

Construction et mise au point d'un infiltromètre à aspersion

J. ASSELINE et C. VALENTIN

Pédologues ORSTOM, Centre d'Adiopodoumé, Côte d'Ivoire

RÉSUMÉ

Les auteurs ont cherché à mettre au point un appareil peu coûteux, très maniable, capable d'apporter des résultats rigoureux sur les intensités d'infiltration dans les sols. Ils ont écarté les méthodes utilisant une charge d'eau pour choisir la simulation de pluies, à leurs yeux plus proche des conditions naturelles.

L'intensité d'averse, sur une parcelle de 1 m² (surface de garde de 2,5 à 13 m²) est réglable à tout moment, d'une manière progressive et continue de 30 mm/h à 140 mm/h. L'amélioration du système de balancement du gicleur pourrait abaisser l'intensité minimale à 15 mm/h. L'appareil consomme environ 410 l d'eau à l'heure. Le transport de l'ensemble du matériel peut être assuré par un véhicule léger (Land Rover, Peugeot 404 bâchée).

Les auteurs ont procédé à une série de mesures visant à rechercher la taille des gouttes et leur distribution suivant six intensités : 37, 45, 60, 90, 120 et 140 mm/h. Tenant compte des vitesses de balancement du gicleur, des vitesses initiales et des vitesses limites dues à la résistance de l'air, ils ont calculé les énergies cinétiques des gouttes lors de l'impact sur le sol. Ces énergies sont très voisines de celles obtenues par divers auteurs sous les pluies naturelles en milieu tropical.

Des possibilités d'utilisation de l'appareil sont indiquées dans plusieurs domaines :

- pédologie expérimentale (présentation de quelques résultats),
- hydrologie,
- agronomie.

Cet infiltromètre peut être utilisé par tous ceux qui sont concernés par les problèmes de relation Eau - Sol - Plante.

ABSTRACT

The authors purposed to build an unsophisticated, cheap and handy device that can furnish scientific results on infiltration of water into soils. They disgarded the methods using flooding and prefered the rainfall simulation much more similar to the natural conditions.

The intensities of the artificial storms, on a runoff plot of 1 m², can be ruled at any moment from 30 mm/h to 140 mm/h without changing nozzle or pression. An improved appliunce, concerning the swinging of the nozzle, could reduce the lowest intensity to 15 mm/h. The infiltrometer needs 410 l of water/hour, and a Land Rover or Peugeot 404 can convey the whole implement.

The authors undertook several tests on the raindrop size distribution at six intensities : 37, 45, 60, 90, 120 and 140 mm/h. Studying the swinging of the nozzle, zero and terminal velocities (air resistance), they computed the kinetic energies of water drops : these are very close to the energies of natural rainfall.

This infiltrometer is used in several branches yet :

- soil science (infiltration, soil crusting...),
- hydrology (runoff, water conservation...).

This device can help many investigators working at water - soil - plant relationships.

*
* *

SOMMAIRE

Résumé

Abstract

Introduction

1. *Objectifs de l'infiltromètre — Critiques des principales méthodes existantes*

- 1.1. Objectifs
- 1.2. Méthodes existantes
 - 1.2.1. Sous lame d'eau
 - 1.2.2. Sous pluie simulée

2. *Présentation et construction de l'infiltromètre*

- 2.1. Principe de l'appareil
- 2.2. Construction

3. *Caractéristiques d'utilisation*

- 3.1. Choix de la pression
 - 3.1.1. Consommation en eau
 - 3.1.2. Surface de garde
 - 3.1.3. Régularité de l'intensité
- 3.2. Réglage des intensités
- 3.3. Mise en place de la parcelle d'essais
- 3.4. Alimentation en eau
- 3.5. Discussion, critiques et améliorations à apporter
 - 3.5.1. Solidité et fiabilité de l'appareil
 - 3.5.2. Facilité d'emploi
 - 3.5.3. Performances

4. *Energie cinétique des pluies simulées*

- 4.1. Présentation de l'étude
- 4.2. Taille des gouttes
 - 4.2.1. Méthodes existantes
 - 4.2.2. Prise et traitement des échantillons
 - 4.2.3. Calibrage des gouttes
 - 4.2.4. Résultats
 - 4.2.5. Comparaison avec les pluies naturelles
- 4.3. Vitesse d'impact au sol
 - 4.3.1. Présentation du problème
 - 4.3.2. Vitesse tangentielle
 - 4.3.3. Vitesse radiale
 - 4.3.4. Vitesses limites
 - 4.3.5. Vitesse d'impact au sol
 - 4.3.6. Comparaison avec les pluies naturelles
- 4.4. Energie cinétique
 - 4.4.1. Calculs et résultats
 - 4.4.2. Comparaison avec les pluies naturelles

5. Utilisation de l'infiltromètre

- 5.1. Pédologie expérimentale
 - 5.1.1. Présentation de l'étude
 - 5.1.2. Résultats et premières hypothèses
 - 5.1.3. Mesures annexes
- 5.2. Hydrologie
- 5.3. Autres domaines intéressés

Conclusion

Bibliographie

Annexe : Matériel employé et coût en 1977 à Abidjan

INTRODUCTION

Les problèmes concernant l'économie de l'eau deviennent de jour en jour plus cruciaux. Aussi demande-t-on de plus en plus aux pédologues, comme aux hydrologues, des données sûres pouvant être utilisées lors de la mise en valeur d'une région. En effet, il est nécessaire de déterminer avec précision la part de l'eau de pluie perdue par ruissellement, et susceptible de provoquer de l'érosion, et celle qui s'infiltré effectivement et peut être stockée par les sols.

Or, pour mener de telles études, les méthodes employées jusqu'ici (Müntz, Pioger...) sont très éloignées des conditions naturelles ; elles donnent, pour cette raison, des résultats limités et peu exploitables. Les simulateurs de pluies utilisés pour l'étude de l'érosion fournissent des données très intéressantes, mais nécessitent une importante mise en œuvre. Seuls les infiltromètres du type Bertrand et Parr [2] (1) semblent présenter à la fois les qualités qu'imposent la rigueur scientifique et les contraintes économiques.

Lors de la mise au point d'un tel appareil, il a paru intéressant d'y apporter un certain nombre d'améliorations :

- Extension de la gamme d'intensités ;
- Mise au point d'un mécanisme permettant les variations d'intensité au cours des pluies simulées ;
- Choix d'un gicleur et d'une pression produisant une énergie de gouttes de pluies plus proches de celles des pluies naturelles de même intensité.

Si d'autres perfectionnements sont encore souhaitables, cet infiltromètre à aspersion rend dès maintenant des services importants dans les programmes concernant l'étude des caractéristiques hydriques des sols en vue de leur mise en valeur, ainsi que l'étude fondamentale du ruissellement. Il est probable que cet instrument peut être utilisé dans d'autres domaines : dynamique actuelle des sols, évolution de l'état structural des surfaces cultivées, etc.

1. OBJECTIFS DE L'INFILTROMÈTRE CRITIQUES DES PRINCIPALES MÉTHODES EXISTANTES

1.1. OBJECTIFS

L'appareil doit répondre, à plusieurs objectifs visant essentiellement à améliorer les techniques déjà existantes :

- Etudier les caractéristiques du ruissellement et de l'infiltration dans les conditions les plus proches possibles des conditions naturelles ;

(1) Numéro de renvoi bibliographique.

- Recueillir suffisamment de *données fiables* susceptibles d'être utilisées dans de nombreux domaines :
 - pédologie expérimentale (test d'érodibilité et d'instabilité structurale...),
 - hydrologie (étude du ruissellement : durée de la pluie d'imbibition et intensité limite à partir de laquelle se déclenche le ruissellement...),
 - agronomie (évolution de la surface du sol aux différentes intensités de pluies, comparaison de techniques culturales, intensité optimale d'irrigation par aspersion...).
- Nécessiter *peu de frais de construction et de fonctionnement* (matériel facilement transportable et de manie-ment aisé).

1.2. MÉTHODES EXISTANTES

Il existe actuellement de nombreuses méthodes permettant de mesurer les intensités d'infiltration. On peut distinguer deux principes différents : l'intensité d'infiltration est mesurée soit sous lame d'eau, soit sous pluie simulée.

1.2.1. Sous lame d'eau

Ces méthodes ne respectent pas les conditions naturelles. En effet, elles ne mesurent pas l'infiltration du mélange biphasique air + eau, mais de l'eau seule. Or, en début de pluie, alors que le ruissellement n'est pas encore déclenché, on assiste, sous pluies naturelles, à des phénomènes de dégazages et d'emprisonnement d'air, phénomènes modifiés par l'apport brutal d'une charge d'eau.

Le choc des gouttes modifie l'état structural de la surface du sol, favorisant, suivant les types de sols, l'apparition plus ou moins rapide d'une pellicule dont la perméabilité est très inférieure à celle du sol avant la pluie. La formation de cette pellicule ou de cette croûte est donc un facteur fondamental dans l'étude du régime d'infiltration. Or, sous charge d'eau les conditions sont évidemment très différentes : les modifications structurales sont dues à la dilution et non au choc des gouttes de pluies. Pour se placer dans des conditions voisines de celles des pluies naturelles, il faut par conséquent non seulement choisir l'aspersion plutôt que la submersion, mais encore former des gouttes dont l'énergie cinétique est voisine de celle des pluies naturelles d'intensité correspondante.

