

ESTIMATION DE LA LAME RUISSELEE SUR UN PETIT BASSIN

VERSANT A PARTIR DES PLUIES SIMULEES

Jean ALBERGEL *

Résumé:

Etude hydrologique de bassin versant par mini-simulateur de pluie, entrepris sur le bassin de savane de BINNDE (Département-Centre de la Haute-volta).

Sont exposés protocole et dispositif expérimentaux utilisés selon la répartition physique du sol.

Les mesures des paramètres hydrologiques ont été réalisées sur les parcelles soumises à la simulation.

Par la suite, on a recherché les procédés permettant de passer, d'une part des pluies simulées aux pluies naturelles, et d'autre part de la parcelle au bassin; afin de pouvoir confronter les observations obtenues par simulation à celles obtenues lors d'une étude hydrologique "classique" faite auparavant.

Le résultat obtenu, s'avère très satisfaisant, notamment quant à l'estimation de la crue décennale.

Abstract

In this study we present and explain the results obtained on a savana watershed (Binnde in Upper-volta), where a framework of surface runoff measurement under simulated rainfalls was attempted.

In a first part we describe the apparatus and experimental methods used as runoff characteristics resulting on experiment plots under simulated rainfalls.

In a second part we try to find the way that allow to compare experiment results to naturel runoff measurement; and to establish relationship between measurement on simulator plot and on the whole of the watershed.

Very significatives liaisons are found between the both. We shall be able to estimate the decennial flood from study of simulated rainfalls.

* Hydrologue, ORSTOM B.P. 182 - OUAGADOUGOU -

3 AVRIL 1985

O.R.S.T.O.M. Fonds Documentaire

N° : 17. 283 ex 1

Cote : B

Introduction

La méthode la plus fine pour étudier le ruissellement, et en particulier la crue décennale, sur un bassin consiste en un ajustement d'un modèle "pluie débit" sur un échantillon observé de crues, à reconstituer les crues à partir d'une série pluviométrique journalière de longue durée, puis à faire l'analyse statistique de l'échantillon de crues ainsi obtenu. La mise en oeuvre demande de gros moyens et réclame une longue présence d'hydrologues sur le terrain (au moins 3 ans). Les hydrologues de l'ORSTOM expérimentent une nouvelle méthode : elle consiste à mesurer les différents paramètres hydrologiques du bassin sous pluies simulées, sur des parcelles installées sur des sites considérés comme représentatifs du bassin, puis à les extrapoler aux pluies naturelles et à l'ensemble du bassin.

I - LE DISPOSITIF EXPERIMENTAL (fig. 1)

1) La parcelle

Elle est constituée d'un cadre métallique carré de 1 m de côté que l'on enfonce dans le sol. Le côté perpendiculaire à la ligne de plus grande pente est percé d'une rangée de trous qui permettent de recueillir le ruissellement dans une cuve. Cette cuve est surmontée d'un limnigraphe horaire et est munie d'un dispositif de vidange. Sur ce cadre peut se fixer une tôle lisse recouvrant la parcelle et permettant de vérifier les intensités de la pluies artificielle. A l'amont de la parcelle sont installés un tube de sonde à neutrons et un faisceau de sondes à chocs thermiques pour mesurer l'humidité des différents niveaux du sol.

2) Le mini-simulateur de pluie

Il s'agit d'une tour en forme de tronc pyramidal de 4m 10 de haut, en tubes carrés, et protégé du vent par des bâches plastiques. Au sommet de la tour est fixé le système d'aspersion composé d'un moteur actionnant un bras oscillant sur lequel est monté un gicleur qui arrose la parcelle et son voisinage suivant un faisceau plan parallèle à la ligne de plus grande pente. En modifiant l'angle de balayage du gicleur on fait varier la surface de sol arrosée et donc la quantité d'eau reçue par la parcelle de 1 m². On règle ainsi de manière continue l'intensité de la pluie simulée. La pression d'alimentation, le choix du gicleur et la hauteur du jet d'eau sont tels que la pluie simulée possède les caractéristiques les plus proches possible des pluies naturelles : taille des gouttes, énergie cinétique...

