

INSTITUT FRANCAIS DE RECHERCHE SCIENTIFIQUE
POUR LE DEVELOPPEMENT EN COOPERATION
(ORSTOM)
CENTRE D'ADIOPODOUME
B.P. V51 ABIDJAN (Côte d'Ivoire)

Laboratoire d'Hydrologie

R A P P O R T D E S T A G E

JAUGEAGES SUR GRANDES RIVIÈRES

SIMULATION DE PLUIE

par

BROU KOUAME

ITH3-ENSTP

Yamoussoukro

Stage effectué au Laboratoire d'Hydrologie de juillet à août 1985

S O M M A I R E

Note de remerciements

Introduction

I. Présentation de l'ORSTOM

I.1. L'ORSTOM

I.2. Le Centre d'Adiopodoumé

I.3. Le laboratoire d'Hydrologie

II. Jaugeages sur grandes rivières

II.1. Passage du câble

II.2. Description du matériel

II.2.1. Le saumon

II.2.2. L'hélice

II.2.3. Le treuil

II.3. Dépouillement de jaugeage

III. Simulation de pluie

III.1. Objectif de la simulation

III.2. Présentation du dispositif

III.3. Techniques de terrain

III.3.1. Choix des sites

III.3.2. Etalonnage de l'appareil

III.3.3. Suivi de l'humidité du sol

III.3.3.1. Méthode gravimétrique

III.3.3.2. Indice d'humectation

III.4. Analyse des données à l'échelle de la parcelle

III.4.1. Coefficients de ruissellement Kru et Kre

III.4.2. Intensité de ruissellement

III.4.3. Relation lame ruisselée-pluie utile-indice d'humidité.

III.5. Transposition des résultats à l'échelle du bassin

Conclusion

Bibliographie

Annexes.

NOTE DE REMERCIEMENTS

Je profite de cette occasion qui m'est offerte pour remercier tout le personnel du labotoire d'Hydrologie du Centre ORSTOM d'Adiopodoumé. Ces remerciements sont particulièrement adressés à MM. Alain CASENAVE, Chef du Service et Pierre CHEVALLIER chercheur, qui ont accepté de me recevoir à nouveau dans leur laboratoire.

Alain GIODA chercheur, mon maître de stage, pour ses conseils et sa disponibilité ; Jean-Marc LAPETITE et Jacky ETIENNE techniciens auprès de qui j'ai appris les techniques de terrain ; DIBY Konan Emmanuel préparateur, MONGO Sami observateur Météo et OUATTARA Dognimé garçon de laboratoire, pour leur franche collaboration.

INTRODUCTION

Dans le processus de leur formation, les techniciens supérieurs et ingénieurs de l'Ecole Nationale Supérieure des Travaux Publics (E.N.S.T.P.) font des stages de deux mois pendant les vacances d'été dans les organismes et sociétés concernant leur spécialité. C'est dans cet optique que du 10 juillet au 9 septembre 1985, j'ai été reçu pour la seconde fois au laboratoire d'Hydrologie du Centre ORSTOM d'Adiopodoumé.

L'hydrologie est la science qui étudie le cycle de l'eau dans la nature et son évolution à la surface de la terre et dans le sous-sol.

Le but recherché par ce stage est d'une part, de permettre aux futurs techniciens du Génie Civil de se familiariser avec les réalités du milieu professionnel et d'autre part, de pouvoir mettre en pratique les enseignements reçus à l'école.

I. PRÉSENTATION DE L'ORSTOM

I.1. L'ORSTOM

Quatrième organisme public français de recherche par ses effectifs (2400 personnes), l'ORSTOM (anciennement Office de la Recherche Scientifique et Technique Outre-Mer, dénommé depuis le 1er janvier 1984 Institut Français de Recherche Scientifique pour le Développement en Coopération) est chargé de promouvoir et de réaliser tous travaux de recherche scientifique et technologique susceptibles de contribuer au progrès culturel, social et économique des pays en voie de développement.

Pour mener à bien ces tâches, il s'est doté de huit départements pluridisciplinaires regroupant cinquante unités de recherche dont la démarche scientifique est orientée vers les grandes questions du développement. Concourent à cette démarche des spécialistes de vingt et une disciplines, de la géophysique à l'anthropologie sociale, ainsi que des représentants de la quasi-totalité des métiers et qualifications nécessaires au fonctionnement de la recherche, des marins aux bibliothécaires. Enfin, les agents de l'ORSTOM sont répartis mondialement, puisque le dispositif de coopération scientifique s'étend à vingt sept pays (Afrique, Moyen-Orient, Océan Indien, Amérique Latine, Asie, Pacifique) pour la plupart en voie de développement.

Les huit départements pluridisciplinaires sont :

- Département A : Milieu physique et environnement.
- Département B : Milieux et sociétés.
- Département C : Connaissance et mise en valeur des écosystèmes.
- Département D : Urbanisation et socio-systèmes urbains.
- Département E : Indépendance alimentaire.
- Département F : Etude et gestion des ressources : énergies, eaux et matières premières.
- Département G : Indépendance sanitaire.
- Département H : Conditions d'un développement indépendant.

Le service dans lequel j'ai effectué mon stage fait partie de l'unité de recherche 12 du Département B. Cette unité étudie les processus de transformation, le fonctionnement et les transferts aux interfaces sol-plante-atmosphère.

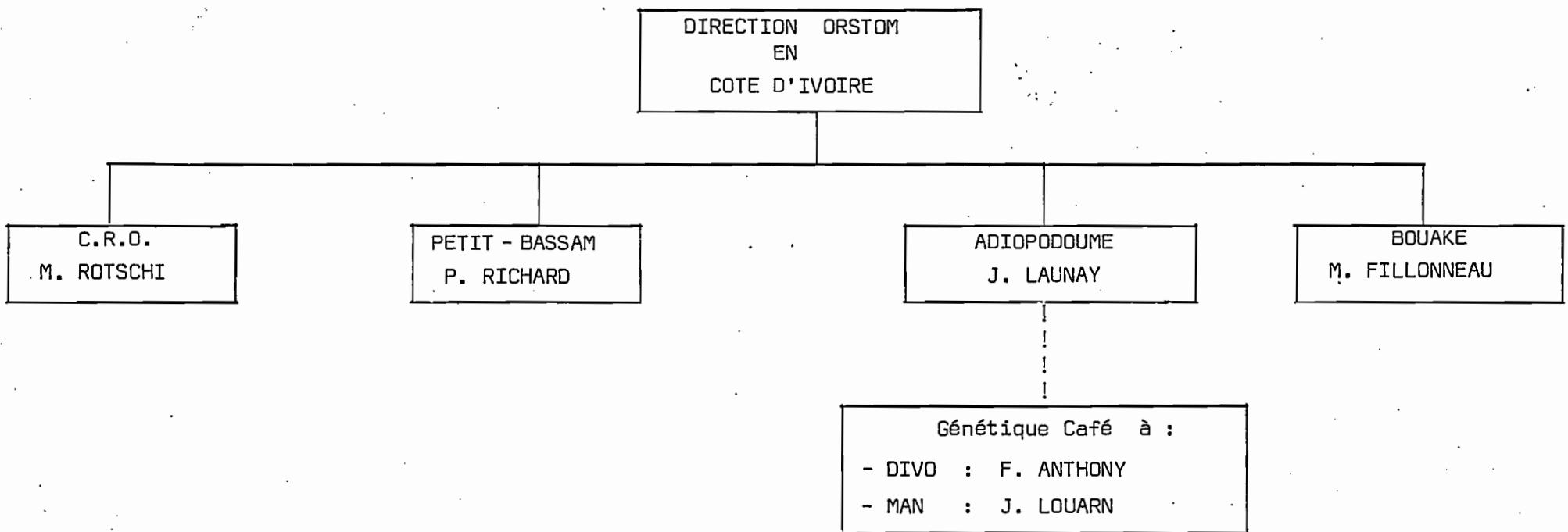
I.2. Le Centre d'Adiopodoumé

L'implantation de l'ORSTOM en Côte d'Ivoire remonte à l'année 1946. C'est au mois de juillet de cette année que le Centre d'Adiopodoumé a été créé. Depuis cette date, d'autres centres ont vu le jour dans le pays : le Centre de Recherches Océnographiques d'Abidjan (C.R.O.), le Centre des Sciences Humaines de Petit-Bassam et le Centre de Bouaké (voir organigramme). Le siège de l'Institut en Côte d'Ivoire se trouve à Abidjan (tour ALPHA 2000).

Dans le Centre d'Adiopodoumé, on note plusieurs services et laboratoires parmi lesquels on peut citer :

- les Services Administratifs et Financiers,
- l'hôtel ou Maison des Stagiaires,
- la Bibliothèque - Documentation,
- le Centre de calcul qui dispose de 5 micro-ordinateurs,
- le service Travaux s'occupant du garage, de l'électricité, de la mécanique de précision et de l'entretien,
- le laboratoire Photo,
- le laboratoire de Pédologie où on étudie la formation des sols par altération des roches et l'accumulation de matières organiques. On y établit la cartographie des sols,
- le laboratoire de Pédologie Expérimentale s'intéresse quant à lui aux problèmes d'érosion à la surface du sol pendant les pluies naturelles et simulées,
- le laboratoire de Bioclimatologie qui établit des relations entre climat et végétation naturelle et cultivée,
- le laboratoire de Génétique où la recherche est axée sur l'amélioration des plantes telles que le café, le gombo, le riz, le panicum (plante fourragère), le manioc, etc...
- le laboratoire de Physiologie Végétale. Ce service s'intéresse à l'évolution et aux moyens de lutte contre les maladies des plantes causées par les champignons,

ORGANIGRAMME DE L'ORSTOM EN CÔTE D'IVOIRE



C.R.O. : Centre de Recherches Océanographiques.

- le laboratoire de Phytopathologie qui étudie les virus attaquant le manioc et l'arachide,
- le laboratoire de Nématologie. Dans ce laboratoire, on cherche les moyens de lutte contre les nématodes qui sont de petits vers parasites de plantes comme le riz, la canne à sucre et le bananier,
- le laboratoire d'Hydrologie où la recherche est basée sur des mesures et observations du cycle de l'eau s'étalant sur de longues périodes. Nous en parlerons avec plus de précisions dans le chapitre suivant,
- le laboratoire Central d'Analyses qui a pour but de satisfaire aux besoins des divers chercheurs du centre en analyse minérales et végétales.

I.3. Le laboratoire d'Hydrologie

C'est dans ce laboratoire que j'ai fait mon stage de deux mois.

Les chercheurs et techniciens de ce service font des études sur des rivières et des bassins versants afin de pouvoir prévoir ces événements de fréquence rare que sont les étiages et les crues dans les zones susceptibles d'être dotées d'installations du type barrage, pont, etc... Le laboratoire a équipé des bassins représentatifs sur lesquels se font des mesures intensive de pluies dans presque toutes les régions de la Côte d'Ivoire.

Il effectue des opérations contractuelles pour l'O.M.S. (Organisation Mondiale de la Santé) dans le cadre de la lutte contre l'onchocercose.

Ce laboratoire se charge aussi de la formation d'élèves ORSTOM et de stagiaires de vacances.

Il comprend un chef de service, deux chercheurs, deux techniciens, un préparateur, un aide-préparateur, un garçon de laboratoire et un observateur météo.

Lors de mon second stage d'été dans ce laboratoire, j'ai eu l'occasion de participer à certaines tournées de jaugeage

sur grandes rivières et à une campagne de simulation de pluie sur le bassin représentatif de Booro-Borotou où j'étais déjà pour les observations hydro-pluviométriques du mois de juillet 1984. Ce bassin se situe à 25 km de Touba et à deux kilomètres à l'ouest du tronçon Touba - Odienné.

II. JAUGEAGES SUR GRANDES RIVIÈRES

Dans le cadre de son programme de lutte contre l'onchocercose, l'Organisation Mondiale de la Santé a besoin de connaître la relation hauteur - débit donc l'étalonnage des rivières qu'elle traite. C'est pourquoi elle a demandé au laboratoire d'Hydrologie de l'ORSTOM de lui faire des jaugeages sur certains fleuves et rivières du pays à savoir la Férédougouba à N'Golodougou et à Badala, la Boa à Niamotou, le Gbanhala à Guéléban, le Bandama à Brimbo et la Marahoué à Bouaflé.

