

THESE de DOCTORAT de l'UNIVERSITE PARIS 6

Spécialité :

Sciences naturelles ; mention hydrologie.

Présentée

par Jean ALBERGEL

Pour obtenir le titre de DOCTEUR DE L'UNIVERSITE PARIS 6

Sujet de la thèse :

**GENESE ET PREDETERMINATION
DES CRUES
AU BURKINA FASO**

**Du m² au km²
ETUDE DES PARAMETRES HYDROLOGIQUES ET DE
LEUR EVOLUTION**

Soutenu le 18 juin 1987

devant le jury composé de :

MM R. LETOLLE Président
J.P. CARBONNEL
A. CASENAVE
J. CLAUDE
G. DE MARSILY
P. DUBREUIL

*à Valérie
à Fleur, Clément, Claire
à mes parents*

NOM : ALBERGEL

PRENOM : JEAN

TITRE : **GENESE ET PREDETERMINATION DES CRUES AU BURKINA FASO, du m² au km²
ETUDE DES PARAMETRES HYDROLOGIQUES ET DE LEUR EVOLUTION**

RESUME : Durant quatre années d'expérimentation au BURKINA FASO, huit bassins versants expérimentaux représentatifs de la diversité des conditions écologiques du pays ont été observés. Sur chaque bassin versant, les propriétés hydrodynamiques des sols ont été testées au mini simulateur de pluie. Une étude portant sur les facteurs explicatifs de l'infiltration a mis en relief l'aspect prépondérant des états de surface : couvert végétal, activité de la mésofaune, organisation pelliculaire de l'horizon superficiel du sol. Un modèle de reconstitution des lames ruisselées qui intègre les états de surface et leur caractérisation sous pluie simulée a été mis au point ; il conduit à la détermination des crues de fréquence rare, particulièrement des crues "d'étude", utilisées dans la conception des aménagements. La transposition des caractéristiques hydrologiques d'un bassin "connu" à un bassin " non observé" a été réalisée avec succès en associant à la simulation de pluie deux autres outils récents de l'hydrologie : la télédétection par satellite pour cartographier les états de surface, et le modèle à discrétisation spatiale "ORSTOM ECOLE DES MINES". La comparaison des observations hydrologiques faites dans les années soixante sur ces petits bassins versants aux observations de la période récente a mis en évidence l'augmentation des coefficients de ruissellement pendant la période sèche 1969-1984. La modification du régime hydrologique de ces bassins versants a été rapportée à la sécheresse actuelle et à la dégradation des états de surface. La chronique reconstituée des lames ruisselées de 1930 à 1984 sur deux bassins est tenue pour conforme à la réalité. Son analyse statistique montre que la sécheresse, en favorisant l'extension des zones sans végétation et la formation des pellicules de battance entraîne l'accroissement des coefficients de ruissellement journaliers et annuels.

MOTS CLES : BURKINA FASO ; simulateur de pluie ; bassin représentatif expérimental ; infiltration ; état de surface ; modèle hydrologique ; prédétermination des crues ; sécheresse.

SURNAME : ALBERGEL

FIRST NAME : Jean

TITLE : **GENESIS AND DETERMINATION OF FLOOD RUNOFF IN BURKINA FASO. ON THE SQUARE METER TO SQUARE KILOMETER SCALE : A STUDY OF HYDROLOGICAL PARAMETERS AND THEIR EVOLUTION.**

ABSTRACT : A four year study has been conducted on eight experimental catchment areas representing the different environments found in BURKINA-FASO. For each catchment, infiltration and runoff processes are analysed on 1 m² experimental plots using a rainfall simulator. For a clear identification of the factors contributing to infiltration, a statistical analysis is performed using variables and observations from 48 experimental plots. Infiltration is strongly influenced by grass cover, soil fauna activity, and surface sealing characteristics. These results are extended to the catchment scale, leading to a physically based model for forecasting on an event to event basis. This model, using a superficial soil features map and the hydrological relationships established by the rainfall-simulation experiment, is applied to the determination of the ten-year runoff depth with good results for all eight catchments. Hydrological characteristics are successfully transposed from an "observed" catchment to a "non-observed" catchment by associating the rainfall simulation with two other recent hydrological tools : remote sensing for mapping the surface features and the ORSTOM-ECOLE DES MINES's space grid model. The modification of hydrological regimes observed on these catchments is related to the present drought and to the degradation of superficial soil features . The daily runoff depth time series computed on two basins from 1930 to 1984 shows that the drought has led to an increase in storm-runoff coefficients by an extension of the bare lands and the formation of surface sealing.

KEY WORDS : BURKINA-FASO ; rainfall simulation ; representative and experimental basin ; infiltration ; soil surface differentiations ; catchment model ; ten-year storm flow ; drought.

REMERCIEMENTS

Cette thèse est intégrée dans un programme de recherche sur l'hydrodynamique des sols et la formation des crues sur les petits bassins versants au SAHEL. Elle est le fruit d'un travail collectif mené au BURKINA-FASO de 1980 à 1985. L'interprétation des données et la rédaction ont été réalisées au Laboratoire d'Hydrologie de l'ORSTOM à MONTPELLIER.

Mes premières pensées sont consacrées à tous mes collègues qui m'ont précédés dans la zone soudano-sahélienne. J.A. RODIER, M. ROCHE, Y. BRUNET-MORET et P. DUBREUIL ont été des pionniers de l'hydrologie tropicale et les initiateurs de ce programme de recherche. P. DUBREUIL, J.C. KLEIN, J. SIRCOULON ont travaillé, il y a maintenant presque trente ans, sur les mêmes bassins de GAGARA, BOULSA et MANGA. Sans leur travail, le mien n'aurait pas eu lieu ; c'est en effet à partir de leurs résultats que la comparaison des régimes hydrologiques en période "humide" (hier) et en période sèche (aujourd'hui) a été possible. P. DUBREUIL a soutenu mes travaux en tant que Vice-Président de la Commission Scientifique ; je le remercie aujourd'hui de participer au Jury de cette thèse.

Mes remerciements s'adressent aussi à tous ceux qui par leur fonction ont beaucoup facilité ma tâche : I. KABORE, alors Directeur Général de la Recherche Scientifique et Technologique du BURKINA ; K. SAWADOGO du Ministère de l'Eau à OUAGADOUGOU et KAM-SY à BOBO-DIOULASSO ; F. OUEDRAOGO de la Météorologie Nationale Burkinabée.

Je dois également beaucoup à J. CLAUDE, Directeur du Département de l'ORSTOM auquel a été rattaché ce programme de recherche ainsi qu'à son successeur Y. GILLON. J. CLAUDE est pour moi, bien sûr, le Chef de Centre ORSTOM qui m'a accueilli le premier jour de mon affectation à OUAGADOUGOU, mais surtout un ami attentif toujours disposé à me dispenser ses conseils. Je suis heureux qu'il fasse partie des juges de cette thèse.

A. CASENAVE est le coordinateur des programmes de simulation de pluie. C'est avec lui qu'a commencé ce travail ; il en a suivi le moindre aspect. Vouloir l'en remercier serait dérisoire tant je lui dois pour l'accomplissement de ce travail. Sa participation au Jury est pour moi une marque de sympathie.

B. POUYAUD, Responsable du Laboratoire d'Hydrologie de l'ORSTOM à MONTPELLIER m'a accueilli pour la rédaction de cette thèse. Il m'a aidé de ses conseils en me faisant profiter de sa grande expérience en Hydrologie. Malgré ses nombreuses tâches, il a consacré beaucoup de temps à la mise en forme définitive de ce texte. Ma reconnaissance va également à F. MONIOD,

collègue, voisin et ami ainsi qu'à P. RIBSTEIN ; de nombreuses idées que je développe virent le jour au cours des multiples discussions que nous avons eues ensemble.

Le Laboratoire de Géologie Dynamique de l'Université Pierre et Marie CURIE s'est intéressé à mon travail. Avec R. LETOLLE et G. DEMARSILY, je connus d'abord les enseignants ; c'est avec eux que je découvris les sciences de l'eau il y a neuf ans. Je remercie R. LETOLLE d'avoir accepté de diriger cette thèse et d'en être aujourd'hui le Président du Jury. G. DEMARSILY a bien voulu utiliser ses compétences en Hydrologie pour juger ce travail.

C'est J.P. CARBONNEL qui m'a encouragé à présenter une thèse. Nous avons travaillé ensemble, au BURKINA pour l'étude de la pluviométrie et les productions végétales. Sa présence au sein de ce Jury constitue pour moi à la fois un honneur et une marque d'affection.

Je tiens à remercier les collègues avec qui j'ai parcouru les beaux paysages burkinabé de la forêt claire du sud-ouest aux steppes du nord :

- A. BERNARD avec qui j'ai réalisé toutes les mesures de terrain et sans qui ce travail n'aurait pu aboutir ; sa très grande expérience du matériel hydrologique et son sens inné de l'organisation de la vie en brousse ont permis le bon déroulement de toutes les manipulations ;

- C. VALENTIN qui a visité tous les bassins et réalisé les cartes des états de surface ;

- M. GROUZIS qui m'a apporté son expérience d'écologue et de botaniste ;

- P. CHEVALLIER avec qui j'ai reconnu le bassin versant de BINNDE et qui m'a fait découvrir toutes les installations de la Mare d'OURSI.

- M. LOINTIER, R. GUALDE, J.M. LAMACHERE, A. MAHIEU, J. GRESILLON, M. GUINAUDEAU avec qui j'ai eu de fructueuses discussions aussi bien scientifiques que techniques.

Que tous mes amis burkinabé qui m'ont aidé dans les tâches souvent ingrates et difficiles de la récolte des données soient assurés de ma sincère reconnaissance, en particulier, O. SANGARE, G. BILGHO, B. SEGUEDA, A. TAPO, J. BOENE, J. BASSOLE, R. MALO, aides-hydrologues au Centre ORSTOM de OUAGADOUGOU ; mais également tous les observateurs dévoués et scrupuleux qui ont eu à travailler avec moi.

Parce que "le nerf" de l'Hydrologie en région tropicale c'est des véhicules en bon état, je tiens à exprimer toute ma reconnaissance à A. COLONGE et à l'équipe du garage ORSTOM à OUAGADOUGOU.

J'ai également profité de l'expérience et des diverses compétences de tous mes collègues du Laboratoire d'Hydrologie de MONTPELLIER et en particulier de C. BOUVIER, J.F. BOYER, G. COCHONNEAU, J. COLOMBANI, A. GIODA, A. HERVE, T. LABEL, Y. L'HOTE, J.C. OLIVRY, S. PIEYNS, L. SEGUIS, B. THEBE. Qu'ils soient assurés de ma reconnaissance. Une bonne partie de la bibliographie a été réalisée à la bibliothèque de ce Laboratoire et je tiens à assurer de mes sentiments amicaux les documentalistes : E. RABBIA et M. SICARD.

Je remercie chaleureusement tous ceux qui ont contribué à la réalisation technique de ce mémoire : C. DIEULIN qui m'a aidé dans la laborieuse tâche de saisie des données et qui a assuré la saisie du texte de ce mémoire ; J. RAZANAMIADANA et J. LIBES pour leurs travaux de secrétariat. Ma reconnaissance s'adresse à C. LAWSON et tout le personnel du service cartographie du centre de OUAGADOUGOU qui réalisa les premiers graphiques et à J.P. DEBUICHE et J.C. MARCOUREL dessinateurs du Laboratoire d'Hydrologie qui les achevèrent.

Mes pensées sont enfin à tous ces villageois si attachants et si hospitaliers qui m'ont reçu au BURKINA. Puisse la présente étude être un maillon dans la chaîne des connaissances qui leur permettront un développement en équilibre avec leur milieu.

SOMMAIRE

RESUME	5
ABSTRACT	6
REMERCIEMENTS	7
INTRODUCTION	13
PREMIERE PARTIE	
LE MILIEU SOUDANO SAHELIEU ET SON CLIMAT :LE CAS DU BURKINA FASO.	21
DEUXIEME PARTIE	65
DISPOSITIFS EXPERIMENTAUX, VARIABLES MESUREES, ELABORATION DES DONNEES.	
TROISIEME PARTIE	111
ANALYSE DU RUISSELLEMENT ET DE L'INFILTRATION	
QUATRIEME PARTIE	179
DU M² AU KM², EXTRAPOLATION AU BASSIN VERSANT DES PARAMETRES HYDROLOGIQUES DEFINIS SUR PARCELLES .	
CONCLUSION GENERALE	243
BIBLIOGRAPHIE	251
ANNEXES	275
NOTES SUR LE DEBAT DE SOUTENANCE	329
TABLE DES MATIERES	334

INTRODUCTION

1. CONTEXTE ET HISTORIQUE DE L'ETUDE.

Au sud du SAHARA, les pays d'Afrique soudano sahélienne, figurent parmi les plus démunis de la planète. Appartenant entièrement à cette zone climatique on distingue 9 états : le SENEGAL, la GAMBIE le plus petit état d'Afrique de l'Ouest avec 11 295 Km², le MALI, le BURKINA FASO, le NIGER, le TCHAD, le plus étendu des pays de l'Afrique de l'Ouest avec 1 284 000 km², la MAURITANIE, la GUINEE BISSAU, les îles du CAP VERT. Ils s'étendent sur 5,3 M Km² où vivent 30 M d'habitants. La partie Nord de certains autres pays peut atteindre les latitudes sahéliennes (CAMEROUN, NIGERIA) ou soudaniennes (TOGO, BENIN, GHANA).

Les déséquilibres régionaux, l'enclavement de la majorité de ces pays, l'insuffisance de leur infrastructure freinent leurs possibilités de développement. La production agricole demeure peu diversifiée, très sujette aux variations climatiques et n'arrive pas partout à assurer l'autonomie alimentaire de cette immense région. Le secteur industriel, malgré les efforts entrepris reste embryonnaire et se limite essentiellement à quelques industries agricoles et alimentaires. Si l'évaluation des ressources minières peut donner de grands espoirs, leur exploitation reste conditionnée par l'extension des réseaux de transports, à quelques exceptions près, uranium d'ARLIT au NIGER par exemple.

Les priorités dans les plans de développement restent donc au développement rural qui passe par une diversification des productions grâce à l'irrigation (programme de cultures en contre saisons au NIGER) et à l'extension des infrastructures de désenclavement (route et chemin de fer en projet).

En voie d'achèvement, la route goudronnée longue de 2500 km joignant ABIDJAN à l'extrême nord du NIGER franchit quelques centaines de cours d'eau. Il en est de même pour un grand nombre de lignes de chemin de fer en construction ou en projet, comme la liaison OUAGADOUGOU - TAMBAO en vue de l'exploitation du minerai de manganèse du TAMBAO (340 km de voie ferrée) et les embranchements de cette ligne vers le MALI et le NIGER (désenclavement du LIPTAKO GOURMA). A côté des grands barrages, dont un grand nombre est encore en projet, les aménagements hydro agricoles sur des bassins de taille plus réduite voient le jour. Leur multiplication est encouragée par l'ensemble des penseurs du développement (conférence sur les barrages en terre, DAKAR 1984)(DUMONT, 1986).. Leur impact sur l'écologie régionale est limité, leur coût de mise en oeuvre reste modeste, leur maîtrise et leur gestion sont adaptées aux conditions locales.

Dans ce contexte, les réseaux hydrométriques et les bassins versants représentatifs et expérimentaux installés par l'ORSTOM depuis les années 50 ont eu pour objectif la prédétermination

hydrologique et l'extension des données afin de fournir aux projeteurs les bases nécessaires au calcul de dimensionnement des ouvrages inscrits dans les projets de développement. Le programme d'étude des bassins versants représentatifs et expérimentaux qui mobilise depuis plus de 30 ans une importante partie du potentiel scientifique de l'hydrologie ORSTOM a permis :

- la mise au point et l'amélioration des méthodes de calcul pour la prédiction hydrologique (RODIER, 1959, RODIER et AUVRAY, 1965, PUECH et CHABI GONNI, 1984, RODIER, 1984, RODIER, 1985).

- la détermination de la ressource en eau de surface à l'échelle régionale (RODIER, 1975)

- la mise au point de modèles mathématiques permettant l'abattement de la pluie ponctuelle (VUILLAUME, 1974) et de modèles permettant soit à partir de pluies types de reconstituer des hydrogrammes de crues (ROCHE, 1965, 1967), soit à partir de séries pluviométriques de générer des séries de débits (GIRARD, 1975).

Les autres objectifs des bassins représentatifs et expérimentaux assignés dans le guide international des pratiques en matière de recherches, publié par l'UNESCO (TOEBES et OURIVAEV, 1970), bien que moins présents dans les études surtout anciennes, n'ont pas été négligés et deviennent prioritaires dans les études nouvelles.

- La recherche fondamentale se base sur l'étude de tous les processus physiques du cycle de l'eau, ou d'une partie de ce cycle (CASENAVE, 1978, POUYAUD, 1985a). Elle comprend également des recherches sur les techniques d'observations, elle s'est traduite dans le contexte tropical, par la mise au point de nombreux appareillages adaptés à ce terrain ; on peut citer les enregistreurs automatiques et à télétransmission (pluviographe, enregistreur de niveau d'eau, température et salinité ORSTOM ELSYDE) et le mini-simulateur de pluie (ASSELINE et VALENTIN, 1978)

- La formation du personnel à la recherche par la recherche, est un volet important de la recherche scientifique en coopération (bassins versants écoles dans la région d'AGADES NIGER).

- Certains bassins versants représentatifs permettent d'étudier l'influence de changements naturels tels que par exemple les modifications du climat (ALBERGEL et VALENTIN, 1986) ou des caractéristiques de la végétation. L'étude des effets des changements provoqués par l'homme sur le régime hydrologique devient un objectif important et nécessite le suivi de bassins versants expérimentaux sur de longues périodes (ALBERGEL et GIODA, 1986).

Parallèlement aux études globales des relations pluies-débits sur petits bassins versants, les mécanismes du ruissellement, de l'infiltration et de l'érosion ont été appréhendés à l'échelle de la parcelle, d'abord sous pluie naturelle (ROOSE, 1976) puis en utilisant des pluies simulées. Entre 1975 et 1980 une équipe pluridisciplinaire du centre ORSTOM d'ADIPODOUME (COTE D'IVOIRE) a mis en oeuvre un simulateur de pluie de type SWANSON (SWANSON, 1965) sur huit sites dont quatre dans la zone géographique qui nous intéresse, KONGOUSSI, LOUMBILA, OURSI au BURKINA FASO et GALMI au NIGER. Un des principaux acquis de cette équipe a été la mise en évidence de l'intérêt de la simulation de pluie dans l'étude des caractéristiques hydrodynamiques des sols (COLLINET et LAFFORGUE, 1978). Cette étude sur des parcelles de 50 m² a permis une première analyse et quantification des principaux facteurs entrant en jeu dans les processus d'infiltration et de ruissellement. Elle a lancé l'idée d'utiliser cette nouvelle technique pour des études étendues sur bassins versants représentatifs et expérimentaux.

Le simulateur de pluie de type SWANSON étant du fait de sa taille, difficilement compatible avec une expérimentation extensive sur un nombre important de sites, il a été décidé de mettre au point un simulateur de pluie plus léger et plus maniable ASSELINE et VALENTIN (1978). Cette étude débuta en COTE D'IVOIRE en 1977 et permit la mise au point d'une nouvelle méthode d'évaluation rapide de la crue décennale sur de petits bassins forestiers (surface inférieure à 200 km²) (CASENAVE, 1981).

Pendant la saison sèche 1980-1981, une première tentative d'utilisation du mini-simulateur de pluie à des fins hydrologiques était faite au SAHEL sur deux bassins représentatifs de la MARE D'OURSI (BURKINA FASO) (CHEVALLIER, 1982) et était à l'origine d'un vaste programme d'étude de la genèse et de la prédétermination des crues en zone soudano sahélienne. Six autres bassins ont été alors testés au BURKINA FASO et 56 parcelles étudiées pour couvrir l'ensemble de la gamme écologique et pédologique du pays.

Avec la construction de nouveaux appareils, cette expérimentation était étendue à des bassins du NIGER, du NORD CAMEROUN du NORD TOGO et de la savane congolaise. On dispose actuellement des résultats sur 141 parcelles couvrant l'ensemble des variétés climatiques, pédologiques et géologiques des régions comprises entre 400 et 1200 mm de pluviométrie annuelle de l'Afrique de l'Ouest.

2. INTERET DES ETUDES SOUS PLUIE SIMULEE EN HYDROLOGIE.

Les nombreuses études réalisées jusqu'à présent dans le domaine des relations eau-sol (bassins versants, case d'érosion, bilan hydrique, etc ...) se heurtent à quatre problèmes (CASENAVE, 1985) qui peuvent en grande partie être résolus par la simulation de pluie :

- un problème d'analyse des paramètres entrant en jeu dans le processus d'infiltration et de ruissellement : La possibilité de maîtriser toutes les caractéristiques de la pluie et de les reproduire à volonté permet d'étudier finement la réponse du sol à différents "stimuli averses" et d'apprécier la contribution de chaque paramètre régissant les transferts hydriques et les transformations à l'interface eau-sol-plante-atmosphère.

- un problème de durée des études : Pour obtenir un résultat fiable sous pluie naturelle, il faut attendre un certain nombre d'années pour observer différents types d'averses et notamment les plus fortes. Les mesures sous pluie simulée permettent de réduire de façon très sensible les études pour un résultat sensiblement égal sinon supérieur. Une étude statistique des événements pluvieux sur une longue série permet de définir des événements types qu'il est possible de reproduire à volonté.

- un problème d'extension spatiale des résultats : Du fait de leur durée, les mesures sous pluie naturelle ne peuvent être effectuées que sur un petit nombre de sites à la fois, les comparaisons entre sites non observés pour les mêmes événements pluvieux restant très difficiles. Les mesures sous pluie simulée, beaucoup plus rapides et fidèlement reproductibles permettent pour un même investissement de tester un nombre de sites bien plus élevés.

- un problème d'expérimentation : Les mesures d'infiltration, *in situ*, ont pratiquement toujours été réalisées à l'aide de techniques interdisant le ruissellement et ne prenant pas en compte la cinétique de la goutte de pluie. Parmi ces techniques, on distingue :

- * la méthode PORCHET : mesure des infiltrations verticales et latérales de l'eau versée dans un trou
- * les infiltromètres double anneau : la méthode MUNTZ permet d'estimer l'intensité d'infiltration sous une lame d'eau maintenue constante (NATHANI et al, 1978) COLOMBANI et al, (1973) comparent cette méthode à celle de PORCHET qu'ils étendent aux sols hétérogènes IMBERNON, (1981), étudie les dimensions optimales des deux diamètres des anneaux pour permettre de considérer l'infiltration dans l'anneau central comme mono-dimensionnelle
- * La méthode PIOGER (1952) consiste à déterminer dans l'anneau central le régime constant d'une lame d'eau de 10 cm dans un sol.

De nombreux auteurs ont remarqué que la conductivité hydraulique à saturation mesurée à l'aide de ces méthodes est nettement supérieure à celle que l'on mesure sous pluie naturelle

(JAMES et LARSON, 1976); cette différence a été généralement attribuée à l'influence des succions latérales (TRICKER, 1978). Les études sous pluie simulée montrent que non seulement les valeurs d'intensité d'infiltration déduites de ce type de tests infiltrométriques ne sont pas du même ordre de grandeur mais aussi qu'elles ne correspondent pas au même classement pour des sols différents (LAFFORGUE et NAAH, 1976, VALENTIN, 1981a). Le rôle important de l'intensité de la pluie sur ces paramètres de l'infiltration ont été mis en évidence par NASSIF et WILSON (1975), et par TANYELEKE (1985).

McCORD (1985) montre l'importance du fractionnement de la goutte de pluie lors de son impact au sol, surtout pour les versants pentus, dans les phénomènes d'infiltration et de ruissellement. Les gouttelettes provenant de ce fractionnement seraient à l'origine d'un flux latéral de ruissellement privant le flux principal d'une quantité allant jusqu'à 10 % du total de la pluie (pour les pentes les plus fortes).

3. OBJECTIFS SCIENTIFIQUES ET FINALITE EN TERME DE DEVELOPPEMENT DES ETUDES SOUS PLUIE SIMULEE EN ZONE SOUDANO SAHELIENNE.

Les principaux objectifs scientifiques du programme simulation de pluie et des études des bassins versants représentatifs et expérimentaux menées en zone soudano sahélienne sont :

- l'analyse du rôle des différents facteurs influençant le ruissellement, l'infiltration et "l'érosion" en milieu tropical sec (pluie, sol, état de surface, état d'humectation du sol, couverture végétale, pratiques culturales, activité mésofaunique etc ...)

- l'étude de la genèse des crues, la détermination des paramètres hydrodynamiques des sols, notamment l'intensité limite de ruissellement, et leur cartographie sur l'ensemble d'un bassin pour permettre une meilleure compréhension des compositions de l'écoulement et donc de la genèse des crues.

- la modélisation des écoulements afin d'étudier les ressources en eau des petits bassins et le dimensionnement d'éventuelles retenues.

- la détermination des crues de fréquences rares, utilisées dans le dimensionnement des ouvrages d'art par une méthode simple pour les bassins versants dont la superficie est inférieure à 200 km².

- l'évolution de la ressource en eau infiltrée (recharge du stock hydrique des sols) et ruisselée (remplissage des réservoirs) en fonction des modifications climatiques (sécheresse) et de l'anthropisation des bassins versants (extension des zones défrichées).

Le travail, présenté ici, effectue une synthèse des recherches menées au BURKINA FASO, premier pays soudano sahélien où des études de bassins versants alliées à la simulation de pluie ont débuté en 1980 et se sont poursuivies jusqu'en 1985.

La première partie décrit le milieu physique et le climat ; une place toute particulière y est réservée à l'étude de la pluviométrie, à l'échelle annuelle et journalière en tenant compte de la situation exceptionnelle créée par la phase de sécheresse que connaît la région depuis 1969.

La seconde partie traite des protocoles expérimentaux et de l'élaboration des données sur les parcelles et les bassins versants.

L'analyse du ruissellement et de l'infiltration est présentée à l'échelle de la parcelle puis du bassin versant, dans la troisième partie.

Dans la quatrième partie sont développés des modèles permettant d'estimer les paramètres du ruissellement sur le bassin versant à partir des observations sur parcelles.

Deux applications originales des techniques de simulation de pluie et de cartographie des états de surfaces sont exposées dans cette dernière partie :

- la transposition des paramètres hydrologiques d'un bassin étudié à un bassin inconnu en utilisant la télédétection pour constituer la carte des états de surface et le "catalogue" des parcelles déjà testées.

- l'étude des modifications des régimes hydrologiques de petits bassins versants dont les écosystèmes ont été très bouleversés ces dernières années par l'action conjuguée de la sécheresse et de la pression anthropique.

PREMIERE PARTIE

**LE MILIEU SOUDANO SAHELIEN
ET SON CLIMAT :
LE CAS DU BURKINA FASO,**

Dans cette première partie consacrée à une étude générale du milieu, chaque aspect physique ou climatique du pays est illustré par une carte où sont représentés les bassins étudiés.

1.1 SITUATION GENERALE (fig.1)

Au coeur du continent ouest africain, le BURKINA FASO s'étend en latitude entre 9°20' Nord et 15°05' Nord et en longitude entre 5°30' Ouest et 2°20' Est. A vol d'oiseau, la frontière sud se trouve à un peu plus de 600 km de la côte atlantique et la capitale, OUAGADOUGOU, à 800 km en moyenne des villes portuaires du golf de GUINEE, ABIDJAN, ACCRA et LOME. Au centre de la boucle du NIGER il couvre une superficie de 274 200 km². L'ensemble du pays a l'aspect d'une immense pénéplaine parsemée de collines, de pitons et d'entablements rocheux de faible dénivelée. La moitié du pays est située entre 250 et 350 m, l'écart altitudinal extrême ne dépasse pas 600 m. Les plus hauts sommets sont situés dans le sud-ouest (région de BANFORA) le point culminant est le TENA-KOUROU (747 m).

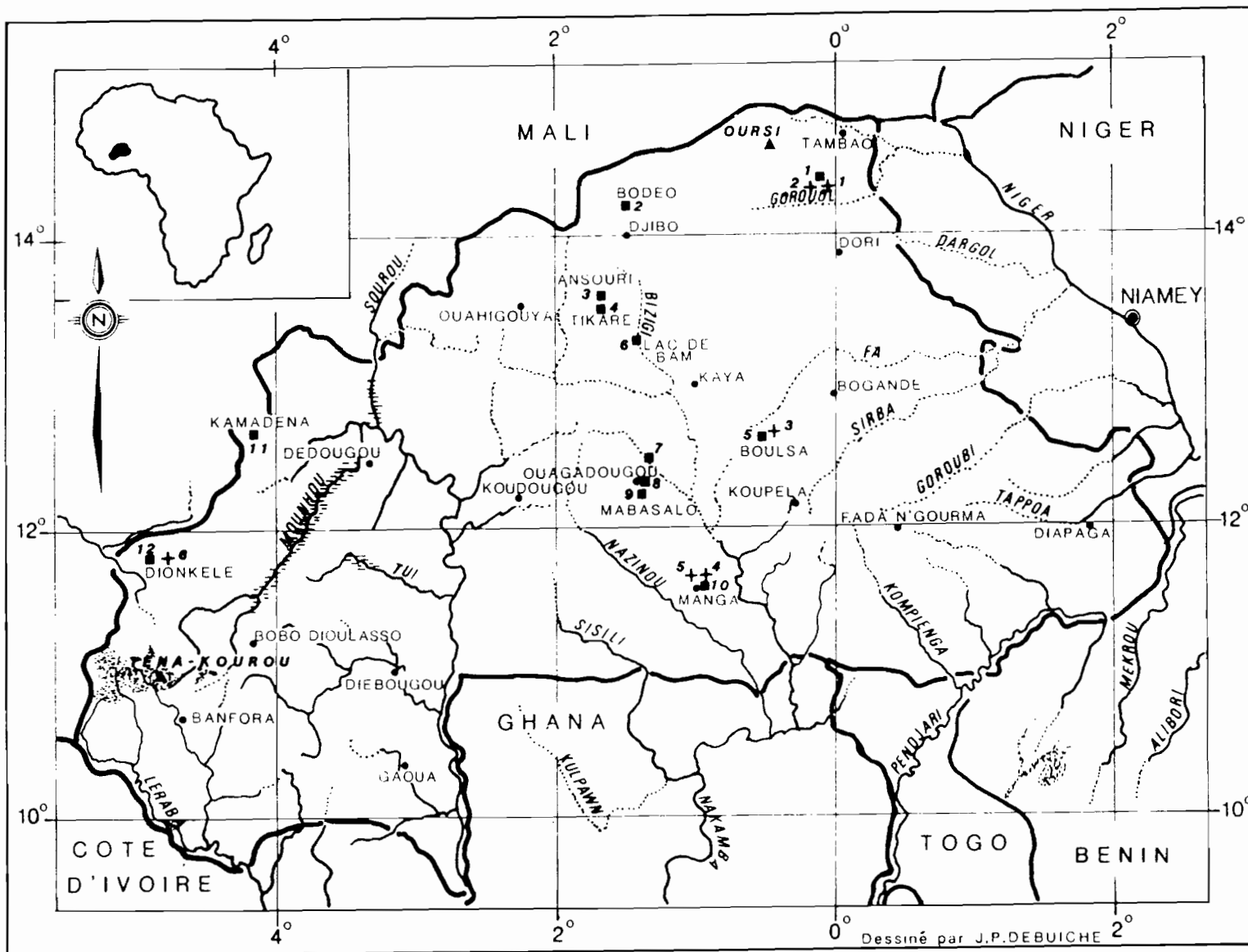
Trois grands bassins hydrographiques se partagent le pays :

- le bassin de la KOMOE qui prend sa source près de BANFORA et fait la frontière avec la COTE D'IVOIRE sur 50 km dans le sud-ouest.

- le bassin de la VOLTA (MONIOD et al, 1977) : le MOUNHOU (ex VOLTA NOIRE) qui naît dans la région de BANFORA draine la majeure partie du sud-ouest du pays. Le NAKAMBA (ex VOLTA BLANCHE) prend sa source près de OUAHIGOUYA et coule au centre du pays ; en saison sèche son cours s'assèche jusqu'au sud de OUAGADOUGOU. Le NAZINOU (ex VOLTA ROUGE) est la plus courte (1350 km) des trois rivières du haut bassin de la VOLTA.

- le bassin du NIGER : il draine le nord et l'est du pays ainsi qu'une petite frange à l'extrême ouest. Sur la bordure est, les principaux affluents du sud au nord sont : la KOMPIENGA, la TAPOA, la SIRBA, la FA, le GOROUOL et le BELI. Dans le nord du pays, des alignements dunaires donnent naissance à de nombreux marécages et mares en saison des pluies, dont la plus grande est la MARE D'OURSIS (province de l'OU DALAN). Ainsi une grande partie du territoire rattaché au bassin versant du NIGER est endoreïque (BRUNET-MORET et al, 1986). A l'ouest, le LONGO qui draine les plaines de NIENA DIONKELE et FOULASSO LELASSO est un affluent du BANIFING, lui même affluent du BANI.

BURKINA FASO - PRESENTATION GENERALE



(●1) OURSI : 7 bassins observés de 1976 à 1981 dont 2 avec simulation de pluie (CHEVALLIER *et al*, 1985)

(●1 + 2) GAGARA : 2 bassins observés de 1956 à 1957 et repris en 1985 dans le cadre de cette étude (ORSTOM, service hydrologique 1956, 1959)

(●2) BODEO : 3 bassins versants observés en 1963, 1964 (BRUNET-MORET, 1965)

(●3) ANSOURI : 1 bassin observé de 1963 à 1965 (OBERLIN *et al*, 1966)

(●4) TIKARE : 2 bassins observés de 1963 à 1965 (OBERLIN *et al*, 1966)

(●5) BOULSA : 3 bassins observés de 1960 à 1962 dont 1 repris en 1984 (SIRCOULON *et al*, 1964)

(●6) LAC DE BAM : 6 bassins observés de 1973 à 1975 (POUYAUD, 1985)

(●7) LUMBILA : 3 bassins observés de 1964 à 1966 (KLEIN 1967a)

(●8) OUAGADOUGOU : 6 bassins observés de 1961 à 1963 (PIEYNS *et al*, 1964) Les bassins urbains de OUAGADOUGOU ont été observés de 1977 à 1979 (LE BARBE, 1981).

(●9) NABAGALE : 3 bassins observés de 1961 à 1965 (PIEYNS *et al*, 1964)

(●10) MANGA : 5 bassins observés de 1963 à 1965 (KLEIN 1967b) dont 2 repris en 1982-1983

(●11) KAMADENA : 4 bassins observés de 1977 à 1979 (LE BARBE, 1979)

(●12) NIENA-DIONKELE et FOULASSO-LELASSO : 6 bassins observés de 1973 à 1976 et de 1981 à 1984 (LAMACHERE 1984)






-  ZONE D'INONDATION
-  ALTITUDE ENTRE 500-800m
-  COURS D'EAU MEMORIE
-  BASSIN VERSANT ETUDIE PAR L'ORSTOM
-  BASSIN VERSANT TESTE PAR SIMULATEUR DE PLUIES

Fig-1-

Dessiné par J.P.DEBUICHE

Le réseau hydrographique est relativement important et bien réparti, toutefois, la majorité des affluents des grandes rivières, voire ces rivières elles-mêmes tarissent en saison sèche. Dans l'ensemble des zones arides du nord du pays les pentes sont faibles, la vitesse de l'eau dans le réseau hydrographique et particulièrement dans les cours principaux ne sont pas suffisantes pour entretenir un tracé net du lit dont la forme se dégrade d'amont en aval. L'aridité du climat est un facteur d'amplification du phénomène ; dans les régions les plus septentrionales l'endoréisme des bassins est presque une règle.

1.2 GEOLOGIE. fig.2 (HOTTIN G. OUEDRAOGO.O.F., 1975)

Plus de 80 % du BURKINA FASO sont constitués de formations cristallines du Précambrien, recouverts en discordance sur les frontières nord et nord-ouest du pays par les sédiments du Précambrien du bassin de TAOUDENI et sur la frontière sud-est par ceux de la bordure septentrionale du bassin voltaïen.

Au nord-ouest les transgressions du Tertiaire ont déposé en discordance les sédiments du bassin du GONDO, sur le vieux socle. L'ensemble cristallin ivoiro-burkinabe caractéristique de la partie centre-sud du craton ouest africain est généralement décrit sous le nom de bloc BAOULE-MOSSI.

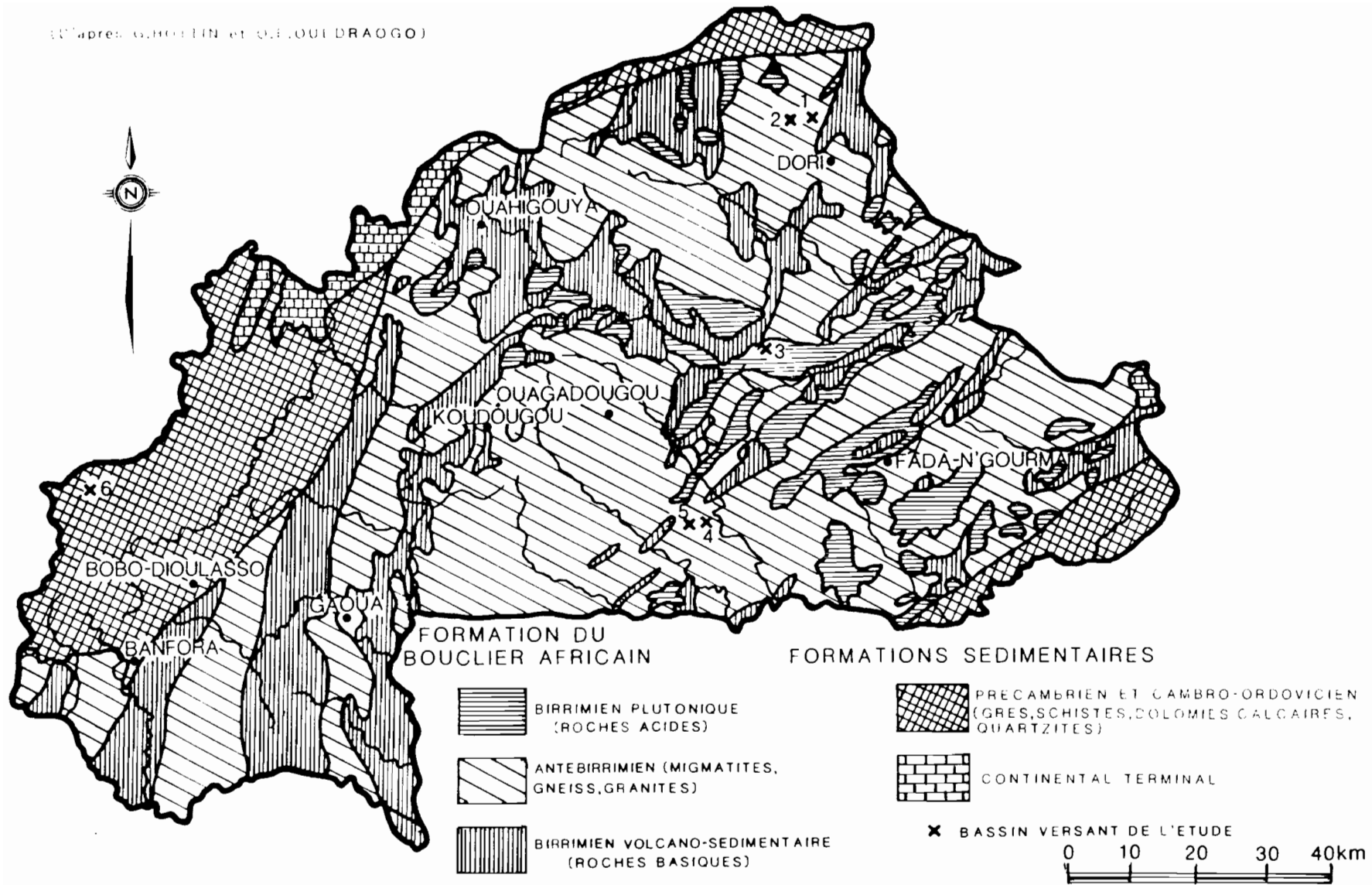
On distingue deux phases orogéniques importantes qui sont à l'origine des reliefs existants sur la frontière sud-ouest, nord et sud-est du pays. L'ensemble des formations birrimiennes du sud-ouest, après une phase de granitisation précoce vers 2170 MA, antérieure aux dépôts de métasédiments gréseux terminaux a été affecté par un épisode orogénique majeur (orogénie éburnéenne, 2100-1000 MA), accompagné de la mise en place d'importantes masses granitiques. Les plissements des couvertures infracambriennes et précambriennes du sud-est et de l'extrême nord-est du pays sont dues à l'orogénèse pan-africaine (550 MA).

Des intrusions accompagnées de minéralisations intéressantes s'étagent du Précambrien en Permien ; filons de dolérites mis en place dans le socle suivant des directions N.NE ou N.NO dominantes.

Les formations récentes sont représentées par :

- les sédiments continentaux du Néogène de la plaine du GONDO, sur une zone de 200 à 300 km de long à la frontière nord-ouest avec le MALI. Ils se présentent sous forme d'argiles sableuses plus ou moins bariolées souvent rubéfiées, discordantes et transgressives sur le précambrien ou le socle. Au BURKINA leur épaisseur ne dépasse pas 80 m (elle atteint une centaine de mètres au MALI dans l'axe du bassin, DEFOSSEZ, 1962).

(d'après GILLOTIN et OLEJOU DRAOGO)



BURKINA-FASO

CARTE GEOLOGIQUE SIMPLIFIEE

Dessiné par J. P. DEBUICHE

Fig-2-

- les affleurements du continental terminal à l'est du pays, moins épais que dans la plaine du GONDO (10 m au maximum à DIAPAGA). Ils sont ici constitués de grés grossiers ou de conglomérats avec parfois des niveaux d'argiles blanches intercalaires.

- les latérites : comme dans toute l'Afrique de l'Ouest, les formations indurées forment des plateaux étendus ou des buttes témoins. Des restes de témoins cuirassés de la surface Eocène (sur les reliefs birrimiens) à la cuirasse flandrienne dont l'évolution se poursuit actuellement, les latérites sont une caractéristique majeure du paysage pénéplané qui domine le BURKINA FASO.

- les alluvions : les vallées des grandes rivières qui entaillent la cuirasse sont formées d'alluvions récentes. Ce sont des bancs de graviers, gravillons et sables dans le lit mineur, et de fines pellicules successives de limons sableux déposées par les crues dans les dépressions et sur les berges.

- les dunes (COUREL, 1977) présentes dans le nord du pays (OUDALAN). Des cordons dunaires hauts d'une vingtaine de mètres, s'allongent sur plusieurs centaines de km en direction est-ouest. Mis en place sous un régime de vents du sud, ils montrent un flanc abrupt tourné vers le nord. Installés à une période récente (40 000 B.P pour l'erg ancien et 20 000 B.P pour l'erg récent), ces cordons colmatent les dépressions ou vallées du réseau hydrographique subactuel. En voie d'érosion, surtout durant les années sèches où la végétation est rare, ils donnent lieu à des recouvrements éoliens superficiels très étendus, ainsi qu'à d'importants niveaux de sables remaniés (dune d'OURSIS) dont l'extension a été étudiée par DEWISPLAERE et TOUTAIN (1976).

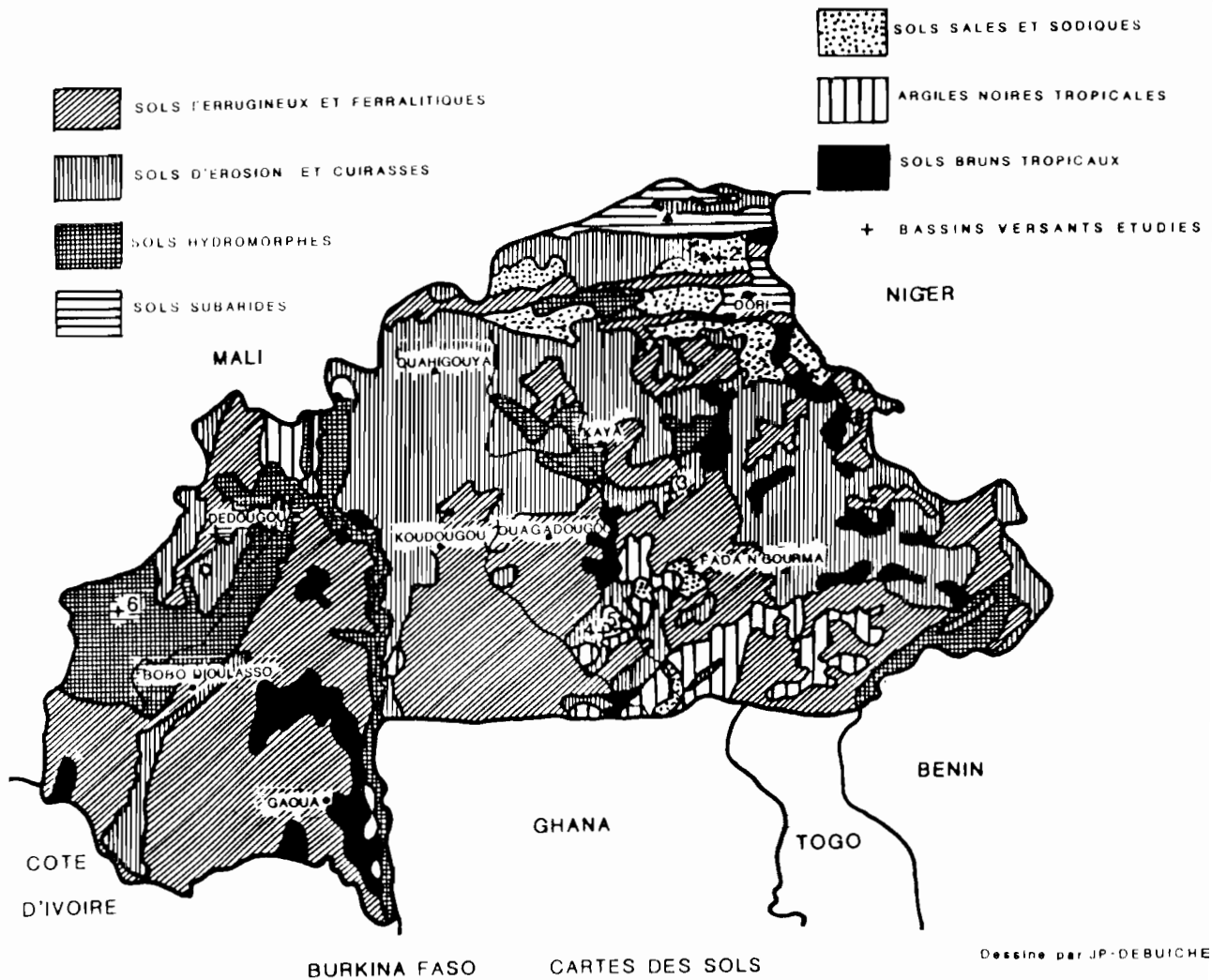
1.3 LES SOLS fig.3.

Les études pédologiques au BURKINA FASO ont été nombreuses et détaillées. Les premières, remontent à 1954 (DUHART et LENEUF). Depuis, des travaux importants réalisés entre 1960 et 1970 par BOULET, FAUCK, KALOGA, LEPRUN, MOREAU ont permis l'établissement d'une carte pédologique au 1/500 000. C'est à partir de cette carte que BOULET (1976) a réalisé à la même échelle une carte des ressources en sols à vocation agronomique.

On remarque la prépondérance des sols d'érosion peu évolués, réservés au pâturage extensif et aux cultures pluviales de céréales sur les bordures gravillonnaires des cuirasses ou dans les vallées, et des sols ferrugineux et ferralitiques. Ces derniers sont des sols épais et meubles de richesse chimique variable ; le facteur limitant leur culture est la répartition des pluies, car ils sont susceptibles de bons rendements pour des cultures variées (mils, arachides, coton). Un apport de matière organique et de phosphates ainsi qu'une protection contre l'érosion devraient en faire de "riches" terroirs. On remarque également des sols bruns tropicaux, chimiquement les plus

riches, de la zone soudano sahélienne, ils ne sont malheureusement pas très profonds et sont très sensibles à l'érosion.

Des sols hydromorphes de richesse chimique variée longent le MOUNHOU et ses affluents et présentent des potentialités intéressantes pour la riziculture qui s'y développe. Les vertisols, argiles noires tropicales sont des sols riches chimiquement mais lourds à travailler et ayant besoin de beaucoup d'eau. Leur mise en valeur nécessiterait une mécanisation et une irrigation qui permettraient de bons rendements pour des cultures variées : mils, sorgho, coton, cultures fruitières, canne à sucre, etc ...



(D'après la carte pédologique ORSTOM au 1/500 000 de l'atlas international de l'ouest Africain)

Fig-3-

1.4. LE CLIMAT.

Dans ce paragraphe sont décrites les principales caractéristiques du climat burkinabé. La pluie étant le phénomène météorologique en liaison la plus directe avec le régime des cours d'eau, fera l'objet d'un assez long développement.

1.4.1 Les facteurs généraux du climat burkinabe.

L'étude du climat de l'Afrique tropicale a donné lieu à un nombre impressionnant de travaux et de publications, (982 références bibliographiques dans la thèse de M. LEROUX, 1981) et reste un large domaine d'investigation pour la communauté scientifique internationale (Projet WAMEX [6] et ETGA [7] de l'Organisation Météorologique Mondiale).

La circulation générale de l'atmosphère est régie par le mouvement apparent saisonnier du soleil, par la rotation de la terre et par la présence de ceintures anticycloniques subtropicales.

L'ensemble des mécanismes atmosphériques régissant le climat de cette région est décrit dans le Traité de Météorologie Tropicale (DHONNEUR, 1984). Nous en donnerons ici un aperçu simplifié.

Les anticyclones dirigent vers l'équateur des masses d'air qui sont inclinées vers l'ouest sous l'effet de l'accélération de CORIOLIS. Ces vents, venant du nord-est en hémisphère boréal et du sud-est en hémisphère austral, sont les alizés. Ils convergent dans une région proche de l'équateur nommée "zone de convergence intertropicale" (Z.C.I.). L'anticyclone saharien dirige vers la ZCI un air sec et chaud. L'anticyclone de SAINTE HELENE, au sud dirige vers la ZCI un vent océanique humide et frais. La position saisonnière de la surface de contact dont on désigne habituellement la trace au sol par FIT (front intertropical) régit l'arrivée des pluies. En effet, dans la ZCI, les pressions sont relativement basses et le flux d'air maritime chargé d'humidité (communément mais improprement appelé "mousson"), y est attiré. Cette mousson se heurte à l'air sec continental pour former le FIT qui se déplace avec les anticyclones tropicaux en suivant la position zénithale du soleil avec un décalage de quelques semaines.

Au nord du FIT, on se trouve dans le domaine de l'Harmattan, sec et brumeux. Au voisinage du FIT, on voit apparaître de petits cumulus qui vers le sud commencent à prendre de l'épaisseur et à provoquer des averses éparses. Au sud du FIT, on entre dans la zone où les couches de nuages sont plus continues et les pluies fréquentes mais peu intenses.

Le FIT se déplace du 5ème degré de latitude nord en janvier au 20ème degré de latitude nord en août. Des perturbations majeures accompagnent les mouvements du FIT et donnent lieu à des précipitations discontinues : les lignes de grains.

"La circulation atmosphérique de l'Afrique occidentale paraît dans ces grandes lignes simple et cohérente. Cette simplicité est illusoire ; elle ne permet pas d'expliquer certaines réalités météorologiques comme le déficit pluviométrique observé sur tout ou partie de l'ouest africain depuis 1968 ou l'abondance des pluies des années cinquante" COUREL (1984).

Les positions moyennes du FIT ne doivent pas cacher son extrême mobilité journalière, ni l'irrégularité interannuelle de ses déplacements. Sa "montée" comme sa "descente" plus ou moins précoce trouve son explication dans les interférences entre les circulations aérodynamiques à l'échelle de la planète dans les deux hémisphères : circulation méridienne de HADLEY, circulation zonale de WALKER. (PEARCE, 1984).

Le BURKINA FASO connaît donc sur l'échelle de son territoire une alternance pluviométrique saisonnière accompagnée de variations thermométriques plus ou moins notables caractéristiques du climat tropical *stricto sensu*. (Figure 4)

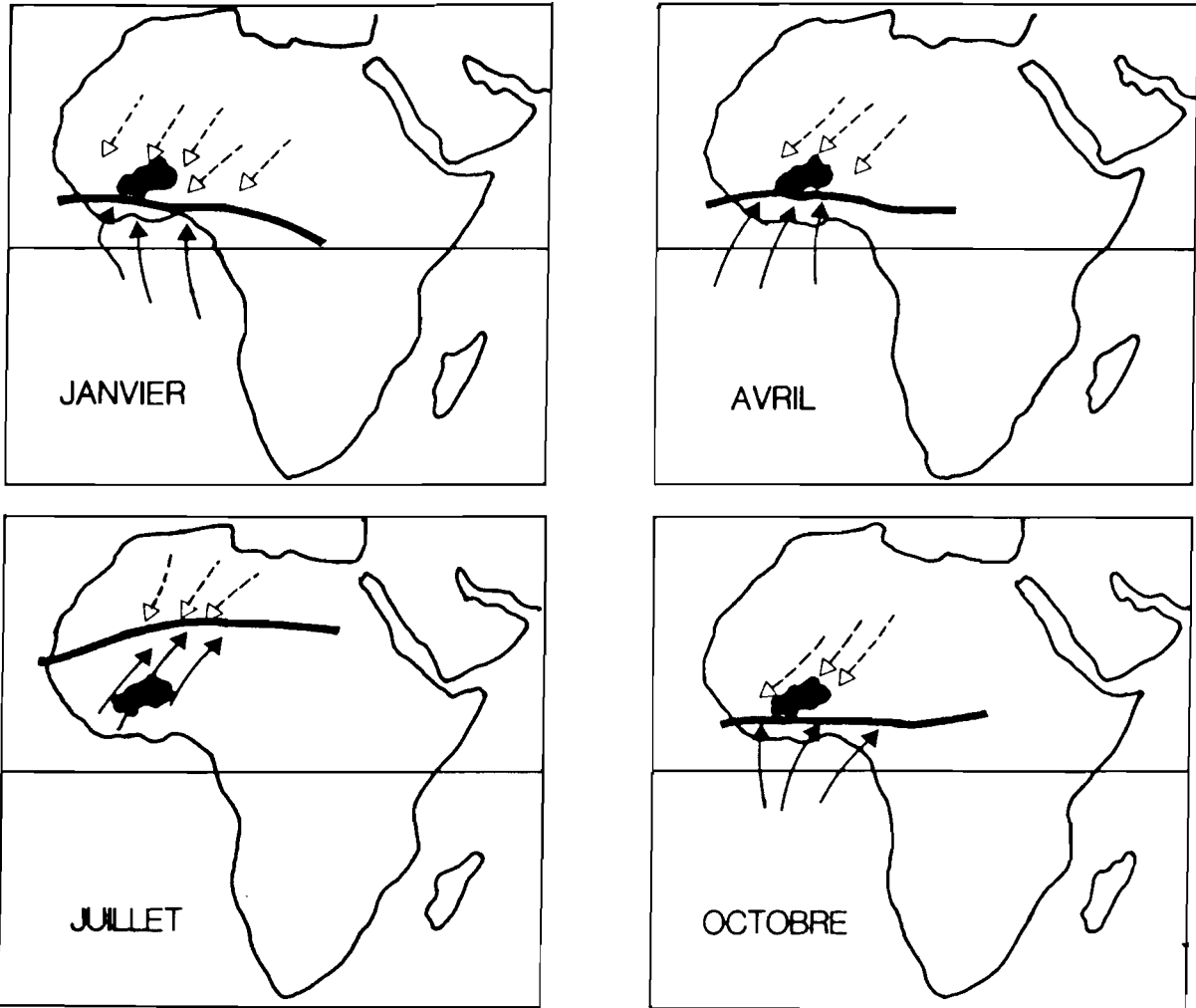
On distingue deux saisons :

- la saison sèche dure de quatre à cinq mois dans le sud du pays et peut atteindre huit mois (octobre à mai) au nord du 14ème parallèle. La période de décembre à février sèche mais fraîche se distingue des autres mois de cette saison ; ils sont plus chauds et l'humidité relativement plus forte. Tout le pays est soumis à des flux d'air sec saharien et est balayé par un vent du nord-est : l'Harmattan.

- la saison humide, appelée aussi "hivernage" est dominée par un régime de mousson (flux humides océaniques) pendant laquelle la quasi totalité des précipitations a lieu. Le total pluviométrique moyen annuel varie de 1300 mm au sud à 400 mm dans les régions les plus septentrionales (RODIER, 1964)

La répartition des pluies dans la saison est dissymétrique : la transition saison sèche - hivernage est très progressive, de mars à juin, sous l'isohyète 900 mm à mai-juin plus au nord. Au contraire, le retour à la saison sèche est plus brutal (de 15 jours à un mois). Pour l'ensemble du BURKINA la majeure partie de la pluie annuelle provient de tornades issues de lignes de grains. Durant la plus grande partie de la saison, l'épaisseur de la mousson reste insuffisante pour que l'on observe des pluies continues. Ceci est d'autant plus vrai que l'on se situe plus au nord du pays..

LA POSITION DU BURKINA FASO PAR RAPPORT AU F.I.T.



d'après PALLIER (1981)

- Trace au sol du F.I.T. (front intertropical)
- - - - -> Direction des principaux flux secs (alizés)
- > Direction des principaux flux humides (mousson)

Fig-4-

Ces lignes de grains se déplacent de l'est vers l'ouest, avec parfois une légère composante sud, portées par les flux d'est d'altitude. Elles se présentent comme des bandes nord-sud larges de 50 à 150 km et composées de cumulus et cumulo nimbus à grand développement vertical (12 km) (pl photo n°1). Elles peuvent parcourir des distances importantes (la ligne de grains "BRIGITTE" en 1976 suivie depuis l'est du NIGER a traversé le pays à une vitesse moyenne de 54 km/h et ne s'est dissipée qu'à l'ouest du MALI, parcourant ainsi près de 3000 km (bulletin ASECNA, 1976,a,b). Le long du parcours d'une ligne de grains on dénote une forte irrégularité des précipitations. Selon LEMAITRE (1981) les lignes de grains sont constituées d'un assemblage de cellules convectives telles que les plus actives sont disposées linéairement à l'avant. En arrière, les cellules se désactivent progressivement. Les masses d'air donnant lieu à précipitation ont donc paradoxalement une origine principalement continentale et dans une moins grande part maritime. Le fort pourcentage d'eau recyclée sur le continent dans le total pluviométrique de OUAGADOUGOU a été mis en évidence par le traçage deutérium et oxygène 18 des eaux de pluies (BAUDET et LAURENTI, 1976). Cela a été également démontré par FONTES J.C. (1976) à NDJAMENA. POUYAUD (1985b) constate que sur les grands bassins comme celui du NIGER, seulement 10% des précipitations, correspondent à des apports externes au système bassin-atmosphère. Sous les latitudes du BURKINA on peut ainsi penser que seulement 10% de la vapeur d'eau a une origine immédiatement marine, le reste étant du recyclage.

L'uniformité topographique efface les disparités locales et la distribution des climats est latitudinale.

De par sa position latitudinale le BURKINA connaît un ensoleillement moyen par jour remarquablement constant tout au long de l'année et d'une année sur l'autre (ensoleillement moyen = environ 8,5 heures par jour) (OUEDRAOGO et al, 1981).

1.4.2. Les vents.

. Au cours des mois d'hiver, la direction privilégiée est E.N.E. qui correspond à l'Harmattan, de mai à octobre la direction S.O.O. traduit le passage du flux d'air humide venant du golfe de GUINEE. La figure numéro 5, qui représente les roses des vents pour l'année 1981 à la station d'OURSI (CLAUDE et al, 1982) (14°37' N 0°29'O), montre la claire opposition de l'Harmattan du N.E.E. de la saison sèche à la "mousson" du S.O, O de l'hivernage. Le mois de mars-avril et de septembre-octobre sont des mois de transitions où il est déjà plus délicat de parler de direction privilégiée. Ces vents ne sont pas très violents, en moyenne mensuelle, leurs vitesses varient entre 2 et 4 m/s. En moyenne journalière ils ne dépassent qu'exceptionnellement une vitesse de 20 m/s, ils sont fréquemment compris entre 2 et 6 m/s (forces de 1 à 3 dans l'échelle BEAUFORT). Les

vitesses moyennes journalières mensuelles décroissent régulièrement d'un maximum en juin vers un minimum en octobre puis croissent jusqu'en juin suivant. Cet aspect est accentué pour les moyennes nocturnes ou le maximum est en juin. De façon générale, il y a très peu de vent la nuit et le matin en saison sèche (POUYAUD, 1976). Ce dernier résultat sera pris en compte dans la constitution des protocoles des pluies simulées.

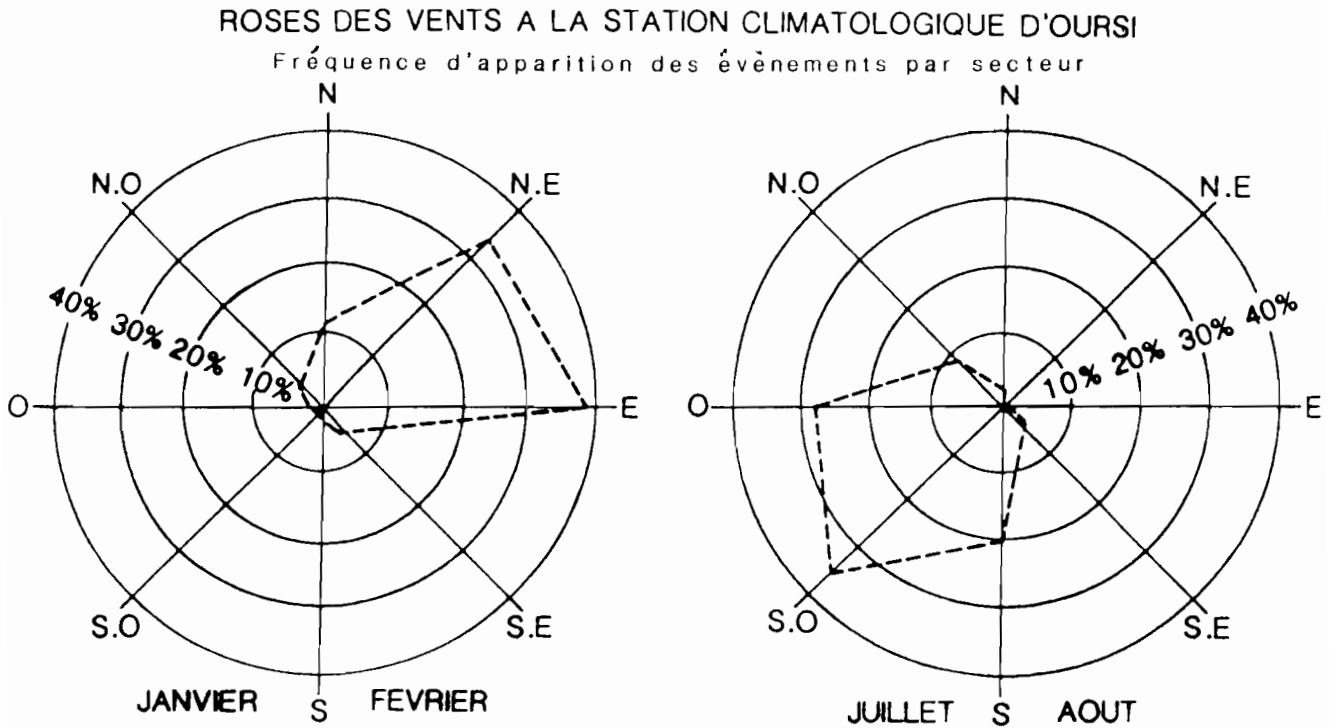


Fig. 5

D'après CLAUDE et AL. 1982

1.4.3 Température et humidité.

Les valeurs mensuelles de température (moyennes, minima et maxima journaliers), permettent de distinguer 4 saisons sur l'ensemble du territoire (fig.6) : une grande saison chaude de mars à avril, puis une petite saison fraîche, où les pluies tempèrent sensiblement les ardeurs de l'été boréal, ensuite une petite saison chaude (octobre novembre) provoquée par l'arrêt des pluies, enfin une grande saison fraîche correspondant à l'hiver boréal. La petite saison chaude n'a pas lieu tous les ans et certaines années le basculement brutal entre l'hivernage et la saison fraîche accentue la dissymétrie de la saison des pluies.

La température mensuelle varie avec la latitude. Les mois les plus chauds sont mars pour le sud (31°C à GAOUA et LEO), avril pour le centre (32°C à OUAGADOUGOU) mai dans le nord (35°C à OURSI).

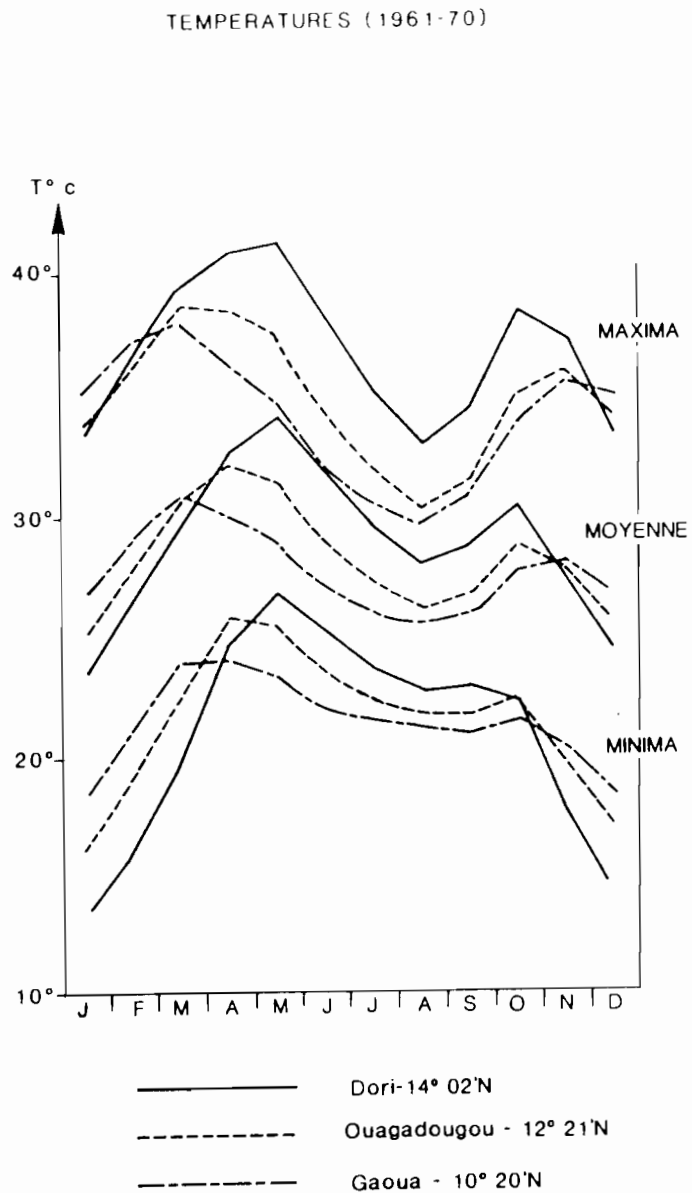


Fig. 6

D'après Fontes 1983

Les températures les plus basses sont observées en janvier dans le centre et le nord du pays (23°C à OURSI et à MARKOYE). Dans le sud, l'influence continentale s'estompe plus fortement en saison des pluies et c'est le mois d'août qui est le plus frais (25°C à BOBO-DIOULASSO). L'amplitude moyenne varie assez nettement du sud au nord de 3 à 4° à GAOUA, à 11° dans le nord (OURSI). Les valeurs moyennes maximales sont pratiquement toujours supérieures à 30°C en toutes saisons. Elles dépassent 40° au nord du pays (41°C moyenne interannuelle de mai à OURSI).

Les valeurs moyennes minimales sont toujours supérieures à 15°C. L'amplitude journalière avoisine les 10°C en saison des pluies et peut atteindre 20°C en saison sèche quelle que soit la région. Ce sont les stations du nord qui fournissent les valeurs extrêmes les plus fortes, minimum absolu observé à OURSI 7,6°C en décembre 1978 et maximum absolu 45,7°C en mai 1983 (9 années d'observations).

Les reliefs très modérés n'influencent que très peu les températures. La seule différenciation régionale, que ce soit pour les valeurs moyennes ou extrêmes, est latitudinale.

A la répartition des températures dans le temps comme dans l'espace on peut associer celle de l'humidité relative de l'air.

L'humidité relative moyenne annuelle n'est jamais très élevée, elle diminue du sud vers le nord (59 % à GAOUA, 34 % à OURSI). En saison des pluies, les moyennes mensuelles de juillet août qui peuvent dépasser 75 % dans le sud 60 % dans le nord retombent à des valeurs proches de 20 % en saison sèche.

Cette sécheresse atmosphérique en hiver aggrave le déficit pluviométrique de saison sèche.

1.4.4 . Evaporation.

L'évaporation est mesurée à la majorité des stations synoptiques simultanément sous abri (évaporomètre PICHE) et sur nappe d'eau libre (bac COLORADO enterré ou bac classe A). De nombreuses études ont montré que les données fournies par l'appareil PICHE sont plutôt d'ordre indicatif. Elles fluctuent dans le même sens que l'évaporation, constituant au mieux un indicateur de celle-ci mais certainement pas une mesure physique de son intensité (POUYAUD, 1977). La hauteur annuelle évaporée sur eau libre varie de 2600 mm à la frontière sud du pays à 4800 mm pour la station d'OURSI dans le nord (valeur exceptionnellement élevée mais représentative de l'évaporation à une station climatologique bien ventée), notons 3000 mm pour DORI, un peu plus au sud pour une station plus à l'abri du vent.

Il faut noter ici que l'évaporation est l'une des variables du climat les plus sujettes au "micro climat local" :

- Influence, sur le vent, de l'urbanisation à proximité des stations climatologiques
- Influence de la végétation sur le vent ou l'humidité de l'air autour des bacs (différence entre bac sur sol nu ou sur pelouse).
- Influence des variations annuelles d'un plan d'eau pas trop éloigné de la station, etc.

Les plus fortes valeurs sont obtenues avant les premiers effets de la mousson, en mars, avril dans le nord avec plus de 500 mm pour chaque mois, en janvier pour le sud avec moins de 300 mm. Les valeurs les plus faibles sont celles du mois d'août.

Ces valeurs de l'évaporation en station climatologique ne sont pas directement transposables aux grandes nappes d'eau libre, lacs, barrages. POUYAUD (1985a) donne des corrélations satisfaisantes entre l'évaporation sur bac et l'évaporation sur lac déduites d'un bilan hydrologique fin. Il donne une évaporation du lac de BAM en année médiane de 2362 mm/an avec un maximum en avril (environ 8mm/jour) et un minimum en juillet et août (environ 5 mm/jour).

1.4.5 L'évapotranspiration potentielle. (E.T.P.)

Elle a été calculée pour quelques stations (OURSI, BAM, NDOROLA) suivant la formule de PENMAN où le rayonnement net est calculé par l'équation établie par RIOU (1975) pour un albedo de 0,05 correspondant à une nappe d'eau libre et de 0,15 correspondant à un couvert végétal graminéen (Tableau 1).

TABLEAU 1 ETP PENMAN a = 0,05 et a = 0,15

Moyenne	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	AN	
Oursi a = 0,05	7,1	8,1	9,1	9,7	10,3	9,7	8,7	8,1	8,2	8,7	7,8	6,8	8,7	*
a = 0,15	6,4	7,4	8,3	8,9	9,4	8,9	7,9	7,3	7,4	7,8	7,1	6,2	7,8	
Bam a = 0,05	5,6	6,9	7,7	8,5	8,9	8,5	6,9	6,6	6,6	6,8	6,3	5,6	7,1	**
a = 0,15	3,3	4,3	4,9	5,8	6,6	6,7	6,1	6,1	6,1	5,6	4,3	3,3	5,3	
Ndorola a = 0,20	4,8	5,8	6,3	6,4	6,4	5,8	5,1	4,7	4,7	4,7	4,6	4,5	5,3	** *

* in CHEVALLIER et al 1985.

** in POUYAUD 1985

*** in LAMACHERE 1984

1.4.6. Les pluies.

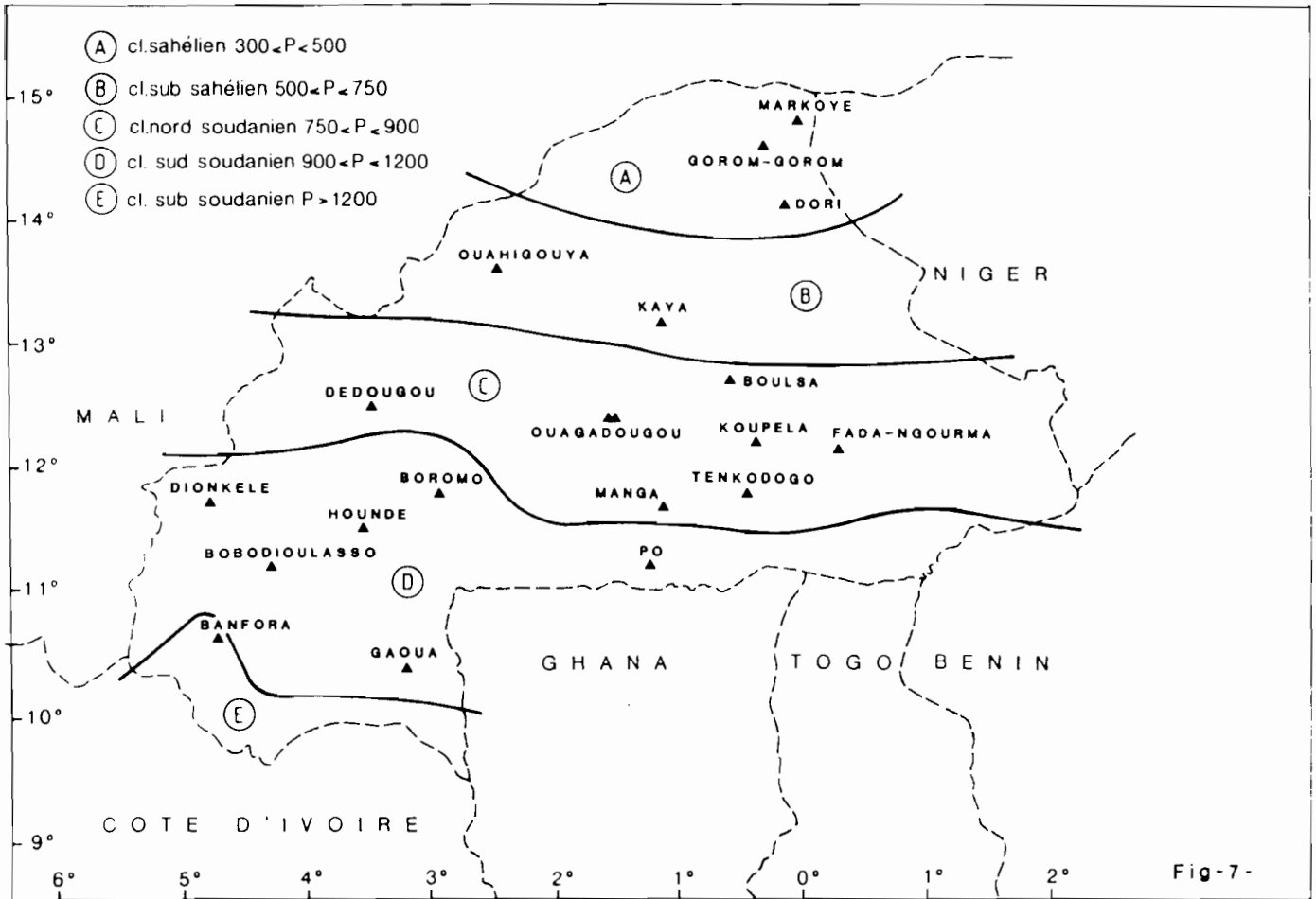
Les méthodes de prédiction hydrologique que nous allons présenter dans ce travail, sont fondées sur des relations "pluies-débits" utilisant la pluie annuelle pour les volumes écoulés annuels et la pluie journalière pour les fortes crues. L'étude des paramètres statistiques des variables : hauteur pluviométrique annuelle, hauteur pluviométrique journalière, et intensité - durée des averses a été un préalable à notre recherche.

Le régime des précipitations au BURKINA FASO a fait l'objet de nombreuses synthèses (BRUNET-MORET, 1963) (MONIOD et al, 1977) (LAHAYE, 1980) présentant des données statistiques fiables pour l'hydrologue sur la chronique 1920-1970. Or, cette région connaît depuis 1969 une sécheresse persistante (SIRCOULON, 1976), (ALBERGEL et al, 1984b, 1985). Se pose, alors la question de la validité pour la période actuelle des références statistiques construites sur des données climatiques de la période où la pluviosité était plus abondante (Colloque CIEH [2], 1986) (ALBERGEL, 1986).

1.4.6.1. Les données pluviométriques.

Elles proviennent du recueil des pluviométries journalières ORSTOM-CIEH [2] (1977) pour la période couvrant l'origine des stations à 1965, des bandes magnétiques ASECNA [3] pour la période 1965-1979, et des originaux disponibles au bureau de l'ASECNA [3] à OUAGADOUGOU pour la période 1980-1983. Pour quelques stations, des totaux annuels ont été utilisés pour l'année 1984 ; ils proviennent des bulletins agrométéorologiques publiés par les Services de la Météorologie et des Travaux Publics à OUAGADOUGOU.

Sur l'ensemble des stations observées depuis au moins vingt cinq ans, la validité des données a été vérifiée sur la période 1930-1979 en utilisant le vecteur indice pluviométrique régional (BRUNET-MORET, 1979). Plutôt que d'essayer de corriger des données, (ce qui ne peut être fait qu'à l'échelle annuelle) nous avons supprimé, de notre échantillon, les stations qui présentent les plus grandes déviations avec le vecteur indice (erreur d'appareillage, modification de l'environnement du pluviomètre, etc ...). Vingt stations de longue durée ont été ainsi sélectionnées pour former un échantillon de postes pluviométriques répartis dans l'ensemble du spectre écologique rencontré dans le pays (GUINKO, 1984), fig. n°7.



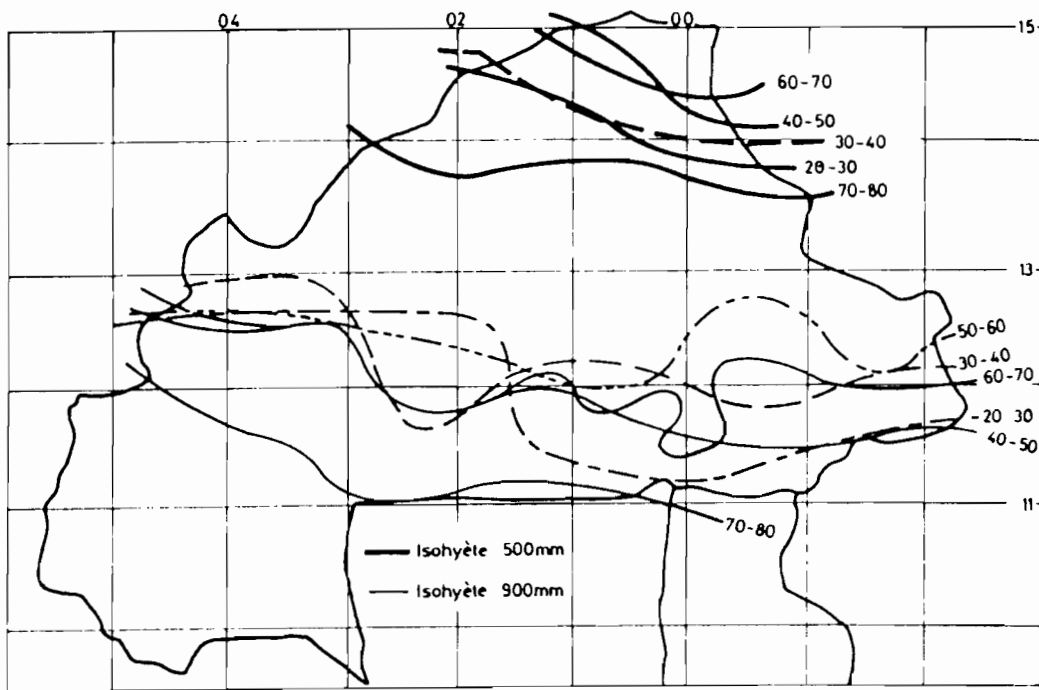
1.4.6.2. Les hauteurs pluviométriques annuelles.

La figure n°8 montre les fluctuations de la situation des isohyètes 500 et 900 mm au cours des six dernières décennies. Malgré l'arbitraire du découpage par tranche de dix ans, on note une remontée générale vers le nord des isohyètes entre 1920 et 1960, puis une descente sensible pour 1960 et 1970, et un record vers le sud pour la décennie 1970-1980.

L'isohyète 500 mm, au nord de la frontière malo-burkinabé, pour 1950-1960, se situe à la latitude de OUAHIGOUYA pour 1970-1980, soit une descente de plus de 200 km ! L'isohyète 500 mm, relatif aux années 1983 et 1984, atteint pratiquement la latitude de OUAGADOUGOU.

Ces résultats corroborent ceux présentés par PUECH (1983) pour l'ensemble de la zone sahélienne ou par BADO *et al* (1982) pour le nord du BURKINA FASO.

Fig-8-
VARIATIONS DES ISOHYETES 500 ET 900 mm
AU COURS DES SIX DERNIERES DECENNIES



Pour mettre en évidence les grandes tendances climatiques, la méthode des moyennes mobiles pondérées (OLIVRY, 1983) a été appliquée à sept stations observées depuis au moins soixante ans, lissant ainsi les variations interannuelles. La figure n°9 montre, pour quatre d'entre elles, une phase déficitaire persistante depuis 1969.

$$\bar{P}_n = \frac{1}{2} P_n + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n P_i e^{-0,7(n-i)} \text{ où } P_n = \text{pluviométrie de l'année } n$$

STATION: DORI STATION: OUAHIGOUYA STATION: DEDOUGOU STATION: FADA

MOYENNES MOBILES PONDEREES - PLUVIOMETRIES ANNUELLES

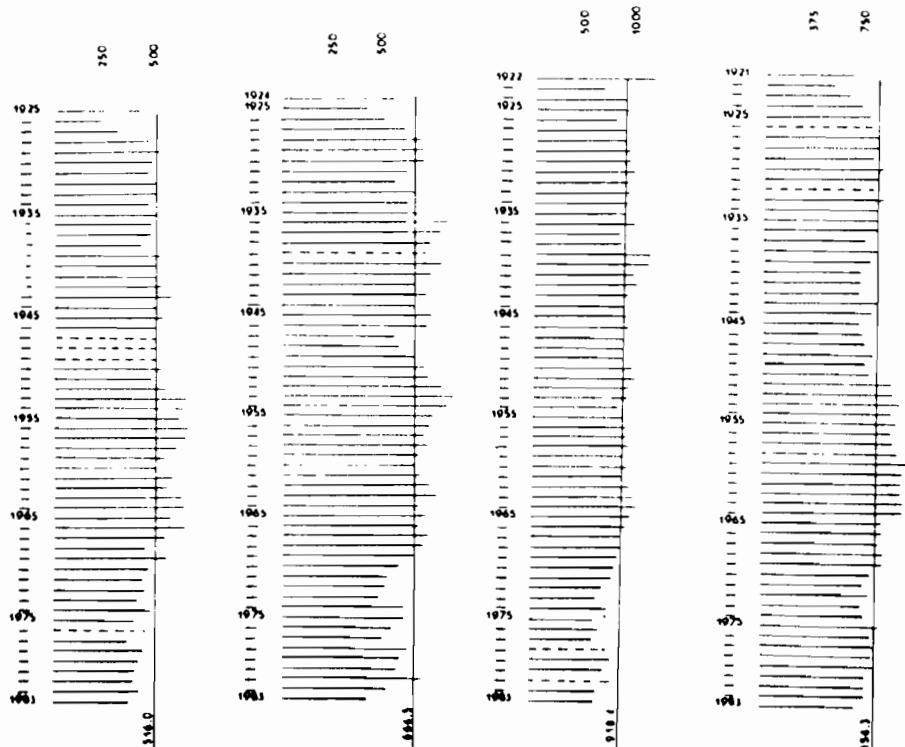


Fig-9-

Les résultats consignés dans le tableau n°2 et qui comparent, pour les sept stations, les moyennes mobiles pondérées à la moyenne interannuelle, donnent une image de l'évolution climatique pour l'ensemble du BURKINA FASO.

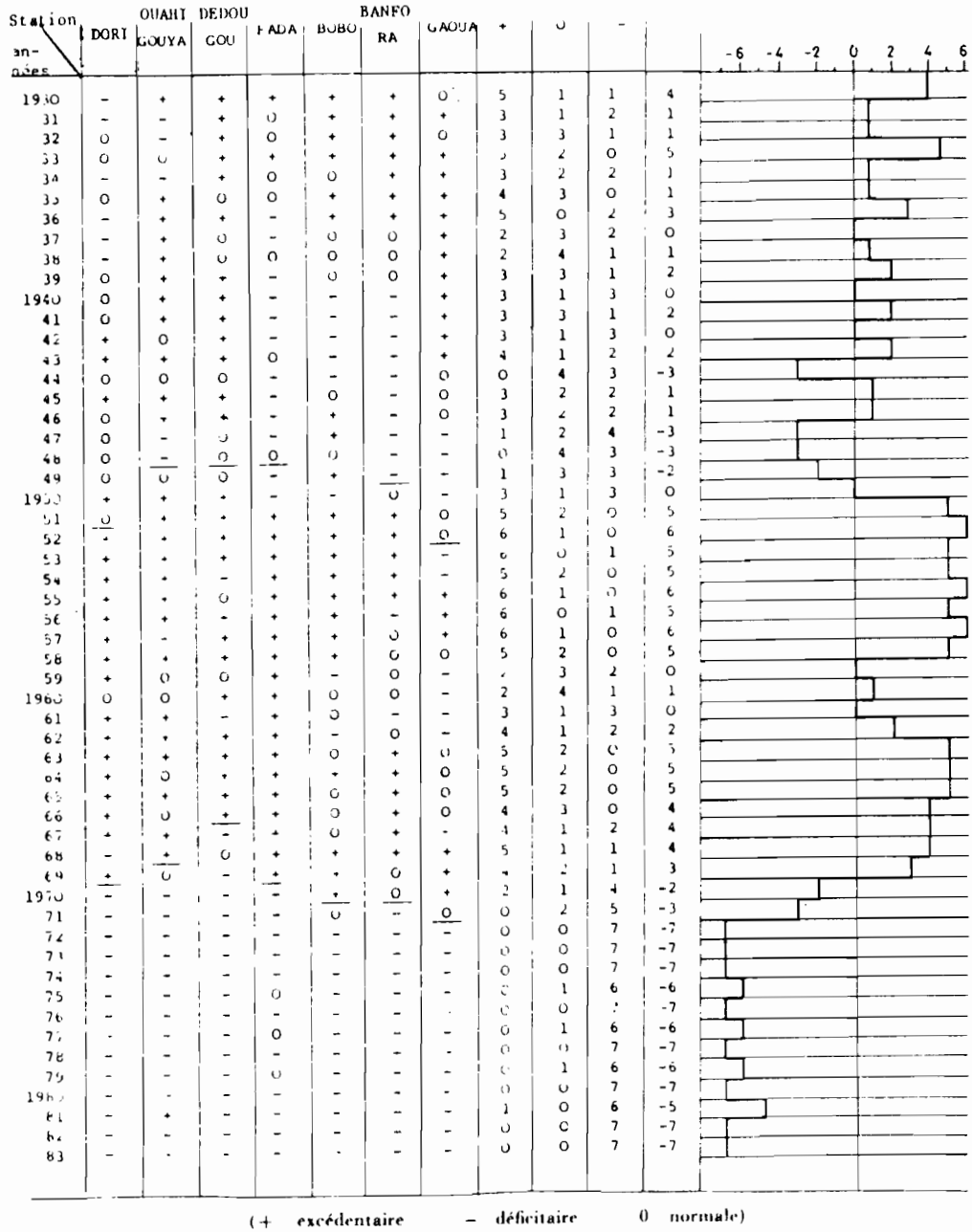


TABLEAU 2 - COMPARAISON ENTRE LA MOYENNE MOBILE ET LA MOYENNE INTERANNUELLE POUR LES DIFFERENTES STATIONS CLIMATOLOGIQUES

On observe :

- De 1930 à 1949, une période à pluviométrie proche de la moyenne,
- De 1950 à 1968, des années successives largement excédentaires,
- Depuis 1969, une tendance générale vers un régime déficitaire.

L'analyse fréquentielle des totaux pluviométriques annuels de ces sept stations a mis en évidence les faits suivants :

- une concentration des années de la période 1970-1983, dans les dix plus basses fréquences (tableau n°3)

- les courbes de fréquences, en fonction des hauteurs pluviométriques, présentent une forte déviation vers les valeurs les plus basses des séries (fig. 10). Ce résultat attendu pour les stations sahéliennes (distribution dissymétrique des pluviométries annuelles est plus singulier pour les stations soudaniennes pour lesquelles la prise en compte des années récentes accroît la dissymétrie des distributions statistiques.