3) Le protocole de pluies simulées

Pour se rapprocher le plus possible des réalités climatiques de la région, et pour posséder un nombre de mesures suffisantes, on a estimé que les pluies simulées du protocole de mesures doivent satisfaire aux critères suivants:

- Le total pluviométrique reçu par la parcelle doit être inférieur au total-annuel-médian ;
- Le nombre d'averses doit être suffisant pour avoir des temps de ressuyage des sols différents ;
- Les hauteurs d'eau reçues par chaque parcelle au cours d'une averse sont de ~~réurrence annuelle~~ réurrence annuelle ou décennale ;
- La forme de chaque pluie tient compte des intensités probables rencontrées dans la région et calculées à partir de courbes, durées - intensités-fréquences.

II - DIFFERENTES PHASES DANS LE RUISSELLEMENT ETUDIE SOUS PLUIES SIMULEES

Le ruissellement est mesuré très près de la bordure aval de la parcelle. On néglige dans toute l'étude les temps de transferts de l'eau à partir des points les plus éloignés de l'exutoire et le temps de transfert entre l'exutoire et la cuve enregistreuse qui recueille l'eau ruisselée. Cette approximation est justifiée par les faibles dimensions du dispositif. Le limnigramme donne la hauteur des lames ruisselées cumulées en fonction du temps. La pente en chaque point du diagramme donne à chaque instant l'intensité du ruissellement. Au début de la pluie on n'observe aucun ruissellement, c'est la phase d'imbibition. L'infiltration est d'abord totale, l'intensité potentielle d'infiltration $F(t)$ est en chaque point de la parcelle supérieure à l'intensité de la pluie. La capacité d'infiltration diminue tandis que le sol s'humecte, elle devient en plusieurs points inférieure à l'intensité de la pluie et l'eau commence à remplir les dépressions de la parcelle.

A un instant t_1 précis les flaques débordent, l'eau se met en mouvement et parvient à l'exutoire. L'hydrogramme prend une forme de S allongé, l'intensité de ruissellement augmente, celle d'infiltration diminue. Si toutes les flaques débordent la totalité de la superficie de la parcelle participe au ruissellement. La hauteur moyenne de la lame d'eau en mouvement à la surface (D_m) augmente. Cette phase correspond à un régime transitoire.

Il s'établit ensuite un palier de ruissellement, dont l'intensité a atteint un maximum, l'infiltration est alors minimale, il s'est établi un régime permanent.

Au changement d'intensité de la pluie, ce régime permanent cesse durant un intervalle de temps au cours duquel les intensités de ruissellement et d'infiltration changent jusqu'à un nouvel équilibre et l'on retrouve un palier caractéristique du nouveau régime permanent.

Lorsque la pluie cesse, le ruissellement décroît lentement pour s'annuler au temps t_f . C'est la phase de vidange, la quantité d'eau qui s'écoule représente la détention superficielle récupérable (D_r) et qui est la partie non infiltrée des réserves superficielles acquises à la fin de la pluie (D_m).

Pour chacune des phases décrites on peut faire le bilan et en tirer des équations entre les grandeurs mesurées.

Notations utilisées.

$P_u(t)$: hauteur de pluie à l'instant t

$L_r(t)$: lame ruisselée à l'instant t

$L_i(t)$: lame infiltrée à l'instant t

$S(t)$: lame stockée en surface à l'instant t

$D_m(t)$: détention superficielle mobilisable à l'instant t

$D_r(t)$: détention superficielle récupérable à l'instant t

$I(t)$: intensité de la pluie à l'instant t

$E(t)$: intensité de ruissellement à l'instant t

$F(t)$: intensité d'infiltration à l'instant t

R_x : intensité maximale de ruissellement

F_n : intensité maximale d'infiltration

t_i : temps de l'apparition du ruissellement

t_m : temps de l'apparition du régime permanent

t_u : temps de fin de la pluie

t_f : temps de fin du ruissellement.

