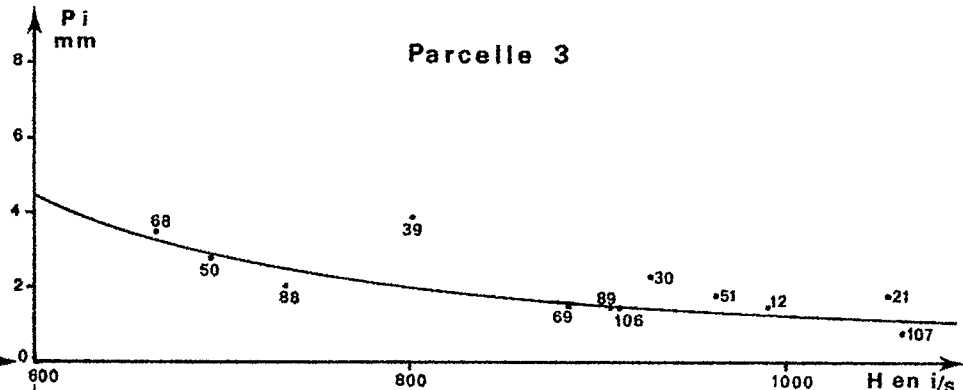
Parcelle 1 RELATIONS PLUIE D'IMBIBITION HUMIDITE DU SOL



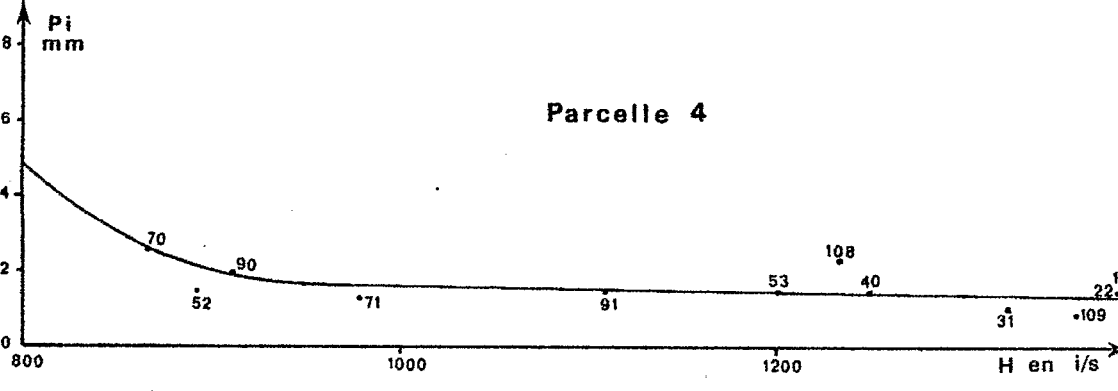
Parcelle 2



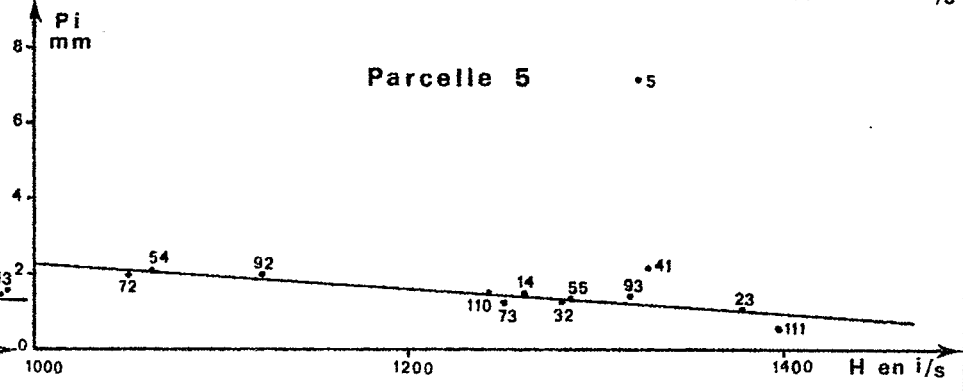
Parcelle 3



Parcelle 4



Parcelle 5



Imp. ...

RELATIONS PLUIE D'IMBIBITION_HUMIDITE DU SOL

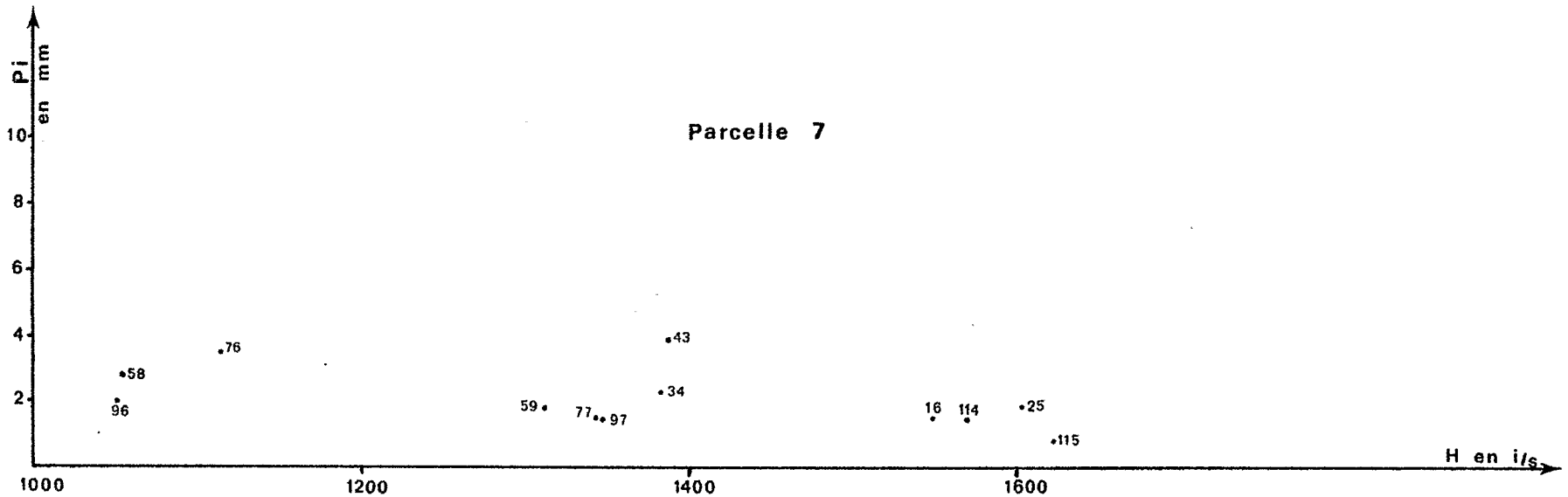
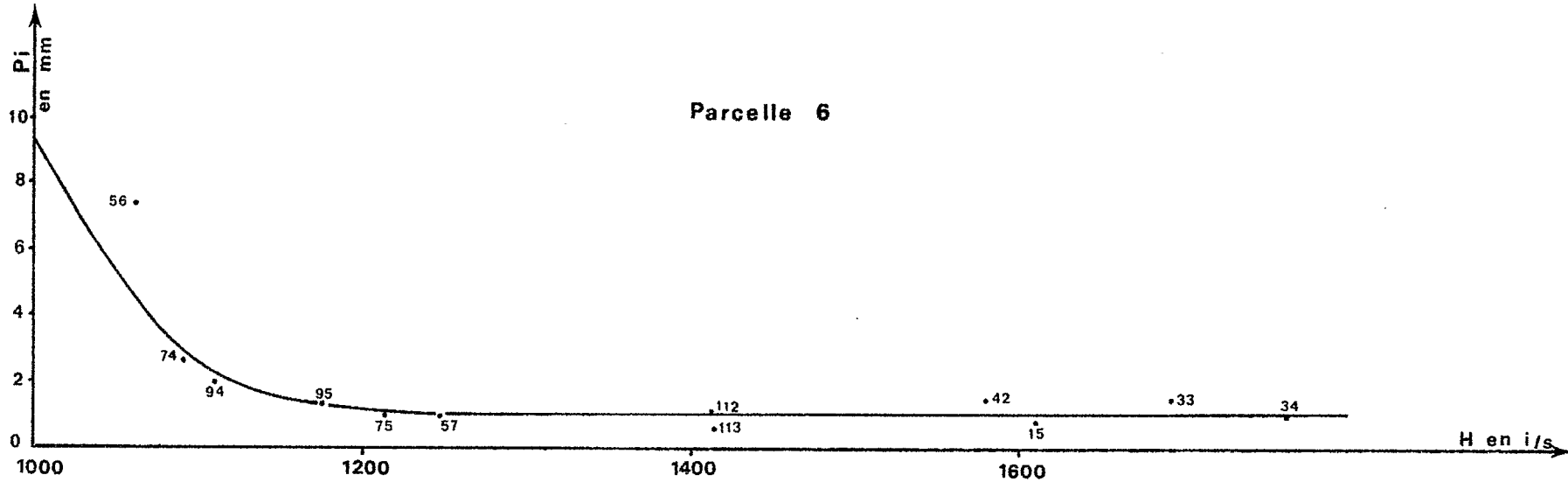