AJUSTEMENT DE LA LOI NORMALE
A DES PLUVIOMETRIES ANNUELLES

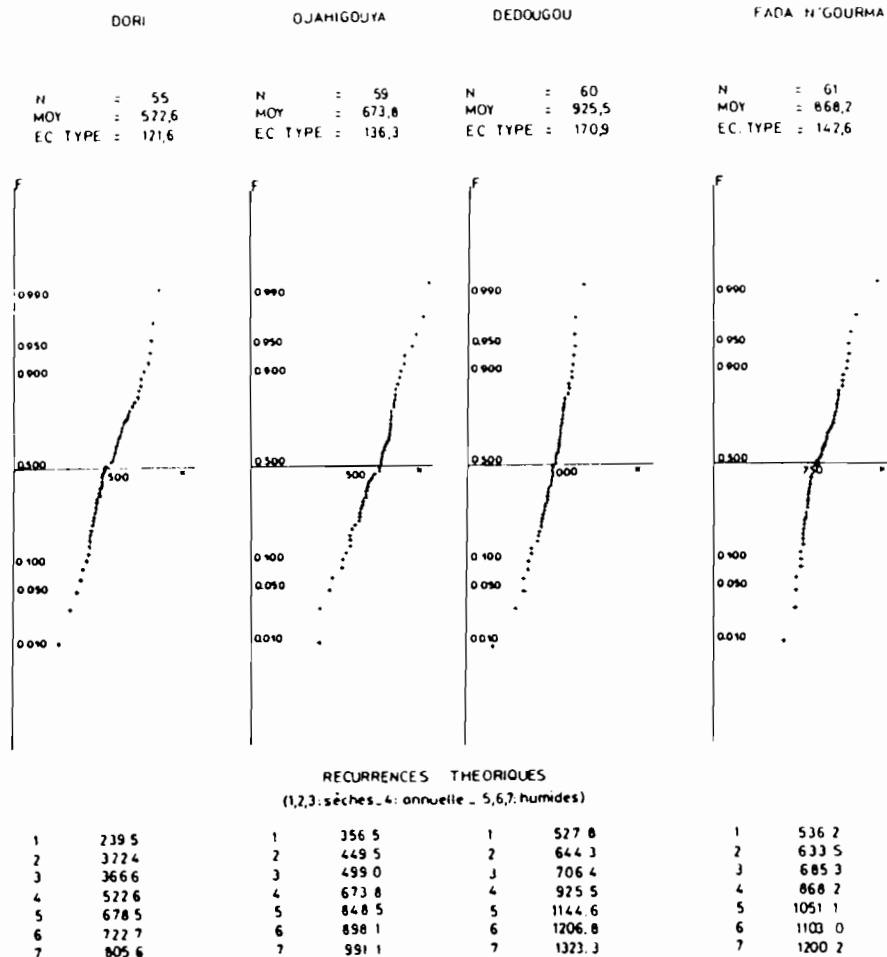


Fig - 10 -

Pour mieux caractériser cette concentration d'années déficitaires dans la période 1969-1984, nous avons comptabilisé, sur les stations sahéliennes (pluviométrie interannuelle ≤ 750 mm), le nombre d'années de la période 1969-1984 pour lesquelles le total pluviométrique est inférieur ou égal à la décennale sèche établie par RODIER (1975) sur la base des données de la période antérieure à la sécheresse.

Stations	GOROM GOROM	MARKOYE	DORI	OUAHIGOUYA	KAYA
Moyenne annuelle mm	462	420	535	674	707
Année décennale sèche : (RODIER, 1975)	320	259	361	522	542
Nombre d'années de 1969 à 1984 où $P \leq D$	6	1	4	8	5

Tableau n°3 - Comparaison des pluviométries de la période 1969-1984 à la décennale sèche établie par RODIER (1975).

Les résultats consignés dans le tableau numéro 3 montrent qu'un risque de sécheresse qui avait une occurrence décennale dans la période antérieure à 1969, apparaît en moyenne cinq fois en seize ans pour la période 1969-1984. Sous l'hypothèse que la série est stationnaire, la probabilité d'observer cinq fois la décennale sèche en seize ans, est égale :

$$P = C_{16}^5 (0,9)^{11} \cdot (0,1)^5 \approx 1,5 \cdot 10^{-2}$$

La valeur très faible de cette probabilité est un argument de plus pour affirmer la singularité de la période sèche. Elle montre comment un risque, correctement estimé pour un aménagement avant 1969, est devenu, depuis, une contrainte.

En appliquant le test de LEE et HEGHINIAN (1977), aux séries pluviométriques annuelles de quelques stations du BURKINA FASO, CARBONNEL et HUBERT (1985) mettent en évidence une rupture dans la distribution statistique de ces séries autour de l'année 1970.

Il est intéressant de constater que la probabilité de rupture est pratiquement nulle entre les deux premières périodes précédemment décrites, alors qu'elle est maximale entre la seconde et la troisième. Ce résultat confère un caractère de singularité à la sécheresse actuelle.

La non stationnarité du régime pluviométrique annuel au BURKINA FASO est également confirmée par SNIDJERS, 1986 qui utilise le test de PETTITT (1979) sur un indice pluviométrique régional fabriqué à partir des données de stations du nord et du centre du pays :

Pour mieux caractériser la tendance générale de l'évolution climatique, des fractions pluviométriques annuelles ont été définies en fonction de l'importance des averses (CARBONNEL, 1983).

- P1 : somme des précipitations journalières inférieures à 20 mm
- P2 : somme des précipitations journalières comprises entre 20 et 40 mm
- P3 : somme des précipitations journalières supérieures à 40 mm.

L'étude des variations temporelles de ces trois fractions pluviométriques aux différentes stations du BURKINA FASO (ALBERGEL *et al*, 1984, a, b) a montré de bonnes corrélations entre P3 et la pluie annuelle et donc une bonne co-fluctuation entre ces deux variables. P1 reste par contre relativement constante dans le temps.

1.4.6.3. Les hauteurs pluviométriques journalières.

Si l'étude des fractions pluviométriques met bien en évidence la diminution notable de l'ensemble des pluies supérieures à 40 mm, elle n'est pas suffisante pour apprécier l'évolution des pluies maximales durant la période de sécheresse. En effet, la pluie journalière de récurrence décennale humide est comprise pour le BURKINA, entre 70 mm et 110 mm (LAHAYE, 1980)

Sur chaque série pluviométrique, nous avons considéré les n valeurs les plus fortes observées, n étant le nombre d'années d'observations.

Nous avons noté le nombre (v) d'apparitions d'une de ces valeurs dans la période 1969-1983 pour le comparer au nombre d'années (ns) observées durant cette période. Nous avons également consigné le rang (r) de la première valeur observée entre 1969 et 1983 (tableau n°4).

On constate pour 20 stations observées :

- quatre pour lesquelles $v \geq ns$
- deux pour lesquelles $v \leq ns/2$
- pour douze stations la plus forte pluie arrive à un rang ≤ 5 .

Sur l'ensemble des vingt stations, 945 années ont été observées dont 260 dans la période sèche. 198 valeurs de pluviométrie journalière les plus fortes, parmi 945 considérées, ont été observées durant la période 1969-1983.

Station	n	ns	v	r	Khi carré
OUAGADOUGOU-AERO	32	14	15	3	0,127
BANFORA	56	13	10	5	0,901
BOBO DIOULASSO	65	13	8	10	2,404
BOROMO	52	13	11	10	0,410
BOULSA	23	14	10	2	2,921
DEDOUGOU	61	12	6	13	3,735
DIONKELE	27	13	11	3	0,593
DORI	50	12	10	5	0,438
FADA NGOURMA	54	11	14	12	1,027
GAOUA	66	12	8	9	1,629
GOROM GOROM	24	12	8	2	2,666
HOUNDE	54	14	9	11	2,410
KAYA	57	11	11	2	0,000
KOUELA	58	14	8	12	3,390
MANGA	32	14	15	1	0,127
MARKOYE	25	14	10	2	2,597
OUAGADOUGOU ville	59	15	16	3	0,093
OUAHIGOUYA	55	12	11	4	0,106
PO	39	14	6	4	7,131
TENKODOGO	56	13	11	19	0,401

Tableau n° 4 - Occurrence des pluies maximales dans la période sèche.

n = nombre d'années observées.

ns = nombre de données observées dans la période 1969-1983.

v = nombre de valeurs parmi les n plus fortes apparues dans la période 1969-1983.

r = rang de la plus forte pluie apparue dans la période 1969-1983.

Pour savoir si la probabilité d'occurrence des précipitations maximales, dans la période sèche 1969-1983, est la même que celle dans la période antérieure, nous avons appliqué le test du "Khi carré" à chaque série. (Tableau n°5)

Evénement	Apparition des valeurs maximales dans la période 1969-1983	Non apparition de valeurs maximales dans la période 1969-1983
Fréquence observée	$X1 = v$	$X2 = n-v$
Fréquence théorique	$np1 = ns$	$np2 = n-ns$

Tableau n° 5 Fréquence observée et fréquence espérée.

$$khi\ carré = \sum_{i=1}^{i=z} \frac{(xi - npi)^2}{npi}$$

Le nombre de degré de liberté de cette distribution en "khi carré" est égale à un (deux classes - une relation). La table des valeurs des centiles, pour la distribution en "khi carré" à un degré de liberté, donne la valeur 3,84 pour khi carré (0,95). Exceptée donc à la station de PO, on peut conclure que la probabilité d'occurrence des précipitations maximales, à chaque station prise individuellement, est équivalente dans la période sèche et la période humide avec un seuil de signification de 0,05. Ce seuil de signification est d'autant plus élevé que la valeur du khi carré est voisine de zéro.

Il est possible d'utiliser ce test sur l'ensemble des stations années en faisant l'hypothèse de l'indépendance des stations vis-à-vis du phénomène étudié.

La valeur du khi carré est alors 14,3 et le test rejette l'hypothèse d'égalité des probabilités d'occurrence dans les deux périodes.

Sur l'ensemble du pays, il est possible d'affirmer que le nombre de précipitations maximales journalières a significativement diminué pendant la période 1969-1983. A l'échelle de chaque station, cette même affirmation n'est pas statistiquement acceptable vu la fréquence des évènements dans la période 1969-1983 par rapport à la longueur d'observation totale.

Pour maximiser cette information sur les pluies journalières les plus fortes, nous avons consigné, dans le tableau n° 6 les années d'apparition des trois évènements pluvieux les plus forts observés. On constate :

- neuf de ces évènements apparaissent dans la période 1969-1983
- leur occurrence reste indépendante de la longueur d'observation
- une station a sa plus forte valeur de pluviométrie journalière observée durant la période sèche, quatre stations ont leur seconde valeur et quatre autres leur troisième valeur observée dans cette même période.

Station	Date d'occurrence des trois pluies les plus fortes
OUAGADOUGOU-AERO	63-57-69
BANFORA	62-63-23
BOBODIOULASSO	11-08-52
BOROMO	33-33-80
BOULSA	59-73-65
DEDOUGOU	40-39-40
DIONKELE	60-68-75
DORI	32-63-39
FADA NGOURMA	58-53-59
GAOUA	19-10-08
GOROM GOROM	65-69-61
HOUNDE	36-51-26
KAYA	58-75-58
KOUPELA	66-40-63
MANGA	70-51-50
MARKOYE	58-80-57
OUAGADOUGOU VILLE	53-30-77
OUAHIGOUYA	57-53-54
PO	50-65-50
TENKODOGO	55-35-67

Tableau n° 6 - Occurrence des trois pluviométries journalières les plus fortes.

En raisonnant sur l'ensemble des 945 stations années, il est possible d'utiliser le test du khi carré pour savoir si la probabilité d'occurrence de l'une des trois pluviométries les plus fortes est la même dans la période 1969-1983 que dans la période antérieure. (Tableau n°7)

Evénement	Occurrence dans la période 1969-1983	Occurrence dans la période antérieure à 69
Fréquence observée	9	51
Fréquence théorique	16,5	43,5

khi carré = 4,702

Tableau n°7 - khi carré sur l'ensemble des stations

L'hypothèse précédemment formulée est donc acceptable au seuil de signification de 0,25.

La période 1969-1983 apparaît moins singulière pour les pluviométries journalières extrêmes que pour l'ensemble des pluies supérieures au seuil de récurrence annuel. Les événements pluvieux les plus forts semblent être des phénomènes erratiques indépendants de la pluviosité annuelle. Deux exemples illustrent bien cette affirmation :

- la pluie du 18 août 1962 enregistrée à BOULSA (186 mm) ; remarquable autant par sa hauteur que par son extension spatiale ; de récurrence centenaire (KLEIN, 1967b), elle survient une année très humide (983,6 mm, plus forte valeur annuelle enregistrée) ;

- la pluie du 30 septembre 1984 enregistrée à TILLABERI au NIGER (206 mm)(météo nationale), de récurrence plus que millénaire (Anonyme, 1984) ; elle survient une année très sèche (381 mm). Elle a une répartition spatiale très limitée.

Comme les méthodes de prédétermination des crues exceptionnelles utilisent l'estimation de la pluie journalière de récurrence décennale, il est important de savoir si la période de sécheresse a produit ou non une "altération" de cette estimation.

L'ajustement des lois de GALTON (in BRUNET-MORET, 1975), GOODRICH (in BRUNET-MORET, 1974), et des Fuites (in RIBSTEIN, 1983) aux vingt séries pluviométriques journalières amène les remarques suivantes :

- différents seuils de troncature entre 30 mm et 60 mm ont été testés. Le changement du seuil de troncature modifie peu l'estimation des valeurs de récurrence décennale, mais a une influence importante pour les récurrences plus rares.

- pour chaque série, les estimations données par les trois lois de la pluie de récurrence décennale sont dans une fourchette de 10 %. A l'examen des ajustements graphiques, la loi des fuites avec un seuil de troncature de 30 mm apparaît comme la plus appropriée pour le plus grand nombre de stations.

Le tableau n° 8 consigne les valeurs de la pluviométrie journalière de récurrence décennale estimée par un ajustement de la loi des fuites avec un seuil de troncature de 30 mm :

- sur l'ensemble des données de la série,
 - sur n années antérieures à 1969 (69 exclue), soit 1954-1968 en général,
 - sur n années postérieures à 1969 (69 incluse), soit 1969-1983 en général,
- (n = nombre d'années observées pendant la période 1969-1983).

On remarque que les différences d'estimations entre l'ajustement sur les périodes antérieures et postérieures à 1969 ne sont pas systématiquement dans le même sens. Les différences d'estimations entre l'ajustement sur la série complète et sur les deux échantillons respectifs sont du même ordre.

L'examen des paramètres de forme des ajustements sur la période humide et sur la période sèche montre que la distribution est systématiquement plus asymétrique et plus aplatie sur la seconde que sur la première. En effet, le nombre des valeurs proches du seuil de troncature, est moins élevé dans la période sèche que dans la période humide, tandis que celui de valeurs extrêmes est sensiblement le même.

Tableau n° 8 - Valeur de la pluie journalière de récurrence décennale estimée par un ajustement de la loi des fuites.

Station	(1) mm	(2) mm	(3) mm
OUAGADOUGOU-AERO	94,6	95,2	92,1
BANFORA	110,0	115,7	104,6
BOBO DIOULASSO	108,0	103,7	93,7
BOROMO	95,9	88,3	95,3
BOULSA	95,4	102,7	89,6
DEDOUGOU	101,3	96,3	83,0
DIONKELE	98,0	107,2	90,1
DORI	80,8	81,1	81,7
FADA NGOURMA	94,4	84,8	98,6
GAOUA	113,6	96,7	101,8
GOROM GOROM	83,6	92,0	71,8
HOUNDE	92,9	108,4	91,5
KAYA	89,0	104,5	87,1
KOUPELA	97,7	92,4	89,0
MANGA	101,7	97,2	101,4
MARKOYE	70,1	74,4	66,6
OUAGADOUGOU ville	95,3	93,3	100,8
OUAHIGOUYA	92,1	94,6	95,7
PO	97,6	93,0	86,8
TENKODOGO	109,4	103,9	101,4

(1) sur l'ensemble des données

(2) sur n années antérieures à 1969 (69 exclu)

(3) sur n années postérieures à 1969 (69 inclus)

n = nombre d'années observées à la station considérée pendant la période 1969-1983.

Pour apprécier les variations de l'estimation de la valeur décennale et celles de la forme de la distribution en fonction de la chronique disponible, nous avons calculé ces paramètres pour une station sur des échantillons de quinze années se recoupant sur des périodes de dix ans.

Le tableau n° 9 consigne ces valeurs pour la station de OUAGADOUGOU VILLE, choisie parce qu'observée sans lacune depuis 1933. (la loi statistique retenue est celle des fuites).

Cette station définitivement fermée en 1986 est remarquable pour la qualité de ces données (L'HOTE, com. personnelle).

Tableau n° 9 - Paramètres d'une distribution "Loi des fuites" sur des échantillons glissants de quinze ans avec un pas de cinq ans à la station de OUAGADOUGOU VILLE

Echantillon	Coefficient d'asymétrie	Coefficient d'aplatissement	Valeur décennale mm
1934-1948	5,06	34,09	95,2
1939-1953	4,92	32,23	92,8
1944-1958	5,32	37,74	94,2
1949-1963	5,42	39,22	97,6
1954-1968	5,01	33,52	93,3
1959-1973	5,91	46,51	100,3
1964-1978	5,46	39,74	97,5
1969-1983	6,07	49,18	100,8

On remarque :

- quelle que soit la période utilisée, l'estimation de la valeur décennale varie au maximum de 8 %. Dans ce cas particulier, la valeur estimée de la décennale est la plus forte pour la période la plus sèche (1969-1983).

- les coefficients d'asymétrie et d'aplatissement sont d'autant plus élevés que l'échantillon contient un nombre important d'années sèches.

1.4.6.4. Pluviomètre à 1 m et pluviomètre au sol.

La pluie est relevée dans des pluviomètres à 1 m du sol suivant le règlement de l'OMM (1981) ou à 1,50 m pour de nombreuses stations du BURKINA. Il est intéressant pour l'hydrologue de connaître dans une région donnée la représentativité de cette mesure par rapport à la pluie mesurée directement au niveau du sol. Pour cela des sites ont été équipés simultanément d'un pluviomètre à 1 m et d'un pluviomètre au sol de type SNOWDOWN. Au BURKINA FASO, on dispose d'une série de ces mesures comparées de façon étagée du nord au sud, station climatologique d'OURSIS, du lac de BAM, bassin versant de BINNDE (région de MANGA) station climatologique de NDOROLA (NIENA DIONKELE). A partir de ces quatre chroniques de séries d'observations on remarque une excellente corrélation entre la pluie journalière au sol et la pluie à 1 m. La pluie au sol est toujours supérieure à la pluie à 1 m, la pente de la droite de corrélation est d'autant plus forte que la latitude augmente.

A OURSI (14°37' N) $P_{sol} = 1,43 P_{1m} - 1,80$ $r^2 = 0,98$ pour 139 observations.

A BAM (13°20' N) $P_{sol} = 1,23 P_{1m} - 0,2$ $r^2 = 0,98$ pour 157 observations

A NDOROLA (11°45' N) $P_{sol} = 1,08 P_{1m} + 0,25$ $r^2 = 0,99$ pour 72 observations.
 A BINNDE (11°42'N) $P_{sol} = 1,22 P_{1m}$ $r^2 = 0,99$ pour 109 observations.

A OURSI, il a été démontré (CLAUDE *et al*, 1982) que cette différence entre pluie au sol et pluie à 1 mètre dépend à la fois de l'intensité de la pluie et de la vitesse du vent. Des études à l'échelle mondiale ont montré l'importance du phénomène dans toutes les régions tropicales sèches (SEVRUK, 1985) (DE BRUIN, 1985). A l'échelle de l'Ouest Africain CHEVALLIER et LAPETITE (1986) proposent un abaque pour calculer les écarts entre pluie à 1 m et pluie au sol en fonction de la latitude.

1.4.6.5. Forme des averses.

Les formes des averses simulées doivent être aussi proche que possible de celles observées dans la nature. Les travaux de BRUNET-MORET (1963), ceux de LAHAYE (1980) déjà cités, deux études récentes de séries pluviographiques, (celle réalisée par CHEVALLIER (1985) à la MARE D'OURSI dans le nord du pays, et celle de OUAGADOUGOU de plus longue durée, réalisée à l'occasion de la synthèse sur le ruissellement urbain de cette ville par LE BARBE (1981) nous ont permis d'établir des hyétoigrammes types pour le protocole de pluies simulées.

Au nord de l'isohyète 1200 mm la forme la plus courante pour une averse est une ondée préliminaire suivie d'un corps prédominant et d'une traîne d'intensité plus faible et de courte durée. Les précipitations à deux pointes d'intensité d'une fréquence moindre ne sont pas rares, entre les isohyètes 1200 mm et 700 mm. L'une des deux pointes d'intensité est le plus souvent franchement supérieure à l'autre, la position temporelle de la plus forte semblant aléatoire. Ces deux pointes étant presque toujours séparées par une période assez longue d'intensité très faible ou nulle, elles peuvent, hydrologiquement parlant être considérées comme deux tornades simples séparées par un temps de ressuyage très court. La séparation doit se faire de façon à partager objectivement la période à faible intensité entre la traîne d'une première averse et l'ondée préliminaire de la seconde.

Dans les tableaux n° 10 et 11 sont réunis les principaux résultats d'ajustement des lois de GOODRICH à des hauteurs pour différents pas de temps aux stations climatologiques de JALAFANKA (MARE D'OURSI) et OUAGADOUGOU AEROPORT.

Fréquence Récurrence	6 mois	1 an	2 ans	5 ans	10 ans	20 ans
Durée						
5'	7,3	8,7	9,9	11,4	12,5	13,5
10'	12,5	15,0	17,2	19,8	21,6	23,2
30'	22,1	27,7	33,3	40,6	46,2	51,8
60'	28,1	34,7	40,2	46,5	50,8	54,7
120'	30,6	37,1	42,5	48,8	53,1	57,1

Tableau n° 10 : ajustement sur des lois de GOODRICH. Relation hauteur durée fréquence à JALAFANKA (OURSI) (CHEVALLIER et al, 1985). Hauteurs en mm.

Fréquence Récurrence	6 mois	1 an	2 ans	5 ans	10 ans	20 ans
Durée						
5'	11,0	13,2	15,4	18,4	20,6	22,8
10'	18,5	21,5	24,4	28,1	30,9	33,6
30'	35,8	41,0	45,9	52,2	58,7	61,1
60'	43,0	50,3	57,4	66,5	73,2	79,8
120'	47,7	56,6	65,3	76,6	85,1	93,5

Tableau n° 11 : Ajustement sur des lois de GOODRICH. Relation hauteur durée fréquence à OUAGADOUGOU (LE BARBE, 1981) hauteurs en mm.

A la station d'OURSI les valeurs très proches obtenues pour les courbes 30 minutes et 120 minutes montrent que le corps des averses durent rarement plus de 30 minutes dans cette zone climatique. On a le même résultat à OUAGADOUGOU pour les durées 60 minutes et 120 minutes.

L'influence de la sécheresse sur les courbes intensité-durée-fréquence semble être négligeable. On remarque cependant une modification appréciable des formes de pluies : l'intensité maximale du corps de l'averse survient en moyenne de 10 à 15 minutes plus tôt au cours d'une année sèche pour les averses de durée supérieure à 35 minutes. (AMRI, 1985).

1.4.6.6. Conclusions.

L'analyse de la pluviométrie annuelle permet de mettre en évidence, pour le BURKINA FASO, une période de sécheresse persistante depuis 1969. Cette phase sèche se singularise des autres sécheresses connues dans cette région du monde (1913, 1939) par sa durée et par son ampleur (succession d'un nombre important d'années extrêmement déficitaires).

Cette singularité soulève le problème de l'adéquation des ajustements statistiques des pluviométries annuelles sur l'ensemble des séries, quelle que soit leur longueur.

Les conséquences de cette évolution, sur la ressource globale en eau sont importantes et se manifestent aussi bien sur l'hydraulicité des grands bassins (POUYAUD, 1986) que sur l'alimentation des nappes ou de la recharge du stock hydrique des sols. (LEUSINK et TYANO, 1985).

Cette dégradation de la pluviosité annuelle, se caractérise par la diminution du total des pluies supérieures à 40 mm, mais sans affecter les valeurs extrêmes de pluviométrie journalière.

L'estimation de la pluie journalière de récurrence décennale (ou de fréquence plus rare) n'est pas modifiée par l'introduction des observations faites dans la période récente affectée par la sécheresse (1969-1983).

Que peut-on conclure sur l'évolution du ruissellement au vu de ces résultats ?

La nette diminution de la pluviométrie annuelle et surtout du total annuel des pluies supérieures à 40 mm, a deux effets opposés :

- la diminution du stock hydrique du sol au cours de la saison des pluies qui donne une probabilité plus faible à une forte pluie de survenir dans des conditions d'humidité maximale est un facteur défavorable au ruissellement.
- la dégradation de la végétation qui favorise la formation d'organisations pelliculaires imperméables à la surface du sol est un facteur favorable pour le ruissellement.

La pluie mesurée au sol, bien que différente, est fortement corrélée à la pluie à 1 m. Vu la rareté de dispositifs de mesures de la pluie au sol, il n'est pas possible d'utiliser ces observations pour les relations "pluies-débits" à l'échelle du bassin.

Sous pluie simulée la hauteur de la lame précipitée est mesurée au niveau du sol, il faut donc garder à l'esprit cette différence de mesure pour la transposition des pluies simulées aux pluies naturelles.

1.5 LA VEGETATION.

La végétation est un des caractères physiographiques des bassins versants, le plus important, pour ses effets sur le cycle de l'eau. Son influence sur le ruissellement et l'infiltration sera étudié en détail tant à l'échelle de la parcelle qu'à celle du petit bassin versant. Dans cette partie descriptive, nous essayerons à l'aide des travaux publiés à ce sujet de tirer les grands traits de sa répartition spatiale et évoquerons les types physiologiques majeurs qui peuvent venir en aide dans la cartographie utilisée en hydrologie.

TERRIBLE (1978) distingue cinq formations fondamentales qui s'étagent du nord au sud, et établit une carte de la végétation qui suit de près la pluviométrie. (fig. n°11)

1 - les formations claires à *Balanites aegyptiaca* et *Acacia raddiana* qui occupent les zones à pluviosité inférieure à 500 - 600 mm. Elles sont caractérisées par un tapis herbacé bas, inférieur à 80 cm, discontinu laissant des plages de sols nus de surface importante. Elles correspondent aux steppes sahéennes que l'on peut diviser en deux secteurs :

+ le secteur sahélo soudanien, des steppes à graminées xérophiles et mésophiles comme *Loudetia togoensis* mêlées parfois à des vivaces comme *Andropogon gayanus*. Le cycle de végétation active dure trois mois environ.

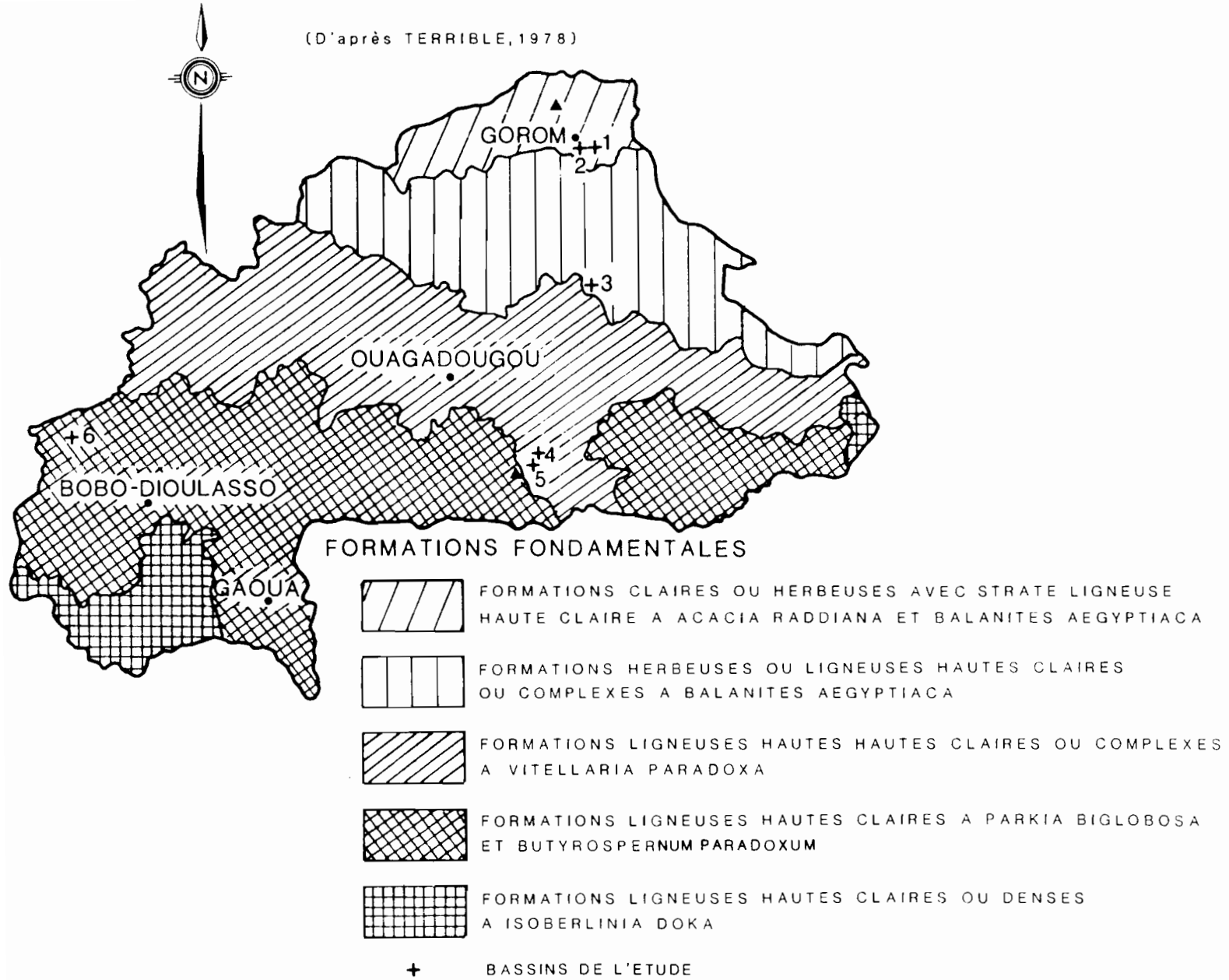
+ le secteur sahéien *stricto sensu* de TOUTAIN et DEWISPELAERE (1977, 1978), où la période de végétation n'excède pas deux mois et demi, et où les graminées sont essentiellement annuelles : *Aristida mutabilis*, *Cenchrus biflorus* et *Schoenefeldia gracilis*. C'est le secteur auquel appartient le bassin de la mare d'OURSI, étudié par LEVANG et GROUZIS 1980.

2 et 3 - les formations ligneuses hautes et claires de l'isohyète 600 mm à l'isohyète 900 mm. Elles sont bien décrites par FONTES, J. (1983) qui distingue le domaine soudahélien plus épargné par les feux de brousse, du domaine soudanien où la strate herbeuse est annuellement brûlée.

+ Les steppes arbustives des glacis soudahéliens. Dans la strate herbacée on retrouve les graminées telles que *Schoenefeldia gracilis* auxquelles s'ajoutent *Pennisetum spodicellatum*. Dans la strate arbustive on remarque l'apparition d'*Accacia seyal* et du baobab (*Adansonia digitata*).

+ les fourrés des zones gravillonnaires. C'est en milieu non dégradé la "brousse tigrée" à *Pterocarpus lucens*.

(D'après TERRIBLE, 1978)



BURKINA-FASO

GRANDES ZONES DE VEGETATION

Dessiné par J-P.DEBUICHE

Fig-11-

+ les savanes arbustives et forêts basses des zones gravillonnaires soudahéliennes. La densité des espèces ligneuses est assez importante. Le tapis herbacé très discontinu est dominé par *Loudetia togoensis*.

+ les savanes arbustives et arborées des glacis soudaniens, où selon la nature édaphique des glacis la savane domine.

+ les savanes arborées des zones gravillonnaires soudaniennes. La strate herbacée assez haute reste encore irrégulière, les espèces dominantes sont *Loudetia togoensis*, *Penisetum pedicellatum* et *Andropogon pseudapricus*. Sur les parties de sol enherbées la couverture est assez dense.

+ les savanes arborées des zones soudaniennes à sols ferrugineux. Il s'agit d'une savane arborée claire dominée par *Vitellaria paradoxa*. La strate herbacée est haute, annuellement brûlée et dominée par différentes espèces d'*Andropogon*.

4 - formations ligneuses hautes et claires à *Parkia biglobosa* et *Vitellaria paradoxa* (isohyète 900 à 1100 mm). Très fréquentes dans le centre sud au delà du 12ème parallèle, elles constituent des savanes arborées. On peut y distinguer également plusieurs faciès en fonction des grandes unités morphologiques (glacis gravillonnaires, glacis latéritisés ou non). La composition du tapis herbacé y varie peu, très haut (80 cm et plus) il est assez dense tout en laissant des parties de sol nu importantes surtout sur les glacis cuirassés.

5 - formations ligneuses claires ou denses à *Isobertinia doka* (isohyète 1100 à 1300 mm). Le paysage est celui de la forêt claire. On le rencontre dans l'extrême sud-ouest du pays.

Ce panorama de la végétation resterait incomplet si l'on n'évoquait pas les profondes modifications qu'il subit depuis près de trois décennies. L'ensemble de la communauté scientifique est à peu près d'accord pour penser que si les dégradations plus ou moins importantes sont essentiellement dues à la baisse pluviométrique enregistrée depuis le début des années 1970, elles sont fortement accentuées par l'action de l'homme et du bétail. (Conférence NORDESTE SAHEL IHEAL, PARIS, 1986).

1.6 LES ACTIVITES HUMAINES ET LA TRANSFORMATION DU MILIEU.

1.6.1. Les activités humaines.

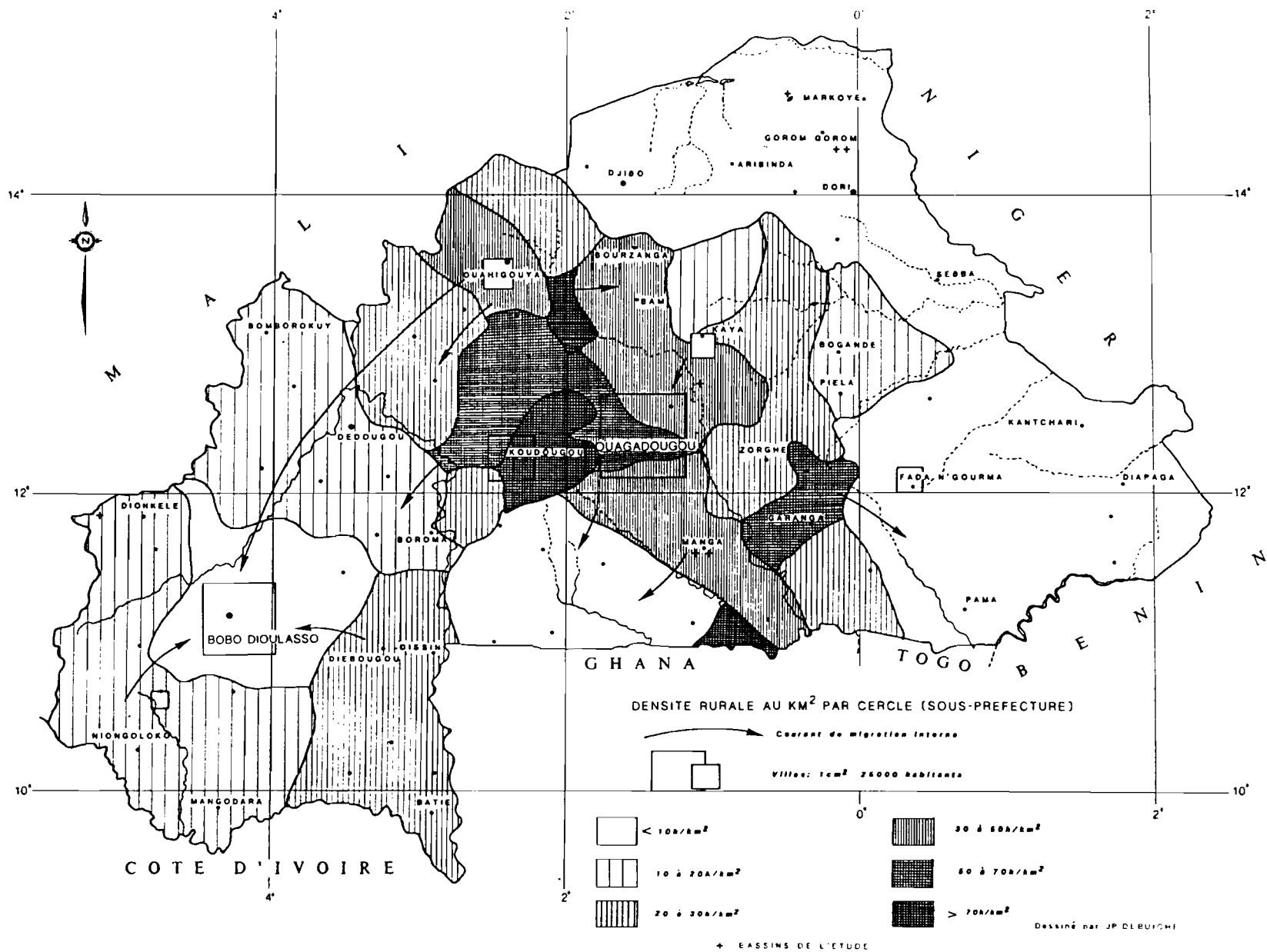
L'homme, à travers ses activités agricoles et industrielles fait partie intégrante du complexe biogéographique au même titre que les composantes physiques. Son importance doit être perçue par l'hydrologue sous deux angles essentiels :

- celui de la maîtrise de la ressource en eau qui lui permet l'aménagement de son environnement.

- celui de la modification des équilibres naturels qu'il crée par son intervention sur le cycle de l'eau.

La population burkinabé est de l'ordre de 7 M d'habitants en 1985. Elle a le taux de croissance le plus fort de l'AFRIQUE au sud du SAHARA (taux de croissance naturelle 20,6 %). Elle est en grande majorité rurale (93,6 %) et sa répartition est très déséquilibrée (fig. 12). Le plateau central où la densité démographique dépasse 60 hab/km² s'oppose aux régions "vides", le nord, le sud-est, l'est et le sud-ouest. Dans l'ensemble, 95 % de la population vit dans les parties arides ou semi arides du pays. (Ministère du Plan, 1979).

Fig-12- BURKINA FASO — DENSITE DE POPULATION EN 1973 (d'après G.PALLIER,1981)



Les mouvements migratoires représentent un trait dominant de la population burkinabé et peuvent être caractérisés par les chiffres suivants de l'année 1980 (source UNSO [9]) :

- Nomadisme suivant la transhumance des troupeaux : 58 000 hab en 1980.
- Migration inter-régionale ou exode vers les zones plus humides délaissées autrefois à cause des mauvaises conditions sanitaires (trypanosomiase et onchocercose) : 7 000 hab en 1980.
- Exode rural vers les grandes villes : 10 350 hab en 1980.
- Migration hors du pays (solde entre les flux entrant et sortant) : 30 000 hab/an. On estime qu'un million de burkinabés vivent en dehors de leur pays.

L'agriculture constitue la principale activité économique. Elle occupe 88 % de la population active totale et représente 50 % du produit intérieur brut (PIB). Cette agriculture est dominée par les cultures vivrières où les systèmes de production restent extensifs et n'utilisent pas toutes les potentialités du milieu en raison d'un manque de moyens de production et d'un défaut de technicité. Seules certaines cultures de rente comme le coton bénéficient d'un encadrement suivi et de moyens de production (ALBERGEL et al, 1985b). Ces cultures de rente forment les nouveaux agriculteurs qui utilisent pour le vivrier les techniques apprises sur les cultures industrielles.

La production vivrière (mil, sorgho) est à peine suffisante pour couvrir les besoins en année moyenne, elle subit violemment les aléas climatiques (LECAILLON et MORISSON, 1984). Parmi les productions de rentes (coton, arachides, sésame, karité) seul le coton a enregistré une progression importante passant de 52 t. en 1951-52 à 75 000 t. en 1984 et 150 000 t. en 1987 (données SOFITEX [10]). La production irriguée, riziculture, canne à sucre (20 000 t/an) et maraîchage s'est considérablement développée mais reste encore au dessous des potentialités du pays.

L'élevage qui représente 10 % du PIB et plus de 30 % des exportations officielles emploie 3 % de la population. Il revêt essentiellement deux formes : élevage traditionnel transhumant, pratiqué au sahel, élevage sédentaire intégré aux cultures.

L'industrie a une place modeste dans les activités du pays (0,3 % de la population active). Ses effectifs ont triplé depuis 1972, ce sont surtout des industries agro-alimentaires ou de mécanique légère développées dans les deux "principales" villes : OUAGADOUGOU (350 000 hab) et BOBO-DIOULASSO (200 000 hab). Le coût élevé des moyens de production dû à l'enclavement du pays et l'étroitesse du marché intérieur limitent nettement son essor.

L'artisanat est un secteur important de la vie socio-économique burkinabé ; en 1974 elle contribuait à 14 % à la valeur ajoutée nationale.

En dehors de la mine d'or de POURA et de l'exploitation artisanale des filons aurifères dans le nord du pays, la production minière reste insignifiante. Cependant les potentialités sont loin d'être négligeables mais les possibilités de leur mise en valeur rencontrent les contraintes d'un enclavement qui ne permet pas des productions à coût compétitif (manganèse de TAMBAO).

1.6.2. La dégradation du milieu

Le rôle de la dégradation du milieu sur la formation des crues des petits bassins versants sera étudié à partir d'exemples concrets. L'étude de l'évolution récente des milieux soudano sahéliens est à l'ordre du jour depuis les grandes sécheresses de 1972-73 et de 1983-84, comme en témoignent les nombreuses réunions internationales, Conférence des Nations-Unies sur la désertification (NAIROBI, 1977) par exemple ...

Pour le BURKINA FASO, une synthèse multidisciplinaire (ALBERGEL et *al*, 1984a) a cherché à quantifier ce phénomène à partir des données pluviométriques, hydrométriques et des productions végétales de 1920 à 1983. Plus régionalement l'importante étude agro-sylvo-pastorale de la mare d'OURSI cherche à décrire l'impact des systèmes de production sur l'écologie du milieu

Les causes directes de cette dégradation sont suivant le rapport UNSO [9] (1983) :

- une diminution sensible de la pluviométrie depuis 1969 qui a pour conséquence principale une diminution de la productivité des pâturages (GROUZIS, 1979, GROUZIS et SICOT, 1983).

- la déforestation pour la satisfaction des besoins en bois : chauffage, construction, usages industriels, délimitation de champs et d'enclos à bétail, nourriture pour le bétail.

- le défrichement pour l'extension des surfaces cultivées en vue de l'augmentation de la production agricole : celle-ci n'étant généralement pas obtenue par l'intensification des cultures. Parallèlement à ce défrichement (2,25 % par an selon TOUTAIN et DEWISPELAERE, 1978) on assiste :

- * au recul des jachères et au développement des cultures en continu (BERNUS et *al*, 1984).

* à l'abandon de la gestion collective des terroirs villageois (MARCHAL, 1982).

* à l'évolution des pratiques culturales intensives sous parc à *Acacia albida* vers une agriculture extensive sur champ de brousse (HERVOUET, 1980)

- le surpâturage qui nuit directement à la productivité de la strate herbacée et au développement des ligneux (ébranchage).

- les feux de brousses (accidentels, provoqués pour favoriser la repousse de l'herbe, les destruction de parasites, la chasse).

La dégradation du milieu commence par la diminution du couvert végétal, le sol étant moins protégé subit suivant les saisons l'action du vent et de la pluie. En absence de couvert végétal le ruissellement augmente en saison des pluies et différentes formes d'érosion s'installent : glaçage superficiel, érosion en nappe et en ravine ...) (ALBERGEL et VALENTIN, 1986). Ces phénomènes érosifs se manifestent par une perte en terre et une baisse de fertilité en raison des transports sélectifs des particules fines et du lessivage des éléments nutritifs (ROOSE et PIOT, 1984). Pendant la longue saison sèche les vents actifs mettent en mouvement les particules les plus fines : remobilisation des dunes, envahissement par le sable d'espaces plus ou moins grands, déflation.

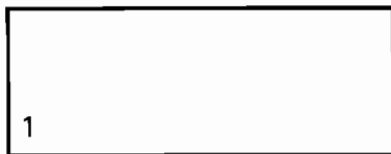
Les étapes ultimes de la dégradation se présentent sous forme de glacis caillouteux, de dunes vives, d'affleurements de cuirasses, de ravinements.

PLANCHE

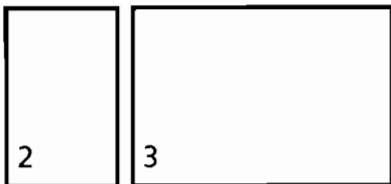
PHOTOGRAPHIQUE

1

PLANCHE 1
BASSINS VERSANTS REPRESENTATIFS ET EXPERIMENTAUX



1. Tornade tropicale à OURSI

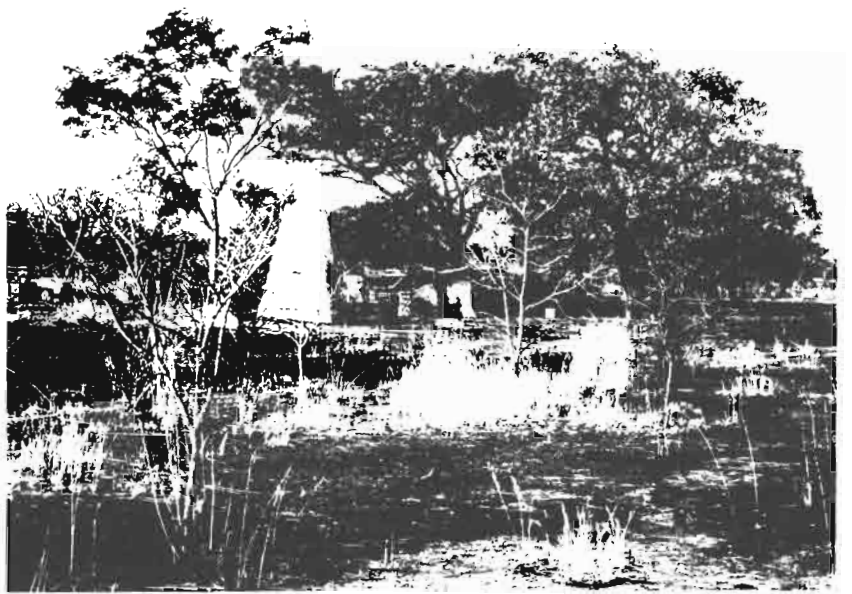


2. Mesure de la vitesse du courant

3. Ensemble de simulation de pluie installé sur le B.V. de KOGNERE



4. Station hydrologique B.V. de BINNDE



DEUXIEME PARTIE

**DISPOSITIFS EXPERIMENTAUX,
VARIABLES MESUREES, ELABORATION
DES DONNEES.**

2.1. CARACTERES CLIMATIQUES PHYSIOGRAPHIQUES DES BASSINS VERSANTS ETUDIES SOUS PLUIES SIMULEES.

Huit bassins versants répartis sur l'ensemble de la gamme écologique du pays (fig. 13 et 14) ont fait l'objet d'expérimentation sous pluies simulées entre 1980 et 1985.

Le tableau n° 12 réunit l'ensemble des facteurs physiographiques (dont les définitions sont données par ROCHE, 1963) et climatiques de ces bassins.

2.1.1. Les bassins versants sahéliens d'OURSI et de GAGARA.

Le bassin de POLAKA (9,14 km²) est un petit bassin versant représentatif du milieu sahélien situé au contact entre un massif granitique au nord-ouest et la cuirasse qui se relève en butte témoin au sud. A l'aval le relief se dégrade et se transforme en glacis qui s'abaisse en pente douce vers la MARE D'OURSI. Le haut des versants est constitué des sols minéraux bruts non climatiques d'érosion : lithosols. En aval, des sols ferrugineux tropicaux appauvris se sont développés sur une arène granitique à texture grossière.

Le bassin de JALAFANKA (0,81 km²) est remarquable par son homogénéité physique. Entièrement situé sur un glacis argilo-limoneux, ses pentes sont faibles et régulières.

Le marigot de GAGARA ouest est un affluent de rive gauche du GOROUOL lequel, après avoir reçu à droite le GOUDEBO à gauche le BELI, draine depuis YATAKALA jusqu'au NIGER l'ensemble des eaux de la région nord DORI. Le choix de ces deux bassins adjacents se justifie par l'existence de nombreux bassins analogues non seulement dans le nord du BURKINA FASO mais dans l'ensemble du SAHEL africain. La morphologie externe de ces bassins est relativement homogène. Une plaine argilo limoneuse couverte de gravillons ou de cailloutis ferrugineux est limitée en amont et en aval par deux systèmes dunaires. Le remaniement est à l'origine de petits ergs de sable vif et d'épandage sableux sur de larges surfaces. Sur la ligne de partage des eaux au nord et à l'ouest, se dressent quelques pointements rocheux d'une vingtaine de mètres d'altitude. Il s'agit de formations en boules de la roche mère du précambrien : granito gneiss avec filons de quartzite, le tout assez altéré. Au pied de ces éminences, la pente assez forte favorise le ruissellement. Les ravines d'érosion qui prennent naissance au pied de ces pointements rocheux se réunissent en thalwegs au lit bien marqué, encaissé dans la croûte caillouteuse du sol. Les marigots ont un cours sinueux, des faux bras s'en détachent pour former des petites mares marquées par une couronne d'épineux. Les berges sont assez franches mais sont souvent masquées par des dépôts de sables grossiers ; elles atteignent aux stations limnimétriques une hauteur de 1,60 m. Sur la plaine de petites zones dépressionnaires donnent des marécages en

BASSINS VERSANTS TESTES AU SIMULATEUR DE PLUIE AU BURKINA FASO

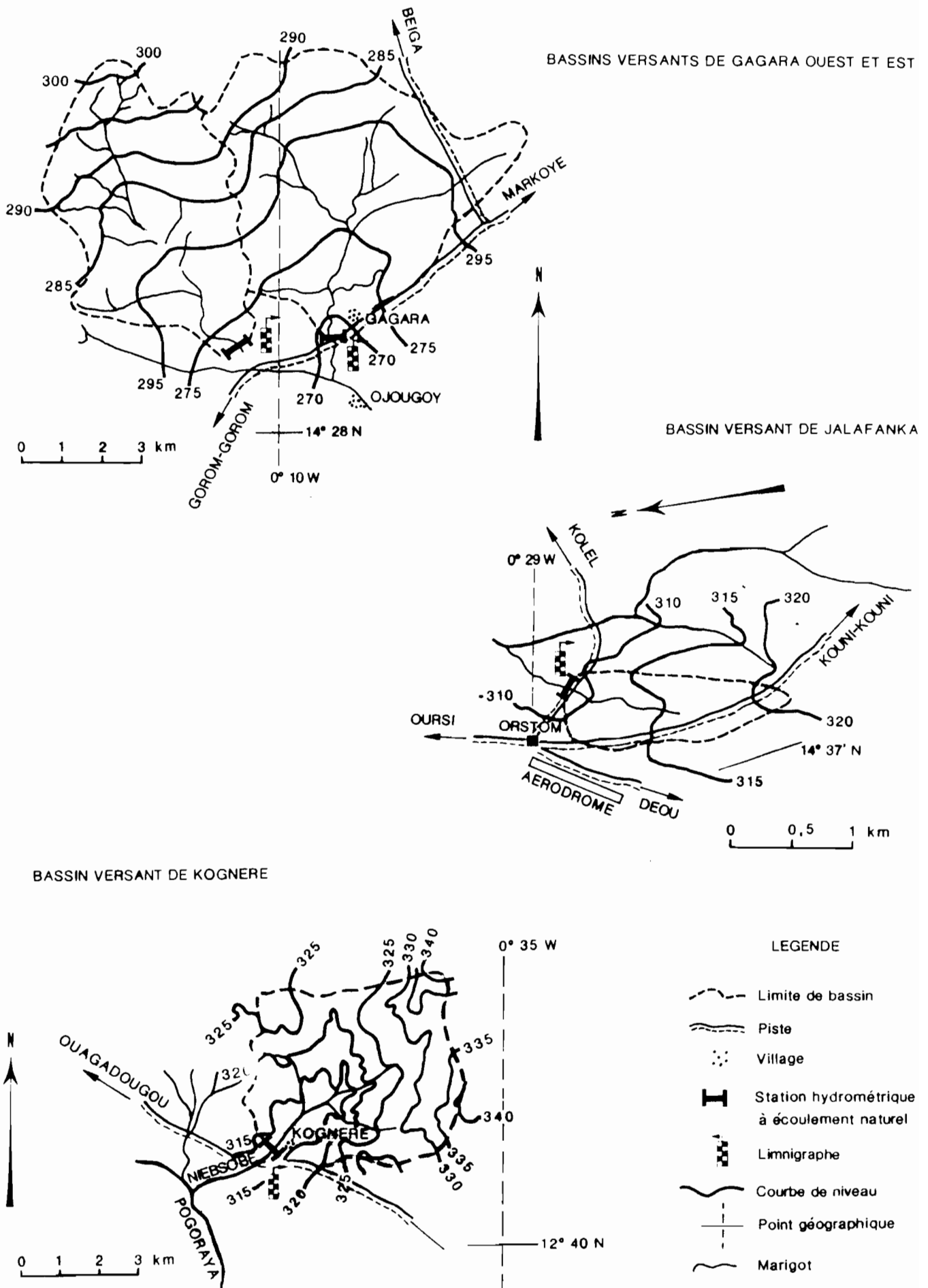


Fig-13-

saison des pluies où l'argile s'accumule. Des fentes de dessiccation y font leur apparition quelques semaines après la fin des pluies. La végétation décrite comme abondante (tant la strate ligneuse qu'herbacée) dans le rapport de 1957 (ORSTOM) est aujourd'hui très réduite. Quelques acacias soulignent les marigots et le tour des mares quelques épineux poussent sur les sables fixés. La couverture de graminées, où dominant : *Cenchrus biflorus* sur les régions sableuses, *Aristida sp*, *Pennisetum sp*, *Loudetia sp* sur les glacis, est restée très faible durant la saison des pluies 1985 d'observations hydrologiques.

Dans les bas fonds argileux on trouve *oriza glaberina*

Une étude des modifications végétales et la conséquence sur les paramètres hydrologiques est présentée plus en avant dans ce travail.

2.1.2 Le bassin versant subsahélien de KOGNERE BOULSA.

Le bassin versant du NIEBSOBE à KOGNERE (19,8 km²) est le plus petit de trois bassins représentatifs étudiés entre 1960 et 1963 . Son modelé est celui de la vieille pénéplaine reposant sur les granites de la région de KOUPELA BOULSA et BOGONDE. Quelques collines de schistes birrimiens forment la ligne de crête septentrionale du bassin et sont le seul accident de relief. Sur l'ensemble du bassin, la pente est faible. Des sols ferrugineux tropicaux généralement indurés en cuirasses donnant des formations graveleuses sur les plateaux et des "glacis" sur les pentes et bas de pentes, occupent la majeure partie de cette aire de drainage. On remarque également la présence de sols hydromorphes (à hydromorphie temporaire) argileux dans les thalwegs. L'érosion hydrique en nappe est relativement intense. Les horizons superficiels meubles sont décapés. Le réseau hydrographique présente un net caractère sahélien de par sa dégradation. Le lit mineur tend à s'estomper, il ne subsiste que sous la forme de mares allongées séparées par des seuils d'alluvionnement latéraux. L'écoulement des crues s'étale et inonde de grandes surfaces encombrées de graminées ou cultivées en riz. La stagnation de l'eau tend fortement à amortir les crues et augmente les pertes par évaporation : drainé par le NIEBSODE, ce bassin alimente le KOULOOUOKO affluent de la SIRBA sur le bassin du NIGER.

Dans cette zone de transition climatique soudano-sahélienne, la végétation naturelle très dégradée associe quelques feuillus tels les combrétacées, aux acacias qui forment un groupe déjà important. La densité de population est notable dans la région et les cultures de mil associées à l'arachide et au pois occupent près de 50 % de la superficie. Ce bassin versant a été d'ailleurs choisi pour une étude approfondie des conséquences d'une mise en culture très intensive sur les paramètres hydrologiques. En l'espace de vingt ans les espaces cultivés ont été multipliés par deux tandis que les jachères ont été réduites de moitié.

BASSINS VERSANTS TESTES AU SIMULATEUR DE PLUIE AU BURKINA FASO

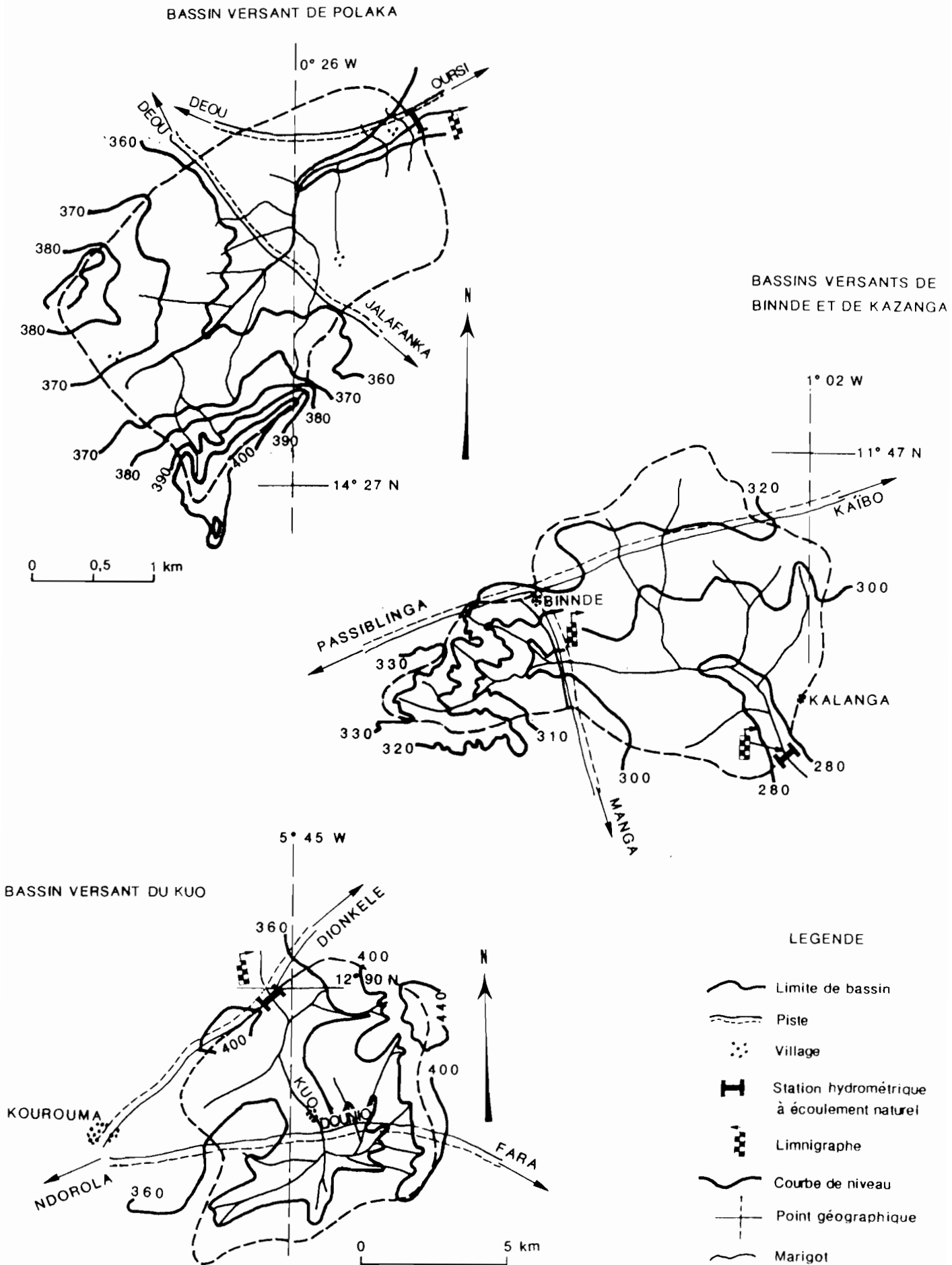


Fig-14-

2.1.3. Les bassins versants emboîtés de BINNDE et KAZANGA de la zone soudanienne.

Situés dans la province du ZOUDWEOGO, centre sud du BURKINA FASO ces deux bassins couvrent une superficie de 54,8 km². Ils sont drainés par les marigots de l'AKALA et du PARLAPOKO qui alimentent la GUILLA elle-même affluent de la NAKAMBA. Le relief est assez ondulé et plus accusé que dans l'ensemble du plateau MOSSI. Le substratum est formé essentiellement de granites syntectoniques, en majeure partie des granites calco-alcalins à phéno-cristaux de muscovite et de feldspath orthose. Ils affleurent à plusieurs endroits sous forme de grosses boules. En rive droite, dans la partie aval du bassin existe un affleurement de roches basiques (gabbros). Une faible partie de l'amont du bassin est recouverte par une cuirasse latéritique en dalles.

Près du village de BINNDE le Birrimien est faiblement représenté par des schistes et des migmatites. Le réseau hydrographique est très bien marqué : le lit principal apparaît sous forme d'un thalweg encaissé à section rectangulaire. Le fond sableux qui bute à plusieurs endroits sur des seuils rocheux est remodelé par chaque crue importante ainsi que les berges qui ont tendance à s'ébouler et à remblayer le fond du lit. Les pertes par stockage superficiel des eaux dans les dépressions et dans le réseau hydrographique proprement dit sont réduites et la mise en écoulement généralisé du bassin est assurée dès les premières pluies importantes, peu après le début de la tornade malgré le soutirage du lit sableux (une à quelques heures pour le grand bassin).

Les sols de ces bassins se répartissent nettement en deux catégories :

- 95 % sols peu évolués sur roche acide,
- 5 % sols d'argiles noires à caractères vertiques en aval du bassin en relation avec les roches basiques.

Le haut du bassin est recouvert d'un faible tapis herbacé et d'arbustes, la partie aval comprend une savane dégradée à *Parkia biglobosa* et à *Vitellaria paradoxa*. Notons la présence de très gros baobabs (*Adansonia digitata*) surtout près des habitations sous forme de petits villages très disséminés (cours mossi).

2.1.4. Le bassin sud soudanien du KUO.

A une centaine de kilomètres au nord-ouest de BOBO-DIOULASSO, dans la province du KENEDOUGOU, le bassin versant du KUO alimente la plaine d'inondation de NIENA DIONKELE drainée par la CESSÉ, elle-même affluent du LONGO dans le bassin hydrographique du NIGER. Avec 67,8 km², c'est le plus grand des bassins versants représentatifs utilisés dans notre étude. Il

appartient à un vaste plateau sédimentaire primaire. Ses pourtours sont caractérisés par d'importants affleurements de masses latéritiques en discordance sur les schistes de TOUM qui constituent 90 % de la superficie. Les grès roses qui forment la couche sous-jacente affleurent en aval du bassin. Le relief est surtout marqué par des buttes de cuirasse latéritiques qui constituent la ligne de partage des eaux. Les pentes moyennes sont de l'ordre de 2 % si l'on exclu les dénivelées rapides de lambeaux de cuirasses au pourtour du bassin.

Le réseau hydrographique paraît correspondre à des diaclases plus ou moins perpendiculaires bien visibles sur photos aériennes ; seuls les collecteurs principaux sont bien individualisés. Ils apparaissent comme des chenaux à section rectangulaire dans les sols argileux hydromorphes. Ils sont envahis de végétation.

Les sols se distribuent le long des versants dans un ordre assez habituel pour cette zone climatique. En haut de versant les sols sont peu évolués non climatiques d'érosion sur cuirasse (lithosols). A mi-pente les sols à sesquioxydes de fer, sol ferrugineux tropical appauvri, modal (acrisol) dominant les sols d'apport colluvial peu évolués et non climatiques (fluviosol). Le bas des toposéquences est dominé par les sols hydromorphes peu humifères à amphigley et à battement de nappe phréatique à forte amplitude (gleysol) (VALENTIN et MAHOP, 1983).

Sur la même toposéquence des sols, d'une bordure du bassin au marigot, on rencontre une savane arborée claire à *Parkia biglobosia* et *Vitellaria paradoxa*, puis une savane à grandes herbes à mi-pente. Enfin à une centaine de mètres des rives du marigot s'étend actuellement une jachère de trois ans sur le tiers inférieur du bassin. La surface cultivée est réduite (10 % du bassin) essentiellement constituée de champs de coton, de sorgho ou de mil.

Tableau n° 12 Principales caractéristiques climatiques et physiographiques des bassins versants étudiés.

Nom du bassin	JALAFANKA *	POLAKA *	GAGARA E.	GAGARA O.	KOGNERE	BINNDE **	KAZANGA ***	KUO
Période de fonctionnement	1976 à 1981	1976 à 80	1956 à 57, 85	1956 à 57,85	1960 à 62, 84	1963 à 65 1982 à 83	1963 à 65,83	1973 à 76 1981 à 84
Coordonnées géographiques	14°33N 0°27 W	14°35N 0°26 W	14°28N 0°11 W	14°28N 0°13 W	12°22N 0°28 W	11°44N 1°05 W	11°42N 1°07 W	11°30N 4°45 W
Climat	Sahélien	Sahélien	Sahélien	Sahélien	Sub Sahélien	Nord soudanien	Nord soudanien	Sud soudanien
Station de référence	GOROM GOROM	GOROM GOROM	GOROM GOROM	GOROM GOROM	BOULSA	MANGA	MANGA	DIONKELE
Pluvio. annuelle (a)	462	462	462	462	689	908	908	1023
Pluvio journalière	1 13,3	13,3	13,3	13,3	22,4	25,7	25,7	27,4
(b)	2 48,5	48,5	48,5	48,5	59,0	63,8	63,8	62,8
	3 83,6	83,6	83,6	83,6	95,4	101,7	101,7	98,0
Superficie km ²	0,81	9,1	35,0	24,3	19,8	9,7	54,8	67,8
Indice de compacité	1,24	1,19	1,18	1,24	1,20	1,24	1,21	1,19
L. du rect. équivalent km	1,4	4,3	8,2	7,8	6,5	4,9	12,3	11,7
Alt max (m)	322	402	295	350	340*	325	335	400
Alt min (m)	310	339	270	285	326	300	270	325
lg m km ⁻¹	7,0	8,1	2,9	3,5	4,3	6,3	4,2	4,3

(1) décennale sèche (2) annuelle (3) décennale humide

(a) moyenne sur l'ensemble des observations

(b) ajustement à une loi des Fuites tronquée

* CHEVALLIER 1982.

** ALBERGEL et TOURI 1982

ALBERGEL 1983

ALBERGEL et BERNARD 1984a

*** ALBERGEL et BERNARD 1984b.

2.2 LA SIMULATION DE PLUIE ET LA PARCELLE.

Afin d'étudier l'infiltration dans des conditions voisines de celles des averses naturelles, ou encore l'effet des gouttes de pluie sur la structure superficielle des sols, un grand nombre d'appareils ont été construits dans le monde pour simuler des pluies. Dans les études bibliographiques qui leurs sont consacrées (HALL, 1971, DE PLOEY, 1983), on distingue deux grands types de modèles :

- Les dispositifs producteurs de gouttes de pluie. De l'eau est pulvérisée sur des grilles dont l'espacement des fils a été prévu pour former des gouttes de dimension et de répartition voulues. Toutes les gouttes ont la même taille et la hauteur de la grille fixe la vitesse avec laquelle elles atteignent le sol. Pour des gouttes de taille moyenne, une hauteur d'environ 5 m est nécessaire pour qu'elles atteignent leur vitesse limite dans l'air (simulateur KAZO utilisé par KERENYI, 1981). D'autres systèmes utilisent des embouts de diamètres fixes pour obtenir des gouttes calibrées (BAKENSIEK et al, 1979) ou des systèmes plus sophistiqués : tubes capillaires, aiguilles hypodermiques... (MUTCHLER et MOLDENHAUER, 1963). De ce type, et utilisé sur le terrain, signalons l'infiltromètre à simulation de pluie portatif du Geological Survey (McQUEEN, 1963). Les gouttes de pluie sont produites par 91 calibreurs de gouttes montés dans un tuyau de plexiglas de 2 m de haut maintenu sur trépied. Un réservoir permet d'alimenter le système en eau. Le ruissellement est recueilli et mesuré en fonction du temps. Il permet de mesurer l'infiltration d'une pluie simulée sur de petites surfaces sans perturber les couches superficielles du sol. Il peut être transporté à la main dans des emplacements inaccessibles aux véhicules. Les quantités d'eau nécessaires à un essai sont réduites (de 5 à 10 litres).

Ce type d'appareil présente deux inconvénients, il ne reconstitue pas des énergies cinétiques voisines de celles des pluies naturelles, une hauteur d'environ 10 m est en effet nécessaire aux plus grosses gouttes pour atteindre leur vitesse limite dans l'air, et il est impossible de faire varier l'intensité de la pluie.

- Les systèmes équipés de buses d'aspersion et utilisant de l'eau sous pression. L'espacement, l'inclinaison, la hauteur et la pression d'utilisation de gicleurs calibrés sont déterminés pour assurer sur la parcelle une répartition convenable des gouttes de pluie et pour que l'énergie libérée au moment de l'impact au sol soit du même ordre de grandeur que dans les averses naturelles. Ces dispositifs peuvent arroser des parcelles de grandes dimensions. L'appareil de HERSMEIER, 1963, est composé de grandes rampes d'aspersion montées sur des cadres mobiles à 2,5 m du sol, et qui fonctionnent quand on les déplace dans une direction. Des intensités de pluie de 30 à 130 mm/h peuvent être réalisées pour simuler des précipitations allant d'une pluie légère à une averse violente. Le dispositif rotatif de SWANSON (1965), repris par l'ORSTOM, permet

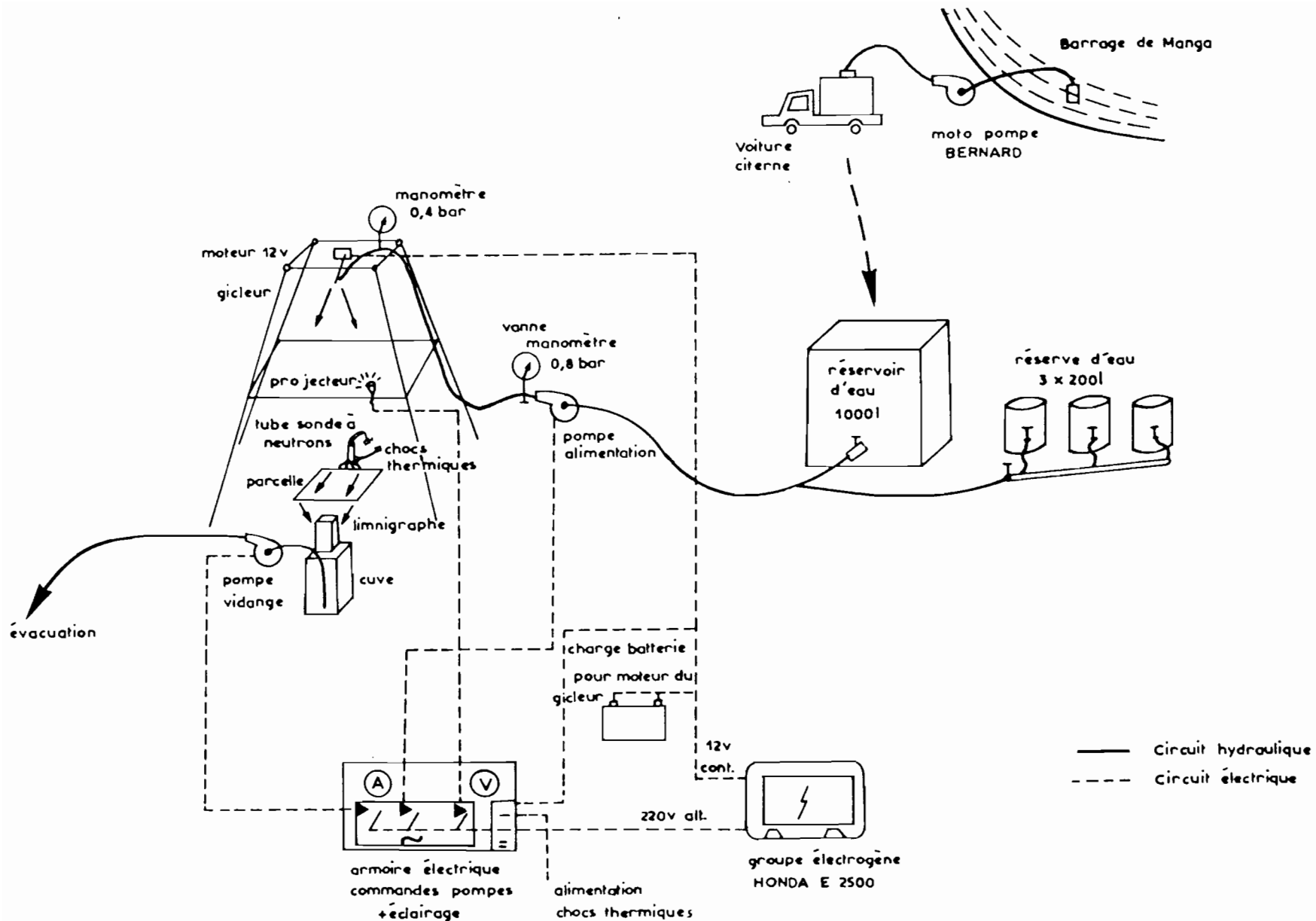
d'arroser deux parcelles de 50 m². Sur des parcelles plus importantes (500 m² et plus) on utilise des installations d'aspersion de type industriel qui n'assurent que difficilement une aspersion uniforme de la surface ou des valeurs constantes de l'intensité de la pluie et de l'énergie des gouttes. Ces appareils permettent en génie civil de tester la stabilité de talus, de digue de fondation.

Si une taille de parcelle d'environ 50 m² convient aux études d'érosion elle n'est pas indispensable à celles de l'infiltration et du ruissellement. Dans ce dernier cas on estime que l'emploi des installations d'aspersion sur des parcelles de 1 à 2 m² est la technique la plus efficace et la plus économique (TOEBES et OURIVAEV, 1970).

L'un des premiers connus est l'infiltromètre à aspersion mis au point par l'Institut Hydrologique d'Etat de l'U.R.S.S. (FEDOROV, 1950). Quatre rampes de gicleurs arrosent 4 parcelles de 1,5 m² une grille calibrée installée sous les gicleurs permet de fractionner les gouttes de pluie.

Depuis 1960 un nombre croissant de chercheurs s'intéressant à l'infiltration et au ruissellement utilisent plutôt des simulateurs de pluie dérivés de celui préconisé par BERTRAND et PARR, 1960. Appareils peu coûteux et maniables, ils arrosent des parcelles de 1 m² entourées d'un anneau de garde important (une dizaine de m²) qui permet de s'affranchir des phénomènes de bordure. On les retrouve dans les travaux de MORIN et *al* (1967), AMERMAN et *al* (1970), RAWITZ et *al* (1972), YAIR et *al* (1980), SINGER et *al* (1981).

C'est un appareil de ce type qui a été construit par l'ORSTOM (ASSELIN et VALENTIN, 1978). Il est utilisé depuis 1977 par des pédologues et hydrologues dans différents programmes scientifiques basés sur la caractérisation des paramètres hydrodynamiques des sols.



SCHEMA DE FONCTIONNEMENT DU SIMULATEUR DE PLUIE (VERSION OUAGADOUGOU)

Fig-15-

2.2.1 Le mini-simulateur de pluie, type ORSTOM. (fig. 15) (pl photo n°1)

2.2.1.1. Description et fonctionnement.

Il s'agit d'une tour en forme de tronc pyramidal en tubes carrés démontable et suffisamment légère pour être transportée par quatre hommes (100 kg environ) protégée du vent par des bâches plastiques.

La surface au sommet est un rectangle de 2,0 m sur 1,4 m, la base occupe une surface au sol de 4,0 m sur 2,8 m. La hauteur est de 4,10 m. Ce bâti est fixé au sol par des haubans.

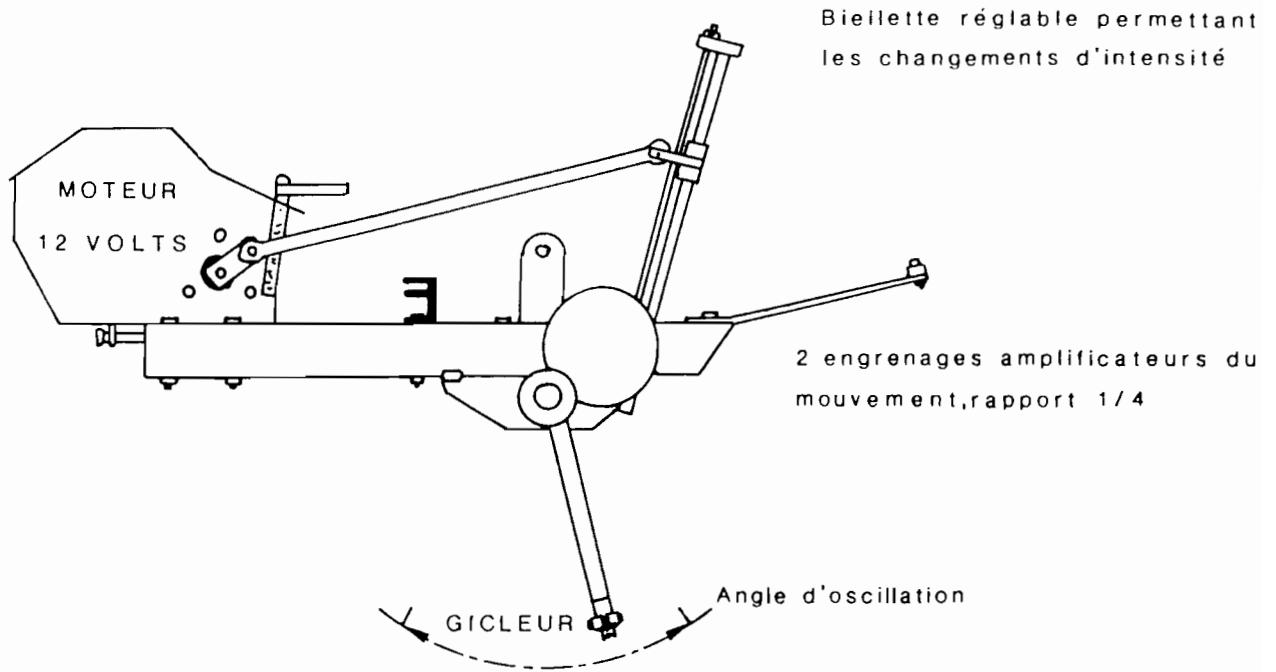
Au sommet de la tour est fixé le système d'aspersion (fig. n°16)(pl photo n° 2) composé d'un moteur actionnant un bras oscillant sur lequel est monté un gicleur calibré qui arrose la parcelle et son voisinage suivant un faisceau plan parallèle à la ligne de plus grande pente. En modifiant l'angle de balayage du gicleur, on fait varier la surface de sol arrosée et donc la quantité d'eau reçue par la parcelle de 1 m² à l'aplomb du système . On règle ainsi de manière continue l'intensité de la pluie simulée par la course du gicleur qu'on augmente ou diminue en actionnant une vis sans fin.

Les pignons d'entraînement du bras oscillant sont dans un rapport tel que l'on peut obtenir une gamme d'intensités de 35 à 150 mm/h. Ce système est alimenté en eau par une pompe électrique. La pression d'eau, visualisée sur un manomètre au sommet de la tour, est réglable à tout moment par une vanne en aval de la pompe d'alimentation.

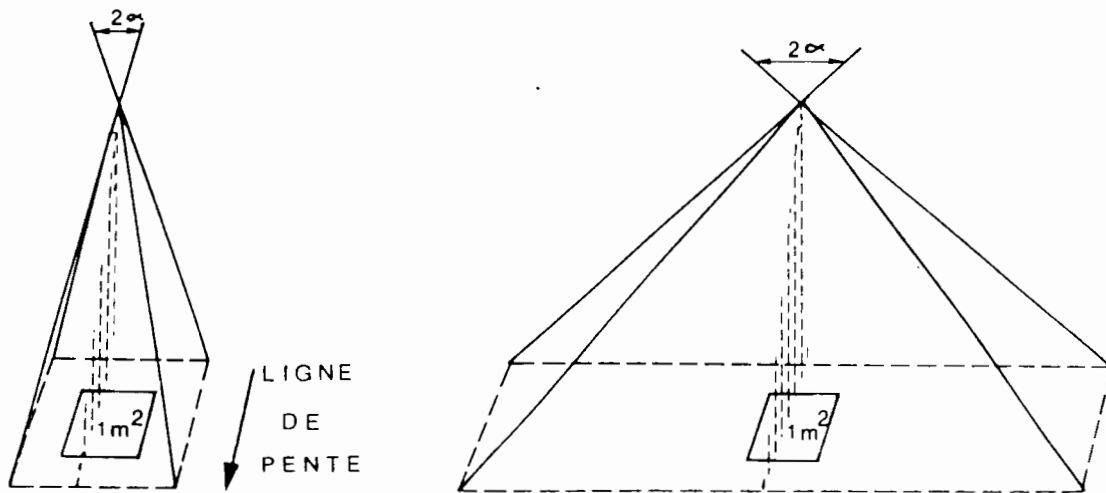
L'alimentation électrique (220 v et 12 v) est fournie par un groupe électrogène avec une batterie en tampon. Toutes les commandes électriques sont regroupées dans une armoire qui permet le démarrage ou l'arrêt instantané des pompes ou du mécanisme de gicleur.

L'énergie cinétique des gouttes ($\frac{1}{2}.m.v^2$) dépend de la masse m et de la vitesse d'impact des gouttes de pluies. Ces deux paramètres ont été calculés par VALENTIN (1981a) à partir de la distribution de la taille des gouttes et comparés à ceux sous pluies naturelles. Il a utilisé pour déterminer le diamètre des gouttes de pluie la méthode proposée par BENTLY (1904) qui consiste à recueillir les gouttes de pluie dans un bac de farine. Les agrégats qui se forment sont tamisés et se répartissent en plusieurs classes de taille. Une relation permet de passer aisément du diamètre de l'agrégat à celui de la goutte qui l'a formé. Les résultats donnent pour les pluies simulées, des valeurs proches de celles des pluies naturelles. L'approximation est meilleure que pour la plupart des autres simulateurs à aspersion connus.

PARTIE MECANIQUE DU SYSTEME D'ASPERSION



PRINCIPE DE REGLAGE DE L'INTENSITE DE PLUIE



- faible angle d'oscillation

- petite surface arrosée

- forte intensité de pluie

- grand angle d'oscillation

- grande surface arrosée

- faible intensité

La parcelle est constituée d'un cadre métallique 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 goulotte.

Le ruissellement est recueilli dans une cuve de 0,1 m² de section afin qu'un centimètre d'élévation du niveau d'eau représente un millimètre de ruissellement. Cette cuve est surmontée d'une table à pieds réglables supportant un limnigraphe de précision à déroulement horaire qui permet d'apprécier les hauteurs ruisselées au dixième de millimètre et le temps à 10 secondes près (pl photo n° 2)

Dans l'anneau de garde, autour de la parcelle, des dispositifs de mesures de l'humidité des sols peuvent être installés : sonde à neutrons, sonde à chocs thermiques.

Sur le cadre de la parcelle peut se fixer un bac à fond plein de même dimension permettant de recueillir la totalité de la pluie et de caler les intensités des pluies moyennes sur le mètre carré.

2.2.1.2. Calcul théorique de la hauteur d'eau précipitée en chaque point de la parcelle.

La représentation géométrique du fonctionnement de l'appareil (fig. 17) permet d'écrire la relation liant l'angle d'oscillation du bras d'aspersion (β) à la vitesse de rotation constante du moteur (ω) en fonction des cotes de construction de ce mécanisme.

$$D^2 = (d - r \cos \omega t + R \cos \beta)^2 + (R \sin \beta + h - r \sin \omega t)^2$$

$$(d - r \cos \omega t) \cos \beta + (h - r \sin \omega t) \sin \beta - \frac{dr}{R} \cos \omega t - \frac{hr}{R} \sin \omega t = \frac{1}{2R} (D^2 - R^2 - r^2 - d^2 - h^2) \quad \textcircled{1}$$

La figure 17 montre que pour une période d'oscillation du gicleur la biellette r a parcouru deux secteurs angulaires différents par demi-oscillation. Le temps de parcours pour aller de la position $\textcircled{1}$ vers la position $\textcircled{2}$ est différent de celui pour passer de $\textcircled{2}$ à $\textcircled{1}$.

$$T = t_1 + t_2 \quad \textcircled{2}$$

Pour étudier la répartition des hauteurs précipitées au sol durant une averse réglée à une intensité constante (pour un R donné) nous assimilons l'équation $\textcircled{1}$ à celle d'un mouvement sinusoïdal. Intuitivement on remarque que cette approximation est d'autant plus justifiée que la première biellette r est petite devant la seconde D et que le moteur tourne vite. Dans ce cas en effet les temps t_1 et t_2 mis par l'asperseur pour parcourir dans un sens ou dans l'autre la distance entre les deux points extrêmes sont sensiblement égaux.