Le jaugeage se fait soit à partir d'un pont, soit avec un canot pneumatique de marque ZODIAC.

II.1. Passage du câble

La matérialisation de la section de jaugeage, dans le cas de l'utilisation d'un canot pneumatique, se fait à l'aide d'un câble gradué en mètres. Ces graduations servent à repérer les verticales sur lesquelles on fait une série de cinq mesures régulièrement réparties sur toute la hauteur d'eau.

Le câble est installé à chaque jaugeage. On dispose, d'un moteur de marque JOHNSON qu'on fixe à l'arrière du canot pneumatique en période des hautes eaux. Le câble, en acier de 3 mm de diamètre, est enroulé sur un tambour pouvant être freiné lors de son déroulement pour assurer la tension.

Le tambour, installé sur l'une des rives de la rivière, est monté sur un bâti lui-même fixé au sol par des barres à mines.

Le brin libre du câble est équipé d'un mousqueton qui permet sa fixation rapide, sur la berge opposée au tambour, à un point fixe préalablement repéré ou préparé. Au cours de cette opération de passage du câble l'embarcation est dirigée vers l'amont afin de pouvoir contrebalancer la vitesse du courant.

Une fois le câble en place, il ne reste plus qu'à le tendre au moyen d'une manivelle qu'on manoeuvre avec précaution.

II.2. Description du matériel

Le jaugeage s'effectuant à partir du pont ou avec le canot nécessite le dispositif suivant :

II.2.1. Le Saumon

C'est une masse de 25 kg qui a la forme du poisson dont il porte le nom.

On fixe à l'une de ses extrémités le moulinet et à l'autre un gouvernail permettant à l'hélice de se mettre dans le sens du courant.

Le saumon repose sur un pied dont la base est située à 18 cm de l'axe de l'hélice, ce qui empêche le contact entre l'hélice et le fond des rivières.

II.2.2. L'hélice

Celle que nous avons utilisée est en matière plastique, sa formule de tarage donnant la vitesse du courant d'eau en fonction du nombre de tour d'hélice est :

$$\text{Pour } n < 0,58 \quad V = 0,2238 n + 0,018$$

$$\text{Pour } n \geq 0,58 \quad V = 0,2463 n + 0,005$$

avec V : vitesse du courant en m/s

n : nombre de tours d'hélice par seconde.

II.2.3. Le treuil

C'est un appareil qu'on monte sur un porte-à-faux. Il est composé d'un tambour sur lequel s'enroule un câble électro-porteur et d'un système d'affichage pour mesurer les différentes profondeurs. Le câble est d'une part relié au saumon et au moulinet, et d'autre part, à un compteur automatique qui affiche pour un temps donné (30 secondes par exemple) le nombre de tours effectués par l'hélice.

II.3. Dépouillement de jaugeage

A chaque verticale, on calcule les différentes vitesses correspondant à chacun des points de mesure (voir Tableau 1). On trace ensuite la courbe vitesse (m/s) en fonction de la profondeur (m). Le planimétrage de la surface limitée par cette courbe donne le débit élémentaire p.u. en mètre carré par seconde (m^2/s)

Ces différentes courbes et leur p.u. se trouvent en annexe 1.

Chacune des verticales étant repérée par une distance à partir d'une rive de référence, on trace alors la courbe des débits élémentaires en fonction de la distance à laquelle se trouve la verticale correspondante. Le débit Q (m^3/s) cherché est obtenu par planimétrage de cette nouvelle parabole. (fig. 1).

Le jaugeage que nous avons effectué le 23 juillet 1985 sur la Féredougouba à la Station de N'Golodougou aux cotes début 2,80 - 2,79 m et fin 2,82 m nous a donné le débit de 142,8 m^3/s .

La section mouillée qu'on obtient aussi par planimétrage de la surface, profondeur en fonction de la distance de chaque verticale, nous permet de déterminer une profondeur moyenne $P_m = \frac{S_m}{l}$ avec S_m = section mouillée

l = largeur de la section.

Ici $S_m = 133,56 m^2$, $l = 76 m$ donc $P_m = 1,76 m$.

On détermine aussi une vitesse moyenne U par la relation $U = \frac{Q}{S_m}$. Cette vitesse moyenne est égale à 1,07 m/s.

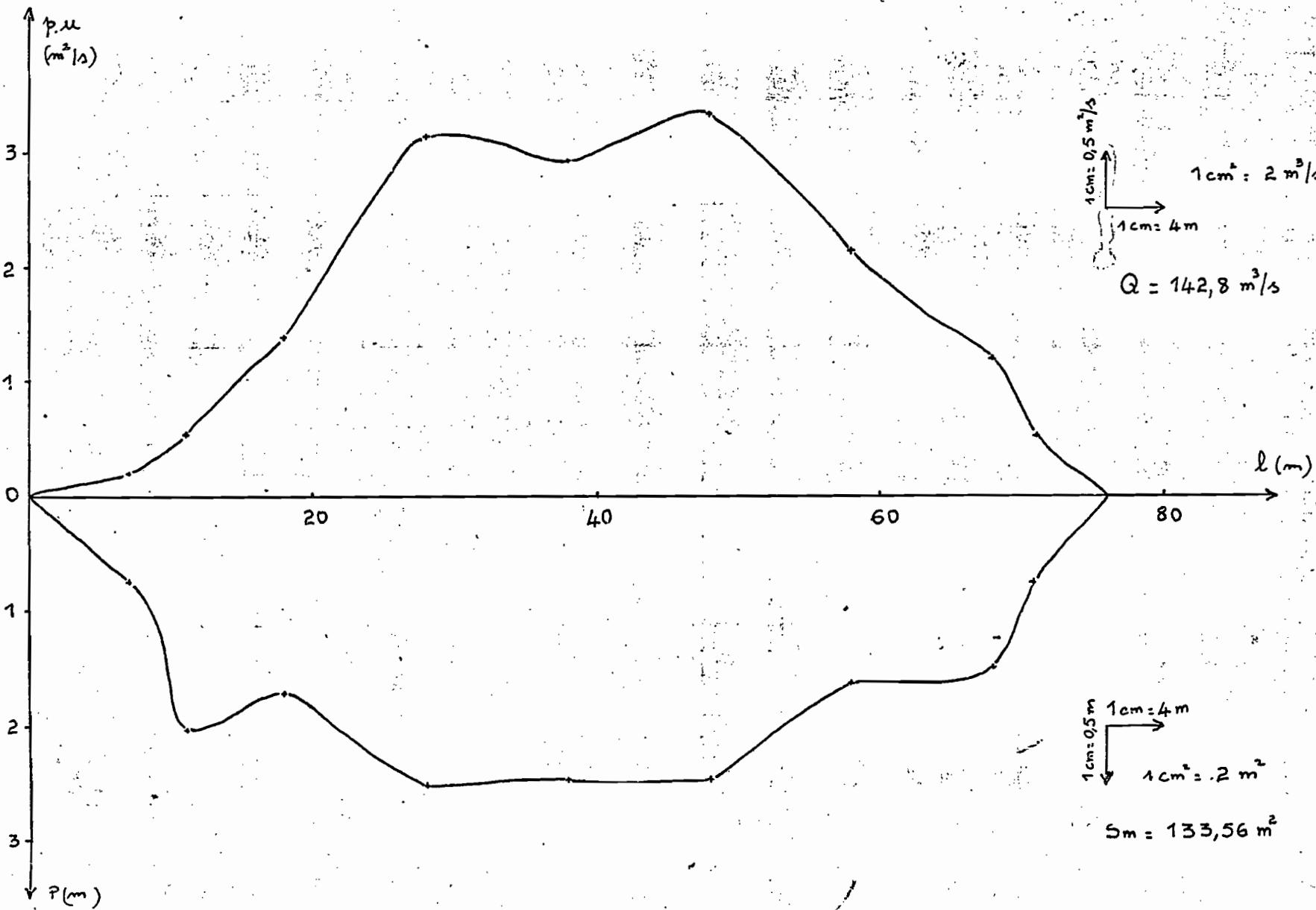
La vitesse maximale observée pour ce jaugeage est de 1,89 m/s.

Tableau 1. : DONNEES DE BASE DU JAUGEAGE DU 23.07.1985

Rivière : FEREDOUGOUBA	JAUGEAGE DU : 23.07.1985								N°
Station : N° GOLODOUGOU	Emplacement de la section : Nouveau Pont								Hauteurs
Observations : Mesures à partir du fond	Moulinet : C3 Hélice n° 1/70406 Pas :								D8 ^H 50
D'axe 18 cm	Formule de tarage :								D280/279
	Nature de la section : Rochers Heure								F9 ^H 40
	Opérateur : ETIENNE-BROU-OUATTARA								F282
Distances	Prof's	Prof" Moulinet	Anglo cable	Prof" corrigées	N/tours	T/sec.	N/T	V m/sec	Observations
R.G. = 0									
V1	7,00 m	074	056		11	10 s	0,367	0,276	Fond
			035		32	30 s	1,07	0,269	
			010		32	30 s	1,07	0,269	Surface
V2	11,00m	201	183		23	30 s	0,767	0,194	
			140		26	30 s	0,867	0,218	
			100		31	30 s	1,03	0,260	
			050		42	30 s	1,40	0,350	
			010		41	30 s	1,37	0,342	
V3	18,00m	171	153		74	30 s	2,47	0,613	
			110		103	30 s	3,43	0,851	
			070		110	30 s	3,67	0,908	
			040		119	30 s	3,97	0,982	
			010		101	30 s	3,37	0,834	
V4	28,00	252	234		84	30 s	2,80	0,695	
			180		134	30 s	4,47	1,11	
			130		157	30 s	5,23	1,29	
			060		177	30 s	5,90	1,46	
			010		201	30 s	6,70	1,66	
V5	38,00	248	230		0	30 s	0	0,000	
			200		80	30 s	2,67	0,662	
			130		163	30 s	5,43	1,34	
			060		196	30 s	6,53	1,61	
			010		216	30 s	7,20	1,78	
V6	48,00	248	230		73	30 s	2,43	0,604	
			180		122	30 s	4,07	1,01	
			130		186	30 s	6,20	1,53	
			060		230	30 s	7,67	1,89	
			010		181	30 s	6,03	1,49	

Tableau 1. : DONNEES DE BASE DU JAUGEAGE DU 23.07.1985 (suite)

Fig.1 : DETERMINATION DU DEBIT Q ET DE LA SURFACE MOUILLEE Sm.



III. SIMULATION DE PLUIE

III.1. Objectif de la simulation

Le but recherché par l'emploi du mini-simulateur est de reconstituer par des pluies artificielles sur des parcelles de un mètre carré (1 m^2) l'ensemble des lames de crues et de définir les lames ruisselées décennales. Ces pluies ont les mêmes intensités, durées et fréquences que les pluies naturelles.

Connaître le rapport pluie - débit est essentiel pour résoudre les problèmes de dimensionnement d'ouvrages hydrauliques (évacuateurs de crue, hydraulique routière...). Sans faire d'études de longue durée, la simulation de pluie en quelques mois doit permettre de cerner sur un bassin le processus de génèse des crues.

Cette méthode présente un certain nombre de limites :

- évaluation des lames de crue à partir des données recueillies sur des parcelles de un mètre carré. C'est un problème d'échelle qui est alors posé,
- répartition spatiale des parcelles par rapport à l'exutoire,
- nature de la végétation lors de la campagne. La simulation de pluie a en général lieu en saison sèche. Mais pour mieux cerner l'influence de la végétation sur les résultats, on est amené à faire des campagnes en saison des pluies. C'est à un de ces campagnes que j'ai participé.