Fig. 31

RELATIONS PLUIE D'IMBIBITION_HUMIDITE DU SOL

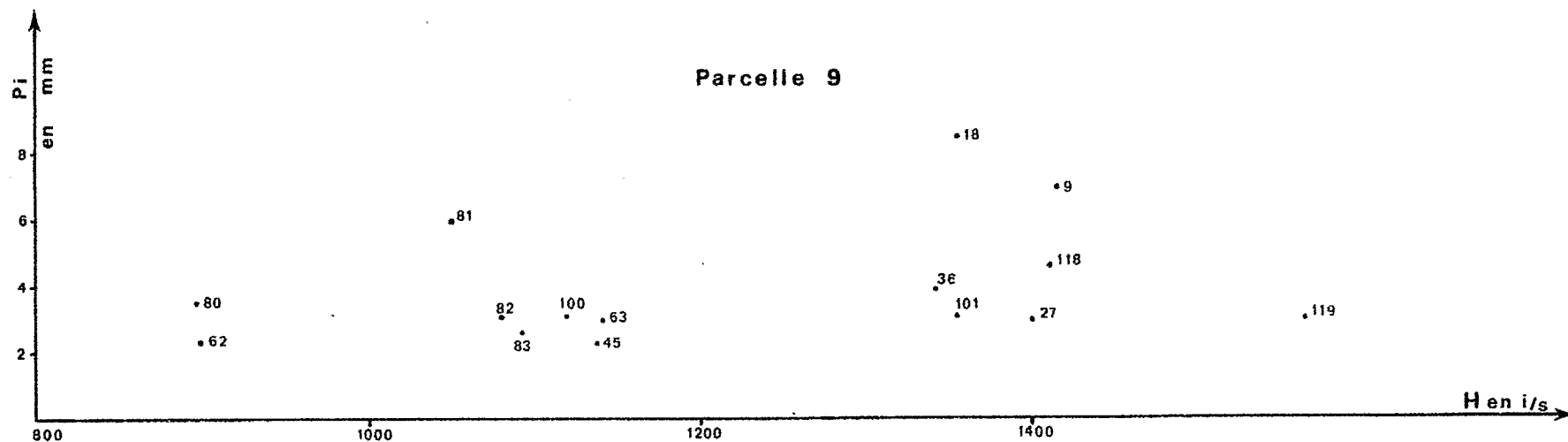
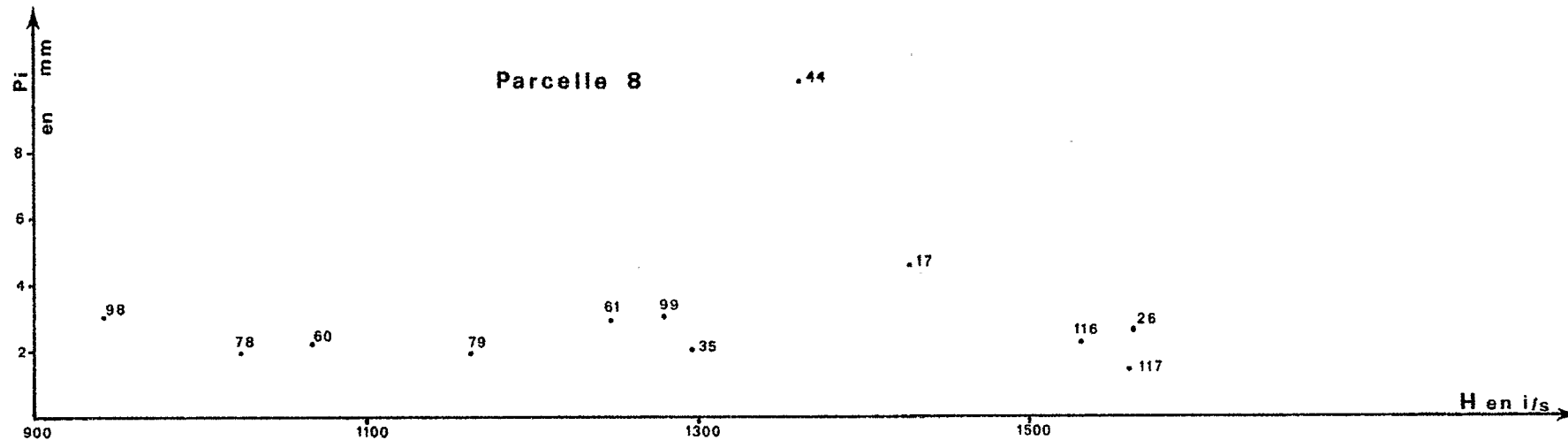


Fig. 32

- Les pluies à intensité variable permettent avec un petit nombre d'essais d'étudier les variations des principaux paramètres caractérisant le ruissellement.

Ces observations nous amènent à proposer, pour les essais futurs, le programme de mesure schématisé dans le tableau ci-après. Ce programme doit être mis en oeuvre, pendant la saison sèche, sur deux parcelles situées à proximité l'une de l'autre, l'une sous végétation naturelle, l'autre dénudée.

Parcelle \ Jour	J	J + 1	J + 2	J + 3	J + 15	8
1 : végétation	Protocole 1		Protocole 2		Protocole 3	✕
2 : dénudée		Protocole 1		Protocole 2	Protocole 3	

✕ Pour les pluies du jour J + 15 la parcelle 1 est dénudée.

Les protocoles proposés sont les suivants :

- Protocole 1 - Pluie à intensité variable P1 = 140 mm/H pendant 15 mn
 100 mm/H pendant 15 mn
 75 mm/H pendant 10 mn
 50 mm/H pendant 10 mn
 35 mm/H pendant 10 mn
 représentant une pluie de 87 mm en 1 heure.
 - arrêt de 1 heure
 - 2^e pluie P1
 - arrêt de 30 mn
 - 3^e pluie P1.
- Protocole 2 : Pluie à intensité variable identique à P1
 - arrêt de 2 heures
 - 2^eme pluie P1.
- Protocole 3 (parcelles 1 et 2 dénudées)
 - Pluie à intensité constante 120 mm/h pendant 30 mn
 - arrêt de 20 mn
 - Pluie à intensité constante 90 mm/h pendant 30 mn
 - arrêt de 20 mn
 - Pluie à intensité constante 60 mm/h pendant 30 mn.

Ce programme permet, en 5 jours de mesures :

- de chiffrer l'influence de la couverture végétale et de l'hétérogénéité du sol
- de déterminer la relation D_s (R_x)
- d'étudier les variations de R_x (et F_n) en fonction de l'intensité de la pluie et de R_x , F_n , I_l , pente et abscisse à l'origine de la droite L_r (P_u) et P_i en fonction de l'état d'humectation préalable du sol.