- Pour la totalité de la pluie l'équation du bilan s'écrit

$$Pu(t) - Lr(t) - Li(t) - Dm(t) - S(t) = 0 \quad (1)$$

- Pendant la phase d'imbibition

$$Lr(t) = 0$$

$$Dm(t) = 0$$

$$Pu(t) - Li(t) - S(t) = 0$$

- Régime transitoire

en dérivant l'équation (1)

$$I - R(t) - F(t) - \frac{dDm}{dt} - \frac{dS}{dt} = 0$$

- Régime permanent

$$R(t) = Rx$$

$$F(t) = Fn$$

$$\frac{dDm}{dt} = 0$$

$$\frac{dS}{dt} = 0$$

$$I - Rx - Fn = 0$$

- Phase de vidange

$$Pu(t) = 0$$

$$Lr(tf) - L(tu) = Dm(tu) + S(tu) - S(tf) + Li(tu) - Li(tf).$$

soit en désignant par Dr (Détention superficielle récupérable pour le ruissellement) la hauteur de la lame d'eau que l'on récupère après l'arrêt de la pluie :
 Lif celle qui s'infiltré : $Dr = Dm(tu) + S(tu) - Lif$.

III - MESURE DE L'ETAT D'HUMECTATION DU SOL AVANT CHAQUE PLUIE

Sur tous les bassins où le mini simulateur a été expérimenté des profils d'humidité ont été effectués sur de nombreuses parcelles. Dans l'analyse des grandeurs mesurées, il a été démontré que c'est l'état d'humectation du sol avant chaque averse qui conditionne la relation "Pluie - ruissellement". Pour caractériser ce dernier on a choisi d'utiliser un indice exprimant la vidange d'un stock hydrique plutôt que la mesure directe. Cet indice est défini de la façon suivante :

$$IK_k = (IK_{k-1} + PU) e^{-ta}$$

IK_k = Indice d'humidité avant la k^{ème} averse

IK_{k-1} = Indice d'humidité avant la k-1^{ème} averse

PU = Pluie utile de k - 1^{ème} averse

ta = temps en fraction de jour séparant la fin de la pluie k-1 du début de la pluie k.

Sur une parcelle du bassin de Binndé (centre de la Haute-Volta) on a vu que le déficit hydrique à saturation mesuré dans le premier horizon du sol (0-10 cm) peut s'exprimer de façon simple en fonction de cet indice.

$$IK = (HVs - Hv_{\infty} - Dhs) \exp \frac{B}{Dhs}$$

HVs : humidité volumique à saturation

Hv_∞ : humidité volumique après un ressuyage de temps infini

Dhs : déficit hydrique à saturation

B : constante d'ajustement.

IV - RELATIONS ENTRE LES PARAMETRES HYDROLOGIQUES MESURES SOUS PLUIES SIMULEES

1) La pluie d'imbibition

L'expérience montre que la pluie d'imbibition (PI) varie en fonction de l'indice d'humidité (IK) caractérisant le sol avant chaque averse. Les courbes de variation $PI = f (IK)$ ont une allure d'hyperboles décroissantes tendant vers une asymptote pour IK maximum. Pour chaque parcelle il est aisé de construire l'abaque donnant la pluie d'imbibition en fonction de l'indice d'humidité.

2) Coefficient de ruissellement (fig. 2)

Le report en coordonnées cartésiennes des lames ruisselées cumulées en fonction des pluies cumulées donne pour chaque parcelle une ligne brisée qui caractérise son aptitude au ruissellement. Le segment joignant deux points a pour pente le coefficient de ruissellement de l'averse qu'il représente. Si sur un même sol on teste des parcelles qui diffèrent par leurs états de surfaces (végétation, brulis, modes cultureux) on peut mettre en évidence l'influence de ces états sur le ruissellement et ouvrir un champ d'application du simulateur aux études d'érosion ou d'agronomie.

3) La lame ruisselée en fonction de la pluie utile

L'étude des hydrogrammes de ruissellement sur chaque parcelle a permis d'abord d'exprimer pour chaque pluie, la lame ruisselée (L_r) en fonction de la pluie utile P_u . En début de pluie la relation est une courbe caractéristique du déficit de saturations du sol, elle devient ensuite linéaire.