En outre, il est presque certain que la charge d'eau intervient sur l'intensité d'infiltration. Notons que la méthode PIOGER (AUDRY *et al.*, 1973) préconise une charge de 100 mm d'eau (soit une pression de 10 g/cm²), ce qui s'avère être environ cent fois la détention superficielle observée communément sous une pluie naturelle ! Il n'est donc pas étonnant d'obtenir à partir de telles méthodes, des intensités d'infiltration d'un ordre différent de celles que l'on observe dans la nature.

Les surfaces testées, de plus, sont très faibles (MÜNTZ et PIOGER : 100 cm²), ce qui nécessite un très grand nombre de répétitions et en rend l'interprétation mal aisée. Certaines restrictions d'utilisation sont très gênantes : la méthode Pioger ne peut pas être employée par exemple sur des sols humides (on ne peut alors opérer qu'en saison sèche) ou sur des sols très filtrants.

Si les critiques précédentes sont le plus souvent admises par les utilisateurs de ces méthodes, ceux-ci affirment qu'elles ont valeur de tests comparatifs et peuvent donner un ordre de grandeur acceptable (AUDRY *et al.*, 1973). Il est probable que ces deux hypothèses sont vérifiées dans le cas, rare, des sols submergés (has-fonds, rizières...), à condition que la lame d'eau expérimentale soit du même ordre que la hauteur d'eau naturelle ou artificielle (irrigation par submersion) et que le sol soit saturé (PIOGER exclus). Par contre, il semblerait que ces méthodes ne soient d'aucun secours pour l'évaluation des intensités d'infiltration sous pluies naturelles.

En effet, A. LAFFORGUE (communication orale, juin 1977) a procédé à une série de mesures cherchant à comparer les intensités d'infiltration minimale (F_N) obtenues sur les sols très perméables d'Adiopodoumé (Côte d'Ivoire) à l'aide du simulateur de pluies type Swanson d'une part utilisé précédemment (A. LAFFORGUE et B. NAAH [13]) et l'appareil de Müntz d'autre part (tableau 1).

Ainsi les données obtenues à partir de l'appareil de Müntz ne seraient ni du même ordre que celles trouvées sous pluies simulées, ni même comparatives...

Les différences semblent encore plus importantes sous PIOGER : nous avons trouvé sur un sol de forêt (Yapo, Côte d'Ivoire) une intensité d'infiltration de 1 500 mm/h mesurée sous PIOGER (médiane de 5 répétitions) tandis que N. GUIGUEN obtient, sur ce même sol, une valeur de 60 mm/h pour intensité d'infiltration minimale, mesurée sous infiltromètre.

TABLEAU 1
COMPARAISON DES INTENSITÉS MINIMALES D'INFILTRATION (F_N)
MESURÉES AU MUNTZ ET AU SIMULATEUR SWANSON

Nombre de mesures Müntz	<i>Sous végétation naturelle</i>	<i>Sol labouré</i>
	25	50
F_N sous charge constante (Müntz)		
moyenne	250 mm/h	500 mm/h
médiane	210 mm/h	430 mm/h
F_N sous averse simulée de 150 mm/h (sur sol très humide)	90 mm/h	20 mm/h

1.2.2. Sous pluie simulée

Un certain nombre d'appareils permettant des simulations de pluies ont déjà été mis au point dans différents pays. Nous ne nous étendrons pas sur tous les avantages qu'ils présentent par rapport aux précédents (Müntz, Pioger). La plupart d'entre eux permettent non seulement l'étude de l'infiltration (par mesure du ruissellement et par différence avec l'intensité de la pluie simulée), mais celle aussi des pertes en terre (par prises d'échantillons de la turbidité des eaux de ruissellement) pour diverses intensités de pluies que l'on peut choisir et maintenir constantes. Ceci représente un grand avantage sur les parcelles d'érosion classiques soumises aux pluies naturelles. Plusieurs pédologues et hydrologues ont déjà utilisé le simulateur type Swanson mis au point sur le Centre d'Adiopodoumé (COLLINET, ASSELINE et LAFFORGUE, 1975).

Cependant de tels appareils sont coûteux et d'un transport difficile.

L'infiltromètre de Bertrand et Parr (1960), comme celui de Dixon et Peterson (1964) couramment utilisé aux Etats-Unis, présente l'avantage d'être économique, facile à construire et à transporter. C'est lui qui correspond le plus aux objectifs. Cependant il nous a semblé utile d'y apporter quelques perfectionnements, exposés lors de la description de l'appareil.

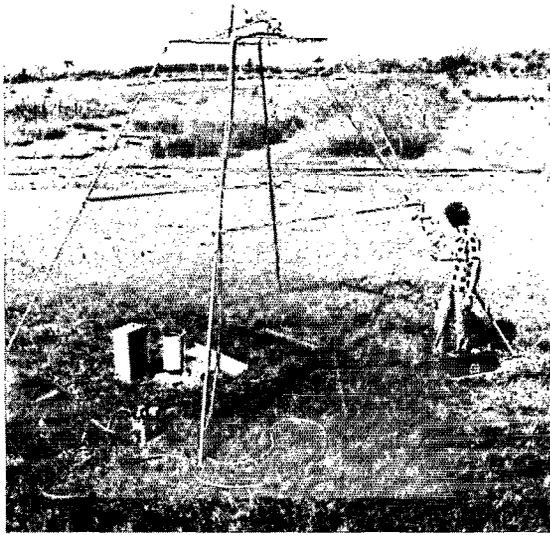
2. PRÉSENTATION ET CONSTRUCTION DE L'INFILTROMÈTRE (cf. planche de photographies et figure 1)

2.1. PRINCIPE DE L'APPAREIL

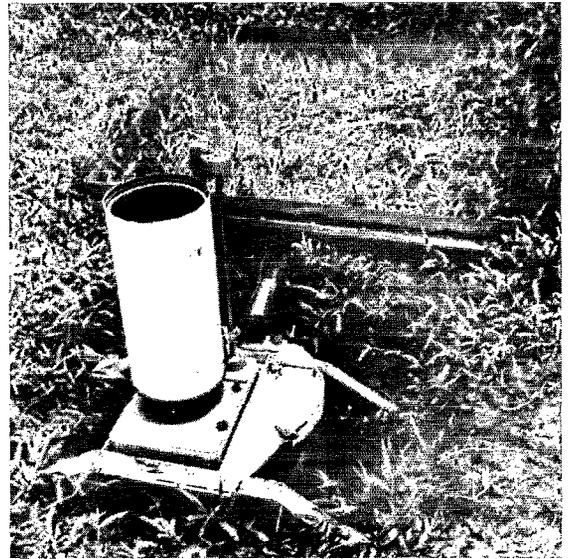
Cet appareil se distingue essentiellement des modèles existants par le fait que l'intensité de l'averse mesurée sur 1 m² est réglable à tout moment, sans interruption, d'une manière progressive et continue, dans une gamme allant de 30 à 140 mm/h (le modèle de Bertrand et Parr ne fonctionne qu'à 64-83 et 117 mm/h).

Pour cela, en faisant varier l'angle de balancement du gicleur, on augmente ou diminue la surface arrosée alors que la quantité d'eau utilisée reste constante. La parcelle de 1 m² reçoit plus ou moins d'eau alors que la surface de garde varie entre 2,5 et 13 m² (limitée à 6,5 m² lors de l'emploi d'une bâche).

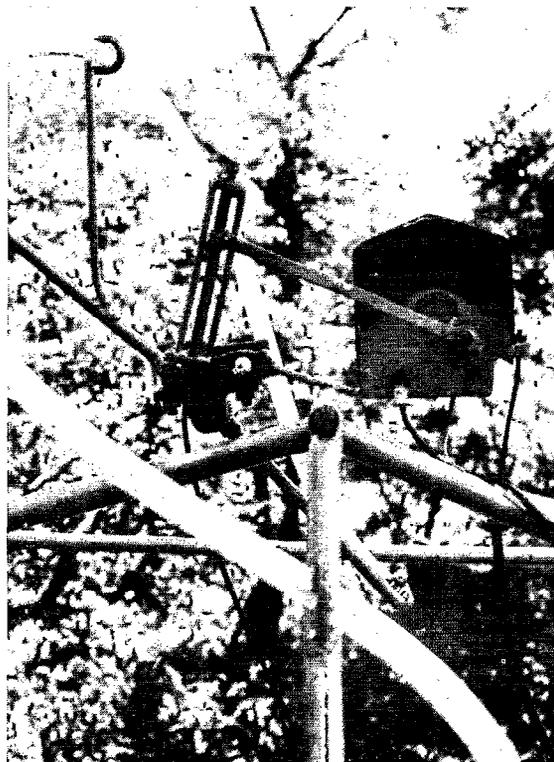
Lorsque l'on immobilise le gicleur situé à 3,50 m du sol, l'eau se répartit sur une ligne d'environ 25 cm d'épaisseur et sur une largeur qui est fonction de la pression (fig. 5). Cette largeur et l'amplitude de balancement du gicleur déterminent la surface arrosée.