En première approximation le mouvement est alors de la forme

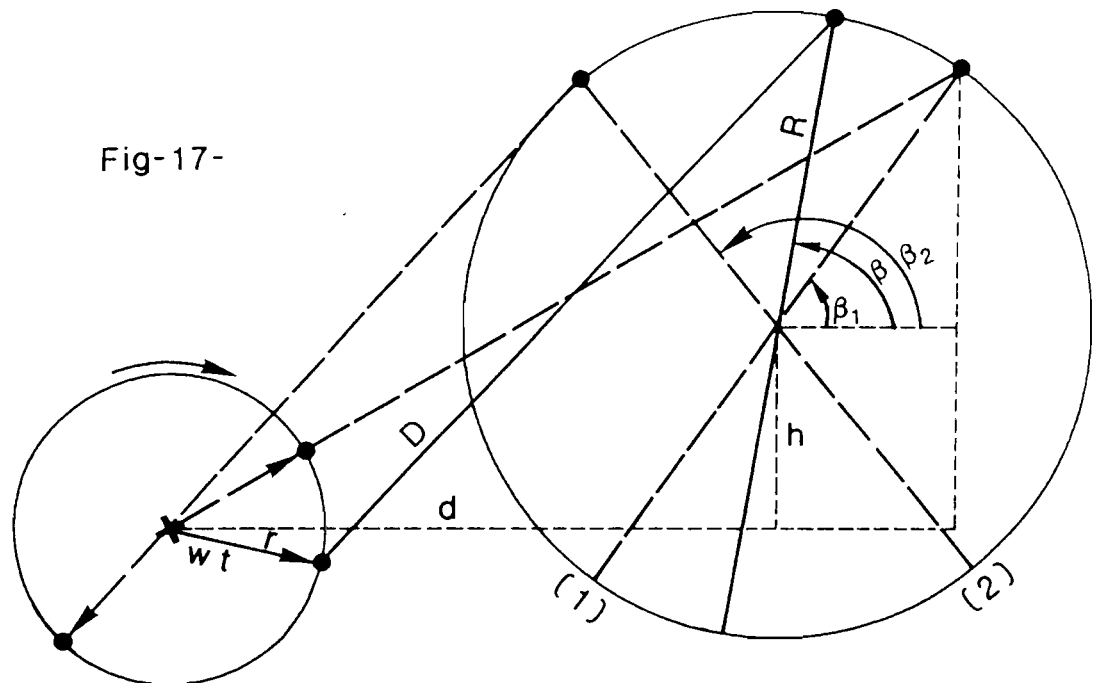
$$a(t) = a_m \sin \omega t \quad \text{③} \quad \text{fig 18}$$

où a_m est l'amplitude maximum réglable par la mécanique du système mais restant constante pendant une phase opératoire. (rd)

ω est la vitesse de rotation uniforme du moteur (rd/s)

$a(t)$ est l'angle du plan du jet avec le plan vertical oxz à l'instant t

Représentation géométrique du mécanisme d'aspersion



● Articulation

----- Position extrême de balayage

————— Position intermédiaire de balayage

✕ Moteur a vitesse constante

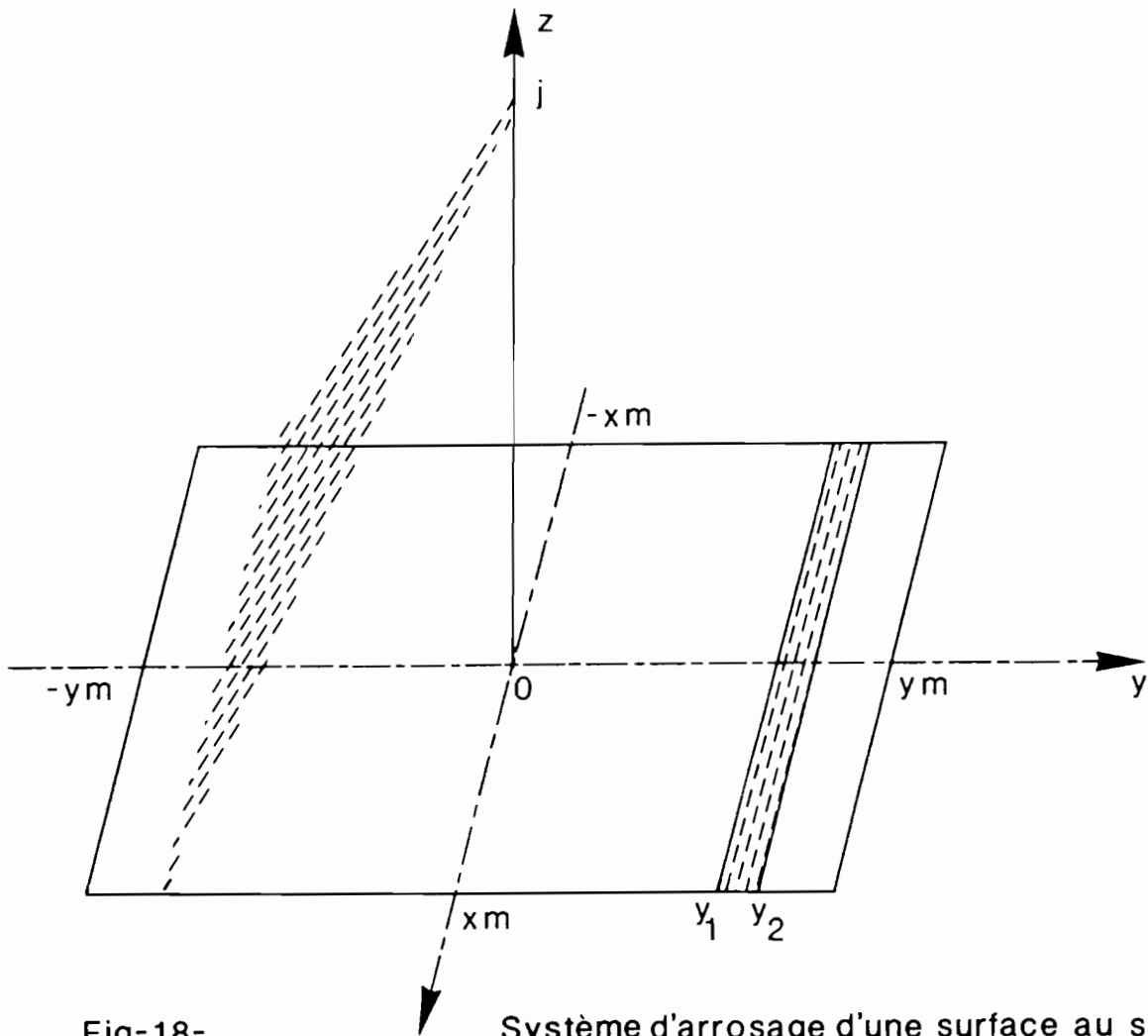


Fig-18-

Système d'arrosage d'une surface au sol

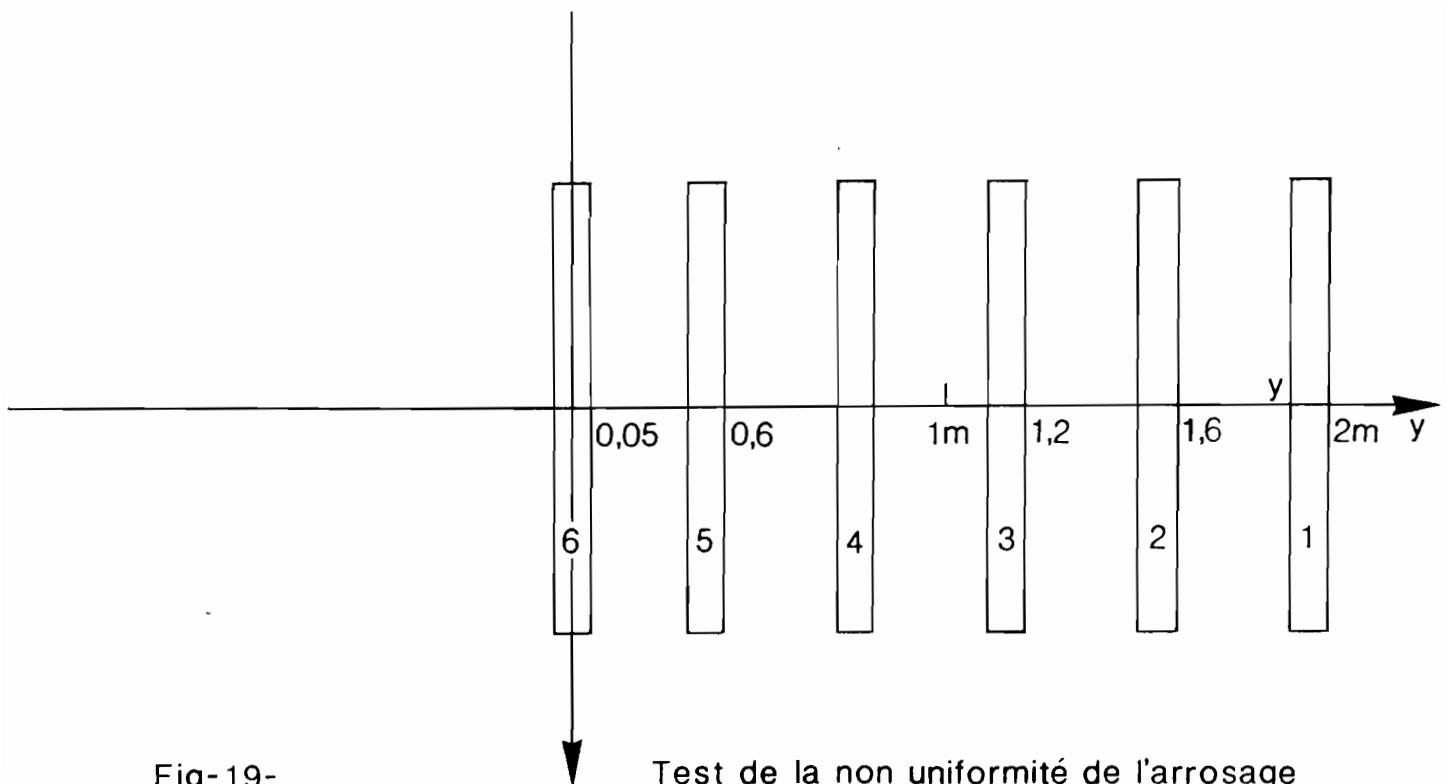


Fig-19-

Test de la non uniformité de l'arrosage

La quantité d'eau reçue par la bande hachurée entre y_1 et y_2 est

$$Q_{y_1 y_2} = \int_{t_1}^{t_2} q dt \quad (4)$$

où $Q_{y_1 y_2}$ est la quantité d'eau reçue par la bande $[y_1 y_2]$ m^3
 q est le débit du gicleur (constant) $m^3.s^{-1}$.
 t_i est l'instant de passage du jet sur y_i s

$$\text{or } y_t = H \operatorname{tg}(\omega t) \quad (5)$$

ou $H = OJ$ hauteur du gicleur en m

(5) donne $y = H \operatorname{tg}(\omega \sin wt)$

l'expression exacte de $t = f(y)$ s'écrit alors :

$$\omega m \sin(\omega t) = \operatorname{Arctg} \frac{y}{H}$$

$$t = \frac{1}{\omega} \operatorname{Arc sin} \left(\frac{1}{\omega m} \operatorname{Arctg} \frac{y}{H} \right)$$

L'équation (4) s'intègre alors aisément (q constant) et donne

$$Q_{y_1 y_2} = q \frac{1}{\omega} \left[\operatorname{Arc sin} \left(\frac{1}{\omega m} \operatorname{Arctg} \left(\frac{y_2}{H} \right) \right) - \operatorname{Arc sin} \left(\frac{1}{\omega m} \operatorname{Arctg} \left(\frac{y_1}{H} \right) \right) \right] \quad (4)$$

Q en m^3 , q en $m^3.s^{-1}$, ω en $s \operatorname{rd}^{-1}$ et ωm en rd .

$$Q - y_{m_1} y_{m_2} = q \frac{1}{\omega} \left[\operatorname{Arc sin} \left(\frac{\omega m}{\omega m} \right) - \operatorname{Arc sin} \left(\frac{-\omega m}{\omega m} \right) \right]$$

$$\Rightarrow Q - y_{m_1} y_{m_2} = q \frac{1}{\omega} \Pi = q \frac{T}{2}$$

Si l'on veut calculer la forme de la fonction intensité le long de l'axe oy (perpendiculaire à la pente de la parcelle), on peut considérer un jeu de boîtes rectangulaires disposées le long de cet axe de largeur Ly et de longueur Lx (fig. 19), calculer la quantité d'eau reçue par chacune de ces boîtes et en vérifier expérimentalement le résultat.

Pour la boîte i , le débit effectif à prendre en compte n'est pas tout le débit q du gicleur mais seulement la fraction :

$$q \left(\frac{2xm}{Lx} \right)^{-1} \quad \text{avec} \quad xm = H \operatorname{tg} \beta$$

$\beta = \text{ouverture transversale du gicleur.}$

- on fait l'hypothèse réaliste de l'uniformité du jet sur $[-xm, xm]$ Pour un temps t_0 il y a

$$\frac{2t_0 \omega}{2\Pi} = \frac{2t_0}{T} \text{ passages.}$$

La quantité d'eau recueillie dans la boîte i est donc :

$$Q_i = \frac{qLx}{2Htg\beta} \frac{to}{\Pi} \left[\text{Arc sin} \left(\frac{1}{\alpha m} \text{Arctg} \frac{y_i}{H} \right) - \text{Arc sin} \left(\frac{1}{\alpha m} \text{Arctg} \frac{y_i - L_y}{H} \right) \right]$$

Il est possible de faire une application numérique pour une surface arrosée au sol égale à l'embase de la tour (2,8 x 4 m)

$$. 2Htg\beta = 2,80 \text{ m}, \alpha m = \text{Arctg} \frac{2}{4,10} = 0,454, H = 4,10 \text{ m}, L_y = 0,10 \text{ m}, L_x = 1 \text{ m}$$

-. prenons 6 boîtes numérotées 1 à 6 d'un bord extérieur de l'embase au centre

$$\text{soit } Q^*i = \frac{Q_i}{qto} = \text{volume retenu dans la boîte } i \text{ divisé par le volume total émis.}$$

Boîte n°	1	2	3	4	5	6
Q^*i	0,0338	0,00885	0,00710	0,00645	0,00628	0,00611

On vérifie bien que pour l'ensemble de la surface arrosée ($L_x = 2,80 \text{ m}, L_y = 4 \text{ m}, y_i = y_m = 2 \text{ m}$)

$$\text{on a } Q^*i = \frac{Q_i}{qto} = 1$$

- Pour une parcelle située au centre de l'anneau de garde ($L_x = 1 \text{ m}, L_y = 1 \text{ m}, y_i = 0,5 \text{ m}$ centré en y), on obtient :

$$\frac{Q_i}{qto} = 0,0615 \quad \text{soit } 6 \% \text{ du volume émis.}$$

Ces 6 % peuvent être comparés au rapport des surfaces : $\frac{1}{4 \times 2,8} = 9\%$

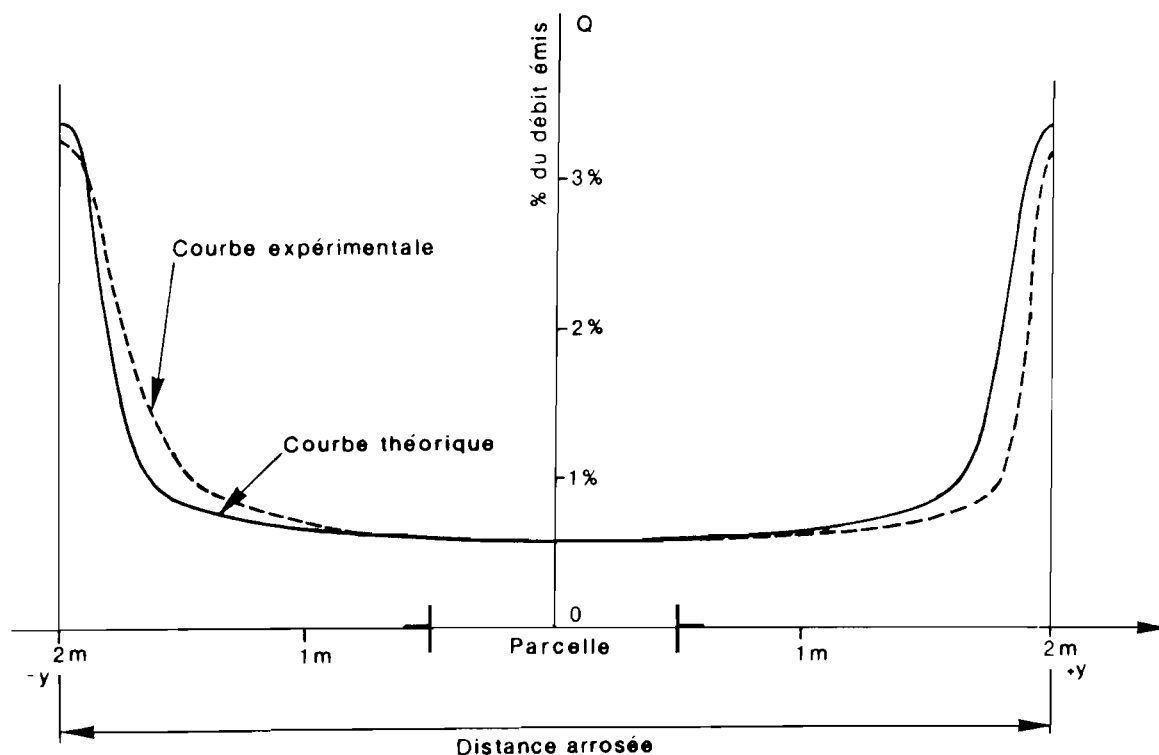
Si l'on diminue la course du gicleur de moitié ($y_{m/2}$), Q_i/qto devient 0,121. La parcelle reçoit alors 12 % du volume d'eau émis alors qu'elle représente 18 % de la surface arrosée.

La quantité d'eau reçue par la parcelle globalement, dépend donc d'une part de αm (angle maximal que fait le gicleur et réglé par le mécanisme) et d'autre part de l'ouverture du gicleur (qui est une donnée constante).

La figure 20 représente les répartitions théoriques (trait continu) et mesurées (trait discontinu) des hauteurs précipitées en fonction de la distance au centre de la parcelle. La dissymétrie de la courbe observée s'explique par le fait que le mouvement n'est pas parfaitement sinusoïdal.

D'autre part, le calcul ne tient pas compte de la forme parabolique de la trajectoire des gouttes d'eau.

Fig-20- DISTRIBUTION DE L'EAU SUR LA SURFACE DU SOL



La non uniformité de l'aspersion qui se fait sentir d'autant plus que l'on se rapproche des extrémités (lieux où la vitesse du bras oscillant s'annule) oblige un étalonnage précis des épisodes pluvieux sur l'ensemble de la parcelle.

On rejoint ici les conclusions de TOEBES et OURIVAEV (1970) sur les infiltromètres à aspersion : "La fiabilité des infiltromètres à aspersion dépend surtout des étalonnages d'intensité de la pluie effectués avant ou après la pluie". La surface de la parcelle est alors recouverte d'une bâche imperméable ou d'un bac collecteur et l'on fait fonctionner l'appareil à la pression de service commandée pendant le temps nécessaire pour assurer la mise en régime du ruissellement avant de commencer l'étalonnage.

Sur l'ensemble de nos expérimentations, nous avons étalonné avant chaque pluie l'ensemble des intensités du hyétogramme. Compte tenu des caractéristiques mécaniques du dispositif et de l'appréciation visuelle sur l'enregistrement graphique la précision de cet étalonnage est estimée à 5 %. L'incertitude sur l'intensité de la pluie est donc de 5 mm.h^{-1} pour une pluie de 100 mm.h^{-1} et de 2 mm pour une pluie de 40 mm.h^{-1} .

2.2.2 Les dispositifs de mesures d'humidité.

Sur chaque site de simulation de pluie, quelques parcelles ont été sélectionnées pour un suivi de l'humidité des sols. Trois dispositifs ont été alors utilisés :

- prélèvement et méthode gravimétrique,
- sonde à neutrons,
- humidimètre à chocs thermiques.

Humidité mesurée par la méthode gravimétrique :

Elle a été utilisée pour l'étalonnage de sonde à neutrons et de l'humidimètre à chocs thermiques. Simultanément à des mesures "sonde" nous avons effectué des prélèvements à la tarière en faisant trois prélèvements à chaque niveau. Les échantillons sont enfermés dans des boîtes hermétiques, pesées avant et après dessiccation à l'étuve (110°) pendant 24 heures. La médiane sur les trois prélèvements est considérée comme représentative de l'humidité pondérale du niveau.

Hp : humidité pondérale

Ph : poids humide

Ps : poids sec

t : poids de la boîte

$$Hp = \frac{Ph - Ps}{Ps - t} \times 100$$

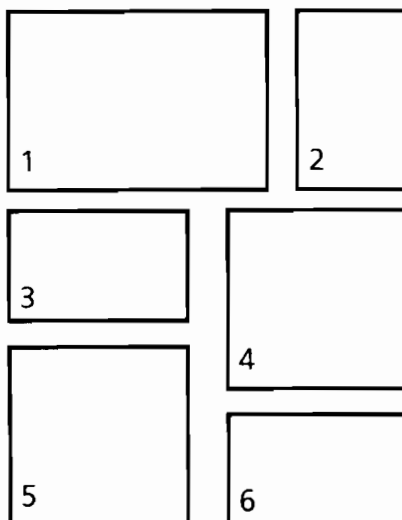
En multipliant *Hp* par la densité apparente on obtient l'humidité volumique *Hv*. Les densités ont été mesurées au densitomètre à membrane.

Mesures d'humidité avec la sonde à neutrons. (pl photo n°2)

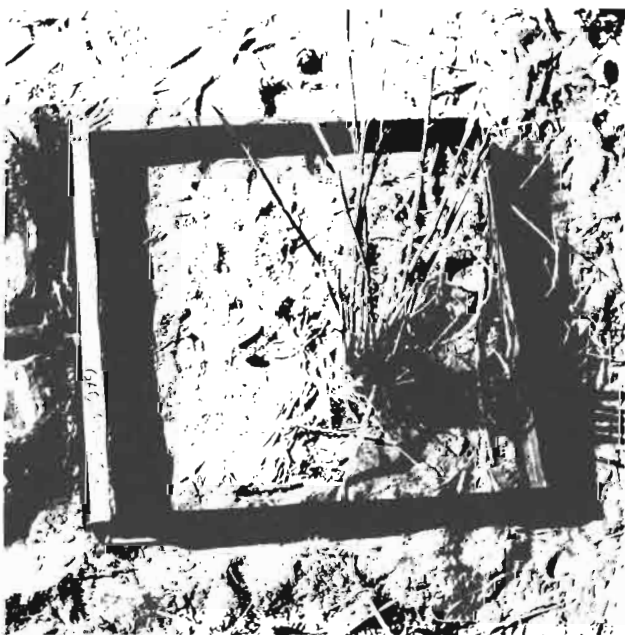
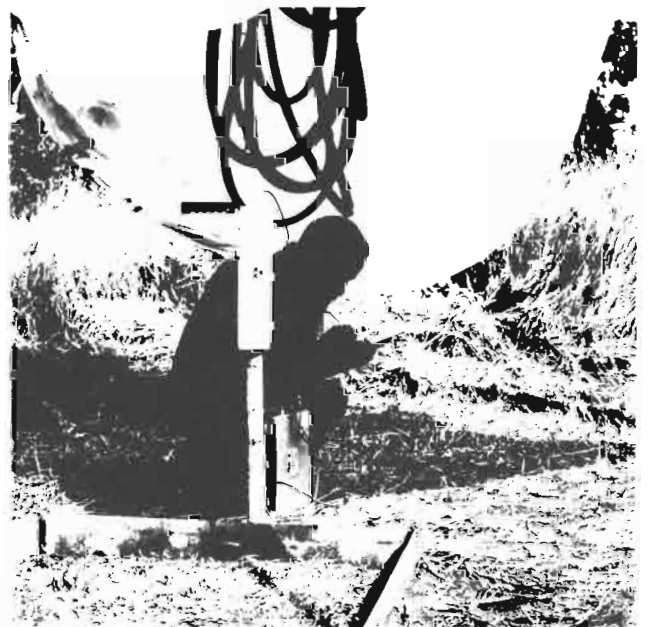
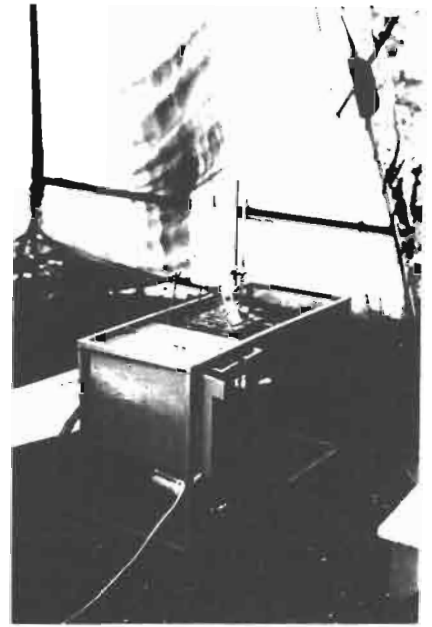
Le principe est déjà ancien et bien connu (MOUTONNET, 1968) (MARCESSE, 1970) : la méthode est fondée sur la proportionnalité entre le ralentissement d'un faisceau de neutrons rapides émis par une source radioactive introduite dans le sol et l'humidité volumique de celui-ci, les atomes d'hydrogène de l'eau étant responsables du ralentissement.

Il s'agit alors d'établir l'équation $N/N_e = aHv + b$, par régression linéaire. *N* étant le nombre de neutrons ralentis déjectés, *Ne* nombre de neutrons émis lors de la mesure point-eau réalisée dans les mêmes conditions que la mesure de *N* mais dans l'eau. *Hv* est l'humidité volumique mesurée par la méthode gravimétrique lors des étalonnages.

PLANCHE 2
LE MINISIMULATEUR DE PLUIE ORSTOM



1. La tour du simulateur de pluie BV de GAGARA
2. Système d'enregistrement de la lame ruisselée
3. Système d'aspersion
4. Mesure neutronique de l'humidité du sol
5. Parcelle sur sol cultivé
6. Parcelle sur végétation naturelle



Les caractéristiques de la sonde à neutrons type SOLO que nous avons utilisée, font que les valeurs observées de N en temps court (30 s) suivent une variation aléatoire assimilable à une loi de POISSON, de moyenne $10 N$ et d'écart type $\sqrt{10 N}$. Cette moyenne se conforme à une loi normale de moyenne $10 N$ et d'écart-type

$$\sqrt{\frac{10N}{n}} \quad 'n' \text{ étant le nombre de répétitions des mesures.}$$

Ayant répété trois fois les mesures à chaque manipulation notre écart type s'élève à $1,83\sqrt{N}$.

Mesures d'humidité par "chocs thermiques".

Le principe de l'appareil et la méthode sont décrits par POUYAUD (1975).

La sonde comprend une résistance chauffante qui sous l'impulsion de chocs électriques émet des chocs thermiques, et d'un thermocouple qui mesure la température du sol à 1,5 cm de l'élément chauffant.

L'humidité volumique est inversement proportionnelle au maximum de température mesuré après la période de chauffe.

Cet appareil qui prend le relais de la sonde à neutrons pour des mesures ponctuelles de l'humidité dans les premiers centimètres du sol nous intéresse pour appréhender l'évolution de l'infiltration juste au dessous des organisations pelliculaires de surfaces. Malheureusement, de fabrication trop artisanale, le prototype disponible à OUAGADOUGOU n'a fonctionné que sur les premiers bassins testés (POLAKA, JALAFANKA, BINNDE).

2.3. LE PROTOCOLE DES PLUIES SIMULEES.

2.3.1 Forme des pluies et calendrier des mesures.

Les études antérieures ont montré que sur une surface élémentaire, les facteurs principaux du ruissellement sont la hauteur et l'intensité de la pluie ainsi que l'état d'humectation du sol (CASENAVE, 1982). Le protocole doit permettre de déterminer pour chacune des parcelles les liaisons existant entre ces différents paramètres. L'influence de l'état d'humectation du sol sur le ruissellement est quantifiée à partir d'une série de pluies simulées séparées par des temps de ressuyage plus ou moins longs. Chacune des pluies simulées est constituée d'une séquence de 5 à 7 intensités différentes, déterminées à partir des caractéristiques des pluies naturelles de la région. Cela permet d'étudier le rôle de l'intensité de la pluie sur le ruissellement pour une gamme d'états d'humectation de sol donnée.

Pour rester proche des conditions naturelles, on a estimé que ce protocole devrait répondre 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 en cours d'averse doivent être suffisantes pour permettre de définir une relation lame ruisselée-pluie utile. Les pluies sont donc suffisamment longues. Nous avons choisi de reproduire des averses de récurrence au moins annuelle ou décennale.
- La forme de la pluie tient compte des intensités obtenues dans l'étude des courbes intensité - durée - fréquence et de leur répartition dans le temps pour qu'elle ressemble aux précipitations les plus courantes dans la zone d'étude. Dans notre cas, comme nous l'avons vu précédemment, il s'agit de tornades simples composées d'une ondée préliminaire, un corps prédominant et une traîne d'intensité plus faible et de courte durée.

Pour avoir un protocole relativement homogène sur toutes les parcelles, à des fins de comparaison, les critères sur l'étude de hauteur, intensité, durée et forme de l'averse ont été calés sur les données d'une station pluviographique du centre du pays OUAGADOUGOU. Sur chaque bassin nous avons vérifié à la station pluviométrique de référence que l'on ne contrevenait pas aux critères précités. (cf. tab. n°12)

Seules les parcelles des bassins de JALAFANKA et de POLAKA ont reçu un protocole différent, car à l'époque où ces premiers bassins ont été testés, (CHEVALLIER, 1982) ces critères n'étaient pas encore définis.

Le tableau n° 13 donne la forme des 2 types de pluies simulées.

Tableau n° 13 forme des pluies simulées.

Pluie type 1	Pluie type 2
10 minutes à 40 mm.h ⁻¹	30 minutes à 30 mm.h ⁻¹
10 minutes à 120 mm.h ⁻¹	10 minutes à 135 mm.h ⁻¹
10 minutes à 90 mm.h ⁻¹	10 minutes à 120 mm.h ⁻¹
10 minutes à 70 mm.h ⁻¹	10 minutes à 90 mm.h ⁻¹
10 minutes à 50 mm.h ⁻¹	10 minutes à 70 mm.h ⁻¹
	15 minutes à 50 mm.h ⁻¹
H = 61,7 mm	H = 96,7 mm

Si on se réfère aux études statistiques sur les données aux stations de référence de nos bassins représentatifs, on remarque que pour l'ensemble des bassins non purement sahélien la pluie de type 1 correspond à une averse de récurrence annuelle celle de type 2 à une averse décennale.

Pour les bassins sahéliens la pluie de type 1 serait de récurrence 8 ans et celle de type 2 de récurrence 20 ans .

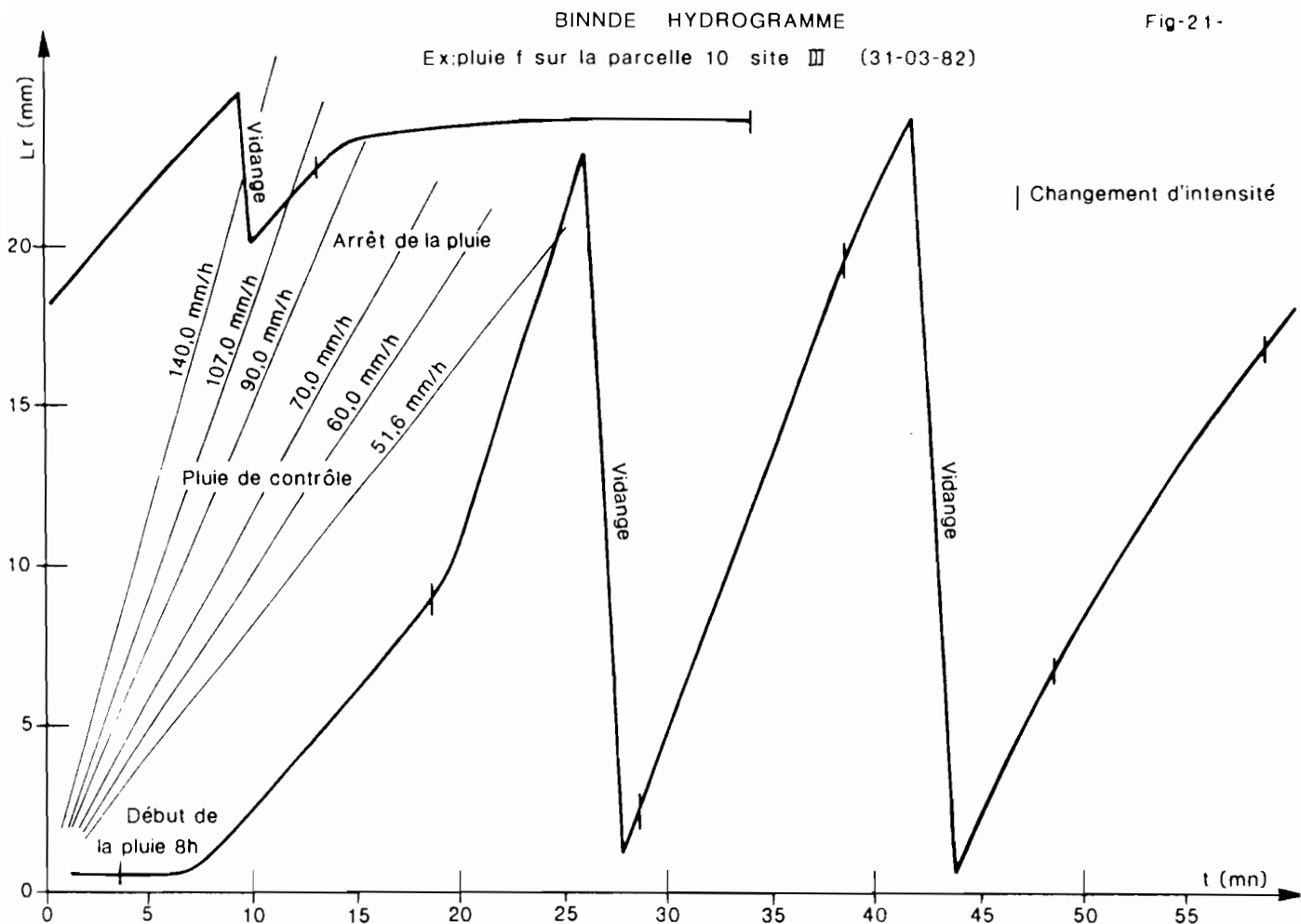
Sur l'ensemble de la durée des averses l'intensité moyenne des pluies simulées correspond à des récurrences légèrement supérieure à celles observées à OUAGADOUGOU ou à JALAFANKA pour ces hauteurs. (cf. tableau 10 et 11)

Sur des durées plus courtes que 30 minutes, les hauteurs simulées sont dans la gamme des intensités-fréquences observées. Cela vient du fait que les traînes de pluies simulées sont trop intenses. Il est impossible en effet avec le matériel disponible de descendre en deça de 30 mm.h⁻¹. La succession des pluies, telle qu'elle a été faite sur chacune des parcelles est indiquée dans le tableau ci-après (tableau. n° 14) :

Tableau 14 Succession des pluies simulées.

Forme de la pluie	Hauteur mm	Temps d'arrêt entre 2 pluies h
Type 2	96,7	
Type 1	61,7	72
Type 1	61,7	12
Type 1	61,7	48
Type 2	96,7	12

Ce protocole est réalisé en saison sèche, un mois, au moins, après la dernière pluie, pour être sûr de débiter l'expérimentation sur un sol bien sec et pour s'affranchir des pluies naturelles. Chaque évènement est réalisé le matin très tôt ou la nuit, pour ne pas être perturbé par les vents de saison sèche (cf. § 1.4.2) et pour profiter des meilleures conditions de travail pendant l'expérimentation (chaleur, évaporation). Le calendrier expérimental tient compte de l'éloignement des parcelles pour pouvoir les traiter par lot de trois ou quatre et réaliser de 3 à 5 pluies par jour. Au total 300 pluies simulées ont été réalisées.



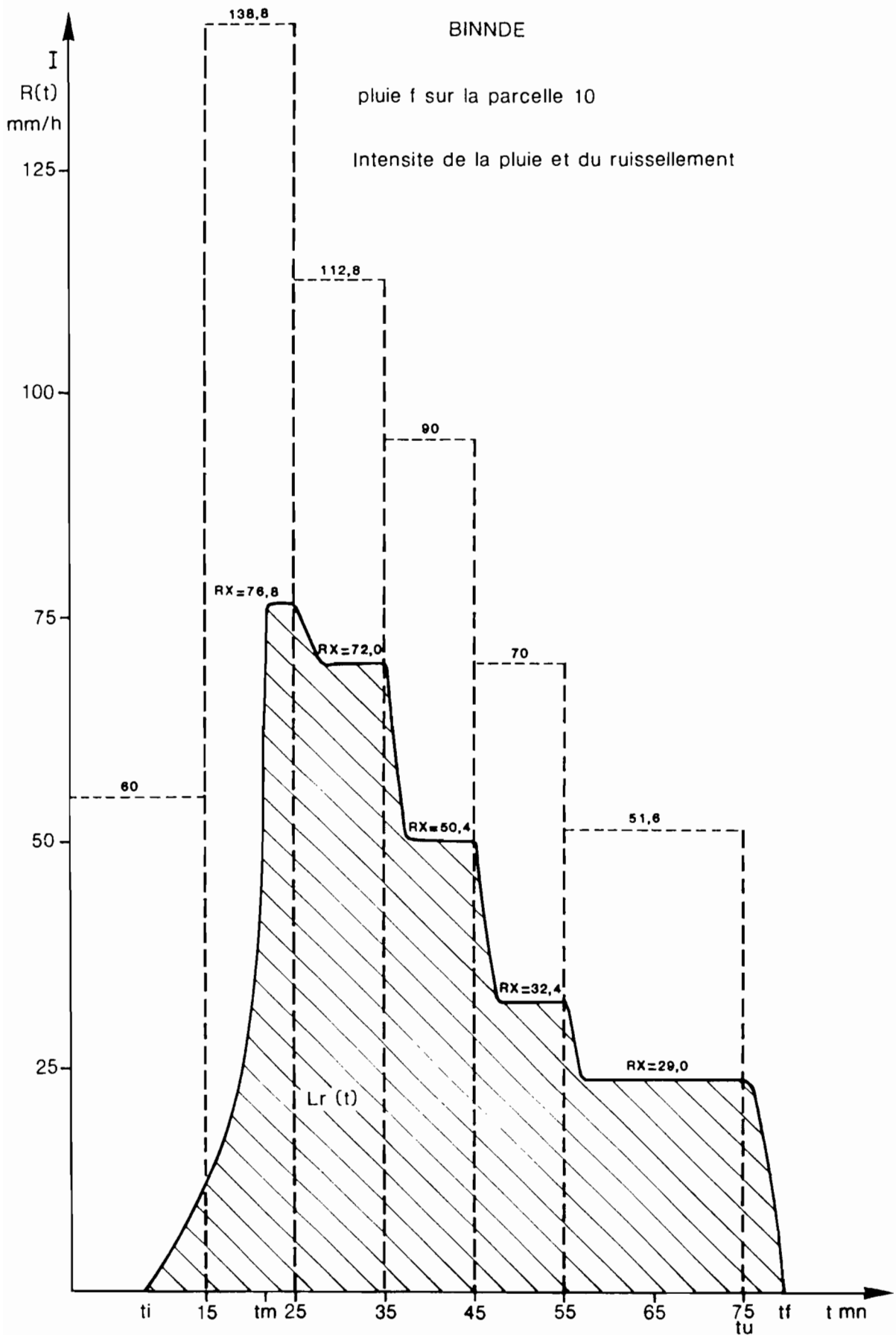


Fig-22-

2.3.2 Les paramètres hydrologiques accessibles par la mesure sous pluie simulée.

Le ruissellement est mesuré très près de la bordure aval de la parcelle. On néglige dans toute l'étude les temps de transfert 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, le graphique n° 21 montre en exemple le limnigramme de la pluie f sur la parcelle 10, du bassin de BINNDE. La pente de la tangente en chaque point du diagramme donne à chaque instant l'intensité de ruissellement. La précision des mesures est de 1/10 mm pour les hauteurs d'eau ruisselée et de 10 secondes pour le temps.

Le graphique n° 22 représente le hyétogramme de la pluie I_2f (pluie f simulée sur la parcelle 2 du site I) avec les intensités contrôlées, et la lame d'eau ruisselée $L_r(t)$ à laquelle correspond l'intensité de ruissellement, $R(t)$. Du début de la pluie jusqu'au temps t_i 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.

Au temps t_i 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.

A partir du temps t_m s'établit 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 changent jusqu'à un nouvel équilibre où 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); c'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 les équations entre les grandeurs mesurées (LAFFORGUE, 1977).

Notations utilisées.

- $Pu(t)$: hauteur de pluie à l'instant t
 $Lr(t)$: lame ruisselée à l'instant t
 $Li(t)$: lame infiltrée à l'instant t
 $S(t)$: lame stockée en surface à l'instant t
 $Dm(t)$: détention superficielle mobilisable à l'instant t
 $Dr(t)$: détention superficielle récupérable à l'instant t
 $I(t)$: intensité de la pluie à l'instant t
 $R(t)$: intensité de ruissellement à l'instant t
 $F(t)$: intensité d'infiltration à l'instant t
 Rx : intensité maximale de ruissellement pour une intensité donnée
 Fn : intensité minimale d'infiltration pour une intensité donnée
 ti : temps correspondant à l'apparition du ruissellement
 tm : temps correspondant à l'apparition du régime permanent
 tu : temps correspondant à la fin de la pluie
 tf : temps correspondant à la 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

$$Lr(t) = 0, Dm(t) = 0, Pu(t) - Li(t) - S(t) = 0 \quad (2)$$

- Régime transitoire

en dérivant l'équation (1)

$$I - R(t) - \frac{dDm}{dt} - \frac{dS}{dt} = 0 \quad (3)$$

- Régime permanent

$$I(t) = I, R(t) = Rx, F(t) = Fn$$

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

$$I - Rx - Fn = 0 \quad (4)$$

- Phase de vidange

$$Pu(t) = 0$$

$$Lr(tf) - Lr(tn) = Dm(tu) + S(tu) - S(tf) + Li(tu) - Li(tf) \quad (5)$$

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 :

$$Dr = Dm(tu) + S(tu) - S(tf) - Lif \quad (6)$$

2.3.3 Mesure de l'humidité des sols.

Le suivi de l'humidité des sols sur un nombre restreint de parcelles (3 ou 4 par bassin) a été fait dans les buts suivants :

- relier le ruissellement aux conditions d'humectation du sol avant la pluie,
- vérifier le bilan hydrologique présenté plus haut en s'assurant que la lame infiltrée mesurée sur un profil correspond bien à celle déduite de la différence entre la pluie et le ruissellement. Il s'agit, donc, de vérifier que, pour les sols testés, l'anneau de garde arrosé est suffisamment grand pour que les effets de bord (infiltration latérale par succion d'un sol sec) ne soient pas sensibles sur le bilan hydrique de la parcelle.
- connaître la profondeur maximale du front d'humectation.
- suivre la cinétique de ressuyage du sol après la dernière pluie.

Les mesures réalisées n'ont pas été assez fines pour un suivi du bilan hydrique du sol, l'étalonnage de la sonde à neutrons faite par comparaison avec les mesures gravimétriques n'a pas été corrigé par un étalonnage en laboratoire à partir de l'analyse des sols (problème d'expédition des échantillons vers un laboratoire équipé). Aucun suivi des pressions (tensiométrie) n'a pu être fait.

Les expérimentations ayant été réalisées surtout dans l'optique de la caractérisation de l'aptitude au ruissellement, nous n'avons pas voulu les alourdir par des mesures qui réclament une grande disponibilité en temps et en personnel.

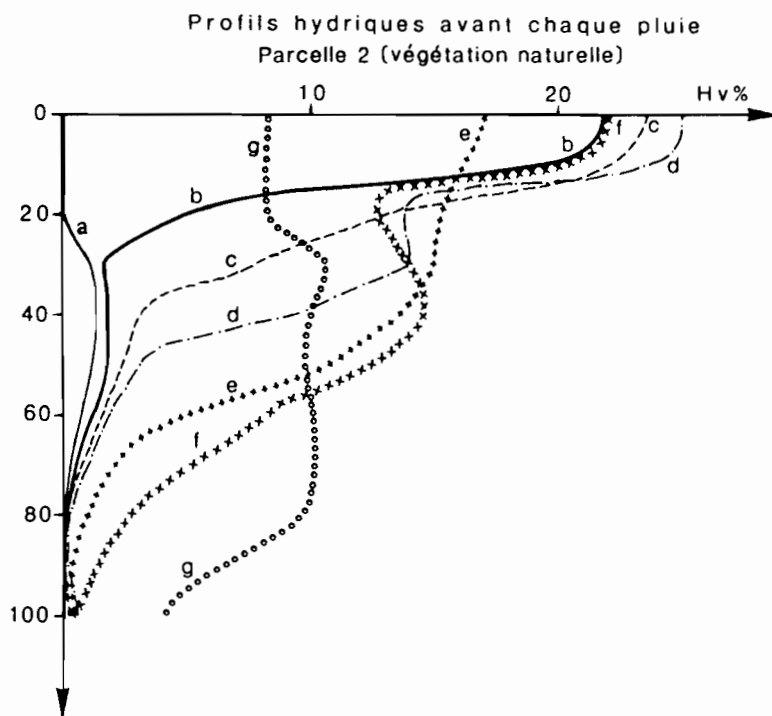
La figure 23 présente les profils hydriques avant chaque pluie pour une parcelle du bassin de BINNDE. L'état hydrique du sol avant la pluie peut être relié à la lame ruisselée (tableau n°15)

Tableau n°15 Parcelle n° 2 bassin de BINNDE
Humidité du sol et lame ruisselée.

Pluie	a	b	c	d	e	f
Humidité volumique de l'horizon de surface %	0,8	21,8	23,5	25,4	17,6	21,0
Humidité volumique de tout le profil %	-	37,4	63,8	81,6	93,2	101,2
Coefficient de ruissellement sur les 30 * premiers mm de pluie %	0	15,6	19,7	20,1	16,6	26,5

Fig-23-

BASSIN DE BINNDE



On peut constater que la lame ruisselée est fonction à la fois du stock hydrique total du sol et de l'humidité en surface.

La figure n°24 qui représente les profils hydriques avant et après une même pluie sur deux parcelles installées sur un même sol, le premier étant dépourvu de végétation, le second étant couvert de graminées, montre que :

- à la précision de la mesure neutronique près, la lame infiltrée mesurée est égale à celle calculée par la différence entre "pluie et lame ruisselée" (tableau n°16)
- la quantité d'eau interceptée par la végétation est faible (pas mesurable).

Tableau 16. Profils hydriques avant et après une pluie de 96,7 mm sur les parcelles n°10 et n°11 du bassin versant de KOGNERE (BOULSA).

Parcelle	Hauteur de pluie - hauteur ruisselée mm	Lame infiltrée mesurée (sonde à neutron) mm	Différence
BOULSA 10 nue	14,9	9	5,9
BOULSA 11 couverture végétale	59,3	56	3,3

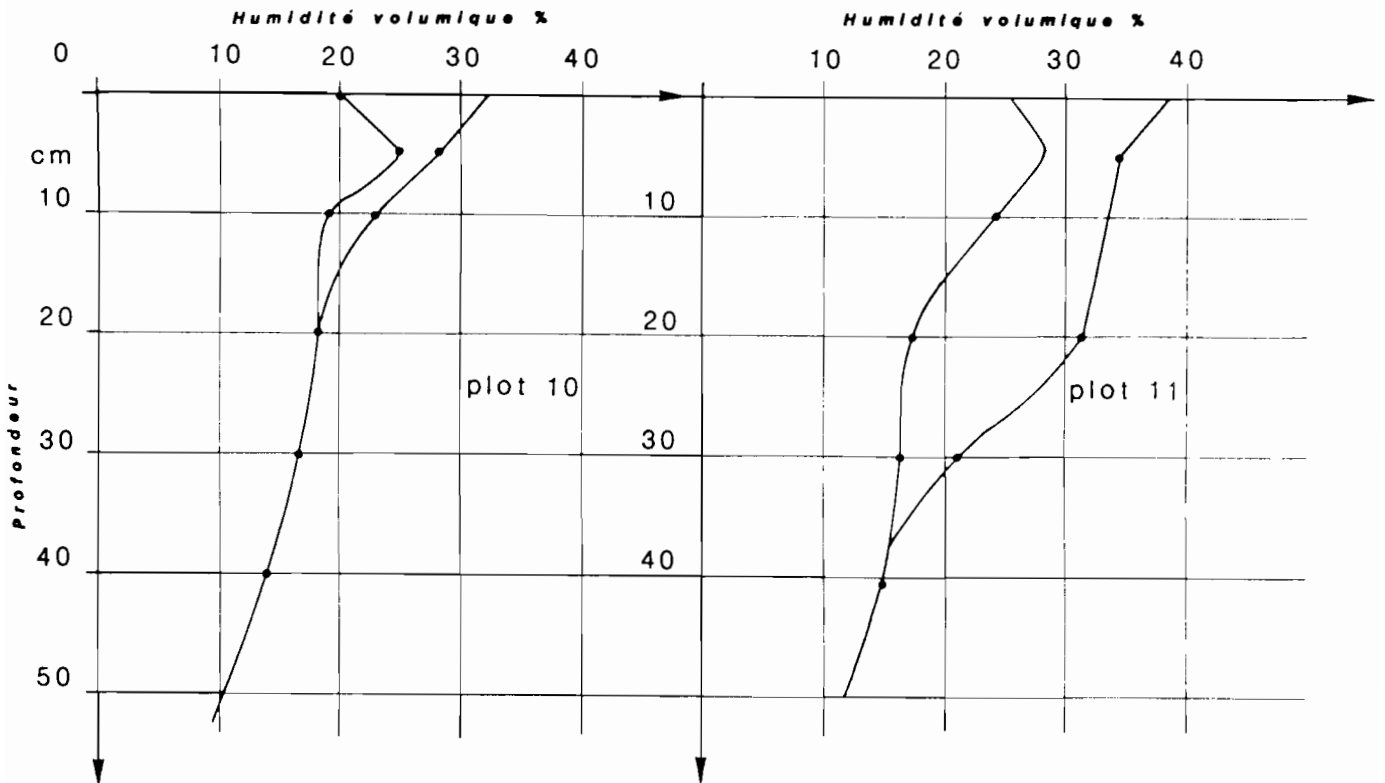


Fig-24- Profils hydriques avant et après une pluie de 96,7 mm sur les parcelles 10 et 11 du bassin de KOGNERE

Sur quelques parcelles on a pu remarquer des écoulements préférentiels à partir d'une certaine profondeur du front d'humectation. Dans ce cas, la mesure d'humidité donne des valeurs de lames infiltrées équivalent à $(P - R)$ pour les premières pluies, avant la mise en fonctionnement de ces écoulements, puis pour les dernières, lorsque les macro porosités l'induisant sont saturées (tableau 17). Ces écoulements ont pu être observés dans une tranchée en aval de la parcelle.

Tableau n° 17 BINNDE, écoulements préférentiels dans le sol.

Pluie	Parcelle n°2		Parcelle n°9	
	<i>P - R</i> mm	<i>Lim</i> mm	<i>P - R</i> mm	<i>LIm</i> mm
a	32,0	29 *	26,0	21 *
b	46,4	33 *	31,0	4
c	39,5	16	29,4	9
d	40,3	18	23,3	6
e	45,8	23	17,6	15 *
f	54,9	55	21,9	23 *

P - R = pluie - lame ruisselée

LIm = lame infiltrée mesurée à la sonde à neutrons

* = $Lim \approx (P - R)$

Dans ce dernier cas *P - R* représente mieux la lame infiltrée que la mesure neutronique.

Des mesures de la cinétique de ressuyage des sols, nous n'avons pas pu tirer de conclusions pertinentes quant à l'hydrodynamique des sols. La décroissance très rapide de l'humidité des 20 premiers centimètres du sol montrent que le ressuyage du sol doit être autant fonction de l'évaporation que du drainage (sinon plus).

Si l'état d'humectation du sol joue un rôle important sur le ruissellement, sa mesure directe, comme nous venons de le voir n'est pas aisée. Il nous a été, par ailleurs, matériellement impossible de réaliser cette mesure sur l'ensemble des parcelles. Nous avons cherché à caractériser ce paramètre de façon indirecte. Pour cela, nous avons choisi de suivre une démarche classique en hydrologie et d'utiliser un indice des précipitations antérieures (CAMUS et al, 1976, CASENAVE, 1978, MOLINIER, 1981, LAFFORGUE, 1982) (antécédent précipitation index) de la forme de celui défini par KOHLER (LINSLEY, KOHLER et PAULHUS, 1949).

$$IK_k = (IK_{k-1} + P_{k-1}) e^{\alpha a}$$

IK_k = indice des précipitations antérieures à l'instant du début de la kème averse.

P_{k-1} = hauteur de la pluie de l'averse précédente

ta = temps d'arrêt entre les pluies *k - 1* et *k*

α = constante d'ajustement qui fixe la vitesse de vidange du réservoir sol.

La valeur d' α a été fixée pour toutes les parcelles à - 0,5. Elle trouve sa justification dans les travaux de COLLINET et VALENTIN (1979, 1982) qui ont montré que ce sont les tout premiers centimètres du sol qui influencent les conditions d'infiltration et de ruissellement. Le ressuyage de cet horizon superficiel a pu être mesuré par la méthode des chocs thermiques à BINNDE. Il se décompose en deux tronçons de décroissance exponentielle, le premier rapide, correspond à

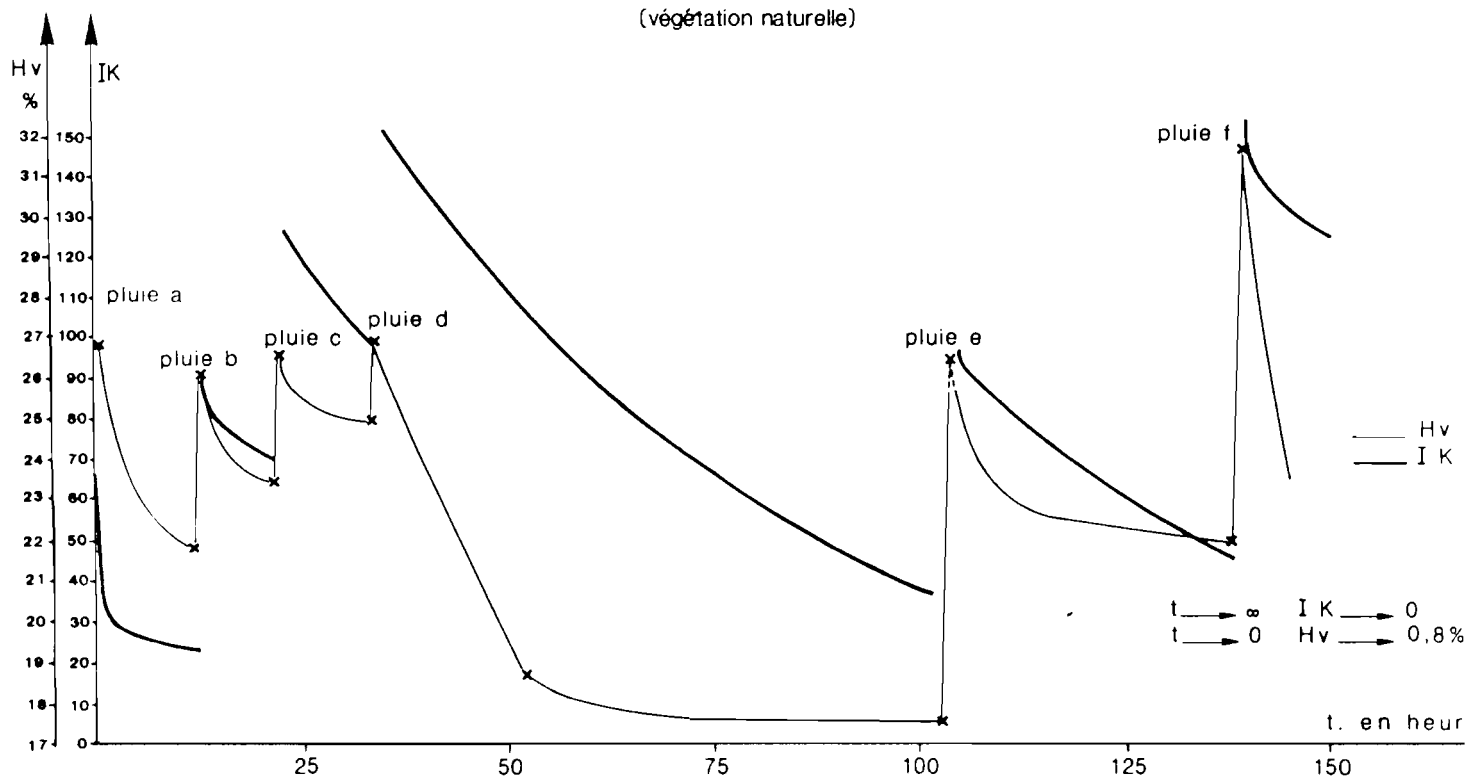
l'infiltration forcée des zones saturées et surtout à la reprise évaporatoire immédiate et ne dure pas plus d'une ou deux heures, le second est plus lent. Il est alors intéressant de rapprocher l'allure de cette cinétique avec la décroissance de IK (fig. 25).

Fig-25-

BASSIN VERSANT DE BINNDE

IK et Hv en fonction de t . en heure durant le protocole de pluie sur la parcelle 2 site I

(végétation naturelle)



CHEVALLIER (1983) montre la performance de cet indice par comparaison aux autres indices généralement utilisés pour expliquer la variabilité du ruissellement.

SEGUIS (1986) compare les valeurs de IK calculées sur une chronique pluviométrique observée et le bilan hydrique reconstitué à partir d'un modèle à réservoir. Il trouve une bonne relation entre IK et le réservoir "eau" du sol sur le bassin versant sahélien de KOLEL (Mare d'OURSIS). (Ce calcul a été réalisé au pas de temps journalier).

2.3.4. Validité des mesures sous pluies simulées.

La validité des mesures sous pluies simulées a été testée au cours d'une étude sur un petit bassin versant soudano-sahélien du nord CAMEROUN "MOUDA" (ALBERGEL et THEBE, 1986). Dans ce travail, a été également apprécié le rôle de la végétation en fonction de son état de développement. Neuf parcelles ont été installées sur trois sites différents et sont restées en place durant deux années. Au cours des saisons sèches 1984 et 1985 ont été menées deux campagnes de simulation de pluie. Chaque parcelle a reçu neuf averses d'intensités variables à des états différents d'humectation et de couvert herbacé. Au cours de la saison des pluies 1985 le ruissellement de ces parcelles a été mesuré sous pluie naturelle. La pluie a été mesurée avec un pluviomètre au sol (type SNOWDOWN).

Trois paramètres ont été retenus comme variables explicatives du ruissellement : la hauteur de pluie, l'état d'humectation du sol représenté par un indice des précipitations antérieures de type KOHLER (CHEVALLIER, 1983), et le pourcentage de couverture végétale.

Les trois parcelles d'un même site sont ici choisies pour avoir les mêmes caractéristiques de sol et de surface, et sont testées pour apprécier la variabilité "aléatoire" du phénomène.

Le suivi en saison des pluies a été réalisé pour comparer les résultats sous pluie simulée et sous pluie naturelle sur le site 1 sans végétation et pour évaluer le rôle de la végétation en fonction de son état (végétation "vivante" et végétation "morte") sur les sites 2 et 3 (couverture moyenne en végétation sur les parcelles du site 2 = 15% et 45% sur le site 3).

Les principales conclusions de cette étude sont :

Les ruissellements mesurés sur trois parcelles d'un même site, au cours de deux saisons sèches différentes donnent un échantillon statistique homogène dont la variabilité reste de l'ordre de la précision de la mesure. Une régression linéaire a été établie sur chaque site (lame ruisselée en fonction de la hauteur précipitée, de l'indice des précipitations antérieures et du couvert végétal) en utilisant l'ensemble des données des trois parcelles.

- La restitution des lames ruisselées sous pluie naturelle par ces régressions linéaires (fig.26) montre que sur le site 1, sans végétation, le ruissellement sous pluie simulée est équivalent à celui mesuré sous pluie naturelle et qu'il est surestimé sur les sites couverts de végétation. Cette diminution du ruissellement pendant la saison des pluies est due à la fragilisation des pellicules de surface par les germinations, l'activité de la mésofaune et par le développement des racines.

Bassin versant de MOUDA

RELATIONS PLUIES SIMULEES PLUIES NATURELLES

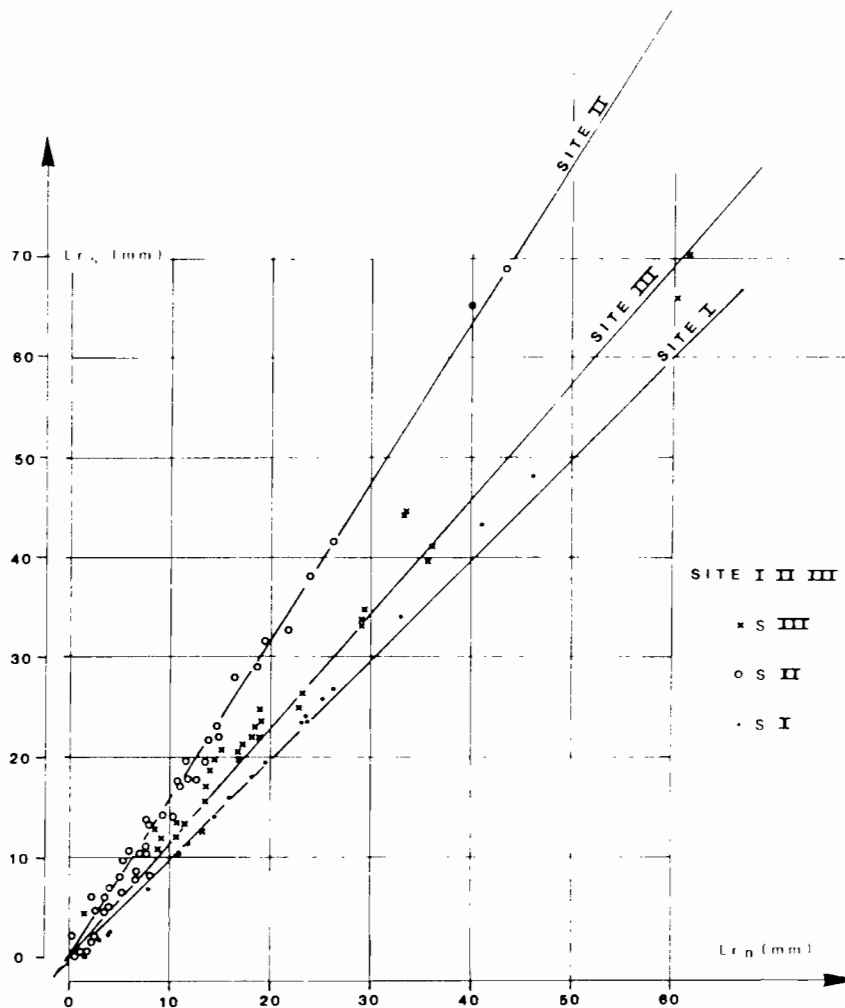


Fig-26-

Le simulateur de pluie est donc un appareil de mesure du ruissellement fidèle : les résultats sont reproductibles dans le temps et sur des parcelles ayant les mêmes caractéristiques physiques. C'est un appareil fiable : dans les mêmes conditions (site I) il donne des résultats comparables à ceux sous pluie naturelle. Il faut cependant tenir compte de l'état physiologique de la végétation : sur des parcelles en végétation naturelle les expérimentations en saison sèche donnent des coefficients de ruissellement supérieurs à ceux obtenus en saison des pluies pour une couverture au sol en végétation équivalente.

2.4. LES CARACTERISTIQUES PHYSIQUES DE LA PARCELLE.

Afin de définir les facteurs explicatifs de l'infiltration, les parcelles ont été décrites de façon la plus exhaustive possible. Ces descriptions comprennent à la fois des mesures *in situ* ou sur photographie et des appréciations subjectives mais pouvant avoir un lien avec la dynamique de l'eau dans le sol (VALENTIN, 1985a).

Quarante huit parcelles sont décrites finement par trois groupes de variables caractérisant :

- le recouvrement du sol
- les organisations superficielles du sol
- le profil pédologique

La pente des parcelles étant inférieure à 3% n'a pas été prise en compte pour les différencier.

2.4.1. Les caractéristiques de recouvrement du sol.

- la couverture végétale en place (R3) ; elle a été estimée sur le terrain en pourcentage de la surface de la parcelle. Elle peut être vérifiée sur photographie de la parcelle.

- la couverture par la litière (R4) ; il s'agit des végétaux morts jonchant la parcelle : tiges ou feuilles de mil, tapis de graminées ou de feuilles de graminées ... R4 est exprimé en pourcentage par la même méthode que R3 (pl photo n°4).

- la couverture en gravillons libres (R5). Cette variable concerne les gravillons posés à la surface de la parcelle sans être inclus dans le sol. Elle est exprimée en pourcentage d'occupation par estimation sur le terrain.

- la couverture en sable éolien (R6). L'épaisseur de sable libre est mesurée en plusieurs points de la parcelle et la moyenne de ces mesures donne la valeur de R6 pour la parcelle considérée. Il s'agit de parcelles installées sur dune ou sur placage sableux dont la totalité de la surface est recouverte de sable (pl photo n°4).

2.4.2. Les organisations superficielles du sol.

- le microrelief (07, 08) :

- * 07 est l'amplitude moyenne du microrelief mesuré sur le terrain en cm.

- * 08 est une appréciation du degré d'obstruction au ruissellement due au microrelief (note variant de 0 à 4)

0 : pas d'obstruction à l'écoulement, 1 : faible l'obstacle est subparallèle à l'axe d'écoulement, 2 : moyen l'obstacle est à peu près de 45°, 3 : 45° < angle < 90°, 4 : angle 90°.

- les micro-organismes végétaux sur la surface (09) :

* Cette variable décrit la présence de végétaux microscopiques donnant une couleur bleu - gris à la surface (note de 0 à 3) (pl photo n°3). 0 : absence, 1 : traces, 2 : près de 5%, 3 : près de 15%, 4 : > 30%.

L'horizon superficiel des sols sableux apparaît fréquemment caractérisé par des structures lamellaires de 2 à 5 mm d'épaisseur dont la cohésion est remarquable. Ce phénomène se retrouve aussi bien sur les surfaces dénudées que dans les champs ou sous tapis de graminées. Si la battance peut expliquer leur mise en place sur les surfaces nues, il faut faire appel aussi à d'autres facteurs explicatifs sous un couvert végétal où le "splash" des gouttes de pluies est très amorti ou encore pour des sols dont les éléments fins sont insuffisamment abondants pour former un ciment. Une diagnose réalisée par GILLET (Museum d'histoire naturelle de PARIS in MIETTON à paraître) permet d'avancer l'hypothèse suivante :

Dans un premier temps ; à la faveur de l'humidité et de résidus organiques, des hyphes mycéliens saprophytes pénètrent dans la couche sableuse supérieure et agglomèrent les grains. Dans un deuxième temps et uniquement en surface, une algue à filaments septés s'installe et par assimilation chlorophyllienne, fabrique des composés organiques en une matière interstitielle qui relie les agrégats. Le feutrage des filaments enchevêtrés forme ainsi un revêtement continu, ne laissant aucune plage de sol nu. Dès lors, on comprend mieux que ces "croûtes" puissent se réaliser sur des sols très sableux, issus de roches mères acides, tels que les granites à pegmatites, sans qu'il y ait nécessité de faire appel à de l'argile ou aux limons fins pour jouer le rôle de ciment.

- l'activité de la mésofaune (010, 011) (pl photo n°4):

* 010 est une appréciation de l'activité faunique : présence de fourmilière, du travail des termites, de turricules de vers de terre ... (note de 0 à 3) 0 : absence, 1 : traces, 2 : près de 5% de la surface, 3 : > 10% de la surface

* 011 représente une appréciation du degré d'ouverture de la porosité due à l'activité de la mésofaune (note de 0 à 3) 0 : absence, 1 : type placage de termites, 2 : type turricules de vers, 3 : type fourmilière

- les gravillons enchassés (012)(pl photo n°3) :

* C'est un pourcentage estimé sur le terrain de gravillons pris dans une matrice ; il faut faire un effort pour les décoller.

- les fentes (013) :

* 013 est une appréciation du nombre et de la largeur des fentes de retraits sur la parcelle, à l'état sec (note de 0 à 2). 0 : absence, 1 : < 1mm, 2 : < 1mm et en réseau.

- l'hydromorphie de la surface (014) :

* 014 est une appréciation des traces d'hydromorphie visibles en surface. 0 : absence, 1 : traces, 2 : taches rouilles peu nombreuses (<5% de la surface), 3 : nombreuses (>5%) ces taches se localisent généralement sur la surface inférieure de la pellicule plasmique

- les caractéristiques des organisations pelliculaires de surface des sols (015, 016, 017, 018, 019) (pl photo n°3 et 4) :

* 015 représente la prise en masse des sables, à partir d'une appréciation de la rigidité du complexe sable - limon - argile en surface uniquement et avant la pluie. (note de 0 à 3). 0 : absence, 1 : sables non pris en masse, 2 : sables pris en masse couvrant moins de 50% de la surface, 3 : couvrant plus de 50% de la surface.

* 016 décrit la porosité vésiculaire par une estimation du nombre et de la grosseur des traces de bulles d'air sous la pellicule. (note de 0 à 3). 0 : absence, 1 : <5%, 2 : entre 5% et 30%, 3 : >30%.

* 017 concerne la continuité de la pellicule de surface sur la parcelle. (note de 0 à 3). 0 : absence, 1 : la pellicule est présente à l'affleurement ou sous les sables sur plus de 50% de la surface, 2 : plus de 70%, 3 : plus de 95%.

* 018 représente l'épaisseur de la pellicule en 4 classes notées de 0 à 3. 0 : absence, 1 : pellicule peu individualisée, 2 : épaisseur de l'ordre de 0,5mm, 3 : épaisseur de l'ordre de 1 mm.

* 019 polygénisme : notation visuelle de la superposition de systèmes pelliculaires. (note de 0 à 3) 0 : absence, 1 : superposition de deux systèmes pelliculaires, 2 : de plus de 2 sur moins d'1 cm, 3 : sur plus d'1 cm.

- l'érosion (020) :

* 020 est une estimation à vue de l'érosion entre le début et la fin du protocole de pluie. (note de 0 à 5) 0 : absence, 1 : traces d'impact, 2 : figures au piedestal peu marquées, 3 : bien marquées, 4 : érosion en marches d'escalier, 5 : érosion linéaire.

2.4.3. La description du profil pédologique.

- la profondeur d'apparition d'un horizon à faible drainage (S21) : (pl photo n°4)

* les valeurs de profondeur en cm ont été regroupées en 4 classes notées de 0 à 3. 0 : absence en profondeur supérieure à 60 cm, 1 : entre 40 cm et 60 cm, 2 : entre 20 et 40 cm, 3 : <20 cm.

- la texture de l'horizon 0 - 20 cm (S22).

* S22 représente le pourcentage de sable et d'argile, estimé au toucher sur le terrain. (classe de 0 à 3) 0 : sableux, 1 : sablo argileux, 3 : argileux.

- la porosité de l'horizon 0 - 20 cm (S23).

* S23 est une note de 0 à 3 et représente une appréciation de la porosité du premier horizon (porosité du matériau et porosité induite par les racines, la mésofaune...). 0 : très poreux, 1 : assez poreux, 2 : peu poreux, 3 : très peu poreux.

- les traces d'hydromorphie de l'horizon 0 - 20 cm (S24).

* S24 est une estimation de la quantité de traces d'hydromorphie du premier horizon du sol (note de 0 à 3). 0 : absence, 1 : traces, 2 : quelques taches, 3 : nombreuses taches ou couleur bleutée.

- les classes de drainage selon BOULET (1976), pour les sols du BURKINA (S25).

BOULET définit six classes de sol pour le BURKINA en fonction d'une description type des profils pédologiques et des grandes catégories de sol. 0 : perméabilité très élevée, 1 : élevée, 2 : moyenne, 3 : assez faible, 4 : très faible, 5 : quasi nulle à saturation, 6 : quasi nulle.

L'annexe 1 donne les valeurs de ces variables pour les 48 parcelles.

2.5. CONCLUSION.

Ce dispositif expérimental qui comprend d'une part, l'équipement de bassins versants représentatifs pour un suivi en conditions naturelles de la pluie et du ruissellement, et d'autre part, un lot de parcelles étudiées sous pluie simulée, vise les objectifs suivants :

- définir les paramètres du ruissellement et de l'infiltration des sols. Ces paramètres découlent des relations que l'on peut établir entre les variables mesurées sous pluie simulée.
- déterminer les caractères physiques des parcelles qui ont un rôle prépondérant dans la dynamique de l'eau. Cette détermination permet la définition de zones homogènes pour la production du ruissellement et leur cartographie à l'échelle du bassin.
- transposer les relations pluie-ruissellement établies sur la parcelle à l'échelle du bassin. Cette transposition a pour but la prédétermination des crues les plus fortes.

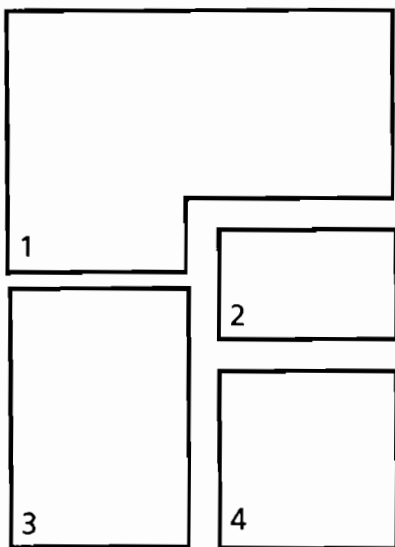
Sur les huit bassins expérimentaux choisis, cinq ont fait l'objet d'une étude dans les années 60. Ce choix a été fait pour estimer les modifications éventuelles du fonctionnement hydrologique des bassins au cours de deux situations climatiques différentes (cf. § 1.4.) et après un ensemble de modifications dû à une mise en culture plus ou moins intense suivant le bassin.

PLANCHE

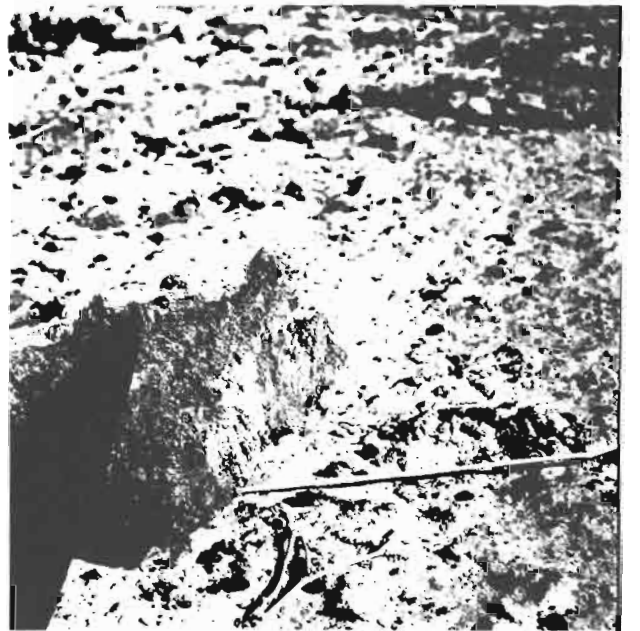
PHOTOGRAPHIQUE

3

PLANCHE 3
ORGANISATIONS SUPERFICIELLES DES SOLS



1. Gravillons inclus dans la pellicule de surface, B.V. de GAGARA, échelle canif.
2. Détails d'une pellicule avec gravillons et forte porosité vésiculaire, échelle carreaux de 0,5cm de côté.
3. Organisation pelliculaire sur dune, porosité vésiculaire importante B.V. de GAGARA, échelle pièce de 25 F CFA.
4. Organisation pelliculaire à micro-organismes (hyphes mycéliens + algues à filaments septés) ; B.V. de KOGNERE, échelle pointe de stylo à bille.



TROISIEME PARTIE

**ANALYSE DU RUISSELLEMENT
ET DE L'INFILTRATION**

3.1 ETUDE A L'ECHELLE DE LA PARCELLE.

3.1.1 L'infiltration et les paramètres hydrodynamiques du sol.

Les physiciens du sol considèrent le ruissellement comme le "résidu de l'infiltration" (VACHAUD, 1985). Sa genèse, son développement ne peuvent être abordés sans la connaissance des mécanismes de l'infiltration liés aux caractéristiques du sol. L'infiltration peut être définie comme l'ensemble des processus suivants (MOREL-SEYTOUX, 1981).

- La pénétration de l'eau dans le sol à travers sa surface.
- Le stockage et les mouvements de l'eau dans le sol.

Elle caractérise donc la cinétique d'un fluide dans un espace à trois dimensions faisant intervenir trois phases : l'eau, l'air et le sol.

Par simplification, on ne considère que le mouvement sur sa principale direction : verticale, et que les principales forces mises en jeu : la gravité et les forces capillaires. "Entre deux fluides en contact, ou un fluide au contact d'un solide, il existe une énergie superficielle engendrée par la différence entre la force d'attraction des molécules vers l'intérieur de chaque phase et la force d'attraction des molécules à travers la surface de contact. Cette énergie superficielle se manifeste par une tension superficielle définie par la quantité de travail nécessaire pour séparer l'unité de surface des deux substances" (DE MARSILY, 1981).

L'infiltration est classiquement décrite par trois paramètres :

- L'intensité d'infiltration $f(t)$ qui est définie comme un flux d'eau traversant une unité de surface de sol, elle est fonction de la conductivité hydraulique du sol et de son gradient hydraulique et a pour unité celle d'une vitesse (LT^{-1}). Elle décroît asymptotiquement avec le temps (HILLEL, 1974).
- La capacité d'infiltration, qui a également comme unité celle d'une vitesse (LT^{-1}) est suivant HORTON (1933), la vitesse maximale d'infiltration avec laquelle un sol donné sous des conditions données absorbe la pluie au fur et à mesure qu'elle tombe. Le mot "capacité" se référant plutôt à un volume qu'à une vitesse les auteurs modernes (RICHARDS, 1965) lui préfèrent le terme de perméabilité. Lorsque cette capacité d'infiltration atteint un minimum on la considère comme voisine de la conductivité hydraulique à saturation du sol dans les conditions naturelles (CHILDS, 1969).

- La hauteur d'eau infiltrée $L_i(t)$ exprimée en mm, c'est le cumul de la lame d'eau entrée dans le sol à l'instant t . Lorsque l'intensité de la pluie est plus petite que la capacité d'infiltration ou durant les arrêts de la pluie, l'eau gravifique descend le long du profil et la surface se dessèche. Cette dessiccation de surface engendre une circulation ascendante sous l'effet des forces capillaires, renforcées par la succion des racines des végétaux et de l'évaporation. Suivant que l'on assèche ou que l'on humidifie le sol, la pression capillaire présente des phénomènes d'hystérésis ; la forme que prennent les interfaces, à une saturation donnée n'est pas la même suivant que l'on imbibe un sol sec ou que l'on draine un sol humide. (VACHAUD et THONY, 1971, MUALEM, 1974, PARLANGE, 1976, VAUCLIN, 1982).

Pour l'étude du ruissellement sur les parcelles soumises à la simulation de pluies nous sommes intéressés à l'infiltration surtout dans le but de prévoir les quantités d'eau absorbées en fonction des caractéristiques physiques des parcelles. Dans une première étape nous avons étudié l'évolution des paramètres qui caractérisent l'infiltration en fonction du temps et de la forme de la pluie.

Cette étude a permis de classer l'ensemble des parcelles en quatre sous ensembles. Nous présentons ci-après les résultats sur quelques parcelles représentatives de chaque groupe.

3.1.1.1 Parcelle homogène, sans microrelief et avec des réorganisations superficielles faibles ou moyennes.

C'est le cas le plus simple. La figure n°27 présente les variations des hauteurs d'eau infiltrées et des intensités d'infiltration en fonction du temps pour la première et la dernière pluie du protocole sur la parcelle n°7 du bassin de KOGNERE.

Il a d'abord été vérifié que la lame infiltrée calculée par différence entre la pluie et la lame ruisselée est du même ordre que celle donnée par les mesures d'humidité (tableau n°18).

Tableau 18 KOGNERE parcelle 7 Infiltration Lame infiltrée.

Pluie (96,7 mm)	Pluie - ruissellement	Mesure de l'humidité volumique des profils
1ère pluie	94,3 mm	99 mm
5ème pluie	46,9 mm	54 mm

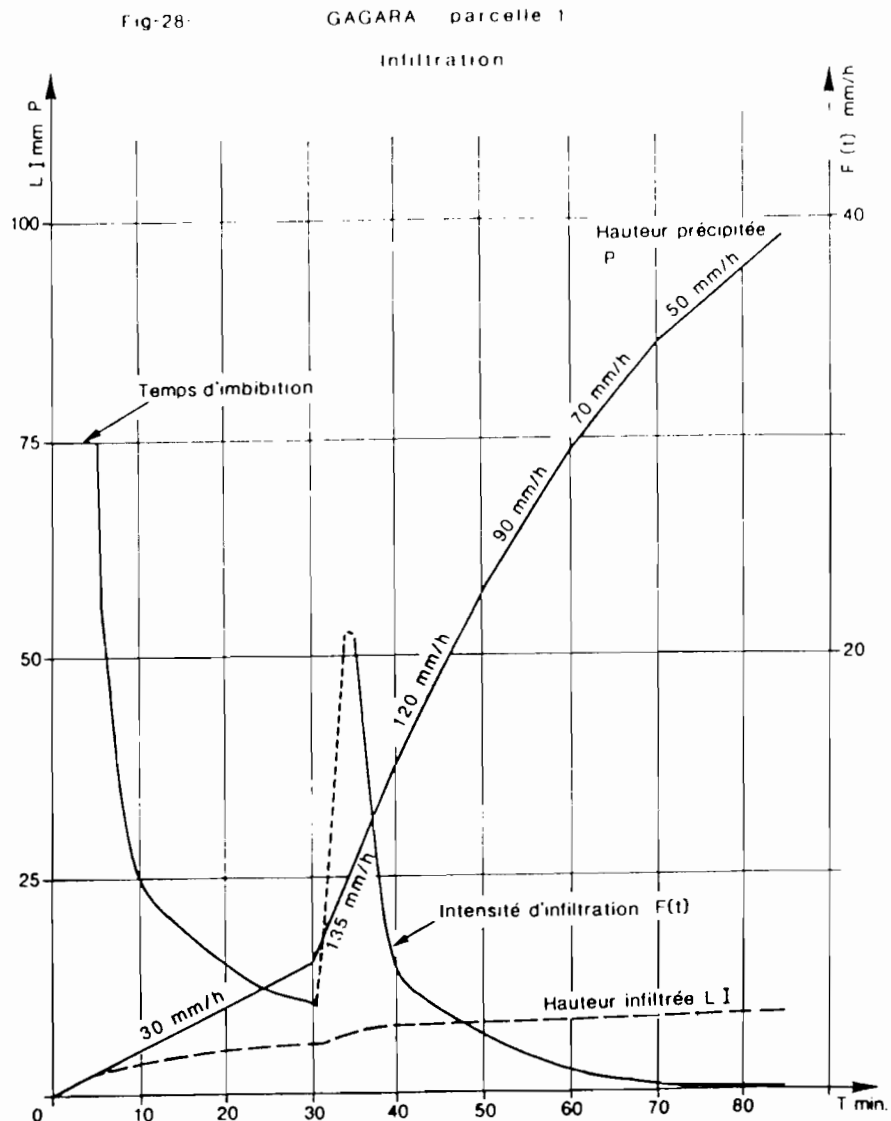
La première pluie du protocole sur sol complètement sec s'est pratiquement totalement infiltrée. Les quelques millimètres de ruissellement recueillis peuvent être négligés et mis sur le compte

GAGARA. La lame infiltrée croît lentement au début de la pluie, augmente au changement d'intensité, puis continue à croître de façon très lente vers une asymptote oblique dont la pente est très faible. Simultanément l'intensité d'infiltration décroît très rapidement, forme un pic, puis décroît jusqu'à une valeur voisine de zéro.

Cette parcelle installée entre deux monticules sableux de la dune amont du bassin de GAGARA-est se caractérise par une surface très lisse, gris clair, recouverte d'une pellicule fine continue, indurée, et contenant des algues microscopiques qui sont, sans doute, à son origine. Dans la fosse pédologique ouverte à son amont, on remarque 4 horizons distincts :

- 0 - 5 cm : une pellicule très fine adhérente sur des sables fins organisés en feuillets horizontaux ondulés,
- 5 - 20 cm : sables fins légèrement limoneux se détachant en petites mottes facilement pulvérisables en exerçant une légère pression
- 20 - 38 cm : sables à granulométrie plus grossière non structurés.
- 39 cm discontinuité importante et présence d'une surface indurée
- 39 cm - fond : horizon massif, sable fin et argile

Cet exemple montre bien comment la surface régit le phénomène d'infiltration, la porosité des horizons sous-jacents aurait laissé prévoir des vitesses d'infiltration plus fortes.

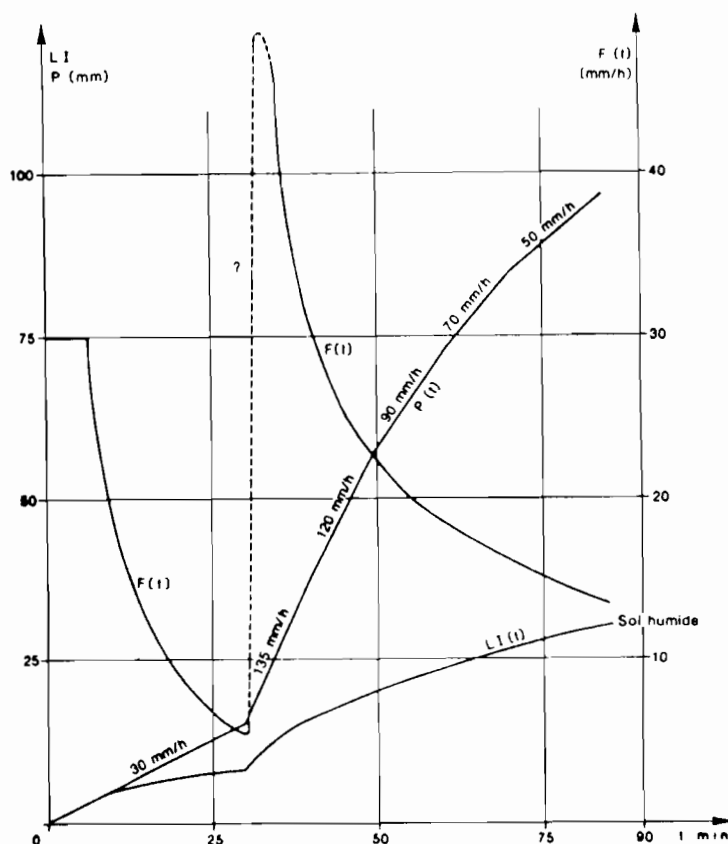


3.1.1.3 Parcelle hétérogène présentant un microrelief important et des organisations superficielles d'épaisseurs différentes.

Prenons comme exemple, la parcelle 1 du bassin de KOGNERE installée dans un champ de mil cultivé à la main, la saison des pluies précédente. Sa surface présente un microrelief dont la hauteur moyenne est de l'ordre de 3 cm ; il est formé d'un monticule principal au centre de la parcelle et de deux autres moins importants en amont. Il ne fait pas d'obstruction au ruissellement. Sur l'ensemble de ce modelé, les sables sont pris en masse dans une pellicule peu épaisse présentant une forte porosité vésiculaire due à des bulles d'air. Cette pellicule est litée plus fine et plus continue, dans les dépressions qu'au sommet des monticules. A la surface du sol se trouvent quelques tiges et feuilles de mil desséchées, deux pieds sont encore en place avec leurs racines. On observe également en surface une activité mésofaunique traduite par des résidus de récoltes de termites et quelques trous d'insectes (fourmis).

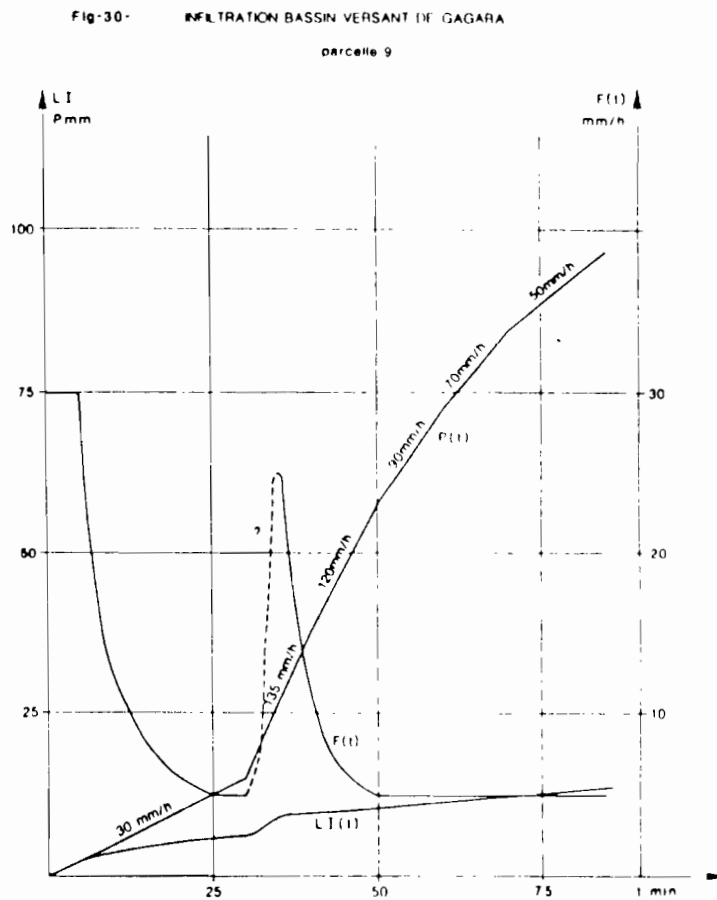
Durant la première phase de la pluie à faible intensité (30 mm.h⁻¹ pendant 30 minutes), la vitesse d'infiltration $f(t)$ décroît et atteint une asymptote oblique de faible pente (5,4 mm.h⁻¹). Au changement d'intensité, après un temps de réponse très court, la vitesse d'infiltration croît très rapidement en suivant les intensités de la pluie et tend en fin d'averse vers une asymptote horizontale $f(t)$ = environ 12 mm.h⁻¹ (plus du double de celle observée en début de pluie) (fig. 29). Ce phénomène observé systématiquement au cours des 5 pluies du protocole sur cette parcelle est caractéristique de l'ensemble des parcelles à surface hétérogène.

Fig-29- INFILTRATION BASSIN VERSANT DE KOGNERE
parcelle 1 pluie n° 5



3.1.1.4 Parcelle très imperméable à forte réorganisation superficielle, des glacis argileux.

La parcelle 9 installée sur un glacis argileux de bas de pente sur le bassin de GAGARA en est un exemple caractéristique. Le sol nu et très lisse, est recouvert d'une pellicule plasmique sur laquelle des éléments très fins pris en masse forment des rides (témoin d'un ruissellement en nappe). Quelques gravillons millimétriques sont inclus dans cette pellicule. L'unique trace de végétation est due à quelques brindilles très fines qui semblent être des racines de graminées décapées par l'érosion. La vitesse d'infiltration décroît rapidement puis montre le même pic que dans le cas précédemment décrit puis décroît pour rapidement atteindre une valeur constante assez faible (fig. 30).



La similitude des courbes d'infiltration entre ces parcelles et celles du type GAGARA 1 est surprenante si l'on considère la différence des profils pédologiques ; la parcelle GAGARA 1 est installée sur un sol plutôt sableux, tandis que GAGARA 9 est installée sur un sol argileux hydromorphe à caractère vertical.

Le front d'humectation durant tout le protocole n'est pas descendu au delà de 15 cm. La lame infiltrée totale a été de 51,3 mm pour 373,8 mm précipités en 5 pluies. Durant la pluie, la surface se transforme en une boue très liquide à particules fines, elle se dessèche rapidement et la pellicule se reforme montrant à sa base une importante porosité vésiculaire due à de nombreuses bulles d'air (gaz en solution dans la boue et qui n'arrive pas à s'échapper lors de la dessiccation, ou trace des bulles provenant d'horizons plus profonds et n'ayant pu atteindre la surface).

3.1.1.5. Interprétation et modélisation.

3.1.1.5.1. Interprétation des observations.

La théorie classique de l'infiltration et du ruissellement suggère que le ruissellement n'apparaît que lorsque l'une des deux conditions suivantes est remplie :

- l'intensité de la pluie est supérieure à la capacité d'infiltration du sol "HORTON overland flow".
- l'état de saturation du sol est tel que la nappe affleure la surface "saturated overland flow". Il peut s'agir de la nappe elle-même ou d'accumulation d'eau dans un horizon imperméable peu profond du sol.