Il permet donc de caractériser de façon assez complète l'aptitude d'un sol au ruissellement et de comparer à partir des résultats obtenus plusieurs sols entre eux.

CONCLUSION

Les faits saillants qui ressortent de cette première campagne sont les suivants :

- Le simulateur de pluie, indispensable à ce type d'étude, est parfaitement opérationnel et répond à toutes les exigences formulées au préalable. Les quelques défauts du premier prototype qui sont apparus à l'usage, seront corrigés dans la prochaine version.

- Les premières mesures ont permis de déterminer l'importance relative des différents facteurs influençant le ruissellement. Les premiers résultats sont encourageants quant à la possibilité de caractériser l'aptitude d'un sol donné au ruissellement. Ils aboutissent à proposer une méthode d'étude des sols forestiers selon un protocole bien précis, destinée à permettre des comparaisons des caractéristiques hydrodynamiques de ces différents sols. Ce programme de mesure doit être couplé lors de la prochaine campagne, avec des analyses de chaque sol testé afin d'essayer de dégager des liaisons significatives entre les valeurs représentant la constitution physico-chimique du sol et les paramètres caractérisant le ruissellement.

Bibliographie

- BERTRAND (S.R.), PARR (J.R.) - Design and operation of the Purdue Sprinkling infiltrometer, Purdue Univers. Agric. Research Bulletin n° 723, 1961.
- BLANCHARD (D.C.) - The distribution of raindrops in Natural rain. Occasional Report N° 15, General Electric Research Lab. Project Cirrus. 1951.
- BOLI BABOULE (Z.) - Mise au point d'un simulateur de pluie de laboratoire. Essai d'application à l'étude de l'érodibilité des sols. D.E.A. Université Paris VII, ORSTOM, 1976.
- BOUCHARDEAU (A.), RODIER (J.A.) - Nouvelle méthode de détermination de la capacité d'absorption en terrains perméables. Mémoires et Travaux de la SHF, n° 1, 1960.
- COLLINET (J.), ASSELINE (J.), LAFFORGUE (A.) - Compte-rendu d'une mission en Haute-Volta. ORSTOM Abidjan, 1975.
- DIXON (R.M.), PETERSON (A.E.E.) - Construction and Operation of a modified spray infiltrometer and a flood infiltrometer. Univ. of Wisconsin. Research report N° 15. 1964.
- DUBREUIL (P.) - Etude du bassin versant de la rivière AGNEBY. Résultats de la campagne 1959. ORSTOM, Paris, 1960.
- DUBREUIL (P.) - Etude hydrologique de petits bassins versants en Côte d'Ivoire. Rapport général. Tome I : Zone forestière. ORSTOM, Paris, 1960.
- GIFFORD (G.F.) - Applicability of some infiltration formulae to rangeland infiltrometer data. Journal of Hydrology 28, 1976.
- GIRARD (G.) - Etude du bassin versant de la rivière AGNEBY. Résultats de la campagne 1960. ORSTOM, Paris, 1961.
- GIRARD (G.) - Etude du bassin versant de la rivière AGNEBY. Résultats des campagnes 1961-1962. Tome I : Les bassins supérieur et moyen. ORSTOM, Paris, 1963.
- GUNN (R.), KINZER (G.D.) - The terminal velocity to fall for water droplets. J. Met. 1949.
- HILLEL (D.) - L'eau et le sol. Principes et processus physiques Vander ed., 1974.
- HUDSON (N.W.) - Raindrop Size distribution in high intensity storms. Rhod. J. Agric. Res., 1, 1963.
- HUDSON (N.W.) - The flour pellet method for measuring the size of raindrops. Dept. of Conservation and Extension, Research Bulletin n° 4, 1964, Salisbury.
- HUDSON (N.W.) - Soil conservation, B.T. Batsford limited, London, 1973.

- KELKAR (V.N.) - Size distributions of raindrops. Indian J. Met. Geophys. Part I, 1959, Part II, 1970.
- KER (A.D.R.) - The measurement of Rainfall Intensity, drop size distribution and impactive force, unpublished thesis for dip. in trop. Agric. Trinidad, 1954.
- LAFFORGUE (A.), NAAH (E.) - Exemple d'analyse expérimentale des facteurs de ruissellement sous pluies simulées. Cah. ORSTOM, sér. Hydrol., vol. 13, n° 3, 1976.
- LAFFORGUE (A.) - Inventaire et examen des processus élémentaires de ruissellement et d'infiltration sur parcelles. Application à une exploitation méthodique des données obtenues sous pluies simulées. A paraître.
- LAWS (J.O.) - Measurement of fall velocity of water drops and raindrops. Trans. Amer. Geophys. Union, 1949.
- MEYER (L.D.) - An investigation of methods for simulating rainfall on standard run-off plots and a study of the drop size, velocity and kinetic energy of selected spray nozzle. Purdue Univers. Special Report n° 81, 1958.
- MEYER (L.D.) - Simulation of rainfall for soil erosion research. Trans. of the A.S.A.E., vol 8, n° 1, 1965.
- NASSIF (S.H.), WILSON (E.M.) - The influence of slope and rain intensity on runoff and infiltration. Bulletin des Sciences Hydrologiques XX, 4, 12, 1975.
- MOREL-SEYTOUX (H.J.) - Pour une théorie modifiée de l'infiltration. 5ème Partie, Le cas de la pluie. Cah. ORSTOM, sér. Hydrol., vol XII, 4, 1975.
- RIOU (CH.) - Quelques relations entre pluie, ruissellement et infiltration, obtenues en laboratoire sur des sols initialement secs. Cah. ORSTOM, sér. Hydrol., vol. I, 5, 1966.
- RODIER (J.A.) - Estimation des débits de crues décennales pour les petits bassins forestiers en Afrique tropicale. Etude préliminaire. Cah. ORSTOM, sér. Hydrol., vol XIII, 4, 1976.
- SMITH (R.E.) - The infiltration envelope : Results from a theoretical infiltrometer. Journal of Hydrology 17, 1972.
- VALENTIN (C.) - Construction et mise au point d'un infiltromètre à aspersion.
ASSELINE (J.) ORSTOM, Adiopodoumé, 1977.