Vue générale



Parcelle et dispositif d'enregistrement



Gigleur et mécanisme de balancement

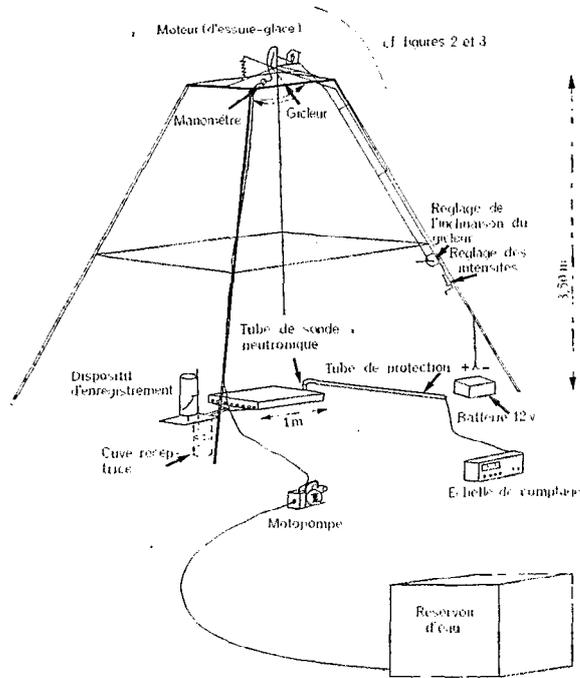


Fig. 1. — Schéma de l'infiltromètre à aspersion

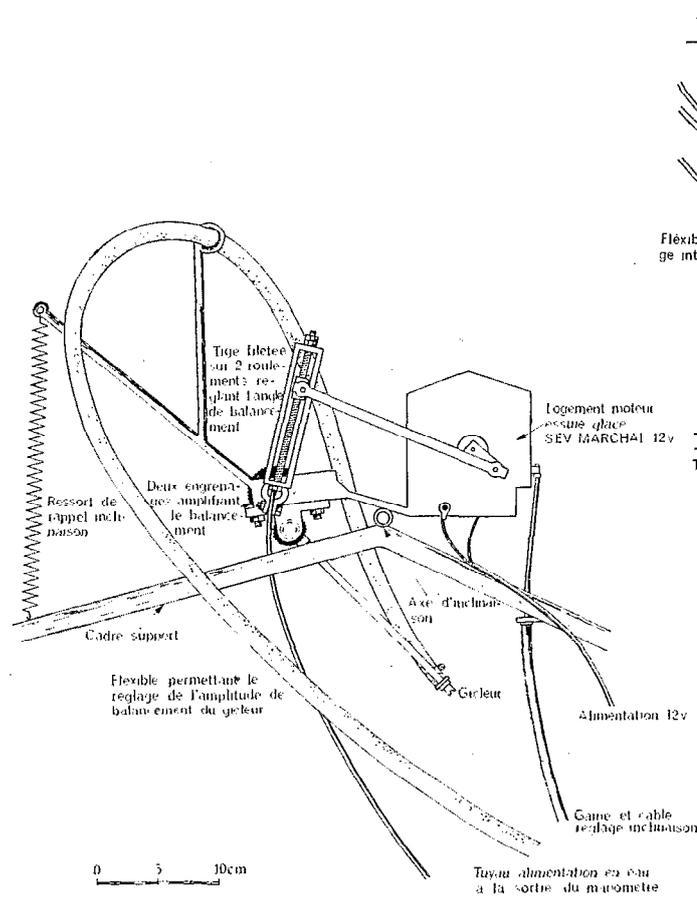


Fig. 2

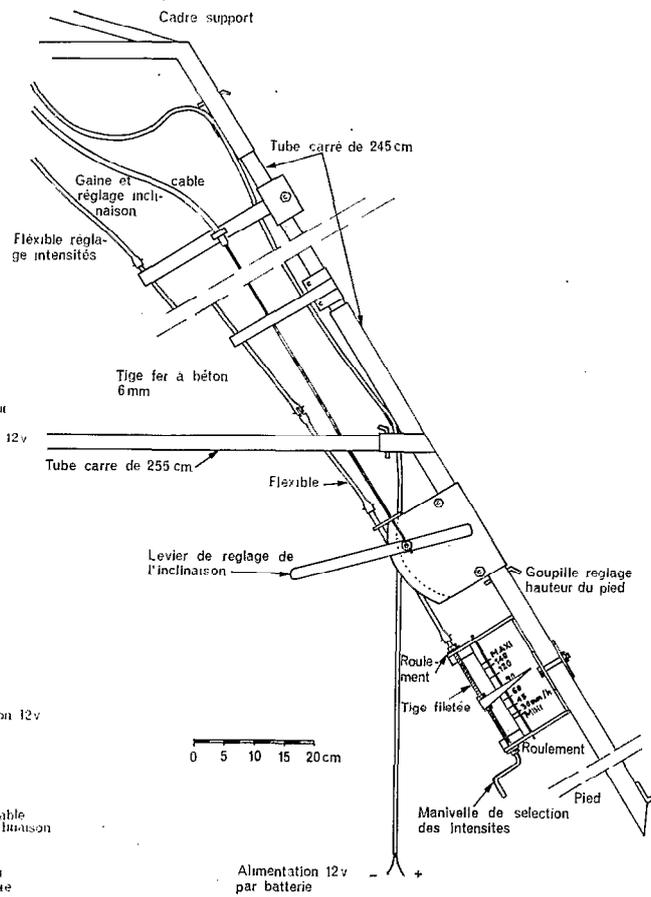


Fig. 3

TABLEAU 2
 ANGLES DE BALANCEMENT ET SURFACE DE GARDE EN FONCTION DES INTENSITÉS

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

2.2. CONSTRUCTION

Les détails de construction de l'appareil sont indiqués sur les figures 2 et 3. De plus amples renseignements peuvent être fournis directement par les auteurs.

L'arrosage de la parcelle est assuré par un gicleur monté sur certains appareils de traitements phytosanitaires (Teejet 6560, vendu par Emani, 75, Boulevard Raspail, 75260 Paris). Ce gicleur est animé d'un mouvement de balancier par une bielle entraînée par un moteur électrique (12 V SEV Marchal). L'ensemble est supporté par une tour démontable, en forme de pyramide tronquée, susceptible de recevoir une bâche pour la protection contre le vent. Un dispositif permet de maintenir l'axe d'oscillation du gicleur au-dessus du centre de la parcelle d'expérimentation.

La figure 4 présente la parcelle proprement dite et le limnigraphe :

- 1) Bac pluviométrique. Il permet, à l'aide de trois tuyaux qui le relie au limnigraphe, de contrôler les intensités avant ou après les mesures en le plaçant au-dessus du cadre n° 2 (1 m² avec bordure de 5 cm de hauteur).
- 2) Cadre permettant l'enfoncement par battage de la bordure en tôle n° 4.
- 3) Tôle de protection venant couvrir le canal de ruissellement et une partie de la goutte.
- 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 20/10^e, il forme un carré de 100 × 100 cm intérieur et 18 cm de hauteur. Sur les côtés, une cornière de 40 × 40 mm rend l'ensemble rigide et limite l'enfoncement dans le sol à 80 mm, la base de la ligne de trous (∅ 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.
- 5) Les eaux sont évacuées par une goutte (5 × 5 × 25 cm) et se déversent dans la cuve du limnigraphe. Une tôle de 20 × 25 cm incurvée ou une feuille de plastique suffisent à l'isoler de la pluie.
- 6) Limnigraphe de laboratoire A. OTT, modèle VIII, fixé sur un socle muni de 4 pieds.

Equippé de roues E avec 48 dents au tambour et 64 à la commande, on obtient une rotation du tambour en 96 mn avec une avance de 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 10/10^e, 22 × 30 × 55 cm, muni d'une vitre en plexiglas de 22 × 41 cm.

- 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 de 1 m². Tôle galvanisée de 10/10^e, diamètre intérieur 356,8 mm, hauteur 45 cm dont 35 utiles. La différence est occupée par le flotteur. A la base de la cuve est soudé un tube muni d'une vanne 20 × 27 permettant des vidanges rapides.