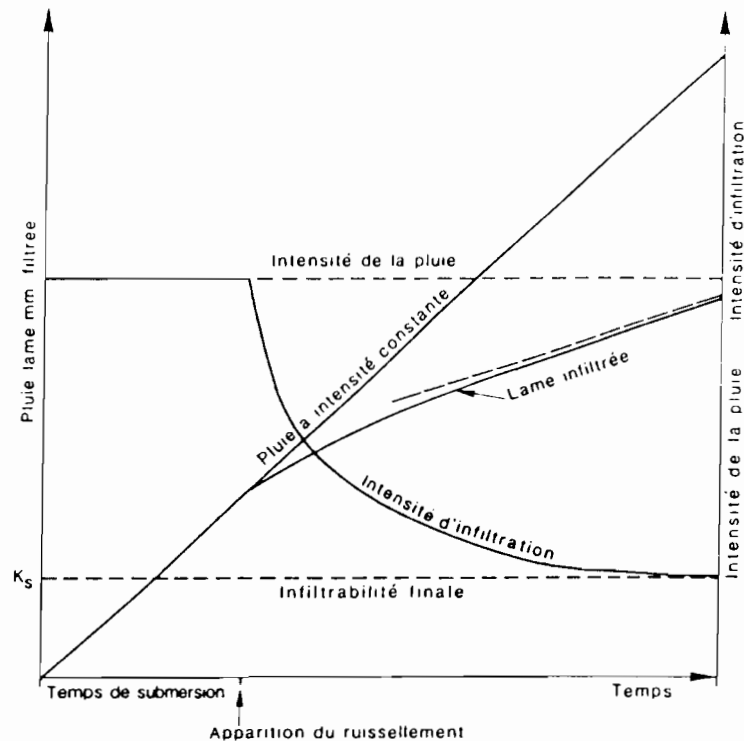
Excepté peut-être, pour les parcelles très imperméables des glacis sahéliens, où un refus à l'infiltration apparaît dans les 20 premiers centimètres du sol, l'infiltration observée sur les autres sites expérimentaux suit le processus de la première hypothèse.

Dans ce cas, RUBIN (1966) définit trois formes d'infiltration :

- infiltration sans submersion : l'intensité de la pluie n'est pas suffisante pour créer un ruissellement, la totalité de l'eau précipitée s'infiltrer.
- infiltration précédant la submersion : l'intensité de la pluie est suffisante pour créer des flaques pluviales à la surface du sol, mais celles-ci n'apparaissent que progressivement, c'est "la pluie d'imbibition".
- infiltration avec submersion : des flaques pluviales se forment à la surface du sol et le ruissellement a lieu mais une partie de l'eau précipitée continue à s'infiltrer.

Si l'averse est assez intense et assez longue, l'infiltration "avec submersion" suit l'infiltration "présubmergeante", une phase transitoire sépare les deux.

HILLEL (1974) donne le schéma suivant pour décrire cet ensemble de phénomènes (fig. 31).



Infiltration : variation de la lame infiltrée et de l'intensité d'infiltration en fonction du temps HILLEL (1974)

Fig-31-

Seul le premier cas expérimental "parcelle homogène sans microrelief et sans réorganisation superficielle importante" se calque parfaitement à ce modèle théorique. Dans les autres cas, si la similitude de la forme des courbes expérimentales à ce modèle est grossièrement respectée, on remarque trois différences importantes :

- (1) un saut brutal de l'infiltration dès que l'intensité de la pluie augmente. Cas de toutes les parcelles recouvertes de pellicules (fig 27, 28, 29).
- (2) une certaine dépendance entre la capacité d'infiltration en régime constant et l'intensité de la pluie pour les parcelles à surface hétérogène avec microrelief marqué (fig. 29).
- (3) l'intensité d'infiltration tend rapidement à devenir constante et très faible pour les parcelles à réorganisations superficielles importantes (fig. 28, 30).

(1) Le brusque changement de pente de la courbe "lame infiltrée en fonction du temps" a été observé par TOUMA, 1984 sur des essais d'infiltration sur colonne de sable calibré, en laboratoire pour rechercher les effets de l'air sur l'infiltration. Au cours de cet essai avec effet d'air sur une

infiltration sous lame d'eau constante, ce brusque changement de pente correspondait à la stabilisation de la pression de l'air dans la colonne six minutes après l'échappée de l'air à la surface. Rapidement, ensuite, le régime d'infiltration reprenait avec une cinétique d'humidification moins rapide que sur des essais sans effet d'air (parois de la colonne poreuses).

On peut penser que dans le cas des parcelles, lorsque l'intensité de la pluie devient suffisante pour créer une surface submergée importante la pression de l'eau en surface déclenche un phénomène de dégazage du sol, une nouvelle stabilisation de la pression de l'air dans le sol se crée et aboutit à une nouvelle cinétique d'infiltration. Des bulles d'air sont visibles sur le film d'eau recouvrant la parcelle.

(2) Les travaux portant sur l'influence de l'intensité des pluies sur les intensités d'infiltration à régime constant sont peu nombreux (NASSIF et WILSON, 1975, MURAI et IWASAKI, 1975, VALENTIN, 1981a, LAFFORGUE, 1977).

La dépendance entre l'intensité d'infiltration à régime constant (F_n) et l'intensité de la pluie (I) a été mise en évidence sur de nombreuses parcelles sous des climats différents (LAFFORGUE, 1977) et sur des parcelles de différentes tailles (COLLINET, 1985). VALENTIN (1981a) montre que pour des parcelles de petites dimensions et des séquences pluvieuses rapprochées le régime permanent F_n est rapidement atteint (3 à 7 minutes) et varie avec l'intensité de la pluie. Sur les pluies de notre protocole où chaque intensité reste constante au moins pendant dix minutes, il est possible de définir une valeur de F_n pour chaque valeur de I . On vérifie alors que F_n est une fonction monotone croissante de I , assimilable à une droite dont les paramètres dépendent de l'état d'humectation initial du sol pour les parcelles à surface hétérogène avec microrelief marqué.

Sur la figure 32, nous avons représenté pour la parcelle 1 du bassin versant de KOGNERE ces droites pour la première et dernière pluie du protocole correspondant respectivement à un sol sec et un sol humide avant la pluie. L'intersection de ces droites avec la première bissectrice ($F_n = I$) donne la valeur de l'intensité limite de la pluie à partir de laquelle on observe un ruissellement (I_l).

LAFFORGUE (1977) propose une interprétation de ce type de résultats : si l'on considère, conformément aux lois de la physique des sols que l'infiltration en chaque point dépend du déficit de saturation et est indépendant de la pluie, F_n doit rester constante et égale à la conductivité hydraulique à saturation (K_s) lorsque $I > K_s$.

Intensité de la pluie Intensité d'infiltration

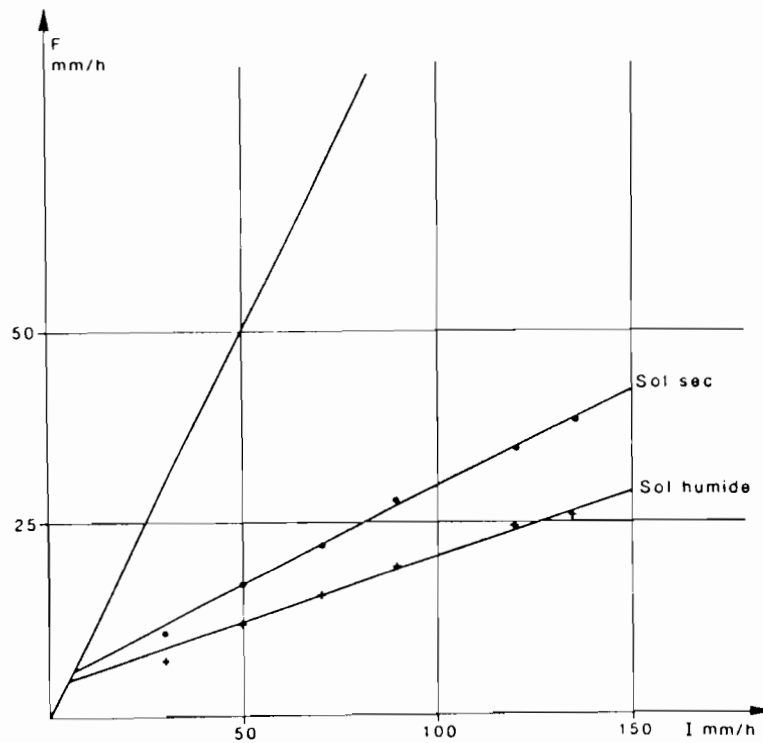


Fig-32-

Mais sur une surface hétérogène : parcelle comprenant des dépressions et des monticules, parcelle labourée ..., les valeurs de K_s d'un élément de la surface de la parcelle varient d'une hétérogénéité à l'autre. Lorsque l'intensité d'averse augmente le nombre de points pour lesquels $I > K_s$ croît également et par conséquent la fonction $F_n = F(I)$ est monotone croissante jusqu'à la valeur de I pour laquelle $I > K_s$ en tout point. L'intensité d'infiltration reste alors constante et égale à la conductivité hydraulique de la zone où l'infiltrabilité est la plus élevée.

(3) L'infiltration dans les sols sujets à la formation de pellicules superficielles a été étudiée d'un point de vue physique par HILLEL et GARTNER (1969) sur des colonnes de loess du NEGEV. Une "cimentation" de la surface se produit soit sous l'action battante des gouttes de pluie (RUIZ FIGUEROA et VALENTIN, 1983) soit par suite de la déliquescence et de la désintégration des agrégats de sol pendant le mouillage (HILLEL, 1960) soit encore sous l'action biologique de l'installation de micro-organismes (cf. § 2.4.1.). La croûte superficielle caractérisée par une densité plus grande, des pores plus fins et une conductivité à saturation plus faible que dans le sol sous-jacent limite l'infiltration de l'eau dans le sol d'une manière importante même si elle est très fine (d'une épaisseur ne dépassant pas quelques millimètres) et le sol par ailleurs très perméable (VALENTIN, 1981a, BOIFFIN, 1984)

Les courbes de lames infiltrées et d'intensité d'infiltration obtenues sur les colonnes de loess du NEGEV ont cette même originalité que celles montrées sur les parcelles à fortes organisations

superficielles : l'infiltrabilité tend rapidement vers une valeur constante d'autant plus faible que cette croûte est hydrauliquement plus résistante.

3.1.1.5.2. Modélisation.

Plusieurs expressions mathématiques sont proposées par les physiciens du sol pour décrire le phénomène d'infiltration, on en distingue deux types :

- Les expressions empiriques qui cherchent à traduire algébriquement la forme de la courbe "lame infiltrée en fonction du temps" ou de sa dérivée "intensité d'infiltration en fonction du temps". Les plus connues sont les équations de HORTON (1) (1940) et de KOSTIAKOV (2) (1932).

$$F(t) = F_c + (F_0 - F_c) e^{-kt} \quad (1)$$

$F(t)$ = intensité d'infiltration en fonction du temps
 F_0 = intensité maximale d'infiltration à l'instant $t = 0$
 F_c = intensité minimale d'infiltration à la fin de l'expérimentation
 k = constante caractérisant le sol.

$$Li(t) = At^n \quad 0 < n < 1 \quad (2)$$

$Li(t)$ = hauteur de la lame infiltrée en fonction du temps
 A et n = paramètres empiriques.

Ces deux expressions traduisent l'infiltration sous lame d'eau dans un infiltromètre à double anneaux. IBIZA (1985) propose une méthode graphique simple pour déterminer les paramètres de l'équation de HORTON pour un sol testé au simulateur de pluie.

- Les expressions traduisant les connaissances de la mécanique des fluides en milieu poreux.

L'hydrodynamique dans les milieux poreux reposent sur deux équations fondamentales (DE MARSILY, 1981) :

- l'équation de continuité qui peut s'écrire sous une forme générale :

$$\frac{\delta(lw)}{\delta t} = - \operatorname{div}(l\bar{q}) \quad (1)$$

l = masse volumique du fluide
 t = temps

q = la densité du flux volumique

w = porosité

• l'équation dynamique

en faisant l'hypothèse d'un milieu homogène et isotrope, d'une phase air à la pression atmosphérique et d'une phase eau non soumise à des gradients chimiques ou thermiques l'équation du mouvement s'écrit sous la forme :

$$\bar{q} = -K(\theta) \overline{\text{grad} H} \quad (2)$$

où H = charge hydraulique

$K(\theta)$ est la conductivité hydraulique correspondant à la teneur en eau θ

• l'équation de l'écoulement

obtenue à partir de (1) et (2), elle s'écrit :

$$w \frac{\delta l}{\delta t} = - \text{div} \left(l K(\theta) \overline{\text{grad} H} \right) \quad (3)$$

A partir de ces trois équations un certain nombre de solutions pouvant caractériser les "entrées - sorties" du bilan hydrique se sont développées en supposant des hypothèses simplificatrices : milieu homogène, humidité initiale du sol constante, flux monodimensionnel, ...

Les deux modèles les plus connus sont ceux de GREEN et AMPT (1) (1911) et de PHILIP (2) (1957)

$$F(t) = \frac{K [H_c (\theta - \theta_i) + Li(t)]}{Li(t)} \quad (1)$$

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

K = conductivité hydraulique à saturation naturelle

$\theta - \theta_i$ = déficit initial d'humidité

H_c = succion capillaire sur le front d'humidité

$Li(t)$ = hauteur cumulée de la lame infiltrée à l'instant t

$$F(t) = \frac{1}{2} S t^{-1/2} + A \quad (2)$$

S = sorptivité

$$S^2 = 2 \int_{\theta_i}^0 (\theta - \theta_i) K \frac{dh}{d\theta} d\theta$$

A = intensité d'infiltration obtenue dans des conditions proches de la saturation.

h = pression de l'eau dans le sol

Ces deux modèles sont basés sur l'hypothèse d'une submersion immédiate et négligent l'effet de l'air emprisonné dans le sol. Dans notre expérimentation, on a vu qu'il existe deux phases bien distinctes : l'infiltration avant submersion et après submersion et que dans le cas général la dynamique de l'eau est très liée à celle de l'air dans le sol. Répondant à ces deux préoccupations, le modèle développé par MOREL-SEYTOUX (1973a, 1973b, 1974a, 1974b, 1976, 1978) devrait s'appliquer à l'ensemble de nos parcelles. Nous résumerons ce modèle ici, par ces principales équations et noterons les résultats qu'il a permis d'atteindre sur 48 parcelles où il a été appliqué avec succès.

- Equation pour la phase précédant la submersion :

$$t_p = \frac{(\theta - \theta_i) Hc (\theta - \theta_i)}{(1 - f_i) K} \frac{1}{r^*} \left(e^{\beta r^* - 1} - 1 \right) \quad (1)$$

t_p = temps de la submersion

$\theta - \theta_i$ = déficit à l'état initial de l'humidité volumique

$Hc (\theta - \theta_i)$ \approx Hc pression capillaire

$$f_i = f_w (\theta - \theta_i) \text{ avec } f_w = \left(1 + \frac{kra}{krw} \cdot \frac{\nu \omega}{\nu a} \right)^{-1}$$

$kra, krw, \nu a, \nu \omega$ sont les valeurs respectives de la perméabilité et de la viscosité de l'air et de l'eau (la valeur relative de viscosité totale rt est une fonction de l'humidité volumique).

. K = conductivité hydraulique à saturation naturelle

. r^* = intensité normalisée de la pluie $r^* : I / K$

. β = constante de viscosité due au mélange air et eau, variant entre 1,1 et 1,7.

La lame infiltrée durant le temps t_p s'obtient naturellement $W_p = t_p \cdot I$.

Cette équation suppose que l'intensité de la pluie est constante depuis le temps initial jusqu'à l'apparition de la submersion ; ce qui est le cas général dans nos expérimentations. Si le temps de submersion apparaît après le premier changement d'intensité (cas des parcelles les plus perméables) l'équation 1 devient :

$$t_p = t_1 + \frac{1}{2} \left[\frac{(\theta - \theta_i) Hc}{1 - f_i} + W_1 \right] \cdot \left[\left\{ e^{K/(\beta I_2 - K)} \left(1 + \frac{(1 - f_i) W_1}{(\theta - \theta_i) Hc} \right) \right\}^{-1/(\beta I_1 - K)/(\beta I_2 - K)} - 1 \right] \quad (2)$$

t_1 = durée de la première intensité de pluie

I_1 = première intensité de pluie

I_2 = deuxième intensité de pluie

Après la submersion l'équation d'infiltration de MOREL-SEYTOUX est :

$$\frac{K}{\beta}(t - t_p) = Li - W_p - \left[\frac{0 - \theta_i}{1 - f_i} Hc(0 - \theta_i) + W_p \left(1 - \frac{1}{\beta}\right) \right] \cdot \ln \left[\frac{1 + \{(1 - f_i) Li\} / \{(0 - \theta_i) Hc(0, \theta_i)\}}{1 + \{W_p (1 - f_i)\} / \{(0 - \theta_i) Hc(0, \theta_i)\}} \right] \quad (3)$$

t = temps de la mesure

Li = lame infiltrée au temps t

W_p = lame infiltrée au temps de la submersion

les autres termes ont été définis précédemment.

Sur chaque parcelle nous avons choisi une pluie du protocole suffisamment longue, celle de récurrence décennale, tombant sur un sol assez humide (5ème pluie du protocole) pour appliquer ce modèle.

Les lames infiltrées ont été déduites (au pas de temps de 5 minutes) de l'hydrogramme de ruissellement.

Disposant donc d'une chronique de lames infiltrées, l'équation (3) a été résolue par optimisation pour trouver sur chaque parcelle une valeur de K (conductivité hydraulique à saturation) et Hc (pression capillaire).

Nous avons fait les hypothèses suivantes pour réaliser ce calcul :

- . $t_p = t_i$ temps de la pluie d'imbibition
- . $W_p = Li(t_i)$ lame infiltrée pendant la pluie d'imbibition.
- . à l'état initial le flux d'eau est nul dans le profil hydrique $f_i = 0$
- . nous avons pris $\beta = 1,3$, valeur utilisable pour la majorité des cas en milieu naturel selon MOREL-SEYTOUX et KANJI (1974).

En posant $h = (0 - \theta_i) Hc(0, \theta_i)$ l'équation (3) devient :

$$\frac{K}{\beta}(t - t_i) = Li - Li(t_i) - \left[h + Li(t_i) \cdot \left(1 - \frac{1}{\beta}\right) \right] \cdot \ln \left(\frac{h + Li}{h + Li(t_i)} \right) \quad (4)$$

Nous avons utilisé pour estimer les paramètres K et h la méthode développée par MARQUARDT (1963). Cette méthode de recherche des paramètres des systèmes non linéaires est un compromis entre la méthode de linéarisation du système (par série de TAYLOR) et la méthode de plus grande pente. Ce compromis permet de retenir les avantages respectifs des deux méthodes : la convergence est presque toujours atteinte et cela après peu d'itération. Dans notre étude, il y a convergence si la différence de la somme des carrés des écarts entre le temps observé et le temps

calculé entre deux itérations est inférieure ou égale à 10^{-4} . La mise en oeuvre de ce calcul a été réalisée à partir du logiciel de statistique S.A.S. (S. A.S. Users' Guide 1982).

Pour donner une idée de la précision de l'estimation des paramètres K et h nous explicitons les caractéristiques statistiques de l'ajustement sur la première parcelle testée (BINNDE 1).

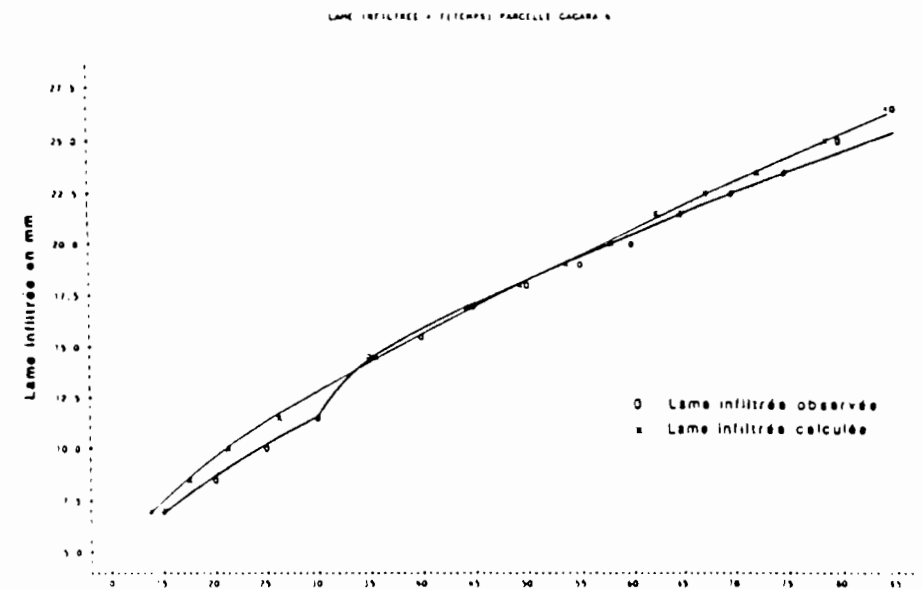
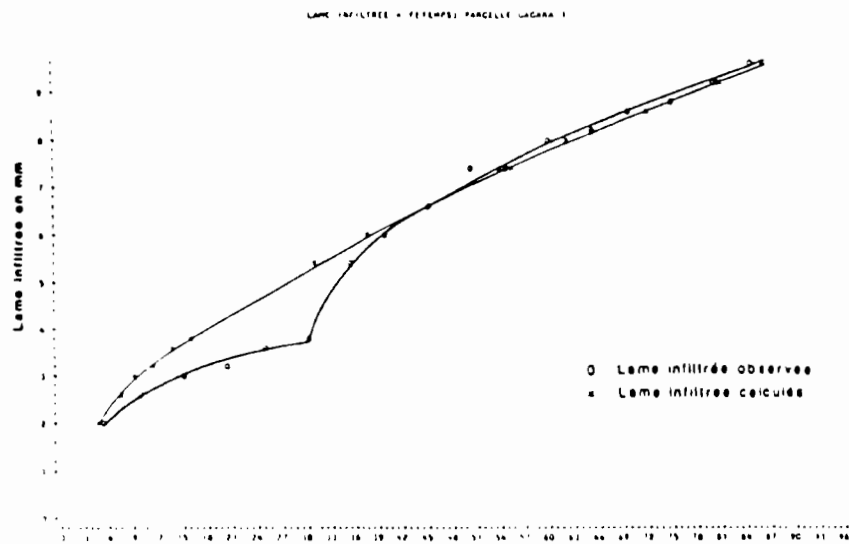
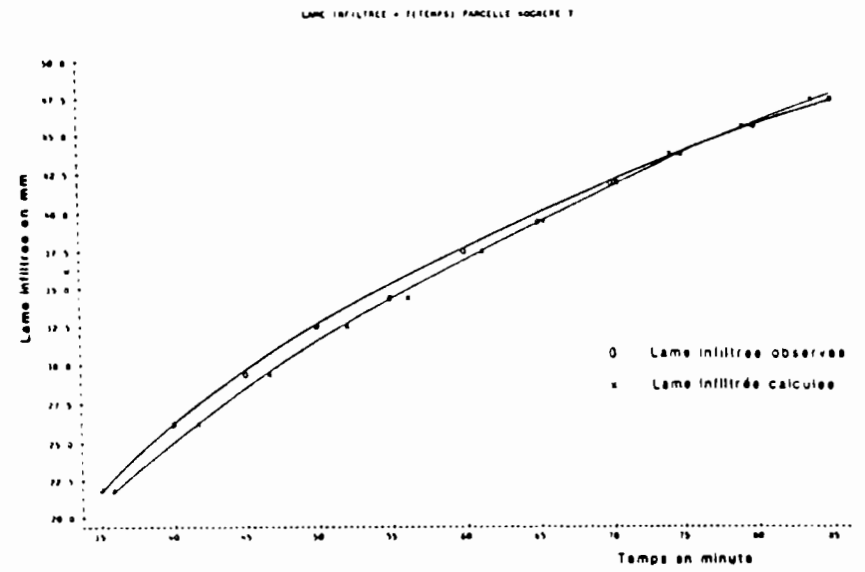
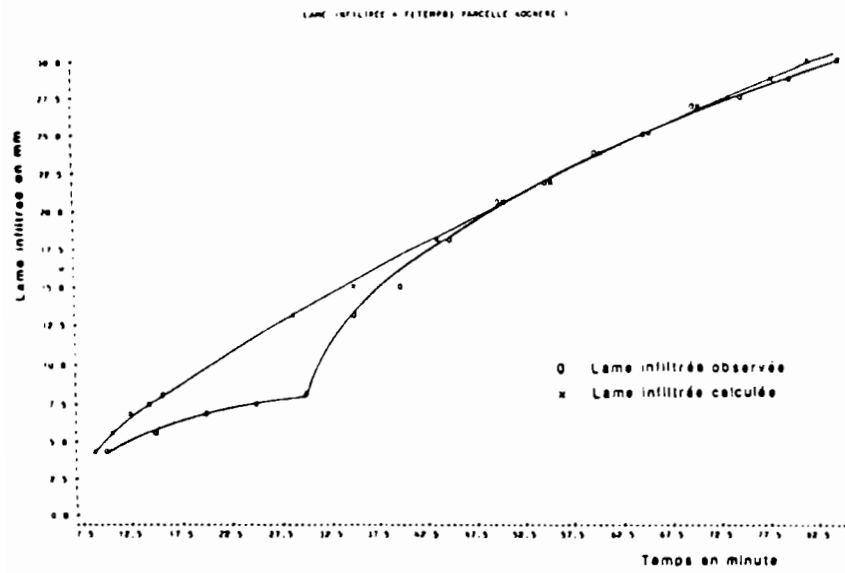
	degré de liberté	somme des carrés	carré moyen
régression	2	20397,4	10198,7
résidus	11	77,6	7,1

paramètre	estimation	écart type	intervalle de confiance à 95%	
k	0,49	0,07	0,35	0,64
h	3,06	2,01	-1,3	7,4

Nous avons testé une certaine stabilité de l'estimation de ces paramètres pour des valeurs initiales plausibles différentes.

La figure 33 montre pour quelques parcelles l'adéquation du modèle aux observations.

Fig-33- Modèle de MOREL-SEYTOUX appliqué aux parcelles sous pluie simulée
Exemples sur 4 parcelles types



Si pour l'ensemble des parcelles le modèle reconstitue parfaitement la fin de la courbe d'infiltration, sur un certain nombre d'entre elles il existe un net décalage entre les valeurs observées et les valeurs calculées en début de courbe.

Pour expliquer ce phénomène nous avons émis trois hypothèses que nous avons cherchées à vérifier :

- L'assimilation du temps de submersion (t_p), au temps d'imbibition (t_i), n'est pas valable : t_i est le temps où est apparu le ruissellement ; pour l'assimiler à t_p , il faut négliger les temps de transfert sur la parcelle et dans le dispositif de mesure (transfert de l'aval de la parcelle à la cuve du limnigraphe). On peut penser qu'au début du ruissellement le stockage superficiel se poursuit et est assimilé à de l'infiltration. En reportant les valeurs des paramètres h et K dans les équations (1) ou (2), il est possible de calculer une valeur de t_p . Ces valeurs sont très voisines de t_i (tableau 19). Cette première critique est à écarter.

- La dynamique de l'infiltration s'est profondément modifiée après le rééquilibrage des pressions suivant le dégazage du sol. Nous n'avons pas les moyens de vérifier cette hypothèse.

- La pluie commence par une intensité faible, une partie seulement de la parcelle a une conductivité hydraulique inférieure à cette intensité. La parcelle ne ruisselle donc pas entièrement et un régime d'infiltration constant est en place, il dure tant que les intensités de la pluie ne sont pas suffisantes pour une contribution au ruissellement de l'ensemble de la parcelle. On rejoint là, le modèle de LAFFORGUE (1977) exposé au début de ce paragraphe pour les parcelles à surface hétérogène.

Tant que l'intensité de la pluie est inférieure à la conductivité hydraulique à saturation en tout point de la parcelle, un régime permanent d'infiltration fonction de l'intensité de la pluie s'établit. Il a paru intéressant d'établir la valeur de l'intensité limite de la pluie à partir de laquelle apparaît un ruissellement même si l'ensemble de la parcelle n'y contribue pas. Pour cela, nous avons appliqué aux mêmes pluies le modèle de LAFFORGUE :

. Parcelle à surface hétérogène :

$$I > I_\ell, F_n = AI + B$$

I = intensité de la pluie

I_ℓ = intensité limite de la pluie pour avoir l'apparition d'un ruissellement.

F_n = intensité d'infiltration à régime constant.

A et B = constantes empiriques.

. Parcelle à surface homogène :

$I > Il, F_n = Il$ Il est par conséquent facile d'en déduire

$$I_l = \frac{B}{1-A} \quad \begin{array}{l} \text{dans le premier cas} \\ (= \text{moyenne de } F_n \text{ dans le second}) \end{array}$$

Sur le tableau 19 qui présente les valeurs des différents paramètres obtenus par le modèle de MOREL SEYTOUX sur les 48 parcelles et les valeurs de I_l données par le modèle de LAFFORGUE, on remarque que :

- pour des parcelles à surface homogène (KOGNERE 7, végétation dense et uniforme, GAGARA 1 sol nu à pellicule très lisse, GAGARA 9 sol nu "glacé" ...) les valeurs de K et Il sont très voisines.

- pour les parcelles à surface hétérogène K est en général très supérieur à Il (KOGNERE 1 sol cultivé, KUO 3 sol à cailloux latéritiques, KAZANGA 13 sol cultivé). Nous notons une certaine dispersion des valeurs de F_n en fonction de I , car les plages d'intensité ne sont parfois pas assez longues et il n'est pas sûr que F_n mesuré en fin de plage corresponde réellement à un régime constant.

La parcelle BINNDE 5 installée sur un sol cultivé en billon semble faire exception à cette règle. La parcelle était en fait installée de manière que seul l'inter billon aval participait au ruissellement. Cette surface peut être considérée comme homogène.

La pression capillaire H_c a été déduite de h en prenant comme valeur de $\theta - \theta_i = 0,15$, valeur moyenne obtenue sur quelques parcelles où les humidités ont été mesurées. Il est évidemment abusif de prendre la même valeur $\theta - \theta_i$ pour tous les sols, mais la valeur H_c ainsi obtenue peut être un indicateur de la capillarité du sol et utilisable quelles que soient les conditions initiales d'humidité. On remarquera que H_c varie de quelques centimètres à une soixantaine de centimètres, que les valeurs de H_c sont les plus fortes pour les sites installés sur des sols argileux (4 parcelles font exception), les plus faibles pour les sols sableux ou gravillonnaires et moyennes pour les sols limono-sableux.

Les valeurs de la conductivité hydraulique à saturation varient de quelques dixièmes de millimètres à 7 centimètres/heure. On remarque que les valeurs les plus fortes sont obtenues pour des parcelles en végétation naturelle et que les plus faibles caractérisent les parcelles des glacis dénudées du SAHEL. Ces dernières se comportent, véritablement comme une surface imperméable.

Tableau 19 : Paramètres de l'infiltration.

Parcelle	K mm/h	h mm	Hc mm	tp min	ti min	Il mm/h
BINNDE 1	29,6	3,1	20,4	1,9	2,0	6,5
BINNDE 2	23,3	23,6	157,1	14,2	8,4	11,5
BINNDE 3	21,2	40,9	272,5	19,7	16,0	13,5
BINNDE 4	16,2	44,1	293,7	11,9	5,4	(3,0)
BINNDE 5	15,2	45,6	304,3	14,2	15,5	13,0
BINNDE 6	1,9	61,3	408,6	1,6	4,7	1,5
BINNDE 7	18,8	36,9	246,3	14,9	11,6	17,5
BINNDE 8	30,9	16,0	106,8	10,5	2,3	(1,0)
BINNDE 9	4,2	40,0	266,4	2,3	7,5	3,0
BINNDE 10	2,9	54,5	363,1	2,1	3,1	4,0
KAZANGA 11	70,8	27,7	184,9	18,6	18,0	27,0
KAZANGA 12	49,8	23,2	154,3	17,2	15,0	(1,0)
KAZANGA 13	15,2	44,3	295,3	10,8	10,0	1,2
KAZANGA 14	7,0	61,4	409,6	6,0	8,0	0,5
KAZANGA 15	59,0	36,9	246,3	17,4	16,7	40,0
KAZANGA 16	8,2	32,1	214,1	3,8	6,3	11,0
KAZANGA 17	2,2	32,0	213,1	2,2	5,6	0,5
KUO 1	7,3	23,8	158,8	2,5	5,0	1,5
KUO 2	2,5	36,8	245,6	1,3	3,0	1,4
KUO 3	29,6	7,0	46,7	4,2	10,6	4,3
KUO 4	2,4	36,6	244,0	1,2	4,3	(0,7)
KUO 5	7,9	20,0	133,6	2,3	4,7	1,7
KUO 6	8,8	22,0	146,6	2,8	5,9	1,2
KUO 7	9,8	20,5	136,9	3,0	5,5	4,0
KUO 8	0,4	75,8	505,5	1,0	5,6	3,6
KUO 9	24,6	7,7	51,5	3,7	8,3	3,0
KUO 11	3,6	71,0	473,3	3,4	6,0	(0,5)
KOGNERE 1	19,6	4,5	29,7	9,0	6,4	1,5
KOGNERE 3	13,1	2,3	15,2	2,3	3,6	(0,5)
KOGNERE 4	66,6	29,7	198,2	33,7	30,0	38,5
KOGNERE 5	4,1	20,6	137,6	4,9	5,6	1,0
KOGNERE 6	1,7	22,7	151,1	2,1	4,0	0,2
KOGNERE 7	16,6	44,4	296,1	29,8	31,5	12,0
KOGNERE 8	3,5	13,6	90,5	2,7	3,0	(0,2)
KOGNERE 10	5,3	22,6	150,7	9,0	6,4	1,5
KOGNERE 11	61,2	36,7	244,4	33,4	32,0	22,5
GAGARA 1	2,1	11,2	77,4	1,3	3,2	1,3
GAGARA 2	7,8	4,8	32,2	1,7	6,1	3,5
GAGARA 3	28,6	2,6	17,4	15,4	20,0	17,2
GAGARA 4	12,0	10,0	66,7	8,9	10,0	13,5
GAGARA 5	0,1	55,1	367,6	0,3	2,4	1,2
GAGARA 6	0,4	62,1	414,0	1,4	3,4	(1,3)
GAGARA 7	1,1	38,6	257,6	2,2	5,1	2,6
GAGARA 8	14,5	6,5	43,5	7,4	5,9	4,0
GAGARA 9	5,7	6,8	45,4	2,3	5,0	4,4
GAGARA 10	4,4	38,2	77,4	1,3	3,2	1,3
GAGARA 11	0,3	84,9	566,1	1,4	4,2	0,3
GAGARA 12	2,1	9,8	65,1	1,2	2,2	1,7

k = conductivité hydraulique à saturation

$h = (\theta - \theta_r) Hc(\theta, \theta_r)$

Hc = pression capillaire

tp = temps de submersion calculé

ti = temps d'imbibition mesuré

Il = intensité limite de ruissellement

3.1.2 Les facteurs explicatifs de l'infiltration en milieu sahélien.

La forte variabilité du comportement hydrodynamique de parcelles parfois spatialement très voisines conduit à la question suivante : quels sont les facteurs susceptibles de hiérarchiser les 48 parcelles vis à vis de l'infiltration?

Cette étude partiellement publiée (ALBERGEL et al/ 1985d) est ici précisée et complétée.

3.1.2.1. Données et méthodes

Les données sont constituées d'un échantillon de 48 parcelles, décrites par des variables de l'infiltration acquises par expérimentation sous pluies simulées et par un ensemble de caractéristiques physiographiques. Leurs valeurs sont consignées dans l'annexe n°1.

Les protocoles définis sur chaque parcelle ont légèrement différé d'un bassin à un autre. Mais, il a été possible d'établir une succession de pluies équivalentes en hauteur, intensité et temps de ressuyage sur toutes les parcelles. Pour chaque parcelle, sept variables caractéristiques de l'infiltration sont retenues.

- La lame infiltrée pendant le déroulement du protocole (*I.I*)

Un protocole équivalent a été retenu sur chaque parcelle : 380 mm de pluie en 5 averses.

- La conductivité hydraulique à saturation (*K*), obtenue par le modèle de MOREL SEYTOUX (tableau n°19)

- La succion capillaire (*Hc*), obtenue également par le modèle de MOREL SEYTOUX (tableau n°19).

- La pluie d'imbibition sur sol sec (*IS*) ; elle définit la hauteur d'eau infiltrée en mm avant l'apparition du ruissellement pour la première pluie du protocole qui a toujours lieu après une période de ressuyage de plusieurs mois

- La pluie d'imbibition sur sol "très humide" (*III*) ; c'est la hauteur infiltrée en mm avant l'apparition du ruissellement pour la pluie survenant dans le protocole lorsque le sol présente en surface une humidité maximale.

- L'intensité limite de ruissellement (*II*) ; obtenue par le modèle de LAFFORGUE (tableau 19)

- La détention superficielle récupérable (*Dr*) ; c'est la hauteur d'eau ruisselée (en mm) après l'arrêt de la pluie. Cette quantité, toujours très faible est peu variable au cours du protocole. Nous avons choisi de retenir celle correspondant à une pluie survenant pour un état d'humectation du sol maximum. Cette variable, exprime la différence entre le stockage mobilisable en fin d'averse et la capacité d'infiltration après l'arrêt de la pluie. Elle est liée à l'intensité en fin d'averse et à la rugosité de la parcelle (LAFFORGUE, 1977).

Les variables physiologiques de la parcelle proviennent toutes de mesures simples de terrain, aucun moyen d'analyse en laboratoire n'ayant été utilisé (cf. § 2.4).

- R3, R4, R5, R6 décrivent le recouvrement du sol (végétation, couverture de gravillons cailloux ou sable)

- 07, 08 décrivent le modelé de la parcelle

- 010, 011 décrivent l'activité de la mésofaune

- 013, 09, 012, 020 décrivent la surface (fente, micro-organisme, gravillons enchassés, érosion)

- 016, 017, 018, 019 décrivent les organisations pelliculaires de surface

- S21, S22, S23, S24 décrivent le profil pédologique.

Pour caractériser par un minimum de variables chaque parcelle et hiérarchiser ces caractères vis à vis de l'infiltration, nous utiliserons les "outils" de l'analyse des données : l'Analyse en Composantes Principales et l'Analyse Factorielle des Correspondances (CAILLET et PAGES, 1976).

L'Analyse en Composantes Principales (ACP) a été appliquée à la matrice des données telle qu'elle a été définie dans les paragraphes précédents. C'est une méthode de réduction du nombre de variables permettant des représentations géométriques des parcelles et des variables. Cette réduction ne se fait pas par une sélection de certaines variables, mais par la construction de nouvelles variables synthétiques obtenues en combinant les variables initiales au moyen de "facteurs" (BOUROCHE et SAPORTA, 1983).

Les nouvelles variables définissent des axes principaux à l'intérieur du nuage des données, et les représentations sur les axes nous permettront d'effectuer des regroupements similaires. Nous chercherons une signification physique aux premiers axes de l'analyse, et nous étudierons le comportement des variables d'infiltration selon les caractéristiques des parcelles.

Comme l'ACP, l'Analyse Factorielle des Correspondances (AFC) propose une représentation de faible dimension du tableau des données. Mais elle s'applique de préférence aux variables qualitatives et traite symétriquement et simultanément les lignes et les colonnes du tableau. L'AFC nous permet d'intégrer dans la matrice les données des variables non hiérarchisées.

Les variables de notre étude sont hétérogènes (par exemple les notes caractérisant l'érosion sont comparées aux mesures d'infiltration et aux types d'occupation des sols). Nous avons employé la technique du codage disjonctif complet qui consiste à substituer à chaque variable un nombre fixé de modalités qualitatives exclusives (ou classes).

Pour la mise en place de l'AFC nous n'avons introduit que les six variables ci-dessous :

- La perméabilité est appréciée par la division en trois classes des valeurs de la lame infiltrée (L1).

- Le type d'occupation du sol est caractérisé par 6 classes décrites dans ALBERGEL et BERNARD (1984b) : sol nu, végétation naturelle, culture, brûlis, cailloux, traitement standard (labour manuel sur 10 centimètres).

- Les deux paramètres du microrelief (07 et 08) sont remplacés par trois classes.

- L'activité de la mésofaune (010 et 011) se réduit à deux classes : pas ou peu d'activité biologique par opposition à traces importantes d'un travail faunique.

- La variable "érosion" (020) est divisée en trois classes.

- A partir des variables caractérisant les organisations pelliculaires de surface, cinq classes ont été définies.

* Classe 1 : pas d'organisation pelliculaire de surface (moins de 25% de la surface concernée).

* Classe 2 : pellicule fine, peu individualisée par rapport au matériau sous-jacent.

* Classe 3 : pellicule consolidée, fine, nettement individualisée et surmontée d'un mince microhorizon sableux discontinu.

* Classe 4 : pellicule sur sable ; succession de trois microhorizons nettement individualisés quant à leur granulométrie : sable grossier lâche, sable fin cimenté présentant une porosité vésiculaire, pellicule plasmique à porosité vésiculaire.

* Classe 5 : pellicule plasmique, argilo-limoneuse, épaisse à forte porosité vésiculaire et présentant souvent un polygénisme.

3.1.2.2 Etudes des corrélations sur les variables hydrologiques.

Les tableaux n°20a et b donnent les paramètres statistiques des variables et les corrélations entre les sept variables hydrologiques définies ci-dessus (*L1*, *Il*, *K*, *IS*, *IN*, *Hc*, et *Dr*).

Tableau n° 20 a - Paramètres statistiques des variables d'infiltration.

Variable	N	MOYENNE	ECART TYPE	MINIMUM	MAXIMUM
<i>L1</i>	48	139,7	100,1	27,8	367,1
<i>Il</i>	48	6,3	9,3	0,2	40,0
<i>K</i>	48	15,5	18,2	0,1	70,8
<i>IS</i>	48	15,2	9,8	1,9	35,9
<i>IH</i>	48	5,6	5,1	1,1	23,3
<i>Hc</i>	48	200,9	139,5	15,2	566,1
<i>Dr</i>	48	1,0	0,6	0,0	3,2

Tableau 20 b - Matrice des corrélations

	<i>L1</i>	<i>Il</i>	<i>K</i>	<i>IS</i>	<i>IH</i>	<i>HC</i>	<i>DR</i>
<i>L1</i>	1,00000 0,0000	0,82057 0,0001	0,85427 0,0001	0,86620 0,0001	0,73992 0,0001	-0,3825 0,8015	-0,50537 0,0002
<i>Il</i>	0,82057 0,0001	1,00000 0,0000	0,78644 0,0001	0,63101 0,0001	0,64679 0,0001	-0,01330 0,9285	-0,41360 0,0035
<i>K</i>	0,85427 0,0001	0,78644 0,0001	1,00000 0,0000	0,60201 0,0001	0,51032 0,0002	-0,20167 0,1693	-0,44612 0,0015
<i>IS</i>	0,86620 0,0001	0,63101 0,0001	0,60201 0,0001	1,00000 0,0000	0,78577 0,0001	0,07330 0,6205	-0,31333 0,0301
<i>IH</i>	0,73992 0,0001	0,64679 0,0001	0,51032 0,0002	0,78577 0,0001	1,00000 0,0000	0,13901 0,3461	-0,35295 0,0139
<i>Hc</i>	-0,03725 0,8015	-0,01330 0,9285	-0,20167 0,1693	0,07330 0,6205	0,13901 0,3461	1,00000 0,0000	0,30995 0,0320
<i>Dr</i>	-0,50537 0,0002	-0,41360 0,0035	-0,44612 0,0015	-0,31333 0,0301	-0,35295 0,0139	0,30995 0,0320	1,00000 0,0000

1ère ligne : coefficient de corrélation

2ème ligne : test de STUDENT sur le coefficient de corrélation.

La lame infiltrée pour l'ensemble du protocole sur une parcelle est bien corrélée à la conductivité hydraulique à saturation (K) à l'intensité limite de la pluie donnant lieu à ruissellement II , aux pluies d'imbibition sur sol sec (IS) et humide (III) et encore significativement à la détention superficielle récupérable (DR).

La recherche d'un modèle de régression entre la lame infiltrée et les autres variables hydrologiques montre que trois variables sont nécessaires IS , K , DR . (coefficient de détermination $R^2 = 0,936$ pour 48 valeurs).

Les coefficients de corrélation entre ces variables prises deux à deux sont assez faibles pour conduire à l'hypothèse de leur indépendance (tableau n°20).

Sur la figure n° 34 sont reportées les valeurs de $L1$ observées en fonction de celles calculées par la relation suivante.

$$L1 = 2.6 K + 5.5 IS - 18.3 DR, + 33,8 (R^2 0,936 \text{ pour } 48 \text{ observations}).$$

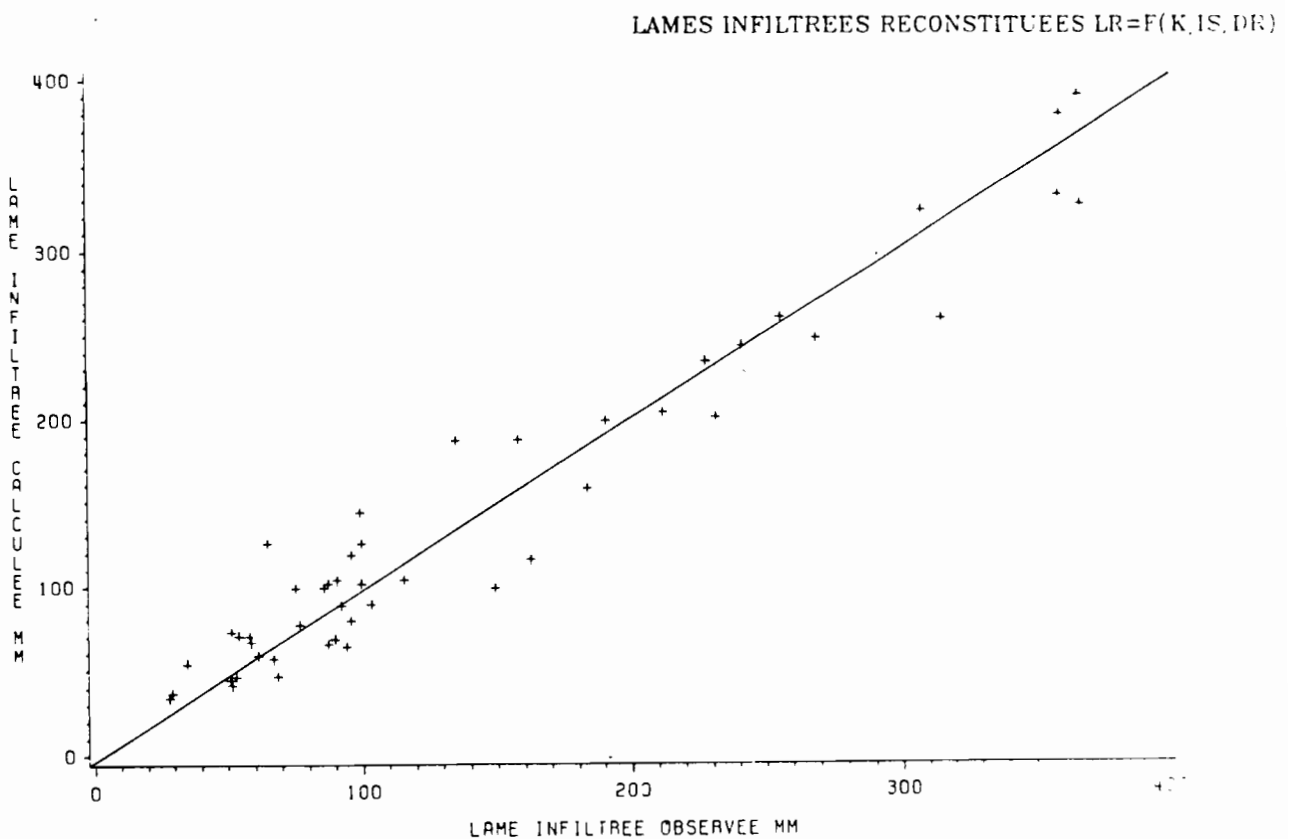


Fig-34-

La pluie totale du protocole sur chaque parcelle est de 380 mm.

Il est possible d'interpréter cette relation statistique : la lame infiltrée lorsque le sol est saturé dépend de K ; IS est liée à la quantité d'eau qu'il faut apporter au sol avant qu'il soit porté à l'état de saturation, Dr est une grandeur surtout liée à la surface du sol, relief, rugosité.

3.1.2.3 Etudes des corrélations entre les variables physiographiques.

Le calcul d'une matrice des coefficients de corrélation rend manifeste quelques liaisons très fortes entre certaines variables et des tendances plus générales, bien que l'interprétation des valeurs reste peu fiable vu les répartitions multi-modales de la majorité des variables.

Le pourcentage de couverture végétale ($R3$) et l'activité biologique sont très liés ($R = 0,74$ pour 48 observations). Cette relation est encore plus forte si on considère un seuil de 40% pour la végétation ($R = 0,96$ pour 10 observations).

Il est intéressant de noter également une forte corrélation négative de $R3$ avec la variable représentant l'érosion.

Les coefficients de corrélation sont tous négatifs entre $R3$ et les variables caractérisant les organisations pelliculaires de surface.

Les critères choisis pour décrire le profil pédologique sont liés entre eux. Les variables $S21$ (profondeur d'apparition d'un horizon à faible drainage) et $S25$ (classes de drainage) peuvent décrire assez bien les autres paramètres. L'hydromorphie de surface est fortement corrélée à celle des premiers horizons du sol (à 20 cm).

3.1.2.4. Résultats de l'AFC.

Les quatre premiers axes expliquent 50% de l'inertie totale du nuage des données (tableau n°21).

Le premier axe oppose les classes de forte infiltration, d'occupation des sols à végétation naturelle, d'absence de pellicule ou d'existence de pellicule fine, à celles d'infiltration la plus faible, d'absence d'activité mésofaunique, d'érosion moyenne et de classe de sols peu drainants.

L'évolution des trois classes d'infiltration le long de ce premier axe nous permet de l'interpréter comme un axe d'infiltration. Le second axe représente surtout les occupations des parcelles et op-

Tableau n° 21 AFC : valeurs propres (valeur triviale : 1000)

NUM	VAL. PROPRE	POURCENT	CUMUL	*	COURBE REPRESENTATIVE
1	0,52041387	18,214	18,214	*
2	0,39459197	13,811	32,025	*
3	0,26829501	9,390	41,416	*
4	0,24241690	8,485	49,900	*
5	0,21790522	,627	57,527	*
6	0,19743746	6,910	64,437	*

pose nettement les sols cultivés aux autres. Les axes suivants moins bien caractérisés peuvent cependant être interprétés de la façon suivante :

Axe 3 : axe des pellicules

Axe 4 : axe des sols.

La figure 35 présente la projection de l'ensemble des variables sur le plan défini par les axes 1 et 2. L'axe d'infiltration sépare 3 groupes, tandis qu'un quatrième est mis en évidence par l'axe 2.

Notons la position relative des classes d'occupation du sol par rapport à l'infiltration ; dans l'ordre croissant nous trouvons les cailloux AV5, le sol nu AV1 ; le traitement standard AV6 ; la culture AV3, les brûlis AV4, la végétation naturelle AV2. Par leur position proche sur l'axe 1 on peut envisager de réduire ce nombre de classe en confondant "recouvrement cailloux" et "sol nu" ; "traitement standard" et "sol cultivé", "brûlis" et "végétation".

Remarquons que la classe d'organisations pelliculaires de surface la plus proche des faibles valeurs de l'infiltration AI1 est celle des pellicules argilo limoneuses à forte porosité vésiculaire AP5. L'absence de pellicules AP1 et les pellicules fines et peu individualisées AP2 se rapprochent des fortes valeurs d'infiltration AI3. La présence d'activité de la mésofaune varie dans le même sens que l'infiltration. Les classes de drainages des sols AS1 et AS6 sont moins bien représentées sur l'axe 1.

Le quatrième groupe mis en évidence par l'axe 2 est remarquable : caractérisé par la variable "sol cultivé" il intègre deux variables qui devraient être très favorables à l'infiltration : fort microrelief AM3 et classe de sol AS1 (drainage interne et externe libre sur tous les horizons). Ce groupe se situe pour des valeurs moyennes de l'infiltration. La classe AP4 des pellicules sableuses qui se superpose à la classe des sols cultivés AV3 peut être interprétée comme la résultante du travail du sol et devient le facteur limitatif de l'infiltration.

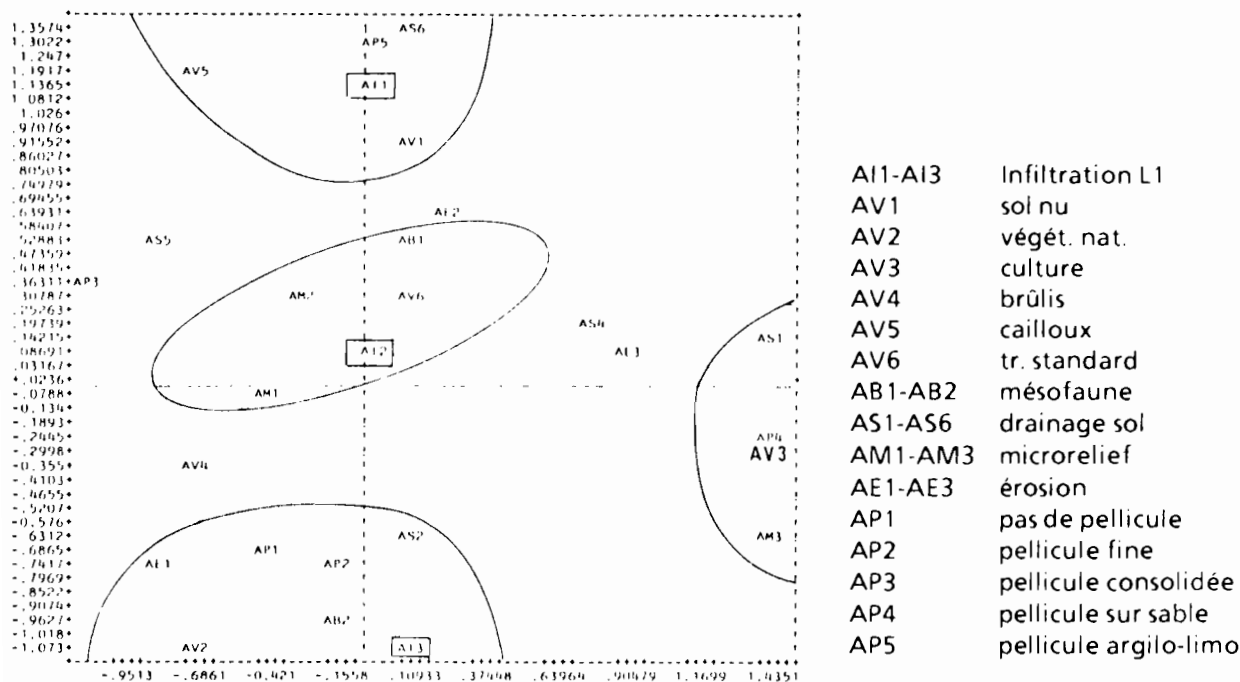


Figure 35 AFC : représentation des variables dans le plan des axes 1 (vertical) et 2 (horizontal)
 Les sols les plus favorables à l'infiltration sont ceux qui sont cultivés mais cette qualité est contrecarrée par la formation de pellicule.

La genèse et l'impact de pellicules sur de tels sols ont été décrits par VALENTIN et RUIZ FIGUEROA (1985) et VALENTIN (1986).

3.1.2.5. Résultats de l'ACP.

Dans une première étape on a utilisé l'ACP sur l'ensemble des variables hiérarchisées et l'ensemble des observations pour confirmer l'analyse des correspondances et affiner le regroupement des variables.

L'ensemble des quatre premiers axes représentent 57% de l'inertie totale du nuage de points (tableau n° 22)

L'étude des contributions relatives de chaque variable à l'inertie totale le long des axes qu'elles définissent permet de bien caractériser les quatre premiers axes.

- Axe 1 infiltration
- Axe 2 sol et érosion
- Axe 3 organisations pelliculaires de surface
- Axe 4 microrelief et pression capillaire.

La figure 36 montre la projection de toutes les variables sur le plan défini par les axes 1 et 2.

Tableau n° 22 ACP. Valeurs propres avec 30 variables.

NUM	VAL. PROPRE	POURCE NT	CUMUL	*	COURBE REPRESENTATIVE
1	8,00032	26,668	26,668	*	*****
2	4,10736	13,691	40,359	*	*****
3	2,86264	9,542	49,901	*	*****
4	2,0481	6,827	56,728	*	*****
5	1,9543	6,514	63,242	*	*****
6	1,55895	5,196	68,439	*	*****
7	1,40001	4,667	73,106	*	*****
8	0,21641	4,055	77,160	*	*****

Le premier axe sépare nettement les variables qui favorisent l'infiltration de celles qui s'y opposent. Les variables d'infiltration, *L1*, *II*, *K*, *IS* et *III* se regroupent à une extrémité de cet axe. Dans ce même groupe se retrouvent les variables : pourcentage de couverture végétale (R3), activité de la mésofaune (010), et degré d'ouverture dû à celle-ci (011).

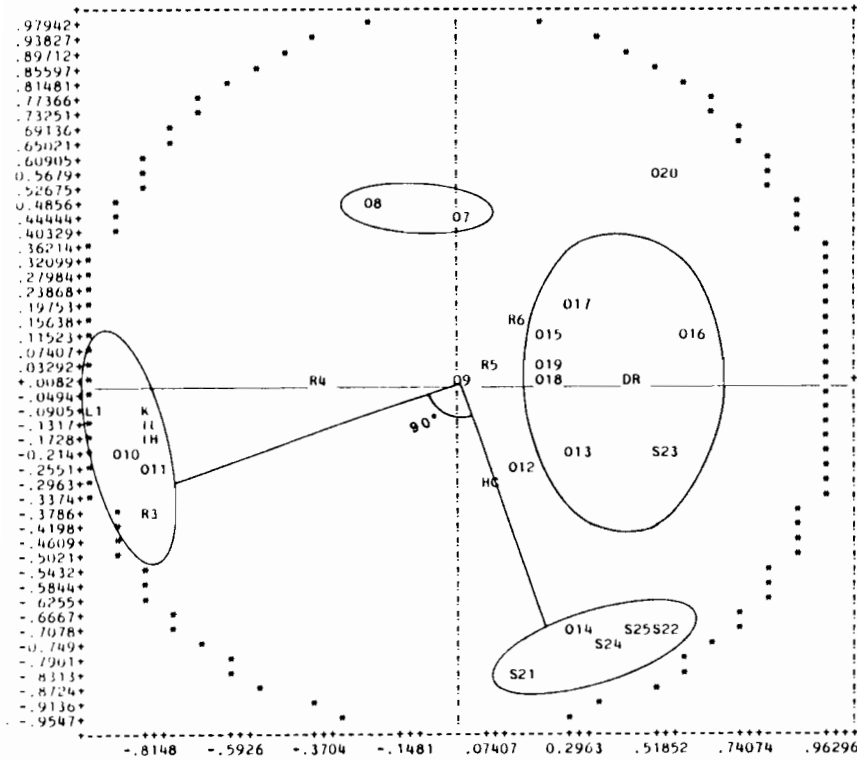
A l'autre extrémité apparaissent le degré de porosité vésiculaire des organisations de surface (016) sur l'axe même, et différencié par le second axe les variables érosion (020), porosité de l'horizon 20 cm (S23) et texture (S32).

Deux ensembles de variables sont séparés par l'axe 2 :

Le premier regroupe les caractères du profil pédologique (S21, S22, S24, S25) et l'hydromorphie de surface (014). Les deux variables du microrelief (07 et 08) et celle de l'érosion (020) appartiennent au second groupe.

L'angle droit qui sépare les groupes de variables "infiltration" et "sol" sur ce plan, montre l'indépendance entre ces deux sous ensembles.

Sur le plan 2.3 les descriptions des organisations superficielles (015 à 019) sont indépendantes de celle du profil pédologique (S21 à S25). Ce résultat confirme l'étude de VALENTIN (1985) montrant par la cartographie que dans la région climatique aride et semi-aride les organisations superficielles sont indépendantes des organisations profondes du sol.



L1	lame infiltrée
R	conductivité sat.
IL	Int. limite
HC	capill.
IS	imbib. sec
IH	imbib. hum.
DR	det. sup. récupérable
R3	% végétation
R4	% litière
R5	% gravil. libres
R6	epais. sable éolien
07	hauteur microrelief
08	obstruction relief
09	micro-organismes
010	mésafaune active
011	ouverture due à 010
012	% gravil. enchassés
013	fente
014	hydromorphie surf.
015	prise en mas. sables
016	porosité vésiculaire
017	continuité pellic.
018	épaisseur pellic.
019	nb couches indurées
020	érosion
S32	prof. faible drainage
S22	texture 0.20 cm
S23	porosité 0.20 cm
S24	hydromorphie 0,20 cm
S25	classe de drainage

Fig. 36. ACP avec 30 variables actives représentation des variables dans le plan des axes 1 (horizontal) et 2 (vertical).

Sur l'axe des sols, la profondeur d'apparition d'un horizon à faible drainage (S21) a la contribution la plus forte.

Certaines variables sont mal représentées dans l'espace défini par les quatre premiers axes. D'autres se regroupent en regard de leur contribution à ces axes (groupes homogènes dans un espace à quatre dimensions).

Ces deux remarques nous ont amenés à réduire le tableau d'entrée pour ne conserver que des variables bien représentées sur l'un des quatre premiers axes et peu reliées entre elles.

Dix variables ont moins de 50% de leur inertie sur les quatre premiers axes de l'ACP ; ils s'agit de R4, R5, R6, 09, 012, 013, 015, S23, Dr et Hc.

Les groupes de variables homogènes dans l'espace à quatre dimensions sont :

- La lame infiltrée *L1*, intensité limite *II*, conductivité hydraulique à saturation *K* ; lame d'imbibition sur sol sec *IS* et sur sol humide *IH*, pourcentage de végétation *R3*, les variables caractérisant l'activité de la mésofaune *010* et le degré d'ouverture *011*. Nous ne conservons que *R3* et *010* pour prévoir un ordre de grandeur de l'infiltration par une caractéristique de la parcelle.
- Les variables de microrelief, importance *07* et obstruction *08*. Nous éliminons *08* qui a une contribution moins forte à l'inertie de l'axe d'infiltration.
- Certaines caractéristiques de pellicules, *017*, *018* et *019* qui ont des contributions équivalentes sur l'axe d'infiltration. Nous conservons *018* épaisseur de la pellicule, grandeur plus facilement mesurable.
- Les caractéristiques d'hydromorphie et de sol, *014*, *S21*, *S23*, *S24*, *S25*. Nous conservons *S21* profondeur d'apparition d'un horizon à faible drainage qui a la plus forte contribution sur l'axe des sols et *S25* classe de drainage dont la valeur est donnée par la classification de BOULET (elle a une contribution voisine de celle de *S22* (texture) sur l'axe d'infiltration).
- La porosité vésiculaire *016* se détache des autres caractéristiques des organisations pelliculaires et a une contribution plus importante à l'inertie de l'axe d'infiltration.
- La caractéristique d'érosion *020* reste isolée et a une assez forte contribution sur les axes 1 et 2.

En résumé, il suffit de conserver 8 variables pour définir une parcelle sur les quatre axes principaux de cette ACP.

- * *R3* pourcentage de la surface couverte par la végétation
- * *07* mesure moyenne de microrelief
- * *010* estimation de l'activité de la mésofaune
- * *016* porosité vésiculaire de la pellicule de surface
- * *018* épaisseur de la pellicule de surface
- * *020* érosion
- * *S21* profondeur d'un horizon à faible drainage
- * *S25* classe de drainage des sols

Nous avons fait une nouvelle ACP réduite en utilisant ces huit variables et en conservant les autres comme variables supplémentaires (elles ne servent pas à définir les axes mais seront représentées sur les graphes).

Les trois premiers axes définis dans cette nouvelle ACP conservent la même signification physique. Le premier axe qui oppose la couverture végétale (R3) et l'activité de la mésofaune (O10) à la porosité vésiculaire de la pellicule (O16) et à l'érosion (O20) peut être considéré comme l'axe de l'infiltration. L'axe 2 représente surtout les variables sols et le troisième les variables liées aux pellicules.

Si on compare le plan 1.2 de l'ACP réduite où sont représentées les variables actives et les variables supplémentaires au plan 1.2 de la première ACP on confirme que :

- La projection des variables sur l'axe d'infiltration reste à peu près identique.
- Les regroupements de variables sont presque les mêmes.

Le calcul d'une régression entre les variables de l'infiltration et les coordonnées des parcelles sur les différents axes de cette ACP réduite montre que :

- le premier axe est la variable qui explique le mieux l'infiltration
- le second axe améliore encore significativement la corrélation.

$$L1 = -41,8 \text{ AXE1} + 30,3 \text{ AXE2} + 139,7$$

$$R^2 = 0,68 \text{ pour 48 valeurs}$$

$$K = -0,68 \text{ AXE1} + 4,2 \text{ AXE2} + 15,5$$

$$R^2 = 0,51 \text{ pour 48 valeurs}$$

Ces régressions suffisamment significatives montrent qu'il suffit de décrire 8 variables sur une parcelle pour avoir une bonne appréciation de sa perméabilité avec une priorité à celles qui contribuent le plus à l'inertie des 2 premiers axes donc dans l'ordre

- * R3 pourcentage de surface couverte par la végétation
- * O10 estimation de l'activité de la mésofaune
- * O16 porosité vésiculaire de la pellicule
- * O20 érosion
- * S25 classe de drainage des sols
- * O7 microrelief
- * O18 épaisseur de la pellicule de surface

* S21 profondeur d'un horizon à faible drainage

En comparant les résultats de l'ACP et de l'AFC, on remarque la nette prépondérance de la couverture végétale et de la mésofaune sur les phénomènes d'infiltration. Ces variables sont assez liées au type d'occupation du sol. Sur le premier plan de l'AFC, nous avons proposé un regroupement dans les types d'occupations du sol :

- * sol nu et cailloux
- * culture et traitement standard
- * végétation naturelle et brûlis

En calculant une ACP pour chaque type d'occupation des sols il est intéressant d'étudier l'évolution dans la hiérarchie des variables vis à vis de l'infiltration.

- ACP sur les observations "sol nu et cailloux" 17 observations Fig. 37.

Les variables d'infiltration contribuent modestement aux inerties des quatre premiers axes et n'en définissent aucun en particulier. Pour cet ensemble d'observations les composantes qui en font la diversité sont celles qui décrivent le profil pédologique (axe 1) sans pour autant induire une diversité parallèle dans l'infiltration.

Sur le plan de projection des axes 1 et 2, les variables de l'infiltration forment un groupe qui contient R3 (pourcentage de couvert végétal) ne variant pourtant que de 0 à 15% et qui s'oppose aux caractéristiques de pellicules 016, 017 et 019 (porosité vésiculaire, continuité, et polygénisme). La perméabilité de ces parcelles, toujours faible, est surtout liée à la nature des organisations pelliculaires.

- ACP sur les observations "culture et traitement standard" 13 observations Fig. 38.

Toutes ces parcelles sont caractérisées par un microrelief fort, des sols généralement drainant et relativement profonds ; le travail du sol y a développé des pellicules assez épaisses plutôt du type sableux.

La lame infiltrée varie pourtant dans une plage importante. Les deux premiers axes de l'ACP sont très influencés par les variables d'infiltration. Il est remarquable d'observer la conductivité hydraulique à saturation K et l'intensité limite II en opposition sur l'axe 1 aux variables sol (profondeur d'un horizon à faible drainage S21 et texture S22) tandis que les pluies d'imbibition IS et IH s'opposent sur l'axe 2 aux organisations pelliculaires de surface. La variable lame infiltrée LI se trouve entre ces deux groupes. Proche de IS et de IH on retrouve le microrelief (07 et 08) et proche de K et IL, la litière R4 importante sur les sols cultivés. Sur cet ensemble d'observations, on

peut conclure que la lame infiltrée totale est la résultante de deux grandeurs : pluie d'imbibition et conductivité hydraulique. La première est croissante en fonction du microrelief et décroissante en fonction des organisations pelliculaires. La seconde est surtout liée à l'importance de la litière et de la nature du sol sous-jacent.

- ACP sur les observations "végétation naturelle", 18 observations, fig. 39.

Sur l'ensemble de ces parcelles, les organisations pelliculaires sont rarement une limite à l'infiltration, lorsqu'elles existent elles se situent entre les touffes de graminées mais très souvent "percées" par la mésofaune. Ce résultat se retrouve dans l'ACP où le premier axe est celui des variables de l'infiltration et le second celui des caractéristiques des organisations pelliculaires. A l'une des extrémités de l'axe 1 se retrouvent les variables de l'infiltration (*L1, II, K, IS, III*) celles de l'activité mésofaunique (010 et 011) et le pourcentage de couverture végétale R3.

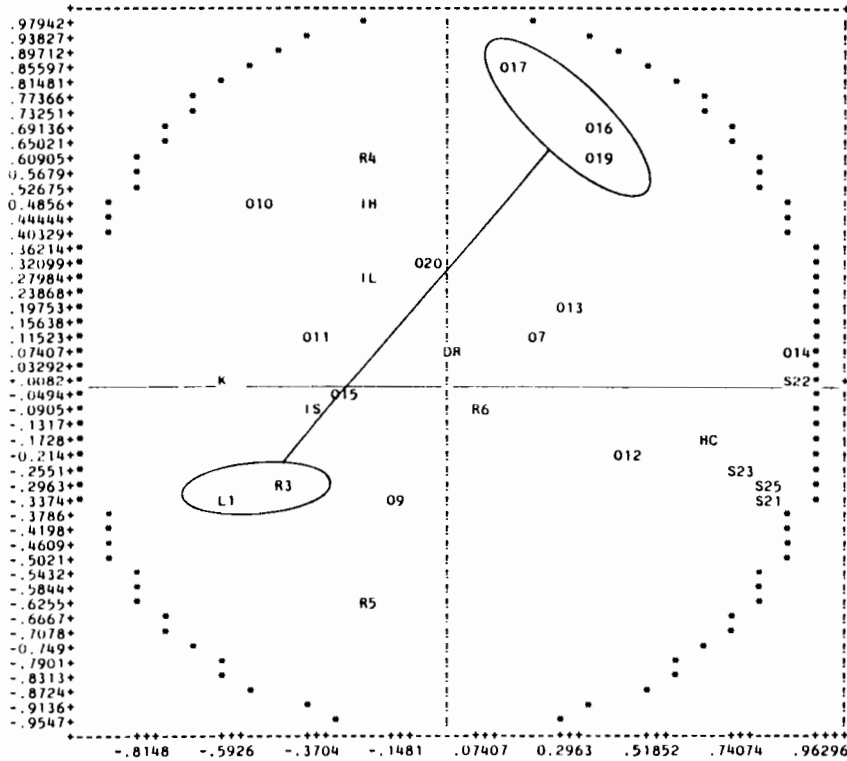


Fig. 37 ACP des 17 observations "sol nu et cailloux" : représentation des variables dans le plan des axes 1 (horizontal) et 2 (vertical).

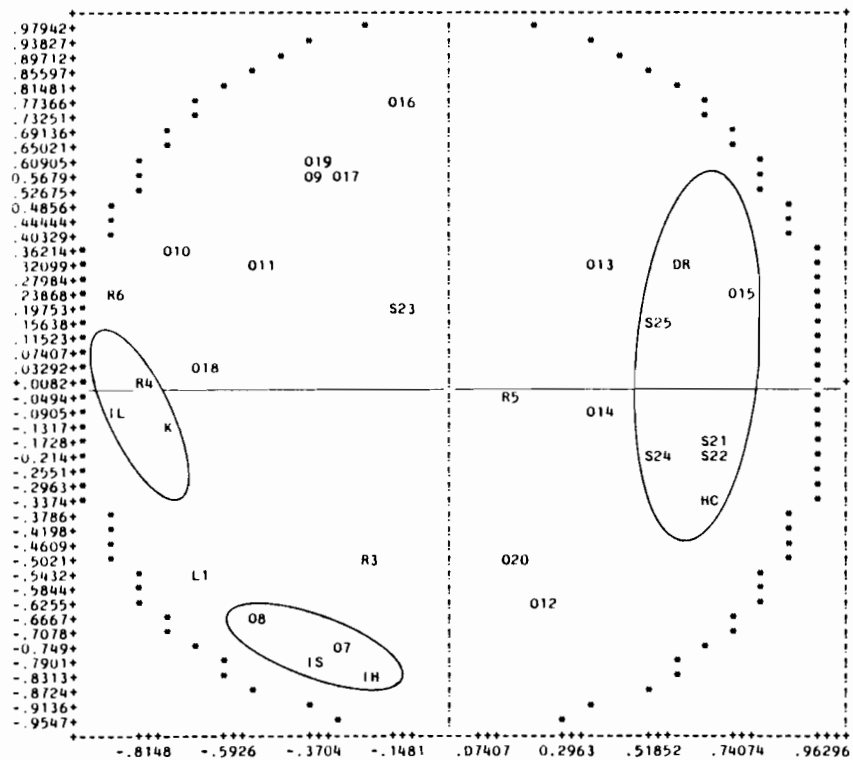
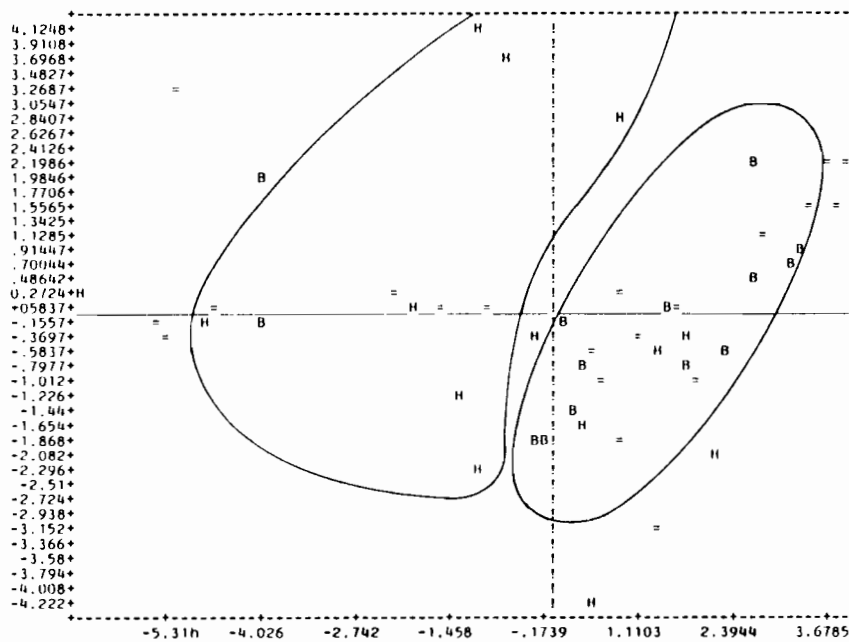


Fig. 38 ACP des 13 observations "culture et traitement standard" représentation des variables dans le plan des axes 1 (horizontal) et 2 (vertical).

- Sur le plan axe 1/axe 3 (infiltration/pellicules), les parcelles se positionnent en fonction d'une variable qui n'avait pas été considérée dans les descriptions : la position de la parcelle sur le versant (fig. 40). Les parcelles de bas fond se regroupent dans un quart de plan pour des valeurs plutôt faibles de l'infiltration tandis que celle de sommet de formes décrivent un croissant dans les trois quarts de plan restant. C'est pour elles que l'infiltration semble plus forte. Les parcelles de mi-pente ne sont pas séparées par l'axe de l'infiltration et couvrent toute la gamme des perméabilités.

La relation entre perméabilité et position sur le versant est ici moins nette que celle observée en forêt tropicale (CASENAVE et al, 1982).

Fig. 40. ACP représentation de 48 observations identifiées par leur position sur le versant dans le plan des axes 1 (horizontal) et 3 (vertical).



H : hauteur
 = : mi-pente
 B : bas fond.

3.1.2.6. Conclusions.

A partir d'une description simple de la parcelle et des paramètres hydrologiques directement mesurés au mini simulateur ou obtenus par optimisation sur ces mesures il a été possible de mener une réflexion sur les facteurs explicatifs de l'infiltration au BURKINA FASO. Cette étude après vérification devrait s'étendre à l'ensemble de la zone semi aride au sud du SAHARA.

Elle a mis en évidence l'importance des états de surfaces dans les phénomènes d'infiltration : couvert végétal, activité de la mésofaune, organisation pelliculaire de surface.

Les principaux résultats que nous retiendrons pour la suite de ce travail sont :

- Sur les parcelles avec végétation naturelle, le pourcentage de couverture végétale à laquelle est liée l'activité de la mésofaune, est la donnée prédominante expliquant l'infiltration.
- Sur les sols nus, les variations observées de l'infiltration peuvent s'expliquer par la nature des organisations pelliculaires de surface et par la couverture gravillonnaire. Mais les valeurs de l'infiltration restent faibles pour ce type d'occupation du sol. Les analyses mettent surtout en évidence la diversité des sols pour séparer les parcelles.
- Sur les sols cultivés, la lame infiltrée est la résultante de deux variables dont les poids sont équivalents : la pluie d'imbibition et le coefficient d'infiltration à saturation. Les variations de la première sont liées au microrelief et aux organisations pelliculaires tandis que la seconde s'explique surtout par l'abondance de la litière favorable au développement de la mésofaune et par la profondeur d'apparition d'un horizon à faible drainage. Notons que sur l'ensemble de notre champ expérimental, les techniques culturales utilisées sont très voisines (travail traditionnel du sol). Cela explique le bon regroupement des parcelles caractérisées par ce type d'occupation.

Sur l'ensemble des parcelles cinq paramètres principaux sont donc à prendre en compte pour caractériser l'infiltration : pourcentage de la surface couverte par la végétation, mesure moyenne du microrelief, estimation de l'activité biologique, porosité vésiculaire dans les organisations pelliculaires de surface, épaisseur de la pellicule. Trois autres variables moins liées à l'infiltration doivent être ajoutées pour expliquer la diversité de notre échantillon : érosion, profondeur d'un horizon à faible drainage et classe de drainage des sols.

Ces résultats vont être à la base d'une cartographie à l'échelle du bassin pour différencier les milieux selon leur aptitude au ruissellement, cartographie que nous développons dans le quatrième chapitre.

3.1.3. Le modèle "pluie - lame ruisselée" sur la parcelle.

3.1.3.1. La relation "pluie, lame ruisselée, indice des précipitations antérieures".

Pour une parcelle donnée, chaque averse permet de déterminer la relation entre la lame ruisselée et la hauteur de la pluie. La courbe qui exprime cette relation peut être assimilée à une droite sans écart excessif (fig. 41) ; la partie incurvée caractérisant le déficit de saturation du sol en début de pluie est toujours très brève. Cette relation correspond à un état d'humectation du sol donné, caractérisé par la valeur de l'indice IK (indice des précipitations antérieures) au début de la pluie.

Pour obtenir un échantillon de pluies de hauteurs différentes mais caractérisées par le même IK on découpe chaque pluie du protocole en intervalles de temps de 5 minutes, et on considère les valeurs des hauteurs précipitées entre le début de la pluie et la borne supérieure de chacun des intervalles successifs comme des averses indépendantes mais de même IK .

Le report de l'ensemble des droites "lames ruisselées - hauteurs de pluies" correspondant à la série des pluies sur une même parcelle ; permet de constater que la pente de ces droites varie en même temps que IK (fig. 42). Pour chaque parcelle il existe une relation linéaire entre la lame ruisselée et l'indice IK , cette relation mise en évidence graphiquement a été vérifiée par le calcul de 5 coefficients de corrélation pour 5 hauteurs de pluies sur le lot des 48 parcelles.

$$Lr = \alpha IK + \beta \quad (1)$$

Les coefficients α et β de cette équation varient de façon linéaire avec la hauteur de la pluie. Très fréquemment, les points représentatifs de ces liaisons s'alignent sur deux tronçons de droites (fig. 43a, b). Ces changements de pentes dans les relations $\alpha(P)$ ou $\beta(P)$ correspondent à des seuils pluviométriques.

Si on introduit dans l'équation (1) les valeurs $\alpha(P)$ et $\beta(P)$ l'équation exprimant les liaisons entre Lr , P et IK devient :

$$Lr = aP + bIK + cIKP + d$$

où a , b , d sont des paramètres sans dimension et c a pour dimension L^{-1}

Lr	=	lame ruisselée	mm
IK	=	indice des pluies antérieures	mm
P	=	hauteur de pluie	mm

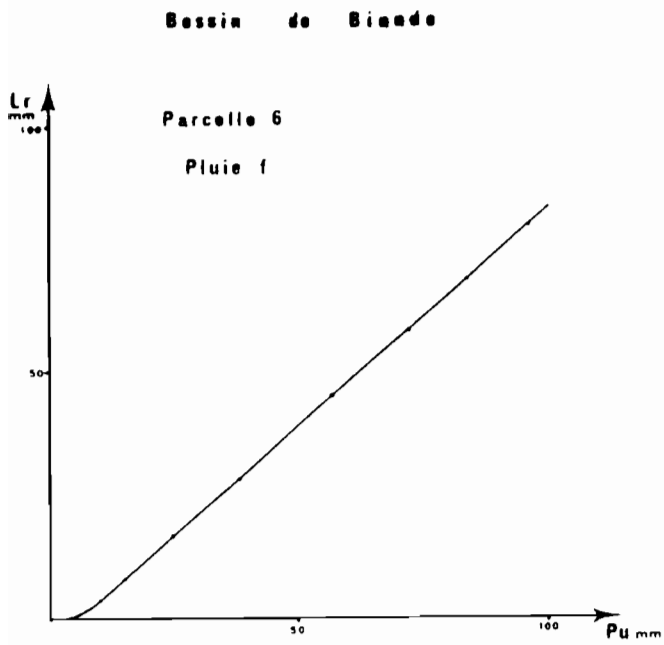


Figure 41.
Lame ruisselée en fonction de la pluie pour un IK donné.

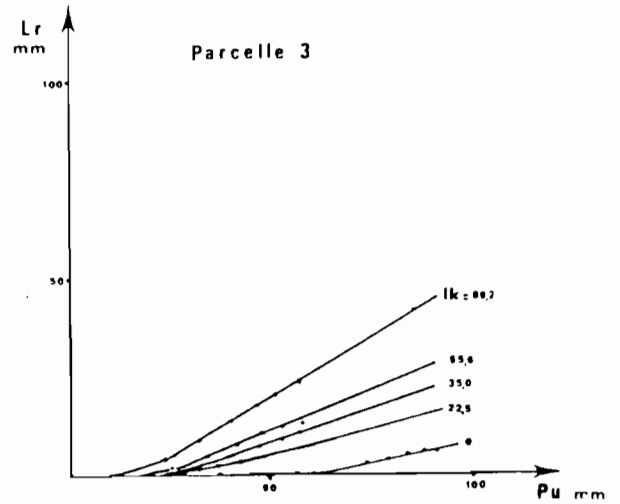


Figure 42.
Lame ruisselée en fonction de la pluie et de IK .

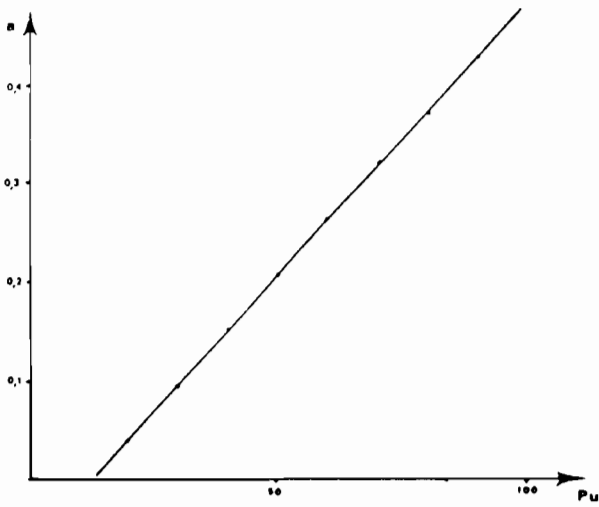


Figure 43a.
 a = fonction de P .

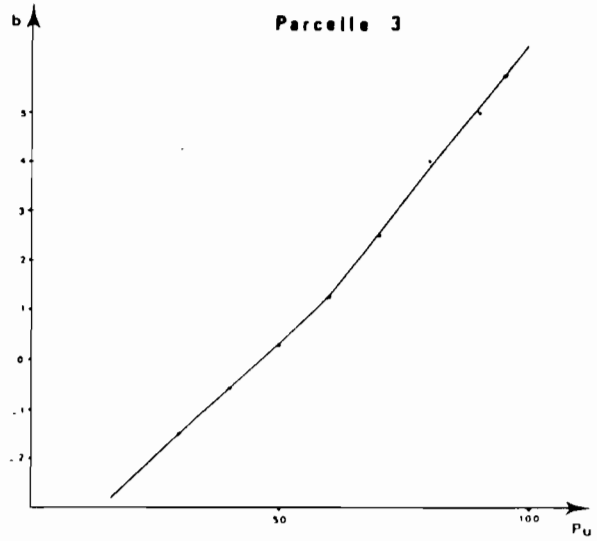


Figure 43b.
 b = fonction de P .

Exemple Bassin de BINNDE

Parcelle 1 site 1 sol nu

$$Lr = 0,654 P + 0,032 IK + 0,002 P.IK - 5,9$$

Parcelle 2 site 1 végétation naturelle

$$Lr = 0,276 P - 0,01 IK + 0,002 P.IK - 5,4$$

Parcelle 3 site 2 végétation naturelle

$$P \leq 60 \text{ mm } Lr = 0,07 P - 0,07 IK + 0,006 P.IK - 2,8$$

$$P > 60 \text{ mm } Lr = 0,13 P + 0,07 IK + 0,006 P.IK - 6,4$$

Parcelle 4 site 2 sol nu

$$P \leq 40 \text{ mm } Lr = 0,85 P + 0,04 IK + 0,002 P.IK - 11,2$$

$$P > 40 \text{ mm } Lr = 0,85 P + 0,09 IK + 0,001 P.IK - 11,2$$

Parcelle 5 site 2 sol cultivé

$$P \leq 40 \text{ mm } Lr = 0,16 P - 0,06 IK + 0,004 P.IK - 2,9$$

$$P > 40 \text{ mm } Lr = 0,63 P + 0,07 IK + 0,001 P.IK - 21,9$$

Ainsi pour chaque parcelle testée un couple d'équations comparable a été établie.

3.1.3.2 Validité de la relation entre lame ruisselée, pluie et indice des précipitations antérieures.

Une telle relation, si elle est simple à établir a un caractère très empirique et nécessite d'être validée sur l'ensemble des observations réalisées.

Dans un premier temps nous avons cherché de façon statistique la meilleure expression de la lame ruisselée en fonction de la pluie globale et de cet indice. Nous avons étudié la régression multiple entre Lr et $(P^2, P, P.IK, P IK^2, P^2.IK, IK^2.P)$

Les prédicteurs relativement indépendants qui donnent le maximum de variance expliquée sont systématiquement $P, P.IK, IK$. Pour les parcelles les plus imperméables IK et parfois $P.IK$ ont un niveau de signification très faible et sont alors supprimés dans la relation.

Exemples :

Bassin de GAGARA parcelle 1 sol nu à pellicules

$$I,r = 0,96 P - 2,6$$

Bassin de GAGARA parcelle 7 sur glacis sahélien.

$$I,r = 0,90 P + 0,01 P.IK - 6,6$$

A l'échelle du bassin versant nous retrouvons chez deux auteurs la même forme de relation en vue de prédéterminer la lame ruisselée à partir de la pluie journalière sur petits bassins versants. SEGUIS, 1986 trouve que c'est la meilleure forme de régression pour l'ensemble des petits bassins du SAHEL. et BADER, 1986 la trouve également satisfaisante sous des latitudes plus basses (Lac ELIA au TOGO).

Que la pluie et un indice représentant la réserve en eau du sol avant la pluie soient de bons prédicteurs de la lame ruisselée, le bon sens le conçoit ; l'introduction du terme $P.IK$ est plus difficilement interprétable : il oblige à attribuer une dimension au coefficient de régression qui lui est associé (mm^{-1}). L'indice IK caractérise l'état du sol avant la pluie ; au cours de l'averse, le sol se sature et le coefficient de ruissellement augmente. Le terme $P.IK$ rend compte d'une influence de IK d'autant plus petite que la hauteur de pluie est grande.

Sur 5 parcelles du bassin de BINNDE le protocole de pluie simulée a réellement comporté 7 pluies. En établissant les relations sur les 5 premières pluies nous avons cherché à connaître la qualité de la reconstitution sur des données n'ayant pas servi au calage. Les lames ruisselées sont reconstituées avec une précision acceptable (Tableau n°23).