III.2. Présentation du dispositif

Le mini-simulateur ou infiltromètre à aspersion (fig. 2) a été mis au point par des chercheurs du Centre ORSTOM (J. ASSELIN et C. VALENTIN). Il comprend une tour en forme de pyramide tronquée ayant une hauteur de quatre mètres. C'est au sommet de cette tour qu'est fixé le système d'aspersion qui est un gicleur calibré donnant des gouttes de taille comparable à celle des pluies naturelles. L'énergie cinétique des gouttes au sol a été étudiée et on se rapproche également de celle observée sous pluies naturelles.

Le gicleur est solidaire d'un balancier qui oscille grâce à un moteur d'essuie - glace alimenté par une batterie. L'eau arrive au gicleur par l'intermédiaire d'une motopompe raccordée à un réservoir d'eau. La pression d'eau est maintenue constante (0,4 bar) par un manomètre situé juste avant le gicleur.

La variation de l'amplitude de balancement du gicleur permet de modifier la surface arrosée, ce qui conduit donc à un changement d'intensité de pluie interceptée sur la parcelle. La gamme des intensités qu'on peut obtenir s'étend entre 40 et 150 mm/h.

Un dispositif de bâche fixée sur la tour neutralise l'action du vent, cause de l'essentiel des erreurs de mesure en pluviométrie.

La parcelle de un mètre carré que l'on étudie est limitée par un cadre carré de un mètre de côté. Ce cadre dont la base est enfoncee dans le sol comporte sur la partie superficielle un côté percé de petits trous servant à collecter dans une gouttière l'eau de ruissellement. On doit donc déterminer la pente du terrain afin que le côté troué soit situé dans le sens de la pente.

La gouttière est reliée à une cuve cylindrique calibrée surmontée d'un limnigraphie OTT de laboratoire. Cette dernière est telle qu'à un millimètre de ruissellement sur la parcelle correspond une élévation de un centimètre sur le limnigraphie. La vitesse d'avancement est de 6 mm/mn.

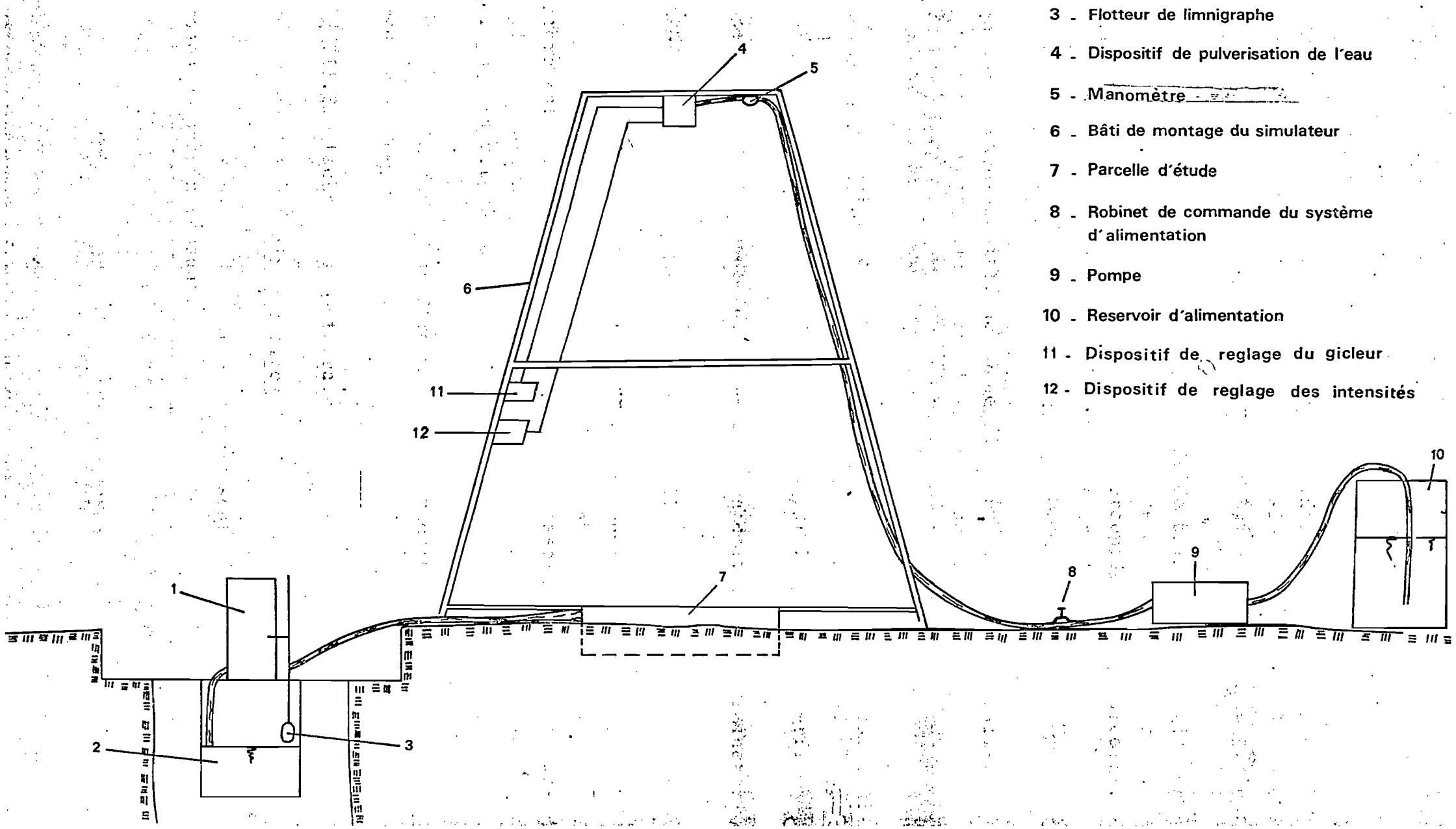
La cuve peut être vidangée rapidement en cours de manipulation.

III.3. Techniques de terrain

III.3.1. Choix des sites

Les sites doivent être représentatifs des différentes zones du bassin versant.

Fig.20: MINI SIMULATEUR DE PLUIE



On les choisit donc en fonction de l'état de surface, terme qui recouvre le couvert végétal, les unités pédologiques et les organisations pelliculaires superficielles.

Un élément non moins important à prendre en compte est l'accessibilité au site. En effet pour pouvoir transporter l'eau nécessaire aux pluies simulées il faut des pistes. Cette condition a été résolue dans notre cas sans problème puisqu'en zone de savane il est facile de tracer des routes.

Le choix des sites est la phase délicate de l'application du modèle de la simulation. On opère de la façon suivante :

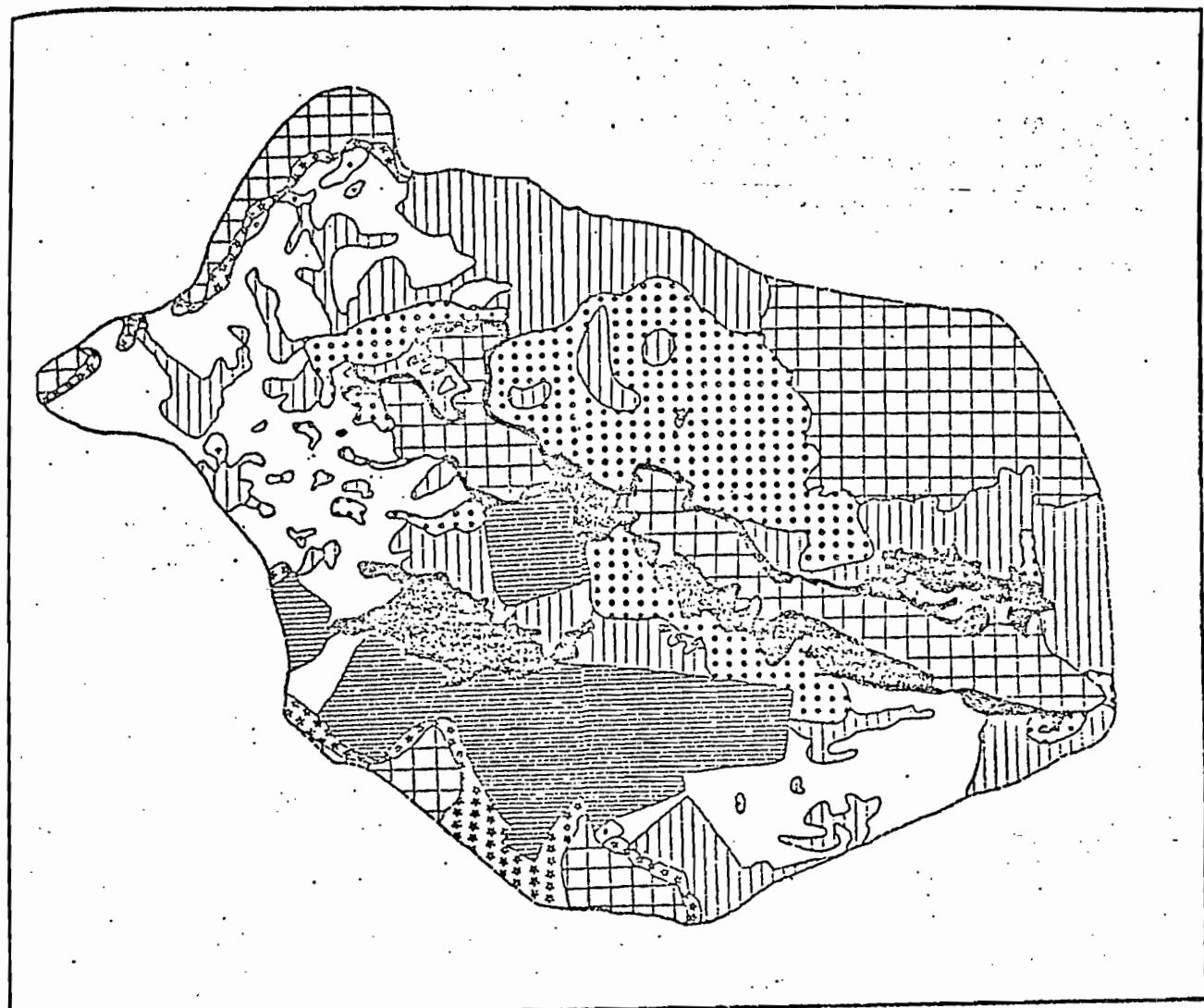
1. On dresse une carte des paysages (dite des organisations superficielles) (fig. 3).
2. On choisit un nombre le plus limité qu'il soit possible d'obtenir des parcelles qui rendent compte des paysages du bassin.

Un site admet une ou plusieurs parcelles. La différenciation au niveau de ces dernières (quand il y a plusieurs parcelles) réside par exemple sur la végétation. On peut avoir une parcelle A sur laquelle la végétation en place a été conservée et une parcelle B installée sur brûlis. Pour un même site les parcelles sont placées à quelques mètres ou dizaines de mètres les unes des autres.

Le modèle de la simulation admet que les différentes lames ruisselées mesurées sur les parcelles de un mètre carré sont transposables à l'ensemble du bassin versant en tenant compte des surfaces représentées par chaque parcelle.

Sur le bassin de Booro-Borotou six sites englobant neuf parcelles ont été choisis pour la première campagne en saison sèche (février, mars 1985). En saison des pluies on n'a retenu que quatre de ces sites et cinq parcelles. La description de l'ensemble des sites a été effectuée par des pédologues de l'ORSTOM : C. VALENTIN et IRIS.

FIG.3 : ESQUISSE DES ORGANISATIONS SUPERFICIELLES DU BASSIN DE BOORO.



LEGENDE :

- [grid] Plateau cuirassé - plateau forestier - forêt galerie
- [cross-hatch] savane herbeuse
- [dotted] surfaces très enherbées à forte infiltrabilité
- [horizontal lines] champs et jachères dégradés
- [vertical lines] jachères et savane très peu arboreé
- [diagonal lines] surfaces en marche d'escalier
- [empty box] savane arboreé
- [circle] chaos de cuirasse onde de granite
- [star] piémont de plateau cuirassé à faible perméabilité.

- site 1 : Galerie forestière, bas-fond.

- * Quelques recrûs ligneux
- * jusqu'à 57 cm de profondeur matériau gris sableux, peu structuré et en-dessous un horizon bariolé blanc et ocre.
- * pas de réserve hydrique.
- * en surface présence d'un mulch d'agrégats favorisant l'infiltration.