Pour l'ensemble du protocole, sur chaque parcelle, la variation de la lame ruisselée est étudiée en fonction de l'indice d'humidité IK , elle est linéaire. Ainsi chaque parcelle est caractérisée par une relation $L_r = f(P_u, IK)$ de la forme.

$$L_r = aP_u \times IK + bIK + cP_u + d.$$

4) Intensité de la pluie et intensité de ruissellement

Lorsque le régime permanent est obtenu l'intensité de ruissellement ($R(t)$) prend une valeur maximale R_x tandis que l'intensité d'infiltration $F(t)$ prend une valeur minimale F_n . Si l'on examine l'ensemble des valeurs de R_x (ou de F_n) mesurées sur différentes parcelles on constate qu'elles sont influencées par les trois facteurs suivants :

- Intensité de la pluie (I)
- Etat d'humectation initial
- Nature du sol et état de surface.

Théoriquement, on démontre que R_x s'exprime de façon simple en fonction de I

$$R_x = K (I - I_1)$$

K : constante caractéristique de la parcelle

I_1 : intensité limite de la pluie donnant lieu à un ruissellement.

Expérimentalement on obtient une bonne corrélation entre I_1 et l'indice d'humectation IK .

L'intensité d'infiltration est par définition la différence entre l'intensité de ruissellement et l'intensité de la pluie.

$$F_n = (1 - K) I + KI_1$$

5) La phase de vidange

A l'arrêt de la pluie on observe encore un ruissellement que l'on qualifie de détention superficielle récupérable D_r . L'expérience montre que D_r varie en fonction de l'intensité de ruissellement maximale R_x obtenue pendant le dernier intervalle d'intensité constante de l'averse. On peut exprimer D_r en fonction de R_x , F_n et de deux autres paramètres caractérisant la parcelle ; A qui dépend de la morphologie de la parcelle (pente, longueur, rugosité) w qui représente la proportion de superficie moyenne ruisselante de la parcelle.

$$D_r = A \left(\sqrt{R_x} - \sqrt{w F_n} \times \text{Arctg} \sqrt{\frac{R_x}{w F_n}} \right)$$

V - EXTENSION DE CES DONNEES AUX PLUIES NATURELLES SUR L'ENSEMBLE DU BASSIN

Le passage de la relation "pluie simulée - lame ruisselée sur la parcelle" à la relation "pluie naturelle - lame ruisselée" sur l'ensemble du bassin se fait en deux étapes.

1ère étape : On évalue sur chaque parcelle le ruissellement que donne la pluie naturelle.

Si on dispose d'une série pluviométrique, on considère chaque pluie journalière comme une averse ponctuelle qui a eu lieu à l'heure du relevé et on calcule les indices d'humidité IK correspondant. A l'aide des abaques pluie d'imbibition en fonction de IK on détermine toutes les pluies qui n'auraient pas donné de ruissellement sur la parcelle.

Pour les autres pluies les relations $L_r = f(PU, IK)$ évaluent la hauteur de la lame ruisselée L_{r_i} sur la parcelle i .

Dans ce modèle de reconstitution on ne tient pas compte de l'intensité de la pluie.

Si on dispose d'une série pluviographique, la reconstitution est plus fine. A l'aide des abaques donnant la pluie d'imbibition en fonction de l'indice d'humidité on détermine la partie du hyétogramme ne donnant pas lieu au ruissellement. On calcule I_1 à l'aide des corrélations $I_1 = f(IK)$.

Pour chaque tranche du hyétogramme restant on calcule l'intensité de ruissellement ($R_x = K(I - I_1)$) et les hauteurs de lames ruisselées correspondantes, ($L_r = R_x \times t$) leur somme est égale à la lame ruisselée L_{r_i} sur la parcelle i .