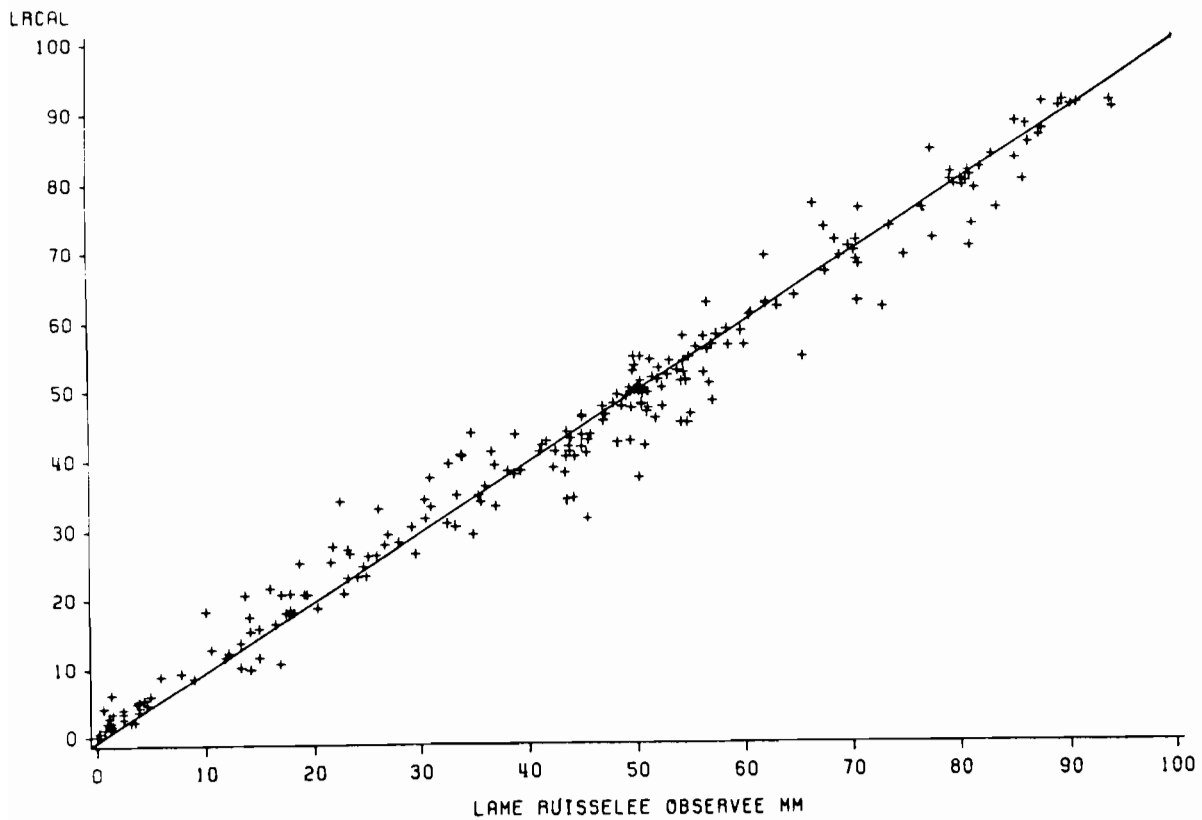
Pour vérifier la validité des équations déterminées pour toutes les parcelles, nous avons reconstitué l'ensemble des lames ruisselées relatives à la hauteur totale de chaque pluie simulée. La dispersion des points autour de la première bissectrice sur la figure n°44, où sont reportées les lames ruisselées calculées en fonction des lames ruisselées observées, donne une idée de la précision de ces reconstitutions. Cette dispersion est due à la fois aux approximations faites dans le modèle (non prise en considération du début de la courbe de ruissellement) et à l'imperfection des mesures. En annexe 1 sont consignés l'ensemble des pluies simulées les lames ruisselées observées et les lames ruisselées calculées.

Tableau n° 23 Reconstitution de lames ruisselées sur 5 parcelles pour deux pluies non utilisées dans l'établissement de la relation L_r, P, IK .

Parcelle	Pluie	IK mm	Lame ruisselée calculée mm	Lame ruisselée observée mm
1	60,0	34,8	38,1	38,8
	93,3	0	58,7	64,9
2	60,0	36,5	15,1	14,2
	94,1	0	20,8	19,5
3	60,0	44,3	11,6	11,9
	96,0	0	5,9	4,9
4	60,0	42,5	40,6	34,9
	95,6	0	69,9	70,4
5	61,2	44,5	20,7	13,8
	95,1	0	38,9	39,4

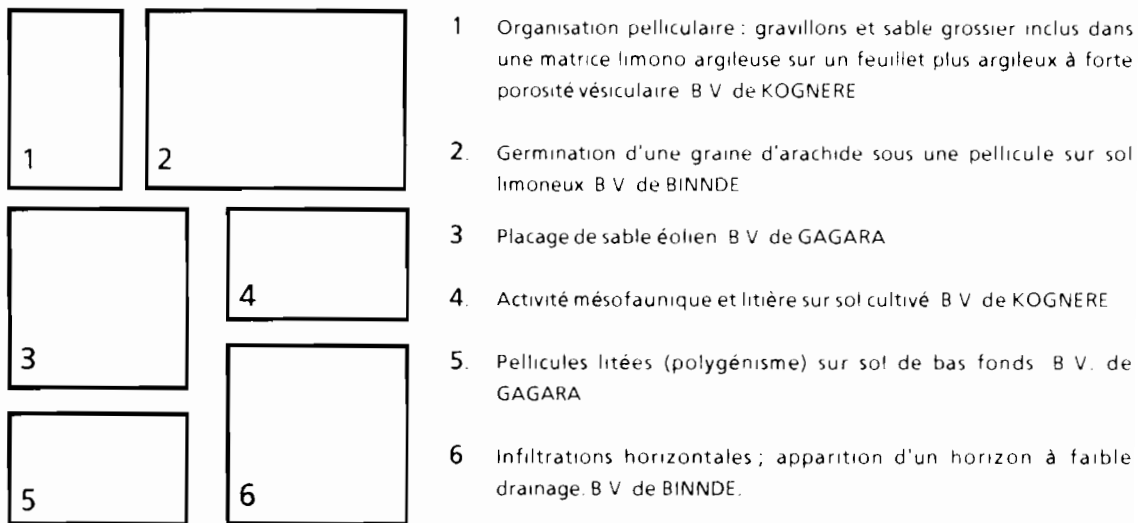
Fig-44-

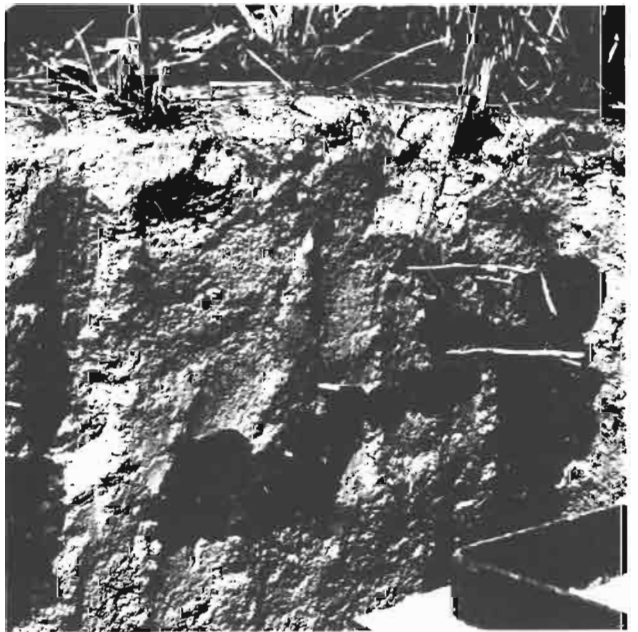
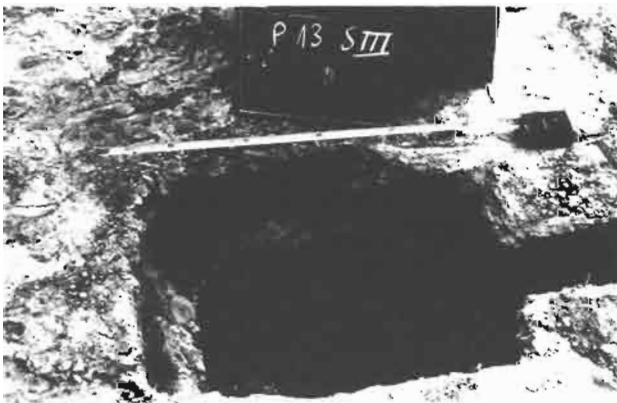
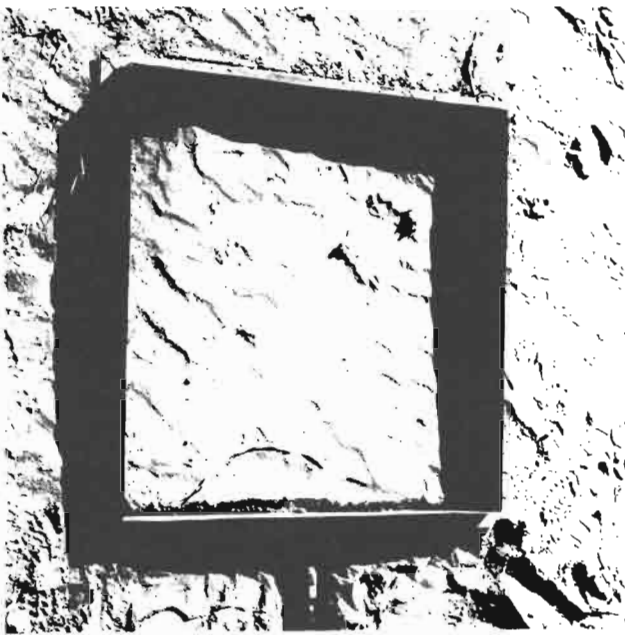
LAMES RUISSELEES RECONSTITUEES SUR PARCELLES



$$\text{MODELE LR} = A \cdot P + B \cdot IK + C \cdot P \cdot IK + D$$

PLANCHE 4
FACTEURS EXPLICATIFS DE L'INFILTRATION





Cette relation en principe simple est facilement transposable à une chronique de pluies naturelles. Elle nous servira de fonction de production d'une aire plus grande dont on aura assimilé les caractéristiques superficielles à celles de la parcelle sur laquelle elle a été calculée. L'hypothèse implicite sera alors : les pluies naturelles ont en moyenne les mêmes caractéristiques d'intensité-durée que la tranche de même durée sur une pluie simulée.

3.2. Etude du ruissellement à l'échelle des bassins.

Sur chaque bassin les expérimentations de pluie simulée sur parcelle ont été accompagnées par des mesures pluie-débit pendant au moins une saison des pluies complète à l'échelle de tout le bassin et de son exutoire. Il n'est pas question ici de reprendre l'étude hydrologique de chaque bassin dont toutes les étapes sont consignées dans les rapports de campagnes déjà cités. L'analyse synthétique du ruissellement et de l'écoulement sur les bassins de la mare d'OURSI, JALAFANKA et POLAKA a déjà été publiée (CHEVALLIER et *al*, 1985) ainsi que sur le KUO (LAMACHERE, 1984). Pour les 5 bassins restants : BINNDE, KAZANGA, KOGNERE, GAGARA OUEST et GAGARA EST, nous tâcherons de tirer les grands traits des saisons des pluies que nous avons observées en les comparant à celles étudiées dans les années 60. Nous essayerons pour finir de rechercher sur chaque bassin une fonction de production lame précipitée - lame ruisselée, à l'échelle journalière de forme semblable à celle qu'on a adoptée sur parcelle.

$$Lr = aP + bIK + cP.IK + d$$

Lr = lame ruisselée

P = hauteur de pluie journalière

IK = indice des précipitations antécédentes.

3.2.1. Bassin versant de BINNDE. (9,7 km²).

Le schéma général d'écoulement reste semblable à celui décrit pour les années 1963-1965 (KLEIN, 1967b) : des écoulements sporadiques de quelques heures à trois ou quatre jours répondent aux premières pluies. En 1982 le premier est observé en février (pluies des mangues) mais le suivant ne l'est que le 13 avril, en 1983 les premiers écoulements ont lieu au mois de juin. L'écoulement permanent s'établit pour les deux saisons au mois de juillet (le 18 en 82, le 6 en 83) et se poursuit jusque dans la deuxième quinzaine d'octobre. Les débits de basses eaux peuvent atteindre des valeurs très faibles même en plein mois d'août (quelques litres/s) sans cependant s'annuler durant ces deux saisons des pluies. Le bilan mensuel et annuel des écoulements est résumé dans le tableau n°24.

Tableau n°24 : Ecoulements mensuels et annuels du bassin de BINNDE.

	Pluie moyenne mm	Vol écoulé 10 ³ m ³	Lame d'eau écoulée mm	coeff. d'écoulement en %	Déficit d'écoulement
Année 1982					
Avril	71.8	110,6	11,4	15,9	60,4
Mai	88.1	89,7	9,2	10,4	79,9
Juin	106.0	61,8	6,4	6,0	99,6
Juillet	105.9	38,4	4,0	3,7	101,9
Août	171.7	78,3	8,1	4,7	163,6
Septembre	108.7	188,4	19,4	17,9	89,3
Octobre	68.3	77,8	8,0	11,7	60,3
Année complète	744.0	645,0	66,5	8,9	677,5
Année 1983					
Avril	12,4	0	0	0	12,4
Mai	50,9	0	0	0	50,9
Juin	106,4	153,2	15,8	14,8	90,6
Juillet	179,9	218,7	22,5	12,5	157,4
Août	204,0	414,7	42,8	20,9	161,2
Septembre	129,8	377,6	38,9	30,0	90,9
Octobre	0	0	0	0	0
Année complète	683,4	1164,2	120,0	17,5	569,4

Ce tableau peut être complété par le calcul du module annuel et du module spécifique que nous pouvons comparer à ceux obtenus dans l'étude ancienne. (tableau n°25).

Tableau n°25 : Modules à la station de BINNDE.

Année	Pluie annuelle moyenne mm	Module annuel m ³ s ⁻¹	Module spécifique l.s ⁻¹ km ⁻²	Lame écoulée mm
1963	740	0,023	2,2	68,1
1964	929	0,058	5,5	173,0
1965	815	0,023	2,2	69,3
1982	744	0,020	2,1	66,5
1983	683	0,037	3,8	120,3

Les écoulements ne suivent pas la pluviométrie que ce soit à l'échelle mensuelle (tableau n°24) ou à l'échelle annuelle (tableau n°25). L'année 1983 se distingue particulièrement en affichant une lame écoulée relativement forte pour la plus faible valeur de pluviométrie annuelle.

En 1983, le début de la saison des pluies très tardif a réduit la croissance de la strate herbacée et des cultures. Cela a eu pour conséquence de forts coefficients de ruissellement jusqu'en juillet. Tandis qu'en 1982 les premières pluies du mois de février et mars ont permis l'installation de la végétation avant l'arrivée du gros de la mousson.

La répartition des pluies montre également un plus fort pourcentage des pluies supérieures à 25 mm en 1983 qu'en 1982.

Pour ce petit bassin versant où l'écoulement est essentiellement constitué par le ruissellement, les débits de base étant très faibles, on voit toute l'importance de la répartition des pluies. Deux facteurs conditionnent, ici, le ruissellement :

- . la présence et le développement de la végétation,
- . l'état d'humectation des sols.

- Descriptions et caractéristiques des crues

L'annexe n° 2 donne le tableau des caractéristiques de l'ensemble des crues observées et une description plus détaillée des plus fortes.

L'examen du tableau des caractéristiques des crues pour les saisons 1982-1983 permet de définir les paramètres de l'hydrogramme type du bassin.

Pour une averse unitaire dont nous fixons la durée à 10 minutes les paramètres de l'hydrogramme type sont :

temps de montée	0h.30
temps de réponse	0h.40
temps de base	3h.40

Cette valeur du temps de base est en pratique la limite inférieure des temps de base de toutes les crues généralisées du bassin.

- Débits de crues.

Le classement des crues selon leur débit de pointe est le suivant :

Tableau n°26 : Débits de pointe.

Débit atteint ou dépassé	Période 1963-1965		Période 1982-1983	
	Nombre de crues	Nbre moyen de crues/an	Nombre de crues	Nbre moyen de crues/an
5 m ³ .s ⁻¹	29	9,7	4	2
10 m ³ .s ⁻¹	13	4,3	3	1,5
20 m ³ .s ⁻¹	5	1,7	3	1,5
30 m ³ .s ⁻¹	1	0,3	0	0

En comparant le classement des crues pour les deux périodes on remarque un net affaiblissement du nombre de crue dans la classe "5 m³.s⁻¹". Bien que l'échantillon soit de taille réduite on peut dire que ce résultat traduit la modification climatique où l'ensemble des pluies supérieures à 40 mm a diminué depuis 1969 sans que la probabilité d'occurrence de très fortes pluies ait changé.

- Coefficient et volume de ruissellement des pluies.

La corrélation entre le coefficient de ruissellement Kr d'une averse et sa hauteur moyenne PM est assez lâche.

L'examen des tableaux des caractéristiques des crues observées montre que les coefficients de ruissellement les plus forts sont obtenus pour des pluies tombant sur des sols ayant été humectés par des pluies précédentes, proches dans le temps, ou pour des averses fortes du début de saison des pluies.

Pour préciser la relation entre la pluie moyenne et le coefficient de ruissellement, nous avons choisi d'introduire deux paramètres :

- l'indice d'humectation des sols IK
- l'état de développement de la végétation naturelle sur le bassin.

La recherche par régression linéaire des prédicteurs de la lame ruisselée permettant d'obtenir le maximum de variance expliqué nous a amené :

- à séparer l'échantillon, pluie - lame ruisselée, en deux classes : les événements de début de saison des pluies où la végétation n'est pas encore en place, et les événements de pleine saison de pluies.

En utilisant la pluviométrie moyenne calculée sur le bassin nous déterminons pour ces deux années une date de mise en place de la végétation, que nous avons vérifiée sur le terrain, et qui correspond aux premiers sarclages des champs.

L'échantillon du début de saison des pluies compte trop peu d'individus pour calculer une régression (15 dont seulement 9 ont une lame ruisselée observée supérieure ou égale à 0,5 mm)

Sur l'échantillon de pleine saison des pluies, la meilleure corrélation sur les observations où la lame ruisselée est supérieure ou égale à 0,5 mm (au dessous de cette valeur il est fort probable que l'ensemble du bassin ne participe pas au ruissellement) s'exprime en fonction de PM pluie moyenne, IK indice des précipitations antérieures et du produit $PM * IK$.

$$Lr = 0,29 PM + 0,31 IK + 0,01 PM.IK - 5,04$$

$$R^2 = 0,719 \text{ pour 22 observations.}$$

Un test de STUDENT sur ces différents coefficients de régression montre que PM est la variable la plus significative mais que toutes ont un niveau d'explication assez fort. L'examen des résidus fait apparaître que les lames ruisselées inférieures à 2 mm sont mal reconstituées par cette régression. Ces faibles lames ruisselées sont souvent le résultat d'un grain isolé et dans ce cas, il est normal que la pluie moyenne soit un mauvais prédicteur.

3.2.2. Bassin versant de KAZANGA.(54,8 km²).

Le poste le plus arrosé du bassin n'a reçu que 752,5 mm en 1983 ; rappelons que pour la région (poste pluviométrique de MANGA) la pluviométrie en année médiane est égale à 910 mm et en année décennale sèche à 780 mm. Notre année d'observation est donc représentative d'une année très sèche.

En début de saison, les écoulements sont brefs et le lit du marigot s'assèche en une dizaine d'heures après le passage de la crue.

La première crue a été observée le 6 mai et l'écoulement permanent ne s'établit qu'au 6 août et ne dure que jusqu'au 10 octobre avec des débits très faibles dans la dernière décade de septembre et en octobre. Après cette date un léger inféroflux apparaît à la faveur des seuils rocheux.

La mise en écoulement généralisé du bassin est assurée dès les premières pluies importantes, et apparaît rapidement après le début de la tornade malgré le soutirage du lit sableux (1 à quelques heures).

- Volumes écoulés - bilan hydrologique.

Le bilan par mois de l'année 1983 figure au tableau n°27.

Tableau n°27 : - Ecoulements mensuels du bassin de KAZANGA 54,8 km²

Année 1983	Pluie moyenne mm	Volume écoulé 10 ³ m ³	Lame d'eau écoulée mm	Coefficient d'écoulement %	Déficit d'écoulement mm
Mai	38,9	0	0	0	38,9
Juin	108,3	331	6,0	5,6	102,3
Juillet	166,1	144	26,0	15,6	120,1
Août	206,0	2082	38,0	18,4	188,0
Sept.	118,9	483	8,9	7,4	110,0
Oct.	0,2	0	0	0	0,2
Année complète	654,9	4320	78,9	12,0	576,0

La saison des pluies 1983 a été très déficitaire comme dans l'ensemble du pays (ALBERGEL et al, 1984a et b) et caractérisée par le très petit nombre de pluies supérieures à 40 mm.

Il est à noter que les coefficients d'écoulement sont du même ordre de grandeur sinon plus fort que lors des campagnes 1963-1965 (KLEIN, 1967b), alors que la pluviométrie est inférieure de 150 mm au moins. Remarquons le très fort coefficient d'écoulement du mois d'août : 18% alors que sa pluviosité est bien inférieure à la moyenne (de l'ordre de 300 mm dans la région).

- Caractéristiques des crues.

L'absence de très fortes crues durant toute la campagne 1983 est à remarquer.

L'annexe n° 3 rassemble les caractéristiques de toutes les crues enregistrées.

Les paramètres des hydrogrammes observés en 1983 varient dans les mêmes plages de valeurs que ceux des campagnes 1963-1965 :

- le temps de montée varie de 0h.40 le 16/06 à 3h.55 le 13/09
- le temps de base varie de 4h.30 le 16/06 à 16h.10 le 13/09

L'allongement des temps de base correspond à un écoulement retardé dû à des pluies dont la traîne est plus longue,

- les débits de pointe observés se répartissent sont consignés dans le tableau 28.

Tableau 28 - Débits de pointes observés sur le bassin de KAZANGA

Débit atteint ou dépassé	Nombre de crues Campagne 83	Nombre de crues/an Campagne 63-65
5 m ³ .s ⁻¹	13	16
10 m ³ .s ⁻¹	8	13
20 m ³ .s ⁻¹	6	7
30 m ³ .s ⁻¹	5	6
50 m ³ .s ⁻¹	1	3
60 m ³ .s ⁻¹	1	2

- Coefficient et volume de ruissellement des pluies.

La seule année 1983 donne un échantillon de crues de taille trop réduite pour pouvoir le séparer en début de saison des pluies et milieu de saison des pluies, mais l'examen des coefficients de ruissellement montre peu de différence entre ces deux sous échantillons. Les observations du

tapis herbacé pendant cette saison des pluies indiquent que seul l'amont du bassin (BINNDE) a vu un développement important des graminées. Sur le reste du bassin et notamment sur les sols aval à caractère vertique ce tapis est resté très clairsemé pendant tout l'hivernage (ce qui doit expliquer le fort coefficient de ruissellement du mois d'août).

Par contre, on remarque une forte influence sur le ruissellement de l'indice antérieur des précipitations.

La recherche d'un modèle régressif entre la lame ruisselée et les mêmes prédicteurs que sur le bassin de BINNDE PM , pluie moyenne IK indice des précipitations antérieures et le produit $PM.IK$ montre que ce dernier terme est peu significatif.

$$L_r = 0,25 PM + 0,13 IK - 4,63$$

$$R^2 = 0,881 \text{ pour 18 observations.}$$

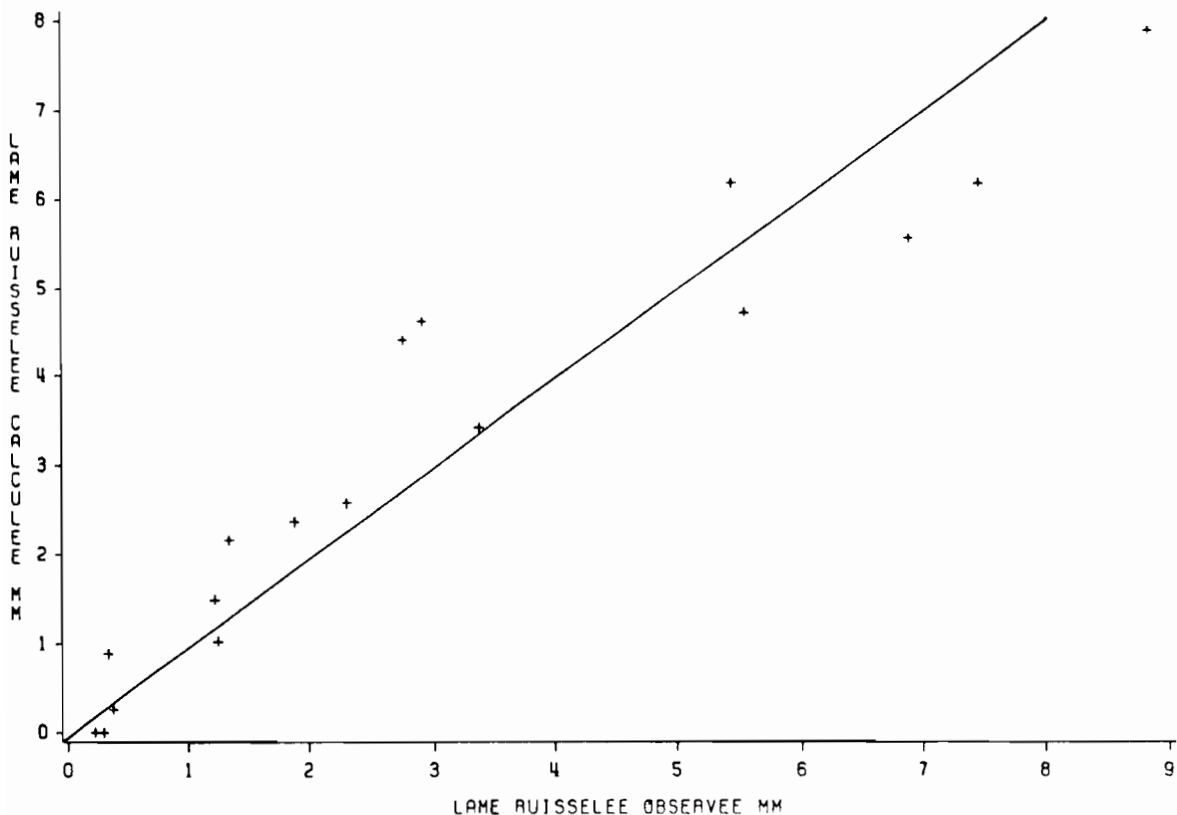
Nous n'avons considéré que les valeurs de lame ruisselée supérieures ou égales à 0,2 mm correspondant à un volume de 11 milliers de m^3 , seuil raisonnable à partir duquel on peut penser que l'ensemble du bassin a participé au ruissellement.

L'utilisation de ce modèle calé sur un échantillon de taille réduite et correspondant à une année exceptionnellement sèche doit être faite avec beaucoup de prudence pour une année plus humide.

La figure n°45 où sont reportées les lames ruisselées calculées en fonction de celles observées donne une idée de l'adéquation de ce modèle : la dispersion reste importante même pour les crues les plus fortes.

Fig-45-

LAMES RUISSELEES BV KAZANGA LR=F(PM IK)



3.2.3. Bassin versant de KOGNERE (19,8 km²).

Comme 1983, l'année 1984 durant laquelle a été observé le bassin de KOGNERE a été particulièrement sèche sur l'ensemble du territoire du BURKINA.

Le poste le plus arrosé sur le bassin a reçu 597,7 mm sur l'ensemble de la saison. La pluviométrie interannuelle est de 750 mm dans la région.

- Volumes écoulés - bilan hydrologique.

Le bilan par mois de l'année 1984 figure au tableau n°29.

Tableau n°29 - Ecoulements mensuels du bassin de KOGNERE 19,8 km²

Année 1983	Pluie moyenne mm	Volume écoulé 10 ³ m ³	Lame d'eau écoulee mm	Coefficient d'écoulement %	Déficit d'écoulement mm
Mai	106,1	202,6	10,2	9,6	95,9
Juin	84,9	67,7	3,4	4,0	81,5
Juillet	92,6	46,7	2,4	2,5	90,2
Août	162,4	49,5	2,5	1,5	159,9
Sept.	118,1	27,1	1,4	1,2	116,7
Oct.	26,8	0	0	0,0	26,8
Année complète	590,9	393,9	19,9	3,4	571,0

- Module 1984 = 0,012 m³ s⁻¹

Débit spécifique 1984 = 0,6 l s⁻¹ km⁻²

Le fort écoulement du mois de mai s'explique par la forte pluie du 24 mai (48,8 mm) suivant celle du 23 mai (16,1 mm). Malgré une pluviométrie très déficitaire l'écoulement annuel reste comparable à celui observé pour les années anciennes plus humides (tableau n°30). Le coefficient d'écoulement de 1984 est égal à celui prévu pour une année où la pluviométrie serait médiane (RODIER, 1975)

Tableau n°30 : Ecoulement annuel sur le bassin versant de KOGNERE.

	1960	1961	1962	1984
Pluviométrie moyenne annuelle (mm)	725	685	1140	591
Lame d'eau écoulee (mm)	29	17	126	20
Coefficient d'écoulement annuel (%)	4	2.5	11.0	3.4

- Caractéristiques des crues.

L'annexe n° 4 rassemble les caractéristiques de toutes les crues enregistrées (9 crues).

Le tableau n°31 donne les débits de pointes à KOGNERE.

Tableau n°31 débits de pointes à KOGNERE.

Débit atteint ou dépassé	Nbre de crues 1984	Nbre de crues/an 1960-1962
1 m ³ .s ⁻¹	6	8
5 m ³ .s ⁻¹	3	2
10 m ³ .s ⁻¹	2	1
15 m ³ .s ⁻¹	1	0,3
20 m ³ .s ⁻¹	1	0,3
25 m ³ .s ⁻¹	1	0,3
30 m ³ .s ⁻¹	1	0

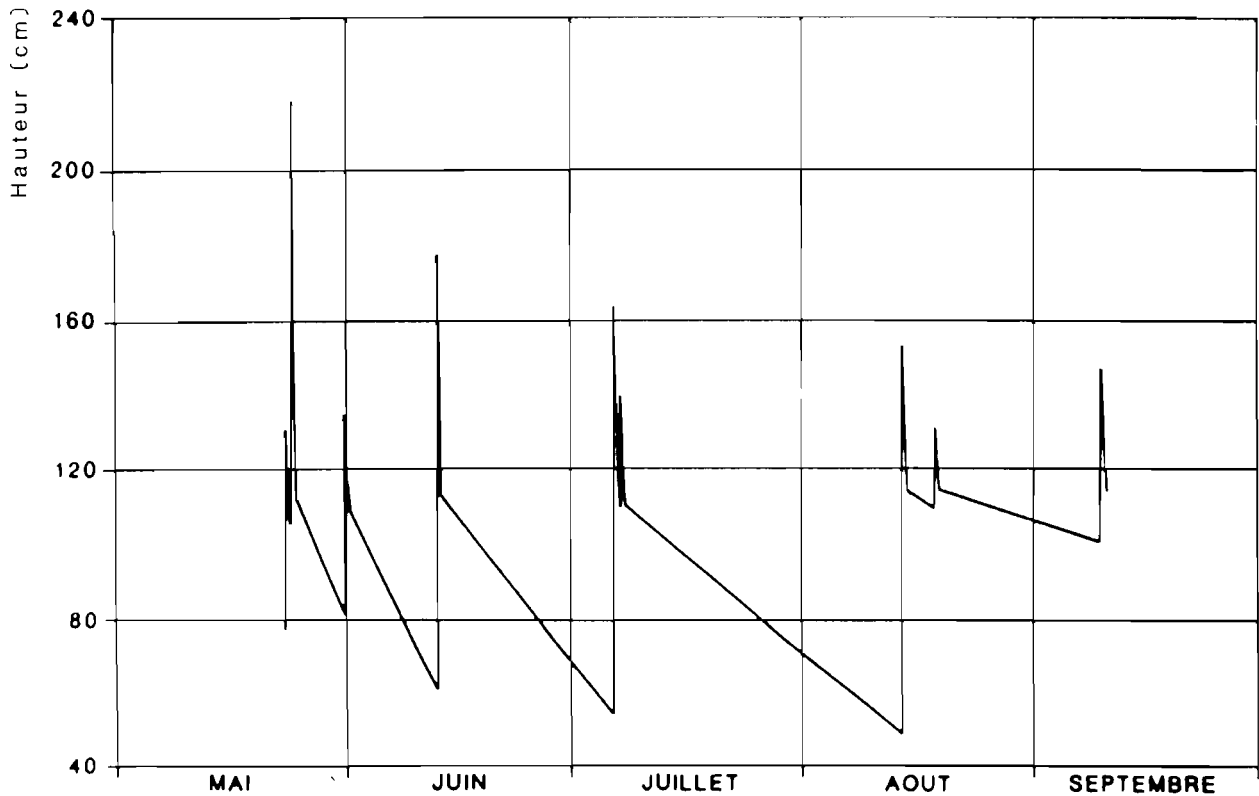
Les caractéristiques des crues pour ce bassin peuvent être déduites des trois principales crues : 24/05/84 13/06/1984 et 06/07/1984.

- temps de réponse 2 heures
- temps de montée 1 heure 20
- temps de base 9 heures 15

- Coefficient et volume de ruissellement des pluies.

Comme le montre la figure n°46 où sont reportées les cotes du niveau d'eau en fonction du temps pour l'année 1984, le ruissellement à l'exutoire dépend de l'état de remplissage de l'ensemble des mares qui forment l'axe de drainage. L'écoulement généralisé du bassin n'apparaît que lorsque la cote du plan d'eau à l'exutoire dépasse 1 m 14. La courbe quasi linéaire qui joint la fin d'un écoulement au début du suivant représente la vidange de la mare qui se fait essentiellement par évaporation, l'infiltration dans ces bas-fonds très argileux doit être faible.

Fig-46- NIEBSOBE A KOGNERE
 Debut du trace le:23/5/1984 a 20h59-cotes en cm



La régression qui traduit le mieux la lame ruisselée en fonction de la pluie a pour expression :

$$I.r = 0,18 PM + 0,01 P . JK - 4,8 (R^2 = 0,91)$$

La taille réduite de l'échantillon observé (9 crues) donne peu de poids à cette équation qui doit être utilisée avec prudence.

3.2.4. Les bassins versants de GAGARA : GAGARA OUEST (24,3 km²) et GAGARA EST (35,0 km²).

Sur ces deux bassins versants typiquement sahéliens l'écoulement annuel résulte des apports produits par une quinzaine de crues provoquées par le ruissellement consécutif à une ou plusieurs averses

Le bilan mensuel et annuel des écoulements est résumé dans les tableaux n°32 et 33 pour l'année 1985 observée.

Tableau 32 : Ecoulement mensuel et annuel sur le bassin versant de GAGARA OUEST (24,3 km²).

Année 1985	Pluie moyenne mm	Volume écoulé 10 ³ m ³	Lame d'eau écoulee mm	Coefficient d'écoulement %	Déficit d'écoulement mm
Juin	17,6	0	0	0	17,6
Juillet	56,9	291,13	11,9	21	45,0
Août	88,8	622,36	25,6	29	63,2
Sept.	35,6	240,7	9,9	28	25,7
Oct.	1,3	1	0	0	1,3
Année complète	200,2	1154,19	47,4	24	152,8

Tableau 33 : Ecoulement mensuel et annuel sur le bassin versant de GAGARA EST (35,0 km²)

Année 1985	Pluie moyenne mm	Volume écoulé 10 ³ m ³	Lame d'eau écoulee mm	Coefficient d'écoulement %	Déficit d'écoulement mm
Juin	13,5	52,05	1,5	11	12,0
Juillet	42,6	332,36	9,5	22	33,1
Août	86,4	782,85	22,3	26	64,1
Sept.	42,4	362,85	10,4	24	32,0
Oct.	1,0	0	0	0	1,0
Année complète	185,9	1530,11	43,7	23	142,2

La comparaison de ce bilan annuel à celui obtenu les années antérieures (DUBREUIL et al 1972) montre que 1985 a le coefficient de ruissellement le plus fort malgré une pluie moyenne très déficitaire et l'absence d'événement pluvieux remarquable. (la pluie la plus forte enregistrée sur les deux bassins n'atteint pas 30 mm) (tableau n°34).

Tableau n°34 : Bilan annuel de l'écoulement.

Année	BV ouest		BV est	
	Pluie moyenne mm	Coefficient d'écoulement %	Pluie moyenne mm	Coefficient d'écoulement %
1956	445	18	440	19
1957	385	12	395	11
1985	200	24	186	23

- Caractéristiques des crues.

L'ensemble des caractéristiques des crues est consigné en annexe n°5

On remarque que pour les faibles précipitations le bassin-est ruisselle plus facilement que le bassin-ouest notamment en début et fin de saison où nous observons deux crues supplémentaires. Dans l'ensemble cependant le volume des crues du bassin-est n'est pas supérieur à celui des crues du bassin ouest ; les débits de pointe sont même inférieurs par suite de l'amortissement dû à la plaine marécageuse qui occupe la partie est du bassin.

Exceptée la pluie du 12/08 et du 15/08 toutes les autres peuvent être considérées comme unitaires, on remarque cependant que les hydrogrammes de ruissellement sur le marigot est ont des temps caractéristiques différents d'une crue à l'autre sans que la forme du hétéogramme moyen (bien connu ici puisque reposant sur 6 pluviographes) puisse l'expliquer. Le temps de montée varie de 40 minutes à 4h.15 et le temps de base de 7h. à 25h. Sur ce marigot il faut attribuer la cause de ces variations à l'hétérogénéité du bassin. L'effet d'amortissement de la plaine marécageuse est complexe et varie suivant l'état de remplissage des mares. Il aurait été intéressant de contrôler très soigneusement les sorties de ce bas-fond en y installant une station hydrométrique secondaire.

Sur le marigot ouest, au contraire on constate que les hydrogrammes de ruissellement varient assez peu d'une averse à l'autre, surtout pour les plus fortes d'entre elles qui sont d'ailleurs les plus intéressantes pour la détermination des crues exceptionnelles. Le temps de montée de l'hydrogramme varie entre 3h. et 4h.30 mais reste en moyenne très voisin de 4 heures. Le temps de réponse est du même ordre. Le temps de ruissellement dont la détermination est moins précise et dépend de la façon dont on a séparé l'écoulement souterrain du ruissellement superficiel est de l'ordre de quinze à vingt heures.

- Coefficient et volume de ruissellement des pluies.

En première analyse il ressort que les deux bassins sont de loin les plus imperméables de ceux que nous venons de présenter.

Sur chacun d'eux nous avons cherché une relation de la forme $L_r = f(PM, P.IK, IK)$. Les prédicteurs les plus pertinents sont encore une fois P et P.IK.

Bassin ouest :

$$L_r = 0,60 PM + 0,02 PM.IK - 4,4 \quad R^2 = 0,84$$

Bassin est :

$$L_r = 0,46 PM + 0,02 PM.IK - 2,5 \quad R^2 = 0,87$$

Ces deux relations traduisent bien la remarque faite plus haut : le bassin versant ouest a une meilleure aptitude au ruissellement mais la hauteur limite de pluie nécessaire à l'apparition du ruissellement est plus faible sur le marigot est.

3.2.5 Comportement moyen des bassins, prédétermination des crues de récurrence décennale et évolution de la perméabilité des bassins.

Pour répondre au problème de dimensionnement et de coût d'amortissement de petits ouvrages hydrauliques sur bassin versant, les hydrologues ont cherché un indicateur du risque naturel. Partant de la législation existante en France et des méthodes de dimensionnement des ouvrages hydrauliques, les projeteurs ont retenu comme indicateur, la crue dont le débit et le volume ont une période de retour de 10 ans. Son estimation devrait se faire après l'ajustement d'une loi théorique aux valeurs observées. La durée de fonctionnement d'un bassin versant est généralement trop courte pour disposer d'une chronique de crues assez longue pour permettre un ajustement statistique fiable. Aussi les hydrologues de l'ORSTOM ont formulé différemment la définition de cette crue qui pourrait être rebaptisée "crue d'étude" : "c'est la crue provoquée par une lame précipitée sur le bassin, de récurrence décennale ; toutes les autres conditions étant moyennes" (RODIER et RIBSTEIN, 1986). La forme du hyétogramme est celle obtenue à partir des courbes intensités-durée-fréquence de la région considérée. On se situe au milieu de la saison des pluies lorsque l'état de la végétation est moyen ainsi que l'état d'humectation des sols.

La méthode utilisée pour obtenir le volume de cette crue d'étude est qualifiée de modèle global. Après la détermination de la lame précipitée décennale à un poste de référence, voisin du bassin versant, et transformation de cette hauteur ponctuelle en une lame précipitée sur le bassin de récurrence décennale (VUILLAUME, 1974), le passage à la lame ruisselée de la crue d'étude s'effectue par extrapolation d'une relation empirique entre pluies moyennes et lames ruisselées observées sur le bassin.

Depuis la méthode graphique des déviations résiduelles (DUBREUIL, 1974) plusieurs méthodes pour établir une telle relation ont été proposées :

- modèle développé par le SOIL CONSERVATION SERVICE MOCKUS (1969)

$$L_r = \frac{(\beta P - a)^2}{P + b}$$

où L_r est la lame ruisselée en mm

P la pluie moyenne en mm

a paramètre qui tend à rendre compte de la pluie d'imbibition moyenne sur le bassin

β et b les paramètres d'ajustement caractérisant le bassin

- ajustement aux observations d'une fonction puissance CHEVALLIER et al 1985.

$$Lr = a P^\beta$$

où Lr est la lame ruisselée mm

P la pluie moyenne en mm

a et β paramètres d'ajustement caractérisant le bassin

- méthode des courbes enveloppes (LAMACHERE, 1984)

Le nuage de points représentant les couples lame ruisselée-pluie moyenne est compris entre deux droites enveloppes caractérisant l'état sec et l'état le plus humide du bassin. Il est possible de tracer la droite correspondant à un état médian d'humidité du bassin parallèle aux droites enveloppes.

- ajustement d'une fonction à concavité vers le haut d'asymptote oblique. SEGUIS (1986), propose après l'étude des graphes "pluie-lame ruisselée" sur 21 bassins sahéliens la fonction suivante pour caractériser l'état de ruissellement moyen des bassins

$$Lr = \sqrt{\beta^2 P^2 + a^2} - a \quad \begin{array}{l} \text{avec } a \geq 0 \\ \text{et } 0 < \beta \leq 1 \end{array}$$

avec Lr = lame ruisselée mm

P = pluie moyenne mm

β et a = constantes

Pour $P = 0$ $Lr = 0$

Pour $P \rightarrow +\infty$ $Lr \rightarrow \beta P - a$

Nous avons retenu cette dernière fonction en fixant $\beta = 1$

Cette opération trouve sa justification dans DUBREUIL (1974) "La représentation de la variation de la lame ruisselée en fonction de la pluie doit admettre une asymptote à 45° (quand P croît, Lr tend vers P)". En appliquant la loi théorique de l'infiltration d'un sol au bassin versant (fig. n°31) ; il est possible de calculer le coefficient de ruissellement (rapport lame ruisselée sur pluie) pour une pluie "infiniment forte".

$$Kr = \frac{Lr}{P} = \frac{I - Ks}{I}$$

Kr = coefficient de ruissellement %

Lr = lame ruisselée mm

I = intensité de la pluie mm h⁻¹

Ks = conductivité hydraulique à saturation du bassin mm h⁻¹

une pluie "infiniment forte" a une intensité forte, or la conductivité hydraulique des sols des bassins étudiés ne dépasse guère 20 mm h⁻¹ ; (Ks/I est voisin de 0 lorsque $P \rightarrow \infty + Kr \rightarrow 1$)

Nous caractériserons le ruissellement en condition moyenne sur les bassins étudiés par la fonction :

$$Lr = \sqrt{P^2 + a^2} - a \quad (1)$$

Lr = lame ruisselée mm, P = pluie moyenne mm, a = constante mm

$$Pm = 0 \quad Lr = 0, Pm \rightarrow \infty \quad Lr \rightarrow P - a$$

a est la quantité de pluie maximale perdue pour le ruissellement sur un bassin dans l'hypothèse d'une pluie "infinie" à forte intensité ; c'est une caractéristique du bassin.

L'étude théorique de cette fonction montre que le calcul de a par optimisation sur les observations est d'autant plus fiable que l'on possède des couples (P, Lr) de valeur importante.

en effet, d'après l'équation (1)

$$a = \frac{P^2 - Lr^2}{2Lr}$$

$$\frac{da}{dLr} = -\frac{1}{2} \left(1 + \frac{P^2}{Lr^2} \right)$$

en remplaçant $\frac{P}{Lr}$ par $\frac{1}{Kr}$ (coefficient de ruissellement)

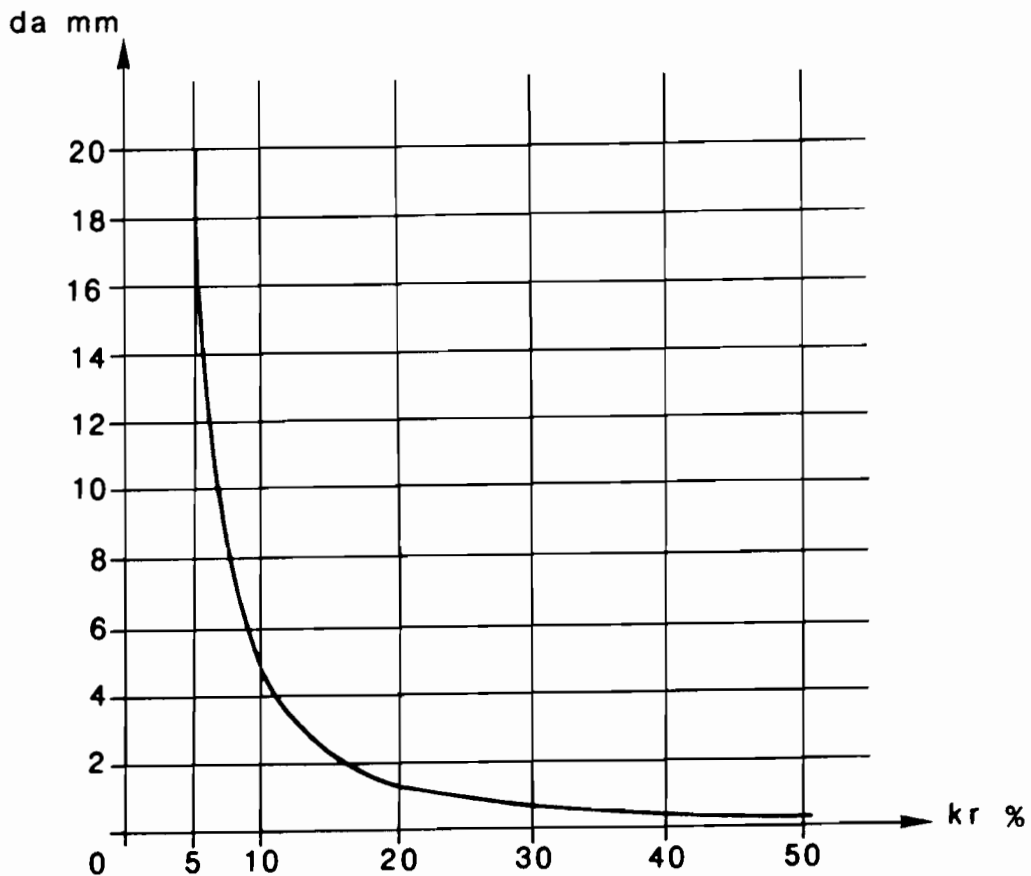
$$|da| = + \frac{1}{2} \left(1 + \frac{1}{Kr^2} \right) dLr$$

en admettant que la variation de lame ruisselée mesurable est de 0,1 mm, il est possible de calculer l'incertitude sur le calcul de a en fonction de Kr (fig. n°47)

si $dLr = 0,1$ mm

Kr	da
1 %	500,1
5 %	20,1
10 %	5,1
20 %	1,3

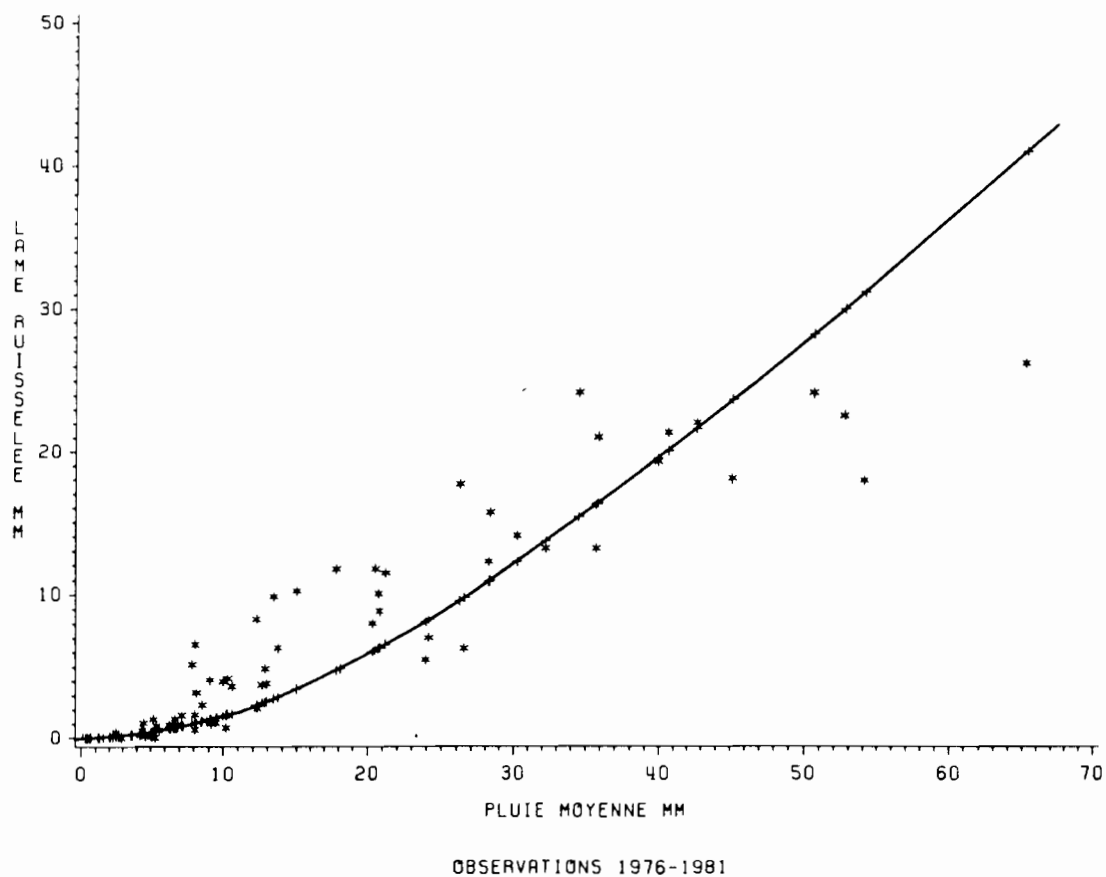
Nous déterminons cette fonction pour chaque bassin étudié en s'appuyant sur les couples de points (Lr , Pm) dont le coefficient de ruissellement est supérieur à 10%. On calcule pour chacun de ces couples une valeur de a et on fait la moyenne de ces valeurs pondérées par la pluie pour donner plus de poids aux pluies les plus fortes (tableau n°35)



Incertainude sur la valeur de a en fonction de kr

Fig-47 -

Fig-48- AJUSTEMENT LR=F(P) BV JALAFANKA



AJUSTEMENT LR=F(P) BV BINNDE

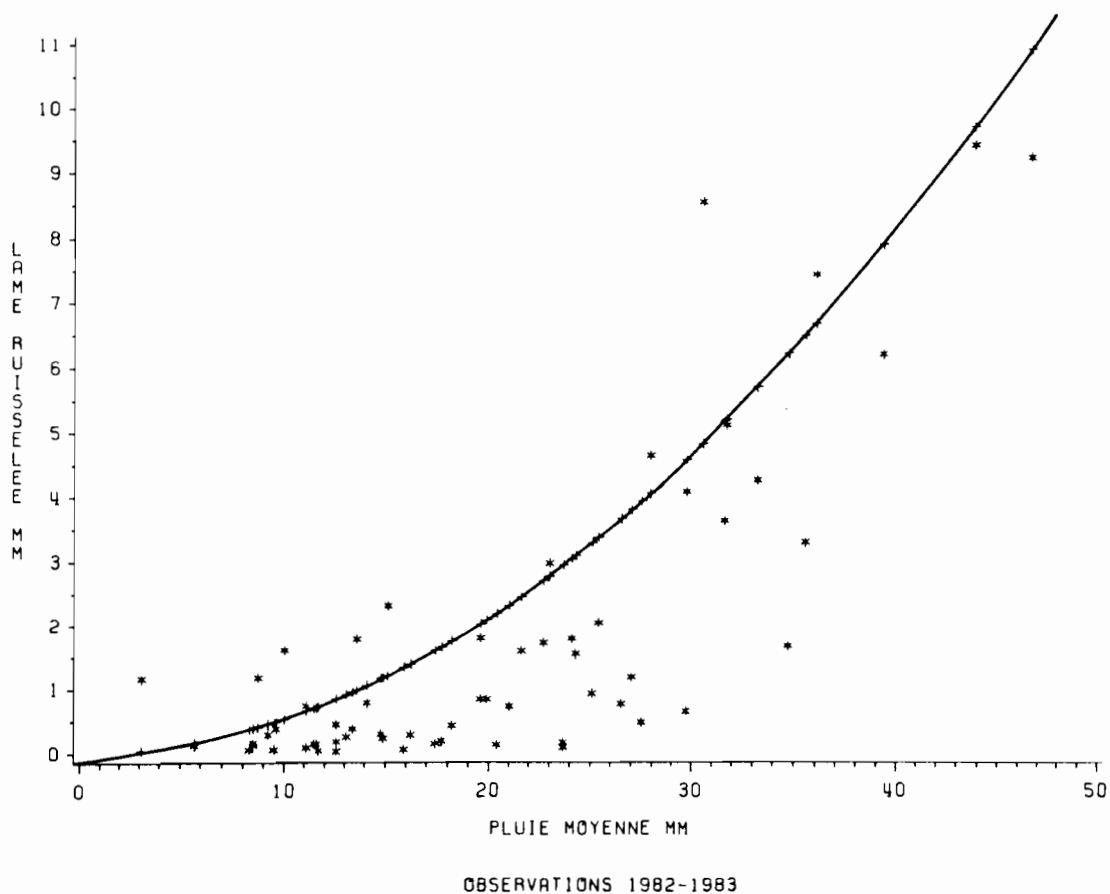


Fig-49-

Les figures 48 et 49 donnent un exemple de l'ajustement de cette courbe moyenne aux données des bassins de JALAFANKA et de BINNDE.

Dans le tableau n°35 nous avons regroupé les valeurs estimées du paramètre α et l'extrapolation de la courbe représentant le comportement moyen du bassin à la valeur de la pluie décennale.

3.2.5.1 Prédétermination de la crue d'étude.

Il faut corriger la valeur ponctuelle de la pluie décennale par un coefficient d'abattement tenant compte de la superficie du bassin versant avant de l'introduire dans le "modèle global". VUILLAUME (1974) a établi une formule valable pour l'AFRIQUE intertropicale.

$$K = 1 - (9 \log r - 42 \cdot 10^{-3}P + 152 \pm 10) \cdot 10^{-3} \log S$$

avec r = période de retour (années)

P = pluviométrie interannuelle du poste de référence (mm)

S = superficie du bassin versant (km²)

Tableau n° 35 Lame ruisselée de la crue d'étude

Bassin	S km ²	α mm	Pluie décennale ponctuelle mm	Pluie décennale moyenne mm	Lame ruisselée de la crue d'étude mm
JALAFANKA	0,8	31,0	83,6	83,6	57,8
POLAKA	9,1	62,3	83,6	71,9	32,8
GAGARA E.	35,0	26,1	83,6	66,8	45,7
GAGARA O.	24,3	22,6	83,6	68,5	49,6
KOGERE	19,8	115,3	95,4	79,2	24,6
BINNDE	9,7	94,1	101,7	87,5	34,4
KAZANGA	54,8	105,1	101,7	77,3	25,4
KUO	67,8	154,3	98,0	74,5	17,1

3.2.5.2 Evolution dans le temps du comportement moyen des bassins.

Pour les cinq bassins : GAGARA E., GAGARA O., KOGNERE, BINNDE et KAZANGA, une chronique de pluies-lames ruisselées a été observée lors des campagnes 1956-1963. Nous avons vu dans les paragraphes précédents que, sur les bilans mensuels et annuels les volumes ruisselés sont relativement forts dans la période d'observation actuelle en regard de la pluviométrie. La valeur du paramètre " α " a été calculé sur les données anciennes. Il nous a paru raisonnable de faire l'hypothèse suivante sur les modifications du paramètre " α " qui signerait une modification dans la réponse du bassin versant :

- le comportement d'un bassin s'est modifié si l'estimation de " a " sur les deux périodes diffère d'au moins deux fois la valeur de l'écart type.

Le tableau n°36 - Estimation du paramètre " a " sur les deux périodes d'observation.

BASSIN	Période ancienne			Période récente		
	Nb d'observations	Estimation de a	Ecart type sur a	Nb d'observations	Estimation de a	Ecart type sur a
KOGNERE	16	146,8	10,8	1	115,3	-
GAGARA E.	10	93,0	9,6	11	26,1	3,8
GAGARA O.	11	59,6	7,9	13	22,6	2,8
BINNDE	32	83,6	6,0	16	94,1	9,7
KAZANGA	33	109,0	8,6	7	105,1	11,2

(1) l'estimation de a est faite à partir des couples de points pour lesquels les coefficients de ruissellement sont supérieurs à 10%.

Les bassins versants les plus sahéliens GAGARA E. et GAGARA O. semblent avoir évolué vers une augmentation du ruissellement entre les deux périodes d'observations (1956-57 et 1985). Moins nettement, le bassin de KOGNERE situé dans la zone de transition SOUDAN-SAHEL voit sa perméabilité décroître. Par contre, les bassins plus arrosés de BINNDE et KAZANGA montrent un comportement très voisin pour les deux périodes d'observations. Ce problème de la modification du comportement des bassins sera étudié plus en détail dans la quatrième partie.

3.3. CONCLUSION.

L'analyse des données sur le ruissellement et l'infiltration sous pluies simulées à l'échelle de la parcelle a permis :

- de trouver les paramètres pertinents pour cartographier un bassin versant en zones homogènes quant à leur comportement vis à vis du ruissellement. Nous retiendrons la prédominance des organisations superficielles (végétation, activité de la mésofaune, organisations pédologiques de surface) dans les processus de transfert de l'eau à l'interface sol-atmosphère.

- d'établir, par parcelle, une relation entre la pluie et la lame ruisselée. Cette relation fait intervenir l'indice des pluies antérieures et son produit avec la lame précipitée. Quantifiée par quatre paramètres empiriques, cette relation représente un comportement du sol vis à vis des pluies dont la forme respecte celle communément admise pour des événements assez forts, (pluie

de récurrence annuelle ou décennale). Elle est facilement transposable à une chronique de pluviométrie journalière en faisant l'hypothèse que dans notre région d'étude il n'y a en général qu'un événement pluvieux par jour et qu'en moyenne la forme des pluies ressemble à celle des pluies simulées.

Les observations hydro-pluviométriques en vraie grandeur sur les bassins versants donnent une référence pour valider une extrapolation des relations établies sur parcelles.

La différence de comportement des bassins mise en évidence entre deux périodes d'observation à trente ans d'intervalle nous incitera à étudier les facteurs expliquant la modification dans le temps des paramètres hydrologiques.

Un paramètre facilement déterminé sur une chronique de "pluie-lame ruisselée" a été mis en évidence pour caractériser la réponse moyenne d'un bassin versant. Les variations de ce paramètre dans le temps signe la modification du comportement hydrologique du bassin

La prédétermination de la lame ruisselée de la crue d'étude sur les observations pourra être comparée à celle calculée par un modèle à partir des résultats sur parcelles. Nous garderons en mémoire les autres paramètres des crues, débits maximums, temps de montée, temps de base, temps de réponse qui ne pourront, bien sûr, pas être extrapolés uniquement à partir de relation sur parcelle mais serviront à une modélisation de l'écoulement à petits pas de temps.

PARTIE IV
DU M² AU KM², EXTRAPOLATION
AU BASSIN VERSANT
DES PARAMETRES HYDROLOGIQUES
DEFINIS SUR PARCELLES .

Dans le premier chapitre de cette quatrième partie est développée une méthode simple de transposition de la relation pluie-lame ruisselée établie sur parcelle, au bassin au pas de temps journalier. Chaque parcelle est considérée comme représentative d'une unité contributive du bassin. Une cartographie basée sur des critères judicieux permet de connaître les différentes aires participantes au ruissellement. Trois hypothèses sont implicites dans cette démarche :

- La pluie journalière est représentative d'un seul événement pluvieux. Deux pluies dans la même journée étant un événement rare sous la latitude où nous travaillons, cette première hypothèse est acceptable.

- Les différentes pluies ont en moyenne les mêmes caractéristiques que celles simulées et la relation pluie simulée-lame ruisselée peut être transposée aux hauteurs de pluies naturelles. Nous avons vu que les pluies simulées étaient construites sur le modèle des pluies de récurrence annuelle ou décennale.

- Les ruissellements calculés sur les différentes aires contributives s'additionnent pour constituer le ruissellement total du bassin. Un calage simple entre quelques valeurs calculées et observées à l'exutoire du bassin rend compte du transfert d'échelle (du m^2 à plusieurs km^2).

Pour mieux cerner un événement pluie-crue, la même technique est utilisée à un pas de temps plus court (36 minutes ou 1/4 de jour) dans le second chapitre.

- La relation pluie-lame ruisselée à cette échelle de temps est introduite comme fonction de production d'un modèle hydrologique à discrétisation spatiale dotée d'une fonction de transfert ; il est alors possible de reconstituer une série de crues à partir d'une chronique pluviographique (modèle couplé GIRARD et al, 1981).

Le modèle à discrétisation spatiale est appliqué aux bassins versants de GAGARA considérés comme "inconnus". L'utilisation d'une carte topographique au 200 000^{ème}, des photos aériennes et d'une image satellite permet de constituer un fichier des données physiographiques des bassins. Le "catalogue" des parcelles testées sur des bassins connus donne la fonction de production sur chaque état de surface d'une maille. Un réseau de pluviographes fournit les données d'entrées du modèle.

Dans le troisième chapitre de cette dernière partie, le premier modèle au pas de temps journalier est utilisé pour la reconstitution de chroniques de ruissellement sur des bassins versants dont les écosystèmes ont été bouleversés ces dernières années par l'action conjuguée de la sécheresse et

de la pression anthropique. La modification du régime hydrologique de ces bassins est appréhendée par rapport à l'évolution des états de surface et du changement climatique.

4.1 TRANSPOSITION DES RELATIONS PLUIE-LAME RUISSELEE A L'ECHELLE DU BASSIN AU PAS DE TEMPS JOURNALIER.

L'étude des facteurs explicatifs de l'infiltration sur notre terrain expérimental (Chapitre 3.1.2.) qui conforte de nombreuses mesures réalisées sur petites et grandes parcelles dans d'autres pays sous des latitudes semblables (COLLINET et VALENTIN, 1979 ; COLLINET et *al*, 1980) a conduit à une nouvelle approche pour différencier les milieux selon leur aptitude au ruissellement. Elle consiste à dresser des cartes thématiques qui font appel à l'état des connaissances entre les différents paramètres du milieu (couvert végétal, état de surface, occupation du sol, organisations pédologiques internes) en les hiérarchisant en fonction de leur influence sur le ruissellement.

4.1.1. Une cartographie adaptée aux besoins hydrologiques en zone soudano sahélienne.

En savane sèche comme au SAHEL *sensu stricto* les caractères d'états de surface (couvert végétal et organisations superficielles de la couverture pédologique) ont été reconnus comme prépondérant en ce qui concerne l'hydrodynamisme du milieu et sont donc retenus pour la cartographie des bassins et la définition de zones homogènes contributives au ruissellement (pl photo n°5).

Ces unités doivent représenter un comportement moyen. En effet les organisations superficielles présentent de fortes différenciations latérales qui résultent de la combinaison de plusieurs facteurs : pluie, vent, couvert herbacé (VALENTIN, 1985a). Elles se manifestent, au SAHEL, par exemple, par l'existence de taches d'une dizaine de mètres de diamètre, dépourvues de végétation et couvertes d'une pellicule, environnées de microbuttes sableuses enherbées. De telles variations décamétriques induisent des différences très marquées d'hydrodynamisme (CHEVALLIER et VALENTIN, 1984).

4.1.1.1. Modalités de réalisation.

La cartographie des états de surface, mise au point par VALENTIN (1985a) diffère peu de celles des organisations internes de la couverture pédologique par l'objet d'étude mais s'en écarte dans ses grands principes : travaux de terrain et représentation cartographique. L'annexe 6 décrit les différentes étapes de la réalisation d'une carte des états de surface.

BASSIN VERSANT DE KAZANGA
 esquisse des organisations superficielles
 à 1/50 000^e
 d'après VALENTIN

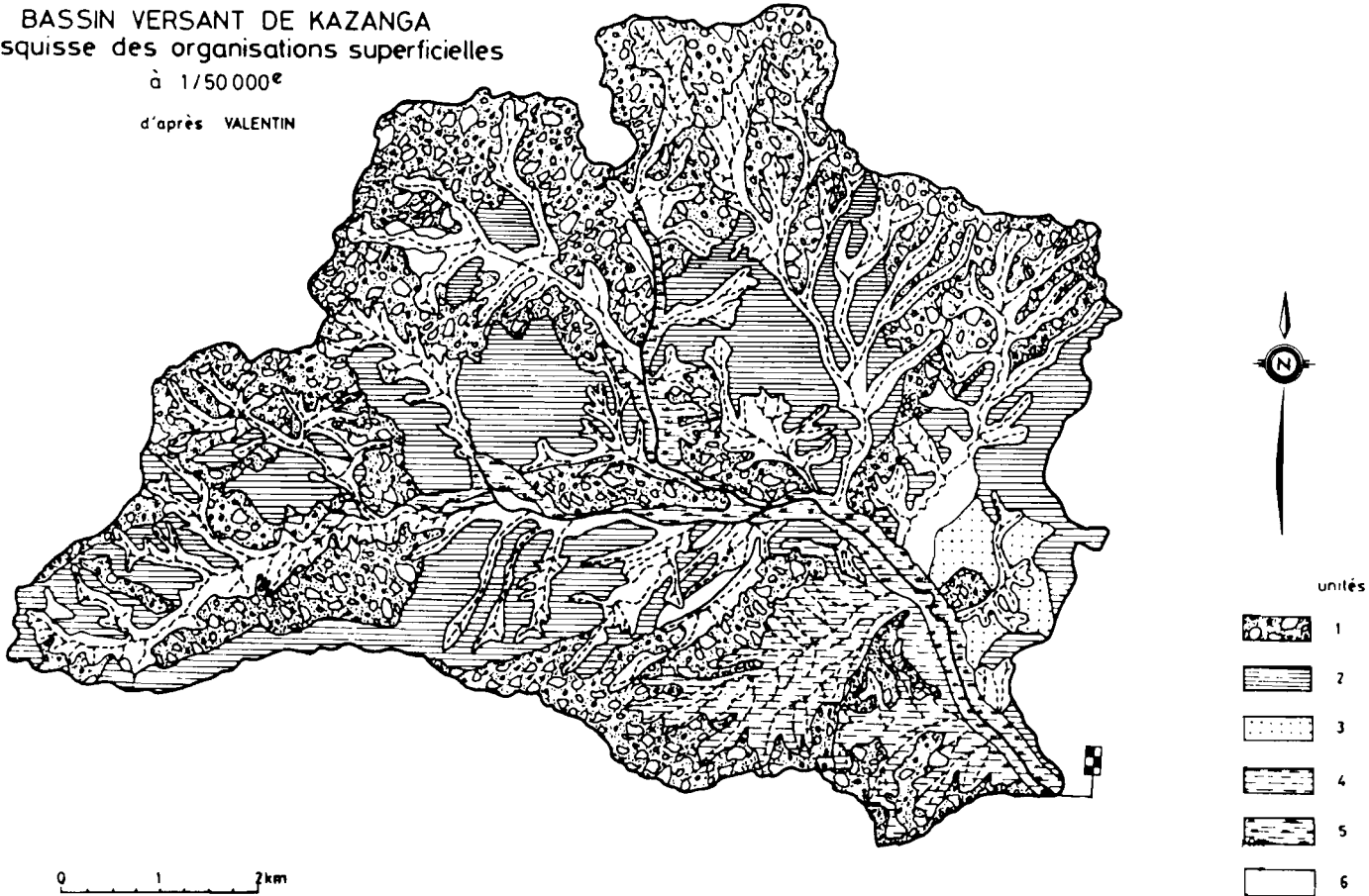


Fig-51-

- (1) surface à épandage gravillonnaire,
- (2) surface pelliculaire,
- (3) surface à taches nues pelliculaires à microbuttes,
- (4) surface verticale à voile sableux,
- (5) surface hydromorphe de terrasse alluviale,
- (6) surface hydromorphe de bas-fond.

A chaque carte des organisations superficielles des sols a été associée une carte de l'occupation du sol réalisée par photo interprétation sur des agrandissements de la photo aérienne au 50 000^{ème}.

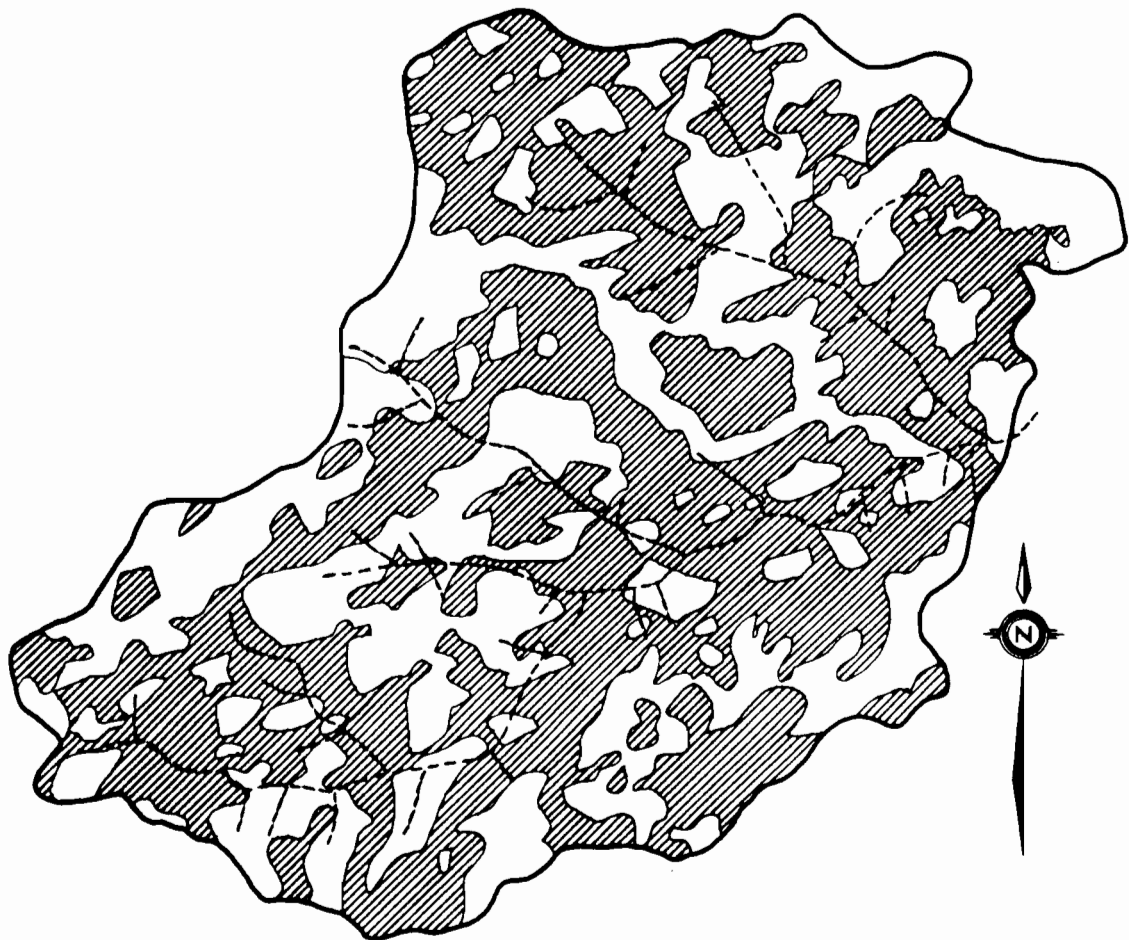
Comme nous l'a montré l'analyse des facteurs explicatifs de l'infiltration les terres cultivées s'opposent fortement à celles sous couverts naturels. Le mode de culture modifie largement l'aptitude de ces sols au ruissellement : microrelief, pellicules de surface, apparition à faible



profondeur d'un horizon peu drainant avec la formation de semelle de labour. Sur nos bassins deux techniques culturales sont utilisées : soit la culture attelée soit la culture à la main avec labour et sarclage à l'hilaire. Le couvert végétal est dans la majorité des cas le même puisque les plus grandes surfaces sont cultivées en céréales mil ou sorgho, nous distinguerons cependant pour le bassin versant du KUO les champs de coton qui représentent 20% de la surface cultivée.

La figure n° 52 donne en exemple la carte d'occupation des sols sur le bassin versant de BINNDE pour l'année 1980.

Fig -52- BASSIN VERSANT DE BINNDE

OCCUPATION DES SOLS



-  surfaces nues ou cultivées
-  surfaces en jachère ou en végétation naturelle

0 250 m 1km

4.1.2. Fonction de production du ruissellement. ALBERGEL et al, 1985c)

4.1.2.1. Fonction de production du ruissellement pour une unité cartographique.

Les parcelles de simulation de pluie ont été installées de façon à avoir au moins une parcelle par surface élémentaire de chaque unité cartographique. Parfois, des contraintes d'ordre pratique (durée de la campagne de simulation de pluie liée aux crédits pour la réaliser, inaccessibilité de certaines zones du bassin, ...) imposent un nombre de parcelles inférieur au nombre de surfaces élémentaires. On procède alors à de nouveaux regroupements d'unités ou tout simplement on donne la priorité aux surfaces élémentaires les mieux représentées. Sur chaque bassin il a été installé de 3 à 5 sites expérimentaux. Un site expérimental représente une unité cartographique ; il compte entre 2 et 5 parcelles représentatives du nombre de surfaces élémentaires à tester dans l'unité.

A partir de la superposition des cartes d'occupation des sols et des organisations superficielles, de sondages sur le terrain ; on détermine le pourcentage occupé par chaque surface élémentaire dans son unité cartographique.

La relation lame ruisselée en fonction de la pluie et de l'indice des précipitations antérieures (IK). $L_r = aP + bIK + cP.IK + d$ est transposée à la pluie naturelle et aux IK correspondants. Cette relation est considérée comme la fonction de production de la surface élémentaire.

En combinant, au prorata des superficies occupées par les surfaces élémentaires, les relations établies sur chaque parcelle on obtient la fonction de production de l'unité cartographique. Cette fonction de production n'est valable que pour une période donnée. Elle peut varier d'une saison à l'autre (développement de la végétation herbacée en saison des pluies, après les brûlis) et d'une année à l'autre (extension ou diminution des zones cultivées, modification des modes culturels).

Nous allons développer, sur un exemple, l'utilisation pratique de cette méthode.

Exemple : Bassin de BINNDE. Unité cartographique n°2 :

Surface à épandages gravillonnaires.

Dans cette unité, C. VALENTIN (1982) distingue trois types de surfaces élémentaires : végétation naturelle ou jachère, sol nu, sol cultivé en billons. La séparation entre végétation naturelle ou jachère et sol nu ou cultivé a été faite à partir des photos aériennes les plus récentes (1981). La

distinction entre zones cultivées et sol nu résulte de sondages sur le terrain. On aboutit à la répartition suivante :

Tableau n°37 - Surfaces élémentaires de l'unité cartographique n°2 à BINNDE

Surfaces élémentaires	Surface avant la repousse de la végétation km ²	%	Surface après la repousse de la végétation km ²	%
Végétation naturelle ou jachère	2,5	52	3,0	62
Sol nu	0,5	10	0	0
Culture	1,8	38	1,8	38

L'évolution annuelle de la végétation herbacée oblige à trouver un critère permettant de fixer une date de validité à chacune des fonctions de production. Les observations effectuées sur le bassin de BINNDE en 1982 et 1983 ont permis de constater que la mise en place de la végétation pouvait être reliée aux hauteurs pluviométriques et à la longueur des périodes sans pluie au début de la mousson (ALBERGEL, BERNARD, 1984a). Le couvert végétal est suffisamment développé pour qu'on puisse considérer qu'il n'y a plus de zone nue à partir d'un total pluviométrique de l'ordre de 80 mm réparti sur une trentaine de jours.

Pour l'unité cartographique n°2 du bassin de BINNDE, les fonctions de production sont exprimées par les équations suivantes :

- Avant la repousse de la végétation

$$Lr2 = 0,52 Lr P3 + 0,10 Lr P4 + 0,38 Lr P5$$

Lri : fonction de production de l'unité cartographique i .

$LrPi$: fonction de production de la parcelle i .

Pour $Pm \leq 40$ mm

$$Lr2 = 0,180 Pm + 0,024 IK + 0,005 PmIK - 3,67$$

Pour $40 < Pm \leq 60$ mm

$$Lr2 = 0,360 Pm + 0,003 PmIK - 10,9$$

Pour $P_m > 60$ mm

$$Lr2 = 0,392 P_m + 0,072 IK + 0,003 P_m IK - 12,8$$

- Après la repousse de la végétation

$$Lr2 = 0,62 LrP3 + 0,38 LrP5$$

Pour $P_m \leq 40$ mm

$$Lr2 = 0,102 P_m + 0,066 IK - 2,82$$

Pour $40 < P_m \leq 60$ mm

$$Lr2 = 0,282 P_m - 0,016 IK + 0,004 P_m IK - 10,0$$

Pour $P_m > 60$ mm

$$Lr2 = 0,319 P_m + 0,070 IK + 0,004 P_m IK - 12,3$$

P_m représente la pluie moyenne sur le bassin et IK l'indice des précipitations antérieures calculé à partir de la chronique des pluies moyennes.

Il est bien évident que si l'examen des photos aériennes montre une évolution importante des zones cultivées ou dénudées, dans le temps, il doit en être tenu compte lors de la reconstitution des crues du bassin.

4.1.2.2. Fonction de production du ruissellement pour le bassin.

De même que pour une unité cartographique, la fonction de production résulte de la somme pondérée des fonctions des surfaces élémentaires, pour le bassin, elle résulte de la somme pondérée des fonctions des unités cartographiques.

Exemple : bassin de KAZANGA

Sur ce bassin, on distingue les unités cartographiques suivantes, (C. VALENTIN, 1983) :

- 1 - Surface à épandage gravillonnaire
- 2 - Surface pelliculaire
- 3 - Surface à taches nues pelliculaires et à micro-buttes sableuses
- 4 - Surface verticale à voile sableux
- 5 - Surface hydromorphe de terrasse alluviale
- 6 - Surface hydromorphe de bas-fond.

Ces unités représentent respectivement 34, 28, 1, 5, 5 et 27% de la surface totale du bassin. Etant donné leur similitude de comportement, les deux dernières unités ont été regroupées.

La fonction de production du bassin est donnée par l'équation :

$$Lr B = 0,34 Lr1 + 0,28 Lr2 + 0,01 Lr3 + 0,05 Lr4 + 0,32 Lr(5 + 6)$$

4.1.2.3. Reconstitution des lames ruisselées sur le bassin.

Si le bassin avait un comportement identique à celui des parcelles la reconstitution des lames ruisselées du bassin dériverait directement de la fonction de production déterminée au paragraphe précédent. A la station de jaugeage du bassin sont mesurés les volumes ruisselés effectivement récupérés par le réseau hydrographique et canalisés jusqu'à l'exutoire. La lame ruisselée calculée par ce modèle représente une hauteur d'eau constituée par la somme des ruissellements de chaque surface élémentaire du bassin. Pour expliquer les différences entre ces deux grandeurs nous évoquerons les faits suivants :

- l'effet de pente qui n'est pas ou peu pris en compte sur la parcelle. L'accélération du ruissellement sur les versants limite le temps d'infiltration.
- La répartition spatiale par rapport à l'exutoire des sols représentés par chaque parcelle. Au cours du cheminement des lames ruisselées, de l'eau est perdue par infiltration, évaporation ou captée dans des dépressions endoréïques. De l'eau infiltrée sur une surface élémentaire en amont peut suivre un cheminement hypodermique ou encore une discontinuité souterraine (canal de dissolution, ou fracture dans les plateaux latéritiques de sommet de forme) et participer au ruissellement sur une unité aval.
- L'hétérogénéité des averses sur le bassin. En effet si ce modèle discrétise finement les hétérogénéités spatiales du bassin ; en utilisant comme donnée d'entrée la pluie moyenne il fait l'hypothèse d'une pluie homogène sur le bassin. Nous avons vu également que la pluie au sol est différente sous ces latitudes des pluies mesurées à 1 m, cas des pluies moyennes utilisées comme données d'entrée.
- La nature de la végétation qui était sèche lors des expériences de ruissellement au simulateur et qui est vivante en saison des pluies. Nous avons pu quantifier cette différence d'aptitude au ruissellement sur quelques parcelles suivies également en saison des pluies (cf. partie 2).

- L'évaporation que nous avons jugée négligeable au cours de la crue et que nous ne différencions pas du drainage des sols (représenté par l'indice des pluies antérieures IK) entre les averses.

- Bien d'autres paramètres : nature du réseau hydrographique qui peut perdre de l'eau avant l'exutoire par infiltration et par évaporation, ou encore en stocker dans des zones de bas-fond, par exemple.

Pour toutes les pluies naturelles ayant donné lieu à ruissellement on reconstitue des lames ruisselées calculées (Lrc) à partir de la fonction de production du bassin. On corrèle ces valeurs Lrc avec les lames réellement observées sur le bassin Lro . La fonction de calage du bassin est la droite de la régression orthogonale entre Lrc et Lro .

Le tableau n°38 récapitule les fonctions de calages pour les huit bassins étudiés.

TABLEAU N°38 : FONCTIONS DE CALAGE

BASSIN	Fonction de calage	Période d'observation	Coefficient de corrélation	Nombre d'observations
JALAFANKA	$Lr_o = 0,69 Lrc$	1976-1982	0,84	63
POLAKA	$Lr_o = 0,48 Lrc$	1976-1980	0,77	77
GAGARA E.	$Lr_o = 0,66 Lrc$	1985	0,91	15
GAGARA O.	$Lr_o = 0,80 Lrc$	1985	0,85	15
KOGERE	$Lr_o = 0,60 Lrc - 2,3$	1984	0,91	9
BINNDE	$Lr_o = 1,39 Lrc$	1982-1983	0,88	38
KAZANGA	$Lr_o = 1,10 Lrc$	1982	0,89	16
KUO	$Lr_o = 0,44 Lrc - 5,51$	1974-1976	0,93	17

La figure n°53 donne l'exemple de la fonction de calage pour le bassin de BINNDE.

La pente de la fonction de calage est inférieure à 1 pour six bassins sur huit. Elle est supérieure à 1 pour les bassins emboîtés de BINNDE et de KAZANGA. Une pente inférieure à 1 peut s'interpréter comme une perte d'eau (évaporation, infiltration) au cours du cheminement de la lame ruisselée vers l'exutoire. Une pente supérieure à 1 est plus difficile à concevoir. La diminution de l'infiltration par accélération du ruissellement sur les pentes des versants est une explication possible. Comme il a été signalé dans la description des bassins (§ 2.1.3), les bassins de BINNDE et de KAZANGA ont un relief plus accusé que les autres bassins. Une autre explication serait un

important ruissellement hypodermique mis en évidence à BINNDE (ph 6, pl IV) ou un ruissellement dans les fissures.

La différence entre les pentes des fonctions de calage calculées pour les bassins de GAGARA EST et GAGARA OUEST trouve également son explication dans la description morphologique de ces deux bassins (§ 2.1.1). La partie orientale du bassin de GAGARA EST est une plaine marécageuse formée d'un chapelet de mares plus ou moins endoréïques où se perd une bonne part du ruissellement.

BASSIN DE BINNDE
Fonction de calage

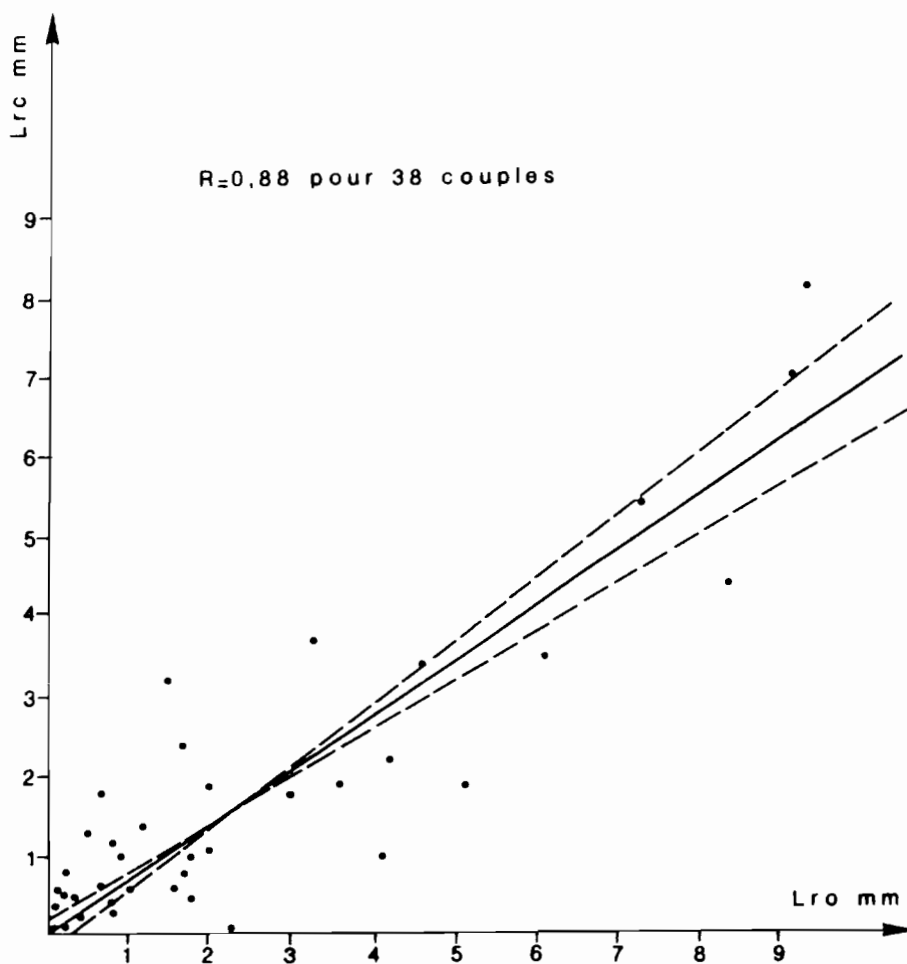


Fig-53-

4.1.3. Application de ce modèle à l'ensemble des bassins étudiés.

Dans une première étape, ce modèle a été appliqué en considérant l'ensemble des parcelles testées sur le bassin, chacune étant représentative d'une surface élémentaire.

Le tableau n° 39 donne par bassin le nombre de paramètres déterminés pour l'application du modèle, fonction de calage comprise. Ce nombre varie en fonction du nombre de surfaces élémentaires cartographiées.

Tableau n° 39 nombre de paramètres utilisés dans le modèle de re-constitution des lames ruisselées.

BASSIN	Nbre de parcelles	Nbre d'équations	Nbre de paramètres dans le modèle
JALAFANKA	3	3	17
POLAKA	9	9	47
GAGARA E.	12	16	82
GAGARA O.	12	16	82
KOGNERE	10	18	92
BINNDE	8	14	72
KAZANGA	14	22	112
KUO	10	12	62

Pour visualiser l'ajustement de ce modèle nous représentons à titre d'exemple les lames ruisselées calculées après la phase de calage, en fonction de celles observées. pour le bassin de BINNDE (fig. n° 54). Le nuage de points autour de la première bissectrice est assez dispersé en raison d'une part des hypothèses qu'on a faites sur la forme des pluies journalières dont les pluies simulées ne constituent qu'une image très imparfaite qui ne traduit pas leur diversité, et d'autre part de l'imprécision de la mesure de la lame effectivement ruisselée.

L'ANNEXE n° 7 rassemble les résultats de cette modélisation sur les bassins de GAGARA, KOGNERE, BINNDE, KAZANGA, et KUO.