. Parcelle n° 1:

- + pente = 5,6 %.

- site 4

. Parcelle n° 5 : jachère récente

- + micro-agrégats, sable grossier, sable fin et plasma.
- + organisation superficielle marquée, porosité fissurale < 1 mm.
- + érosion faible
- + pente = 3,8 %.

. Parcelle n° 6 : Savane arborée dense à herbes hautes

- + litière discontinue à épaisseur très faible.
- + organisation superficielle faible
- + érosion faible
- + pente 3,1 %.

- site 5 : Jachère ancienne

- * strate arbustive à distribution par tâches
- * organisation superficielle marquée
- * érosion et activité faunique fortes.

. Parcelle n° 8

- + Une touffe centrale et des tiges vertes dispersées
- + Gravillons superficiels
- + pente = 8,4 %.

- site 6 : Savane arbustive dense.

- * strate arborée, strate herbacée en touffes de distribution aléatoire.
- * des tiges, des graines, quelques rampants, des feuilles couvrent la surface du sol.
- * organisation superficielle faible
- * érosion nulle.

. Parcelle n° 9

- + pente faible.

Les cinq parcelles testées en saison des pluies représentent 84 % de la superficie du bassin. Nous voyons qu'elles représentent la plupart des paysages du bassin. Elles permettront donc l'application du modèle de simulation précédemment décrit. Les 16 % non testés de la superficie seront estimés par extrapolation en se basant sur les données de la simulation en saison sèche car la végétation ne présente pas de différences sensibles entre saison sèche et saison humide sur ces 16 %.

III.3.2. Etalonnage de l'appareil

On veut avoir des pluies simulées, de 60 mn de recourence annuelle "A", dont les intensités sont réparties de la façon suivante.

Durée (mn)	10	10	10	10	10	10
Intensité (mm/h)	40	60	120	90	75	40

Pour cela sur la feuille du limnigraphie, qui a son axe des abscisses gradué en temps et celui des ordonnées en hauteur d'eau ruisselée, on trace des droites dont les pentes sont les intensités souhaitées.

On recouvre la parcelle par une bâche de 4 m² environ et on superpose au cadre de la parcelle déjà implanté un bac en tôle de 1 m².

L'étalonnage consiste donc à faire varier l'angle d'oscillation par le biais d'une tige filetée réglée à partir d'un compteur à chiffres sautants et d'une plaque munie de trous. Il est jugé satisfaisant pour chaque intensité lorsque pendant les pluies d'essai sur le bac la droite obtenue est sensiblement confondue à celle tracée au préalable. On note alors le nombre de tours affiché par le compteur et le numéro du trou qu'occupe le bras de levier. Après chaque pluie simulée on vérifie l'éta-lonnage en remettant le bac de tôle et en affichant le nombre de tours de la tige et le numéro du trou correspondant aux différentes intensités.

III.3.3. Suivi de l'humidité du sol

Il a pour but de connaître l'état d'humectation du sol. Il existe plusieurs méthodes pour l'appréhender :

- la mesure par sonde à neutrons
- la mesure par chocs thermiques
- la mesure gravimétrique
- le calcul de l'indice d'humectation IK.

A Booro-Borotou seules les deux dernières techniques citées ont été retenues.

III.3.3.1. Méthode gravimétrique

On a appliqué la technique de la pesée des échantillons qui est une méthode gravimétrique. Elle consiste à prélever à la tarière de 30 mm de diamètre trois échantillons, à 5, 10, 20, 30... 60 cm de profondeur, dans l'anneau de garde des parcelles avant chacune des pluies simulées. Ces échantillons enfermés dans des boîtes étanches sont pesés humides sur le terrain puis secs à Abidjan après dessication dans une étuve à 105°C pendant 24 h.

L'humidité pondérale de chaque échantillon s'obtient par la relation :

$$H_p = \frac{P_h - P_s}{P_s - t} \times 100.$$

avec H_p = humidité pondérale en %.

P_s = Poids de l'échantillon sec en g.

P_h = Poids de l'échantillon humide en g.

t = Tare de la boîte de prélèvement en g.

L'humidité pondérale de chaque profondeur est donnée par la médiane des valeurs des trois échantillons considérée comme significative.

Je ne pourrai pas donner dans mon rapport les résultats de cette méthode parce que je n'ai fait que les prélèvements sur le terrain, le passage à l'étude ayant lieu après mon stage.

III.3.3.2. Indice d'humectation

C'est un indice de type KOHLER et LINSLEY (1951) dont l'expression retenue dans le cadre de la simulation est définie par CASENAVE (1982). Elle est la suivante :

$$I_{Kn} = (I_{Kn-1} + P_{n-1}) e^{-\alpha t_a}.$$

où I_{Kn} = valeur de l'indice avant la pluie n.

I_{Kn-1} = valeur de l'indice avant la pluie n-1

P_{n-1} = Hauteur de la pluie n-1.

t_a = temps en fraction de jours séparant la fin de la pluie n-1 du début de la pluie n.

α = coefficient d'ajustement ici égal à 0,5.

En saison sèche, les pluies simulées étaient de recrudescence annuelle "A" et décennale "D". Sur une parcelle il y a eu six averses. Par contre en saison humide nous n'avons fait que trois pluies simulées de recrudescence annuelle. La fourchette des indices d'humidité IK qui nous était demandée est la suivante.

1ère pluie A : $0 < IK < 20$

2ème pluie A : $20 < IK < 40$

3ème pluie A : $IK > 40$.

En saison des pluies il serait difficile d'effectuer six pluies simulées compte tenu du fait que l'indice d'humidité est lié à la pluviométrie. Il risque d'y avoir des interférences entre pluies naturelles et pluies simulées. Nous avons essayé de résoudre ce problème en couvrant avec une bâche la parcelle que nous testons. Notons cependant que l'indice d'humectation IK que nous calculons avant chaque pluie simulée n'est pas très significatif pour évaluer le degré d'humidité en saison humide. On peut expliquer cette situation par le fait qu'en protégeant les parcelles pour ne pas tenir compte des pluies naturelles dans le calcul de IK on néglige l'effet de l'infiltration pourtant considérable autour de la bâche et on bloque aussi l'évapotranspiration sur la parcelle. L'humidité du sol sera certainement mieux rendue par les mesures gravimétriques non dépouillées lors de mon stage.

III.4. Analyse des données à l'échelle de la parcelle

Sur les cinq parcelles étudiées pendant la campagne de la saison des pluies je ne mentionnerai que les résultats de quatre (annexe 2), la cinquième (parcelle n° 9) n'ayant pu être testée à temps pour des raisons d'ordre technique.

III.4.1. Coefficients de ruissellement Kru et Kre

Le coefficient de ruissellement est l'aptitude du sol au ruissellement. Ses expressions en fonction de la pluie utile (Pu) et de la pluie efficace (Pe) sont :

$$Kru = \frac{Lr+Dr}{Pu} \times 100 \quad (\text{en \%}).$$

$$Kre = \frac{Lr+Dr}{Pe} \times 100 \quad (\text{en \%})$$

avec $Pe = Pu - Pi$.

Dr qui est la lame recueillie après la fin de la pluie est une donnée faible sur toutes les parcelles.

La pluie d'imbibition Pi est la hauteur de pluie absorbée par la parcelle pour le remplissage des dépressions de la surface avant l'apparition du ruissellement.

Tableau 2 : Coefficients de ruissellement utile Kru (%)
saison sèche - saison humide.

	Parcelles			
	1	5	6	8
saison sèche	0,24	22,0	12,0	54,0
saison humide	0,35	42,4	16,6	56,9

Ce tableau nous montre que le ruissellement est plus important en saison des pluies. Ce phénomène pourrait être dû au couvert végétal qui n'est pas le même pendant les deux saisons. En effet en saison des pluies le sol est peu couvert de feuilles, les herbes sont hautes. Ce sont des facteurs qui favorisent le ruissellement.

Remarquons tout de même qu'à l'exception de la parcelle n° 5 dont le coefficient de ruissellement a fortement augmenté les autres parcelles ont à peu près le même comportement tant en saison sèche qu'en saison humide.

On voit aussi que la parcelle n° 1 ne ruisselle pratiquement pas. Elle est située dans un bas-fond où on note la présence d'un mulch d'agrégats favorisant l'infiltration.

III.4.2. Intensité de ruissellement

Dès que le régime de ruissellement se stabilise la court lame ruisselée en fonction du temps, pour une intensité (I) donnée est une droite. La pente de cette droite est l'intensité maximale de ruissellement (Rx). On définit aussi l'intensité minimale d'infiltration (Fn). Cette dernière est obtenue par différence :

$$Fn = I - Rx.$$

L'annexe 3 donne les valeurs de Rx et de Fn en fonction de l'intensité des pluies pour chaque parcelle.

Les valeurs de Rx et Fn sont influencées par les facteurs suivants :

- l'intensité de la pluie
- l'état d'humectation initial
- la nature du sol et l'état de surface.

III.4.3. Relation lame ruisselée - pluie utile - indice d'humidité.

C'est une relation de la forme

$$Lr = a \cdot IK + b.$$

On l'obtient par une méthode graphique à partir des valeurs de la lame ruisselée (Lr) et de la pluie utile (Pu) mesurées au pas de cinq minutes (Annexe 4) et des valeurs de l'indice d'humidité correspondant à chacune des pluies.

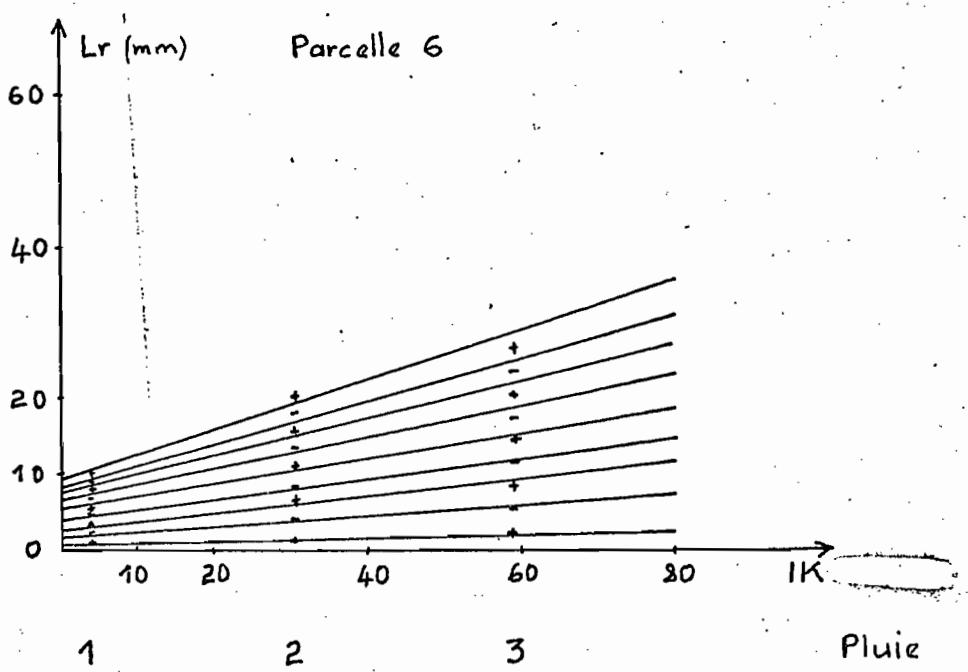
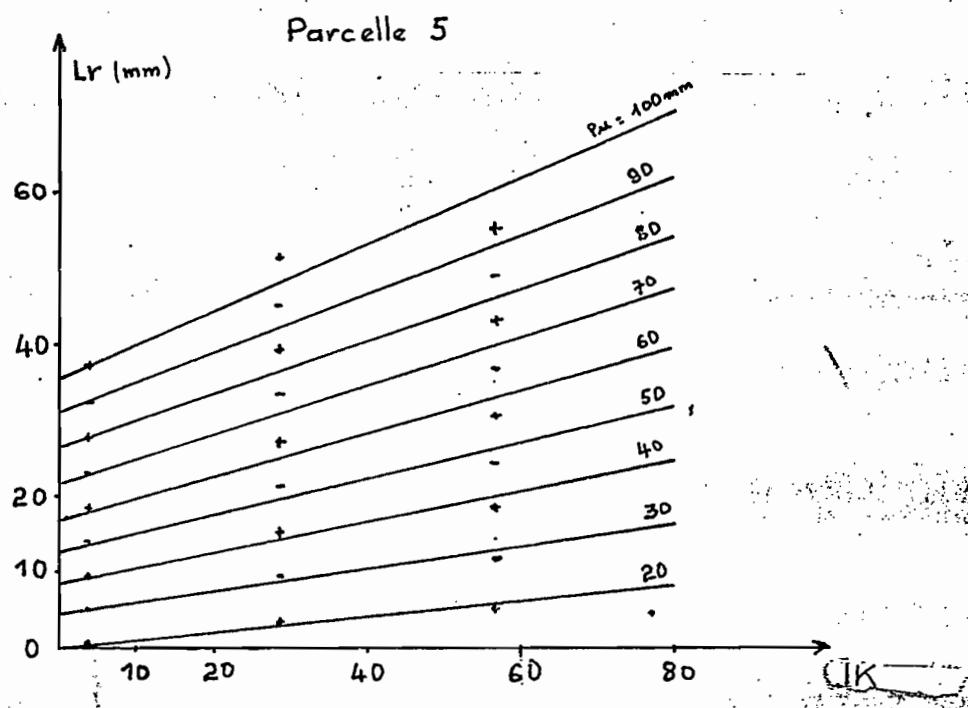
Les paramètres a et b sont des fonctions de la pluie utile. A partir des courbes $Lr = f(Pu)$ (Annexe 5) on extrait les valeurs de Pu (20, 30, 40, ..., 100 mm) et les lames ruisselées correspondantes pour chacune des pluies. On trace ensuite les droites $Lr = f(Pu, IK)$ (fig. 4) issues de la même valeur de la pluie utile pour les trois indices d'humidité calculés. Pour déterminer le paramètre b on relève sur la courbe $Lr = f(Pu, IK)$ les valeurs de l'intersection des différentes droites avec l'axe des ordonnées (Lr) et les Pu correspondantes. La droite obtenue par ces points est de la forme $b = \alpha Pu + \beta$.