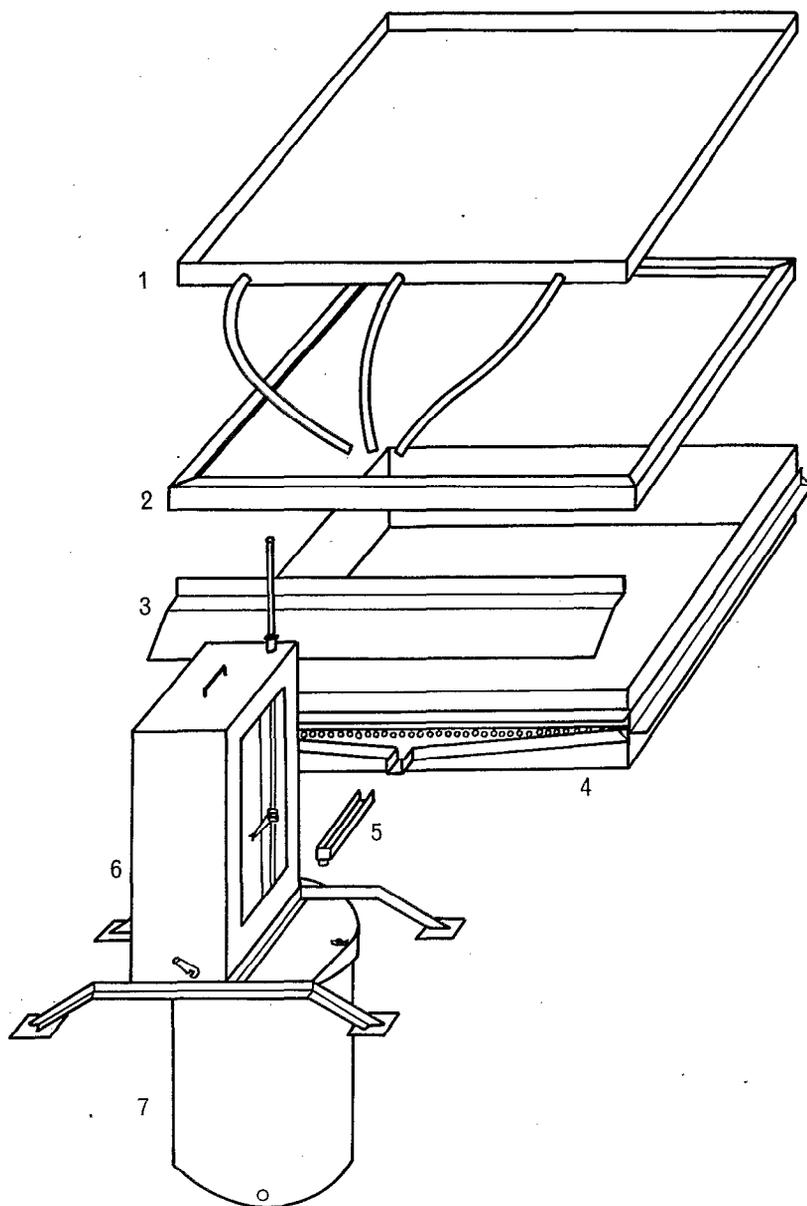


Fig. 4. — Infiltromètre : dispositif de recueillement et d'enregistrement des eaux de ruissellement

3. CARACTÉRISTIQUES D'UTILISATION

3.1. CHOIX DE LA PRESSION

3.1.1. Consommation en eau

Afin de conserver à cet appareil un caractère de légèreté, de facilité de transport et d'emploi, il est nécessaire de consommer le moins d'eau possible, mais un certain volume s'impose : une parcelle et sa garde, réduites au minimum à 3 m², recevant 140 mm pendant une heure, nécessite 420 l d'eau.

TABLEAU 3
INFLUENCE DE LA PRESSION SUR LA CONSOMMATION EN EAU

Pression (g/cm ²)	250	300	350	400	450
Consommation d'eau (l/h)	380	410	470	510	545

Au vu de ce tableau, nous nous placerons entre 300 et 350 g (surface de garde suffisante).

3.1.2. Surface de garde

Pour un ensemble surface de garde + parcelle d'au moins 3 m², la pression ne doit pas être inférieure à 300 g/cm² (fig. 5).

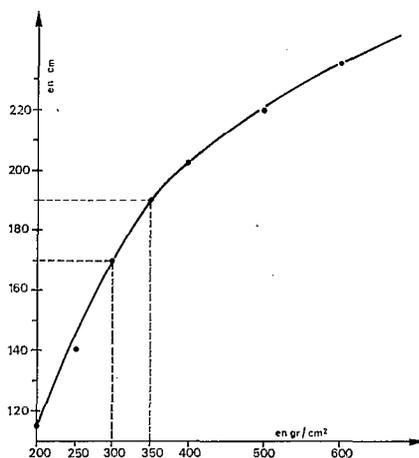


Fig. 5. — Largeur arrosée par le gicleur placé à 3,60 m du sol en fonction de la pression

3.1.3. Régularité de l'intensité

Le gicleur a été testé à l'arrêt à 3,50 m du sol à différentes pressions ; il ressort de ces essais que de 250 à 600 g/cm² l'intensité recueillie sur une largeur d'un mètre, centrée sous le jet, est strictement la même alors qu'elle a tendance à varier en dessous de 250 g/cm².

3.2. RÉGLAGE DES INTENSITÉS

L'appareil a été étalonné ; une aiguille permet de repérer le nombre de tours imprimés à la tige filetée par l'intermédiaire d'une petite manivelle.

Lors du montage, on place l'axe relié à la bielle (fig. 2) en butée inférieure ainsi que l'aiguille (fig. 3).

Dans cette position, on obtient le balancement maximum du bras portant le gicleur. L'intensité au sol est donc alors minimum, soit environ 30 mm/h.

Il faut noter que l'appareil, dans sa conception actuelle, ne fonctionne pas d'une façon satisfaisante à cette

intensité. En effet, le cadre supérieur est atteint par le jet d'eau (fig. 2 et 3), ce qui provoque des retombées d'eau dans la parcelle et augmente ainsi l'intensité.

La bâche recouvrant l'ensemble de l'appareil a dû être reculée à plus d'un mètre de part et d'autre du gicleur pour les mêmes raisons. Aux autres intensités, ce problème n'apparaît pas.

3.3. MISE EN PLACE DE LA PARCELLE D'ESSAIS

La mise en place du cadre de 1 m² ne pose pas de problème particulier ; il est cependant nécessaire de déterminer au préalable, et de façon précise, la pente du sol afin de placer le côté troué du cadre rigoureusement en aval (l'emploi du niveau à bulle est suffisant). Le cadre renforcé (n° 2, fig. 4) permet l'enfoncement de la tôle en 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 de la parcelle ainsi que la surface de garde, lors de la mise en place du dispositif. Le cadre étant installé, la pente de la parcelle peut être déterminée avec précision, à l'aide d'un mètre, d'un niveau et d'un double décimètre.

Lors de l'étude de la toposéquence du Manso (CASENAVE et GUIGUEN, 1978) des infiltrations importantes ont été enregistrées sur les parcelles récemment implantées, l'enfoncement de la bordure en tôle perturbant en effet le sol et créant des zones d'infiltration privilégiée. Cet effet disparaît après une première pluie. Etant donné le faible prix de revient 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 reposent 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 ne permet pas d'enregistrer une lame ruisselée supérieure à 35 mm ; aussi est-il nécessaire de vidanger la cuve au cours des pluies simulées dans le cas des forts ruissellements. L'emploi d'une seconde motopompe assure des vidanges rapides (30 s).

3.4. L'ALIMENTATION EN EAU

Une petite motopompe TAS Motor QCP 12 animée par un moteur 2 temps consommant environ 0,5 l à l'heure de mélange est utilisée pour fournir l'eau sous pression. Le moteur est employé à faible rendement, sa capacité pouvant aller jusqu'à 7 000 l à l'heure.

La même motopompe est utilisée pour remplir au point d'eau le plus proche un réservoir de 600 l aménagé afin d'être facilement transportable dans un véhicule léger (Land Rover, 404 bâchée). Quelques fûts de 200 l peuvent être employés si l'on désire une plus grande réserve d'eau.

3.5. DISCUSSION, CRITIQUES, AMÉLIORATIONS A PORTER

Après plusieurs missions effectuées sur le terrain avec l'infiltromètre précédemment décrit, il apparaît que le principe de fonctionnement de l'appareil est excellent ; il mérite cependant qu'on lui apporte un certain nombre d'améliorations.

3.5.1. Solidité et fiabilité de l'appareil

Ces deux caractères sont liés car toute torsion ou usure entraîne du jeu dans les organes mobiles et influe sur le réglage des intensités.

C'est pourquoi il est souhaitable de monter les axes des engrenages (fig. 2) sur roulements à billes. Le moteur pourrait être un peu plus puissant, il a tendance à chauffer à faible intensité (balancement maximum) (moteur d'essuie-glace de camion).

3.5.2. Facilité d'emploi

Un second manomètre serait utile près des organes de commandes pour faciliter la surveillance de la pression.

Afin de déplacer l'appareil plus aisément sur le terrain, les pieds devraient être inversés, la partie inférieure (fig. 3) coulissant à l'intérieur de l'autre et les manchons maintenant les traverses étant soudés à la base du tube supérieur. Cela permettrait d'abaisser l'appareil de plus de 2 m lors des déplacements sous forêt sans avoir à démonter les traverses, d'où un gain de temps et le réglage possible de chaque pied.

3.5.3. Performances

En abaissant l'axe d'inclinaison par rapport au cadre et en montant deux engrenages ayant un rapport en nombre de dents voisin de 1 sur 2 au lieu de 1 sur 1,48, le seuil de faible intensité pourrait être largement abaissé en dessous de 30 mm/h.

Bien que pré-réglée, il est opportun de vérifier de temps à autre l'intensité à l'aide d'un bac de 1 m². La construction d'une gouttière étroite sur le périmètre de la parcelle reliée à un pluviographe est à l'étude. L'enregistrement précis de l'intensité serait d'une grande utilité ; il permettrait des dépouillements plus précis, notamment lors des pluies d'intensités variables.

4. ÉNERGIE CINÉTIQUE DES PLUIES SIMULÉES

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, BOLL, BABOULE, 1976) utilisent des dispositifs formant des gouttes de même diamètre ; les simulateurs, munis de gicleurs sélectionnés, visent à obtenir une répartition des gouttes plus proches 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.