AJUSTEMENT DU MODELE SIMULATEUR - BASSIN DE BINNDE

BASSIN=1

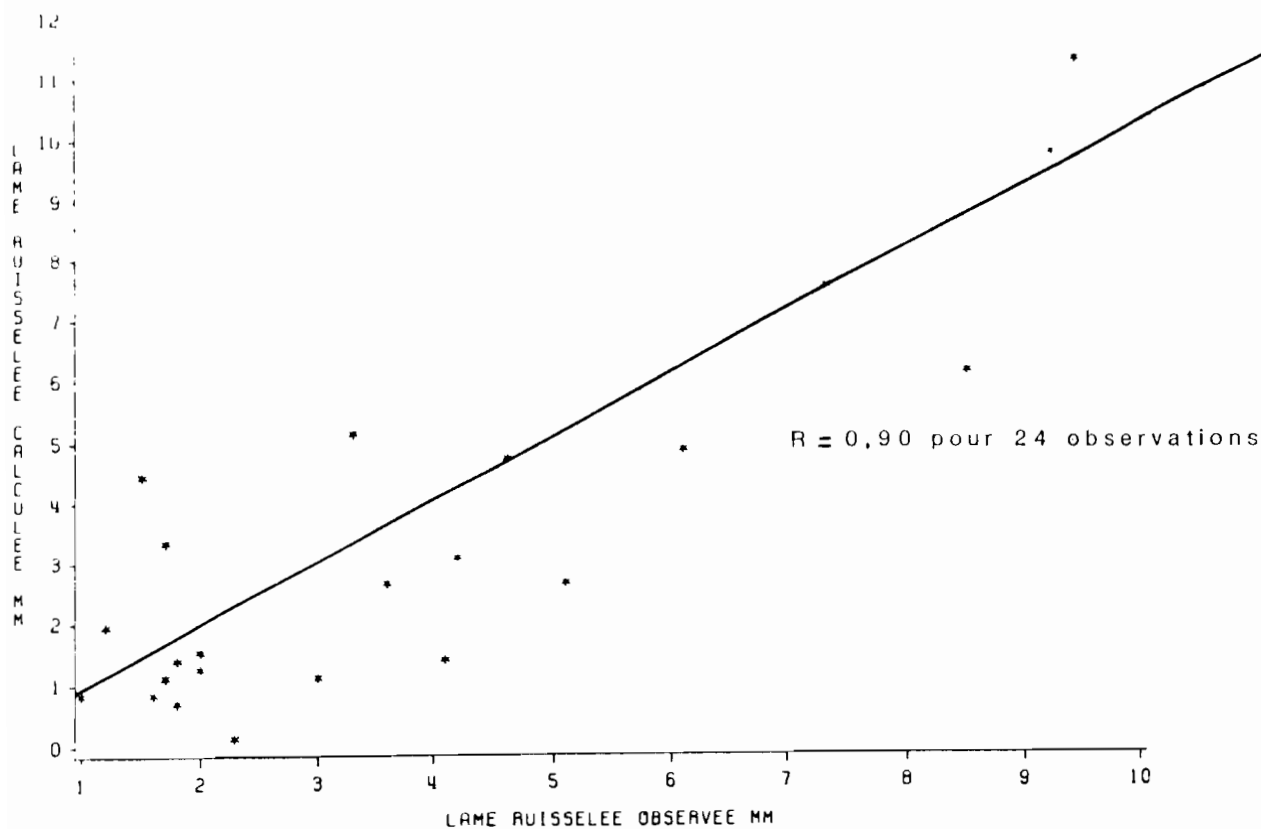


Fig-54-

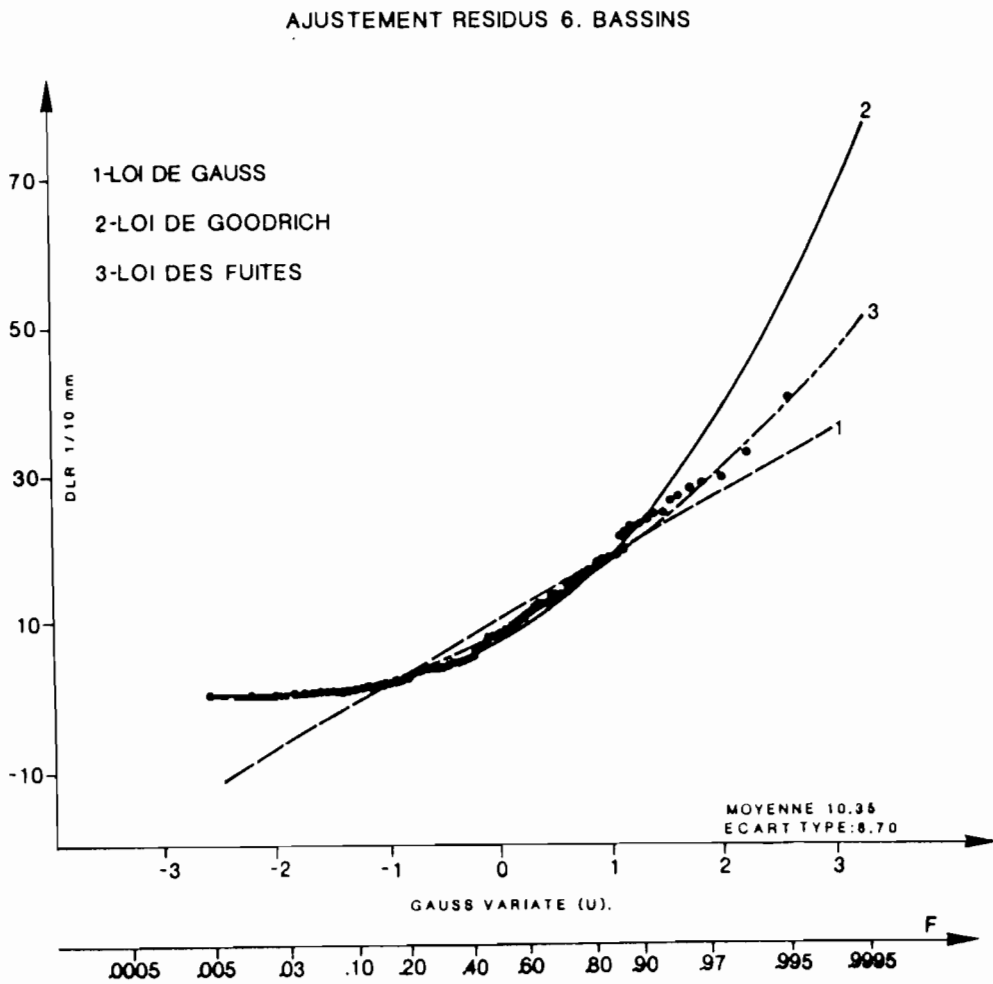
Pour avoir une idée de la précision de la reconstitution de la lame ruisselée par ce modèle, nous avons cherché les caractéristiques statistiques de la série des erreurs absolues ($D = \text{lame ruisselée observée} - \text{lame ruisselée calculée}$ par le modèle). Les chroniques de D obtenues sur six bassins ont été réunies pour former un seul échantillon de 102 valeurs.

Les bassins de JALAFANKA et de POLAKA n'ont pas été pris en compte parce que les protocoles de pluies simulées étant différents, le modèle de reconstitution des lames ruisselées n'est pas totalement semblable (CHEVALLIER, 1982)

Nous avons préféré prendre, comme critère de précision de la reconstitution, l'erreur absolue plutôt que l'erreur relative : une erreur de reconstitution même de plus de 100% sur une petite

lame ruisselée est moins importante qu'une erreur de quelques % sur une forte lame ruisselée dans ce genre de comparaison.

On a cherché un ajustement statistique sur la série des erreurs absolues. Le graphique n° 55 montre que le meilleur ajustement est obtenu avec la loi des "fuites".



	sur les observations	sur l'ajustement (loi des "fuites")
Moyenne	1,0 mm	1,0 mm
Médiane	0,8 mm	0,8 mm
Mode	0,7 mm	0,5 mm
P(D = 4 mm)	0,995	0,995

Cette précision de la reconstitution du volume des crues est acceptable d'autant plus que c'est sur les plus petites lames ruisselées que la différence "lame ruisselée observée - lame ruisselée reconstituée" est forte. L'erreur "modale" peut être prise ici comme représentative de la performance du modèle : c'est l'erreur la plus probable qui est commise lors d'une reconstitution.

4.1.4. Validité et critique de ce modèle.

Pour valider un modèle il est classique de vérifier son fonctionnement sur des valeurs observées non utilisées dans sa phase de calage.

L'étude sur le comportement moyen des bassins a montré que les bassins de BINNDE et de KAZANGA ont eu un fonctionnement semblable pendant les périodes ancienne et récente. C'est également pour ces bassins que nous avons le plus d'observations dans les deux périodes. Nous avons donc reconstitué sur ces deux bassins les lames ruisselées observées dans la période 1961-1963 à partir de la fonction de production établie avec le simulateur de pluie (période 1982-1983). On vérifie que la fonction de calage calculée avec les données de la période ancienne n'est pas significativement différente de celle obtenue avec les données récentes (tableaux 40 et 41).

Tableau n°40

Bassin de BINNDE : comparaison des reconstitutions sur les périodes 1961-1963 et 1982-1983

Période d'observation	Fonction de calage	Nbre d'observations	R
1982-1983	$Lrc = 1,39 Lro$	38	0,88
1961-1963	$Lrc = 1,31 Lro$	41	0,77

Tableau n°41

Bassin de KAZANGA : comparaison sur les périodes 1961-1963 et 1982-1983

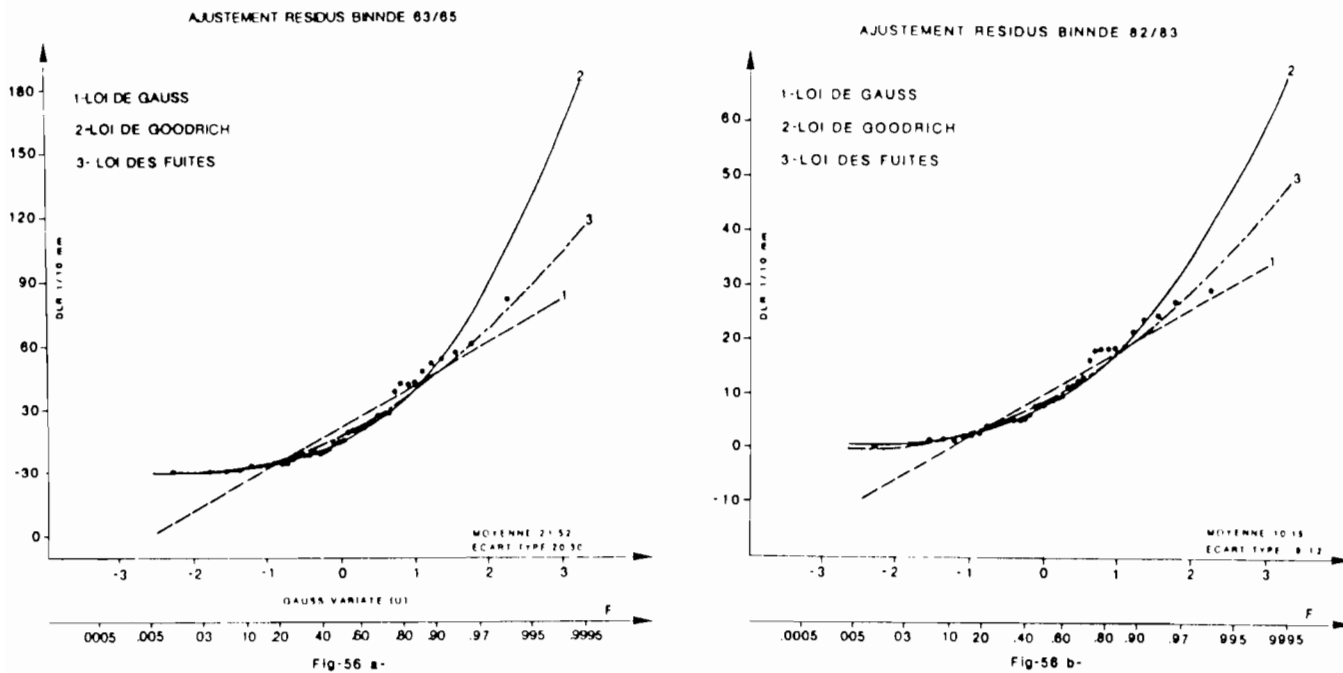
Période d'observation	Fonction de calage	Nbre d'observations	R
1983	$Lrc = 1,10 Lro$	16	0,80
1961-1963	$Lrc = 1,28 Lro$	32	0,72

En utilisant le modèle calé sur la période 1982-83, nous avons reconstitué les volumes de crues de la période 1961-63 sur le bassin de BINNDE.

La figure n° 56 compare les distributions statistiques des erreurs absolues (lames observées - lames calculées) pour les deux périodes. Nous remarquons que pour les deux séries, c'est la même loi (loi des "fuites") qui fournit le meilleur ajustement.

	D période 82-83	D période 61-63
Moyenne	1,0 mm	2,1 mm
Médiane	0,8 mm	1,8 mm
Mode	0,5 mm	0,8 mm

La plus grande dispersion des valeurs dans la période ancienne doit s'expliquer par une moins bonne connaissance des volumes de crues. Il ne faut pas oublier que lors de l'étude 1963-1965 l'effort des équipes de terrain portait sur cinq bassins versants s'étendant sur une superficie de 570 km² alors qu'en 1982-83 une équipe de jaugeage est restée à demeure permettant l'établissement d'une relation hauteur débit très fiable (plus de cent jaugeages). L'influence de la végétation plus abondante dans la période ancienne peut être aussi un facteur explicatif.



Un autre critère de validité de ce modèle est la comparaison des paramètres statistiques calculés sur l'échantillon des lames ruisselées observées et sur un échantillon de lames ruisselées reconstituées par ce modèle (tableau n° 42).

Tableau 42 : comparaison des séries : lames ruisselées calculées et observées sur le bassin de KAZANGA.

Variable	Nombre d'observations	Moyenne 1/10 mm	Ecart type	Valeur max mm	CV
Lames ruisselées reconstituées sur 34 ans	453	56,1	62,2	50,1	110,69
Lames ruisselées observées sur 4 saisons	54	53,3	51,1	29,7	95,9

* Seules les lames ruisselées supérieures ou égales à 0,7 mm ont été prises en compte.

Nous avons appliqué ce modèle à la série des observations pluviométriques journalières du poste de MANGA (poste de référence pour le bassin de KAZANGA). Sur la figure n°57 nous avons reporté les lames ruisselées reconstituées à partir de la chronique des pluies du poste de MANGA (34 ans d'observations) et les lames ruisselées réellement observées (4 ans) en fonction de la pluie journalière. Les pluies journalières ont été multipliées par un coefficient d'abattement moyen calculé par régression entre les pluies ponctuelles au poste de MANGA et les pluies moyennes sur le bassin pendant la période d'observation commune (1961-63 et 1983). Ce coefficient a été évalué à 0,81.

On remarque une dispersion plus importante pour les valeurs observées que pour les valeurs calculées. Cette dispersion s'explique déjà par les hypothèses du modèle mais aussi par les écarts entre pluie ponctuelle à MANGA (10 km du bassin) et les pluies moyennes du bassin.

Le tableau n° 42 qui compare les paramètres statistiques de la série des lames ruisselées calculées sur la période d'observation du poste de MANGA et celles observées pendant la période de fonctionnement du bassin versant expérimental permet de valider ce modèle.

4.1.5. Stabilité de la fonction de calage.

La détermination statistique des paramètres de la fonction de calage (régression linéaire) est influençable par l'échantillonnage surtout lorsque le nombre d'individus est faible. La règle adoptée est d'utiliser les crues observées pendant au moins une saison des pluies pour déterminer ces paramètres.

La stabilité de la fonction de calage a pu être appréciée sur un petit bassin versant bien observé pendant 5 ans dans le sud ouest du CONGO et sur lequel a été réalisée une campagne de

simulation de pluie : bassin versant de la COMBA dans la région de MINDOULI (1,18 km²) (CASENAVE et al, 1985).

Lames ruisselées observées (4 années) ruisselées reconstituées (34 années)
sur le bassin de KAZANGA

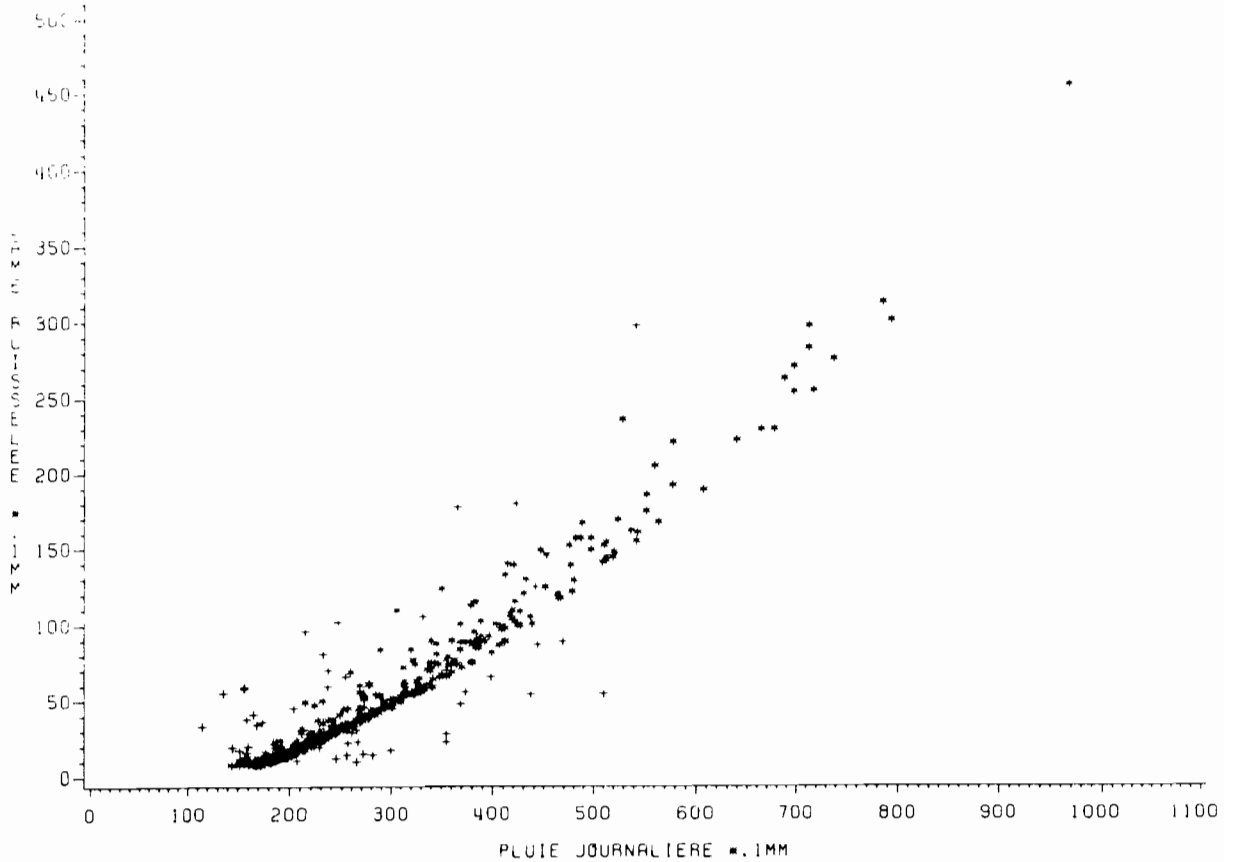


Fig-57-

Le tableau n° 43 compare les paramètres de la fonction de calage calculée sur des années différentes.

Tableau n° 43 - Paramètres de la fonction de calage sur le bassin de la COMBA.

Période d'observation	Fonction de calage	Nbre d'observations	R
1973	$Lrc = 1,184 Lro - 0,579$	17	0,909
1974	$Lrc = 1,191 Lro - 2,343$	51	0,914
1975	$Lrc = 1,083 Lro - 2,813$	42	0,935
1976	$Lrc = 1,156 Lro - 2,914$	16	0,962
1972 * à 1976	$Lrc = 1,157 Lro - 2,80$	109	0,923

* en 1972 deux crues seulement ont été observées.

Quelle que soit l'année choisie pour leur détermination, les paramètres de la fonction de calage ne sont pas significativement différents.

4.1.6. Réduction du nombre de paramètres du modèle.

La subdivision du bassin en un nombre important de surfaces élémentaires implique l'ajustement de très nombreux paramètres (équation de ruissellement, pourcentage de chaque surface ...). Les études du ruissellement sous pluie simulée ont montré que plusieurs parcelles testées sur un même bassin ont des comportements assez voisins. Nous avons vu ainsi, sur le bassin de BINNDE qu'il est possible de considérer trois familles de parcelles (sol nu, végétation naturelle, sol cultivé). De même sur les bassins de GAGARA les parcelles sur dune donnent des résultats voisins tout comme celles installées sur les glacis d'épandages gravillonnaires et celles du bas-fond.

Pour tester l'influence du nombre de parcelles sur les résultats de la modélisation nous avons comparé sur le bassin de BINNDE les résultats obtenus à partir du modèle utilisant les huit parcelles installées, à ceux d'un modèle qui en utiliserait simplement trois judicieusement choisies :

- Les parcelles qui donnent un ruissellement médian pour les trois unités : sol nu, sol cultivé et végétation naturelle.

Les distributions statistiques des deux séries de "D" (I_r observée - I_r calculée)(78 valeurs) sont représentées sur la figure n° 58.

	Modèle 8 parcelles	Modèle 3 parcelles
Moyenne observée	1,6 mm	1,3 mm
Médiane observée	1,0 mm	0,9 mm
Mode probable	1,0 mm	0,8 mm
D max observé	8,2 mm	5,5 mm

La réduction du nombre de zones homogènes à prendre en compte n'a pas modifié la précision de la reconstitution ; mais le choix d'un nombre minimal de parcelles à considérer a été faite *a posteriori*, après avoir comparé les résultats de ruissellement sur toutes les parcelles. L'amélioration apparente n'est pas significative, on a choisi, le jeu de trois parcelles qui donnait le meilleur résultat.

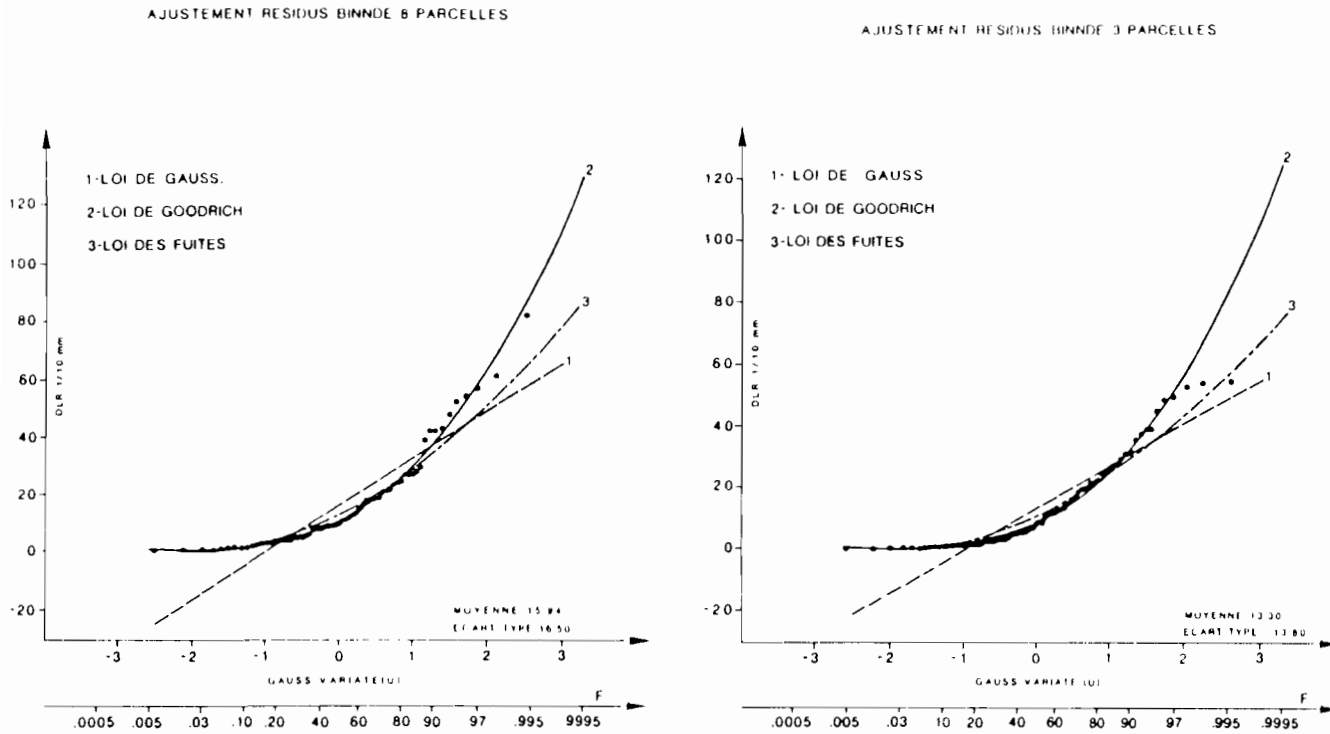


Fig-58 a-

Fig-58 b-

4.1.7 Prédétermination de la crue d'étude.

A titre d'application de ce modèle nous avons cherché à évaluer le volume de la crue d'étude sur chaque bassin. La pluie journalière ponctuelle de récurrence décennale au poste de référence a été multipliée par un coefficient d'abattement comme au § 3.2.5 Pour représenter les conditions moyennes de ruissellement il a été pris un indice des pluies antérieures médian pour une forte pluie ayant lieu en milieu de saison des pluies. D'après SEGUI (1986) l'indice des précipitations antérieures médian pour une pluie décennale ayant lieu au milieu de la saison des pluies a une valeur comprise entre 6 et 12 mm en fonction de la latitude en zone soudano-sahélienne.

Nous avons adopté $IK = 10$ mm pour l'ensemble des bassins.

Le tableau n° 44 rassemble les valeurs de la lame ruisselée estimée par les trois méthodes suivantes.

- LP1 estimation par la courbe du comportement moyen du bassin sans faire intervenir IK .
 $(Lr = \sqrt{p^2 + a^2} - a)$
- LP2 estimation par les relations statistique $Lr = f(P, IK)$ établies directement à l'aide des observations de saison des pluies. (cf. 3.2)
- LP3 estimation par le modèle simulateur.

Tableau n°44 : lame ruisselée de la crue d'étude.

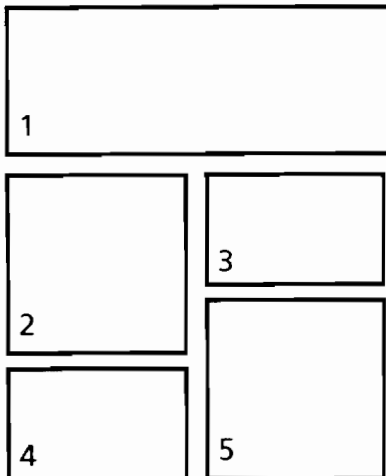
BASSIN	Pluie décennale ponctuelle mm	LP1 mm	LP2 mm	LP3 mm
JALAFANKA	83,6	57,8	-	49,4
POLAKA	83,6	32,8	-	25,2
GAGARA E.	83,6	45,9	41,5	40,2
GAGARA O.	83,6	49,6	50,4	43,7
KOGNERE	95,9	24,6	17,4	20,0
BINNDE	101,7	34,4	32,2	33,1
KAZANGA	101,7	25,4	20,5	28,4
KUO	98,0	17,1	-	19,0

Nous vérifions que ces trois estimations sont du même ordre de grandeur.

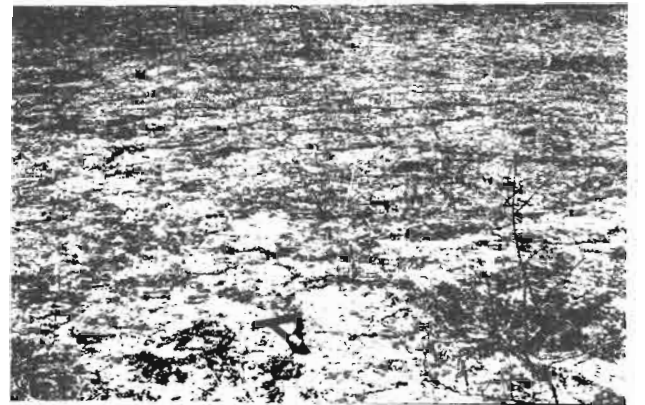
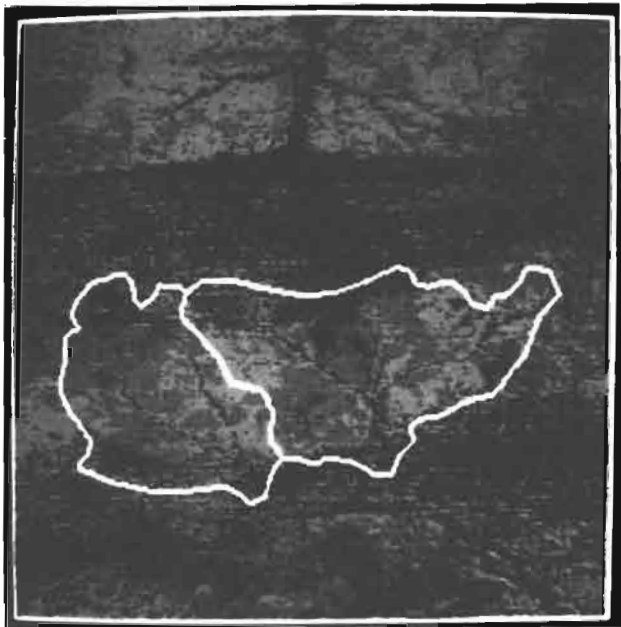
Il est donc possible d'obtenir une estimation correcte du volume de la crue d'étude à partir d'une campagne de simulation de pluies et de quelques observations pluies-débits pour déterminer la fonction de calage. Cette estimation nécessite :

- Une cartographie des états de surfaces. Sa réalisation demande une quinzaine de jours de travail dont la moitié sur le terrain si l'on dispose de documents topographiques (carte au 1/200 000ème) et des photo aériennes de bonne qualité.
- Une campagne de simulation de pluies. Elle nécessite la présence d'un hydrologue et de quatre manoeuvres pendant trois semaines sur le bassin versant. Les infrastructures pour le bon déroulement d'une telle campagne doivent comprendre : le simulateur de pluie et ses accessoires, un nombre de véhicules suffisant (au moins deux) et un campement.
- Les observations pluies-débits à l'échelle du bassin versant pendant une saison des pluies. Une équipe de deux jaugeurs peuvent se charger de l'ensemble des mesures (débits, pluviométrie, pluviographie).

PLANCHE 5
UNITES CARTOGRAPHIQUES ; ZONES HOMOGENES
PARTICIPANT AU RUISSELLEMENT



1. Sol nu à pellicule, B.V. de GAGARA
2. Cartographie des unités de surface à partir de l'analyse multi-spectrale de l'image LANDSAT. B.V. de GAGARA.
3. Sol à caractère verticale. B.V. de KAZANGA.
4. Végétation naturelle de saison sèche. B.V. de KOGNERE.
5. Sol gravillonnaire sur latérite. B.V. de KUO.



4.2. MODELISATION DU RUISSELLEMENT A PETITS PAS DE TEMPS AVEC DISCRETISATION DE ZONES PLUVIOMETRIQUES HOMOGENES.

Pour tenter une reconstitution plus fidèle du ruissellement, nous avons cherché à transposer les relations établies sous pluies simulées dans un modèle à discrétisation spatiale.

Une modélisation à discrétisation spatiale des écoulements de surface a été mise au point dès 1972 à l'ORSTOM par GIRARD en collaboration d'abord avec des chercheurs de l'Institut National de la Recherche Scientifique du QUEBEC (INRS-Eau) (GIRARD et *al*, 1972) ; plus récemment les hydrogéologues de l'Ecole Nationale Supérieure des Mines de PARIS se sont associés à ce travail pour y introduire la composante souterraine (GIRARD et *al*, 1981, GIRARD et LEDOUX, 1983) et réaliser un modèle de simulation conjointe des écoulements de surface et des écoulements souterrains dans un système hydrologique (modèle couplé).

CHEVALLIER et *al* (1985) ont introduit dans ce modèle d'une part, une fonction de production dérivant directement des équations obtenues sur les parcelles de simulation de pluies et d'autre part, la possibilité d'utiliser la télédétection pour constituer le fichier physiographique du bassin.

Nous avons cherché à transposer ce travail réalisé sur les bassins de la Mare d'OURSI aux bassins versants de GAGARA en utilisant les mêmes paramètres de calage de l'image satellitaire et de la fonction de production dans les objectifs suivants :

- Examiner les possibilités de transposition des données hydrologiques d'un bassin étudié à un bassin de la même région (fig. 59).
- Simuler à partir d'une averse type les hydrogrammes de crues d'étude.

L'annexe 8 présente la structure du modèle couplé, la fonction de production dérivant de la simulation de pluie, et la méthode d'interprétation de l'image satellitaire utilisée (Image LANDSAT du 4 février 1976).

L'étude que nous présentons ci-dessous a été réalisée avec la collaboration de CHEVALLIER et LORTIC et fera l'objet d'une publication (ALBERGEL et *al*, à paraître).

Le modèle à discrétisation spatiale a été mis en oeuvre d'une part en utilisant les données des parcelles de GAGARA et la carte établie au sol, d'autre part en utilisant les données de la mare d'OURSI et l'image "satellite". Nous présentons surtout les résultats de la deuxième méthode qui montre la possibilité de transposition spatiale des données hydrologiques.

NORD EST BURKINA FASO

Situation des bassins versants de la MARE D'OURSIS et de GAGARA

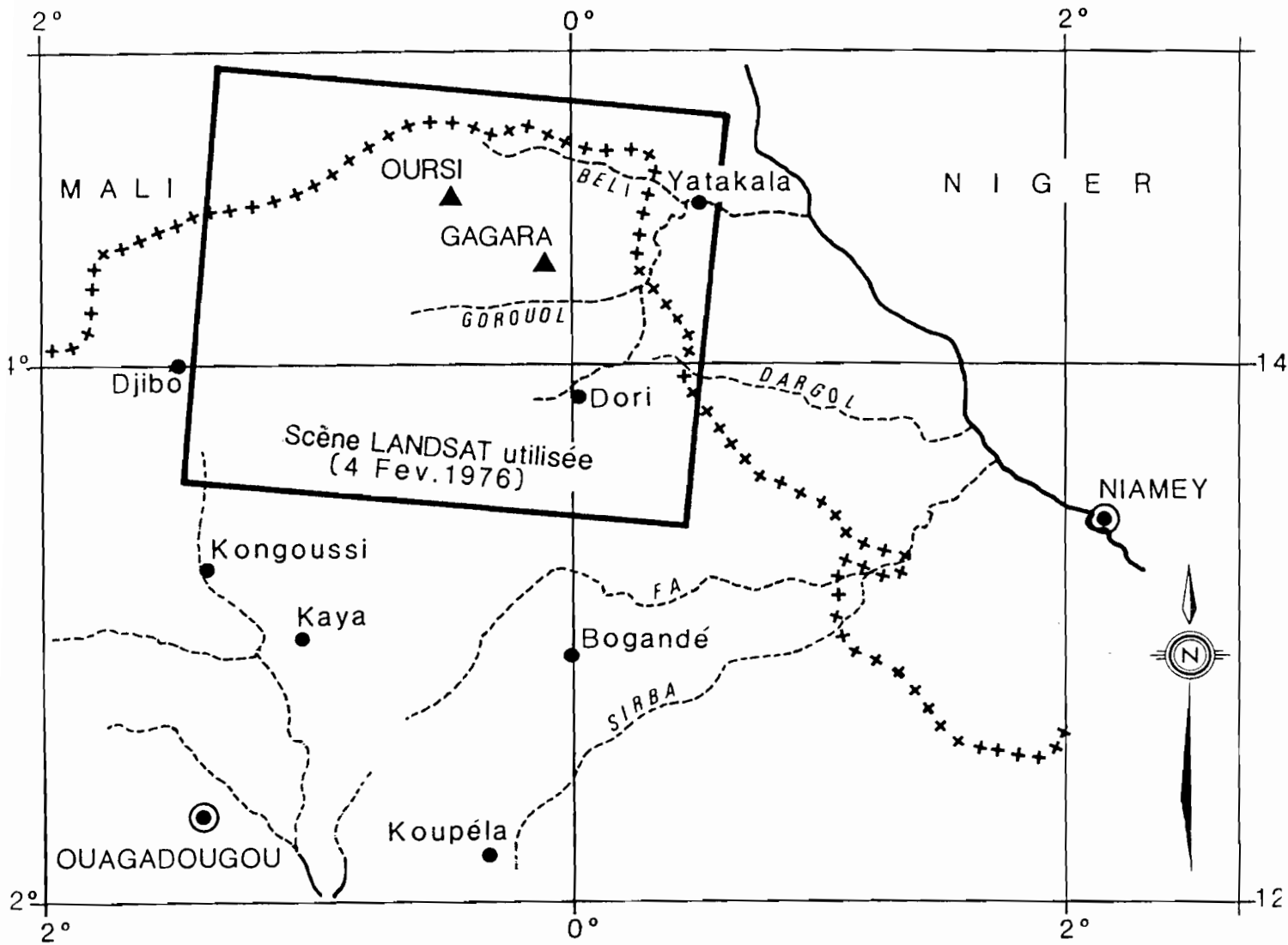


Fig. 59

EHELLE  100km

4.2.1. Principaux résultats obtenus sur la mare d'OURSI : les éléments de la transposition.

Le traitement de l'image satellitaire a consisté essentiellement en une dégradation de l'information par un regroupement en dix lots (procédure LOTERIE, ORSTOM 1977, 1978), correspondant à des plages de même signification radiométrique. La comparaison avec une "vérité sol" permet d'identifier sous un terme qualitatif "thème" chacun de ces lots. (Tableau 45).

Tableau n° 45 - Thèmes de surface définis à OURSI (LOINTIER et LORTIC, 1984).

1. Sables vifs	6. arènes, sables grossiers
2. Buttes	7. Pellicule indurée
3. Altération avec cuirasse	8. Sables fixés, cordons dunes
4. Blocaille de roches diverses	9. Végétation
5. Epanchage gravillonnaire	10. Mare

Sur chacun de ces "thèmes" de surface une expérimentation sous pluie simulée a permis de déterminer les paramètres a, b, c, d de l'équation de la lame ruisselée en fonction de la pluie.

$$Lr = aP + bIK + cP.IK + d$$

Ces paramètres sont ceux de la fonction de production du modèle. Une application aux crues du bassin versant de POLAKA a été réalisée pour un pas de temps de 36 minutes (1/40 jours) avec un certain succès sur les trois années 1978, 1979 et 1980.

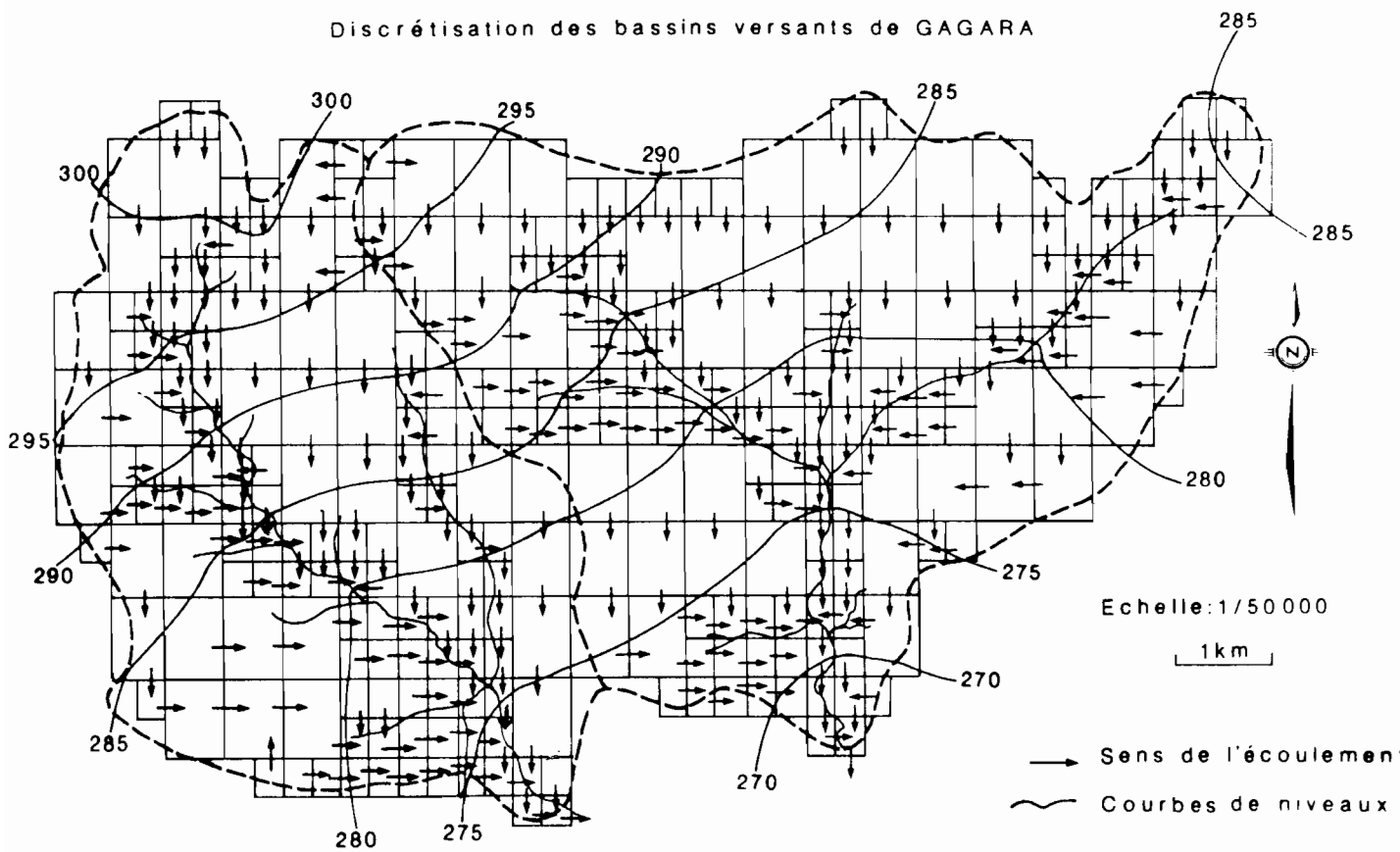
En utilisant le même traitement d'image, et en reprenant pour les dix "thèmes" de surfaces les équations de ruissellement établies sur les sols de la mare d'OURSI, le modèle à discrétisation spatiale est transposé aux bassins versants de GAGARA.

4.2.2. Application du modèle à discrétisation spatiale aux bassins versants de GAGARA.

4.2.2.1. Etablissement du fichier physiographique des bassins.

Un découpage automatique des bassins versants de GAGARA en carreaux de 100 pixels ($100 \times 0,079 \times 0,056 \text{ km} = 0,44 \text{ km}^2$) a été réalisé. Pour les contours des bassins comme pour le tracé du réseau hydrographique, les grandes mailles ont été subdivisées en 4 sous-mailles de 25 pixels ($0,11 \text{ km}^2$)

Nous obtenons ainsi la discrétisation en mailles représentées à la figure 60.



On vérifie que les superficies discrétisées sont peu différentes de celles données par les limites naturelles (Tableau n° 46).

Tableau n°46 - Surface des bassins versants de GAGARA (surface réelle et surface discrétisée)

Bassin versant	Nombre de mailles	Superficie discrétisée km ²	Superficie réelle km ²
GAGARA EST	178	34,60	35,0
GAGARA OUEST	136	25,65	24,3

- 33 mailles "rivière" représentent les thalwegs principaux du bassin ouest et 46 ceux du bassin-est.

- Le sens d'écoulement d'un carreau à son voisin est fixé par le relief discrétisé à partir de la carte topographique au 200 000ème et une étude en stéréographie des photographies aériennes au 1/50 000ème

- Six zones pluviométriques sont définies à partir des six pluviographes installés dans les bassins (fig. n°61).

DEFINITION DE SIX ZONES PLUVIOGRAPHIQUES

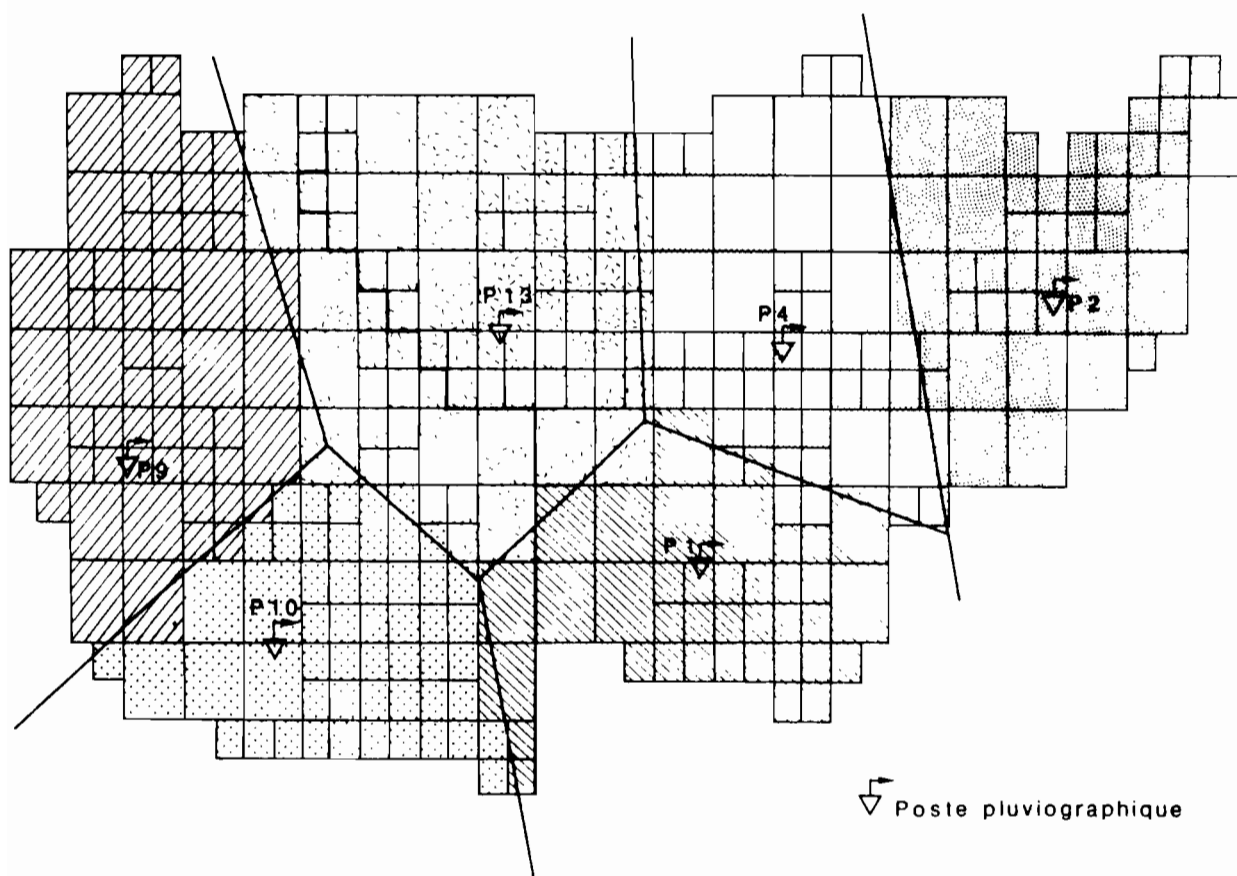


Fig-61-

Pour chacune des 314 mailles qui définissent les deux bassins versants il a été établi l'histogramme des pixels de chaque lot. L'ensemble de ces histogrammes forme le fichier des données de surface des bassins. A ce fichier on associe celui des altitudes par mailles et celui du sens de l'écoulement d'une maille à l'autre (en fonction de la topographie et du réseau hydrographique principal) pour obtenir le fichier des données physiographiques des bassins.

Le tableau n° 47 récapitule par "thème" les surfaces occupées pour chaque bassin.

Tableau 47 - "Thème" de surface, suivant la légende établie à OURSI, des bassins de GAGARA.

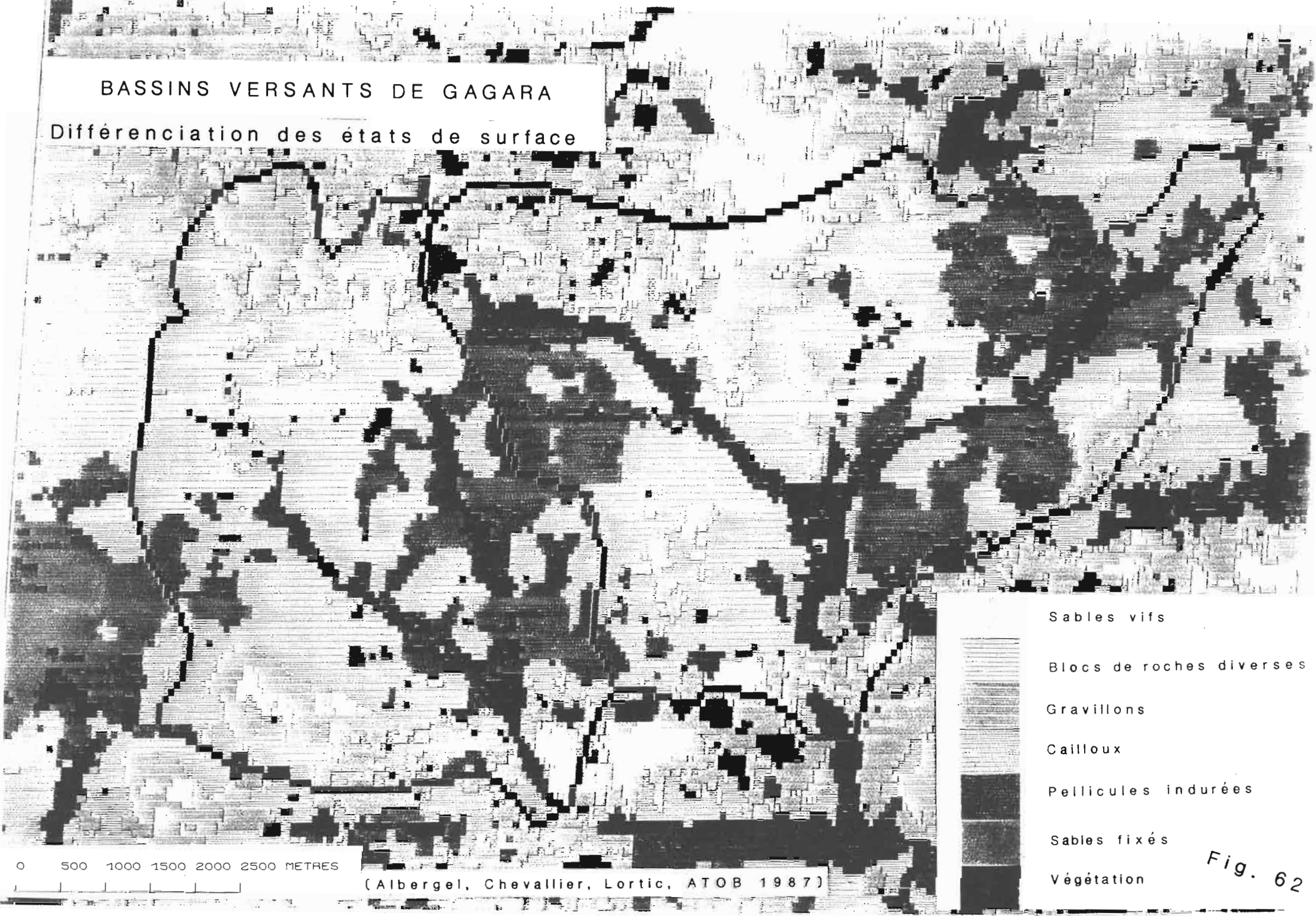
Thème de surface	Surface représentée sur le bassin-est km2	Surface représentée sur le bassin-ouest km2
1. sables vifs	0,94	0,58
2. buttes	0	0
3. altération de cuirasse	0	0
4. blocaille de roches diverses	0	0,01
5. épandage gravillonnaire	4,18	2,61
6. arènes, sables grossiers	13,29	12,77
7. pellicules indurées	9,03	5,16
8. sables fixés, cordons dunes	4,60	2,88
9. végétation	2,56	1,64
10. mare	0	0

La carte obtenue à partir de l'analyse de l'image "satellite" (fig. n°62) est à rapprocher de celle établie au sol (VALENTIN, 1986, fig. 50 § 4.1.1.2.). Les 13 thèmes de surface mis en évidence par une cartographie au sol sont regroupés en 7 thèmes sur la cartographie "satellite". Après ce regroupement, les limites des grandes unités cartographiques sont à peu près respectées et les correspondances entre thèmes de l'image satellitaire calée sur les bassins de la mare d'OURSI et ceux de la carte au sol sont celles du tableau n°48.

On remarquera que les thèmes : *buttes (gabbros, roches vertes)*, *altération de cuirasse*, *mare (eau libre)* non présents sur les bassins de GAGARA ne sont pas apparus (aucun pixel avec ces numéros de lots).

BASSINS VERSANTS DE GAGARA

Différenciation des états de surface



Sables vifs

Blocs de roches diverses

Gravillons

Cailloux

Pellicules indurées

Sables fixés

Végétation

Fig. 62

0 500 1000 1500 2000 2500 METRES

(Albergel, Chevallier, Lortic, ATOB 1987)

Tableau 48 - Correspondance entre thèmes de la carte au sol et thème de la carte satellite.

Unités définies sur la carte au sol (VALENTIN, 1986)	Unités définies sur l'image satellite calée sur une vérité sol réalisée à OURSI
Argile à fentes fines et grandes termitières Argile à fentes fines sans termitières Argile à fentes larges	Végétation de bas fond
Surface nue (qqes microbuttes sabl.) Surface sableuse à taches nues	Pellicule indurée
Surface caillouteuse Surface gravillonnaire à taches nues	Arène, sable grossier
Dunes à taches nues	Sable vif
Association de surface gravillonnaire et de dune Surface gravillonnaire à cailloux Surface nue avec quelques cailloux	Epandage gravillonnaire
Dune cultivée	Sable fixé, cordons dunes
Inselberg	Blocaille de roches diverses

Les légendes établies pour la réalisation de la cartographie à partir de l'image LANDSAT sur OURSI correspond assez bien aux légendes établies par VALENTIN sur la carte au sol excepté pour les surfaces caillouteuses qui ressortent sous une légende inappropriée "arène et sable grossier". La différenciation entre les unités par les réflectances radiométriques semble se faire sur un critère de rugosité apparente et de présence ou absence de végétation plutôt que sur un critère nature du sol. C'est ainsi que nous trouvons réunis dans un même lot l'ensemble des surfaces nues, les surfaces à gravillons...

Les surfaces caillouteuses cartographiées par VALENTIN correspondent à des versants sans végétation avec "pavage" de cailloux inclus dans la pellicule de surface ou libres. La rugosité de ces surfaces se rapprochent sensiblement de celle des arènes qui bordent les granites en boules des bassins versants de la mare d'OURSI.

4.2.2.2. Reconstitution des crues.

Le tableau n°49 récapitule les valeurs des paramètres de la fonction de production et de la fonction de transfert établie par thème sur les bassins d'OURSI.

Tableau n°49 Paramètres de la fonction de production par thème de surface pour le modèle utilisant l'image LANDSAT.

Thème de surface	AA	AB	AC	AD	FN	P seuil	CQR	QR max
Sable vif	0,51	0,14	0,00	9,72	2,00	0,40	0,30	5,00
Epandage gravillonnaire	0,91	0,08	0,00	7,38	0,50	0,40	0,70	2,0
Surface caillouteuse	0,85	0,10	0,00	8,64	0,50	0,40	0,70	2,00
Pellicule indurée	0,95	0,08	0,00	7,38	0,50	0,40	0,70	2,00
Sable fixé cordon dune	0,53	0,07	0,00	8,85	1,00	0,40	0,30	5,00
Végétation de bas-fond	0,74	0,14	0,00	9,77	0,50	0,40	0,70	5,00
Blocaille de roches diverses	0,85	0,10	0,00	8,64	0,50	0,40	0,70	2,00

où AA, AB, AC, AD sont les coefficients caractéristiques de l'équation de la fonction de production. $L.r = AA.P + AB.IK + AC.P.IK + AD$

FN la valeur limite de l'infiltration pour chaque pas de temps.

CQR et QR max sont les paramètres de la loi exponentielle de transfert de surface du modèle utilisé.

P seuil = hauteur de précipitation en dessous de laquelle on considère que la précipitation est négligeable. Cette valeur permet de fractionner les averses.

Les autres paramètres d'ajustement du modèle sont les suivants :

- facteur de correction pluie au sol-pluie à 1 m. = 1,37
- évaporation $QE = 0,5$ ETP PENMANN (l'ETP est calculé sur les données d'évaporation de la station climatologique de JALAFANKA) (cf. annexe 8).
- temps de concentration = 0,3 jour pour le bassin-est et 0,2 jours pour le bassin-ouest.

Les données d'entrées sont les précipitations observées aux six pluviographes installés sur les bassins de GAGARA.

Le pas de temps de la modélisation est de 1/40 jour. La période d'étude a été limitée à celle d'occurrence des crues soit 3640 pas de temps entre le 18 juin 1985, date de la première pluie observée, et le 15 septembre.

Le tableau n° 50 compare les volumes annuels écoulés observés et calculés sur les deux bassins pour l'année 1985. A titre de comparaison, nous avons également appliqué ce modèle en utilisant pour le fichier des états de surface la carte réalisée au sol (VALENTIN, 1985) et la fonction de production calculée à partir des 12 parcelles de simulation de pluies installées à GAGARA.

Tableau n° 50 - Volumes écoulés observés et calculés annuels (1985).

Bassin	Volume écoulé observé 10 ³ m ³	Volume écoulé calculé (1) 10 ³ m ³	Volume écoulé calculé (2) 10 ³ m ³
GAGARA EST	1535	1568	1470
GAGARA OUEST	1185	1406	1176

(1) modélisation à partir de la carte au sol et des parcelles testées sur les bassins de GAGARA.

(2) modélisation à partir de l'image satellite et des parcelles testées sur le bassin de POLAKA. (OURSIS)

Remarquons qu'à l'échelle annuelle les reconstitutions de la modélisation à partir de la "carte satellite" sont du même ordre de grandeur que celles à partir de la "carte sol" et même plus proches des valeurs réellement observées.

Les figures 63, 64, 65 présentent les résultats comparés de la modélisation (trait interrompu) et de l'observation (trait plein) pour les crues les plus fortes observées sur les deux bassins pour le modèle à partir de l'image satellite et des parcelles d'OURSIS.

Pour chacune des crues représentées, les valeurs en abscisse sont les numéros des pas de temps et de jour depuis le début de la modélisation ; en ordonnée les débits moyens de pas de temps sont représentés de manière à ce que la pleine échelle soit le débit maximum observé dans l'année.

L'adéquation entre la crue observée et la crue modélisée est assez grossière, mais la forme de la courbe, les volumes, et, dans une moindre mesure, les débits sont à peu près respectés.

A cette différence qu'on constate entre les hydrogrammes observés et calculés, nous voyons essentiellement deux raisons :

- Le pas de temps choisi (36 minutes) est important en regard du temps de montée des crues et représente mal les corps d'averses.
- La qualité des données de calcul n'est pas parfaite : précision de la courbe d'étalonnage, calage en temps des pluviographes.

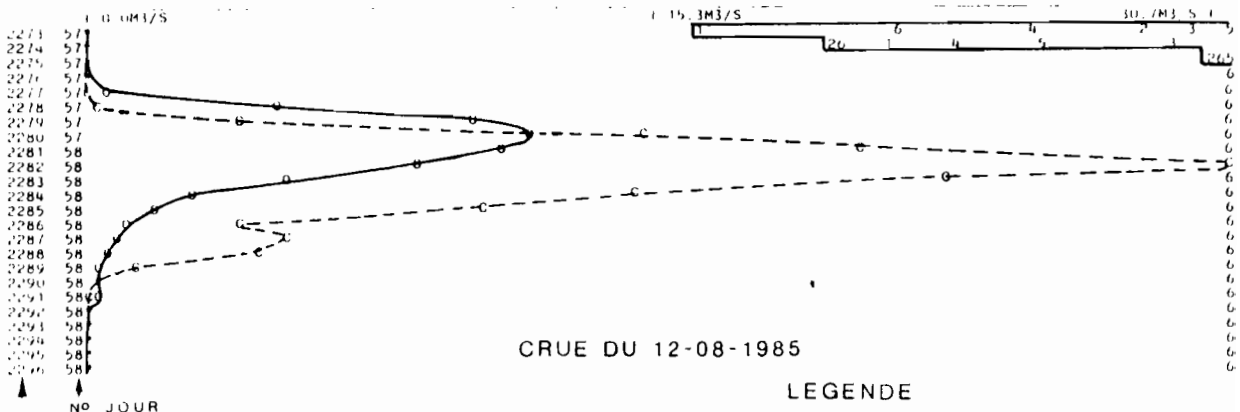
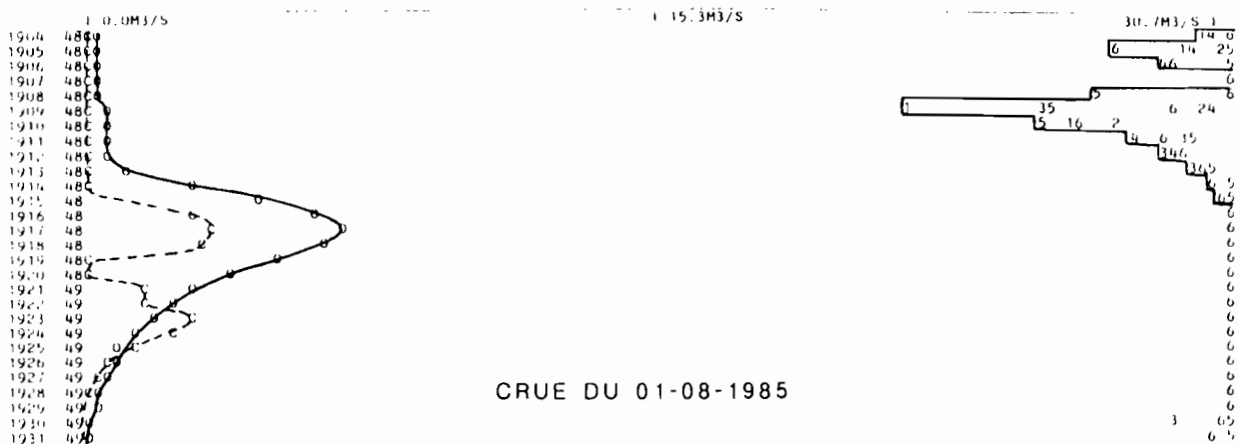
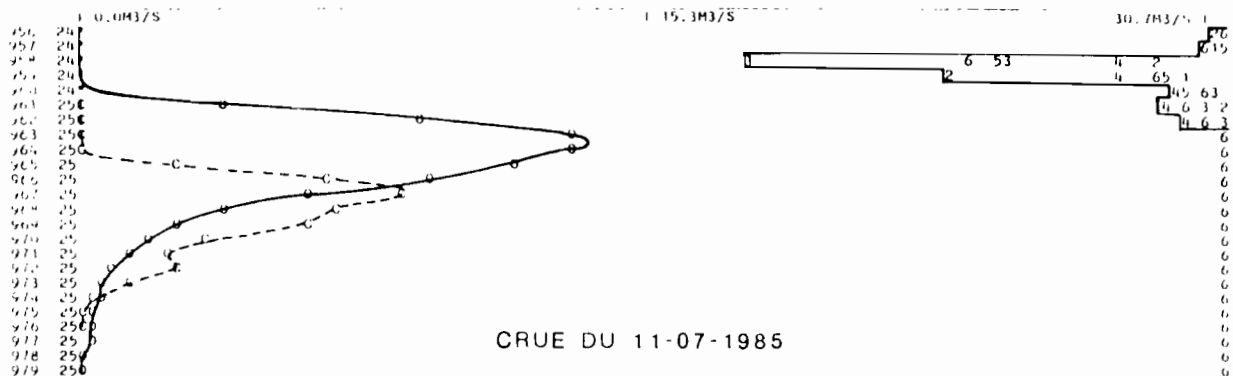
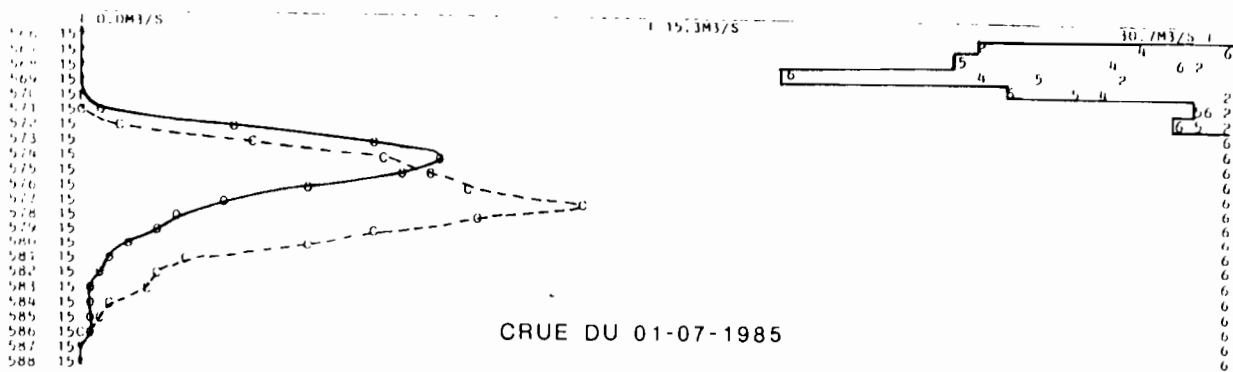
Remarque : Dans la fonction de production utilisée (cf. annexe 8) nous avons conservé la possibilité d'introduire un paramètre de calage correspondant à la fonction de calage du modèle au pas de temps journalier. Ce paramètre permet de multiplier par un facteur correctif l'ensemble des lames ruisselées calculées. Sa valeur est obtenue par optimisation pour que le volume annuel écoulé calculé corresponde au volume annuel écoulé observé.

La valeur de ce paramètre fixée à 1 a donné satisfaction. Bien que ce calcul ne soit pas très significatif avec une seule année de mesure, il rend possible une interprétation de la fonction de calage du modèle au pas de temps journalier.

- La fonction de calage du modèle au pas de temps journalier par zone contributive représente les facteurs pris en compte dans la modélisation à discrétisation spatiale : l'hétérogénéité de la pluie, l'évaporation, les échanges de la rivière avec le niveau sous-terrain, la correction pluie au sol-pluie à 1 mètre.

GAGARA EST

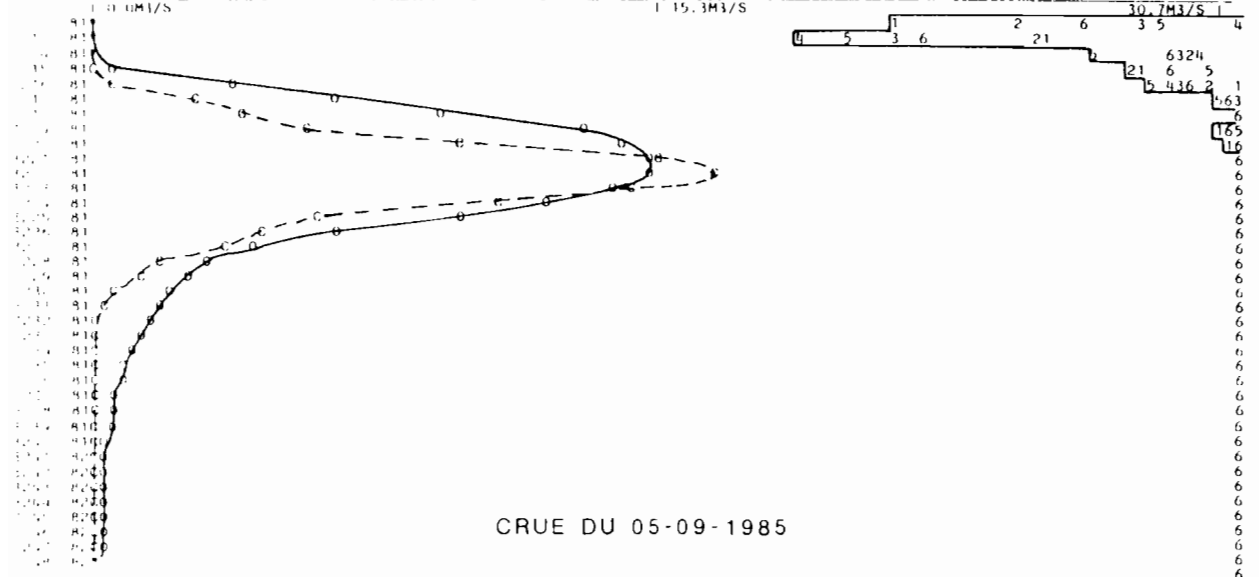
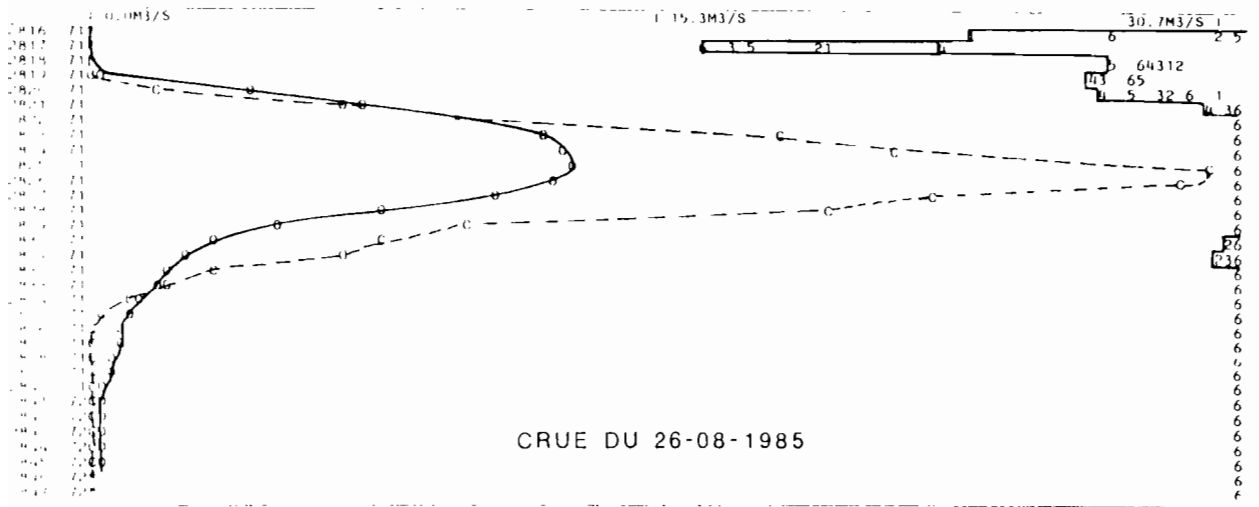
MODELISATION DES ECOULEMENTS A PARTIR DE L'IMAGE LANDSAT



LEGENDE

- DEBIT OBSERVE
- - - DEBIT CALCULE
- 1-6 HYETOGRAMME DES POSTES 1-6

Fig-63-



GAGARA OUEST

MODELISATION DES ECOULEMENTS A PARTIR DE L'IMAGE LANDSAT

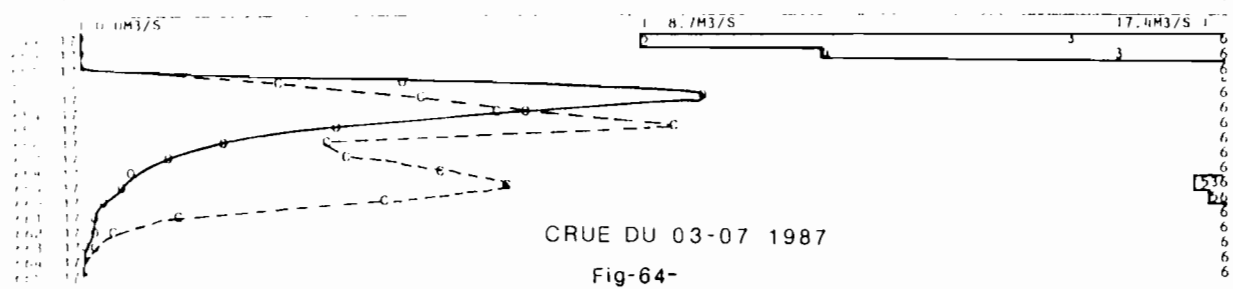
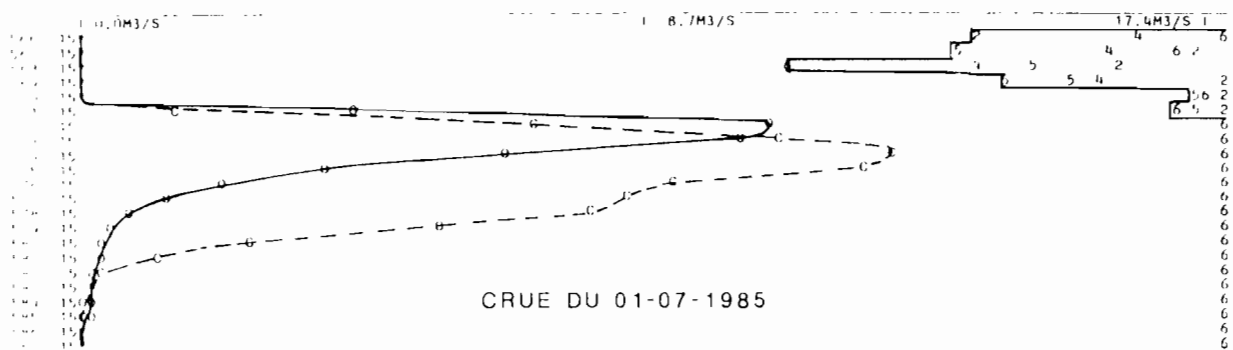


Fig-64-

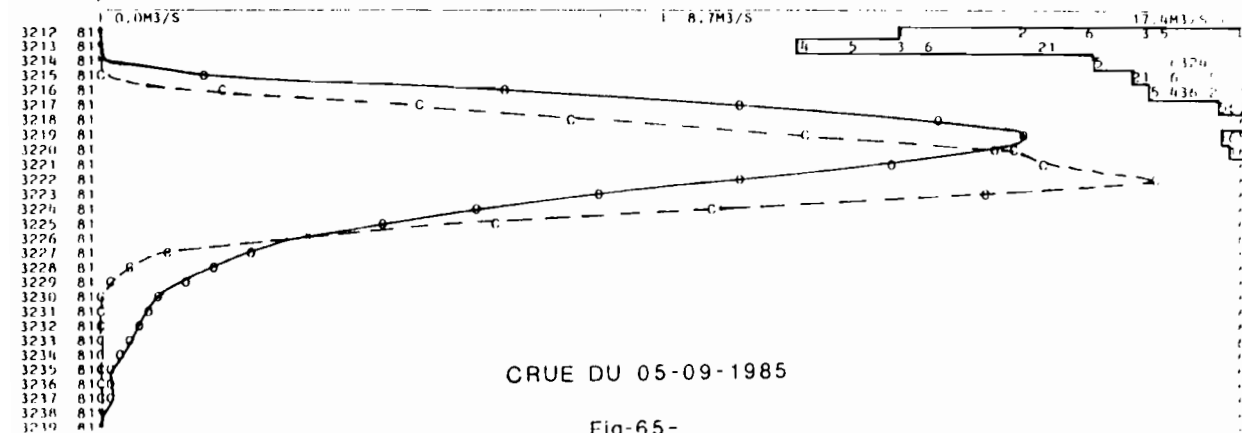
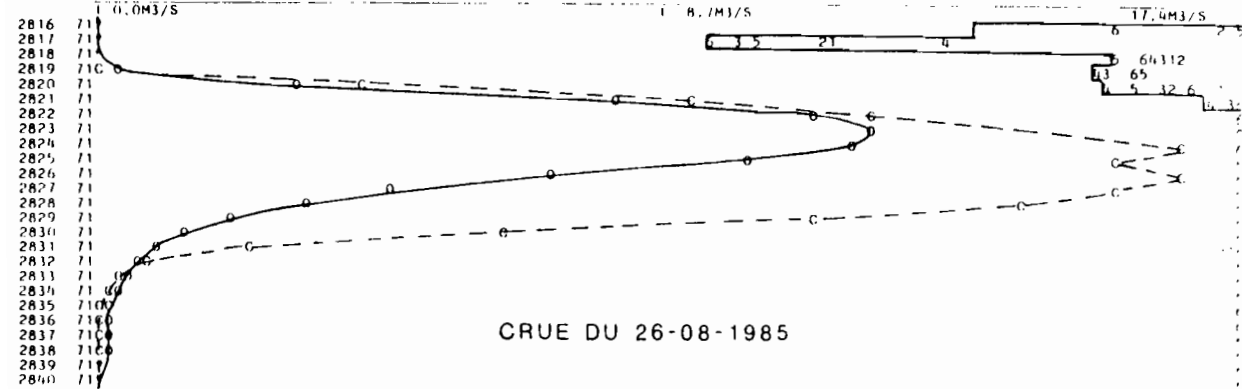
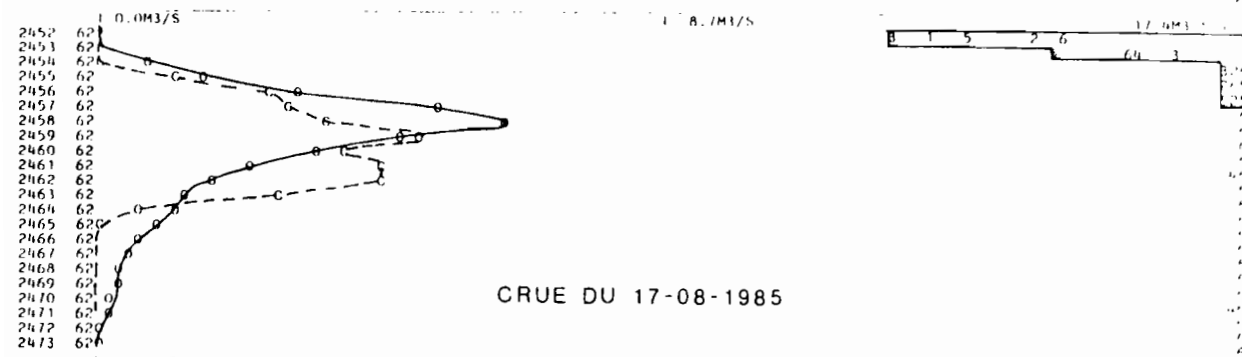
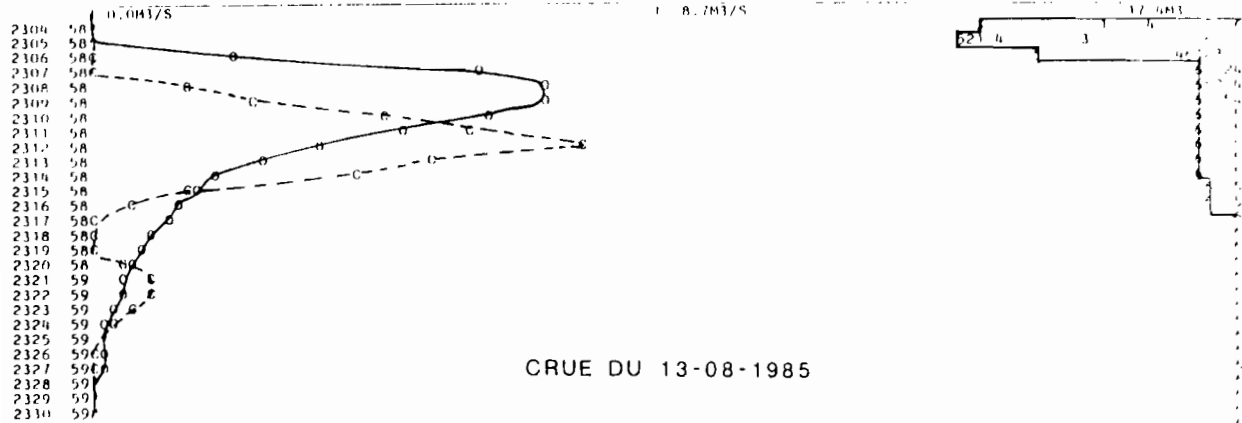
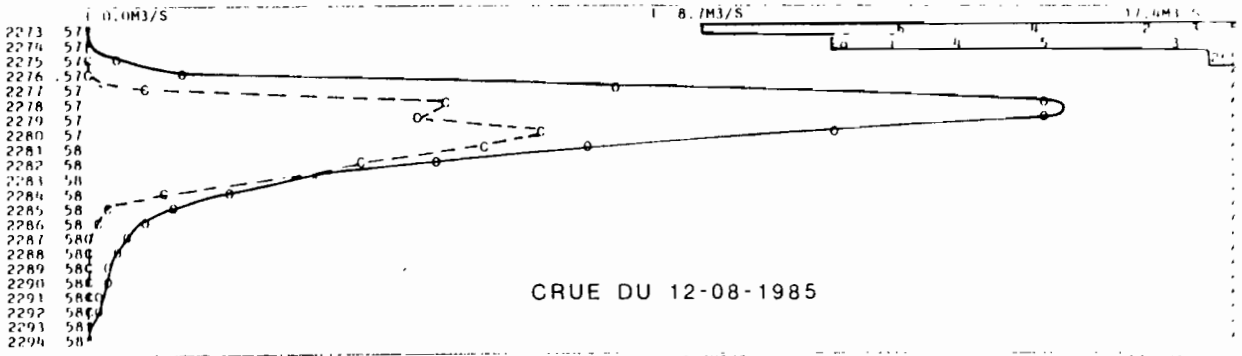


Fig-65-

4.2.3. Validité du modèle.

L'objectif fondamental de ce type d'opération est une simulation au travers du modèle des hydrogrammes de la crue d'étude, à partir d'une averse de récurrence décennale. Nous retiendrons donc comme critère de validité du modèle les deux points suivants :

- Une bonne reconstitution des volumes ruisselés. La droite de régression entre volumes ruisselés observés et ceux calculés doit être le plus proche possible de la première bissectrice.
- Les crues reconstituées doivent avoir la même forme que les crues observées. Nous comparerons crue par crue le coefficient de forme (rapport du débit de pointe sur le volume ruisselé).

Le tableau 51 récapitule pour l'ensemble des observations les lames ruisselées observées et calculées, les débits maximum observés et calculés et les coefficients de forme des crues.

La droite de régression entre lames ruisselées observées et celles calculées est très proche de la première bissectrice.

$$Lrc = 1,0276 Lro - 0,032 \quad (R = 0,775 \text{ pour } 29 \text{ couples de valeurs})$$

Lrc = lame ruisselée calculée

Lro = lame ruisselée observée

R = coefficient de corrélation

La droite de régression entre les débits de pointe observés et calculés si l'on supprime de notre échantillon les deux crues du 26/08/1985 et du 12/08/1985 du bassin-est a pour équation.

$$\overline{Qx_c} = 0,949 \overline{Qx_o} + 0,238 \quad (R = 0,858 \text{ pour } 27 \text{ couples de valeurs})$$

$\overline{Qx_c}$: débit maximum (moyen sur 36 minutes) calculé

$\overline{Qx_o}$: débit maximum (moyen sur 36 minutes) observé

Les deux crues éliminées de l'échantillon sont deux crues dont le débit de pointe a été largement surestimé par le modèle. Elles ont été en réalité fortement écrêtées par le remplissage amont des zones marécageuses (cf. § 2.1.1).

Le modèle à discrétisation spatiale possède un module qui permet de prendre en compte ce phénomène (MODLAC). Le faible nombre de crues concernées ne nous a pas permis de l'utiliser.

Tableau n° 51 : Modélisation des écoulements : Bassins versants de GAGARA

Crue du	Lr obs mm	Lr calc mm	Qx obs m ³ s ⁻¹	Qxcal m ³ s ⁻¹	Qx/Vr obs 10 ⁻⁸ s ⁻¹	Qx/Vrcal 10 ⁻⁸ s ⁻¹
GAGARA EST						
18.06.85	1,5	1,4	4,72	4,52	8,97	8,60
01.07.85	3,2	5,1	9,80	13,5	8,82	7,55
06.07.85	0,3	0,2	0,74	0,19	7,34	9,05
11.07.85	5,1	2,6	13,4	8,79	7,49	6,21
20.07.85	1,0	0,6	2,38	1,78	6,94	6,85
26.07.85	0,1	0,0	0,04	0,00	-	-
03.08.85	4,4	1,2	7,04	3,45	5,54	8,38
10.08.85	1,2	2,7	4,48	9,24	11,04	9,60
12.08.85	4,0	8,5	12,2	30,7	8,71	10,26
13.08.85	3,4	2,8	6,27	3,82	5,24	6,20
15.08.85	0,4	0,4	0,91	1,45	6,81	7,56
17.08.85	1,8	1,0	3,35	4,01	5,35	6,22
26.08.85	7,3	12,1	13,01	30,1	5,11	7,09
05.09.85	9,3	6,3	15,18	16,8	4,65	7,65
14.09.85	1,2	1,0	2,15	2,59	5,25	8,95
GAGARA OUEST						
01.07.85	3,6	6,6	10,5	12,4	12,18	7,66
03.07.85	2,7	4,2	9,56	9,05	14,79	8,70
11.07.85	2,2	2,1	5,66	4,71	10,40	9,17
20.07.85	1,0	0,8	2,95	3,04	11,56	16,04
26.07.85	1,7	1,1	4,71	4,41	14,46	18,83
04.08.85	2,5	2,6	5,03	6,49	8,52	10,38
11.08.85	0,8	0	1,61	0,0	-	-
12.08.85	6,2	3,9	14,6	7,02	9,62	9,93
13.08.85	4,3	3,0	7,03	5,47	6,71	7,56
15.08.85	0,7	0,9	1,38	1,87	7,92	8,52
17.08.85	3,0	2,7	6,27	4,89	8,68	7,62
26.08.85	6,6	11,9	11,8	17,3	7,43	5,98
05.09.85	9,4	8,8	14,2	16,1	6,24	7,60
14.09.85	0,2	0,2	0,11	0,82	22,63	17,85

Lr obs. = Lame ruisselée observée ;

Lr calc. = Lame ruisselée calculée ;

Qx = Débit maximum moyen sur le pas de temps ;

Vr = Volume ruisselé.

La comparaison crue par crue des coefficients de forme montre que l'ordre de grandeur est respecté même si pour les plus fortes crues une surestimation du débit de pointe est quasi systématique. Cette surestimation va par ailleurs dans le sens de la sécurité dans le problème de la prédétermination de la crue d'étude.

4.2.4. Prédétermination de la crue d'étude.

Il a été montré que, après la hauteur de pluie, le second facteur explicatif du ruissellement est l'état d'humectation des sols représenté par l'indice des précipitations antérieures IK . Il nous a paru intéressant de simuler le comportement de ces bassins pour une averse décennale intervenant pour toute une gamme possible d'humectation du sol.

Une averse type de 68 mm respectant les conditions intensité-durée-fréquence décennale a été soumise au modèle pour les indices de précipitations antérieures suivants : 0, 10, 30, 60 mm.

La forme des crues résultantes sont présentées sur les figures n° 66 et 67 ; leurs paramètres sont consignés dans le tableau n° 52.

Tableau n° 52 - Simulation de crues à partir d'une averse décennale.

Bassin	Paramètre de la crue	$IK = 0$	$IK = 10$	$IK = 30$	$IK = 60$
GAGARA EST	L_r mm	46,6	48,3	52,7	55,4
	Q_{mx} (m^3s^{-1})	99,1	101,9	112,5	125,4
	t_m (min)	288	288	288	288
	t_b (min)	648	648	648	648
GAGARA OUEST	L_r mm	48,5	50,3	54,4	56,7
	Q_{mx} (m^3s^{-1})	81,1	84,2	91,3	101,6
	t_m (min)	252	252	252	252
	t_b (min)	540	540	540	540

Les variations de la lame ruisselée et du débit de pointe, de l'état le plus sec à l'état le plus humide (d'ailleurs tout à fait exceptionnel), doit mettre en garde l'aménageur, qui utilise la notion de crue d'étude, contre les dangers que représentent les conditions moyennes que l'on attache à la définition de la crue d'étude.

Ces estimations appellent plusieurs commentaires :

- Le volume de la crue d'étude estimée par cette modélisation pour un $IK = 0$ est très voisin de la prédétermination réalisée à partir de l'extrapolation d'une courbe moyenne ajustée sur les observations.

Lame ruisselée estimée	ajustement d'une courbe moyenne	Modélisation
GAGARA EST	45,7 mm	46,6 mm
GAGARA OUEST	49,6 mm	48,5 mm

- Pour conforter l'estimation du débit maximum de la crue d'étude il est possible de comparer les rapports "débit maximum / lame écoulée" pour l'ensemble des plus fortes crues et celui de l'estimation. Nous avons retenu les crues observées dépassant $10\text{m}^3\text{s}^{-1}$ et résultant d'une averse unitaire (averse à un seul corps homogène et assez intense) (tableau n° 53).