Pour a on procède de la même façon mais avec les pentes des droites $Lr = f(Pu, IK)$. (annexe 6). Les relations $Lr = f(Pu, IK)$ pour les parcelles 5 et 6 sont respectivement :

$$Lr_5 = (0,0041 \cdot Pu \cdot IK) + (0,038 \cdot IK) + 0,0044 \cdot Pu - 0,088 \text{ et}$$

$$Lr_6 = (0,0037 \cdot Pu \cdot IK) - (0,045 \cdot IK) + 0,0058 \cdot Pu - 0,081.$$

Fig. 4: CORRELATION LAME RUISSÉLEE - PLUIE UTILE - INDICE D'HUMIDITÉ



III.5. Transposition des résultats à l'échelle du bassin

Comme je l'ai déjà souligné dans le paragraphe III.3.1. le but visé par l'utilisation du mini-simulateur est de transposer les résultats recueillis sur les parcelles de un mètre carré ($1m^2$) à l'ensemble du bassin. Pour cela on estime par planimétrie la superficie que représente chaque parcelle. On calcule ensuite les coefficients de pondération qui sont les pourcentages de superficie de chacune des parcelles. La lame ruisselée calculée (L_{re}) pour une pluie P_u et un indice d'humectation (IK) est donnée par la relation.

$$L_{rc} = \frac{1}{\sum_{i=1}^N C_i} L_{ri}$$

où C_i = coefficient de pondération de la parcelle i
 L_{ri} = lame ruisselée sur la parcelle i
 N = nombre de parcelles.

Cette lame ruisselée pour la campagne de saison humide ne pourra pas figurer dans mon rapport par manque des données de la parcelle n° 9.

On peut remarquer que le protocole de cette simulation en saison des pluies, trois pluies par parcelle, pourrait poser des problèmes d'exploitation des résultats. S'il survenait une erreur au cours d'une manipulation il serait difficile de la déceler compte tenu du nombre insuffisant de pluies. C'est le cas de la parcelle n° 8 où le ruissellement de la troisième pluie est faible par rapport à ceux des deux premières bien que l'indice d'humidité de cette dernière pluie (IK = 59,3) soit dans les normes, c'est-à-dire supérieur à 40.

CONCLUSION

Ce stage de deux mois que j'ai fait au laboratoire d'Hydrologie du Centre ORSTOM d'Adiopodoumé m'a été utile à plus d'un titre.

Il m'a permis de participer à des séances de jaugeages en bateau sur grandes rivières et à une campagne de simulation de pluie.

La simulation de pluie me donne une seconde fois l'occasion de goûter au milieu à la fois complexe et passionnant de la recherche. Ce travail de recherche répond à mes aspirations parce qu'il comporte deux volets bien liés : le travail de terrain et celui du traitement des données de terrain au bureau.

Mon intégration dans le laboratoire d'Hydrologie n'a pas été difficile compte tenu du fait que j'y ai déjà travaillé deux mois (l'année dernière) avec son personnel.

BIBLIOGRAPHIE

- M. ALDEGHERI : Mesure des débits à partir des vitesses.
- A. CASENAVE : Simulation de pluie sur bassins versants représentatifs.
- FERID SAKLY : Etude du rapport pluie-débit sous pluie simulée sur un petit bassin de savane humide.
- A. GIODA : Etude du rapport pluie-débit sur un petit bassin de savane à l'aide d'un infiltromètre à aspersion.
- périodique ORSTOM - Actualités.

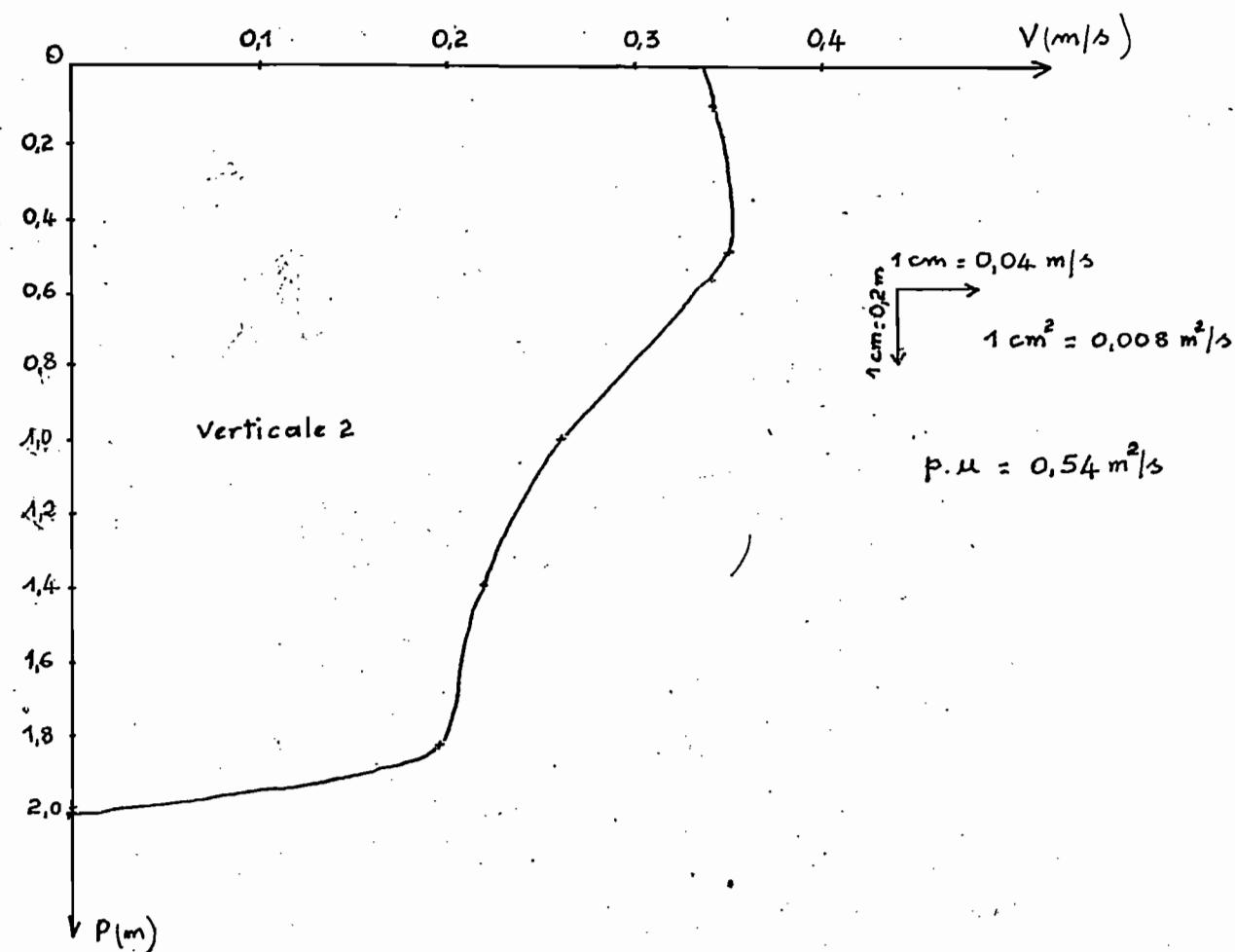
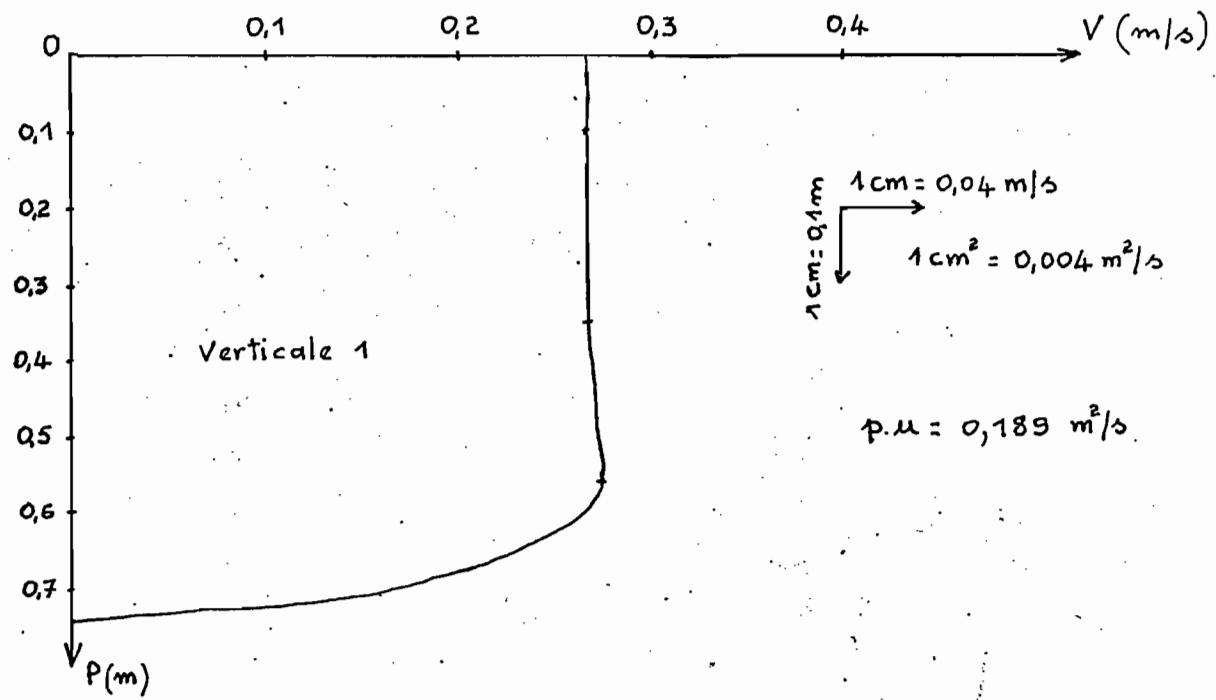
A N N E X E S

0. Notations utilisées
1. Débit élémentaire P_u
2. Infiltromètre à aspersion : Données de base.
3. Infiltromètre à aspersion : Intensités maximales de ruissellement et minimales d'infiltration.
4. Infiltromètre à aspersion : pluies utiles et lames ruisselées mesurées au pas de 5 minutes.
5. Corrélation lame ruisselée - pluie utile.
6. Détermination de $a = f(P_u)$ et de $b = f(P_u)$.