4.2. TAILLE DES GOUTTES

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, 1949 ; MEYER, 1958 ; HUDSON, 1963).

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.

4.2.2. Prise et traitement des échantillons

On soumet à l'aspersion un parallélépipède de farine ($30 \times 20 \times 2,5$ 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 plus 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.

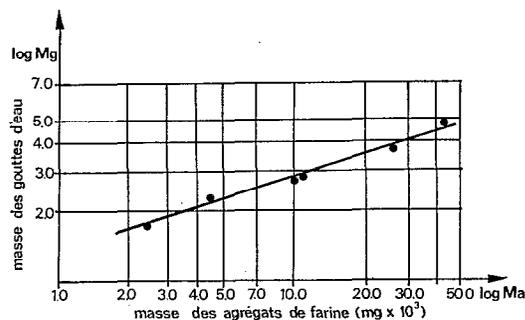


Fig. 6. — Calibrage des gouttes

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) conçues pour former des gouttes de volume constant (2,5, 5,0 et 10,0 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 (1958) 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 1 m. HUDSON (1964) 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 3,5 m et 1 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 [7]. En effet les études antérieures (BLANCHARD, 1951, MEYER, 1958) montrent une étroite corrélation entre les masses d'agrégats et celles des gouttes testées quelle que soit 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'agrégat, correspondant à la taille de goutte testée.

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

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

En portant sur une feuille loglog les masses d'agrégats en fonction des diamètres de gouttes, on obtient une courbe s'ajustant sur la droite :

$$Y = 34 x + 1,12$$

avec $r = 0,99$ (coefficient de régression)
et $n = 7$ (cf. fig. 6).

On en déduit immédiatement la relation :

$$D_e = 13,18 M_f^{0,34}$$

avec D_e = diamètre de la goutte (mm)
et M_f = masse de l'agrégat (mg).

Cette relation est proche de celle établie par BLANCHARD (1951) et celle de MEYER (1958) :

$$D_e = 14,56 M_f^{0,354}$$

Les différences obtenues entre ces auteurs proviennent vraisemblablement du type de farine utilisée. (Pour ces essais nous avons employé la farine de force « PS-15 type U.S. » des Grands Moulins d'Abidjan).

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

$$D_f = \frac{(6 M_f)^{1/3}}{\pi b}$$

avec D_f (mm) = diamètre de l'agrégat
 M_f (mg) = masse de l'agrégat
et b = densité de la farine.

$$b = 0,93$$

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

$$D_e \text{ (mm)} = 0,985 D_f^{1,02} \text{ (mm)}$$

Pour chaque classe de diamètre d'agrégats correspondant aux différents tamis, on peut ainsi évaluer le diamètre moyen de gouttes. Il est supposé, comme le fait remarquer HUDSON (1973), 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.

TABLEAU 4
RAYONS DES GOUTTES ET DIAMÈTRE DES AGRÉGATS

Classes de tamis μ	0	200	315	400	500	630	800	1 000	2 000	3 150	4 000	5 000
	200	315	400	500	630	800	1 000	2 000	3 150	4 000	5 000	et +
Diamètres moyens d'agrégats μ	100	258	358	450	565	715	900	1 500	2 575	3 575	4 500	5 500
Rayons moyens des gouttes μ	49	124	173	218	275	350	442	745	1 293	1 807	2 285	2 805

4.2.4. Résultats

Les courbes granulométriques cumulatives (fig. 8 et 9) ont 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 pourcentages 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 :

$$D_e \text{ (mm)} = 0,985 D_f^{1,02} \text{ (mm)}$$

permet ainsi de connaître les diamètres de 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 :

TABLEAU 5
INTENSITÉS DE PLUIES ET DIAMÈTRE DES GOUTTES

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

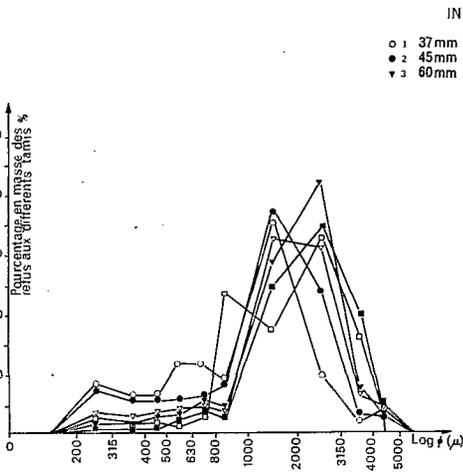


Fig. 7. — Distribution des différentes fractions granulométriques

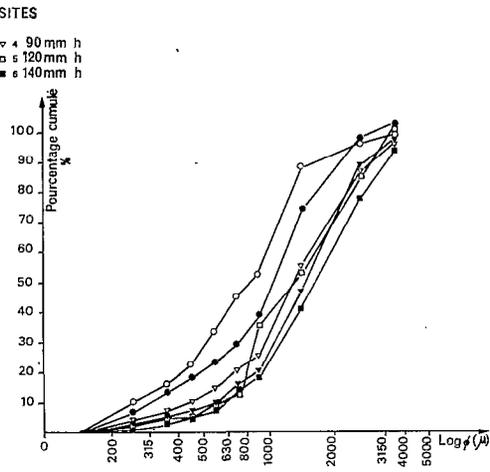


Fig. 8. — Couches granulométriques cumulatives

Diamètre des gouttes obtenues au sol par l'infiltromètre pour diverses intensités

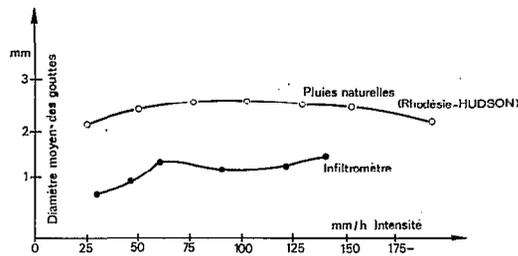


Fig. 9. — Relation entre le diamètre moyen des gouttes et l'intensité

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 2 000 à 3 150 μ d'après la figure 7). 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 faible balancement 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 artefact ? : la densité des gouttes au sol augmente la probabilité pour que plusieurs gouttes tombent en un même point. On compterait alors pour un seul agrégat, de masse importante, l'agglomération de plusieurs.

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 (1973) en Rhodésie.

La comparaison des deux courbes (fig. 9) 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% de celui trouvé par HUDSON (1973) 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 tandis qu'une pression plus élevée provoquerait une diminution de la taille des gouttes par pulvérisation et augmenterait la consommation en eau.

4.3. VITESSE D'IMPACT AU SOL

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 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).

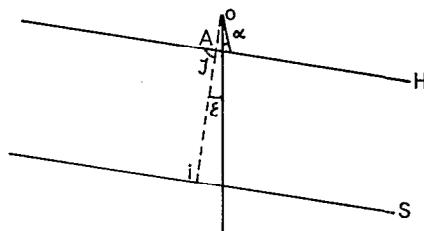


Schéma I

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

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

Or :

$$\alpha + \varepsilon \neq 23^\circ$$

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

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 assimilons 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 :

$$1/2 (mv_s^2 - mv_i^2) = mgh$$

d'où :

$$v_s = \sqrt{v_i^2 + 2gh}$$

avec : h = distance entre les deux plans H et S (hauteur en m)

v_s = vitesse d'impact sur la parcelle (m/s)

v_o = composante radiale de la vitesse initiale v_i (m/s)

v_t = composante tangentielle de v_i (m/s).

On a ainsi :

$$V_s = \sqrt{v_o^2 + v_i^2 + 2gh} \quad (1)$$

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

$$v_o \text{ et } v_i$$

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.

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

On a :

$$v_t = \omega \cdot R$$

$$(\text{m/s}) \quad (\text{rad./s} \cdot \text{m})$$

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

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

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

TABLEAU 6
INTENSITÉS ET VITESSES TANGENTIELLES

Intensités (m/s)	γ		v_t (m/s)
	(grades)	(radians)	
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

4.3.3. Vitesse radiale v_o

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

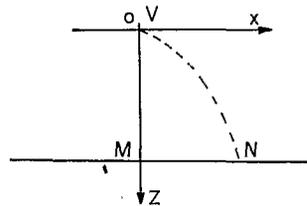


Schéma 2

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

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

d'où, au temps t :

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

et

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

quand $t = 0$ x et z sont nuls, d'où :

$$x = v_o^t$$

et :

$$z = 1/2 gt^2,$$

on en déduit :

$$v_0 = x \cdot g/2z.$$

En mesurant \overline{MN} (cf. schéma 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 (1958) 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 : $v_0 = \sqrt{2gh}$.

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 mn. De chaque pluviomètre, on déduit l'intensité reçue à la distance \overline{MN} correspondante. Les figures 10 et 11 donnent la distribution de ces intensités en fonction de la distance \overline{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 deçà et 50% au-delà.

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

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

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

en prenant :

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

4.3.4. Vitesses limites

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

$$\varnothing (v) = k \cdot s \cdot v^2$$

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 :

$$k \cdot s \cdot v_1^2 = mg$$

d'où :

$$v_1^2 = mg/k \cdot s$$

avec :

$$k = \frac{C_p}{2}$$

$C = 0,45$ pour les sphères ; on assimilera les gouttes à des sphères de rayon R .