GAGARA EST
 PREDETERMINATION DE LA CRUE D'ETUDE

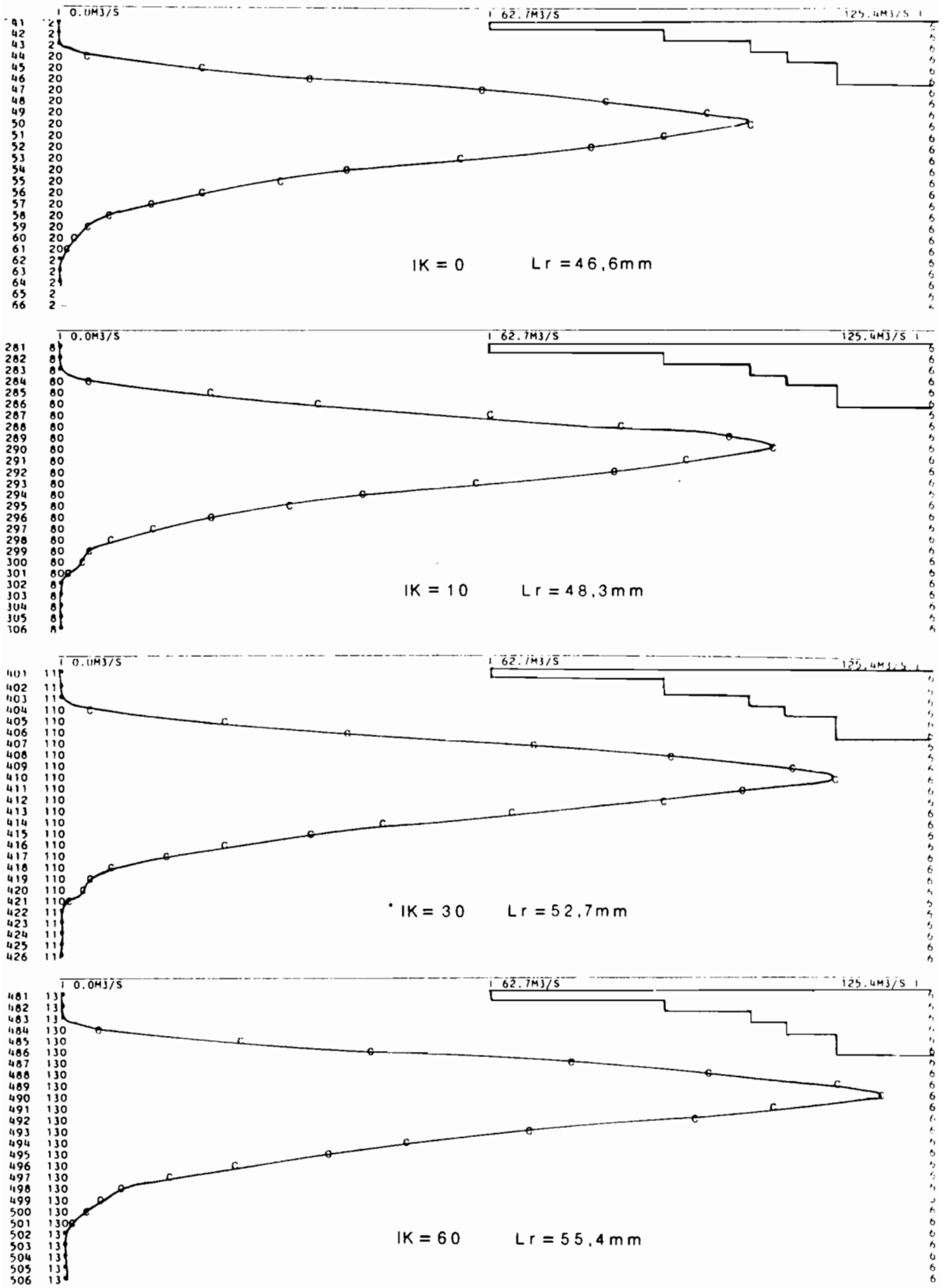


Fig-66-

GAGARA OUEST
 PREDETERMINATION DE LA CRUE D'ETUDE

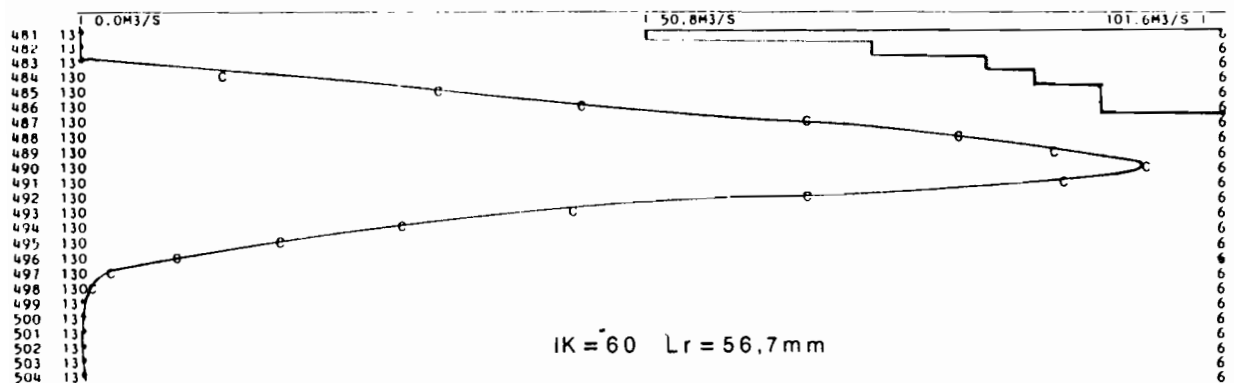
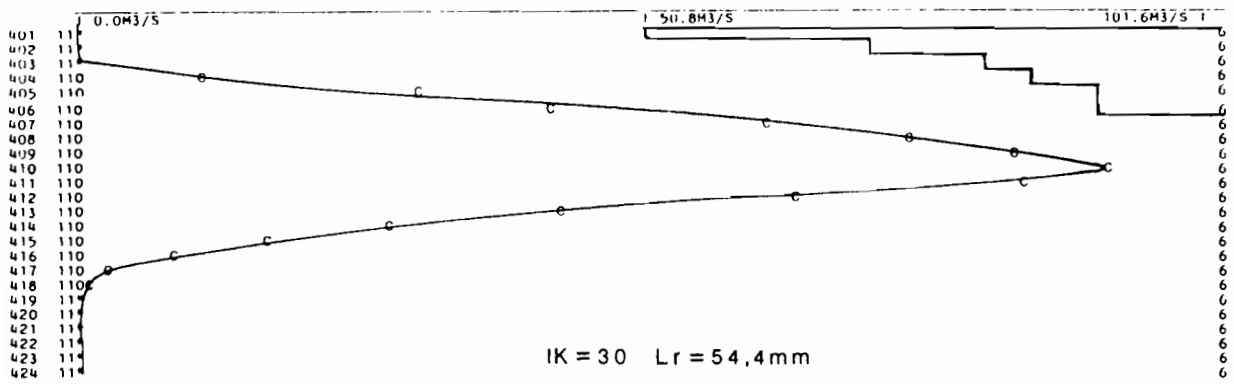
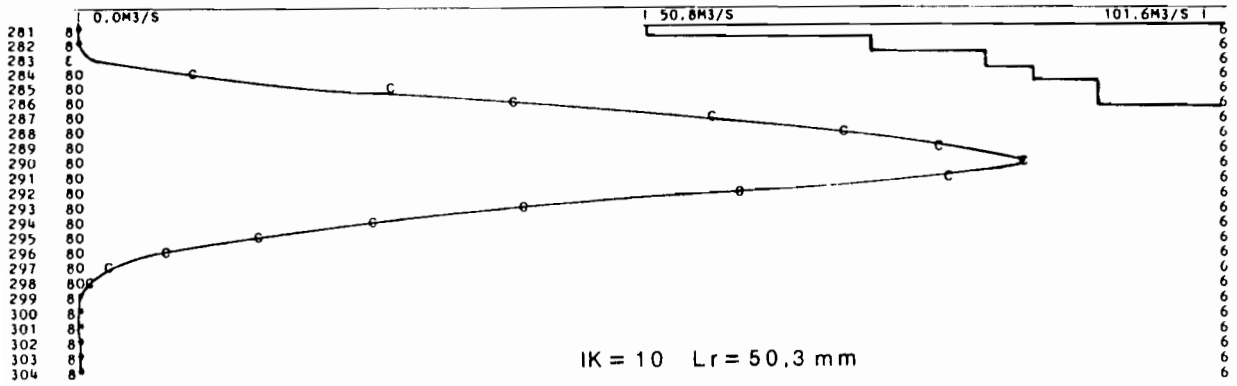
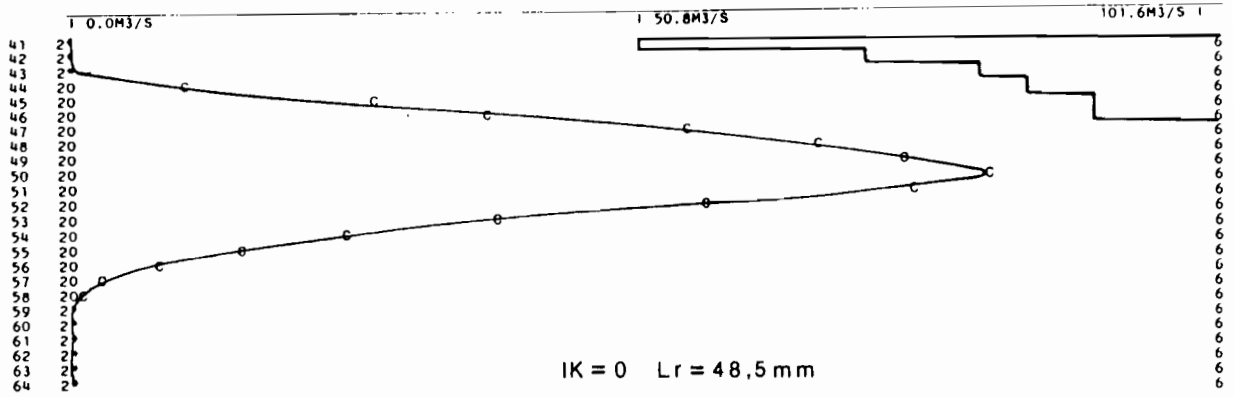


Fig-67-

Tableau n° 53 - Rapport débit maximum / lame écoulee sur les bassins versants de GAGARA.

Crue	Marigot est		Marigot ouest	
	Q max/Le	Le mm	Q max/Le	Le mm
01-07-1985	3,216	3,14	3,032	3,76
03-07-1985	-	-	3,546	2,82
10-07-1985	2,806	5,06	-	-
12-08-1985	3,096	3,94	2,348	6,60
26-08-1985	1,833	7,20	1,717	6,93
05-09-1985	1,663	9,20	1,454	9,91
Crue de projet $IK = 0$	2,127	46,6	1,672	48,5
Crue de projet $IK = 10$	2,110	48,3	1,673	50,3

(-) crue < $10 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$

- les rapports "débit maximum / lame écoulee" de la crue d'étude ont des valeurs moyennes par rapport à ceux des crues observées. Mais on remarque pour les deux crues les plus importantes (26-08-85 et 05-09-85) qui ont débordé du lit mineur que ce rapport est bien plus faible que sur l'ensemble des autres crues. Il est probable que l'affaiblissement du débit de pointe pour des crues qui sortent du lit mineur et plutôt en fin de saison des pluies soit en rapport avec le remplissage en amont de zones de stockage et avec un laminage de la crue due à la pousse de la végétation.

- D'autre part, si l'on reporte les débits de pointe estimés sur la courbe "hauteur-débit" en l'extrapolant, on obtient une cote à l'échelle bien supérieure à celle de débordement du lit des marigots, et on assisterait à des détournements d'une partie du débit dans des dépressions du système dunaire qui barre l'aval des deux bassins. Dans ces conditions la seule station de contrôle serait celle de DJONGOY en aval des deux bassins et réunissant les deux affluents.

- Pour toutes ces raisons nous pensons que les débits maximums calculés par le modèle pour la crues d'étude sont surestimés. Une estimation plus raisonnable serait obtenue par les rapports "débit maximum/lame écoulee" déterminés sur les crues du 05-09-85.

Marigot est : $80 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$

Marigot ouest : $70 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$

- Malgré les profondes modifications des paramètres physiographiques de ces bassins depuis 20 ans il reste intéressant de confronter cette estimation aux crues exceptionnelles observées lors de la campagne de 1956 (ORSTOM, 1957) notamment celle du 31-07-56 et celle du 1-9-56 consécutives à des averses assez rares dans la région.

Le 31 juillet 1956 la précipitation maximale tombait sur le pluviographe du bassin est donnant 84 mm en 3 heures dont 78 mm en 1 heure.

Cette averse très violente (156 mm/h pendant 5 minutes) est d'une fréquence équivalente (ou un peu plus rare) à celle choisie pour la crue d'étude. Il en résulte une crue pour chaque bassin dont les paramètres sont récapitulés dans le recueil des bassins versants (DUBREUIL *et al*, 1972)

	GAGARA OUEST	GAGARA EST
Pluie moyenne sur bassin mm	42,8	68,1
Lame ruisselée mm	10,8	9,5
Débit maximum m ³ s ⁻¹	22,7	11,5

Du 31 août au 1er septembre une très grosse averse coupée en son milieu par une accalmie d'un peu plus d'une heure atteint 116,4 mm au pluviographe ouest, centre de la précipitation. L'ensemble de la pluie dure 8 heures se répartissant à ce poste d'observation en 69 mm durant 2H.30 et 48,5 mm durant 4H.45. Il en résulte une crue à deux pointes sur le bassin est et une crue à sommet très étalé (6 heures) sur le bassin ouest.

	GAGARA OUEST	GAGARA EST
Pluie moyenne sur bassin mm	90,0	70,5
Lame ruisselée mm	47,7	32,6
Débit maximum m ³ s ⁻¹	(36)	(23)

Les observations de la campagne 1985 consignées dans l'annexe n°5 laissent supposer qu'en l'état actuel des bassins de tels événements pluvieux auraient provoqué des crues beaucoup plus importantes. Une prédétermination de la crue d'étude sur ces deux événements exceptionnels du passé sous-estimerait le volume et le débit de pointe de cette crue.

4.2.5. Discussion sur l'application du modèle à discrétisation spatiale.

La transposition des résultats obtenus sur un bassin versant à un autre bassin versant voisin apparaît comme possible avec une assez bonne précision par cette méthode de modélisation. Il faut cependant préciser que :

- le SAHEL, avec ses paysages bien typés et un nombre relativement réduit d'états de surface parfaitement différenciables par analyse multispectrale d'images satellitaires, est particulièrement bien adapté à ce type de transfert ;
- la transposition a été réalisée dans une zone géographique réduite en utilisant une seule scène satellitaire. Il est vraisemblable que pour des images différentes et/ou pour des dates différentes, des difficultés pour le regroupement des pixels par thèmes identiques apparaîtraient ;
- la reconstitution des débits de pointe des plus fortes crues n'est pas bonne. Elle ne l'était déjà pas pour le bassin versant de POLAKA (Mare d'OURSI). Plusieurs raisons peuvent être invoquées : la durée du pas de temps, l'écrêtement des crues, la qualité des données d'observation.

Si un tel transfert surprend par la relative bonne qualité du résultat obtenu, il ne dispense cependant pas d'une connaissance, la meilleure possible, *de visu* du terrain. L'association d'une visite *critique* avec cette technique de modélisation à partir d'images satellitaires déjà traitées dans la région permet une prédétermination correcte de la crue d'étude sur un bassin peu connu.

"On voit donc poindre pour l'avenir la possibilité d'utiliser sur un bassin non observé un modèle dont la fonction de production n'utiliserait que les données du mini simulateur pour chaque type de couches superficielles du sol ; lesquelles seraient délimitées uniquement par photos satellitaires" (RODIER, préface de Pluies et Crues au SAHEL, in CHEVALLIER, et al, 1985).

4.3. APPLICATION DES TECHNIQUES DE SIMULATION DE PLUIE ET DE CARTOGRAPHIE DES ETATS DE SURFACE A L'ETUDE DES MODIFICATIONS DU COMPORTEMENT HYDROLOGIQUE DES BASSINS VERSANTS EXPERIMENTAUX.

Nous avons vu dans l'introduction de cet ouvrage qu'un des objectifs de l'étude des bassins versants représentatifs et expérimentaux est de quantifier l'influence des changements naturels ou provoqués par l'homme sur la ressource en eau

Les conséquences de la période sèche 1969-1984 (décrite au § 1.4.6) sur les grands systèmes hydrologiques ont été impressionnantes et relatées tant par des scientifiques que par les médias :

- effondrement des débits des grands fleuves comme le SENEGAL (OLIVRY, 1983), le NIGER (BILLON, 1985) ou l'ensemble des grands cours d'eau tropicaux (SIRCOULON, 1986).
- bouleversement des systèmes lacustres ; lac TCHAD, delta intérieur du NIGER (SIRCOULON, 1985).
- baisse généralisée de tous les aquifères importants (LEUSINK et TYANO, 1985).

L'analyse des régimes hydrologiques de cours d'eau moins importants (bassins versants de 10 000 à 30 000 km²) a démontré que la sécheresse climatique a eu des répercussions bien moins importantes sur le fonctionnement de ces systèmes : pas de modifications significatives dans les chroniques de modules annuels ou de modules journaliers maximums (POUYAUD, 1986).

Pour l'ensemble des petits bassins, le manque de données sur les débits ne permet pas une comparaison statistique entre les volumes écoulés ou les risques de plus fortes crues de la période d'abondance et de la période d'indigence des précipitations. Si à partir de documents tels que photos aériennes et descriptions physiographiques de bassin il est possible de reconstituer les cartes des états de surfaces à différentes dates, la modélisation à partir des données sur parcelles permettra de simuler le comportement hydrologique du bassin en fonction du temps après l'avoir calé pour un état donné à une date donnée.

Nous choisirons deux bassins versants observés de façon à peu près simultanée dans la période humide et dans la période sèche, et pour lesquels nous disposons de photos aériennes prises pendant ces deux périodes.

Le bassin versant de KAZANGA en zone soudanienne observé de 1963 à 1965 et en 1983 et le bassin de KOGNERE en zone de transition soudan - sahel observé de 1960 à 1962 et en 1984. Pour

ces deux bassins nous disposons de deux couvertures "photos aériennes" de bonne qualité et prises dans la même saison (décembre, janvier) : mission aérienne IGN [4] 1956 pour la période humide et mission aérienne IGHV [5] 1980 pour la période sèche.

4.3.1. Reconstitution des cartes des états de surface.

La première opération, est la comparaison entre les états d'occupation des sols. La figure n°68 illustre cette photo interprétation sur le bassin de KOGNERE.

Le tableau n° 54 résume les différences d'occupation des sols entre la période sèche et la période humide pour les bassins de KAZANGA et de KOGNERE.

Tableau n° 54 - Occupation des sols, comparaison des états en 1956 et 1980.

Photos	Champs %	Jachère %	Savane arborée %
KAZANGA 1956	16,2	51,3	32,5
KAZANGA 1980	36,2	33,8	30,0
KOGNERE 1956	16,1	10,7	73,2
KOGNERE 1980	37,4	5,6	57,0

Si sur les deux bassins on assiste à un recul important des jachères au profit des champs cultivés, sur le bassin de KOGNERE l'extension des cultures s'est également faite au détriment de la savane arborée.

En reprenant la carte des états de surface du bassin de KOGNERE (annexe 6), on s'aperçoit que les types de surface délaissés par l'agriculture en 1956 sont maintenant exploités. En 1956, c'est surtout l'unité 4 "surfaces pelliculaires sans sables grossiers ni gravillons" qui est cultivée et secondairement l'unité n°7 "bas-fond". Les autres unités semblent marginales pour la culture. En 1980 ; ce sont toujours les unités 4 et 7 qui sont les plus exploitées, mais elles tendent à le devenir complètement et en permanence. En effet les jachères y sont presque totalement absentes. De plus, les zones naguère marginales, comme l'unité 2 "surface à sables grossiers et termitières" sont de plus en plus fréquemment mises en culture.

— Limite du bassin



champ

- - - - Marigot



jachère récente

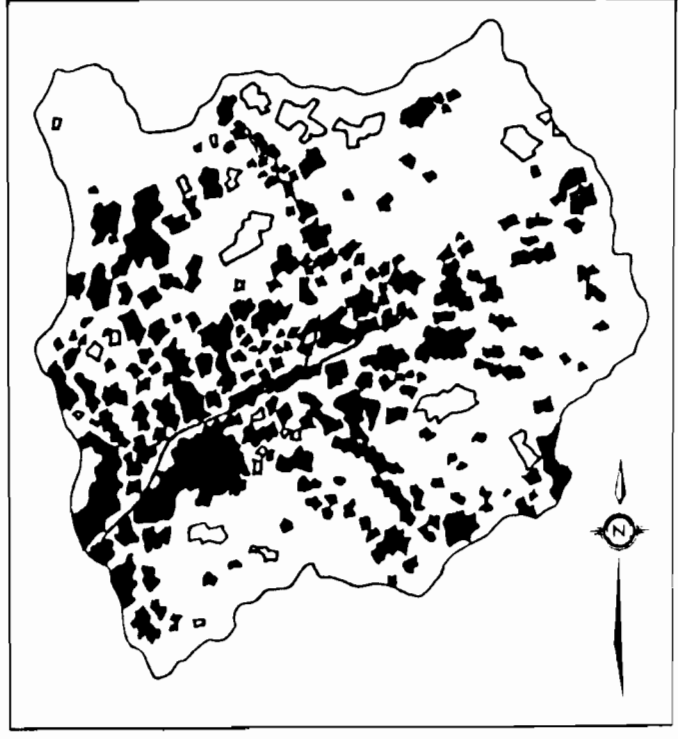
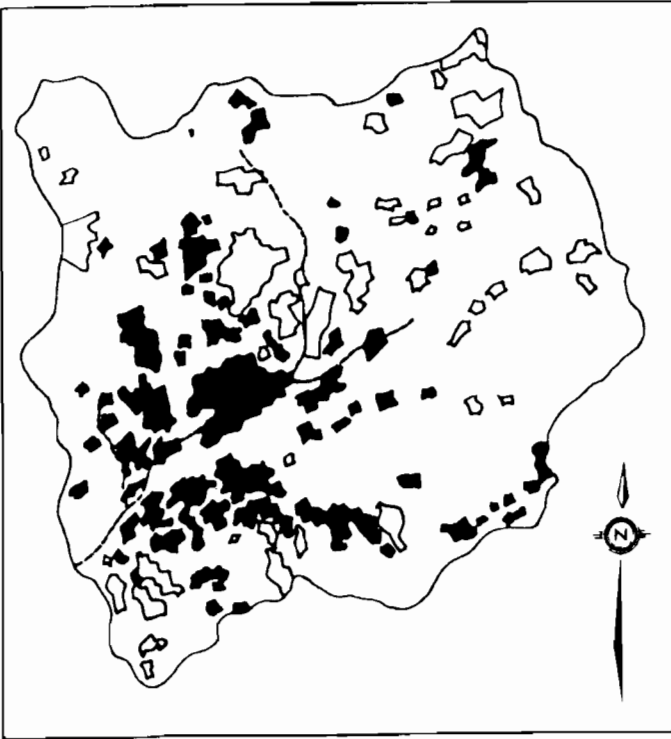


Fig-68-

1956

Occupation des sols, 1956 1980

1980

D'après Valentin 1985



BASSIN DE KOGNERE

— Limite du bassin



zone très érodée

- - - - Marigot

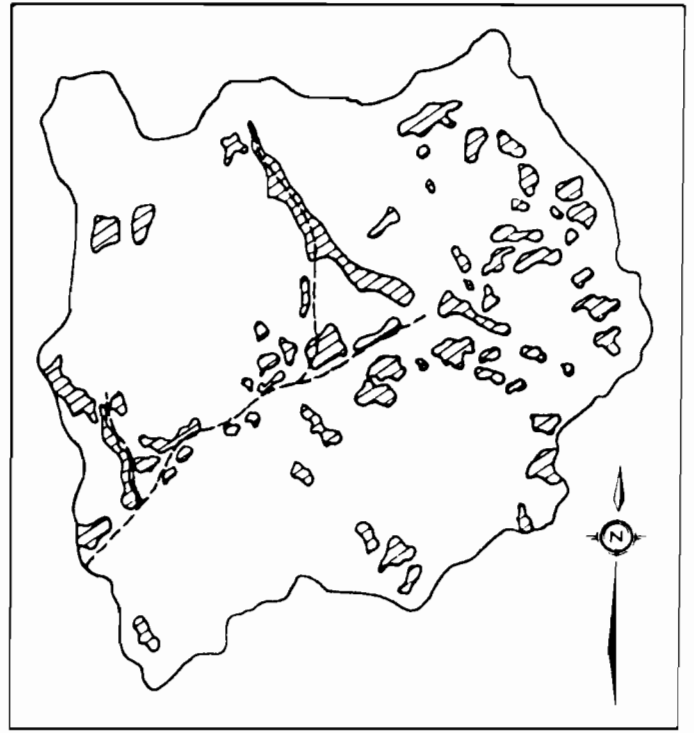
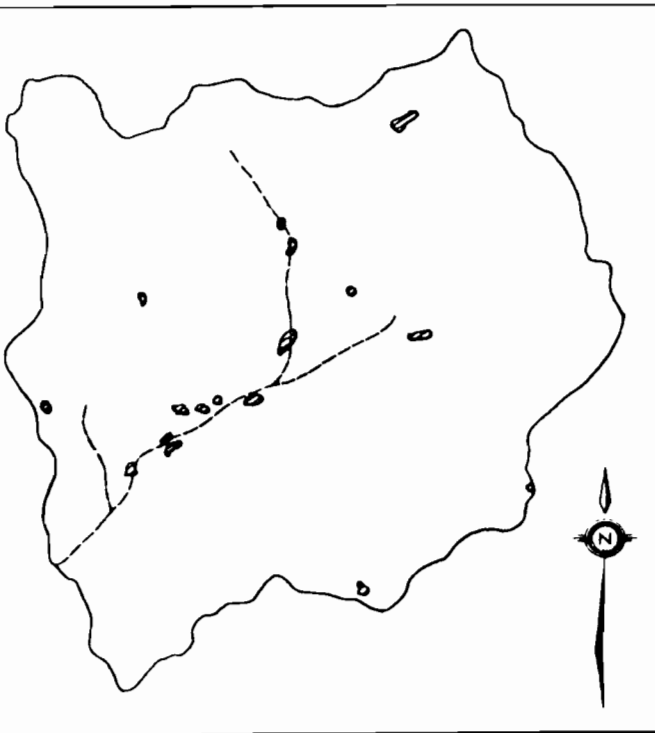


Fig-69-

1956

Zones très érodées, 1956 1980

1980

D'après Valentin 1985



L'examen comparatif des photos aériennes permet également de mettre en évidence :

- sur le bassin de KAZANGA ; les contours des unités cartographiques restent sensiblement les mêmes, seules leurs sous divisions en zone cultivée et en jachère sont modifiées.

- sur le bassin de KOGNERE, au contraire on assiste à une modification des surfaces occupées par les différentes unités. Nous qualifierons cette modification des états de surface qui va dans le sens d'une aridité croissante du milieu, de "sahélisation" du bassin (annexe 6).

On observe, en effet sur le bassin de KOGNERE une extension des zones très érodées dont les superficies sont multipliées par 20 entre les deux missions aériennes (fig. n°69). Ces zones deviennent impropres à la culture, et la végétation naturelle y est très dégradée. Si l'on excepte quelques zones naturellement fragiles et déjà érodées en 1956 (sommet de versant ou zone de raccordement du réseau de drainage) la totalité de cette augmentation est due aux défrichements (planche photographique n°6).

L'augmentation démographique très rapide, 2,6% par an dans la région (VAUGELADE, communication personnelle) conjuguée à une pluviométrie déficitaire, pousse les agriculteurs à modifier leurs pratiques culturales : une des réponses adoptées face à la faiblesse des rendements est l'extension des cultures. Le doublement des zones cultivées, la division par deux des jachères, le défrichement des zones marginales, une pluviométrie déficitaire qui tend à laisser le sol nu, sont les facteurs qui favorisent la dégradation des sols par érosion hydrique et une aptitude croissante au ruissellement (VALENTIN et RUIZ FIGUEROA, 1985). Les nouvelles zones érodées apparaissent surtout lors de la mise en culture de l'unité 2 "surface à sables grossiers et termitières" (elle devient l'unité 3 "surface à sables grossiers et termitières très érodées") et de la (sur)exploitation des unités n°7 et 6 "bas-fonds" et "zones d'écoulement" (qui tend à devenir l'unité 5 "surfaces érodées à sables grossiers sans termitière").

Les sols de l'unité 4, "surfaces pelliculaires sans sables grossiers ni gravillons", la plus cultivée, sont assez résistants à l'érosion hydrique. Nous avons vu néanmoins qu'ils étaient sensibles au processus de réorganisations superficielles et à la dénudation. Or le développement des pellicules et la raréfaction de la végétation favorisent considérablement le ruissellement. Ainsi, bien que cette unité présente peu de marques d'érosion, elle n'en continue pas moins à favoriser, par le ruissellement qu'elle produit, la dégradation des unités situées à l'aval.

Il est nécessaire enfin de souligner que ce qui a été cartographié comme "jachère" correspond parfois à des zones qui ont été cultivées naguère, puis abandonnées, sur lesquelles la végétation de savane arbustive ne se reconstitue pas. Ces anciens champs présentent en effet, de vastes

zones nues pelliculaires semblables aux surfaces de glacis sahéliens, où le recrû ne semble constitué que d'épineux (*Balanites aegyptiaca*) l'érosion en nappe y est marquée formant des microdénivelées en forme de marches (pl photo n°6). On remarque sur l'ensemble du bassin que tous les plus jeunes arbres (moins de 10 ans) sont, dans leur majorité, des épineux, tandis que les plus vieux sont les combrétacées caractéristiques de la zone de transition sahel-soudan. A partir de toutes ces observations, il a été possible d'établir une cartographie des états de surface pour la période "1956".

Sur le tableau n° 55, sont réunis les pourcentages de la surface du bassin représentés par chaque parcelle de simulation de pluie pour les deux périodes 1956 et 1980.

4.3.2. Effets comparés de la modification du régime des pluies et des caractères physiographiques du bassin.

A partir de l'ensemble des observations pluviométriques du poste de référence BOULSA (24 années d'observations) pour le bassin de KOGNERE, nous avons simulé les ruissellements journaliers résultants, soit avec la carte des états de surfaces établie pour 1956, soit avec celle établie pour 1980 (fig n°70). On observe une homogénéité de la relation pluie-lame ruisselée journalière sur chaque reconstitution et une différence notable entre les deux reconstitutions. La carte de 1980 donne des ruissellements plus forts.

LAMES RUISSÉES RECONSTITUÉES SUR LE BASSIN DE KOGNERE
 CARTE 1956 : 1 ANTERIEUR A 1969, 2 POSTÉRIEUR A 1969
 CARTE 1980 : 3 ANTERIEUR A 1969, 4 POSTÉRIEUR A 1969

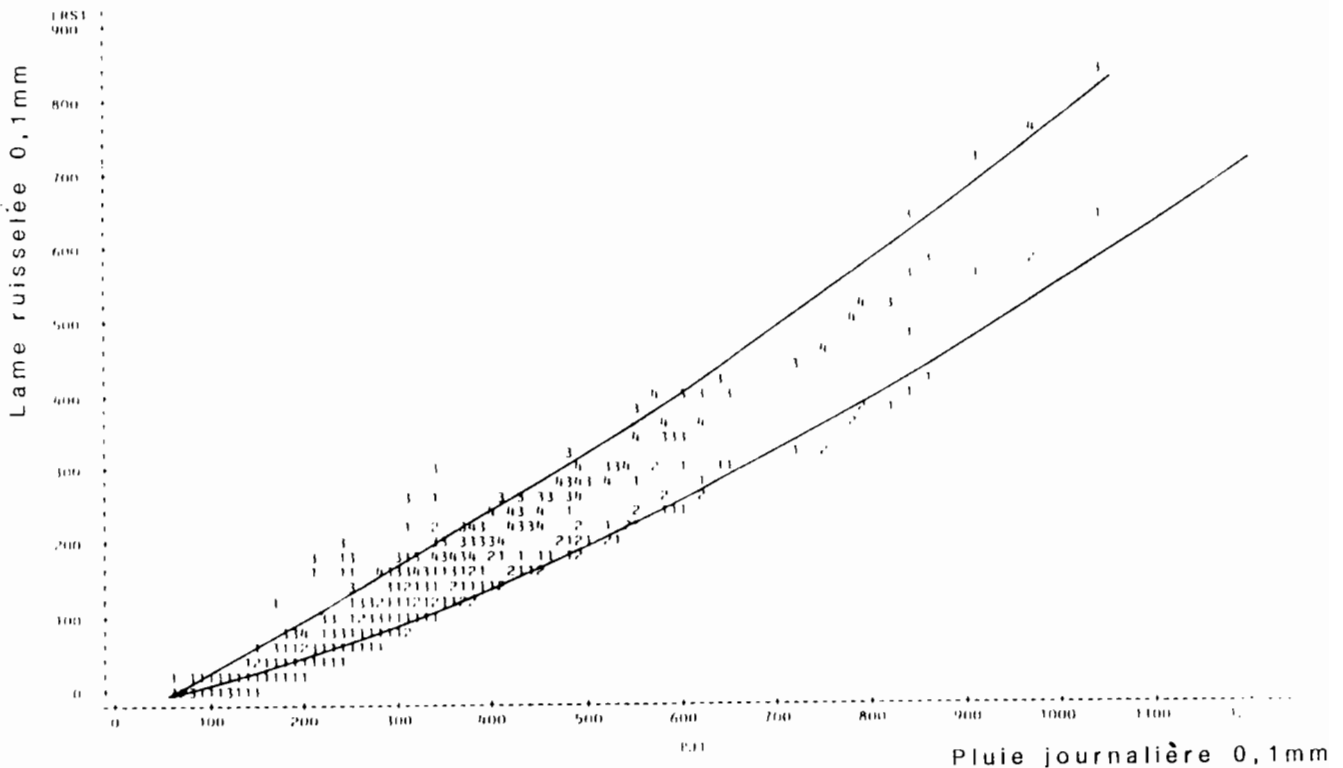


Fig-70-

Tableau n° 55 - Unités de surface pour les périodes 1956 et 1980.

Unité cartographique	Surface élémentaire	Parcelle	% de la surface totale 1956	% de la surface totale 1980.
Unités 2 et 3	Sol cultivé	1	2,2	15,0
	Végétation naturelle graminée claire	2	19,6	3,7
	Sol nu	3	11,0	11,7
	Végétation naturelle touffe	4	16,2	3,6
Unités 5, 6 et 7	Sol cultivé	5	0	5,4
	Sol nu	6	1,2	10,8
	Végétation naturelle	7	6,1	6,1
Unité 1	Sol cultivé	8	1,0	5,0
	Végétation naturelle	9	13,2	9,2
Unité 4	Sol cultivé	10	18,2	20,2
	Végétation naturelle	11	11,3	9,3

unité 1 cuirasses et surfaces gravillonnaires.

unité 2 surfaces à sables grossiers et termitières

unité 3 surfaces à sables grossiers et termitières très érodées

unité 4 surfaces pelliculaires sans sables grossiers ni gravillons

unité 5 surfaces érodées à sables grossiers sans termitières

unité 6 zones d'écoulement

unité 7 bas fonds.

Tableau n° 56 - Lames ruisselées reconstituées sur le bassin de KOGNERE.

Reconstitution	Date	Nbre moyen de lames ruisselées par an *	Hauteur ruisselée annuelle mm *	Val max. de la lame ruisselée mm
D'après la carte de 1956	Avant 1969	21	175	64
	Après 1969 1969 inclus	15	116	57
D'après la carte de 1980	Avant 1969	23	241	84
	Après 1969 1969 inclus	17	166	75

* Les lames ruisselées < 0,5 mm n'ont pas été prises en compte.

L'analyse des ruissellements sur chaque reconstitution (tableau n° 56) met en évidence une diminution sensible du nombre moyen de crues par an et de la hauteur de la lame ruisselée moyenne annuelle pour la période postérieure à 1969. On remarque cependant que pour chaque reconstitution la valeur maximale de la lame ruisselée observée sur les deux périodes est sensiblement la même.

A la vue de ces résultats il est possible de dire :

- Si les états de surfaces étaient restés identiques, la modification du régime des pluies se serait traduite par une diminution du nombre de crues et de la lame totale ruisselée annuelle.
- la modification des états de surfaces a induit une aptitude au ruissellement accrue pour la période sèche.

4.3.3. Reconstitution d'une chronique de lames ruisselées sur les bassins de KOGNERE et de KAZANGA.

Afin de reconstituer une chronique complète des lames ruisselées la plus probable on se propose d'utiliser pour chacun des deux bassins la carte des états de surface obtenue à partir de la première mission aérienne pour les observations pluviométriques antérieures à 1969 et celle dérivant de la seconde pour la période postérieure. La simulation des lames ruisselées se fait à partir des postes pluviométriques de référence : MANGA (34 années d'observation) pour le bassin de KAZANGA, BOULSA (24 années d'observations) pour le bassin de KOGNERE.

Les hauteurs de lames ruisselées reconstituées ont été comparées à celles observées pendant les deux périodes. Les coefficients de corrélation varient entre 0,75 et 0,90. On constate cependant une dispersion plus forte des valeurs observées que de celles reconstituées en fonction de la pluie.

Sur les figures n° 71 et 72 sont reportées les lames ruisselées reconstituées pour les deux périodes en fonction de la pluie journalière ; on remarque :

- pour le bassin versant de KAZANGA, les deux nuages de points se confondent assez bien avec une légère tendance à un plus fort ruissellement pour les événements de la période sèche.
- pour le bassin de KOGNERE, l'ensemble des pluies supérieures à 25 mm engendrent des lames ruisselées nettement plus fortes sur la période 1969-1983.

Chronique reconstituée des lames ruisselées sur le bassin de KOGNERE

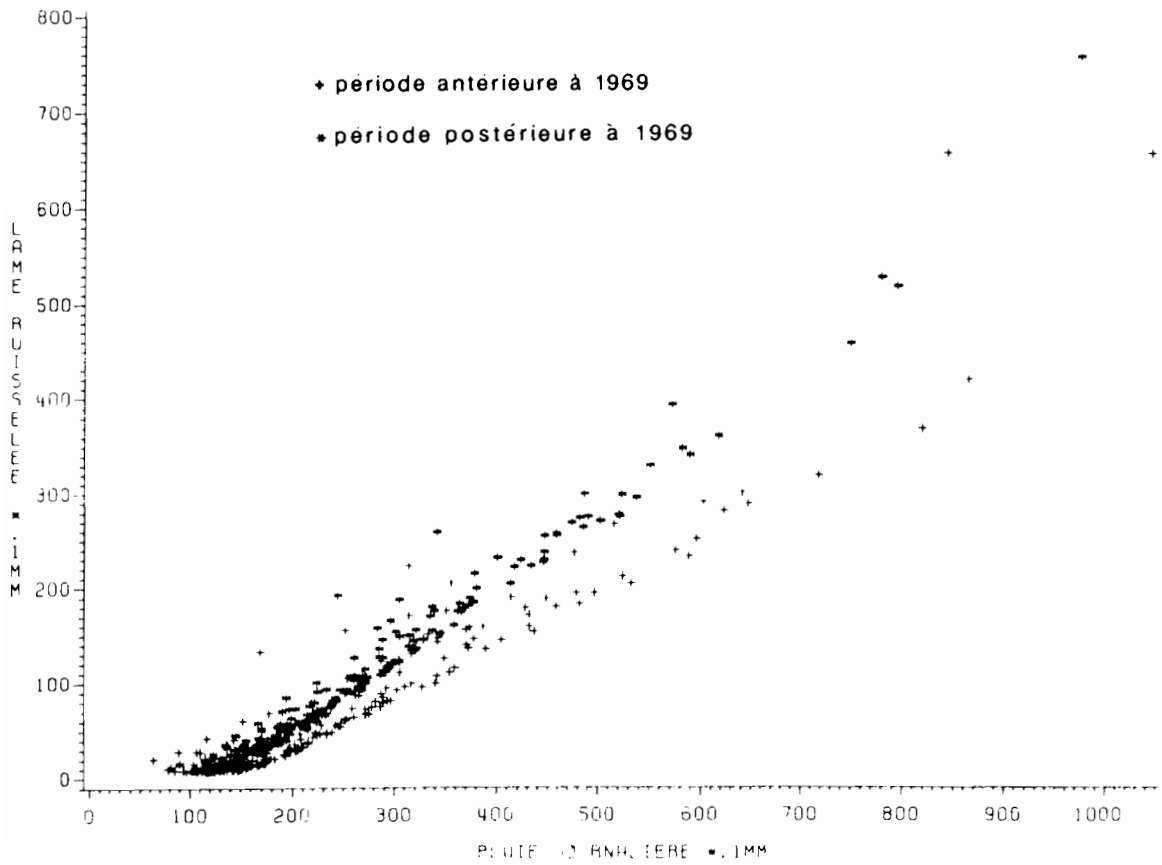


Fig-71-

BASSIN DE KAZANGA

Chronique reconstituée des lames ruisselées journalières

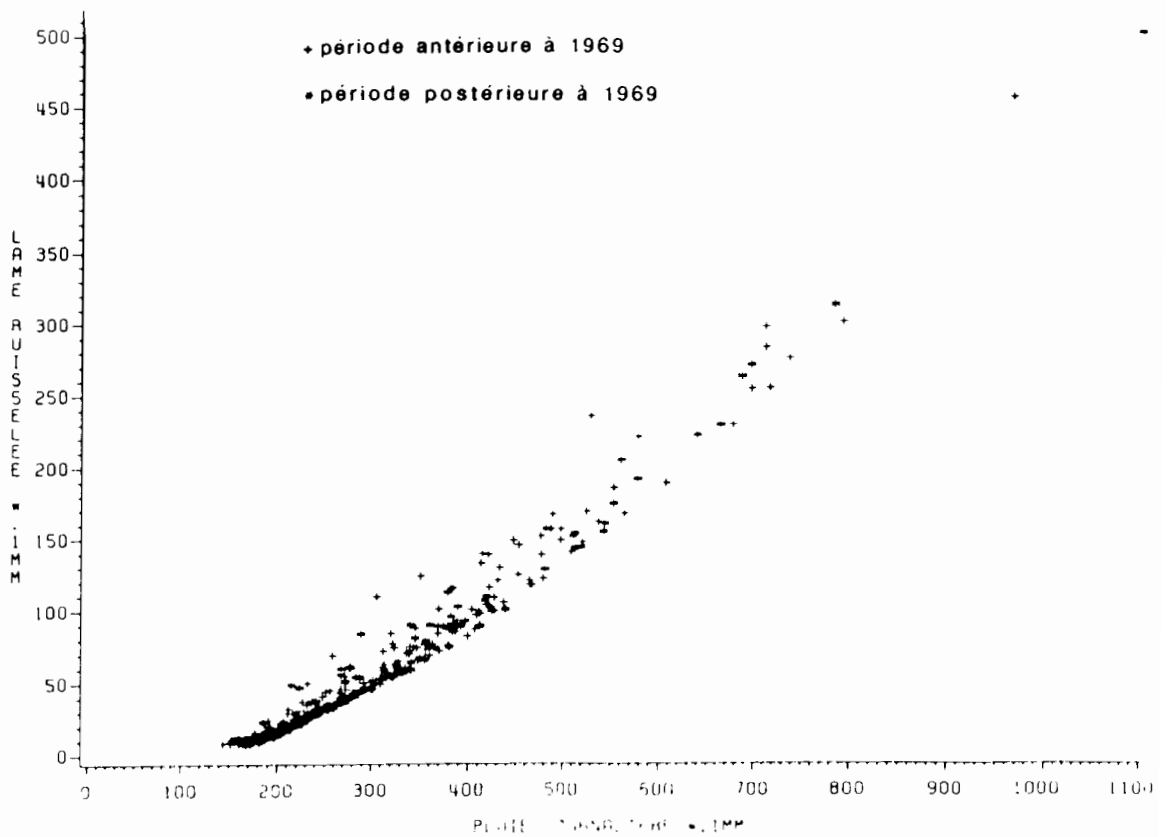


Fig-72-

Ce résultat corrobore l'analyse sur le comportement moyen des bassins par l'ajustement d'une courbe de la forme $L_r = (P^2 + a^2)^{1/2} \cdot a$ sur les observations à l'échelle du bassin. Nous avons établi que la valeur de a estimée en période humide et en période sèche n'était pas significativement différente sur le bassin de KAZANGA tandis qu'elle diminuait nettement en période sèche sur le bassin de KOGNERE.

Sur les figures n° 73 et 74 les hauteurs de lames ruisselées rangées en classe de 0,5 mm sont reportées en fonction des fréquences expérimentales. On remarquera le peu de différence entre les distributions statistiques des échantillons de période sèche et de période humide.

Fig-73- Lames ruisselées reconstitués sur le bassin de KOGNERE

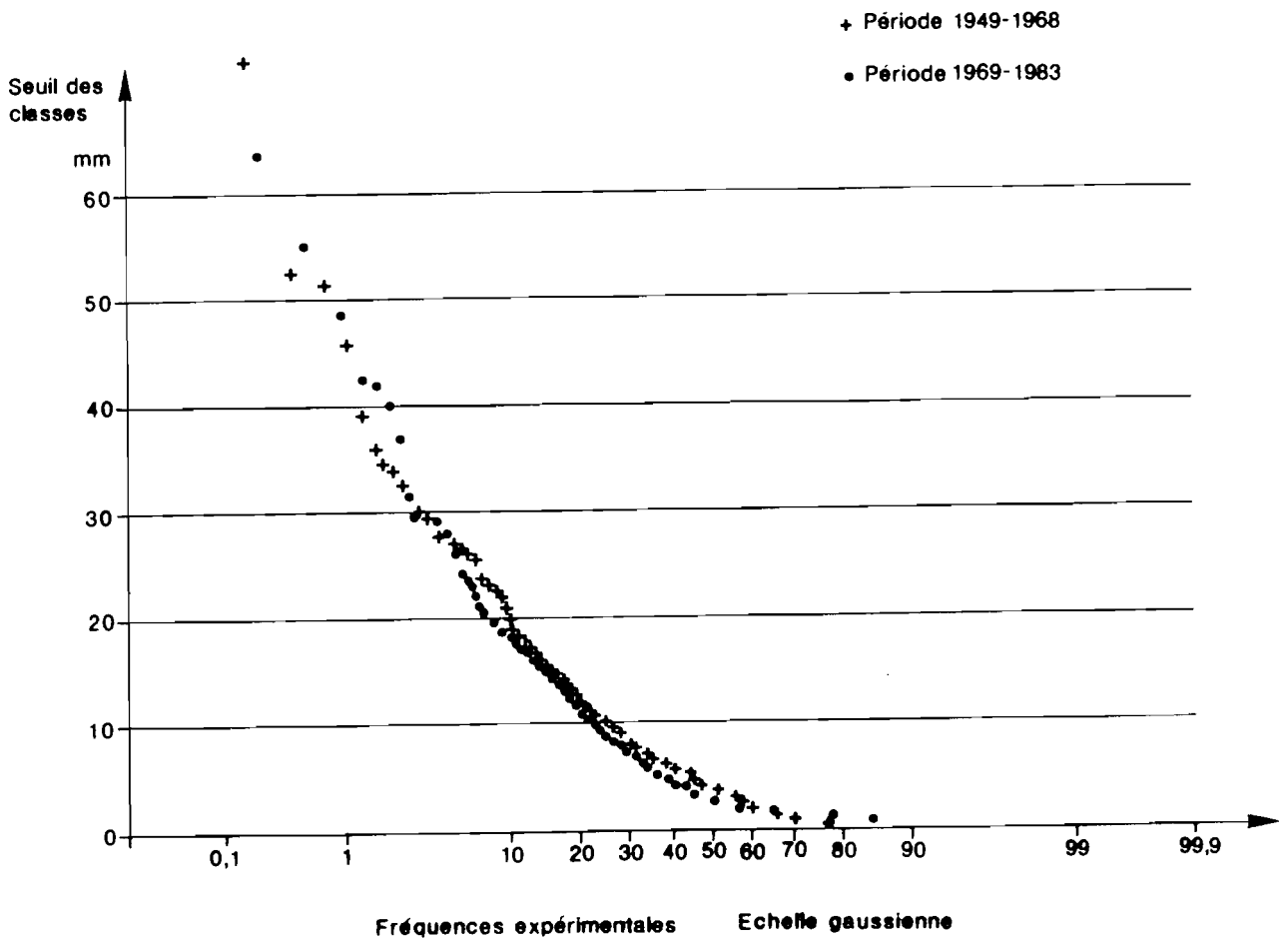
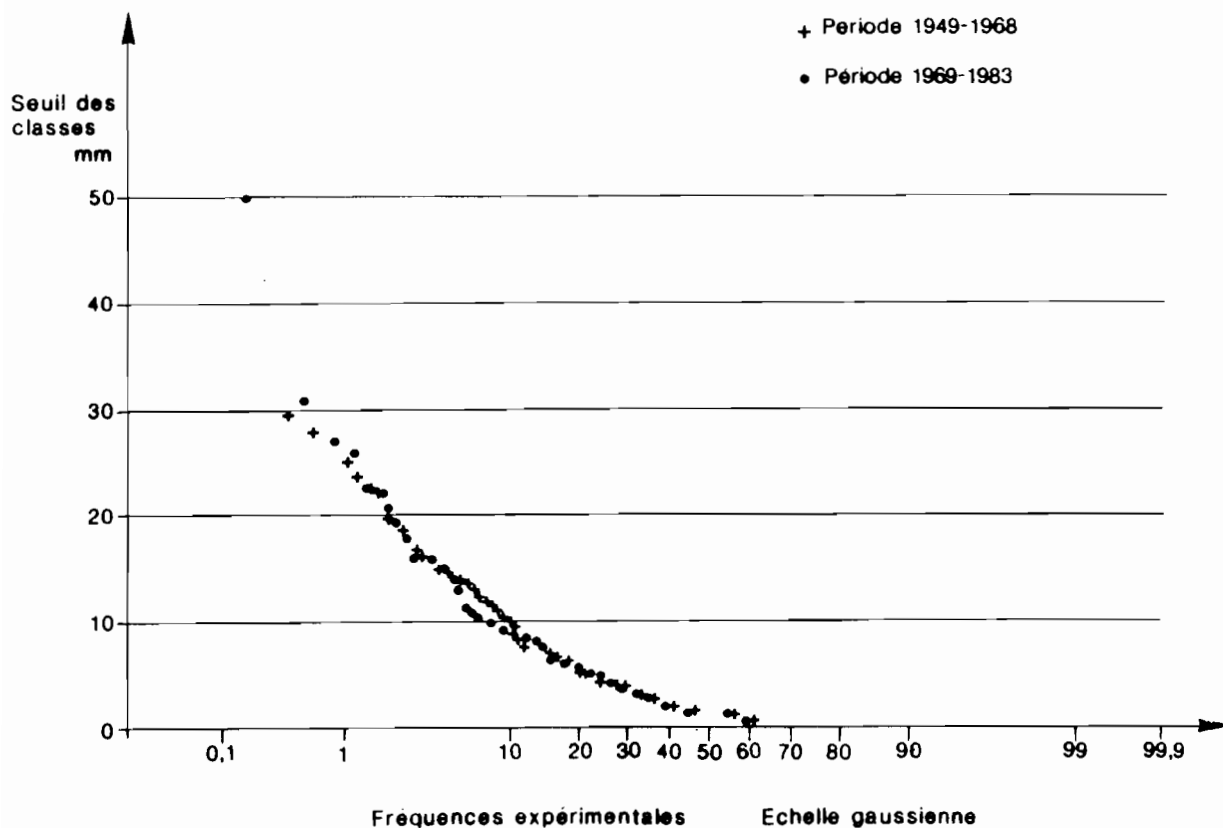


Fig-74- Lames ruisselées reconstituées sur le bassin de KAZANGA



4.3.4. Discussion.

La diminution du total pluviométrique pendant la période 1969-1984 semble être largement compensée par la modification des états de surfaces dans le fonctionnement des petits bassins versants. Ces modifications qui ont amené des conditions de ruissellement plus favorables, surtout sur les bassins au nord de l'isohyète 800 mm, sont dues à l'action conjuguée de l'homme et des nouvelles conditions climatiques. La diminution du couvert herbacé et l'extension des zones cultivées favorisent les tassements de la surface du sol et le développement de pellicules imperméables ainsi que l'extension des zones très érodées. Le bassin de KOGNERE présente actuellement les caractères des paysages habituels de régions plus septentrionales, vastes étendues de sol nu formant des glacis lisses ou caillouteux.

Les espèces de graminées pérennes disparaissent en faveur des annuelles. Dans la végétation arborée on remarque que les rares recrûs sont tous des épineux qui prennent la place des combrétacées (pl photo n° 6).

La similitude des distributions statistiques des lames ruisselées journalières reconstituées sur les deux périodes, tout comme les crues exceptionnelles apparues ici et là sont des arguments pour mettre en garde contre une révision à la baisse des normes de sécurité pour la construction des ouvrages à cause de la période sèche que nous vivons.

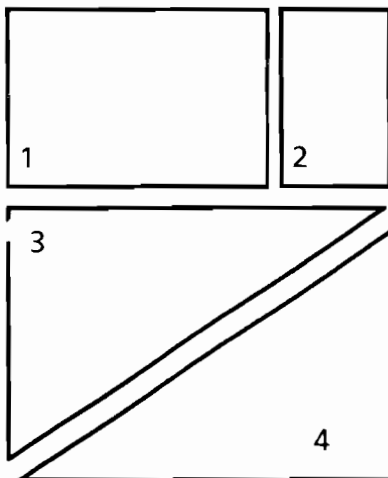
Rappelons, en effet que des crues ponctuelles causaient des dégâts dans une ville comme GOROM-GOROM le 29 et 30 septembre 1984 ou emportait des ouvrages sur des bassins versants de surface inférieure à 100 km² (barrage de ZAMSE au sud de OUAGADOUGOU) à un moment où l'attention était plutôt polarisée sur les problèmes de manque d'eau.

L'apparente contradiction de fonctionnement entre ces petits bassins versants et les plus grands rappelle la complexité spatiale des phénomènes hydrologiques.

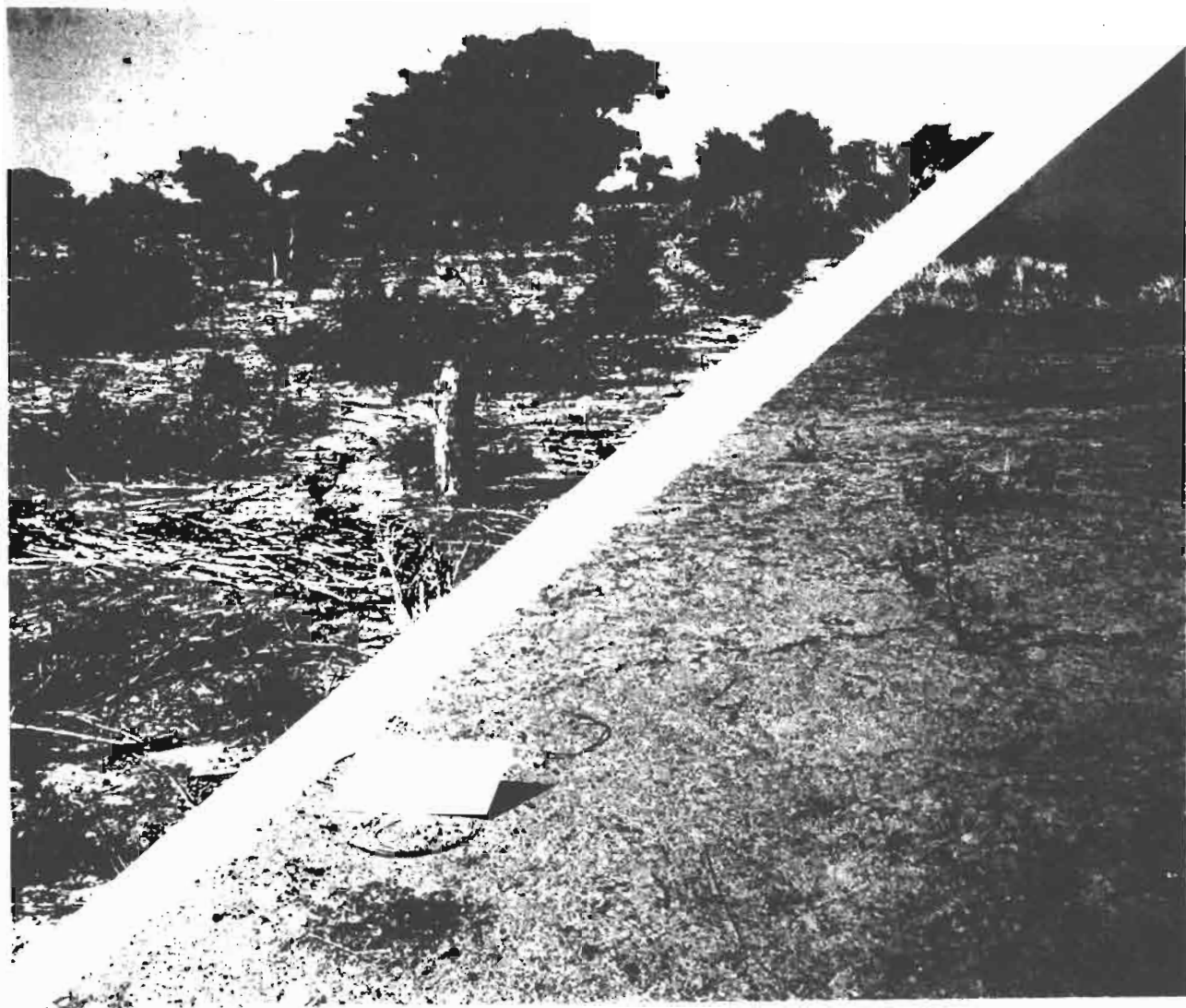
Il semble bien qu'il existe une surface de bassin versant à partir de laquelle l'influence de la sécheresse allant vers une chute des modules est contrecarrée par l'augmentation des coefficients de ruissellement produite par le développement des zones sans végétation et des organisations pelliculaires à fort ruissellement. D'après l'étude de POUYAUD (1986) sur les apports annuels du MOUNHOU et du NAKAMBA avant et après la récente phase de sécheresse on peut estimer cette "surface de rupture" à 30 000 km².

La dégradation de la surface des petits bassins versants est due à l'action conjuguée de la sécheresse et de la pression anthropique. Faire la part des deux phénomènes qui sont très imbriqués serait une gageure. La comparaison des modifications des régimes hydrologiques des bassins de KAZANGA dans une zone bien arrosée et de KOGNERE aux abords du SAHEL, montre cependant que le déficit pluviométrique exacerbe cette dégradation.

PLANCHE 6
SAHELISATION DU B.V. DE KOGNERE



1. Limite entre un champ abandonné (à gauche) et un champ récemment défriché (à droite)
2. Les recrûs sont des épineux et remplacent les combrétacés
3. Savane récemment défrichée et reste de la première culture
4. Champs dégradés après cinq années de culture continue, érosion en nappe marquée par des microdénivelées en forme de marche.



CONCLUSION GENERALE

Cette étude des paramètres hydrologiques sous pluie simulée et leur transposition à l'échelle du bassin versant constitue un prolongement des travaux menés depuis plus de vingt ans sur les bassins versants représentatifs et expérimentaux observés par l'ORSTOM en AFRIQUE de l'Ouest et en AFRIQUE Centrale.

En introduction, était évoqué le double intérêt du suivi du bilan hydrologique sur les petits bassins versants :

- L'intérêt purement scientifique qui se concrétise par l'accumulation des connaissances sur les régimes hydrologiques et par l'étude des mécanismes du cycle de l'eau.
- Les perspectives offertes au développement, qui se traduisent par un ensemble de données et de méthodes utilisables en vue d'aménagement pour la maîtrise de la ressource en eau et pour la conservation des sols.

Au terme de ce mémoire qui fait la synthèse des actions menées au BURKINA FASO, nous rappelons les principaux résultats d'un travail engagé depuis son début sur cette double voie de la recherche scientifique et du développement.

1. LES THEMES SCIENTIFIQUES ETUDIES.

Comme pour toute étude de type naturaliste, le premier thème abordé a été celui de la description du milieu. Ce milieu de la zone intertropicale sèche subit une forte évolution due à l'action conjuguée de plusieurs facteurs : baisse très sensible de la pluviométrie annuelle, croissance démographique, et accroissement du taux d'occupation des sols sans adaptation des systèmes culturels. Après avoir effectué un choix de données pluviométriques représentatives des zones écologiques du pays, nous avons pu mettre en évidence la réalité de la notion de persistance de la sécheresse qui sévit depuis 1969 dans le pays. Cette sécheresse se traduit par une succession d'années où les totaux pluviométriques annuels sont exceptionnellement faibles et par la généralisation géographique du déficit pluviométrique. Elle se caractérise pour les pluies inférieures à 20 mm, par un total annuel peu différent de celui de la période antérieure et pour les pluies supérieures à 40 mm, par un total annuel nettement inférieur. La probabilité d'occurrence des événements pluvieux ponctuels les plus forts n'est cependant pas affectée.

L'aridité croissante sur l'ensemble du pays est aggravée par l'exploitation extensive des terres agricoles. Les techniques actuelles d'exploitation, caractérisées par une grande consommation de l'espace ont accru la dégradation du milieu : régression du couvert végétal, augmentation des

phénomènes érosifs, chute de la capacité de rétention (accroissement du ruissellement) et baisse de la fertilité par lixiviation.

L'étude de l'hydrodynamique des sols sous pluie simulée s'est révélée être une bonne approche à la fois pour comprendre la genèse et la formation du ruissellement et pour expliquer l'évolution du comportement hydrologique des bassins versants. Elle a permis de déterminer les facteurs explicatifs de l'infiltration au BURKINA FASO. Sur l'ensemble des parcelles testées nous avons mis en relief le rôle prépondérant des paramètres décrivant les états de surfaces (couverture végétale, activité de la mésofaune, microrelief, organisations pelliculaires de l'horizon superficiel du sol) pour caractériser l'infiltration. La perméabilité d'un sol apparaît être une grandeur plus liée à l'écologie du milieu qu'à sa nature physique au sens strict.

La transposition, à l'échelle du bassin, des relations établies sur parcelles entre la pluie et le ruissellement conduit après calage à une bonne modélisation du volume des crues. La télédétection spatiale associée à une modélisation à petits pas de temps s'est avérée être un outil performant pour la simulation des écoulements, la prédétermination des crues de fréquence rare et pour la transposition des résultats d'un bassin connu à un bassin non observé. Il faut cependant rappeler que ce dernier résultat a été obtenu dans des conditions très favorables : le SAHEL est particulièrement bien adapté à cette méthode d'étude avec ses paysages typés et parfaitement différenciables par l'analyse multispectrale d'image. La transposition des données hydrologiques entre deux bassins a été réalisée dans une zone géographique réduite en utilisant une seule scène satellitaire.

L'étude du bilan hydrologique à l'échelle du bassin versant a mis en évidence une modification du comportement de certains bassins entre les dates des premières observations 1960 et des observations récentes. Les états de surface cartographiés aux mêmes dates que les observations, introduits dans le modèle "simulateur de pluie" ont conduit à la reconstitution d'une chronique complète de lames ruisselées journalières que l'on tient pour conforme aux ruissellements réels.

L'analyse de cette chronique montre que la sécheresse en favorisant l'extension des zones sans végétation et le développement des pellicules de surface entraîne l'accroissement des coefficients de ruissellements journaliers et annuels.

2. APPORTS TECHNOLOGIQUES.

Les expérimentations menées au BURKINA FASO, ont été dans le déroulement des programmes de recherche utilisant la simulation de pluie, favorables à la mise au point de l'appareillage. En effet, après les premiers essais de COTE D'IVOIRE, nous disposons d'un prototype de "mini-

simulateur de pluie" de conception artisanale qu'il fallait améliorer en vue de l'extension des études faisant appel à cette technique.

Les principes de l'appareil étant fixés, il nous a été possible pendant les quelques centaines d'heures d'expérimentations avec ce prototype d'imaginer et de concevoir un appareil de seconde génération.

Cet appareil de seconde génération réalisé au Laboratoire d'Hydrologie de MONTPELLIER et déjà diffusé à plusieurs exemplaires a été construit sur les principes suivants (BERNARD, 1986) :

- conserver l'idée de produire une averse artificielle à intensité variable sur une parcelle de 1 m² en faisant varier la surface arrosée au sol.
- réaliser le balayage du bras oscillant à vitesse constante.
- faciliter l'utilisation de cet outil en digitalisant ses principales fonctions et en réduisant ses dimensions.
- améliorer ses capacités en augmentant la gamme d'intensité produite, surtout vers les faibles valeurs.

L'utilisation d'un moteur, "hybride", pas à pas piloté par un microprocesseur s'est avéré comme la solution qui permet de simplifier au maximum les parties mécaniques nécessaires pour obtenir la cinétique voulue.

Ce matériel dont les organes électroniques utilisent les technologies de pointe semble d'une fiabilité supérieure aux systèmes entièrement mécaniques, même en conditions tropicales.

3. APPLICATIONS DANS LES ACTIONS DE DEVELOPPEMENT.

Au plan pratique, les résultats de ce travail peuvent être utilisés à des fins très diverses ; le projeteur trouvera d'une part les chroniques climatiques et hydrologiques établies en certains points et d'autre part des caractéristiques des régimes d'écoulement des petits bassins versants qui concerne toute la région.

Au projeteur d'ouvrages hydrauliques, on a proposé le concept "de crue d'étude" plus facile à déterminer et plus réaliste que celui de "crue décennale", qui fait référence à une pluviométrie de fréquence donnée et à des conditions secondaires de ruissellement. La détermination de cette

crue d'étude repose sur des méthodes souples et adaptées à l'état des connaissances que l'on a du terrain :

- Appréciation de la perméabilité globale d'un bassin versant avec la carte des états de surfaces
- Modélisation des volumes ruisselés
- Modélisation des crues.

Le planificateur des régions sahéliennes qui est confronté aux problèmes posés par l'épisode de sécheresse actuelle, pourra mettre à profit les résultats suivants :

- La probabilité d'occurrence d'événements exceptionnels est restée la même pendant la période sèche et une révision à la baisse des normes hydrologiques pour la sécurité des ouvrages ne doit pas être envisagée sur les petits bassins versants (surface < 1000 km²). L'augmentation des coefficients de ruissellement due à la dégradation des états de surfaces inciterait plutôt à une plus grande prudence.

- Dans la mesure où les petites pluies sont les éléments déterminants d'un projet, il est important de souligner qu'aucune modification sensible n'est apparue dans cette phase climatique.

L'accent mis sur l'importance des organisations de surfaces dans les phénomènes d'infiltration et de ruissellement devrait apporter des enseignements de première utilité pour tous les projets de conservation des eaux et des sols.

4. PERSPECTIVES POUR CE PROGRAMME DE RECHERCHES.

Ce mémoire a fait la synthèse des résultats obtenus sur huit bassins versants au BURKINA FASO, mais ce programme de recherche se poursuit dans d'autres pays de la même zone climatique et se développe dans d'autres régions. Au terme des expérimentations en zone soudano-sahélienne on est en droit d'attendre :

- un catalogue des états de surfaces.
- une typologie des bassins versants en fonction de leur perméabilité globale.
- la confirmation des possibilités de généraliser l'établissement de la carte des états de surface par l'analyse d'images fournies par les satellites. L'utilisation des documents SPOT (satellite d'observations de la terre à haute définition) devrait fournir une meilleure définition des zones

homogènes (pixel plus petit que LANDSAT) et la topographie numérisée des bassins (image stéréoscopique). Les progrès apportés par l'imagerie SPOT aux données d'entrée du modèle à discrétisation spatiale des écoulements sont en cours d'évaluation dans un programme de recherche qui a choisi les bassins versants de la Mare d'OURSI comme terrain expérimental.

Pour résumer l'apport des techniques de simulation de pluies et de cartographie des états de surface à l'étude des crues et à leur prédétermination, nous présentons ci-dessous l'évolution de la méthode à mettre en oeuvre en vue de déterminer la crue d'étude.

- Sans faire appel à la simulation de pluie :

La méthode pour étudier le ruissellement et en particulier la crue décennale, consiste en un ajustement d'un modèle pluie-débit sur un échantillon observé de fortes crues. Cette méthode demande une longue présence sur le terrain, souvent plus de trois ans, pour constituer un échantillon de crues observées statistiquement significatif, et la chance de ne pas "rater" les événements exceptionnels dont l'apparition est aléatoire et la mesure toujours difficile.

- Dans l'état actuel de nos connaissances :

Pour étudier un petit bassin versant, il faut pratiquement : réaliser une carte des états de surfaces et définir le "poids" de chaque zone contributive homogène, tester sous pluie simulée les propriétés hydrodynamiques de chacune de ces zones, extrapoler au bassin les paramètres hydrologiques obtenus sur parcelles. Nous avons vu qu'une année d'expérimentation suffit pour obtenir une estimation correcte de la crue "d'étude". De plus, cette méthode permet d'aborder les modifications du comportement hydrologique d'un bassin versant à travers l'évolution des états de surfaces.

- Au terme des expérimentations en cours :

Le catalogue des états de surfaces et les fichiers physiographiques des bassins obtenus par l'imagerie satellitaire permettront la mise en place d'un modèle des écoulements supprimant toute expérimentation lourde sur le terrain. La présence de l'hydrologue sur le terrain pourra se limiter à une expertise pour vérifier la cartographie réalisée à partir du satellite (vérité sol) et pour reprendre certains détails de la topographie (lit de la rivière, forme des berges...) afin de moduler des extrapolations en fonction des possibilités de débordement, d'écèlement de crues etc.)

BIBLIOGRAPHIE

ALBERGEL, J. (1983). Estimation de la lame ruisselée sur un petit bassin versant à partir des pluies simulées. *Notes et documents voltaïques*. CNRST OUAGADOUGOU. 14, 1, pp 16-28.

ALBERGEL, J. (1986). Evolution de la pluviométrie en AFRIQUE soudano sahélienne. Exemple du BURKINA FASO, *col. internationale sur la révision des normes hydrologiques suite aux incidences sur la sécheresse*, CIEH OUAGADOUGOU 17 p.

ALBERGEL, J., BERNARD, A. (1984a). Calage du modèle simulateur. Préviation de la crue décennale sur le bassin versant de BINNDE. ORSTOM OUAGADOUGOU. 50 p.

ALBERGEL, J., BERNARD, A. (1984b). Etude des paramètres hydrodynamiques des sols sous pluies simulées. Estimation du ruissellement sur le bassin versant de KAZANGA. ORSTOM OUAGADOUGOU. 79 p.

ALBERGEL, J., CARBONNEL, J.P., GROUZIS, M. (1984a). Pluies, eaux de surface, production végétale, ORSTOM-DGRST, OUAGADOUGOU, *multigr* 58 p.

ALBERGEL, J., CARBONNEL, J.P., GROUZIS, M. (1984b). Péjoration climatique au BURKINA FASO. Incidences sur les ressources en eau et sur les productions végétales. *Cah. ORSTOM, sér. hydro.* Vol. XXI, n°1 3-19.

ALBERGEL, J., CARBONNEL, J.P., GROUZIS, M. (1985a). Sécheresse au SAHEL, incidences sur les ressources en eau et les productions végétales. Cas du BURKINA FASO. *Veille climatique satellitaire n°7 - ORSTOM, météorologie nationale LANNION*. pp. 18-30.

ALBERGEL, J., CARBONNEL, J.P., VAUGELADE, J. (1985b). Aléas climatiques et production agricole : le coton au BURKINA. *Acta oecologia, Oecologia applic.* vol 6 n°3 pp. 199-211.

ALBERGEL, J., CASENAVE, A., VALENTIN, C. (1985c). Modélisation du ruissellement en zone soudano-sahélienne, simulation de pluies et cartographie des états de surfaces. Journées hydrologiques de MONTPELLIER. *Colloques et séminaires*. Editions de l'ORSTOM : pp. 75-87.

ALBERGEL, J., CHEVALLIER, P., LORTIC, B. (à paraître). D'OURSI à GAGARA : transposition d'un modèle de ruissellement dans le SAHEL (BURKINA FASO) *Hydrologie continentale*, ed. de l'ORSTOM.

ALBERGEL, J., GIODA, A. (1986) Extension des surfaces agricoles et modification de l'écoulement. Analyse sur deux bassins de la savane africaine. *XIXème journées de l'hydraulique de la S.H.F.* PARIS. Tome 1 pp. 191-196.

ALBERGEL, J., RIBSTEIN, P., VALENTIN, C. (1985d). Quels facteurs explicatifs de l'infiltration? Analyse sur 48 parcelles au BURKINA FASO. *Journées hydrologiques de MONTPELLIER, Coll. et séminaires.* ORSTOM. pp. 26-48.

ALBERGEL, J., THEBE, B. (1986). Pluie naturelle - pluie simulée, quelle différence sur le ruissellement? *Gouttes et Splash* Vol 3, n°1.

ALBERGEL, J., TOUIRI, H. (1982). Un nouvel outil pour estimer le ruissellement sur un petit bassin versant : le mini-simulateur de pluie. Expérimentation sur le bassin de BINNDE. ORSTOM, OUAGADOUGOU, p 117.

ALBERGEL, J., VALENTIN, C. (1986). "Sahélisation" d'un petit bassin versant : BOULSA KOGNERE au centre nord du BURKINA FASO *Colloque Nordest SAHEL*, IHEAL, PARIS.

AMERMAN, C.R., HILLEL, D., PETERSON, A.L. (1970). A variable intensity sprinkling infiltrometer *Soil sci. soc. amer. Proc.*, 34 : 830-832.

AMRI (1985). Influence de la sécheresse sur la forme des pluies. *Mémoire de DEA*, ORSTOM, Université de PARIS-SUD, 66 p.

Anonyme (1984). Enquête sur les crues des koris traversant la route TILLABERI-AYOROU à la suite de la pluie du 30 septembre 1984. *ORSTOM D.R.E. NIAMEY*. 10 p.

ASECNA (1976a). Analyse de lignes de grains dans la boucle du NIGER. *Météorologie*, sér. VI n°6, pp. 183-189.

ASECNA (1976b). Répartition des précipitations dans un système perturbé complexe. *Météorologie*, sér. VI, n°6, pp. 191-193.

ASSELIN, J., VALENTIN, C. (1978). Constructions et mise au point d'un infiltromètre à aspersion. *Cah. ORSTOM, sér. hydro.* vol XV n°4 : pp. 321 - 349.

ATLAS INTERNATIONAL DE L'OUEST AFRICAIN (1968). ORGANISATION de L'UNITE AFRICAINE, FONDATION FORD, 42 planches cartographiques.

BADER, J.C. (1986). Etude du ruissellement sous pluie simulée sur les bassins versants du lac ELIA et de la SAYES à DZOBEGAN - TOGO *Rapport ORSTOM*, LOME 58 p.

BADO, L., OUEDRAOGO, F., LOMBARDI, E.R. (1982). Essai d'étude préliminaire sur l'avancement de la désertification dans la zone DORI-OURSI. *Ministère du développement rural*. multigr. 11 p.

BAUDET, J., LAURENTI P., (1976). Traceurs isotopiques et situation météorologique. *Météorologie série VI*, n°6 pp. 213-221.

BENTLY, W.A. (1904). Studies of raindrops and raindrop phenomena *Monthly weather review* 32 pp. 450-456.

BERNARD, A. (1986). Un nouveau simulateur de pluie. *Gouttes et Splash, bul. du groupe méthodologique de simulation de pluie*. Vol 3 n°2, ABIDJAN, pp. 12-16.

BERNUS, E., FAUCK, R., MARCHAL, J.Y. (1984). Le SAHEL et ses problèmes, l'apport de la recherche. *AFRIQUE contemporaine, La doc. Française*, 129, pp. 11-17.

BERTRAND, R.B. PARR, J.F. (1960). Development of a portable sprinkling infiltrometer. *Tr. of the VIIIth int. cong. of soil sci. MADISON*. 6(4) pp. 433-440.

BILLON, B. (1985). Le NIGER à NIAMEY. Décrue et étiage 1985. *Cah. ORSTOM, Sér. hydro. vol XXI* n°4. pp 3-22.

BOIFFIN, J. (1984). La dégradation structurale des couches superficielles du sol sous l'action des pluies. *Thèse doc. Ing. Institut National Agronomique de PARIS GRIGNON* : 320 p.

BOULET, R. (1968). Etude pédologique de la HAUTE VOLTA, région centre-nord, *Rapport ORSTOM* multigr. 351 p.

BOULET, R. (1974). Toposéquences des sols tropicaux en HAUTE VOLTA : équilibres dynamiques et bioclimats. *Thèse Sciences, STRASBOURG* multigr. 330 p.

BOULET, R. (1976). Carte des ressources en sols de la HAUTE VOLTA. 5 cartes + notice, 97 p. *Ed. ORSTOM, Ministère de la Coopération*

- BOULET, R., FAUK, R., KALOGA, B. LEPRUN, J.C. (1969). Etude pédologique de la HAUTE VOLTA, *Rapport général de synthèse, ORSTOM* 30 p.
- BOULET, R., LEPRUN, J.C. (1969). Etude pédologique de la HAUTE VOLTA, région est, *Rapport ORSTOM* multigr. 331 p.
- BOUROUCHE, J.M., SAPORTA, G. (1983). L'analyse des données. Que sais-je? PUF 126 p.
- BRAKENSIEK, P.O., RAWLS, W.J., HAMON, W.R. (1979). Application of an infiltrometer system for describing infiltration into soils. *Trans of ASAE* 14(4) pp. 625-628.
- BRUNET-MORET, Y. (1963). Etude générale des averses exceptionnelles en AFRIQUE occidentale. République de HAUTE VOLTA. *ORSTOM PARIS* 23 p.
- BRUNET-MORET, Y. (1965). Etudes hydrologiques du nord DORI et de DJIBO. Rapport de campagne 1964 et 1965. ORSTOM, PARIS 33 p. 48 p.
- BRUNET-MORET, Y. (1974). Distribution exponentielle généralisée. *Cah. ORSTOM, sér. hydro..* Vol. XI n°4 pp. 245-236.
- BRUNET-MORET, Y. (1975). Distribution gaussio-logarithmique. *Cah. ORSTOM, sér. hydro..* Vol. XII n°2 pp. 63-140.
- BRUNET-MORET, Y. (1979). Homogénéisation des précipitations. *Cah. ORSTOM, sér. hydro..* Vol XVI n°3, 4 pp. 147-170.
- BRUNET-MORET, Y., CHAPERON, P., LAMAGAT, J.P., MOLINIER, M. (1986). Monographie hydrologique du fleuve NIGER. *Collection monographies hydrologiques n°8 ORSTOM* 396 + 506 p.
- CAILLIEZ, F., PAGES J.P. (1976). Introduction à l'analyse des données SMACH, 616 p.
- CAMUS, H., CHAPERON, P., GIRARD, G., MOLINIER, M. (1976). Analyse et modélisation de l'écoulement superficiel d'un bassin tropical. Influence de la mise en culture. COTE D'IVOIRE, KORHOGO, 1962-1972. *Travaux et Documents* n°52, ORSTOM PARIS, 81p.

CARBONNEL, J.P. (1983). Evolution climatique récente en HAUTE VOLTA ; un paramètre pluviométrique peu utilisé : la pluie moyenne journalière annuelle. *Notes et documents voltaïques*, n°3 et 4.

CARBONNEL, J.P., HUBERT, P. (1985). Sur la sécheresse au SAHEL d'AFRIQUE de l'ouest. Une rupture climatique dans les séries pluviométriques du BURKINA FASO (ex HAUTE VOLTA). *C.R. Acad. sc.*, tome 301 n°13 pp. 941-944.

CASENAVE, A. (1978). Etude hydrologique des bassins de SENGUERE. *Cah. ORSTOM, sér. hydro.* vol XV n° 1 et 2 : pp. 3 - 209.

CASENAVE, A. (1981). Etude des crues décennales des petits bassins forestiers en AFRIQUE tropicale. Rapport final. *C.I.E.H. ORSTOM, ADIOPODOUME*, 59 p.

CASENAVE, A. (1982). Le mini-simulateur de pluies. Conditions d'utilisation et principes de l'interprétation des mesures. *Cah. ORSTOM, sér. hydro.* Vol. XIX, 4, pp. 207-227.

CASENAVE, A. (1985). Programme d'analyse du ruissellement, de l'infiltration et de l'érosion à l'aide des techniques de simulation de pluie. Journées hydrologiques de MONTPELLIER. *Colloques et séminaires ORSTOM* : pp. 10 - 17.

CASENAVE, A., GUIGUEN, N., SIMON, J.M. (1982). Etude des crues décennales des petits bassins versants forestiers en AFRIQUE tropicale. *Cah. ORSTOM, sér. hydro.* Vol XIX, n°4, pp. 229-252.

CASENAVE, A., KONG, J., THIEBAUX, J.P. (1985). Etude du ruissellement sous pluies simulées sur un bassin versant de la COMBA, *Rapport ORSTOM, ABIDJAN multigr.* 30 p.

CHEVALLIER, P. (1982). Simulation de pluies sur deux bassins versants sahéliens (MARE D'OURSIS - HAUTE VOLTA) *Cah. ORSTOM, sér. hydro.* vol. XIX n°4 : pp. 253 - 297.

CHEVALLIER, P. (1983). L'indice des précipitations antérieures. Evaluation de l'humectation des sols des bassins versants représentatifs. *Cah. ORSTOM, sér. hydro.* Vol. XX n°3, 4 : pp. 179-190.

CHEVALLIER, P., CLAUDE, J., POUYAUD, B., BERNARD, A. (1985). Pluies et crues au SAHEL. Hydrologie de la mare d'OURSIS (BURKINA FASO). *Travaux et documents n°190 ORSTOM PARIS*, 251 p.

CHEVALLIER, P., LAPETITE, J.M. (1986). Note sur les écarts de mesures entre les pluviomètres standards et les pluviomètres au sol en AFRIQUE de l'OUEST. *Journées hydrologiques de MONTPELLIER*, Ed. de l'ORSTOM, (à paraître).

CHEVALLIER, P., VALENTIN, C. (1984). Influence des micro-organisations pelliculaires superficielles sur l'infiltrabilité d'un type de sol sahélien. *Journées du Groupe Français d'Humidité Neutronique*. MONTPELLIER, 13-14 nov. 1984.

CHILDS, E.L. (1969). An introduction to the physical basis of soil water phenomena. *Willey Interscience* NEW YORK, NY. 493 p.

CLAUDE, J., BERNARD, A., TOURI, H., ALBERGEL, J. (1982). Observations climatologiques à la station de JALAFANKA et observations hydrologiques à KOLEL, JALAFANKA et MARE D'OURSI. *Rapport ORSTOM-OUAGADOUGOU multigr.* 98 p.

COLLINET, J. (1985). Hydrodynamique superficielle de quelques types de sols du SAHEL africain, comparaison des données fournies par deux dimensions de parcelles de simulation de pluie. *Journées hydrologiques de MONTPELLIER, Colloques et séminaires, ed. ORSTOM 1* pp. 12-162.

COLLINET, J., LAFFORGUE, A. (1978). Mesures de ruissellement et de l'érosion sous pluies simulées pour quelques types de sols de HAUTE VOLTA. ORSTOM, ABIDJAN, *Multigr.* 129 p. + 123 p.

COLLINET, J., VALENTIN, C. (1979). Analyse des différents facteurs intervenant sur l'hydrodynamique superficielles. Nouvelles perspectives. Applications Agronomiques. *Cah. ORSTOM, série pédologie XVII (4)* : pp. 283-328.

COLLINET, J. VALENTIN, C. (1982). Effects of rainfall intensity and soil surface heterogeneity on steady infiltration rate. *XII Cong. Int. de science du sol*. NEW DEHLI, Fev. 1982, 10 p.

COLLINET, J., VALENTIN, C., ASSELINE, J., HOEPFFNER, M., HARANG, P., PEPIN, Y. (1 9 8 0) . Ruissellement, infiltration et érosion en zones sahéliennes et subdésertiques. Bassin versant de GALMI et cuvette d'AGADEZ. *ORSTOM, ABIDJAN*, 38 P.

COLOMBANI, J., LAMAGAT, J.P., THIEBAUT, J. (1973). Mesure de la perméabilité des sols en place : un nouvel appareil pour la méthode MUNTZ. Une extension de la méthode PORCHET aux sols hétérogènes. *Bulletin des sciences hydrologiques*, 18 (2) : pp. 197-235.

COUREL, M.F. (1977). Etude géomorphologique des dunes du SAHEL (NIGER nord occidental - HAUTE VOLTA septentrionale) *Thèse troisième cycle* Université PARIS VII. 284 p.

COUREL, M.F. (1984). Etude de l'évolution récente des milieux sahéliens à partir des mesures fournies par les satellites. *Thèse doctorat d'Etat es lettres et sciences humaines*. Université PARIS I, 407 p.

DE BRUIN, H.A.R. (1985). Results of the international comparison of rain gauges with a reference pit gauge. *Royal Netherlands Meteorological Institute. Correction of precipitation measurements. Boris SEVRUK (ed) ETH/IAHS/WHO Workshop on the correction of precipitation measurements Zurich 1-3 Ap. 1985 - pp. 97-100.*

DE MARSILY, G. (1981). Hydrologie quantitative, *MASSON* edi. PARIS, NEW-YORK, BARCELONE, MILAN, MEXICO, RIO DE JANEIRO. 214 p.

DE PLOEY, J. (1983). Rainfall simulation runoff and soil erosion, *Catena Supplement 4*, 214 p.

DEFOSSEZ, M. (1962). Contribution à l'étude géologique et hydrologique de la boucle du NIGER. *Mem. BRGM. n° 13.*

DEWISPLAERE, G., TOUTAIN, B. (1976). Estimation de l'évolution du couvert végétal en 20 ans, consécutivement à la sécheresse dans le SAHEL voltaïque. *Photointerprétation n°3, fascicule 2.*

DHONNEUR, G. (1984) *Traité de météorologie tropicale. Vol I. METEOROLOGIE NATIONALE, PARIS, 151 p.*

DUBREUIL, P. (1974). Initiation à l'analyse hydrologique. *éd. MASSON et CIE - ORSTOM* 216 p.

DUBREUIL, P., CHAPERON, P., GUISCAFRE, J., HERBAUD, J. (1972). Recueil des données de base des bassins représentatifs et expérimentaux. Années 1951 - 1969. *ORSTOM PARIS. 916 p.*

DUHART, J. (1954). Rapport sur l'état actuel de la conservation des sols en territoire de HAUTE VOLTA. *Conférence inter-africaine des sols C.C.T.A. 103* 10 p.

DUMONT, R. (1986). Pour l'AFRIQUE j'accuse. *Terre humaine éd PLON. PARIS 457 p.*

FEDOROV, S.F. (1950). Opyt primeneniya dozhdevalnoy ustanovki dla izucheniya infiltratsionnoy sposobnosti pochvy (quelques exemples d'utilisation du dispositif d'aspersion pour l'étude de l'infiltration dans le sol). *Trudy GGI vol. 24(78)* : pp. 109-121.

FONTES, J.C. (1976). Isotopes du milieu et cycles des eaux naturelles : quelques aspects. Thèse d'Etat, Université PARIS VI, 208 p.

FONTES, J. (1983). Essais cartographiques de la végétation par télédétection. Quelques exemples pris en HAUTE VOLTA. *Thèse de troisième cycle*. Université Paul SABATIER, TOULOUSE. 179 p.

GIRARD, G. (1975). Les modèles hydrologiques pour l'évaluation de la lame écoulée en zone sahélienne et leurs contraintes. *Cah. ORSTOM, sér. hydro.*. Vol XII n°3.

GIRARD, G., LEDOUX, E. (1983). Modèle couplé : notice d'utilisation des programmes. Mise à jour du 14 Décembre 1983. Ecole des Mines de PARIS, ORSTOM, BONDY, *multig*, 54 p.

GIRARD, G., LEDOUX, E., VILLENEUVE, J.P. (1981). Le modèle couplé. Simulation conjointe des écoulements de surface et des écoulements souterrains dans un système hydrologique. *Cah. ORSTOM, sér. hydro., n°4 - 1981* : pp 151-278.

GIRARD, G., MORIN, G., CHARBONNEAU, R. (1972). Modèle précipitation - débit à discrétisation spatiale. *cah. ORSTOM, sér. hydro. vol IX n°4* pp 35-52.

GREEN, W.H. AMPT, G.A. (1911). Studies on soil physics : flow of air and water through soils. *J. Agr. sci.* 4 : pp. 1-24.

GROUZIS, M. (1979). Structure, composition floristique et dynamique de la production de matière sèche des formations végétales sahéliennes (MARE D'OURSIS, HAUTE VOLTA) A.C.C. Lutte contre l'aridité dans l'OU DALAN. DGRST ORSTOM OUAGADOUGOU. *multigr.* 56 p.

GROUZIS, M., SICOT, M. (1983). Production fréquentielle du bassin versant de la MARE D'OURSIS. Application à l'estimation des potentialités pastorales. *Atelia* FAO ISRA DAKAR. 11 p.

GUINKO, S. (1984). Végétation de la HAUTE VOLTA. Thèse de Doctorat es sciences, *Université de BORDEAUX III*. Tomes 1 et 2, 394 p.

HALL, M.J. (1971). A critique of methods of simulating rainfall. *Wat res.* 6 (4) pp. 1104-1114.

HERSMEIER, L. (1963). Construction and operation of a 16 unit rainulator USDA ARS pp. 41-62.

HERVOUET, J.P. (1980). Du *Feidherbia* à la brousse, modifications culturales et dégradation sanitaire, ORSTOM OUAGADOUGOU, *multigr.*, 26 p.

HILLEL, D. (1960). Crust formation in loessial soils. *Trans. Int. sci. congress, MADISON 7th I*, pp. 330-339.

HILLEL, D. (1974). L'eau et le sol, principes et processus physiques. *Dept. of soil sc. The Hebrew University of JERUSALEM*. Trad. de l'anglais par Louis W DE BACKER, WANDER ed. LOUVAINS : 288 p.

HILLEL, D., GARTNER, W.R. (1969). Steady infiltration into crust topped profiles soil, *sci.*, 108, pp. 137-142.

HORTON, R.E. (1933). The role of infiltration in the hydrological cycle. *Trans. Amer. Geophys. Un. 14* : pp. 446-460.

HORTON, R.E. (1940). Approach toward a physical interpretation of infiltration capacity. *Soil sci. soc. Amer. proc.* 5 pp. 339-417.

HOTTIN, G., OUEDRAOGO, O.F. (1975). Carte géologique à 1/1 000 000 de la République de HAUTE VOLTA. *Editions BRGM* 56 p.