CONSTRUCTION DU SIMULATEUR

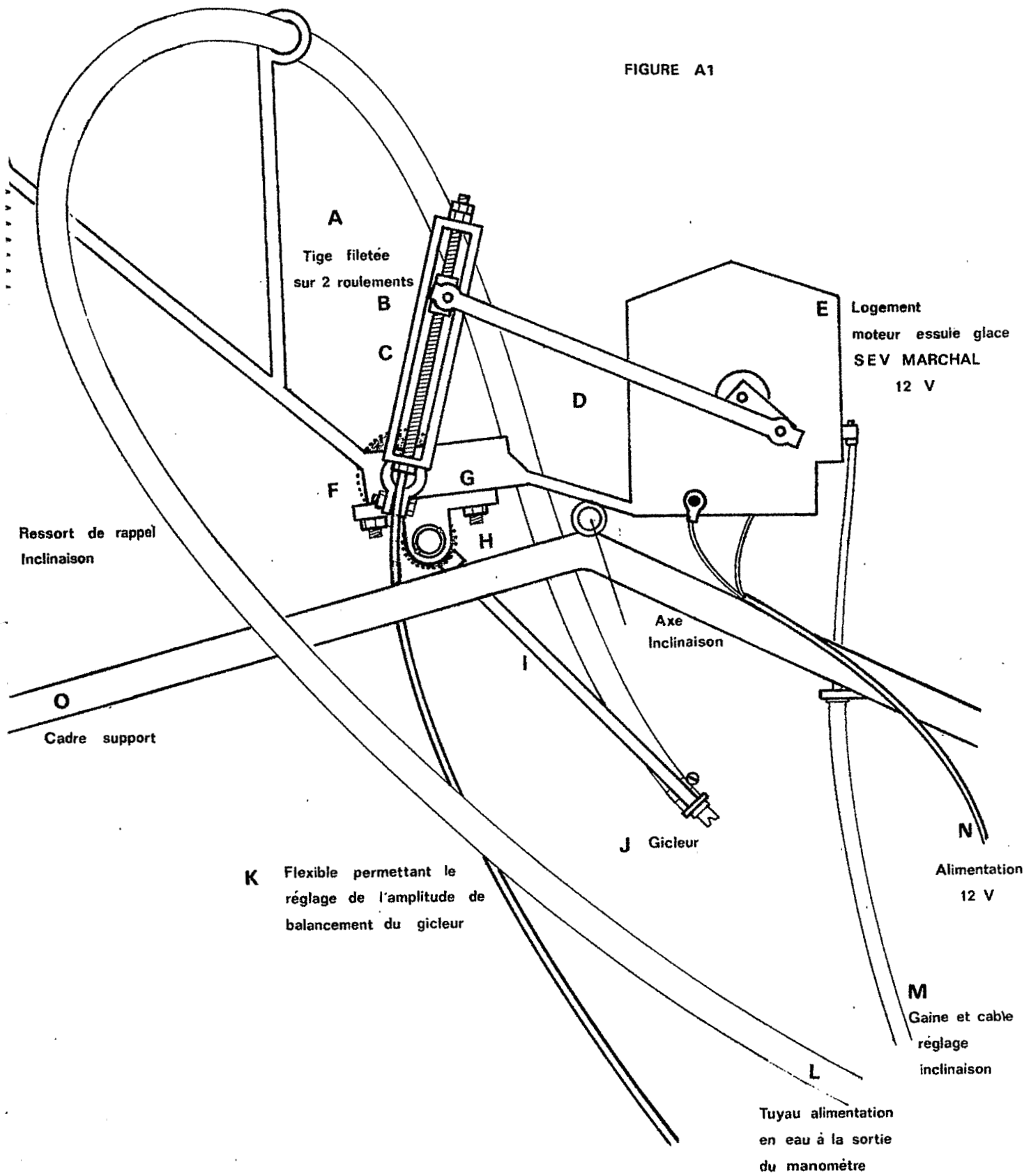
J. ASSELINE

A partir des figures A1, A2 et A3 nous donnons les schémas de construction.

Description des figures A1 et A2

- A - Tige filetée montée sur 2 roulements. Sa rotation (imprimée par l'intermédiaire du flexible K) permet d'allonger ou de raccourcir l'entre-axe B - F, ce qui augmente ou diminue l'angle de balancement du levier C et par transmission celui du bras supportant le gicleur.
- . Tige de laiton de 6 mm de diamètre et 145 mm de long
 - . 2 roulements, diamètres 6/19 mm.
- B - Axe en acier de 4 mm de diamètre, soudé sur deux écrous.
- C - Bâti supportant les deux roulements, muni à la base d'un orifice lui permettant de s'adapter sur l'axe F.
- . 3 tiges d'acier \varnothing 6 x 115 mm de long.
 - . 2 plaques 25 x 30 x 40 mm de fer plat avec logement de 3 mm x 19 mm de diamètre pour les roulements.
 - . 30 mm d'acier carré de 20 mm, travaillé, perforé aux diamètres de 8 et 12 mm avec une fente et une vis de 6 mm permettant le serrage sur l'axe.
- D - Bielle provenant d'un mouvement d'essuie-glace (Renault 4) 3 x 10 x 190 mm (170 mm d'axe en axe).
- E - Calandre de protection pour le moteur (12 V SEV MARCHAL) aérée pour éviter l'échauffement, en tôle galvanisée 10/10è
10 x 10 x 10 cm.
- F - Deux engrenages permettant d'amplifier le mouvement de balancier obtenu au levier C.
- . 1 roue de 52 dents \varnothing 43 mm, montée sur un axe de 43 mm \varnothing 12 mm.
 - . 1 roue de 35 dents \varnothing 29 mm montée au centre d'un axe de 75 mm, d'un diamètre de 12 mm d'un côté et de 8 de l'autre.
- G - Armature support de l'ensemble. Elle est divisée en deux parties, avec chacune une bague en bronze faisant office de palier, ce qui permet de positionner au mieux le contact entre les engrenages.
1. Sur la partie supérieure en fer plat de 4 x 20 mm, composée de 6 pièces soudées, 2 de 75 mm, 2 de 10 mm, 1 de 65 mm, 1 de 9 mm, sont soudés :
 - 1 tige reliée à un ressort de rappel (200 mm de fer à béton de 10) ;