ρ = masse spécifique de l'air . $\rho = 0,0012$.

ainsi :

$$v_1 = \left(\frac{2 mg}{s \cdot c \cdot \rho} \right)^{0,5}$$

Pour une sphère de densité = 1 :

$$m = 4/3 \pi R^3$$

et :

$$s = \pi R^2$$

d'où finalement :

$$v_1 = \left(\frac{2 \cdot R \cdot 4 \cdot g}{3 \cdot C \cdot \rho} \right)^{0,5}$$

$$v_1 = 220.1 (R)^{0,5}$$

Ainsi peut-on calculer la vitesse limite correspondant à chaque classe granulométrique de diamètre de goutte :

TABLEAU 7
VITESSES LIMITES DANS L'AIR

Classe de tamis (μ)	0 200	200 315	315 400	400 500	500 630	630 800	800 1 000	1 000 2 000	2 000 3 150	3 150 4 000	4 000 5 000
Rayon moyen des gouttes (μ)	49	124	173	218	275	350	442	745	1 293	1 807	2 285
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

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 431.

TABLEAU 8
INTENSITÉS ET VITESSES D'IMPACT AU SOL

Intensités (mm/h)	Vitesses radiales (m/s)	Vitesses tangentielles (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 seule 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 (tableau 9).

TABEAU 9

VITESSES D'IMPACT AU SOL (m/s) EN FONCTION DES INTENSITÉS ET DES TAILLES DE GOUTTES

Rayon des gouttes (μ)	Intensités (mm/h)						V_s sous pluies 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
1 293	7,91	7,91	7,91	7,91	7,91	7,91	7,47
1 807	9,10	9,09	9,08	9,07	9,07	9,07	8,59
2 285	9,10	9,09	9,08	9,07	9,07	9,07	9,14
2 805	9,10	9,09	9,08	9,07	9,07	9,07	9,22

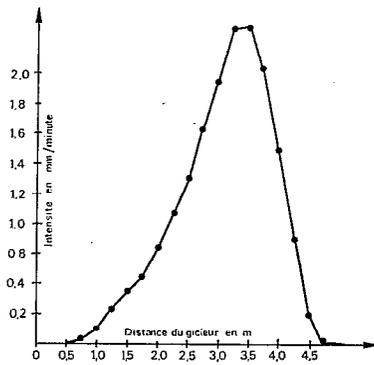


Fig. 10. — Répartition des intensités en fonction de la distance du gicleur

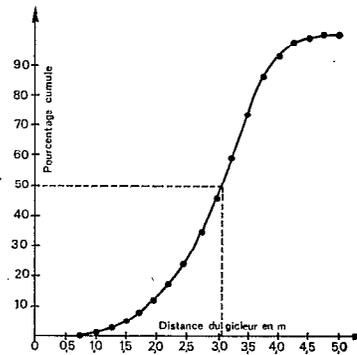


Fig. 11. — Détermination de la distance médiane

Détermination de la vitesse radiale médiane

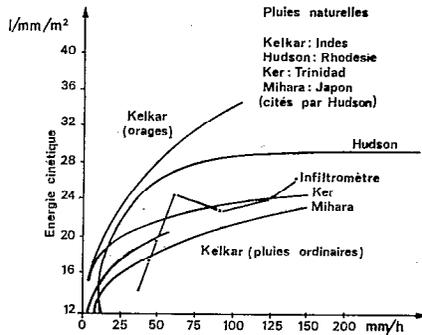


Fig. 12. — Relation entre l'énergie cinétique et l'intensité des pluies naturelles et simulées

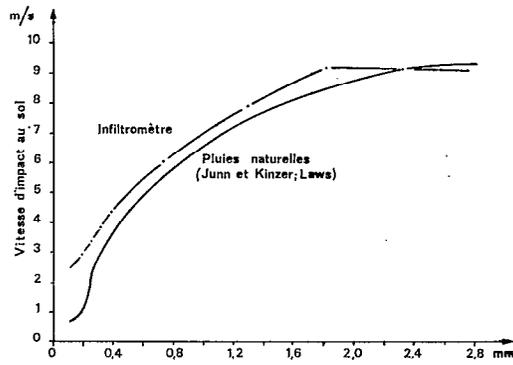


Fig. 13. — Relation entre les vitesses d'impact au sol et le rayon des gouttes

4.3.6. Comparaison avec les pluies naturelles

Nous avons porté dans la dernière colonne du tableau 9 les vitesses d'impact relevées sous pluies naturelles (GUNN et KINZER, (1949) ; LAMS (1949) ; cités par WISCHMEIER et SMITH (1958)). 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 du 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 infiltromètres sont du même ordre (écart de 1 à 5%) (fig. 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).

4.4. ENERGIE CINÉTIQUE

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 mètre carré, nous avons cumulé les énergies de chaque classe granulométrique.

Il apparaît (tableau 10) 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 avions supposé que toutes les gouttes atteignaient le sol avec la même vitesse, nous aurions eu, pour une intensité de 140 mm/h :

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

$$E_c = 5\,758 \text{ J/m}^2/\text{h} \text{ au lieu de } 3\,671 \text{ J/m}^2/\text{h} \text{ soit une erreur d'environ } 60\% \text{ par excès!}$$

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

TABLEAU 10
CLASSES GRANULOMÉTRIQUES, INTENSITÉS DE PLUIES ET ÉNERGIES CINÉTIQUES

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
0,200-0,3150	8,51	7,07	2,13	3,58	2,58	1,70	0,255	0,212	0,063	0,107	0,077	0,051
0,3150-0,400	6,38	5,05	1,83	2,63	2,06	1,51	0,266	0,211	0,076	0,110	0,086	0,063
0,400-0,500	6,38	5,05	1,83	3,10	2,06	1,89	0,425	0,336	0,122	0,206	0,137	0,126
0,500-0,630	10,64	5,05	2,74	4,77	1,55	2,83	0,708	0,336	0,183	0,318	1,032	0,184
0,630-0,800	10,64	6,06	5,41	5,97	3,09	5,09	0,903	0,514	0,466	0,507	0,262	0,432
0,800-1,000	8,51	8,08	4,57	4,06	23,71	3,96	0,908	0,162	0,488	0,433	2,530	0,422
1,000-2,000	35,11	37,37	28,05	32,32	17,01	24,34	6,341	6,749	5,066	5,837	3,072	4,396
2,000-3,180	9,57	23,23	42,38	30,79	32,47	34,53	2,993	7,267	13,258	9,632	10,158	11,043
3,150-4,000	1,06	3,03	7,62	7,88	15,46	18,30	0,439	1,252	3,141	3,241	6,359	7,257
4,000-5,000	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	1 454,6	2 020,7	2 845,6	3 671,6

(en dessous les vitesses d'impact v_s sont égales aux vitesses limites). MEYER (1958) 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 comparés aux énergies cinétiques sous pluies naturelles.

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 durée de la pluie (pluies d'orages ou normales). KELKAR (1960) distingue ainsi les pluies communes des pluies courtes et violentes. D'après HUDSON (1963) 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).

HUDSON (1973) 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 (1954) à Trinidad, à partir de 60 mm/h (fig. 12).

Parmi les différences observées par les divers auteurs, il est hélas impossible de distinguer l'influence des climats sous lesquels les travaux ont été menés et celle des diverses méthodes employées.

Quoi qu'il en soit, il semble possible de 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 (1949) sous pluies naturelles. Les tailles de gouttes sont inférieures aux données de HUDSON (1973), 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 de gouttes en diffèrent peu.

Nous présentons ici la comparaison la plus défavorable entre les énergies cinétiques sous infiltromètre et sous pluies naturelles en Rhodésie (HUDSON, 1973) (tableau 11).

TABLEAU 11
ÉNERGIES CINÉTIQUES SOUS PLUIES NATURELLES (RHODÉSIE)
ET SOUS PLUIES SIMULÉES (INFILTROMÈTRE)

Intensités (mm/h)	E_{cs} sous infiltromètre (J/m ² /mm)	E_{cn} sous pluies naturelles (J/m ² /mm)	E_{cs}/E_{cn} (%)
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

Ces résultats sont comparables à ceux obtenus par MEYER (1965) pour son simulateur de pluies : $E_{cs}/E_{cn} = 77\%$ à 50 mm/h. Ils sont meilleurs que ceux de BERTRAND et PARR (1960) : $E_{cs}/E_{cn} < 50\%$.

L'infiltromètre 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 (1973) en Rhodésie.

5. UTILISATION DE L'INFILTROMÈTRE

Dès la mise au point de l'appareil, deux sections de l'ORSTOM furent intéressées par son utilisation. En 1977, il est employé pour deux programmes de recherches : l'un en pédologie, l'autre en hydrologie.