2ème étape : Ayant obtenu la lame ruisselée qu'aurait produit chaque pluie naturelle sur les différentes parcelles il faut construire un modèle pour passer des parcelles à l'ensemble du bassin ;

Une cartographie des différences morpho structurales du bassin permet de connaître les aires représentées par chaque parcelle étudiée. Pour une pluie donnée on calcule une lame ruisselée (Lrc) égale à la somme de lames ruisselées (Lri), déterminées sur chaque parcelle et pondérées par un facteur (ci) égal au pourcentage de la surface du bassin représentée par la parcelle .

$$Lrc = \sum ciLri$$

Si le bassin se comportait de façon identique aux parcelles, Lrc représenterait la lame ruisselée engendrée par la pluie. Mais ce passage à l'échelle du bassin fait intervenir plusieurs facteurs :

- l'effet de pente qui n'est pas ou peu pris en compte sur la parcelle ;
- la répartition spatiale par rapport à l'exutoire, des sols représentés par chaque parcelle. L'eau qui ruisselle de l'amont vers l'aval peut s'infiltrer ou être captée par des petits endoreismes non cartographiables. ;
- l'homogénéité des averses sur le bassin ;
- la nature de la végétation qui était sèche lors des expériences de ruissellement au simulateur et qui est verte en saison des pluies. ;
- bien d'autres paramètres : nature du réseau hydrographique, drains préférentiels que sont les pistes...

On crée une fonction de calage ou fonction de "passage d'échelle" qui englobe tous ces facteurs. Elle est obtenue en confrontant une série de lames ruisselées reconstituées Lrc à la série observée correspondante pendant une saison des pluies. Sur le bassin de BINNDE on a établi une corrélation entre 39 valeurs de lame reconstituées et de lames observées.

$$Lro = 1,45 Lrc + 0,45 \quad R^2 = 0,906 \text{ pour 39 valeurs.}$$

La détermination de cette fonction de calage rend obligatoire l'observation de la pluviométrie et des écoulements pendant au moins une saison des pluies. Mais on peut penser que lorsque de nombreux bassins auront été étudiés, il sera possible de trouver des relations entre cette fonction et les paramètres physiographiques et climatiques du bassin, et disposer d'abaques pour déterminer la fonction : "passage d'échelles".

VI - ESTIMATION DE LA LAME RUISSELEE DECENNALE

Cette estimation peut se faire sur une série statistique de lames ruisselées reconstituées, ou par approximation en calculant la lame ruisselée, correspondante à une pluie de récurrence décennale ayant lieu dans des conditions d'humectation du sol moyenne et au milieu de la saison des pluies.

Sur le bassin de BINNDE, en utilisant la seconde méthode la lame ruisselée décennale est estimée à 35,0 mm. Cette valeur est à rapprocher de l'estimation faite lors de l'étude conventionnelle de ce bassin et qui est de 32,1 mm.

VII - CONCLUSION

Cette méthode, relativement peu coûteuse et dont la mise en oeuvre peut se faire dans un temps plutôt court :

4 semaines en saison sèche, plus une campagne en saison des pluies, peut donner des résultats satisfaisants pour les projeteurs d'aménagements hydrauliques.

OUAGADOUGOU, Octobre 1982.