FIGURE A1



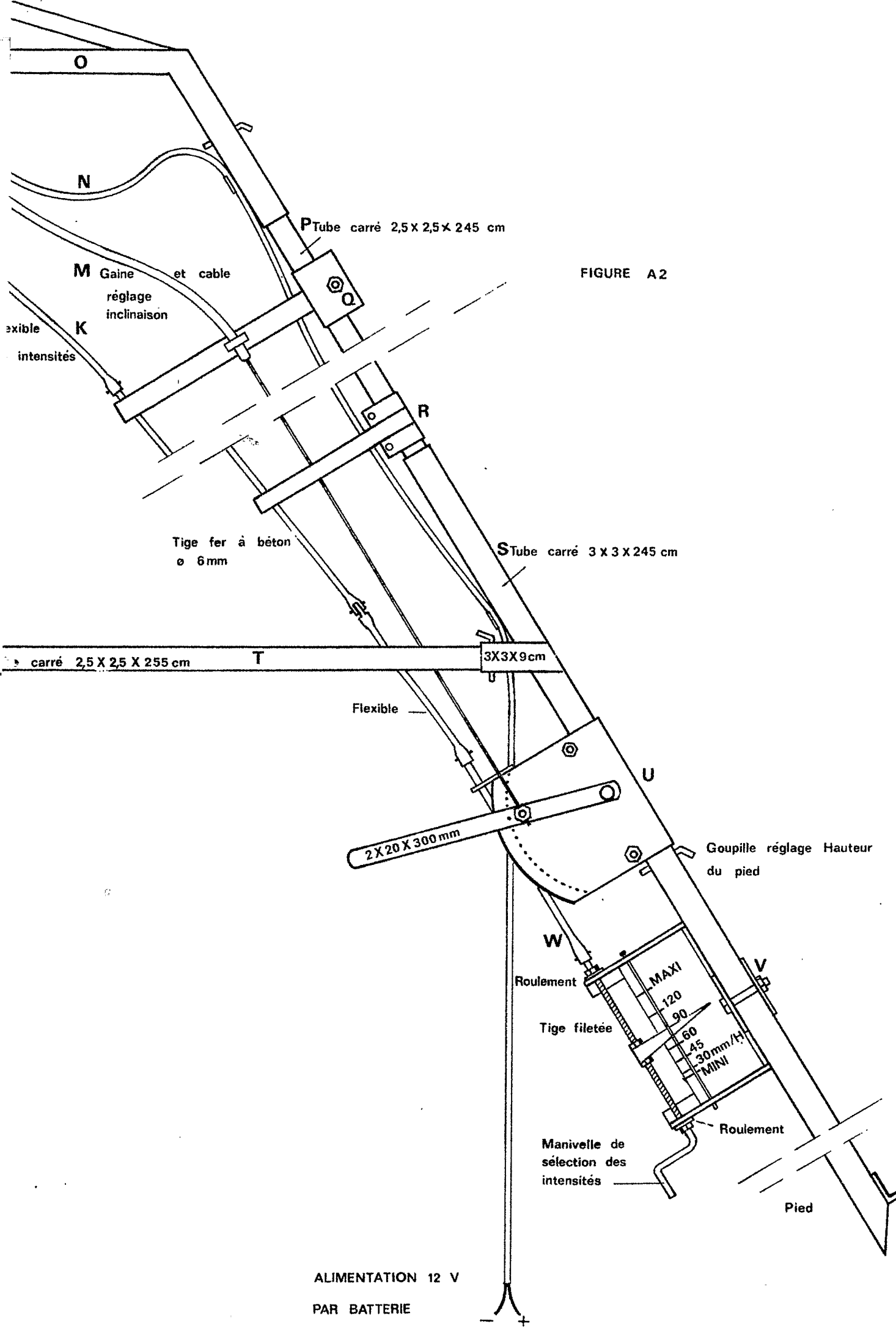


FIGURE A 2

- 1 tige supportant l'alimentation en eau (220 mm de fer à béton de 6) ;
 - 1 tige servant d'axe d'inclinaison à l'ensemble (250 mm de fer à béton de 12) ;
 - 1 plaque supportant le moteur et sa calandre de protection, l'accrochage du câble d'inclinaison (tôle galvanisée 20/10^e 110 x 100 mm) ;
 - 2 filetages pour la fixation de la seconde partie.
2. La partie inférieure a pour seule fonction de maintenir le palier H du petit engrenage. Monobloc en aluminium, il provient de récupération mais peut aisément se fabriquer en tôle épaisse. Longueur 70 mm, hauteur 35 mm, épaisseur 20.
- H - Deux bagues en bronze servent de paliers aux axes supportant les engrenages. Ø 12/19 mm x 20 de long.
- I - Tige imprimant le balancement au gicleur qu'elle supporte.
- . fer carré de 12 x 12 x 40 mm, percé de 2 trous Ø 8 mm, fendu sur un plan avec vis de serrage 8 mm
 - . fer à béton 10 mm x 180 mm.
 - . fer plat 4 x 20 x 50 percé d'un orifice Ø 11,5mm recevant le gicleur, fendu dans l'épaisseur avec vis de serrage 6 mm.
- J - Gicleur TEEJET SS 60 monté sur certains appareils de traitements phytosanitaires vendus par TECHNOMA. (Epernay, France).
- K - Flexible permettant le réglage de l'amplitude de balancement du gicleur (récupéré sur 404 Peugeot où il anime le tachymètre).
- L - Tuyau d'alimentation en eau, relie le manomètre (BOURDON-Paris Ø 18 cm, 0 à 1 Kg/cm²) au gicleur. Tuyau souple transparent de 10 mm de diamètre intérieur, 1,50 m de longueur.
- M - Gaine et câble permettant le réglage de l'inclinaison (récupéré sur le frein à main d'une 404 Peugeot).
- N - Câble électrique, 20 m de long, 2 fois 2,5 mm².
- O - Cadre en tube galvanisé de 20-27 mm formant un carré de 120 cm de côté avec, soudés à chaque angle à 125 grades d'inclinaison, 4 manchons en tube noir carré 3 x 3 x 20 cm dans lesquels s'ajustent les pieds
- P - 4 tubes noirs carrés de 2,5 x 2,5 x 245 cm.

Q - R - 2 supports et guides de la tringlerie de réglage

- . Tube carré 2,5 x 2,5 x 20 plus tôle galvanisée 20/10è 8 x 14 cm pliée s'ajustant sur le pied, maintenu serrée par un boulon 8 x 35 mm.

S - 4 tubes carrés de 3 x 3 x 245 cm, fermés en biseau à l'extrémité reposant sur le sol, munis de deux manchons 3 x 3 x 9 cm. Un de ces 4 pieds supporte également les guides Q et R les commandes de réglage U et V.

T - 4 tubes carrés de 2,5 x 2,5 x 255 cm relient les pieds entre eux.

U - Poignée de réglage de l'inclinaison.

- . Fer plat de 2 x 20 x 300 mm pivotant sur un axe contre une tôle galvanisée de 20/10è percée d'une ligne de trous \emptyset 5 mm et repliée avec 2 boulons de serrage (8 x 40 mm) sur un des pieds. Une petite plaque 2 x 20 x 50 mm perforée à 8 mm sert également de guide pour la tringlerie W.

V - Commande de réglage des intensités.

- . 2 supports en cornière de 30 x 30 x 120 mm avec logement pour roulement \emptyset 19 mm
- . 1 support en cornière de 30 x 30 x 180 mm reliant les 2 précédents
- . plaque de lecture des intensités, tôle galvanisée 10/10è
- . tôle galvanisée repliée avec vis de serrage 8 x 40 mm sur un pied
- . tige filetée en laiton \emptyset 6 mm ; 20 cm de long
- . aiguille de lecture, tôle galvanisée 10/10è 80 x 25 mm soudée sur deux écrous de 6 mm ;
- . fer à béton \emptyset 6 x 170 mm (Manivelle)
- . deux roulements 6 x 19 mm.

W - Tringlerie de sélection des intensités.

- . 2 fer à béton de 6 mm x 620 mm
- . 1 fer à béton de 6 mm x 410 mm
- . 1 flexible de 40 cm.

Ces différentes sections se raccordent par un manchon avec clavette, fer à béton de \emptyset 10 mm x 30 mm perforé dans sa longueur au \emptyset de 7 mm et dans le travers \emptyset 4 mm.

Figure n° A3 (cadres et limnigraphe)

- 1 - Bac pluviométrique. Il permet, à l'aide de trois tuyaux qui le relie au limnigraphe, de contrôler les intensités avant ou après l'expérience en le plaçant au-dessus du cadre n° 2. Tôle galvanisée 10/10è, 1 m² avec bordures de 5 cm de hauteur.
- 2 - Cadre permettant l'enfoncement par battage de la bordure en tôle n° 4.
 - . Extérieur en fer cornière égale de 50 X 50 mm formant un carré de 102 cm de côté ;
 - . A l'intérieur, renforcé par un second cadre de 99,5 cm de côté en cornière de 35 x 35 mm.
- 3 - Tôle de protection venant couvrir le canal de ruissellement et une partie de la goulotte. Tôle galvanisée de 6/10è mesurant déployée 99,8 cm x 24 cm ; elle est pliée dans la largeur en bande de 12, 4,4 et 4 cm.
- 4 - Cadre délimitant le périmètre de mesure de l'infiltration. Il est muni sur un côté d'une ligne de trous et au-dessous d'une gouttière collectant les eaux de ruissellement. Construit en tôle galvanisée 20/10è, il forme un carré de 100 x 100 cm intérieur et 18 cm de hauteur. Sur les côtés, une cornière de 40 x 40 mm rend l'ensemble rigide et limite l'enfoncement dans le sol ; à 80 mm, la base de la ligne de trous (\varnothing 10 mm, tous les 20 mm) est également à 80 mm du bord inférieur. Une double pente de 3 % guide l'écoulement au centre de la gouttière (tôle galvanisée 6/10è).
- 5 - Les eaux sont évacuées par une goulotte (tôle galvanisée 6/10è, 5 x 5 x 25 cm) et se déversent dans la cuve du limnigraphe. Une tôle 20 x 25 cm incurvée ou une feuille de plastique suffit à l'isoler de la pluie.
- 6 - Limnigraphe de laboratoire A. OTT modèle VIII fixé sur un socle muni de 4 pieds (tôle galvanisée de 10/10è et cornière de 30 x 30 mm).