5.1. PÉDOLOGIE EXPÉRIMENTALE

5.1.1. Présentation de l'étude

En appui à la cartographie au 1/200 000 des sols du nord de la Côte d'Ivoire, R. ROSS et C. VALENTIN ont entrepris une étude du comportement de ces sols en ce qui concerne les caractéristiques hydrodynamiques. Lors d'une mission à Katiola, une toposéquence a été étudiée en détails (densité apparente, porosité, résistance à la pénétration, capacité au champ, perméabilité Pioger et Vergière...). Sur trois sols de cette toposéquence (haut de versant, mi-pente et bas de versant) 24 pluies simulées à l'aide de l'infiltromètre ont été réalisées selon le protocole suivant (2 sites par sol)

- Végétation naturelle :
 - une pluie de 120 mm/h pendant 90 mn ;
 - une pluie de 120 mn, d'intensité variant de 120 à 30 mm/h puis de 30 à 120 mm/h.
- Sol nu après labour superficiel : même régime de pluies.

5.1.2. Résultats et premières hypothèses

Nous donnons ici l'exemple d'un dépouillement d'une pluie en paliers (sol nu après labour, sol de mi-pente, 5,5% de pente (fig. 14).

Il apparaît lors du dépouillement que, pour cette pluie, l'intensité d'infiltration minimale (F_N) reste du même ordre quelle que soit l'intensité de la pluie. Nous assimilons cette intensité ($\neq 12$ mm/h) à l'intensité à partir de laquelle se déclenche le ruissellement.

La précision des résultats est de l'ordre de 5 mm/h. Les irrégularités des courbes proviennent de plusieurs phénomènes dont les principaux sont :

- La durée d'obtention des régimes permanents (après un changement d'intensité, il faut attendre au moins cinq minutes pour que le régime de ruissellement se stabilise et que l'intensité d'infiltration (F) devienne minimale (F_N)).
- Les erreurs dues aux irrégularités d'intensité : n'utilisant pas encore de bâche protectrice, l'intensité pouvait varier du fait du vent, heureusement peu violent.

Il est à noter que l'on obtient des résultats très voisins pour une même intensité, quelle que soit l'intensité précédente (supérieure ou inférieure).

Ce type de graphique permet de déterminer les intensités d'infiltration en fonction des intensités de pluies, de la pente, du type de sol et de son degré de couverture superficielle.

La figure 14 regroupe les différents résultats obtenus lors de ces essais.

Il apparaît que le nombre de sites par sol est insuffisant pour le caractériser avec une grande précision.

Une étude très détaillée de la surface du sol devrait permettre de relever d'éventuelles hétérogénéités en vue d'en tenir compte lors de la détermination du nombre de répétitions.

L'examen de résultats concernant les valeurs de R_x (valeur maximale du ruissellement en régime permanent) et de F_N (valeur minimale de l'intensité d'infiltration en régime permanent) met en évidence plusieurs facteurs :

— L'intensité de pluie simulée

L'intensité minimale d'infiltration ne semble pas indépendante de l'intensité de pluie (fig. 15). Si elle garde une valeur voisine dans certains cas (B2, C2), l'augmentation de F_N en fonction de I paraît plus générale notamment sous végétation naturelle.

— La nature du sol et son couvert

L'intensité limite de ruissellement I_f est par définition l'abscisse du point où la droite F_N intercepte la première

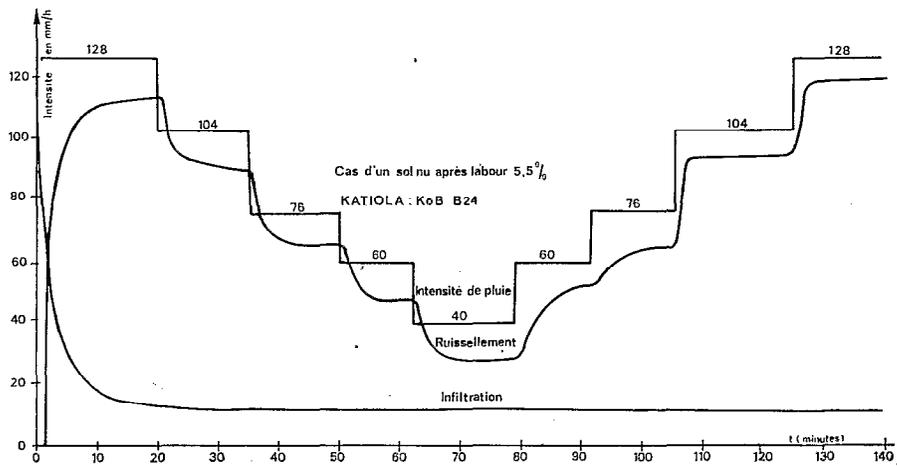


Fig. 14. — Intensités de ruissellement et d'infiltration sous une pluie simulée en paliers

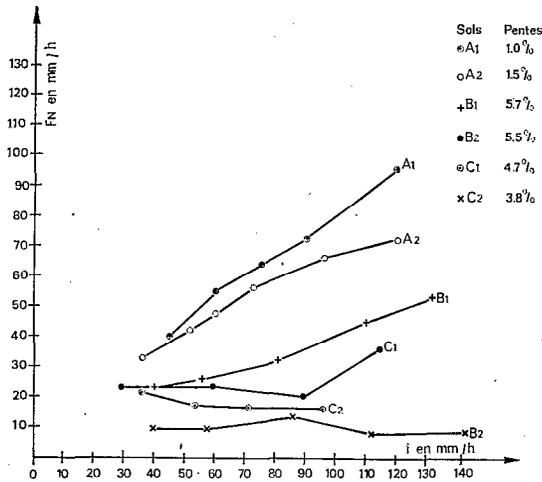


Fig. 15. — Végétation naturelle

Relation entre les vitesses d'infiltration et les intensités de pluies simulées

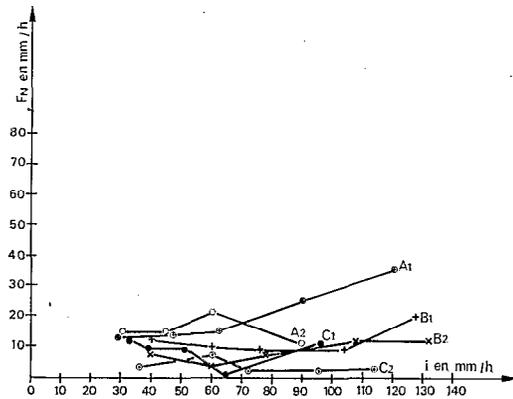


Fig. 16. — Sol nu après labour

bissectrice ($F_N = I$). Cette valeur peut être déterminée avec une certaine précision si les valeurs expérimentales s'ajustent effectivement sur une droite. En fait, ce cas ne se présente que lorsque l'état hydrique du sol est très voisin pour les points différents (LAFFORGUE, 1977). Dans le cas contraire, on prend les moyennes des valeurs $I - R_x$ obtenues pour chaque intensité. Le tableau 12 présente les moyennes obtenues pour chaque sol :

TABLEAU 12

INCIDENCE DE LA NATURE DU SOL ET DE SON COUVERT SUR L'INTENSITÉ LIMITE DE RUISSELLEMENT I_f (mm/h)

Sol	A haut de versant	B mi-versant	C bas de versant
Végétation naturelle	22	11	21
Sol nu labouré et plané	13	11	8

Ainsi I_f diminue considérablement (sauf pour le sol B) après destruction de la végétation naturelle et labour superficiel. Ces résultats laissent entrevoir les conséquences d'une éventuelle mise en valeur : diminution des coefficients d'infiltration et augmentation des risques d'érosion.

— *L'état d'humectation initial du sol*

Une étude fine des humidités préalables aux essais n'a pas été réalisée, les sols étant proches de la capacité au champ (saison des pluies). Il semble par conséquent beaucoup plus intéressant de mettre en œuvre l'infiltromètre au cours de la saison sèche.

— *La dynamique de surface*

La surface du sol évoluant au cours des averses (tassement, formation progressive d'une pellicule de battance...), il est très probable que ces modifications interviennent sur les intensités d'infiltration. Il serait par conséquent souhaitable, à l'avenir, de suivre avec précision cette évolution (à l'aide de photographies par exemple).

Notons enfin que les intensités limites de ruissellement évaluées sous infiltromètre semblent proches des intensités limites réelles. Opérant en saison des pluies (les sols sont alors à une humidité proche de la capacité au champ), on a assisté, sous une *pluie naturelle* ayant une intensité de 19 mm/h (enregistrée sur le bac pluviométrique), à la formation des premières flaques sur le sol C, alors que l'intensité limite de ruissellement obtenue sur les parcelles correspondantes est de 21 mm/h.

5.1.3. Mesures annexes

En vue de faciliter l'interprétation des résultats nous avons procédé à des mesures d'humidité à l'aide d'une sonde neutronique, tous les 10 cm, jusqu'à une profondeur de 200 cm, avant, pendant et après chaque pluie simulée (résultats non dépouillés).

Des échantillons de turbidité ont été prélevés, lors des pluies d'intensité constante (120 mm/h), une fois le régime permanent de ruissellement atteint. Cet essai n'a qu'une valeur de test comparatif, la longueur de pente étant très faible. Cependant ce test met en évidence l'importance bien connue de la couverture du sol quant à sa protection :

TABLEAU 13
TURBIDITÉS DES EAUX DE RUISSELLEMENT
EN FIN DE PLUIE (mg/l)

Sols	Végétation naturelle	Sol nu après labour
A	—	845
B	43	1 337
C	93	1 087

La turbidité obtenue en début de ruissellement sur parcelle labourée est bien plus importante que celle mesurée après formation de la pellicule en fin de pluie. Il serait donc intéressant de suivre l'évolution de la turbidité au cours du temps, et pas seulement en fin d'averse. Un dispositif de prise d'échantillons d'eaux de ruissellement au cours des pluies pourrait être mis en place, à partir du canal récepteur.