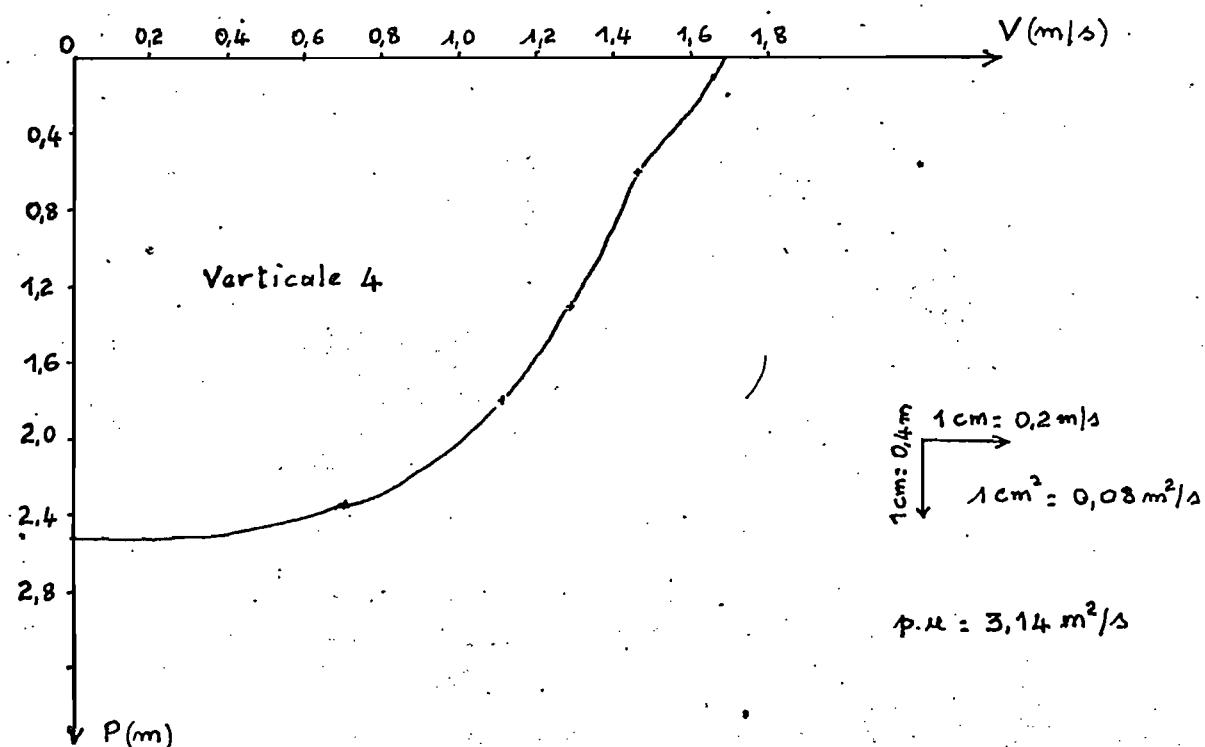
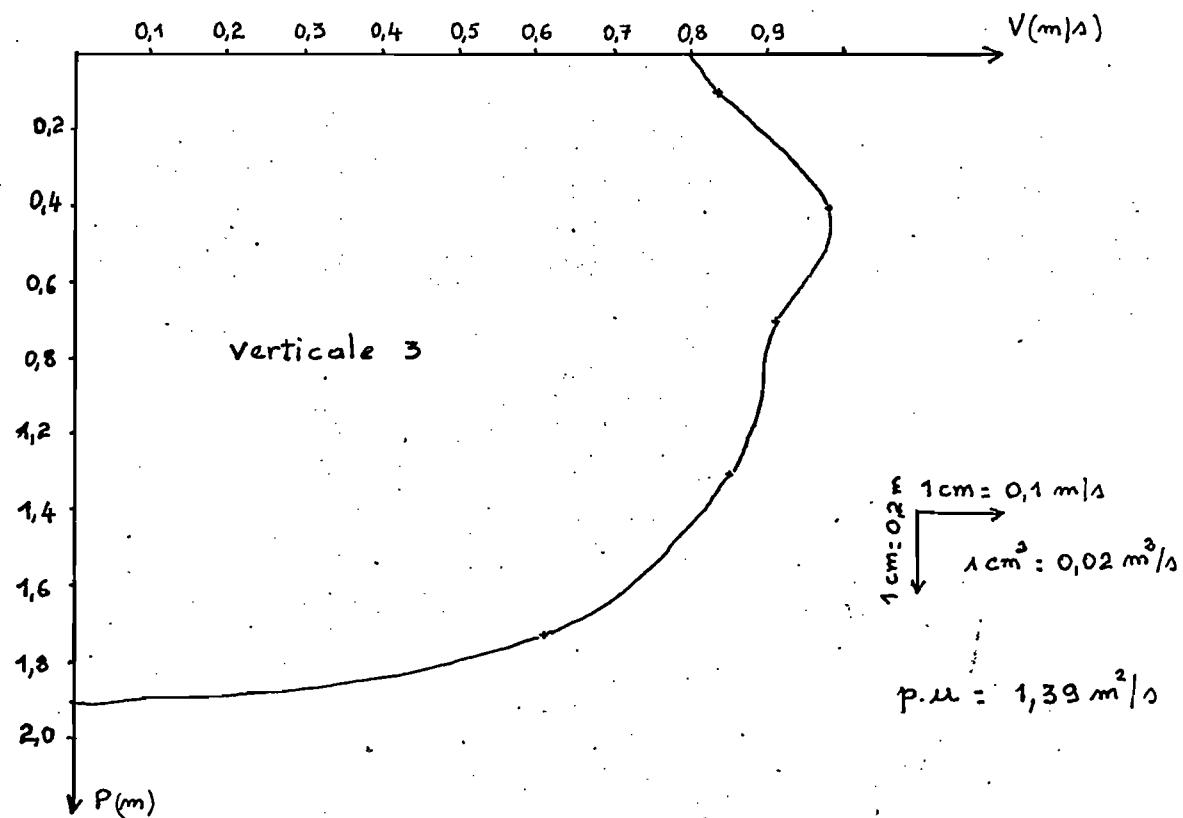
Notations utilisées

- Dr : détention superficielle récupérable (mm)
Fn : intensité minimale d'infiltration (mm/h)
I : intensité de pluie (mm/h)
IK : indice de KOHLER
IKn-1: indice de KOHLER antérieur
Kre : coefficient de ruissellement efficace (%)
Kru : coefficient de ruissellement utile (%)
Li : lame infiltrée (mm)
Lr : lame ruisselée (mm)
Lre : lame ruisselée calculée avec le modèle simulation (mm)
Pa : pluie antérieure, assimilable à Pn-1 dans le calcul de IK (mm)
Pe : pluie efficace (mm)
Pi : pluie d'imbibition (mm)
Ph : poids humide (g)
Ps : poids sec (g)
Pu : pluie utile (mm)
Rx : intensité maximale de ruissellement (mm/h)
t : tare (g)
ta : durée de ressuyage en fraction de jour
te : Durée efficace de la pluie (mn et s)
tu : Durée utile de la pluie (mn et s)
 α : coefficient d'ajustement pris égal à 0,5.

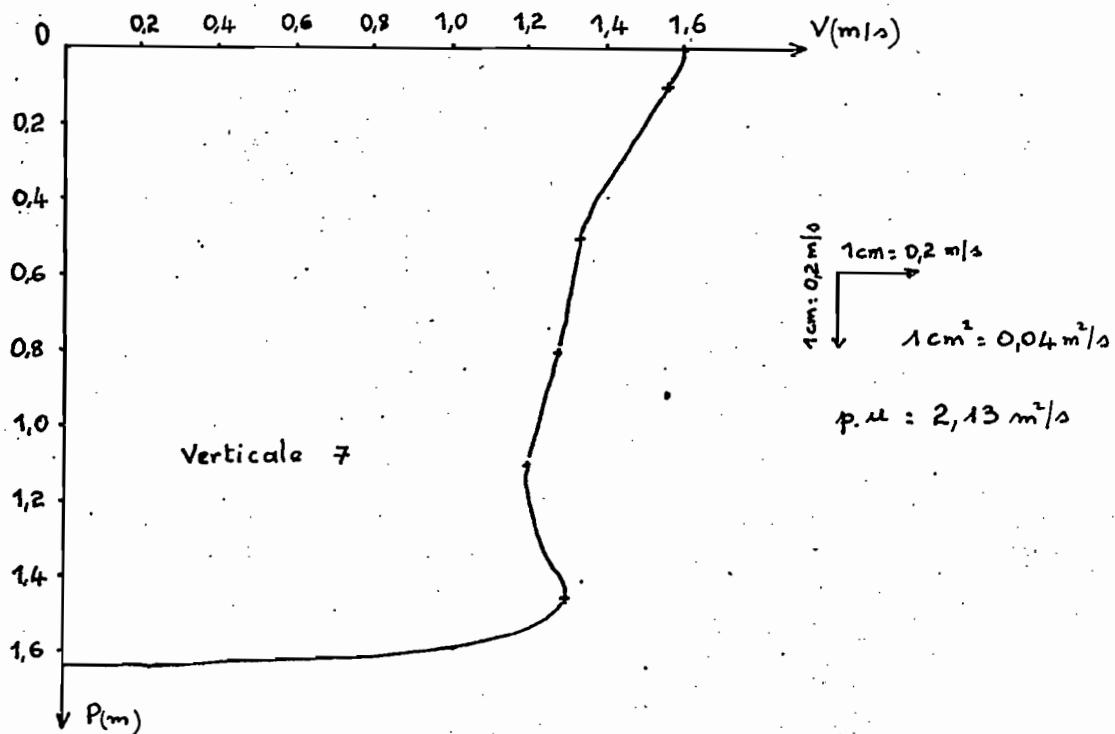
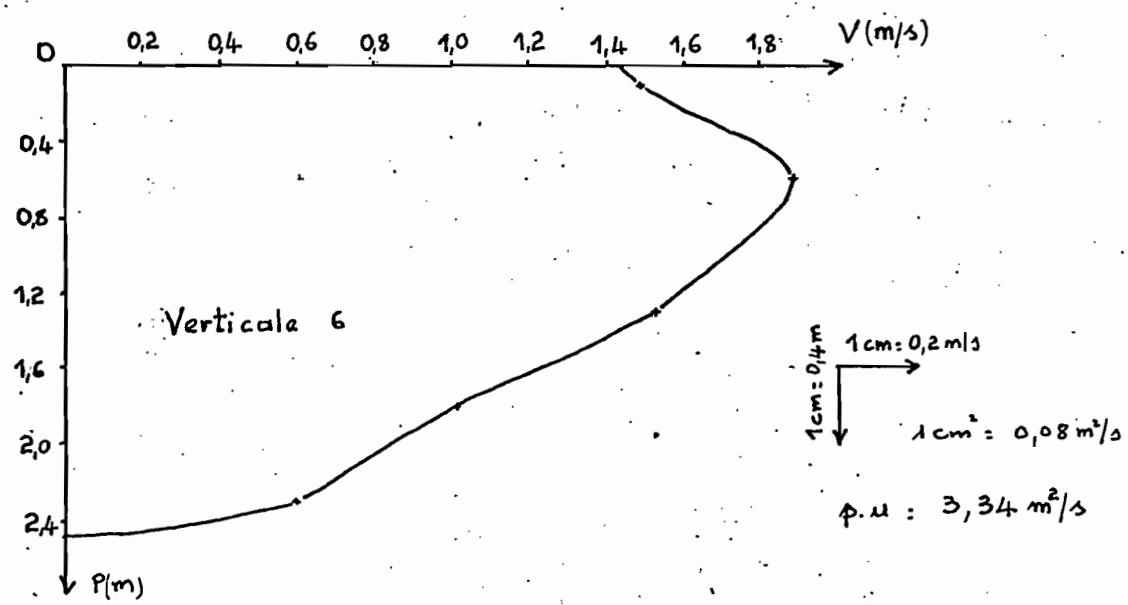
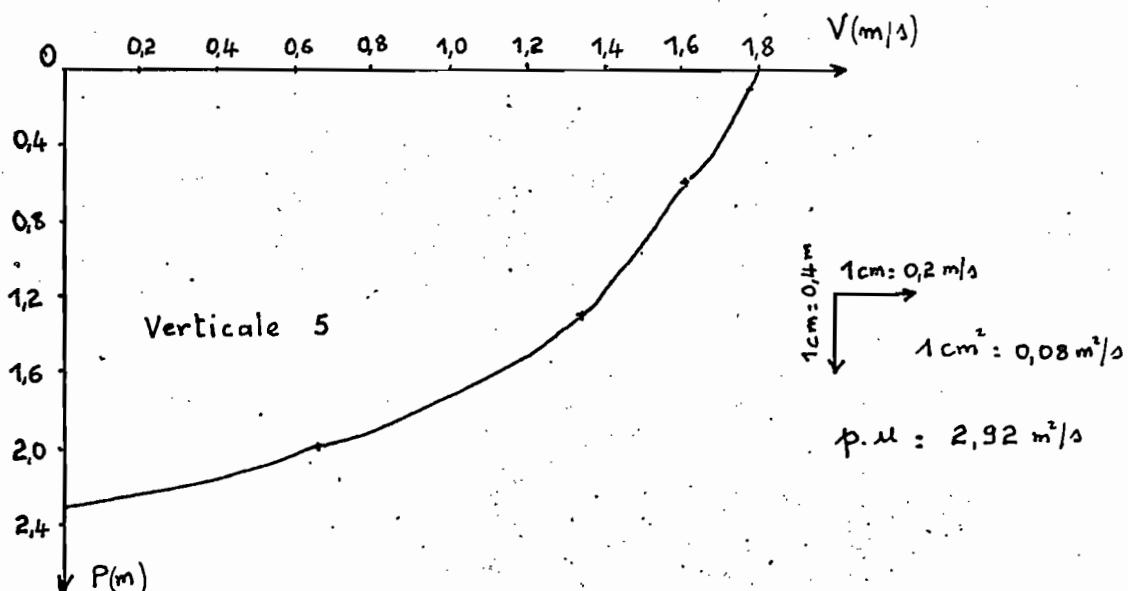
Annexe 1 : DEBIT ELEMENTAIRE p.u.