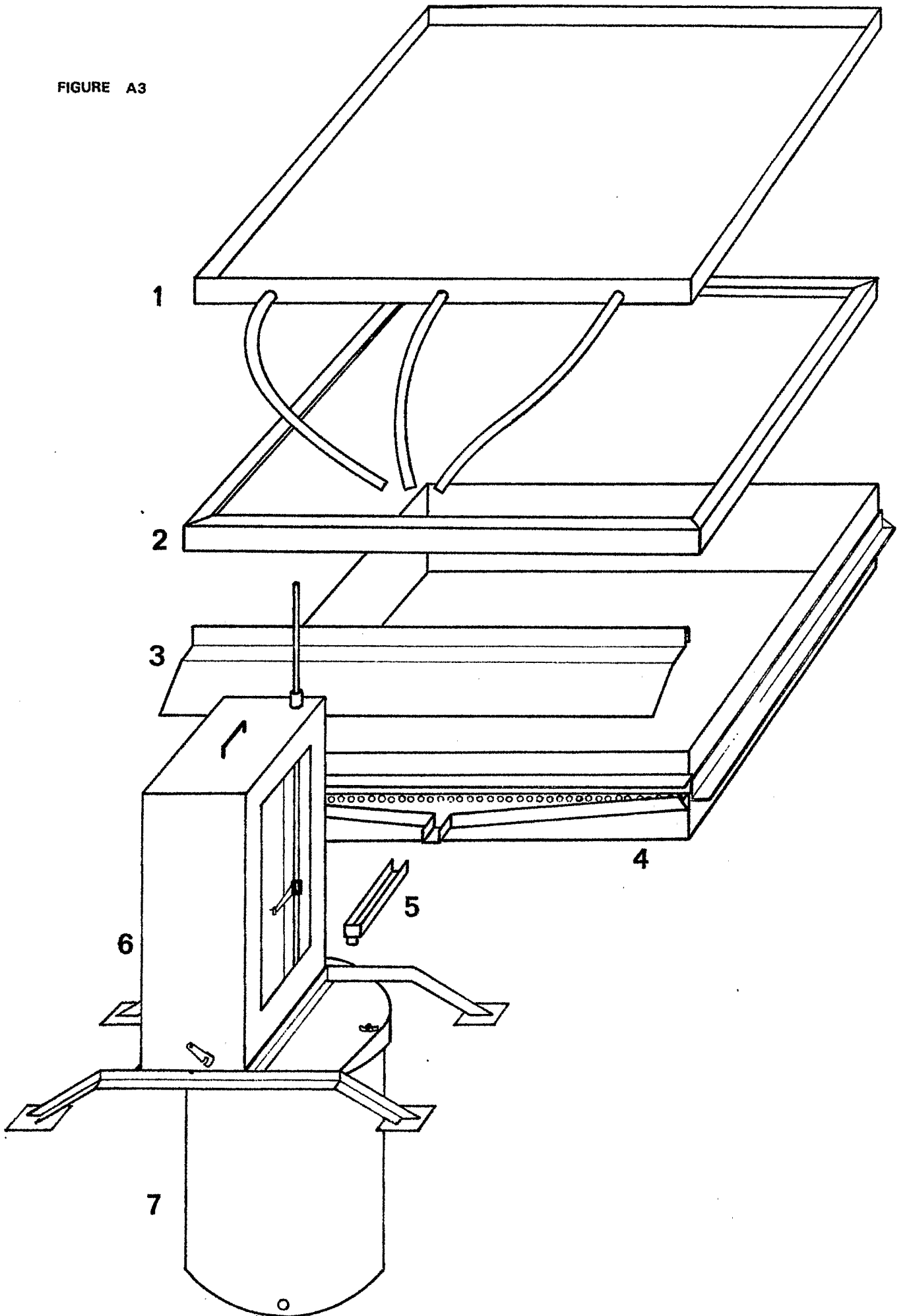
Equipé de roues E avec 48 dents au tambour et 64 à la commande, on obtient une rotation du tambour en 96 minutes avec une avance du papier (A. OTT n° 460 RK 35) de 6 mm à la minute (code LAGAG).

Le flotteur agit directement sur une tringle, le rapport est de 1/1 et permet d'enregistrer une hauteur de 35 cm.

L'ensemble est protégé par un couvercle en tôle galvanisée 10/10è, 22 x 30 x 55 cm, muni d'une vitre en plexiglas de 22 x 41 cm.

INFILTROMETRE : DISPOSITIF DE RECUEILLEMENT ET D'ENREGISTREMENT DES EAUX DE RUISSELLEMENT

FIGURE A3



7 - Cuve cylindrique du limnigraphe.

Cette cuve a été construite afin d'obtenir une élévation de 10 mm du flotteur pour un litre d'eau écoulée, soit 1 mm de pluie sur le bac pluviométrique d'un m².

Tôle galvanisée de 10/10è, diamètre intérieur 356,8 mm hauteur 45 cm dont 35 utiles. La différence est employée par le flotteur.

A la base de la cuve, est soudé un tube muni d'une vanne 20 x 27 permettant de vidanger rapidement.

LA TERMINOLOGIE TYPOLOGIQUE

PRINCIPE DE LA METHODE ET DEFINITIONS.

La terminologie typologique est basée sur 3 niveaux de diagnose. Le premier permet l'identification de l'horizon. On distingue, dans les sols ferrallitiques, 7 horizons majeurs qui sont :

- L'Appumite : partie supérieure des sols qui est humifère et/ou appauvrie en argile et sesquioxydes,

- Le Structichron : horizon minéral meuble qui possède une organisation structurale proprement pédologique sans rapport avec celle du matériau d'origine,

- Le Gravalite : horizon caractérisé par une grande abondance de nodules de sesquioxydes (+ de 45%),

- Le Gravelon : défini comme le gravolite mais les éléments grossiers ont ici une origine géologique (généralement cailloux et graviers de quartz),

- Le Stérite : horizon durci des sols ferrallitiques. Deux variantes en fonction de la dureté : Pétrostérite ne peut être cassée qu'au marteau (= cuirasse), fragistérite peut être rompu à la main (carapace),

- Le Rétichron : horizon à taches ou marbrures rouges ou ocre rouge et blanchâtres ou beiges ou jaunâtres. Le rétichron strict conserve la cohésion relativement faible des horizons meubles, le durirétichron montre dans les taches colorées un début de durcissement,

- L'Altérite : horizon sans organisation structurale de type strictement pédologique et sans agrégats. Dans la variante isaltérite, la structure de la roche est conservée au contraire dans l'allotérite les traits majeurs de la structure de la roche ont disparu.

Le deuxième niveau de diagnose porte sur la structure. Un horizon meuble peut être dit :

- Grumoclode : les faces structurales sont courbes, mamelonnées et composent des formes enveloppantes,

- Nuciclode : les faces courbes et mamelonnées sont nombreuses mais forment peu de figures complètes.

- Amérode : structure massive et continue,

- Pauciclode : faces structurales planes et arêtes anguleuses ou émoussées,

- Anguclode : faces planes et arêtes marquées forment une structure en agrégats anguleux bien délimités,

- Aliatode : structure farineuse, poudreuse.

- Psammoclode : structure particulière à éléments assez grossiers,

- Apalode : ce terme caractérise les altérites ayant complètement perdu la cohésion de la roche.

Le troisième niveau concerne des diagnostics complémentaires portant sur la couleur, la texture, les caractéristiques minéralogiques etc...

Le profil pédologique est divisé en deux : la partie supérieure ou apexol constitué de l'appumite et du structichron (si le structichron est très développé seule sa partie supérieure appartient à l'apexol) et la partie inférieure ou infrasol. On distingue trois variantes principales dans les apexols :

- L'ortho-apexol constitué d'un appumite et d'un structichron suffisamment développé pour porter sa profondeur à deux mètres,

- Le brachy-apexol formé d'un appumite et d'un structichron ayant plus de 30 cm mais n'atteignant pas les deux mètres,

- Le lepto-apexol ne comporte qu'un appumite et éventuellement une ébauche de structichron (moins de 30 cm).