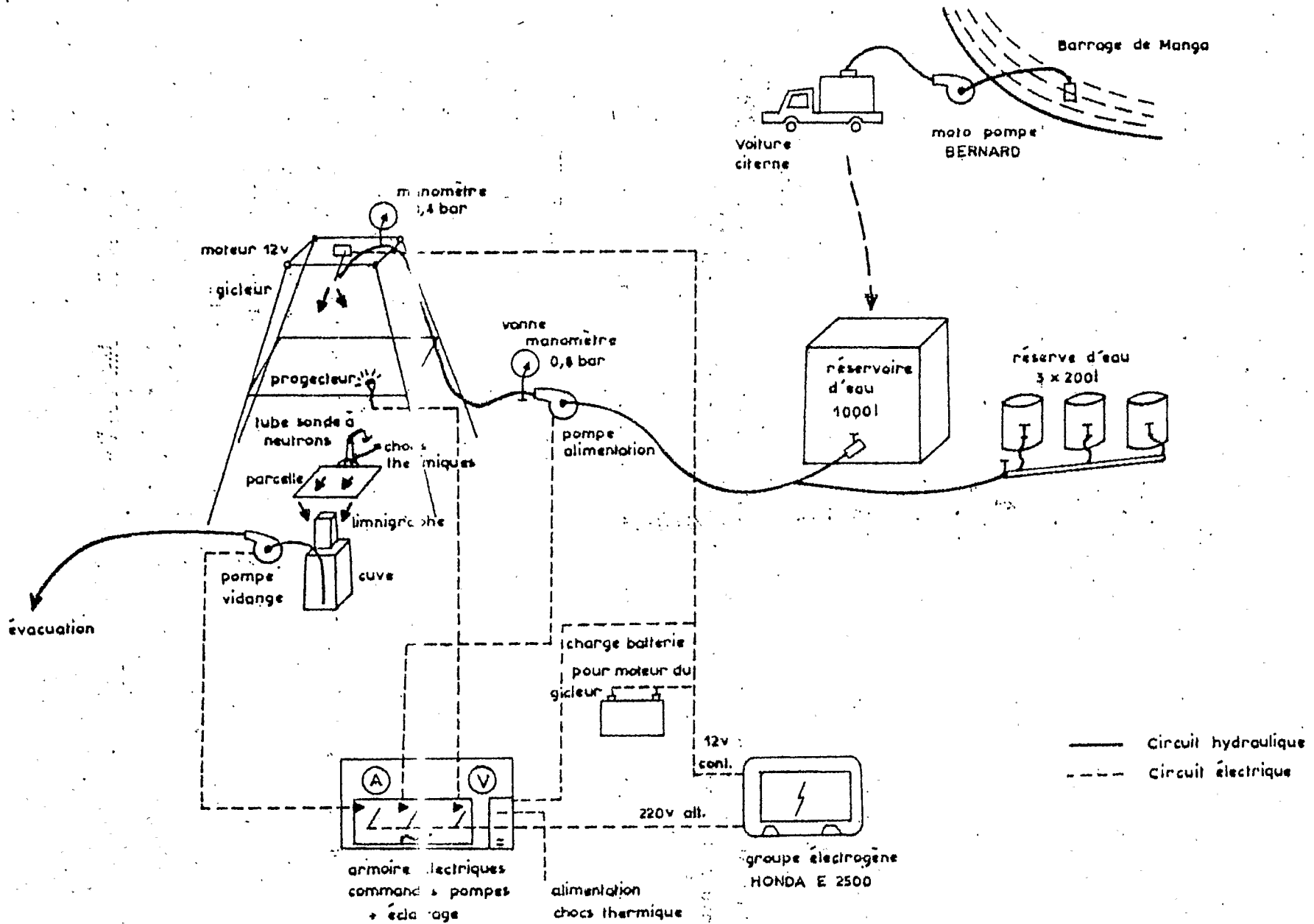