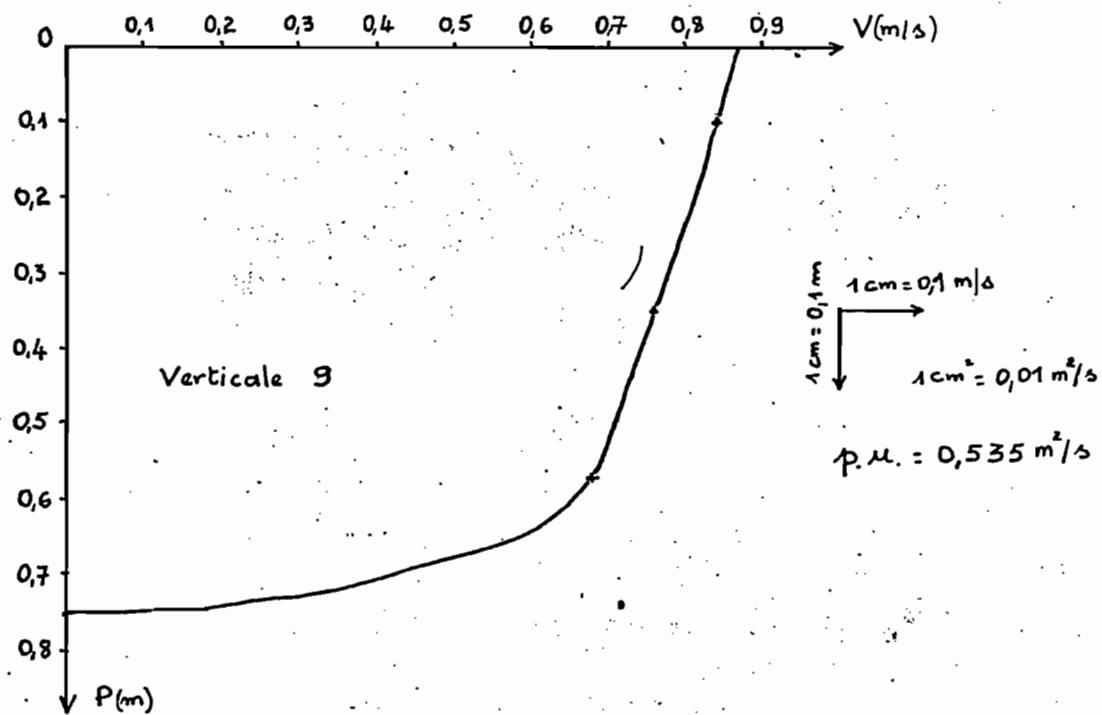
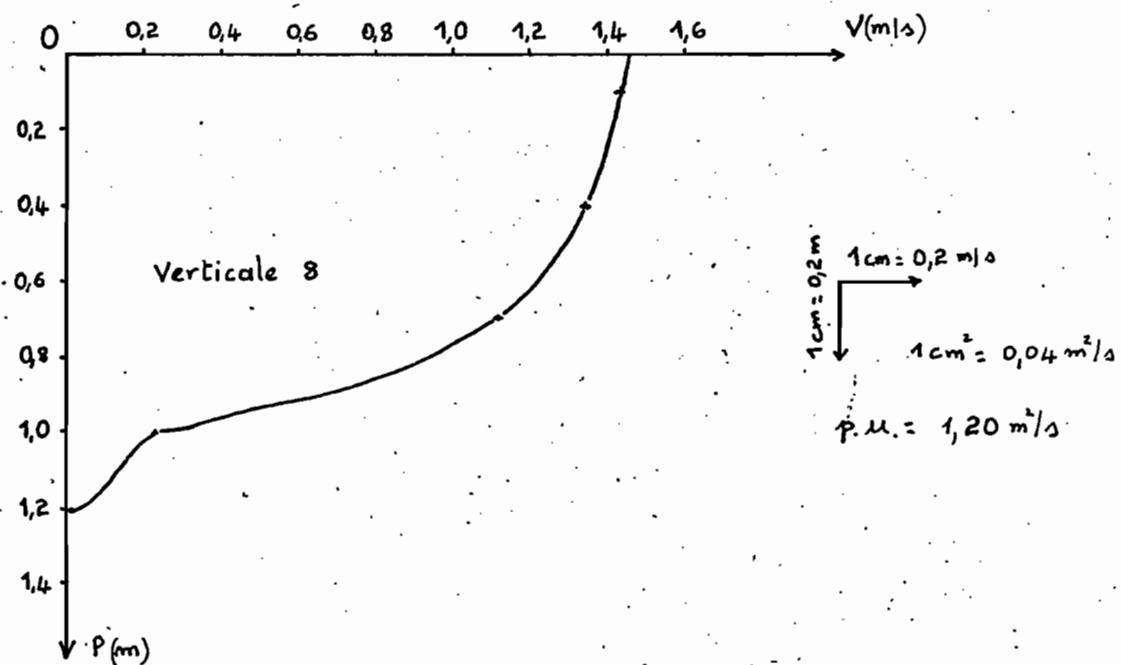
Annexe 1 : DEBIT ELEMENTAIRE p.u.



Annexe 1 : DEBIT ELEMENTAIRE pu.



Annexe 1 : DEBIT ELEMENTAIRE pu.



ANNEXE 2. : INFILTROMETRIE A ASPERSION : DONNEES DE BASE

Parcelle n° 1.

Pluie	Date	Heure	tu (mn/s)	te (mn/s)	ta (H/mn)	Pa (mm)	IK	Pu (mm)	Pi (mm)	Pe (mm)	Lr (mm)	Dr (mm)	Li (mm)	Kru (%)	Kre (%)
1A	02/08	15 ^H 56	60'	30'	80 ^H 43	0,5	3,9	81,8	42,2	39,6	0,4	0	81,4	0,5	1,0
2A	04/08	10 ^H 04	60'	0'	41 ^H 08	81,8	36,4	71,0	71,0	0,0	0,0	0	71,0	0	0
3A	05/08	14 ^H 13	60'	39'	27 ^H 09	71,0	61,0	73,0	19,7	53,3	0,4	0	72,6	0,5	0,75

ANNEXE 2. : INFILTROMETRE A ASPERSION : DONNES DE BASE

Parcelle n° 5

Pluie	Date	Heure	tu (mn/s)	te (mn/s)	ta (H/mn)	Pa (mm)	IK	Pu (mm)	Pi (mm)	Pe (mm)	Lr (mm)	Dr (mm)	Li (mm)	Kru (%)	Kre (%)
1A	13/08	17 ^H 48	60'	42' 00"	141 ^H 55	12,6	3,6	69,4	15,1	54,3	21,1	0	48,3	30,4	38,9
2A	15/08	15 ^H 13	60'	46' 33"	44 ^H 25	69,4	28,9	69,3	9,5	59,8	31,5	0,1	37,7	45,6	52,8
3A	16/08	17 ^H 26	60'	49' 10"	26 ^H 13	69,3	56,9	73,9	8,1	65,8	37,2	0,2	36,5	50,6	56,8

ANNEXE 2. : INFILTROMETRE A ASPERSION : DONNEES DE BASE

Parcelle n° 6

Pluie	Date	Heure	tu (mn/s)	te (mn/s)	ta (mn/s)	Pa (mm)	IK	Pu (mm)	Pi (mm)	Pe (mm)	Lr (mm)	Dr (mm)	Li (mm)	Kru (%)	Kre (%)
1A	13/08	11 ^H 44	60	46' 27"	135 ^H 51	12,6	4,0	73,1	10,7	62,4	6,2	0	66,9	8,5	9,9
2A	15/08	9 ^H 09	60	46' 20"	44 ^H 31	73,1	30,5	70,2	10,6	59,6	12,4	0,1	57,7	17,8	21,0
3A	16/08	10 ^H 47	60	47' 20"	25 ^H 38	70,2	59,0	71,7	10,0	61,7	16,8	0,1	54,8	23,6	27,4

ANNEXE 2. : INFILTROMETRE A ASPERSION : DONNEES DE BASE

Parcelle n° 8

Pluie	Date	Heure	tu (mn/s)	te (mn/s)	ta (mn/s)	Pa (mm)	IK	Pu (mm)	Pi (mm)	Pe (mm)	Lr (mm)	Dr (mm)	Li (mm)	Kru (%)	Kre (%)
1A	08/08	9 ^H 14	60'	55' 30"	109 ^H 46	0,5	5,8	69,5	2,9	66,6	38,4	0,3	30,8	55,7	58,1
2A	10/08	8 ^H 31	60'	53' 44"	46 ^H 17	69,5	28,7	69,5	4,6	64,8	50,4	0,6	18,5	73,4	78,6
3A	11/08	9 ^H 45	60'	54' 10"	24 ^H 14	69,5	59,3	71,0	4,3	66,7	29,4	0,3	41,3	41,8	44,5

ANNEXE 3 : INFILTROMETRE A ASPERSION INTENSITES MAXIMALES
DE RUISSELLEMENT ET MINIMALES D'INFILTRATION

Parcelle n° 1

Pluie 1A			Pluie 2A			Pluie 3A		
I (mm/h)	Rx (mm/h)	Fn (mm/h)	I (mm/h)	Rx (mm/h)	Fn (mm/h)	I (mm/h)	Rx (mm/h)	Fn (mm/h)
52,9	0	52,9	40,0	0	40,0	43,9	0	43,9
69,2	0	69,2	60,0	0	60,0	63,5	0	63,5
130,9	0	130,9	122,0	0	122,0	110,7	0,7	110,0
94,7	1,3	93,4	91,8	0	91,8	92,3	1,2	91,1
90,0	0,9	89,1	72,0	0	72,0	83,7	0,4	83,3
52,9	0	52,9	40,0	0	40,0	43,9	0	43,9

ANNEXE 3 : INFILTROMETRE A ASPERSION INTENSITES MAXIMALES
DE RUISSELLEMENT ET MINIMALES D'INFILTRATION.