Tous ces termes peuvent être combinés entre eux pour permettre une quantification. Considérons par exemple un horizon composé de deux phases dont X est la phase dominante (Ex. Structichron) et y la phase secondaire (Ex. Gravillons), la description se fera selon le schéma suivant.

pour 0	% de y	: X	Structichron
pour 0-5	% de y	: X stigme y	Structichron à stigme gravillonnaire
pour 5-15	% de y	: X phase y	Structichron à phase gravillonnaire
pour 15-30	% de y	: Xy	Structichron gravillonnaire
pour 30-45	% de y	: (y)X	Gravo structichron
pour 45-55	% de y	: Xy	Structichron gravolitique.

BIBLIOGRAPHIE.

- BEAUDOU (A.G.), CHATELIN (Y.).- Méthodologie de la représentation des volumes pédologiques. Typologie et cartographie en milieu ferrallitique africain. Cah. ORSTOM, sér. Pédol., 14, 4, 1976.
- BEAUDOU (A.G.).- Note sur la quantification et le langage typologique. ORSTOM, Adiopodoumé, 1977.
- CHATELIN (Y.).- Eléments d'épistémologie pédologique. Application à l'étude des sols ferrallitiques. Cahier ORSTOM, sér. Pédol., 10, 1, 1972.
- CHATELIN (Y.).- Contribution à une épistémologie des sciences du sol. Thèse Fac. Sciences, Dijon, 1976.

CHATELIN (Y.), MARTIN (D.).- Recherche d'une terminologie typologique applicable aux sols ferrallitiques. Cah. ORSTOM, sér. Pédol., 10, 1, 1972.

RICHARD (J.F.), KAHN (F.) et CHATELIN (Y.).- Vocabulaire pour l'étude du milieu naturel (tropiques humides). ORSTOM, Adiopodoumé, 1976.

DESCRIPTION DES PROFILS PÉDOLOGIQUES

TOPOSEQUENCE DU MANSO

par

C. VALENTIN

Profil Y 1

- 0 - 15 cm humide, 2,5 YR 5/4, humifère, sableux, faiblement argileux à sables fins de quartz et limons, amérode, peu poreux, très meuble quelques racines horizontales très superficielles, fines et moyennes, limite distincte et ondulée.
A 1
- 15 - 50 cm humide, 2,5 Y 6/6, dyscrophe, sableux, faiblement argileux à sables fins de quartz et limons, amérode, poreux, très meuble, rares racines horizontales fines et moyennes. Limite graduelle et régulière.
A 2
- 50 - 105 cm humide, 2,5 Y 7/0 à taches 7,5 YR 5/8 augmentant de taille du haut vers le bas, couvrant 30 à 50 % de la surface, argilo sableux à sables fins et limons, amérode, peu poreux, très meuble, très rares racines fines, limite nette et régulière.
Bg
- 105 - 120 cm humide, 5 Y 6,5/1, 35 % de cailloux de quartz de forme polyédrique émoussée, argilo sableux à sables grossiers de quartz et limons, amérode, très peu poreux, meuble, très rares racines fines, limite graduelle et régulière.
G
- 120 - 160 cm et plus noyé, 2,5 Y 5/0, 40 % taches étendues 10 YR 6/8, 15 % de graviers de quartz de forme irrégulière, 25 % de blocs de schiste sain ou peu altéré, très argileux, amérode, très peu poreux, très meuble, très rares racines fines.
Go/c

SOL HYDROMORPHE PEU ORGANIQUE A GLEY DE PROFONDEUR

Profil Y 2

- 0 - 5 cm humide, 10 YR 4/3, humifère, sableux faiblement argileux à sables fins de quartz, muciclude à débit grumoclude très fin, peu poreux, très meuble, très nombreuses racines fines à très fines, limite nette et régulière
Appumite
- 5 - 35 cm humide, 2,5 Y 6/4, dyscrophe, argilo sableux à sables fins de quartz, amérode à tendance anguoclode, poreux, très meuble, assez peu de racines fines et très fines, limite graduelle et régulière
Structichron dyscrophe
- 35 - 55 cm humide, 2,5 Y 6/6, à phase dyscrophe, argilo sableux, amérode à tendance anguoclode, poreux, meuble, assez peu de racines fines et très fines, limite graduelle et ondulée
Structichron à phase dyscrophe
- 55 - 100 cm très humide, 2,5 Y 5/6, 10 % de taches 10 Y R 6/8 et 25 % de taches 2,5 YR 4/8, argileux, pauciclude, poreux, meuble, activité animale décelable, rares racines fines, limite graduelle et régulière
Structichron altérique à phase réticrome
- 100 - 155 cm très humide, 2,5 Y 7/0, 25 % de taches d'environ 25 mm 5 YR 5/8, 15 % de cailloux à blocs d'isaltérite de schiste 2,5 YR 4/6, argileux, pauciclude, peu poreux, meuble, très rares racines fines, limite graduelle et régulière
Alté-structichron pardichrome
- 155 - 220 cm et plus très humide, 2,5 Y 7/0, 25 % de taches de 25 mm 5 YR 5/8, de 15 à 40 % de cailloux à blocs d'isaltérite de schiste, argileux, pauciclude, peu poreux, meuble, très rares racines fines
Isaltérite pardichrome

DENDRO - APEXOL SUR ALTE - STRUCTICHRON PARDICHROME

Profil Y 3

- 0 - 7 cm Frais, 7,5 YR 3/2, humifère, argilo-sableux à sables fins de quartz grumoclode, très poreux, très meuble, très nombreuses racines fines et moyennes à nette tendance horizontale, transition nette et ondulée.
Appumite.
- 7 - 20 cm frais, 7,5 YR 5/4, dyscrophe, argileux, amérode à débit pauciclude, poreux, très meuble, racines assez nombreuses, taille moyenne, buttant sur l'horizon sous-jacent, transition rapide et ondulée.
Structichron dyscrophe.
- 20 - 50 cm frais, 10 YR 5/6, horizon s'amincissant de l'amont vers l'aval, légèrement dyscrophe, 55 % d'éléments grossiers : 30 % de concrétions ferrugineuses de la taille des graviers, 25 % de graviers de quartz ferruginisés et émoussés, argileux, amérode à débit anguclide net très fin, poreux, peu meuble, quelques racines fines, transition distincte et régulière.
Structi-(gravé-gravolite) à phase dyscrophe.
- 50 - 90 cm frais, 7,5 YR 5/8, 25 % de cailloux altéritiques de schiste 10 R 3/6, argileux, présence de limons, amérode à débit anguclide assez net fin, peu poreux, meuble, assez peu de racines fines et très fines, transition nette et régulière.
Structichron altéritique.
- 90 - 220 cm et plus frais, 10 YR 6/8 et 10 R 3/6, altérite de schiste quartzeux à pendage subvertical, argilo limoneux, très peu poreux, peu meuble, très rares racines moyennes.
Isaltérite de schiste.
LEPTO-APEXOL SUR STRUCTI-(GRAVE-GRAVOLITE)

Profil Y 4

- 0 - 4 cm frais, 10 YR 3,5/2, humifère, argilo-sableux à sables fins et moyens de quartz, grumoclode, très poreux, très meuble, racines très nombreuses fines et moyennes à tendance horizontale, transition nette et régulière.
Appumite
- 4 - 70 cm frais, 7,5 YR 5/4, dyscrophe, 60 % d'éléments grossiers : 15 % de cailloux de quartz ferruginisés, 45 % de concrétions ferrugineuses boursoufflées de la taille des graviers aux cailloux, argilo-sableux à sables moyens de quartz, nuciclode très fine, poreux, peu meuble, racines moyennes assez nombreuses dans la partie supérieure de l'horizon passant ensuite à rares, transition nette et régulière.
Structi-gravolite graveleuse dyscrophe
- 70 - 170 cm humide, 10 YR 4/6, 40 % de taches 10 R 4/8 et 10 % de taches 10 R 4/5 correspondant à l'altérite, argilo-limoneux, amérode à débit pauciclode, peu poreux, peu meuble, racines très rares fines et très fines, transition diffuse et régulière.
Altérite-structichron pardichrome
- 170-230 cm et plus humide, 25 % de 10 R 4/5 et 40 % de 2,5 Y 7/6 correspondant à l'altérite, 30 % de taches 2,5 YR 4/8 et 5 % de taches 2,5 Y 8/0, argilo-limoneux, structure héritée de la roche, pendage subvertical, très peu poreux, meuble, très rares racines fines.
Isaltérite pardichrome

LEPTO-APEXOL SUR STRUCTI-GRAVOLITE GRAVELEUSE DYSCROPHE

Profil Y 5

0 - 10 cm humide, 10 YR 3/2,5, humifère, argilo-sableux à sables fins de quartz, grumoclode, très poreux, très meuble, racines très nombreuses fines et moyennes à tendance horizontale, transition nette et régulière.