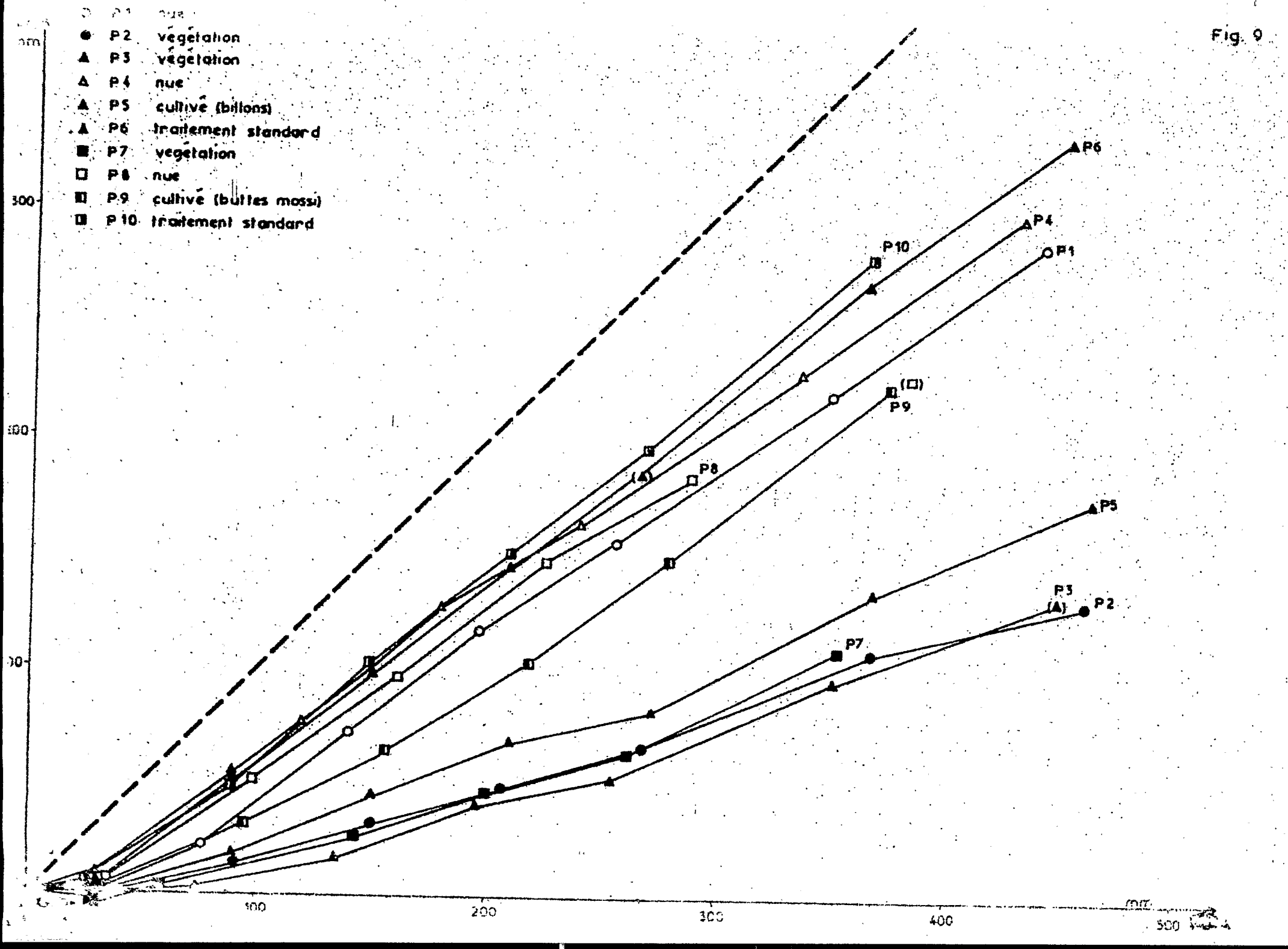