5.2. HYDROLOGIE

Une convention, prévoyant l'emploi de l'infiltromètre à aspersion, a été signée en 1977, entre la Section d'Hydrologie de l'ORSTOM et le CIEH (Comité Interétats d'Etudes Hydrauliques) en vue d'une étude approfondie du ruissellement sous forêt *sempervirens*. L'étude porte, pour l'instant, sur une toposéquence de la forêt classée de Yapo, dans le sud de la Côte d'Ivoire. Menée par A. CASENAVE et N. GUIGUEN, elle doit permettre de comprendre les régimes de ruissellement sur ce bassin versant. L'infiltromètre doit être utilisé aussi dans la forêt de Taï, située au sud-ouest de la Côte d'Ivoire (Projet M.A.B. : Man and Biosphere).

5.3. AUTRES DOMAINES INTÉRESSÉS

Cet appareil pourrait rendre d'intéressants services dans d'autres domaines. En agronomie, par exemple, il permettrait une comparaison de différentes techniques culturales vis-à-vis de leur résistance à la battance, de leur

influence sur les coefficients d'infiltration ($K_w = F_N/I$) et sur la mise en réserve d'eau pour les plantes. Dans le cas de l'irrigation par aspersion, il pourrait aider à déterminer l'intensité optimale d'arrosage (infiltration maximale pour un ruissellement nul).

Il est évident que cette liste des utilisations possibles de l'infiltromètre est loin d'être exhaustive...

CONCLUSION

L'infiltromètre à aspersion construit et mis au point sur le Centre ORSTOM d'Adiopodoumé permet de répondre aux objectifs fixés au préalable. En effet, son coût est modique, sa construction, son maniement et son transport sont faciles. En outre, simulant des pluies dont les caractéristiques sont proches des pluies naturelles, il fournit des données directement applicables.

Dans le vaste domaine que couvrent les problèmes concernant les relations eau - sol - plante, cet appareil est à même d'être utilisé largement tant par les chercheurs concernés que par les praticiens.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] AUDRY *et al.* - 1973 - Essai sur les études de dynamique actuelle des sols. *Bulletin du groupe de travail sur la dynamique actuelle des sols*. ORSTOM, Paris, n° 2, 126 p. + annexes.
- [2] BERTRAND (R. B.) et PAAR (J. F.) - 1960 - Development of a portable sprinkling infiltrometer. *Trans. 7th Intern. cong. of soil science*. Madison, VI, 4, pp. 433-440.
- [3] BLANCHARD (D. C.) - 1951 - The distribution of Raindrops in Natural Rain. *Occasional Report*, n° 15. General Electric Research Lab. Project Cirrus.
- [4a] BOLI BABOULE - 1976 - *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, 19 p.
- [4b] CASNAVE (A.) et GUIGUEN (N.) - 1978 - *Etude des crues décennales des petits bassins forestiers en Afrique tropicale. Détermination des caractéristiques hydrodynamiques des sols forestiers*. Campagne 1977. ORSTOM, Abidjan, multigraph. 60 p. + annexes.
- [5] COLLINET (J.), ASSELINE (J.) et LAFFORGUE (A.) - 1975 - *Compte rendu d'une mission en Haute-Volta* (3 mars-3 juin 1975). ORSTOM, Abidjan.
- [6] DIXON (R. M.) et PETERSON (A. E. E.) - 1964 - Construction and Operation of a modified spray infiltrometer and a flood infiltrometer. Univ. of Wisconsin. *Research Report*, n° 15, 31 p.
- [7] GUNN (R.) et KINZER (G. D.) - 1949 - The terminal velocity of fall for water droplets. *J. Met.*, 6, pp. 243-248.
- [8] HUDSON (N. W.) - 1963 - Raindrop Size Distribution in high intensity storms, *Rhod. J. Agric. Res.*, 1, pp. 6-11.
- [9] HUDSON (N. W.) - 1964 - The flour pellet method for measuring the size of raindrops, Dept. of Conservation and Extension. *Research Bulletin*, n° 4, Salisbury, 26 p.
- [10] HUDSON (N. W.) - 1973 - *Soil Conservation*, B. T. Batsford limited. London, 320 p.
- [11] KELKAR (V. N.) - 1960 - Size distributions of raindrops. *Indian J. Met. Geophys.* Part. I, 10, 2, 1959 ; Part II, 11, 4, 323, 1970.
- [12] KER (A. D. R.) - 1954 - The measurement of Rainfall Intensity, Drop Size Distribution and Impactive Force, unpublished thesis for Dip. in *Trop. Agric.* Trinidad, 26 p.
- [13a] LAFFORGUE (A.) et NAAH (E.) - 1976 - *Mesure des phénomènes d'érosion sous pluies simulées aux cases d'érosion d'Adiopodoumé* : 1. Analyse des facteurs de ruissellement. ORSTOM, Abidjan, 32 p.
- [13b] LAFFORGUE (A.) - 1977 - Inventaire et examen des processus élémentaires de ruissellement et d'infiltration sur parcelles. Application à une exploitation méthodique des données obtenues sous pluies simulées. *Cah. ORSTOM, sér. Hydrol.*, vol. XIV, n° 4, 1977.

- [14] LAWS (J. O.) – 1949 – Measurement of fall velocity of water drops and rain drops. *Trans. Amer. Geophys. Union*, pp. 709-721.
- [15] MEYER (L. D.) – 1958 – An investigation of methods for simulating rainfall on standart run-off plots and a study of the Drop Size, Velocity, and Kinetic Energy of selected spray nozzle, Purdue Univers. *Special Report*, n° 81, 42 p.
- [16] MEYER (L. D.) – 1965 – *Simulation of Rainfall for Soil Erosion Research*, *Trans. of the A.S.A.E.*, vol. 8, n° 1, pp. 63-65.
- [17] MIHARA (Y.) – 1951 – Raindrops and Soil Erosion. *Bulletin of the National Institute of Agricultural Science*, series A, 1.
- [18] WISCHMEIER (W. H.) et SMITH (D. D.) – 1958 – Rainfall energy and its relationship to soil loss. *Trans. Amer. Geophys. Union*, 39, 2, pp. 285-291.

ANNEXE

MATÉRIEL EMPLOYÉ ET COÛT EN 1977 A ABIDJAN

A. Matériaux de construction pour l'appareil, le réservoir et l'aménagement du limnigraphe :

1 tube galvanisé, 15 × 21 mm.....	2 790
1 tube galvanisé, 20 × 27 mm.....	3 608
4 tubes noirs carrés, 25 × 25 mm	7 410
2 tubes noirs carrés, 30 × 30 mm	4 590
2 fers à béton, \varnothing 6 et 10 mm	1 900
4 roulements S.K.F., \varnothing 6 × 19 mm	2 200
30 boulons, 8 × 50, 8 × 35, 6 × 26 mm	750
3 m tuyau plastique souple	510
8 colliers de serrage	400
1 tôle plane galvanisée, 100 × 200 mm, 20/10 ^e	7 261
3 tôles planes galvanisées, 100 × 200, 15/10 ^e	14 840
1 tôle plane galvanisée, 100 × 200 mm, 10/10 ^e	3 338
1 tôle plane galvanisée, 100 × 200 mm, 6/10 ^e	2 410
1 barre de fer cornière égale, 50 × 50 mm	4 099
1 barre de fer cornière égale, 40 × 40 mm	2 674
1 barre de fer cornière égale	2 023
1 tige filetée en laiton avec 10 écrous, \varnothing 6 mm	770
<hr/>	
Total partiel (250 U.S. Dollars) :.....	61 573 CFA

B. Alimentation de l'infiltromètre et matériel annexe :

20 m de câble électrique, deux fois 2,5 mm + 2 pinces	4 500
1 batterie d'accumulateurs 12 V., 178 ampères	63 900
1 pompe de cale GEM BP 1 400, 4 500 l/h GEM marine. Products, Box 911 Lake City, USA.	19 840
1 moto-pompe TAS Motor QSZZ 7 200 l/h Tanaka Kogyo (Japan)	59 000
1 manomètre, 0 à 1 kg, \varnothing 18 cm	30 000
2 vannes bronze, 20 × 27	5 500
1 bâche Edsanyl, environ 45 m ²	75 000
2 kg de peinture	2 280
<hr/>	
Total partiel (1 050 U.S. Dollars) :.....	260 000 CFA

C. Matériel de récupération :

- 2 engrenages avec axe.
- 2 paliers bronze.
- 1 moteur essuie-glace.
- 2 flexibles câble de compteur.
- 1 gaine et câble de frein à main.

Soit un total de 321 600 F CFA (1 300 U.S. Dollars).

A cette liste, l'on doit ajouter :

- Le gicleur Tee jet SS 6560 dont nous ne connaissons pas encore le prix ;
- Le limnigraphe A OTT VIII de laboratoire, utilisé depuis plusieurs années sur d'autres programmes d'études.