Appumite

10 - 80 cm humide, 7,5 YR 4/6, dyscrophe, 60 % d'éléments grossiers : 20 % de cailloux de quartz ferruginisés, 40 % de concrétions ferrugineuses de graviers à cailloux et de forme irrégulière, la taille des éléments grossiers diminue dans les 10 derniers centimètres de l'horizon, argilo-sableux à sables moyens de quartz, nuciclode, peu poreux, peu meuble, racines assez nombreuses fines et moyennes passant à quelques racines en profondeur, transition nette et ondulée.

Structi-(gravé-gravolite) dyscrophe

80 - 170 cm humide, 7,5 YR 4/6, 30 % de taches 2,5 YR 4/8 et 15 % de taches 10 R 3/6 correspondant à l'altérite, 5 % de cailloux de quartz ferruginisés, argilo-limoneux, à sables grossiers de quartz, amérode à débit anguoclode net, peu poreux, meuble, très rares racines fines, transition graduelle et régulière.

Altérite-Structichron pardichrome

170 - 240 cm et plus humide, 2,5 YR 7/6, 20 % de taches 10 R 5/4, 20 % de taches 10 R 3/4 et 10 % de taches 2,5 Y 7/6 ; ces taches suivent la schistosité de l'altérite, argilo-limoneux, structure héritée de l'altérite très peu poreux, peu meuble, très rares racines fines.

Isaltérite pardichrome

LEPTO-APEXOL SUR STRUCTI-(GRAVE-GRAVOLITE) DYSCROPHE

Profil Y 6

- 0 - 7 cm humide, 10 YR 3,5/2, sablo-argileux à sables moyens de quartz, pauciclode, humifère, poreux, très meuble, racines très nombreuses fines et moyennes à tendance horizontale, transition nette et ondulée.
Appumite
- 7 - 25 cm humide, 10 YR 4/5, dyscrophe, argilo-sableux à sables moyens de quartz, anguclode assez nette, poreux, meuble, racines assez nombreuses, fines et moyennes à tendance horizontale, transition nette et régulière.
Structichron dyscrophe
- 25 - 100 cm humide, 7,5 YR 5/6 légèrement dyscrophe, 50 % d'éléments grossiers, 35 % de concrétions ferrugineuses de la taille des graviers aux cailloux, de forme irrégulière, 15 % de cailloux de quartz ferruginisés, argilo-sableux, anguclode fine et nette, peu poreux, peu meuble, assez peu de racines fines à tendance horizontale, transition nette et ondulée.
Gravo-structichron graveleux à phase dyscrophe
- 100 - 180 cm humide, 10 R 4/8, 35 % de taches 10 YR 6/6 et 10 % de taches 10 R 3/4, argilo-limoneux à sables fins de quartz, amérode à débit anguclode assez net, très peu poreux, meuble, activité animale discernable, rares racines fines, transition diffuse et régulière.
Structi-altérite pardichrome
- 180 - 260 cm et plus humide, 10 R 4/8, 25 % de taches 10 YR 5/6, 15 % de taches 2,5 YR 8/0 10 % de taches 10 YR 6/8 et 10 % de taches 10 R 3/4, ces taches suivant la schistosité de la roche, argilo-limoneux, amérode à débit anguclode assez net et structure héritée de la roche, très peu poreux, de meuble à peu meuble, très rares racines fines.
Isaltérite pardichrome

DENDRO-APEXOL SUR STRUCTI-ALTERITE PARDICHROME

Profil Y 7

- 0 - 5 cm frais, 7,5 YR 3/2, humifère, argilo-sableux à sables fins de quartz, nuciclode, poreux, très meuble, racines très abondantes fines et à tendance horizontale, transition nette et ondulée.
Appumite
- 5 - 25 cm frais, 7,5 YR 4/4, 55 % d'éléments grossiers : 30 % de concrétions ferrugineuses arrondies de la taille des graviers à cailloux, 15 % de graviers à cailloux de quartz et 10 % de cailloux d'altérite conservée, argilo-sableux à sables fins de quartz, dyscrophe, nuciclode fine, poreux, meuble, racines fines assez rares, transition distincte, et régulière.
Structi-(gravé-gravolite altéritique) dyscrophe
- 25 - 75 cm humide, 5 YR 4/6, 50 % d'éléments grossiers : 25 % de concrétions ferrugineuses de la taille des graviers, 15 % de graviers d'altérite conservée, 10 % de graviers de quartz, dyscrophe, argileux, angu-
clode fine assez nette, peu poreux, peu meuble, rares racines fines, transition nette et régulière.
Structichron-(alté-gravolite graveleuse) dyscrophe
- 75 - 115 cm humide, 10 YR 5/6, 20 % de taches 10 R 4/8 et 10 % de taches 10 R 3/4, argileux, anguclode assez nette, peu poreux, meuble, rares racines fines, transition distincte et irrégulière.
Structichron altéritique pardichrome
- 115 - 170 cm humide, 10 YR 5/6, 40 % de taches 10 R 4/8 s'élargissant en profondeur, 15 % de taches 10 R 3/4 et 10 % 10 YR 6/8, argilo-limoneux, amérode à débit anguclode très net, peu poreux, peu meuble, racines fines très rares, transition graduelle et irrégulière.
Structi-altérite pardichrome
- 170 - 250 cm et plus humide, 10 R 4/3 et 10 YR 6/8 : couleurs principales de l'altérite, argilo-limoneux, très peu poreux, de peu meuble à assez cohérent, structure héritée de la roche, schistosité subverticale, très rares racines fines.
Isaltérite pardichrome.

LEPTO-APEXOL SUR STRUCTI-(GRAVE-GRAVOLITE ALTERITIQUE) DYSROPHE

Pluviométrie journalière (en mm). Pluies naturelles.

	J 77	A	S	O	N	D	J 78	F	M
1			3,2	1,1	4,4	*		*	
2				1,5	1,2	*		*	16,5
3		1,3				*		*	14,0
4						*			
5			11,7		24,9				
6			7,9	5,6		0,8			90,9
7			4,5					5,7	0,5
8			6,0	2,2					*
9				2,0		2,5			*
0		1,9	20,1			3,5			*
1				28,1	25,0				
2		2,4	2,1	*	9,6				
3				*				15,4	
4			9,0	*	0,3			*	
5	Installat	0,5	11,2					4,5	
6			3,4		*	8,4	0,1	16,0	
7			1,5	0,2	*				
8			14,4		*	2,2	*		
19	2,7	18,2					*	9,7	
20			7,0	3,2			*		
21				0,6		*			
22		1,3			9,5	*		*	
23						*		*	
24				1,8				*	
25			0,1				5,4	2,0	
26		4,9	9,2	0,9	24,5				
27		5,1	59,3	10,0	12,3			16,0	
28			10,5	17,2				0,5	
29									
30			22,6	2,8					
31									
	(2,7)	35,6	203,7	87,1	112,4	6,9	5,4	69,8	

* Pluies simulées.