Parcelle n° 5

Pluie 1A			Pluie 2A			Pluie 3A		
I (mm/h)	Rx (mm/h)	Fn (mm/h)	I (mm/h)	Rx (mm/h)	Fn (mm/h)	I (mm/h)	Rx (mm/h)	Fn (mm/h)
42,4	0	42,4	38,6	0	38,6	43,4	0	43,4
60,0	4,1	55,9	58,1	21,6	36,5	63,5	28,8	34,7
112,5	55,1	57,4	115,4	75,0	40,4	122,0	84,7	37,3
86,7	43,9	42,8	90,0	60,7	29,3	91,5	62,1	29,4
72,7	25,2	47,5	75,0	40,0	35,0	79,4	43,9	35,5
42,4	4,5	37,9	38,6	11,0	27,6	43,4	13,6	29,8

ANNEXE 3 : INFILTROMETRE A ASPERSION INTENSITES MAXIMALES
DE RUISSELLEMENT ET MINIMALES D'INFILTRATION

Parcelle n° 6

Pluie 1A			Pluie 2A			Pluie 3A		
I (mm/h)	Rx (mm/h)	Fn (mm/h)	I (mm/h)	Rx (mm/h)	Fn (mm/h)	I (mm/h)	Rx (mm/h)	Fn (mm/h)
43,9	0	43,9	41,9	3,4	38,5	43,9	0	43,9
64,2	3,3	60,9	59,3	4,3	55,0	61,3	9,8	51,5
113,9	22,0	91,9	118,0	38,3	79,7	112,5	40,6	71,9
94,7	7,3	87,4	85,7	20,2	65,5	91,5	30,0	61,5
78,2	5,2	73,0	75,0	14,4	60,6	77,1	21,2	55,9
43,9	1,7	42,2	41,9	2,7	39,2	43,9	4,9	39,0

ANNEXE 3 : INFILTROMETRE A ASPERSION INTENSITES MAXIMALES
DE RUISSELLEMENT ET MINIMALES D'INFILTRATION

Parcelle n° 8

Pluie 1A			Pluie 2A			Pluie 3A		
I (mm/h)	Rx (mm/h)	Fn (mm/h)	I (mm/h)	Rx (mm/h)	Fn (mm/h)	I (mm/h)	Rx (mm/h)	Fn (mm/h)
39,1	11,8	27,3	44,4	17,6	26,8	43,9	8,1	35,8
66,1	22,5	43,6	65,1	36,2	28,9	57,6	14,2	43,4
115,4	76,9	38,5	109,1	101,4	7,7	114,3	59,3	55,0
84,9	62,6	22,3	81,8	77,1	4,7	90,0	44,8	45,2
72,6	49,7	22,9	73,5	64,3	9,2	76,6	40,9	35,7
39,1	21,9	17,2	43,4	34,8	8,6	43,9	20,2	23,7

ANNEXE 4 : INFILTROMETRE A ASPERSION : PLUIES UTILES ET LAMES RUISSELEES MESUREES
AU PAS DE 5 MINUTES.

PARCELLE 1

tu (mn)	Pluie 1A		Pluie 2A		Pluie 3A	
	Pu (mm)	Lr (mm)	Pu (mm)	Lr (mm)	Pu (mm)	Lr (mm)
5	4,4	0	3,3	0	3,7	0
10	8,8	0	6,7	0	7,3	0
15	14,6	0	11,7	0	12,6	0
20	20,3	0	16,7	0	17,9	0
25	31,3	0	26,8	0	27,1	0,1
30	42,2	0	37,0	0	36,3	0,2
35	50,1	0,1	44,6	0	44,0	0,3
40	57,9	0,3	52,3	0	51,7	0,3
45	65,4	0,3	58,3	0	58,7	0,4
50	72,9	0,4	64,3	0	65,7	0,4
55	77,4	0,4	67,6	0	69,3	0,4
60	81,8	0,4	71,0	0	73,0	0,4

ANNEXE 4 : INFILTROMETRE A APERSION : PLUIES UTILES ET LAMES RUISSELEES
MESUREES AU PAS DE 5 MINUTES.

PARCELLE N° 5

tu (mn)	Pluie 1A		Pluie 2A		Pluie 3A	
	Pu (mm)	Lr (mm)	Pu (mm)	Lr (mm)	Pu (mm)	Lr (mm)
5	3,5	0	3,2	0	3,6	0
10	7,1	0	6,4	0	7,2	0
15	12,1	0	11,3	0,4	12,5	1,4
20	17,1	0,2	16,1	2,1	17,8	3,8
25	26,4	3,1	25,7	6,8	28,0	9,7
30	35,8	7,2	35,4	12,9	38,1	16,7
35	43,0	11,7	42,9	17,6	45,8	22,1
40	50,3	15,3	50,4	22,3	53,4	27,1
45	56,3	17,8	56,6	25,7	60,0	30,5
50	62,3	19,9	62,9	28,5	66,6	34,1
55	65,9	20,7	66,1	30,6	70,2	36,0
60	69,4	21,1	69,3	31,5	73,9	37,2

ANNEXE 4 : INFILTROMETRE A ASPERSION : PLUIES UTILES ET LAMES RUISSELEES
MESUREES AU PAS DE 5 MINUTES.

PARCELLE N° 6

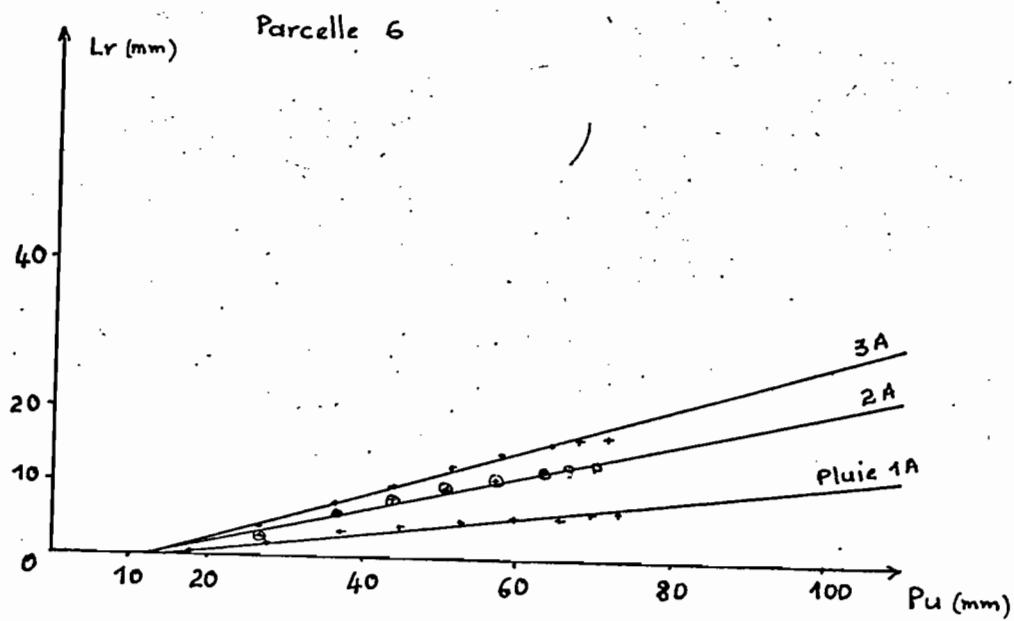
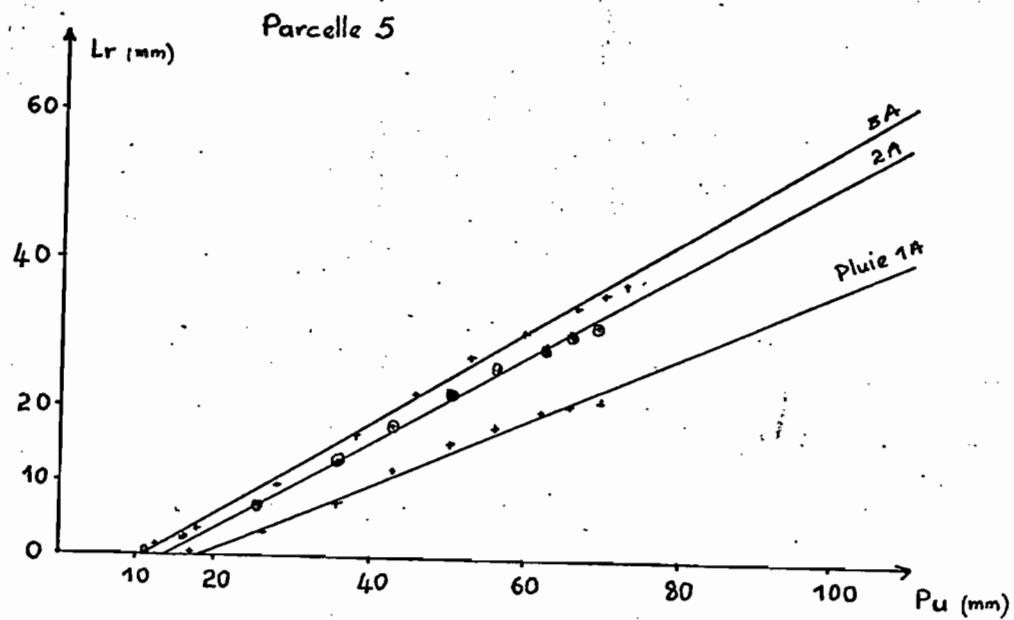
tu (mn)	Pluie 1A		Pluie 2A		Pluie 3A	
	Pu (mm)	Lr (mm)	Pu (mm)	Lr (mm)	Pu (mm)	Lr (mm)
5	3,7	0	3,5	0	3,7	0
10	7,3	0	7,0	0	7,3	0
15	12,7	0,1	11,9	0,1	12,4	0,2
20	18,0	0,4	16,9	0,3	17,5	0,9
25	27,5	1,8	26,7	2,8	26,9	4,0
30	37,0	3,5	36,5	5,9	36,3	7,3
35	44,9	4,4	43,7	7,8	43,9	9,8
40	52,8	5,0	50,8	9,5	51,5	12,2
45	59,3	5,4	57,1	10,7	58,0	14,1
50	65,8	5,9	63,3	11,8	64,4	15,7
55	69,5	6,1	66,8	12,2	68,0	16,3
60	73,1	6,2	70,2	12,4	71,7	16,8

ANNEXE 4 : INFILTROMETRE A ASPERSION : PLUIES UTILES ET LAMES RUISSELEES
MESUREES AU PAS DE 5 MINUTES.

PARCELLE N° 8

tu (mn)	Pluie 1A		Pluie 2A		Pluie 3A	
	Pu (mm)	Lr (mm)	Pu (mm)	Lr (mm)	Pu (mm)	Lr (mm)
5	3,3	0,2	3,7	0	3,7	0
10	6,5	1,1	7,4	1,1	7,3	0,5
15	12,0	2,8	12,8	3,6	12,1	1,5
20	17,5	4,7	18,3	6,4	16,9	2,6
25	27,1	9,4	27,3	13,2	26,4	6,0
30	36,7	15,4	36,4	21,0	36,0	11,0
35	43,8	20,4	43,2	27,4	43,5	15,0
40	50,9	25,8	50,1	33,6	51,0	18,9
45	57,0	29,9	56,2	38,9	57,3	22,3
50	63,0	34,1	62,3	44,2	63,7	25,8
55	66,3	36,5	65,9	47,5	67,4	27,7
60	69,5	38,4	69,5	50,4	71,0	29,4

Annexe 5: CORRELATION LAME RUISSLEE - PLUIE UTILE



Annexe. 6 : DETERMINATION DE $a = f(P_u)$ ET DE $b = f(P_u)$