Fig:1 SCHEMA DE FONCTIONNEMENT DU SIMULATEUR DE PLUIES (VERSION OUAGADOUGOU)

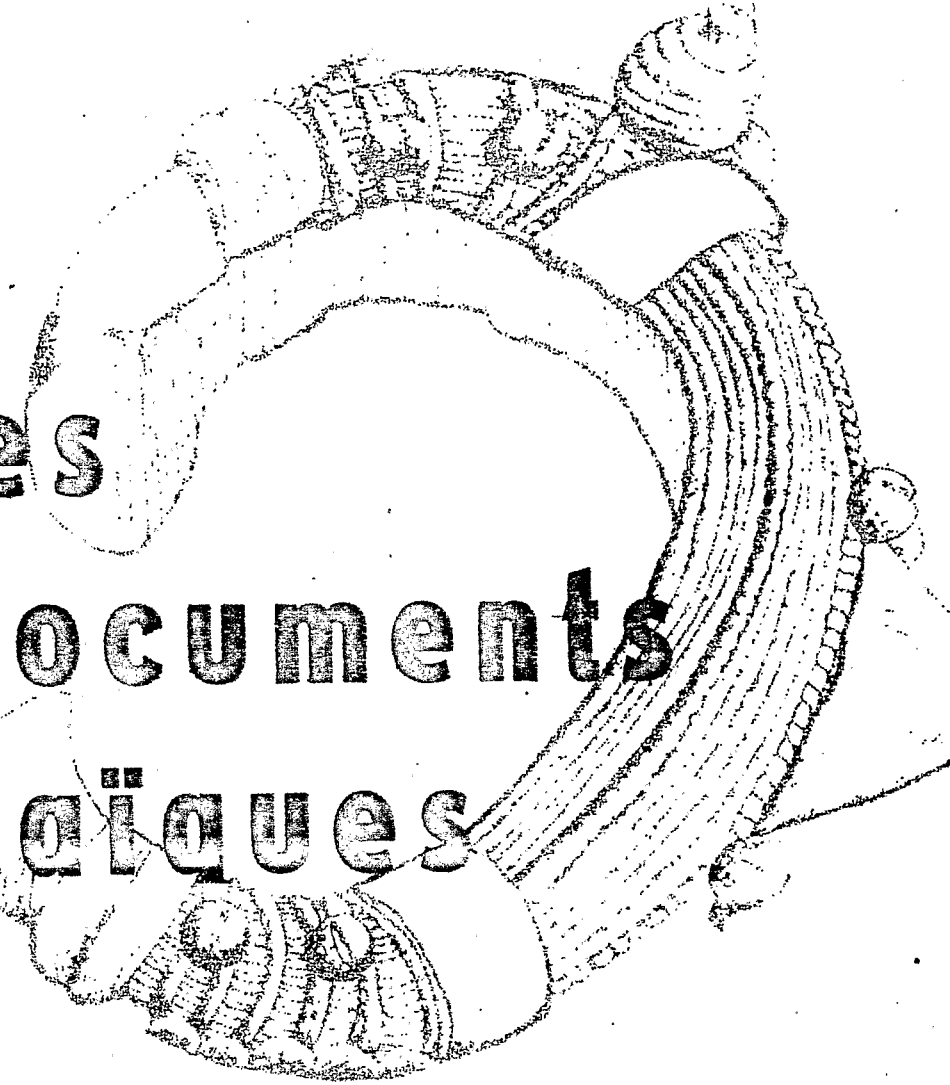
Fig. 9

- P1 nue
- P2 vegetation
- ▲ P3 vegetation
- △ P4 nue
- ▲ P5 culive (bilions)
- ▲ P6 traitement standard
- P7 vegetation
- P8 nue
- P9 culive (bulles mossi)
- P10 traitement standard



BIBLIOGRAPHIE SOMMAIRE

- ALBERGEL (J.), TOUIRI (H.), 1982.- Un nouvel outil pour estimer le ruissellement sur un petit bassin versant : le mini simulateur de pluies. Expérimentation sur le bassin de BINNDE ORSTOM - OUAGADOUGOU -
- ASSELIN (J.), VALENTIN (C.), 1978.- Construction et mise au point d'un infiltrmètre à aspersion. Cahier ORSTOM sér. Hydrologique vol. XV n° 4.
- BERTRAND (A.R.), PARR (J.F.).- Development of a portable sprinkling infiltrmometer tr. of the VII th. Int. Cong. of soil Sci. MADISON 6. 4
- CASENAVE (A.), 1981.- Etude des crues décennales des petits bassins forestiers en Afrique tropicale. Rapport final. ORSTOM - CIEH - ABIDJAN.
- CHEVALIER (P.), Etude du ruissellement sur deux bassins versants sahéliens JALAFANKA et POLAKA, utilisation d'un infiltrmètre à Aspersion - ORSTOM (à paraître).
- COLLINET (J.), VALENTIN (C.), 1979.- Analyse des différents facteurs intervenants sur l'hydrodynamique superficielle. Nouvelles perspectives. Applications Agronomiques ORSTOM - ABIDJAN -
- HILLEL (D.), 1974.- L'eau et le sol, principes et processus physiques. Department of soil science, the Hebrew University of Jerusalem - Traduit de l'Anglais par Louis W. de BACKER Edité par WANDEC LOUVAINS.
- LAFORGUE (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. Cahier ORSTOM sér. Hydrologie, Vol. XIV, n° 4.



notes
et documents
voltaïques

bulletin trimestriel d'information scientifique et technique

14 (1) Janvier - Mars 1983

**CENTRE NATIONAL DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
ET TECHNOLOGIQUE**

B.P. 7047 - OUAGADOUGOU

HAUTE-VOLTA

ORSTOM
HYDROLOGIE
DOCUMENTATION

3 AVRIL 1985

O.R.S.T.O.M. Fonds Documentaire

N° : 17.283 ex 1

Cote : B

72238