IBIZA, D. (1985). Interprétation des mesures d'infiltration sous pluies simulées à partir du principe du bilan hydrique : bassin de POLAKA sur la Mare d'OURSI. *Journées hydrologiques de l'ORSTOM à MONTPELLIER. 17-18 Septembre 85. Colloques et séminaires. éd. de l'ORSTOM.* pp. Z190-196.

IMBERNON, J. (1981). Etude de la variabilité spatiale des caractéristiques hydrodynamiques d'un sol du SENEGAL. *Thèse 3ème cycle. Inst. Polytechnique de GRENOBLE*, 149 p.

JAMES, L.G., LARSON, C.L. (1976). Modeling infiltration and redistribution of soil water during intermittent application. *Journal of the A.S.A.E.* 19 (3) : pp. 482-488.

KALOGA, B. (1964). Reconnaissance pédologique des bassins versants des VOLTA Blanche et Rouge - 1 - Etude pédologique - 2 - Résultats analytiques - *Rapport ORSTOM, DAKAR multigr.*

- KALOGA, B. (1966). Etude pédologique des bassins versants des VOLTA Blanche et Rouge en HAUTE VOLTA. *Cah. ORSTOM, série pédologie.*, IV, 1, pp. 23-61.
- KALOGA, B. (1969). Etude pédologique de la HAUTE VOLTA, région centre-sud. *Rapport ORSTOM* 247 p. multigr.
- KALOGA, B. (1970). Etude pédologique des bassins versants des VOLTA Blanche et Rouge (3ème partie) - Sols associés aux vertisols : sols halomorphes *Cah. ORSTOM, série pédologie*, VIII, 2, pp. 187-218.
- KALOGA, B. (1972). Premiers résultats d'une étude morphologique et dynamique détaillée des sols cuirassés du centre-sud de la HAUTE VOLTA : les horizons ferrugénisés et les horizons d'altération sous-jacents. *Bulletin liaison thème B ORSTOM* pp. 29-43.
- KERENYI, A. (1981). A study of the dynamics of drop erosion under laboratory conditions. Erosion and sediment transport measurement. IASH n°133 pp. 365-372.
- KLEIN, J.C. (1967a). Note sur les écoulements observés de 1964, 1965, 1966 sur le MASSILI à LUMBILA (retenue de PK 20). *Rapport ORSTOM, OUAGADOUGOU multigr.*
- KLEIN, J.C. (1967b). Etude hydrologique des bassins représentatifs dans le sud est de la HAUTE VOLTA, région de MANGA. Rapport définitif 1963-1965. *Rapport ORSTOM, PARIS, multigr.* 90 p.
- KOSTIAKOV, A.N. (1932). On the dynamics of the coefficient of water percolation in soils and on the necessity for studying it from a dynamic point of view for purposes of amelioration. *Trans. Comm. Intern. Soil sc. soc. MOSCOW*, 67th Part. A pp. 17-21.
- 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. hydro.* Vol. XIV n°4 : pp. 299-344.
- LAFFORGUE, A. (1982). Etude hydrologique des bassins de SAKASSOU (COTE D'IVOIRE) (1972-1977). *Travaux et documents de l'ORSTOM* n°149. PARIS, 342 p.
- LAFFORGUE, A., NAAH, E. (1976). Exemple d'analyse expérimentale des facteurs de ruissellement sous pluies simulées. *Cah. ORSTOM, sér. hydro.* vol XIII. n°3 : pp. 299-344.

- LAHAYE, J.P. (1980). Etude des pluies journalières de fréquence rare en HAUTE VOLTA. *CIEH OUAGADOUGOU* 89 p.
- LAMACHERE, J.M. (1984). Etude hydrologique des plaines de NIENA DIONKELE et FOULASSO LELASSO. *Rapport ORSTOM-OUAGADOUGOU*, 387 p. 2 t.
- LE BARBE, L. (1979). Etude hydrologique de la plaine de KAMADENA. Rapport définitif, ORSTOM OUAGADOUGOU *multigr.* 224 p.
- LE BARBE, L. (1981). Etude du ruissellement sur la ville de OUAGADOUGOU. Rapport général. ORSTOM, OUAGADOUGOU Tome I *multigr.* 159 p. Tome II *multigr.* 88 p.
- LECAILLON, J., MORISSON, C. (1984). Politiques macroéconomiques et performances agricoles. Le cas de la HAUTE VOLTA. *OCDE centre de développement, PARIS*, *multigr.* 146 p.
- LEE, A.F.S. HEGHINIAN, S.M. (1977). A shift of the mean level in a sequence of independant normal random variables. A bayesian approach. *Technometries*. Vol. 19 n°4 pp 503-506.
- LEMAITRE Y. (1981). Etude thermodynamique et dynamique des lignes de grains observées à KOROGHO pendant l'expérience COPT 79 *Thèse Docteur 3ème cycle, Université PARIS VII*, 226 pp.
- LENEUF, N. (1954)? Les sols du secteur cotonnier de HAUTE VOLTA. *Conférence inter-africaine des sols C.C.T.A.* 78. 22 p.
- LEPRUN, J.C. (1971). Premières observations sur des toposéquences à amont cuirassé en HAUTE VOLTA orientale : rôle de la pédogénèse dans la destruction des cuirasses et le façonnement du modelé. *Bulletin liaison thème B ORSTOM.* 2, pp. 39-53.
- LEPRUN, J.C., MOREAU, R. (1968). Etude pédologique de la HAUTE VOLTA, région O.N. *Rapport ORSTOM* 341 p. *multigr.*
- LEROUX, M. (1981). Le climat de l'AFRIQUE tropicale, *Thèse de doctorat d'Etat*. Université de DIJON. 3 tomes. 1427 p.
- LEUSINK, A., TYANO, B. (1985). Observations du niveau de la nappe des eaux souterraines et de sa composition chimique et isotopique de socle cristallin au BURKINA FASO, *Bull. de liaison du CIEH.* n°62.

LEVANG, P., GROUZIS, M. (1980). Méthodes d'étude de la biomasse herbacée de formations sahéliennes : application à la MARE D'OURSIS (HAUTE VOLTA) : *Acta oecologia, oecologia plantarum* ; vol. 15 n°3 : pp. 231-244.

L'HOTE, Y. (1987). Communication orale sur la qualité des données pluviométriques.

LINSLEY, R.K., KOHLER, M.A. PAULHUS, J.L.H. (1949). Applied hydrology *Mac GRAW Hill Book company*, NEW YORK, TORONTO, LONDON, chap. 16 : pp. 414-418.

LOINTIER, M., LORTIC, B. (1984). Mare d'OURSIS (HAUTE-VOLTA) Traitement numérique de la vue LANDSAT du 04 février 1976. *Rapport ORSTOM CAYENNE. Multigr.* 13 p.

MARCESSE, J. (1970). Exploitation des mesures neutroniques pour calculer les bilans hydriques et les doses d'arrosage. *Note techn*; Dpt de Biologie. Service de radio-agronomie. Centre d'études Nucléaires CADARACHE.

MARCHAL, J.Y. (1982). Facteurs climatiques limitants et calamités agricoles en région de savane : YATENGA, PAYS MOSSI, HAUTE VOLTA, Hérodote. 24, pp. 68-94.

MARQUARDT, D.W. (1963). An algorithm for least square estimation of non linear parameters. *J. of the stat. compt. section* ; pp. 57-65.

McCORD, J.T. (1985). Review and field study of lateral flow on unsaturated hillslopes. *Hydrology days and the 40th annual Rocky Mountain Groundwater conf. Hydrology days pub.* MOREL-SEYTOUX, H.J. and DOEHRING, D.O. ed. FORT-COLLINS COLORADO : pp. 1-11.

McQUEEN, I.S. (1963). Development of an hand-portable rainfall simulator infiltrometer. USGS (Circ. 485).

MIETTON, M. (à paraître). Contribution à l'étude de la dynamique de surface. Erosion et lutte anti-érosive au BURKINA, *Thèse à paraître*.

Ministère du plan et de la coopération, Direction générale du Plan (1978). Situation économique et financière de la HAUTE VOLTA. Dossier d'information économique (avec le Ministère de la Coopération Française).

MOCKUS, V. (1969). Estimation of direct runoff from storm rainfall *Soil cons. serv. U.S.D.A. Hydrology Section 4*, 10.1-1024.

MOLINIER, M. (1981). Etude hydrologique des bassins de la COMBA (CONGO). *Cah. ORSTOM, sér. hydro.* Vol. XVIII. n°2, 3 : pp. 75-190.

MONIOD, F., POUYAUD, B., SECHET, P. (1977). Le bassin du fleuve VOLTA. *Collection Monographies hydrologiques n°5 ORSTOM* 513 p.

MOREL-SEYTOUX, H.J. (1973a). Pour une théorie modifiée de l'infiltration, 1ère partie : Pourquoi? *Cah. ORSTOM, sér. hydro.* Vol. X, n°2 : pp. 185-194.

MOREL-SEYTOUX, H.J. (1973b). Pour une théorie modifiée de l'infiltration, 2ème partie : Comment? *Cah. ORSTOM, sér. hydro.* Vol. X, n°3 : pp. 197-209.

MOREL-SEYTOUX, H.J. (1974a). Pour une théorie modifiée de l'infiltration, 3ème partie : effets de compression et de contre-courant, *Cah. ORSTOM, sér. hydro.* Vol XI, n°1 : pp. 51-59.

MOREL-SEYTOUX, H.J. (1974b). Pour une théorie modifiée de l'infiltration, 4ème partie : le drainage vu comme une infiltration d'air, *Cah. ORSTOM, sér. hydro.* Vol. XI, n°3 : pp. 181-188.

MOREL-SEYTOUX, H.J. (1975). Pour une théorie modifiée de l'infiltration, 5ème partie : le cas de la pluie. *Cah. ORSTOM, sér. hydro.* Vol XII, n°4 : pp. 227-233.

MOREL-SEYTOUX, H.J. (1976). Derivation of equations for rainfall infiltration. *Journ. of hydrology*, 31 : pp. 203-219.

MOREL-SEYTOUX, H.J. (1978). Derivation of equations for variable rainfall infiltration. *Water res. res.* Vol 14, n°4 : pp. 561-568.

MOREL-SEYTOUX, H.J. (1981). Application of infiltration theory for the determination of excess rainfall hyetograph. *Water resources bulletin* pp. 1012-1022.

MOREL-SEYTOUX, H.J., KANJI, J. (1974). Derivation of an equation of infiltration. *Water res. res. J* 10 pp. 795-800.

MORIN, J., GOLDBERG, D., SEGNER, I. (1967). A rainfall simulator with a rotating disk. *Tr of the ASAE*. 10(1) : pp. 74-79.

MOUTONNET, P. (1968). Une méthode neutronique de l'humidité des sols en surface. *Int. Journ. of Applied Radiation and Isotopes*. Vol 20, pp. 23-27.

MUALEM, Y. (1974). A conceptual model of hysteresis. *Water resources res.* pp. 514-520.

MURAI, H., IWASAKI, Y. (1975). Studies on function of water and soil conservation based on forest land. *Bull. of Government Forest Experiment. Station n° 274, TOKYO*, pp. 23-84.

MUTCHER, C., MOLDENHAUER, W.C. (1963). Application for laboratory rainfall simulator trans. of ASAE 6.3 pp. 220-222.

NASSIF, S.H., WILSON E.M. (1975). The influence of slope and rain intensity on runoff and infiltration. *Hydrological Sciences Bulletin*. 20(4) : pp. 539-553.

NATHANI, C.P., SHARMA, D.L., NAGAR, R.P. (1978). Infiltration studies on the soils of CHAMBAL COMMAND AREA KOJA-RAJASTHAN. *Journal of soil and water conservation in INDIA*. 28 (1/4) : pp. 55-60.

OBERLIN, G., BAUDUIN, D., CHAPERON P. (1966). Etude hydrologique en HAUTE VOLTA, région de TIKARE. Campagne 1965 et conclusions générales. *Rapport ORSTOM, PARIS, multigr.* 82 p.

OLIVRY, J.C. (1983). Le point en 1982 sur la sécheresse en SENEGAMBIE et aux Iles du CAP VERT. Examen de quelques séries de longues durées (débits et précipitations). *Cah. ORSTOM, sér. hydro.* Vol. XX, 1, pp 47-69.

OMM (1981). Guide des pratiques hydrologiques Vol I, acquisition et traitement des données (OMM n° 168).

ORSTOM télédétection (1977). Télédétection n°1 : les satellites d'observations de la terre ; LANDSAT. *Initiation et documents techniques n°34* ORSTOM PARIS 47 p.

ORSTOM télédétection (1978). Télédétection n°2 : analyse multivariable. Procédure LOTERIE. application à l'analyse multispectrale en télédétection. *Initiation et documents techniques n°35* ORSTOM PARIS 58 p.

ORSTOM, CIEH (1977). République de HAUTE VOLTA. Précipitations journalières de l'origine des stations à 1965 - p 685.

ORSTOM, CIEH, ASECNA (à paraître). BURKINA FASO. Précipitations journalières de 1965 à 1980.

ORSTOM, service hydrologique (1957). Etudes hydrologiques des petits bassins versants d'AOF. Rapports préliminaires sur les résultats de la campagne 1956. Tome II. Bassins de GAGARA, de la LHOTO, de KOMBAKA et de l'IFOU, PARIS, *Rapports de l'ORSTOM*. multigr. 97 p.

ORSTOM, service hydrologique (1959). Etudes hydrologiques des petits bassins versants d'AOF. Rapport préliminaire sur les résultats de la campagne 1957. Tome II. Bassins de SELOUMBO, de TIN ADJAR de la MAGGIA et de GAGARA, *Rapport ORSTOM* PARIS multigr. 72 p.

OUEDRAOGO, J.P., OUEDRAOGO, J.B.G., BALOY, M. (1981). Premières données sur le rayonnement global et la durée de l'insolation en HAUTE VOLTA. *La Météorologie*, 6ème série, 25 : pp. 123-134.

PALLIER, G. (1981). Géographie générale de la HAUTE VOLTA. 2ème édition. *UER Lettres et Sciences humaines, Université LIMOGES C.N.R.S.* 241 p.

PARLANGE, J.Y. (1976). Capillary hysteresis and relationship between drying and wetting curves. *Water Res. Res. vol 12(2)* : pp. 224-228.

PEARCE, R.P. (1984). The global circulation and the west African Monsoon. *Scientific conference on gate, warmex and tropical meteorology in AFRICA*. WMO DAKAR pp. 22-30.

PETTITT, A.N. (1979). A non-parametric approach to the change point problem. *Appl. Statist.* 28 pp. 126-135.

PHILIP, J.R. (1957). The theory in infiltration : the infiltration equation and its solution. *Soil sci.* 83 : pp. 345-357.

PIEYNS, S., KLEIN, J.C. (1964). Etude hydrologique des bassins versants dans la région de OUAGADOUGOU. Conclusions générales sur les trois campagnes. *Rapport ORSTOM, PARIS, multigr.* 95 p.

PIOGER, R. (1952). Mesures d'infiltration sur le terrain. Interprétation des résultats. *E.N.A. GRIGNON mutigr.* 27 p.

POUYAUD, B. (1975). La mesure de l'humidité du sol par chocs thermiques, *Cah. ORSTOM, sér. hydro.* Vol. XII. n°4 pp. 259-284.

POUYAUD, B. (1976). Etude du lac de BAM. 3 années d'observations du vent à la station climatologique de SAINT-PAUL (1973, 1974, 1975). *Rapport ORSTOM OUAGADOUGOU multigr.* 49 p.

POUYAUD, B. (1977). Etude du lac de BAM. Observations climatologiques aux stations de SAINT-PAUL, KONGOUSSI et BAM. Année 75. *Rapport ORSTOM-OUAGADOUGOU multigr.* 136 p.

POUYAUD, B. (1985a). Contribution à l'évaluation de l'évaporation de nappes d'eau libre en climat tropical sec. Exemples du lac de BAM et de la mare d'OURSIS (BURKINA FASO). du lac TCHAD et d'acudes du Nordeste brésilien. *Thèse UNIVERSITE de PARIS SUD ORSAY*, 254 p.

POUYAUD, B. (1985b). L'évaporation, composante majeure du cycle hydrologique. In "*Climat et développement*", Coll. et séminaires. ORSTOM, pp. 130-139.

POUYAUD, B. (1986). Estimation des apports annuels et des étiages avant et après la récente phase de sécheresse de la VOLTA noire à NUMBIEL et de la VOLTA blanche à BAGRE. *Coll. Internat. CIEH sur la révision des normes hydrologiques suite aux incidences de la sécheresse. OUAGADOUGOU* : 15 p.

PUECH, C. (1983). Persistance de la sécheresse au SAHEL. Conséquences sur les normes hydrologiques et pluviométriques. *CIEH, OUAGADOUGOU*.

PUECH, C., CHABI-GONNI, D. (1984). Méthode de calcul des débits de crue décennale pour les petits et moyens bassins versants en AFRIQUE de l'Ouest et centrale. *CIEH OUAGADOUGOU*. 91 p.

RAWITZ, E., MARGOLIN, M., HILLEL, D. (1972). An improved variable intensity sprinkling infiltrometer. *Soil sci. soc. amer. Proc.* 36(3) pp. 533-535.

RIBSTEIN, P. (1983). Loi des fuites. *Cah. ORSTOM, sér. hydro.* Vol. XX. n°2 pp 117-144.

RICHARDS, S.J. (1965). Physical condition of water in soil, chap. 8. In C.A. BACK et al (eds). *Methods of soil analysis, Part. I, Academic press, NEW-YORK*, 770 p.

RIOU, C. (1975). La détermination pratique de l'évaporation. Application à l'AFRIQUE centrale. *Mémoires ORSTOM n°80 PARIS*.

ROCHE, M.(1963). Hydrologie de surface. *GAUTHIER-VILLARS Edit.* PARIS. 383 p.

ROCHE, M.(1965). Point de vue matriciel sur un opérateur linéaire de transformation pluies - débits. *Cah. ORSTOM, sér. hydro.* N°2 : pp. 21, 36.

ROCHE, M.(1967). Recherche d'un hydrogramme standard. *Cah. ORSTOM, sér. hydro.*, N°1 : 27, 44.

RODIER, J.A.(1959). Résultats obtenus sur les bassins expérimentaux de la FRANCE d'Outre-mer. PARIS ORSTOM, *Mémoires et travaux de la SHF n°11.*

RODIER, J.A.(1964). Régimes hydrologiques de l'AFRIQUE noire à l'ouest du CONGO. *Mémoires ORSTOM n°6*, 138 p.

RODIER, J.A.(1975). Evaluation de l'écoulement annuel dans le SAHEL tropical africain. *Travaux et documents de l'ORSTOM. PARIS.* p 121.

RODIER, J.A.(1984). Evaluation hydrométéorologique des critères de conception des ouvrages de drainage routiers et des évacuateurs de crues des petits barrages dans la région du SAHEL. *Projet UNSO/RAF/83/504* GENEVE. 43 p.

RODIER, J.A.(1985). Caractéristiques des crues des petits bassins versants au SAHEL. *Cah. ORSTOM. Sér. hydro.* Vol.XXI n°2 : PP. 3-25 + An.

RODIER, J.A., AUVRAY, C.(1965). Estimation des débits de crues décennales pour les bassins versants de superficie inférieure à 200 km² en AFRIQUE occidentale. PARIS, ORSTOM - CIEH. 46 p.

RODIER, J.A., RIBSTEIN, P. (1986). Transposition des données hydrologiques, utilisation des bassins représentatifs pour la prédétermination des crues et l'estimation des apports au SAHEL ORSTOM-CIEH, Col international sur la révision des normes hydrologiques suite aux incidences de la sécheresse C.I.E.H. OUAGADOUGOU, 44 p.

ROOSE, E.(1976). Erosion et ruissellement en AFRIQUE de l'ouest. Vingt années de mesures en petites parcelles expérimentales. *Travaux et documents, ORSTOM N°78* PARIS, 108 p.

ROOSE, E.J., PIOT, J.(1984). Runoff, erosion and soils fertility restoration on the MOSSI plateau (central zone of upper VOLTA) *symp. internat.* "Challenge in African hydrology and water resources". HARARE *IASH publ.* n°144 : pp. 485-498.

RUBIN, J.(1966). Theory of rainfall uptake by soils initially dryer than their field capacity and its applications, *Water resources res.* V. 2 : pp. 739-749.

RUIZ FIGUEROA, J.F., VALENTIN, C. (1983). Effects of various types of cover on soils detachment by rainfall. *3ème colloque sur les processus géomorphologiques*, LIEGE : 22 p.

S.A.S. (1982). Statistic analysis system. Users guide. *Ed. S.A.S. Institute inc.* CARY North CAROLINA.

SEGUIS, L. (1986). Recherche pour le SAHEL, d'une fonction de production journalière (lame précipitée, lame écoulée). *Thèse de doctorat. Université des Sciences et Techniques du Languedoc* MONTPELLIER, 326 p.

Service météorologique du BURKINA FASO "Bulletins climatologiques mensuels".

SEVRUK, B. (1985). Effect of wind and intensity of rain catch International Comparison of national precipitation gauges with a reference pit gauge (Evaluation stations). Correction of precipitation measurement. *Boris SEVRUK (éd.) ETH/IAHS/WMO Workshop on correction of precipitation measurements. ZURICH. 1-3 April 1985.* pp. 251-256.

SINGER, M.J., MATSUDA, Y., BLACKARD, J. (1981). Effect of mulch rate on soil loss by raindrop splash. *Soil sci. soc. amer. Proc. J.*, 45 : 1pp. 07-110.

SIRCOULON, J. (1976). Les données hydropluviométriques de la sécheresse récente en AFRIQUE inter-tropicale. Comparaison avec les sécheresses "1913" et "1940". *Cah. ORSTOM, sér. hydro..* vol.XIII, 2, pp 75-174.

SIRCOULON, J. (1985). La sécheresse en AFRIQUE de l'Ouest. Comparaison des années 1982-1984 avec les années 1972-1973. *cah. ORSTOM sér. hydro.. vol XXI n°4* pp 75-86.

SIRCOULON, J. (1986). Bilan hydro-pluviométrique de la sécheresse 1968-84 au SAHEL et comparaisons avec les sécheresses des années 1910 à 1916 et 1940 et 1949. *In Colloque Nordeste Sahel Institut des Hautes Etudes d'Amérique latine*, PARIS 16 au 18 janv. 1986.

SIRCOULON, J., KLEIN, J.C. (1964). Etudes hydrologiques des bassins versants expérimentaux dans l'est VOLTA. Bassins de BOULSA. ORSTOM, service hydrologique. PARIS, multigr. 77 p.

SNIDJERS, T.A.B. (1986). Interstation correlations and non stationarity of BURKINA FASO rainfall. *Journal of climate and applied meteorology* vol. 25 pp. 524-531.

SWANSON, N.P. (1965). Rotating boom rainfall simulator. *Jr of the A.S.A.E.*, n°8, pp. 71 - 72.

TANYLEKE, Z.G. (1985). Infiltration rates. A comparaison of field methodologies. *Master of science Fort Collins Colorado* 95 p.

TERRIBLE, M. (1978). Végétation de la HAUTE VOLTA au 1/1 000 000 carte et notice provisoire. *multigr_ BOBO-DIOULASSO*, 40 p.

TOEBES, C., OURIVAEV, V. (1970). Representative and experimental basins. An international guide for research an practice. *UNESCO Studies and reports in hydrology* n°4 348 p.

TOUMA, J. (1984). Etude critique de la caractérisation hydrodynamique des sols non saturés : rôle de l'air, influence de l'écoulement multidimensionnel de l'eau. *Thèse de doc. es sciences physiques. Université scientifique et médicale et Institut National Polytechnique de GRENOBLE* : 190 p.

TOUTAIN, B., DE WISPELAERE, G. (1977, 1978). Etude et cartographie des pâturages de l'ORD du SAHEL et de la zone de délestage au nord-est du FADA NGOURMA (HAUTE VOLTA). IEMVT, MAISONS-ALFORT. *Etude agropastorale n°51*, 3 tomes, 51 p. + 120 p. + 239 p. 19 cartes couleur.

TRICHER, A.S. (1978). The infiltration cylinder, some comments on its use. *Journal of hydrology* 36 : pp. 383-391.

UNSO (1983). Plan national de lutte contre la désertification en HAUTE VOLTA 56 p. doc préparé par GROUZIS, M., SKOURI.

VACHAUD G. (1985). Intervention orale. Journées hydrologiques de MONTPELLIER. *Colloques et séminaires*. Editions de l'ORSTOM. p. 200.

VACHAUD, G., THONY, J.L. (1978). Hysteresis during infiltration and redistribution in a soil column at different initial water contents. *Water resources Res.* pp. 111-127.

VALENTIN, C. (1981a). Organisations pelliculaires superficielles de quelques sols de région subdésertiques. Dynamique de formation et conséquences sur l'économie en eau. *Colloques, études et thèses de l'ORSTOM*. Thèse docteur 3^o cycle. Université PARIS VII 229 p.

VALENTIN, C. (1981b). Esquisse au 1/25.000ème des différenciations morpho-structurales de la surface des sols d'un petit bassin versant sahélien (POLAKA-OURSI, nord HAUTE-VOLTA). *ORSTOM, ABIDJAN*, 11 p.

VALENTIN, C. (1982). Esquisse au 1/25.000ème des organisations superficielles d'un petit bassin versant soudanien (BINNDE, centre sud de la HAUTE-VOLTA) *ORSTOM OUAGADOUGOU*, 18p.

VALENTIN, C. (1983). Organisations superficielles de KAZANGA, Centre-sud de la HAUTE-VOLTA. Esquisse à 1/50.000ème d'un bassin versant de 56 km². *ORSTOM, ABIDJAN*, 18 p.

VALENTIN, C. (1985a). Différencier les milieux selon leur aptitude au ruissellement : une cartographie adaptée aux besoins hydrologiques. *Journées hydrologiques de l'ORSTOM à MONTPELLIER (17-18 Sept. 1985)*. Coll. colloques et séminaires. Ed. ORSTOM : p. pp. 50-74.

VALENTIN, C. (1985b). Effects of grazing and trampling on soil deterioration around recently drilled water holes in the sahelian Zone. in *Soil Erosion and Conservation" Soil Conservation Society on the America* (edit.) : pp. 51-65.

VALENTIN, C. (1985c). Le bassin versant de BOULSA-KOGHNERE (BURKINA-FASO). Organisations superficielles. Interprétation des photographies aériennes de 1956 et de 1980. *ORSTOM, ADIOPODOUME*, 19 p.

VALENTIN, C. (1986). Soil surface crusting, some agronomic implications. *Séminaire régional sur les latérites* ORSTOM, IBSRAM YAOUNDE, 16 p.

VALENTIN, C. (à paraître). Organisations superficielles des bassins versants de GAGARA.

VALENTIN, C., MAHOP, F. (1983). Organisations superficielles et reconnaissance pédologique. Esquisse au 1/50 000ème du bassin du KUO à DIGOUERA, OUEST de la HAUTE VOLTA, *ORSTOM ABIDJAN*, 23 p.

VALENTIN, C., RUIZ FIGUEROA, J.F. (1985). The effect of kinetic energy and water application, rate on the development of crusts in a fine sandy loam soil using sprinkler irrigation and rainfall

simulation. *Réunion internationale de micromorphologie des sols, Asso. int. de la science du sol.* PARIS 11 p.

VAUCLIN, M. (1982). Infiltration in unsaturated soils. *Lecture at NATO Advances Study Institute on "Mechanics of fluids in porous media new approach in research"*. University of DELAWARE, 50 p.

VAUGELADE, J.(1986). Communication personnelle sur la démographie du plateau MOSSI.

VUILLAUME, G.(1974). L'abattement des précipitations journalières en AFRIQUE intertropicale, variabilité et précision du calcul. *Cah. ORSTOM, sér. hydro..* Vol XI n°3 : 205, 240.

YAIR, A., LAVEE, H., BRYAN, R.B., ADAR, E. (1980). Runoff and erosion processes and rates in the ZIN valley BEDLAND. Northern NIGER. ISRAEL *Earth surface processes* 5 pp. 205-225.

ANNEXES

ANNEXE N° 1 - LES PARCELLES DE SIMULATION DE PLUIES

Tableau 1 - Caractéristiques physiques des parcelles

NOM :	B pour le bassin versant de BINNDE
	K pour le bassin versant de KAZANGA
	U pour le bassin versant de KUO
	O pour le bassin versant de BOULSA
	G pour le bassin versant de GAGARA
R3 :	% de la couverture végétale en place
R4 :	% de la couverture en litière
R5 :	% de gravillons libres
R6 :	Epaisseur de sable éolien
07 :	Hauteur moyenne du micro relief
08 :	Degré d'obstruction du micro relief
09 :	Présence du micro-organisme (champignons et algues)
010 :	Activité de la mésofaune
011 :	Porosité due à la mésofaune
012 :	% de gravillons enchassés
013 :	Nombre et largeur des fentes en surface
014 :	Hydromorphisme de surface
015 :	Prise en masse des sables
016 :	Porosité vésiculaire des pellicules de surface
017 :	Continuité de la pellicule
018 :	Epaisseur des organisations pelliculaires
019 :	Polygénisme des organisations pelliculaires
020 :	Erosion
S21 :	Profondeur d'un horizon à faible drainage
S22 :	Texture de l'horizon 20 cm
S23 :	Porosité de l'horizon 20 cm
S24 :	Hydromorphie de l'horizon 20 cm
S25 :	Classe de drainage du sol selon BOULET

Tableau 2 - Variables de l'infiltration

P	: Hauteur pluviométrique (mm)
L1	: Lamé infiltrée (mm)
K	: Conductivité hydraulique à saturation en conditions naturelles (mm h ⁻¹)
IL	: Intensité limite de la pluie pour voir paraître le ruissellement (mm h ⁻¹)
IS	: Pluie d'imbibition sur sol sec (mm)
IH	: Pluie d'imbibition sur sol humide (mm)
Dr	: Détention superficielle récupérable (mm)
Hc	: Pression capillaire (mm)

Tableau 3 - Lamé ruisselée observée et calculée sur parcelles

BASSIN 1 pour bassin versant de BINNDE

2 pour bassin versant de KAZANGA

3 pour bassin versant de KUO

4 pour bassin versant de KOGNERE

5 pour bassin versant de GAGARA

PLUIE : Hauteur de la précipitation (mm)

IK : indice des pluies antérieure (mm)

LROBS : Lamé ruisselée observée

LRCAL : Lamé ruisselée calculée par l'équation $LR = aP + bIK + CP.IK + D$

TABLEAU DES CARACTERISTIQUES PHYSIQUES DE LA PARCELLE

OBS	NOM	R3	R4	R5	R6	07	08	09	010	011	012	013	014	015	016	017	018	019	020	S21	S22	S23	S24	S25
1	B1	0	0	0	0	2.0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	1	0	3	2	0	1	1	2
2	B2	70	0	0	0	3.0	0	1	3	2	10	0	0	0	0	2	1	0	0	2	0	1	2	2
3	B3	75	0	5	0	0.0	0	0	3	2	10	0	0	0	0	2	1	0	0	1	0	1	0	2
4	B4	0	0	2	0	0.0	0	0	2	2	10	0	0	0	0	2	1	0	0	1	0	0	0	2
5	B5	0	15	5	0	10.0	4	0	0	0	5	0	0	0	0	2	1	0	4	1	0	1	0	2
6	B6	0	0	10	0	0.0	0	0	0	0	15	0	0	0	0	3	1	0	2	2	0	1	0	2
7	B7	75	0	0	0	0.5	0	0	3	2	0	0	0	0	0	2	1	0	0	2	1	3	0	2
8	B8	0	0	0	0	0.0	0	3	0	0	0	0	0	0	0	1	2	0	1	2	1	3	0	2
9	B9	0	5	1	0	10.0	2	0	0	0	0	0	0	1	0	2	1	0	4	2	1	3	0	2
10	B10	0	0	0	0	2.0	0	0	0	0	2	0	0	2	2	2	2	0	2	2	1	3	0	2
11	K11	90	0	0	0	2.0	0	0	3	2	0	0	2	2	0	2	0	0	0	3	1	0	2	2
12	K12	0	0	0	0	3.0	1	0	4	2	0	0	2	2	1	1	1	0	2	3	1	0	2	2
13	K13	20	0	0	0	8.0	2	0	0	0	25	0	2	2	0	0	2	0	3	3	1	0	2	2
14	K14	0	0	0	0	0.0	0	1	0	0	0	2	3	3	3	2	1	3	2	3	1	0	2	2
15	K15	70	10	0	0	0.0	0	1	4	3	0	0	0	0	0	1	1	0	0	3	2	2	0	5
16	K16	60	0	0	0	0.0	0	0	1	1	0	0	3	1	0	3	1	0	1	3	1	0	2	2
17	K17	20	0	0	0	0.5	0	4	0	0	0	0	0	2	0	1	1	0	1	3	2	2	0	5
18	U18	7	0	70	0	0.0	0	1	0	0	40	0	0	1	0	0	0	0	1	2	1	2	0	4
19	U19	7	0	10	0	3.0	0	4	0	0	30	0	1	2	2	1	1	0	2	3	1	3	1	5
20	U20	40	1	3	0	4.0	0	2	0	0	10	0	0	0	0	0	0	0	3	1	1	2	0	2
21	U21	0	0	0	0	0.0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	2	1	0	1	3	2	2	2	5
22	U22	30	30	0	0	0.5	0	5	0	0	0	0	3	1	1	1	2	0	0	3	1	2	3	5
23	U23	10	0	0	0	1.0	0	0	1	1	0	0	0	2	2	2	2	0	1	1	1	1	1	2
24	U24	5	0	0	0	2.0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	2	1	0	3	1	1	1	1	2
25	U25	3	0	0	0	5.0	0	0	0	0	5	0	0	3	3	1	2	0	4	1	1	1	1	2
26	U26	25	20	0	0	3.0	0	4	0	0	0	0	0	0	0	2	1	0	0	2	1	1	1	5
27	U27	15	2	0	0	3.0	0	0	1	2	0	0	0	0	0	1	1	0	2	2	1	1	1	5
28	O28	1	5	0	0	2.0	0	0	2	1	0	0	0	2	2	3	1	0	2	3	0	1	0	2
29	O29	3	0	0	0	0.0	0	0	0	0	0	0	0	3	3	3	1	0	2	1	0	1	0	1
30	O30	95	50	0	0	0.0	0	0	3	2	30	0	0	0	0	1	1	0	0	2	0	0	0	2
31	O31	1	5	0	0	4.0	0	0	0	0	0	0	0	3	2	1	1	1	2	2	1	3	1	5
32	O32	1	0	0	0	0.5	0	0	0	0	0	0	0	3	3	3	3	0	2	3	1	3	1	5
33	O33	95	10	0	0	0.0	0	0	3	2	0	0	3	1	0	2	2	2	0	3	1	1	3	5
34	O34	1	5	10	0	2.0	1	1	0	0	10	0	0	2	2	3	1	2	3	1	0	2	0	4
35	O35	2	5	2	0	3.0	1	1	0	0	5	0	0	1	2	3	1	2	4	1	0	0	0	2
36	O36	80	5	0	0	2.0	2	2	3	2	0	0	0	3	2	3	3	2	1	1	0	0	0	2
37	G37	0	0	0	0	0.0	0	0	0	0	0	1	0	3	1	3	1	0	4	0	1	1	0	1
38	G38	0	3	0	2	1.0	0	1	1	0	0	0	0	0	3	3	3	3	3	0	0	1	0	1
39	G39	3	8	0	3	4.0	2	1	1	0	0	0	0	0	3	2	3	3	2	0	0	2	0	1
40	G40	10	18	0	4	5.0	1	1	2	1	0	0	0	0	3	3	3	3	2	0	0	2	0	1
41	G41	0	0	8	0	3.0	0	0	0	0	70	0	3	0	3	3	3	1	2	3	3	2	3	5
42	G42	0	0	1	0	0.5	0	0	0	0	50	2	3	0	3	3	2	2	2	3	3	2	3	5
43	G43	0	0	1	1	0.0	0	0	0	0	20	0	3	0	3	3	2	3	2	3	3	3	3	5
44	G44	1	0	1	0	2.0	0	0	0	0	8	1	3	0	3	3	2	1	2	3	3	3	3	6
45	G45	0	0	0	0	0.0	0	0	0	0	0	0	3	1	2	3	2	0	3	3	3	3	3	6
46	G46	0	0	0	5	0.0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	3	3	3	3	3	6
47	G47	1	0	0	1	2.0	0	0	0	0	0	0	3	2	1	1	3	2	2	3	3	3	3	6
48	G48	5	2	0	1	2.0	0	0	0	0	0	0	0	2	3	3	2	3	2	3	3	3	3	6

TABLEAU 1

TABLEAU DES VARIABLES D INFILTRATION

OBS	NOM	P	L1	K	IL	IS	IH	DR	HC
1	B1	381.8	134.8	29.6	6.5	20.8	2.5	2.1	20.4
2	B2	371.0	255.8	23.3	11.5	32.0	9.1	0.6	157.1
3	B3	372.6	268.9	21.2	13.5	30.0	16.9	0.4	272.5
4	B4	371.1	103.3	16.2	3.0	5.8	3.9	1.0	293.7
5	B5	372.0	212.0	15.2	13.0	28.2	12.5	1.4	304.3
6	B6	374.6	75.2	1.9	1.5	17.5	6.3	2.0	408.6
7	B7	350.7	241.4	18.8	17.5	30.0	23.3	0.3	246.3
8	B8	380.1	95.8	30.9	1.0	3.9	3.7	0.9	106.8
9	B9	372.5	149.2	4.2	3.0	13.1	4.0	1.0	266.4
10	B10	365.8	99.7	2.9	4.0	15.9	4.2	1.5	363.1
11	K11	390.8	359.2	70.8	27.0	29.4	13.4	0.0	184.9
12	K12	373.4	307.8	49.8	1.0	30.0	1.8	0.3	154.3
13	K13	370.4	227.7	15.2	1.2	29.4	8.0	0.1	295.3
14	K14	377.8	87.2	7.0	0.5	10.0	2.0	2.3	409.6
15	K15	377.6	358.7	59.0	40.0	30.0	11.7	1.1	246.3
16	K16	378.2	157.8	8.2	11.0	26.2	5.9	0.7	214.1
17	K17	346.6	61.3	2.2	0.5	14.0	2.6	3.2	213.1
18	U18	378.6	115.6	7.3	1.5	11.3	2.3	0.6	158.8
19	U19	369.7	68.3	2.5	1.4	4.1	2.3	0.9	245.6
20	U20	373.6	190.8	29.9	4.3	17.8	8.6	0.6	46.7
21	U21	377.4	66.7	2.4	0.7	5.0	1.1	0.6	244.1
22	U22	378.5	95.7	7.9	1.7	9.2	6.7	1.4	133.6
23	U23	378.1	87.2	8.8	1.2	12.5	4.9	1.3	146.6
24	U24	382.8	99.8	9.8	4.0	14.3	5.7	0.7	136.9
25	U25	384.8	58.6	0.4	3.6	8.0	3.7	0.7	505.5
26	U26	377.7	99.2	24.6	3.0	12.3	5.5	1.2	51.5
27	U27	377.2	94.0	3.6	0.5	13.3	4.7	2.9	473.3
28	O28	378.5	162.4	19.6	1.5	9.0	3.2	1.0	29.7
29	O29	378.5	53.9	13.1	0.5	4.8	1.8	1.3	15.2
30	O30	377.5	367.1	66.6	38.5	21.8	10.0	0.0	198.2
31	O31	378.1	89.7	4.1	1.0	8.3	2.8	1.2	137.6
32	O32	379.5	52.9	1.7	0.2	5.1	2.2	1.1	151.1
33	O33	378.5	315.2	16.6	12.0	35.6	18.4	0.8	296.1
34	O34	378.5	57.9	3.5	0.2	8.9	2.0	1.2	90.5
35	O35	378.5	85.6	5.3	0.5	15.0	2.9	1.7	150.7
36	O36	378.5	366.1	61.9	22.5	35.9	19.1	0.1	244.4
37	G37	380.6	29.0	2.1	1.3	1.9	1.7	0.7	77.4
38	G38	378.5	92.1	7.8	3.5	7.9	3.5	0.5	32.2
39	G39	378.5	231.5	28.6	17.2	17.8	2.5	0.3	17.4
40	G40	378.5	183.7	12.0	13.5	18.1	5.0	0.4	66.7
41	G41	380.5	27.8	0.1	1.2	3.3	1.2	1.0	367.6
42	G42	379.5	34.6	0.4	1.3	7.4	2.6	1.2	414.0
43	G43	378.5	51.5	1.1	2.6	6.1	2.6	1.6	257.6
44	G44	378.5	76.5	14.5	4.0	3.7	3.0	0.8	43.5
45	G45	373.8	51.3	5.7	4.4	7.0	2.5	0.8	45.4
46	G46	377.7	90.4	4.4	0.2	12.6	1.1	0.6	77.4
47	G47	378.5	50.8	0.3	0.3	7.4	2.2	1.7	566.1
48	G48	376.6	64.8	2.1	1.7	18.3	5.9	0.8	65.1

TABLEAU 2

LAMES RUISSELEES RECONSTITUEES ET OBSERVEES SUR PARCELLES

OBS	BASSIN	PARCELLE	PLUIE	IK	LROBS	LRCAL
1	1	1	47.5	22.7	21.9	27.6
2	1	1	62.3	57.9	49.6	42.5
3	1	1	55.8	92.0	43.9	41.7
4	1	1	60.0	34.8	38.8	37.8
5	1	1	93.8	43.2	64.9	63.3
6	1	1	92.4	0.0	65.6	54.5
7	1	2	61.6	35.6	15.0	15.6
8	1	2	57.4	70.0	17.8	17.7
9	1	2	57.4	97.8	17.1	20.7
10	1	2	60.0	36.5	14.2	15.2
11	1	2	100.5	45.1	45.6	31.4
12	1	2	94.1	0.0	19.5	20.6
13	1	3	45.0	22.5	3.6	4.8
14	1	3	60.0	55.6	14.1	17.4
15	1	3	60.0	89.2	23.3	27.2
16	1	3	60.0	35.0	11.9	11.5
17	1	3	96.3	44.3	44.3	34.4
18	1	3	96.0	0.0	4.9	5.9
19	1	4	60.0	22.4	45.7	42.6
20	1	4	30.0	68.2	22.9	20.8
21	1	4	60.0	74.2	50.4	49.6
22	1	4	60.0	30.3	34.9	43.7
23	1	4	95.6	42.5	66.7	76.5
24	1	4	95.5	0.0	70.4	69.7
25	1	5	60.0	22.3	17.9	18.4
26	1	5	60.0	68.4	25.0	23.3
27	1	5	60.0	99.2	23.5	26.6
28	1	5	61.2	35.3	13.8	20.6
29	1	5	96.9	44.5	54.2	45.1
30	1	5	95.1	0.0	39.4	38.2
31	1	7	56.6	22.4	12.2	12.2
32	1	7	56.7	65.5	19.2	20.7
33	1	7	56.6	94.2	26.0	26.3
34	1	7	60.5	35.2	16.5	16.4
35	1	7	90.3	44.8	45.9	43.4
36	1	8	64.0	22.5	43.6	40.2
37	1	8	63.9	104.9	50.2	50.0
38	1	8	63.9	71.1	45.1	45.9
39	1	8	62.5	38.1	36.7	40.9
40	1	9	62.2	22.3	26.2	33.0
41	1	9	62.2	70.2	32.8	39.3
42	1	9	62.2	102.2	38.9	43.5
43	1	9	61.3	36.0	43.7	34.1
44	1	9	94.6	44.7	73.0	61.7
45	2	11	29.4	0.0	0.0	0.1
46	2	11	67.5	22.9	1.4	3.3
47	2	11	67.5	73.3	2.4	3.9
48	2	11	61.0	108.1	3.9	4.1
49	2	11	97.0	51.1	4.3	5.3
50	2	11	97.8	0.0	3.8	3.6
51	2	12	30.0	0.0	0.2	0.6
52	2	12	61.2	24.6	5.9	8.8
53	2	12	60.0	65.1	13.3	13.6
54	2	12	60.0	102.3	10.1	18.2

TABLEAU 3

LAMES RUISSELEES RECONSTITUEES ET OBSERVEES SUR PARCELLES

OBS	BASSIN	PARCELLE	PLUIE	IK	LROBS	LRCAL
55	2	12	90.0	46.2	18.2	18.0
56	2	12	96.1	0.0	15.0	11.5
57	2	13	29.4	0.0	0.6	4.1
58	2	13	61.3	23.9	17.9	20.8
59	2	13	61.3	66.6	21.7	25.3
60	2	13	61.3	103.6	27.1	29.3
61	2	13	90.2	44.8	50.3	37.2
62	2	13	96.3	0.0	35.7	33.8
63	2	16	30.0	0.0	1.3	6.1
64	2	16	61.6	23.6	29.3	30.4
65	2	16	61.6	68.3	37.0	39.1
66	2	16	61.6	105.2	33.9	40.6
67	2	16	96.7	47.7	70.7	62.5
68	2	16	96.7	0.0	49.5	50.0
69	2	17	29.0	0.0	9.0	8.5
70	2	17	61.6	24.5	55.1	46.3
71	2	17	96.7	28.8	85.4	88.4
72	2	17	96.7	28.8	85.4	83.1
73	2	17	96.7	0.0	77.7	71.6
74	3	1	96.6	0.0	49.9	54.6
75	3	1	61.5	49.8	43.7	43.8
76	3	1	61.5	89.1	50.5	54.6
77	3	1	61.5	41.5	45.0	41.6
78	3	1	97.5	40.0	75.0	69.1
79	3	2	83.6	0.0	62.2	62.2
80	3	2	61.5	41.9	50.6	47.9
81	3	2	61.5	84.7	53.9	52.6
82	3	2	61.5	42.3	48.0	47.9
83	3	2	96.6	39.4	81.7	78.7
84	3	3	96.6	0.0	36.1	36.1
85	3	3	57.4	60.3	25.2	26.2
86	3	3	61.5	90.2	37.1	33.2
87	3	3	61.5	46.2	29.7	26.5
88	3	3	96.6	40.1	54.8	45.0
89	3	4	96.6	0.0	76.8	75.9
90	3	4	61.5	60.0	50.3	50.4
91	3	4	61.5	95.4	54.4	53.9
92	3	4	61.5	45.4	49.2	48.9
93	3	4	96.3	40.4	80.9	79.7
94	3	5	96.6	0.0	63.3	61.8
95	3	5	61.5	47.1	41.4	41.9
96	3	5	61.5	89.2	49.6	49.5
97	3	5	62.7	43.3	48.4	42.2
98	3	5	96.2	41.1	81.2	70.4
99	3	6	96.7	0.0	70.6	68.5
100	3	6	61.6	45.2	45.1	43.3
101	3	6	61.6	88.5	50.6	47.6
102	3	6	61.6	111.3	50.9	49.9
103	3	6	61.6	41.1	44.1	42.9
104	3	6	96.6	37.9	73.7	73.3
105	3	8	96.7	0.0	81.4	73.6
106	3	8	61.6	47.1	51.6	51.6
107	3	8	61.6	85.8	54.4	57.6
108	3	8	61.6	117.4	56.6	62.4

TABLEAU 3 SUITE

LAMES RUISSELEES RECONSTITUEES ET OBSERVEES SUR PARCELLES

OBS	BASSIN	PARCELLE	PLUIE	IK	LRBS	LRAL
109	3	8	61.5	39.9	50.5	50.4
110	3	8	103.3	37.8	86.4	88.0
111	3	9	96.6	0.0	52.2	62.4
112	3	9	61.5	58.4	45.5	40.8
113	3	9	61.5	96.3	51.9	45.7
114	3	9	61.5	123.6	50.7	49.3
115	3	9	61.5	42.0	42.4	38.6
116	3	9	96.6	39.5	62.1	69.0
117	3	10	96.6	0.0	38.2	38.2
118	3	10	61.5	46.3	35.0	29.3
119	3	10	61.5	83.5	33.5	34.9
120	3	10	61.5	119.7	34.0	40.4
121	3	10	61.5	40.1	28.1	28.2
122	3	10	96.6	37.5	51.1	46.6
123	4	1	96.7	0.0	60.6	60.6
124	4	1	61.7	23.4	24.2	23.2
125	4	1	61.7	67.8	31.0	37.4
126	4	1	61.7	47.2	32.6	30.8
127	4	1	96.7	86.6	67.7	73.2
128	4	2	61.7	0.0	7.8	9.3
129	4	2	61.7	42.2	13.3	10.1
130	4	2	61.7	24.3	14.2	9.8
131	4	2	61.7	72.5	16.9	10.6
132	4	3	96.7	0.0	86.1	79.9
133	4	3	61.7	22.9	57.1	48.2
134	4	3	61.7	46.4	48.4	49.1
135	4	3	96.7	90.2	77.6	84.5
136	4	4	96.7	0.0	1.2	1.4
137	4	4	61.7	22.0	0.7	1.0
138	4	4	61.7	70.3	3.5	2.1
139	4	4	60.7	46.7	1.2	1.4
140	4	4	96.7	88.5	3.8	5.1
141	4	5	96.7	0.0	58.5	58.6
142	4	5	61.7	22.5	44.4	40.2
143	4	5	61.7	67.0	52.2	52.9
144	4	5	61.7	47.4	51.2	47.3
145	4	5	96.5	85.1	81.1	81.3
146	4	6	96.7	0.0	79.4	79.9
147	4	6	61.7	21.6	51.2	49.4
148	4	6	61.7	68.3	55.0	54.5
149	4	6	61.7	44.7	53.0	51.9
150	4	6	97.7	90.3	89.4	90.7
151	4	7	96.7	0.0	2.4	3.3
152	4	7	61.7	21.9	1.2	1.9
153	4	7	62.3	67.7	10.6	12.7
154	4	7	61.7	46.2	1.1	2.8
155	4	7	96.7	90.0	49.9	49.8
156	4	8	96.7	0.0	69.9	70.4
157	4	8	61.7	22.6	47.3	46.3
158	4	8	67.3	61.7	53.2	54.0
159	4	8	61.7	48.3	56.8	50.7
160	4	8	96.7	86.9	94.1	91.5
161	4	9	61.7	0.0	17.5	17.9
162	4	9	61.7	52.0	26.8	27.8

TABLEAU 3 SUITE

LAMES RUISSELEES RECONSTITUEES ET OBSERVEES SUR PARCELLES

OBS	BASSIN	PARCELLE	PLUIE	IK	LROBS	LRCAL
163	4	9	61.7	85.0	22.6	34.1
164	4	9	61.7	22.6	23.3	23.0
165	4	9	66.3	72.2	30.5	34.3
166	4	10	96.7	0.0	62.2	62.4
167	4	10	61.7	22.9	43.5	37.9
168	4	10	61.7	69.1	47.1	45.3
169	4	10	61.7	46.7	50.9	41.7
170	4	10	96.7	90.5	79.5	81.1
171	4	11	96.7	0.0	0.9	1.9
172	4	11	61.7	21.7	1.4	1.6
173	4	11	61.7	68.3	2.4	2.6
174	4	11	61.7	46.7	3.1	2.1
175	4	11	96.7	87.8	4.6	4.6
176	5	1	98.0	0.0	89.7	91.6
177	5	1	61.7	22.3	57.5	57.8
178	5	1	61.7	69.4	56.3	57.5
179	5	1	62.5	48.8	59.8	58.3
180	5	1	96.7	88.0	87.9	91.3
181	5	2	96.7	0.0	69.1	69.0
182	5	2	61.7	21.5	41.8	42.5
183	5	2	61.7	67.5	49.7	47.3
184	5	2	61.7	45.7	45.1	46.2
185	5	2	96.7	91.6	80.4	80.1
186	5	3	96.7	0.0	16.1	21.6
187	5	3	61.7	21.6	20.4	18.6
188	5	3	61.7	70.1	30.6	31.5
189	5	3	61.7	46.5	18.8	25.2
190	5	3	96.7	89.3	60.8	60.9
191	5	4	96.7	0.0	31.1	33.2
192	5	4	61.7	21.7	24.7	24.7
193	5	4	61.7	67.5	35.5	34.8
194	5	4	61.7	45.9	33.4	30.4
195	5	4	96.7	91.6	70.8	67.7
196	5	5	98.7	0.0	86.6	85.4
197	5	5	61.7	23.1	58.6	56.3
198	5	5	61.7	65.3	57.0	56.3
199	5	5	61.7	46.9	57.1	56.3
200	5	5	96.7	90.0	94.4	90.5
201	5	6	96.7	0.0	82.2	81.8
202	5	6	61.7	21.7	55.6	55.9
203	5	6	62.3	70.4	60.1	56.2
204	5	6	61.7	47.2	56.6	55.6
205	5	6	97.5	88.4	90.5	90.9
206	5	7	96.7	0.0	81.3	80.6
207	5	7	61.7	21.5	52.5	50.1
208	5	7	61.7	67.3	54.5	52.3
209	5	7	61.7	45.8	52.1	51.3
210	5	7	96.7	91.5	87.6	86.4
211	5	8	96.7	0.0	83.7	75.9
212	5	8	61.7	21.6	47.0	47.4
213	5	8	61.7	70.1	52.5	47.4
214	5	8	61.7	46.6	48.8	47.4
215	5	8	96.7	87.7	70.9	75.9
216	5	9	92.0	0.0	79.8	79.2

TABLEAU 3 SUITE

LAMES RUISSELEES RECONSTITUEES ET OBSERVEES SUR PARCELLES

OBS	BASSIN	PARCELLE	PLUIE	IK	LROBS	LRCAL
217	5	9	61.7	17.5	54.7	51.0
218	5	9	61.7	62.3	54.2	51.0
219	5	9	61.7	78.5	50.5	51.0
220	5	9	96.7	65.8	83.3	83.6
221	5	10	95.9	0.0	68.7	71.3
222	5	10	61.7	21.9	43.9	41.0
223	5	10	61.7	43.5	41.2	41.0
224	5	10	61.7	48.5	42.6	41.0
225	5	10	96.7	91.2	70.6	71.3
226	5	11	96.7	0.0	80.6	79.1
227	5	11	61.7	13.7	49.8	52.5
228	5	11	61.7	57.3	50.0	53.3
229	5	11	61.7	46.1	56.3	52.2
230	5	11	96.7	89.8	91.0	91.2
231	5	12	96.3	0.0	67.8	66.6
232	5	12	61.7	16.6	50.0	49.8
233	5	12	61.7	64.4	51.4	54.1
234	5	12	61.5	36.2	54.7	51.2
235	5	12	95.2	80.0	87.9	87.3

TABLEAU 3 FIN

ANNEXE N° 2 - BASSIN VERSANT DE BINNDE

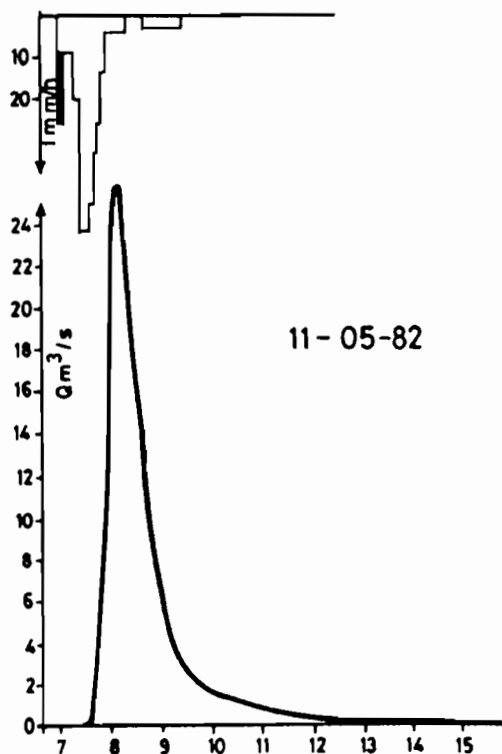
1. Description des principales crues des campagnes 1982-1983

Crue du 11 Mai 1982.

La crue résulte d'une averse assez homogène (rapport pluie moyenne sur pluie maximale : 0,91) pas très forte (30,5 mm en moyenne) avec un corps de 1h.10, un début de plus faible intensité et presque pas de traîne.

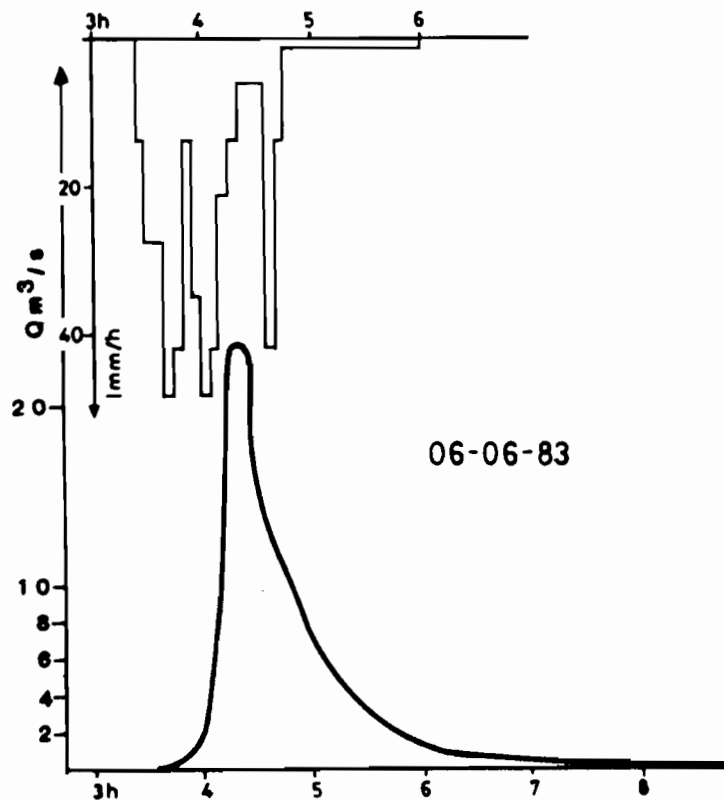
Le débit maximum est de 26,0 m³/s, le temps de montée est d'une demi-heure, le temps de base de 6 heures.

Cette pluie précoce est arrivée sur un sol préalablement humidifié par une pluie (hauteur moyenne 15,6 mm) l'avant-veille. A cette époque la végétation naturelle ou cultivée n'est pas encore un frein au ruissellement et le coefficient de ruissellement est le plus fort observé : 27,3 %.



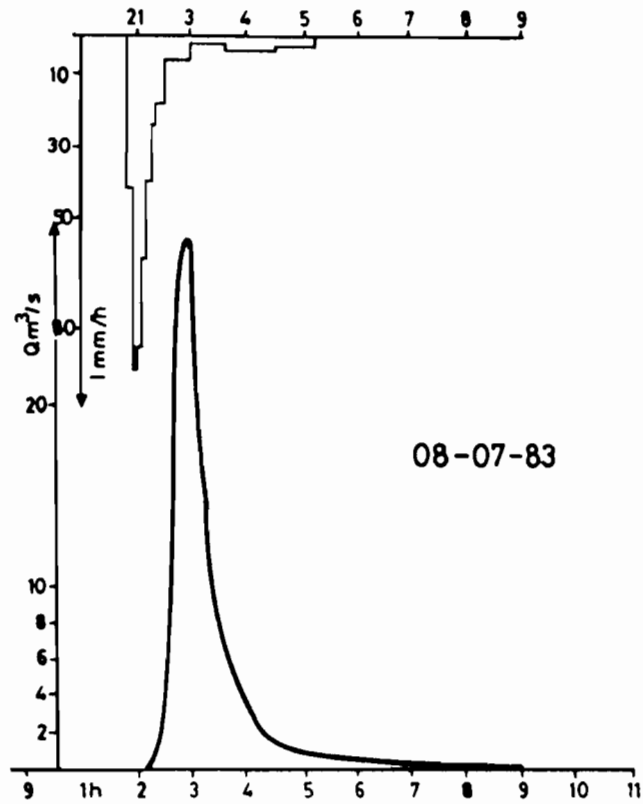
Cruel du 6 Juin 1983

L'averse plus abondante sur l'amont du bassin (43,4 mm) que sur l'aval (31,0 mm) a une hauteur moyenne de 36,0 mm, comporte un corps à trois points d'intensité assez long (1h.10). On observe une crue à temps de montée et à temps de base courts (0h.40 et 3h.10) avec un débit de pointe de 23,5 m³/s. Le coefficient de ruissellement de 19,8% est assez élevé compte tenu de la très mauvaise saturation du sol. En fin de saison sèche la pellicule superficielle du sol réagit de façon imperméable et l'absence de végétation favorise le ruissellement.



Cruel du 8 juillet 1983

Correspondant à une averse moyennement forte (46,6 mm de hauteur moyenne) très homogène sur tout le bassin avec une pointe unique et atteignant une intensité de 91 mm/h pendant 5 minutes, c'est la plus forte crue observée sur ces deux années de mesures. Le débit de pointe atteint 28,8 m³/s, le temps de montée est de 0h.48, le temps de base de 4h.36. Avec un état de saturation des sols comparable à la crue du 11 Mai 1982 (pluie du même ordre de grandeur l'avant-veille) et malgré une pluviométrie supérieure et des intensités plus fortes, le coefficient de ruissellement est un peu moins fort 19,7%, et correspond à un début de la repoussée végétale (très tardive cette année).



2. Caractéristiques des crues sur le bassin versant de BINNDE

PMX : hauteur de pluie maximale recueillie sur le bassin (mm)

PMY : hauteur de pluie moyenne sur le bassin (mm)

IK : Indice des pluies antérieures (mm)

PIK : Produit de P par IK

VR : Volume ruisselé (10^6 m^3)

LR : Lame ruisselée (mm)

Kr : Coefficient de ruissellement (mm)

Qmx : Débit de pointe (m^3/s)

TM : Temps de montée (heure-minute)

TR : Temps de réponse (heure-minute)

TB : Temps de base (heure-minute)

VEG 1 : Végétation du début de la saison des pluies

VEG 2 : Végétation du milieu et fin de la saison des pluies

CAM 1 : Campagne de 1961-1963

CAM 2 : Campagne de 1982-1983

CARACTERISTIQUES DES CRUES SUR LE BASSIN DE BINNDE (9,7 KM2)

OBS	DATE	PMX	PMY	IK	PIK	VR	LR	KR	QMX	TM	TR	TB	VEG	CAM
1	22-06-63	49.5	41.3	16.7	689.7	87.7	9.0	0.22	18.40	0.45	1.10	3.50	1	1
2	26-06-63	29.6	20.3	35.2	714.6	26.1	2.7	0.13	6.70	0.45	0.15	3.00	1	1
3	06-07-63	40.6	25.3	17.0	430.1	22.2	2.3	0.09	6.00	1.05	1.45	3.40	2	1
4	16-07-63	27.5	23.3	23.5	547.5	18.8	1.9	0.08	3.90	1.30	1.00	4.00	2	1
5	21-07-63	57.5	47.1	3.9	183.7	97.3	10	0.21	22.60	1.10	1.20	4.20	2	1
6	22-07-63	65.7	47.1	30.9	1455	110.6	11	0.24	20.60	1.30	0.50	4.30	2	1
7	03-06-64	26.0	18.6	0.6	11.2	3.5	0.4	0.02	2.00	0.10	0.55	2.00	1	1
8	07-06-64	22.1	19.2	4.6	88.3	23.5	2.4	0.13	6.30	0.20	1.10	4.20	1	1
9	29-06-64	29.3	21.0	2.0	42.0	13.5	1.4	0.07	3.50	0.25	1.10	4.00	1	1
10	13-07-64	44.3	29.4	1.1	32.3	37.0	3.8	0.13	8.10	0.40	1.00	4.45	2	1
11	18-07-64	29.2	26.1	2.5	65.2	16.8	1.7	0.07	4.60	0.25	0.25	3.50	2	1
12	18-07-64	29.3	26.0	.	.	11.2	1.2	0.04	1.80	1.10	2.40	4.35	2	1
13	21-07-64	30.0	25.0	12.2	305.0	34.8	3.6	0.14	8.60	0.20	0.35	3.50	2	1
14	21-07-64	61.3	39.7	.	.	206.0	21	0.53	50.50	0.40	0.45	4.20	2	1
15	22-07-64	27.6	18.0	46.6	838.8	41.0	4.2	0.23	6.00	0.15	1.00	5.10	2	1
16	24-07-64	36.2	33.0	23.8	785.4	90.0	9.3	0.28	12.20	0.55	1.05	6.20	2	1
17	28-07-64	22.0	12.5	7.7	96.2	16.9	1.7	0.14	2.70	1.30	1.20	4.30	2	1
18	31-07-64	35.8	24.7	4.5	111.1	60.5	6.2	0.25	10.10	0.45	1.00	5.30	2	1
19	04-08-64	40.9	33.7	4.0	134.8	84.6	8.7	0.26	13.60	1.00	1.05	5.30	2	1
20	06-08-64	51.3	43.4	13.9	603.3	100.0	10	0.24	7.20	1.00	1.55	10.10	2	1
21	09-08-64	37.0	28.3	13.8	390.5	72.2	7.4	0.26	7.00	0.45	1.05	10.00	2	1
22	17-08-64	32.6	30.6	1.2	36.7	23.1	2.4	0.08	2.00	1.50	1.20	10.20	2	1
23	20-08-64	23.0	18.4	7.1	130.6	57.8	6.0	0.32	6.00	1.10	1.30	6.15	2	1
24	24-08-64	23.0	16.9	0.8	13.5	24.0	2.5	0.15	2.70	2.00	1.25	7.00	2	1
25	25-08-64	38.0	32.2	10.7	344.5	80.4	8.3	0.26	11.90	0.50	0.55	6.00	2	1
26	28-08-64	22.5	18.5	8.6	159.1	63.4	6.5	0.35	2.70	0.45	1.20	5.30	2	1
27	29-08-64	31.4	17.8	17.0	302.6	32.2	3.3	0.19	6.50	0.45	1.00	5.20	2	1
28	21-08-64	14.0	12.0	12.8	153.6	26.6	2.7	0.23	3.30	0.55	1.45	5.10	2	1
29	21-08-64	11.5	10.8	43.0	464.4	51.4	5.3	0.49	7.50	0.45	0.20	5.30	2	1
30	01-09-64	34.0	29.0	21.6	626.4	56.7	5.8	0.20	7.20	1.00	0.30	9.00	2	1
31	02-09-64	7.1	5.2	30.7	159.6	14.5	1.5	0.29	1.50	1.10	1.30	5.00	2	1
32	11-09-64	27.1	23.4	0.4	9.4	21.0	2.2	0.09	1.60	0.45	1.10	5.50	2	1
33	17-09-64	28.0	24.6	3.4	83.6	44.4	4.6	0.19	6.60	1.05	1.00	5.20	2	1
34	19-09-64	41.2	36.6	10.3	377.0	113.0	12	0.32	11.50	1.05	1.15	7.10	2	1
35	07-06-65	45.9	38.4	0.0	0.0	80.1	8.3	0.22	21.60	0.30	0.15	4.00	1	1
36	15-06-65	80.3	64.4	0.8	51.5	122.4	13	0.20	22.30	1.00	0.35	5.30	1	1
37	26-06-65	33.3	29.1	3.8	110.6	21.9	2.3	0.08	5.80	0.30	0.10	4.00	1	1
38	01-07-65	55.5	26.4	2.4	63.4	15.2	1.6	0.06	6.10	0.45	0.35	3.05	2	1
39	20-07-65	46.8	32.9	2.0	65.8	11.4	1.2	0.04	1.90	1.00	1.15	4.40	2	1
40	23-07-65	39.0	30.6	10.5	321.3	52.2	5.4	0.18	10.00	0.55	0.50	5.15	2	1
41	28-07-65	22.4	12.7	5.2	66.0	8.8	0.9	0.07	1.60	1.00	1.00	5.20	2	1
42	30-07-65	41.5	29.9	7.0	209.3	21.4	2.2	0.07	1.60	1.05	0.30	11.00	2	1
43	01-08-65	49.0	39.3	16.4	644.5	57.5	5.9	0.15	6.50	1.10	1.30	8.00	2	1
44	07-08-65	30.9	25.9	4.2	108.8	17.4	1.8	0.07	2.30	1.15	1.10	5.40	2	1
45	12-08-65	46.5	27.0	10.0	270.0	66.0	6.8	0.25	11.80	0.25	0.40	5.00	2	1
46	17-08-65	16.2	15.6	6.1	95.2	20.0	2.1	0.13	2.30	1.05	1.20	6.35	2	1
47	18-09-65	37.0	18.1	6.4	115.8	12.1	1.2	0.07	2.30	0.25	0.40	4.45	2	1
48	13-04-82	47.3	43.8	0.0	0.0	91.2	9.4	0.21	11.20	-	-	-	1	2
49	15-04-82	26.2	24.3	22.6	549.2	15.0	1.5	0.06	2.14	-	-	-	1	2
50	07-05-82	17.0	14.9	0.2	3.0	2.2	0.2	0.02	0.30	0.05	0.34	6.15	1	2
51	09-05-82	30.1	15.9	5.9	93.8	0.6	0.1	0.00	0.24	0.05	1.25	4.04	1	2
52	11-05-82	33.7	30.5	10.0	305.0	82.8	8.5	0.28	26.00	0.30	1.00	6.00	1	2
53	09-06-82	46.9	34.7	0.1	3.5	16.1	1.7	0.05	4.32	0.30	0.33	5.10	1	2
54	11-06-82	17.4	9.6	7.2	69.1	3.7	0.4	0.04	0.82	0.15	1.38	3.55	1	2
55	12-06-82	13.3	11.1	8.8	97.7	7.1	0.7	0.07	1.19	1.10	1.13	7.30	1	2

TABEAU 1

CARACTERISTIQUES DES CRUES SUR LE BASSIN DE BINNDE (9,7 KM2)

OBS	DATE	PMX	PMY	IK	PIK	VR	LR	KR	QMX	TM	TR	TB	VEG	CAM
56	25-06-82	37.9	31.6	0.5	15.8	35.1	3.6	0.11	10.10	0.50	0.50	6.00	2	2
57	07-07-82	27.8	25.4	4.1	104.1	19.7	2.0	0.08	3.75	1.15	1.19	6.55	2	2
58	12-07-82	11.5	8.5	3.6	30.6	1.2	0.1	0.01	0.22	1.19	1.15	5.55	2	2
59	18-07-82	34.1	27.5	0.5	13.8	4.6	0.5	0.02	0.47	0.28	1.16	7.37	2	2
60	21-07-82	19.1	18.2	6.7	121.9	4.1	0.4	0.02	0.58	2.15	2.10	7.19	2	2
61	24-07-82	15.7	11.7	9.4	110.0	0.4	0.0	0.20	0.04	0.45	0.34	6.25	2	2
62	31-07-82	25.3	23.7	1.1	26.1	1.6	0.2	0.01	0.18	1.40	1.40	10.00	2	2
63	01-08-82	15.3	12.6	14.6	184.0	1.7	0.2	0.01	0.13	2.34	2.40	11.00	2	2
64	03-08-82	18.2	12.6	8.2	103.3	0.3	0.0	0.00	0.03	1.10	3.34	11.10	2	2
65	05-08-82	16.4	11.6	9.7	112.5	1.4	0.1	0.01	0.18	1.04	1.10	8.15	2	2
66	07-08-82	30.3	27.0	7.4	199.8	11.4	1.2	0.04	0.86	1.40	1.34	12.45	2	2
67	11-08-82	17.7	14.1	10.1	142.4	7.6	0.8	0.06	0.78	0.55	0.57	9.30	2	2
68	11-08-82	19.5	8.7	20.6	179.2	11.3	1.2	0.13	1.82	1.19	1.19	10.30	2	2
69	13-08-82	10.0	5.7	11.9	67.8	1.2	0.1	0.02	0.27	0.30	0.30	7.19	2	2
70	20-08-82	25.7	23.7	0.7	16.6	0.9	0.1	0.00	0.06	6.30	6.15	16.30	2	2
71	27-08-82	18.7	17.4	1.5	26.1	1.4	0.1	0.01	0.19	1.40	1.40	12.25	2	2
72	29-08-82	13.5	8.3	7.3	60.6	0.6	0.1	0.01	0.05	0.49	0.30	9.55	2	2
73	30-08-82	24.7	19.9	5.2	103.5	8.1	0.8	0.04	0.95	2.00	2.15	9.00	2	2
74	03-09-82	11.5	9.5	8.7	82.6	0.6	0.1	0.01	0.08	3.19	2.34	7.40	2	2
75	06-09-82	27.4	22.7	7.0	158.9	16.7	1.7	0.08	1.82	1.19	1.19	13.00	2	2
76	07-09-82	24.3	19.6	16.4	321.4	17.4	1.8	0.09	0.86	2.45	3.25	14.00	2	2
77	11-09-82	28.7	24.1	6.2	149.4	17.3	1.8	0.07	0.95	3.45	5.30	18.15	2	2
78	11-09-82	18.3	13.6	22.5	306.0	17.2	1.8	0.13	1.33	1.33	1.40	16.52	2	2
79	20-09-82	16.3	13.1	0.6	7.9	2.5	0.3	0.02	0.16	2.34	2.30	14.04	2	2
80	04-10-82	13.4	11.5	0.7	8.0	1.4	0.1	0.01	0.08	0.37	0.45	13.22	2	2
81	09-10-82	26.9	20.4	1.0	20.4	1.3	0.1	0.01	0.16	0.45	0.55	7.55	2	2
82	12-10-82	32.9	29.7	5.3	157.4	6.3	0.6	0.02	0.78	1.34	1.25	13.19	2	2
83	06-06-83	43.4	36.0	0.1	3.6	71.9	7.4	0.21	23.50	0.40	0.30	4.00	1	2
84	17-06-83	19.7	14.8	4.1	60.7	2.9	0.3	0.02	0.70	0.30	0.30	5.24	1	2
85	19-06-83	31.3	27.9	7.1	198.1	45.0	4.6	0.17	6.25	0.45	0.10	15.00	1	2
86	25-06-83	10.5	3.1	2.9	9.0	11.2	1.2	0.37	0.23	1.45	1.00	6.50	1	2
87	05-07-83	29.9	26.5	0.4	10.6	7.4	0.8	0.03	2.00	0.50	0.50	4.10	1	2
88	08-07-83	56.2	46.6	9.9	461.3	89.3	9.2	0.20	28.80	0.42	0.48	4.36	1	2
89	08-07-83	15.8	15.1	34.3	517.9	22.4	2.3	0.15	4.90	0.40	0.55	4.40	1	2
90	11-07-83	19.6	17.7	11.0	194.7	1.8	0.2	0.01	0.34	1.00	0.55	3.40	1	2
91	17-07-83	41.2	39.3	1.4	55.0	60.0	6.2	0.16	18.60	0.45	0.50	4.30	2	2
92	28-07-83	45.6	31.7	0.2	6.3	49.5	5.1	0.16	8.96	1.00	1.05	6.00	2	2
93	06-08-83	34.3	25.1	0.6	15.1	9.0	0.9	0.04	1.72	1.31	-	6.50	2	2
94	07-08-83	21.8	19.6	15.6	305.8	8.1	0.8	0.04	1.72	1.00	1.15	7.30	2	2
95	08-08-83	24.5	21.0	12.9	270.9	7.0	0.7	0.03	0.30	2.10	-	16.00	2	2
96	11-08-83	39.3	35.5	12.5	443.8	31.9	3.3	0.09	8.96	2.16	1.53	8.00	2	2
97	21-08-83	18.5	12.6	0.7	8.8	4.3	0.4	0.04	0.38	1.35	1.30	8.00	2	2
98	22-08-83	29.2	23.0	4.9	112.7	28.8	3.0	0.13	4.90	1.55	1.16	8.40	2	2
99	23-08-83	21.5	13.4	16.9	226.5	3.7	0.4	0.03	0.30	1.50	-	11.00	2	2
100	26-08-83	31.7	29.7	6.7	199.0	39.6	4.1	0.14	6.95	1.30	1.08	5.30	2	2
101	28-08-83	9.3	8.5	12.1	102.8	1.6	0.2	0.02	0.28	2.00	-	7.10	2	2
102	29-08-83	12.3	10.0	21.3	213.0	15.5	1.6	0.16	2.64	1.35	1.30	6.00	2	2
103	05-08-83	27.2	21.6	7.6	164.2	15.4	1.6	0.07	2.64	1.20	1.15	6.20	2	2
104	11-09-83	11.4	11.1	5.2	57.7	0.9	0.1	0.01	0.23	2.30	2.00	5.40	2	2
105	13-09-83	18.4	16.2	6.0	97.2	2.8	0.3	0.02	0.46	1.20	1.20	6.20	2	2
106	15-09-83	14.4	9.2	8.2	75.4	2.8	0.3	0.03	0.46	2.25	2.10	7.35	2	2
107	22-09-83	41.5	33.2	1.8	59.8	41.3	4.3	0.13	6.20	1.15	1.00	6.15	2	2

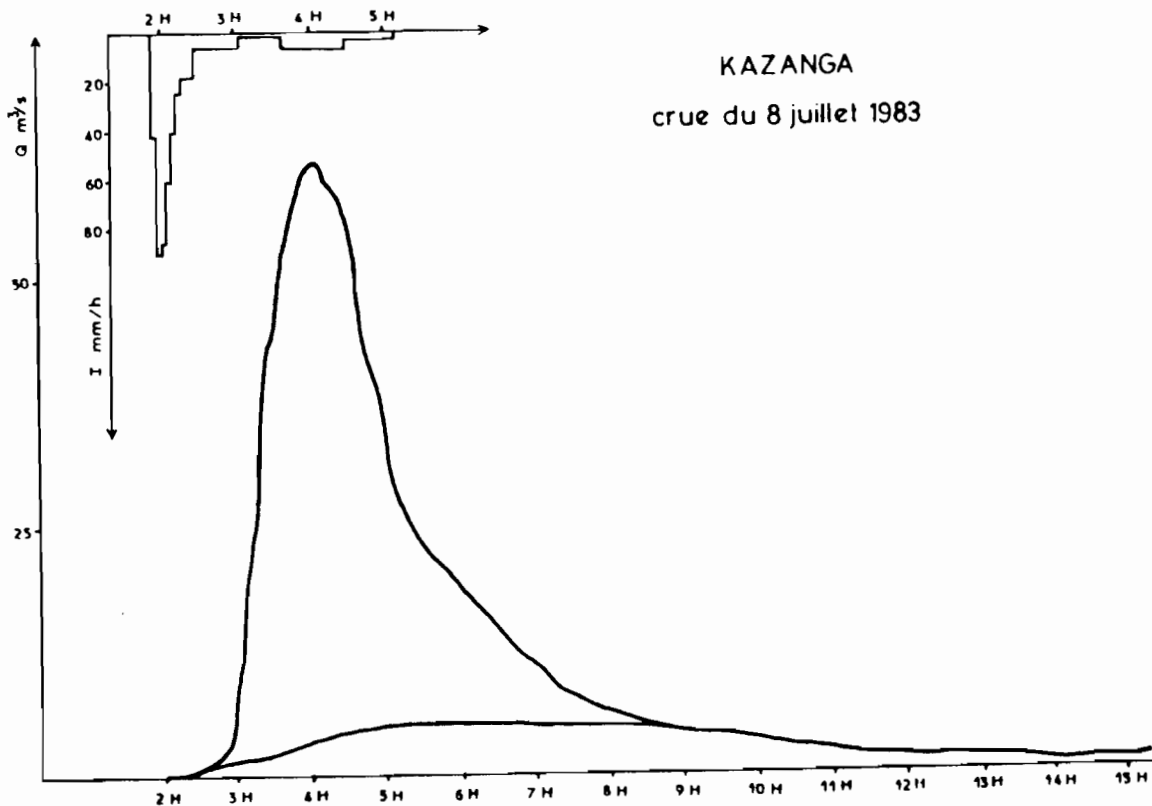
TABLEAU 1 SUITE

ANNEXE N° 3 - BASSIN VERSANT DE KAZANGA

1. Description des principales crues de la campagne 1983

La crue qui a eu la pointe la plus forte est celle du 8 Juillet 1983, elle résulte d'une averse assez homogène de 46,9 mm, avec un maximum de 58,8 mm sur la bordure aval du bassin. Le corps de l'averse est simple, il dure 40 minutes avec une pointe d'intensité de 91 mm.h⁻¹ pendant 5 minutes, la traîne, de très faible intensité dure plus de deux heures.

La crue qui peut être considérée comme unitaire, a un temps de montée d'une heure, un temps de base de 6 heures 25 et atteint un débit de pointe de 61,7 m³.s⁻¹. Survenant sur un sol à saturation moyen ($IK = 8,9$), son coefficient de ruissellement est de 19%.



2. Tableaux des caractéristiques des crues

PMX : hauteur de pluie maximale recueillie sur le bassin (mm)

PMY : hauteur de pluie moyenne sur le bassin (mm)

IK : Indice des pluies antérieures (mm)

PIK : Produit de P par IK

VR : Volume ruisselé (10^6 m^3)

LR : Lame ruisselée (mm)

Kr : Coefficient de ruissellement (mm)

TM : Temps de montée (heure-minute)

TB : Temps de base (heure-minute)

CARACTERISTIQUES DES CRUES SUR LE BASSIN DE KAZANGA(54.8 KM2)

OBS	DATE	PMX	PMY	IK	PIK	VR	LR	KR	QMX	TM	TB
1	19-06-63	46.0	20.7	1.1	22.8	71.0	1.3	0.06	9.7	2.30	5.15
2	22-06-63	55.9	47.6	11.9	566.4	201.4	3.7	0.08	25.2	1.30	6.30
3	23-06-63	36.6	23.5	3.5	82.3	140.3	2.6	0.11	18.4	1.30	7.00
4	05-07-63	40.0	30.0	4.8	144.0	95.0	1.7	0.06	11.7	2.05	7.40
5	16-07-63	31.2	26.0	3.7	96.2	156.0	2.8	0.11	10.7	3.20	10.30
6	21-07-63	58.9	44.1	8.7	383.7	680.0	12	0.28	70.5	1.00	9.00
7	22-07-63	94.7	54.1	16.9	914.3	1615.0	29	0.54	157.0	1.55	9.30
8	07-08-63	36.5	23.6	14.6	344.6	318.9	5.8	0.25	14.6	1.10	9.00
9	09-08-63	45.0	21.5	1.3	27.9	521.0	9.5	0.44	40.5	1.40	9.00
10	27-08-63	26.4	16.5	0.6	9.9	223.8	4.1	0.25	11.4	2.30	10.00
11	11-09-63	19.3	15.9	0.5	7.9	203.7	3.7	0.23	10.4	4.50	12.00
12	07-06-64	43.3	22.9	2.0	45.8	106.3	1.9	0.08	12.6	1.45	6.40
13	13-07-64	44.3	26.5	2.8	74.2	170.0	3.1	0.12	14.9	2.30	9.15
14	18-07-64	20.0	11.5	5.6	64.4	42.0	0.8	0.07	5.0	1.00	5.10
15	19-07-64	51.7	32.3	28.3	914.1	253.0	4.6	0.14	40.0	0.35	6.15
16	21-07-64	91.3	42.2	38.9	1642	980.0	18	0.42	134.0	1.25	7.00
17	22-07-64	27.6	15.6	42.1	656.8	85.0	1.6	0.10	7.2	1.05	6.40
18	24-07-64	45.8	30.7	15.2	466.6	820.0	15	0.49	104.0		
19	28-07-64	32.0	15.6	5.0	78.0	317.0	5.8	0.37	38.5	1.30	7.00
20	31-07-64	35.8	23.7	2.2	52.1	382.5	7.0	0.29	44.8	1.30	6.45
21	04-08-64	40.9	24.6	2.5	61.5	553.0	10	0.41	84.5	0.45	6.40
22	06-08-64	51.3	33.1	5.6	185.4	578.0	11	0.32	37.5	2.30	9.45
23	09-08-64	37.0	26.4	10.0	264.0	750.0	14	0.52	64.2	1.45	11.00
24	17-08-64	34.5	17.6	0.7	12.3	53.4	1.0	0.06	3.7	2.20	10.00
25	20-08-64	23.0	17.4	7.7	134.0	193.0	3.5	0.20	13.8	1.40	11.10
26	24-08-64	23.0	15.2	1.3	19.8	93.0	1.7	0.11	6.2	2.50	10.40
27	25-08-64	38.0	25.4	2.9	73.7	356.0	6.5	0.26	27.0	1.00	11.00
28	28-08-64	22.5	11.5	6.1	70.1	177.0	3.2	0.28	15.2	1.05	9.30
29	29-08-64	31.4	13.6	7.3	99.3	182.0	3.3	0.24	16.2	1.20	8.00
30	31-08-64	10.5	7.3	5.5	40.1	115.0	2.1	0.29	11.0	1.50	8.00
31	31-08-64	13.5	8.2			219.0	4.0	0.49	14.6	2.10	
32	01-09-64	34.0	23.2	2.7	62.6	442.0	8.1	0.35	26.7	2.00	16.00
33	11-09-64	35.2	28.1	0.4	11.2	78.6	1.4	0.05	4.9	4.00	9.50
34	17-09-64	28.0	20.4	1.0	20.4	243.0	4.4	0.22	18.1	1.50	8.30
35	19-09-64	44.5	36.9	6.5	239.8	965.0	18	0.48	78.0	1.25	9.20
36	07-06-65	51.1	35.5	5.3	188.1	122.7	2.2	0.06	12.7	1.20	8.30
37	15-06-65	80.3	51.1	11.9	608.1	296.0	5.4	0.11	36.6	0.50	7.05
38	26-06-65	39.0	27.1	3.1	84.0	85.5	1.6	0.06	10.3	0.45	6.45
39	01-07-65	71.6	44.4	8.6	381.8	473.0	8.6	0.19	91.2	0.45	6.40
40	24-07-65	39.0	21.5	1.8	38.7	109.5	2.0	0.09	11.3	1.10	7.30
41	28-07-65	39.8	26.4	3.0	79.2	206.4	3.7	0.14	20.0	1.50	8.45
42	30-07-65	52.7	39.8	7.1	282.6	356.0	6.5	0.16	30.6	2.05	8.15
43	01-08-65	96.0	51.4	4.5	231.3	370.0	6.8	0.13	34.4	2.10	8.30
44	02-08-65	14.5	15.5	42.8	663.4	289.0	5.3	0.34	29.3	1.45	8.00
45	04-08-65	15.9	14.2	20.0	284.0	138.9	2.5	0.18	12.5	1.20	8.20
46	07-08-65	41.7	26.5	3.7	98.0	54.6	1.0	0.04	4.1	1.00	8.30
47	12-08-65	46.5	16.0	1.6	25.6	108.0	2.0	0.12	11.9	1.50	7.20
48	17-08-65	17.3	14.5	0.3	4.3	102.0	1.9	0.13	7.0	3.20	9.30
49	18-08-65	42.0	25.2	2.7	68.0	119.4	2.2	0.09	10.1	1.55	8.45
50	06-06-83	45.9	36.7	1.6	58.7	159.2	2.9	0.08	31.2	1.00	7.10
51	16-06-83	20.7	14.5	3.6	52.2	8.6	0.2	0.01	0.9	0.40	4.30
52	19-06-83	31.9	25.5	4.0	102.0	73.2	1.3	0.05	5.6	2.50	8.30
53	05-07-83	29.7	23.8	0.5	11.9	6.1	0.1	0.00	0.5	0.55	7.35
54	08-07-83	58.6	46.9	8.9	417.4	483.6	8.8	0.19	61.7	1.00	6.25
55	08-07-83	18.8	16.9	33.9	572.9	185.4	3.4	0.20	0.5	1.10	7.30

TABLEAU 1

CARACTERISTIQUES DES CRUES SUR LE BASSIN DE KAZANGA(54.8 KM2)

OBS	DATE	PMX	PMY	IK	PIK	VR	LR	KR	QMX	TM	TB
56	12-07-83	21.2	12.7	11.3	143.5	6.7	0.1	0.01	15.2	1.25	10.15
57	17-07-83	41.4	37.3	1.2	44.8	303.6	5.5	0.15	31.2	1.10	7.25
58	28-07-83	49.0	24.5	0.2	4.9	66.9	1.2	0.05	7.3	2.05	7.35
59	06-08-83	62.4	43.7	0.5	21.8	408.0	7.4	0.17	55.8	1.10	6.40
60	07-08-83	23.2	18.6	20.8	386.9	103.2	1.9	0.10	8.4	3.00	13.00
61	08-08-83	47.0	32.9	23.9	786.3	298.2	5.4	0.17	27.5	1.45	7.25
62	11-08-83	39.4	35.5	12.7	450.8	377.4	6.9	0.19	31.2	2.00	10.05
63	20-08-83	17.0	10.2	0.5	5.1	3.3	0.1	0.01	0.3	1.20	10.50
64	22-08-83	27.6	19.3	7.3	140.9	68.1	1.2	0.06	5.0	3.20	11.10
65	23-08-83	18.8	7.5	16.1	120.7	12.5	0.2	0.03	0.8	1.20	9.30
66	26-08-83	38.0	26.6	5.3	141.0	126.3	2.3	0.09	10.1	1.20	7.50
67	27-08-83	13.0	7.8	19.3	150.5	8.9	0.2	0.02	0.5	3.00	12.00
68	29-08-83	11.6	5.8	10.0	58.0	10.7	0.2	0.03	1.0	1.20	7.35
69	05-09-83	26.5	15.9	0.3	4.8	16.4	0.3	0.02	1.4	2.40	8.00
70	13-09-83	24.3	17.0	5.5	93.5	21.0	0.4	0.02	0.8	3.55	16.10
71	15-09-83	15.0	9.0	8.4	75.6	6.2	0.1	0.01	0.7	0.50	6.50
72	16-09-83	35.4	17.7	9.6	169.9	18.9	0.3	0.02	1.0	3.30	12.05
73	22-09-83	44.4	35.5	2.3	81.6	150.5	2.7	0.08	9.9	2.15	8.10

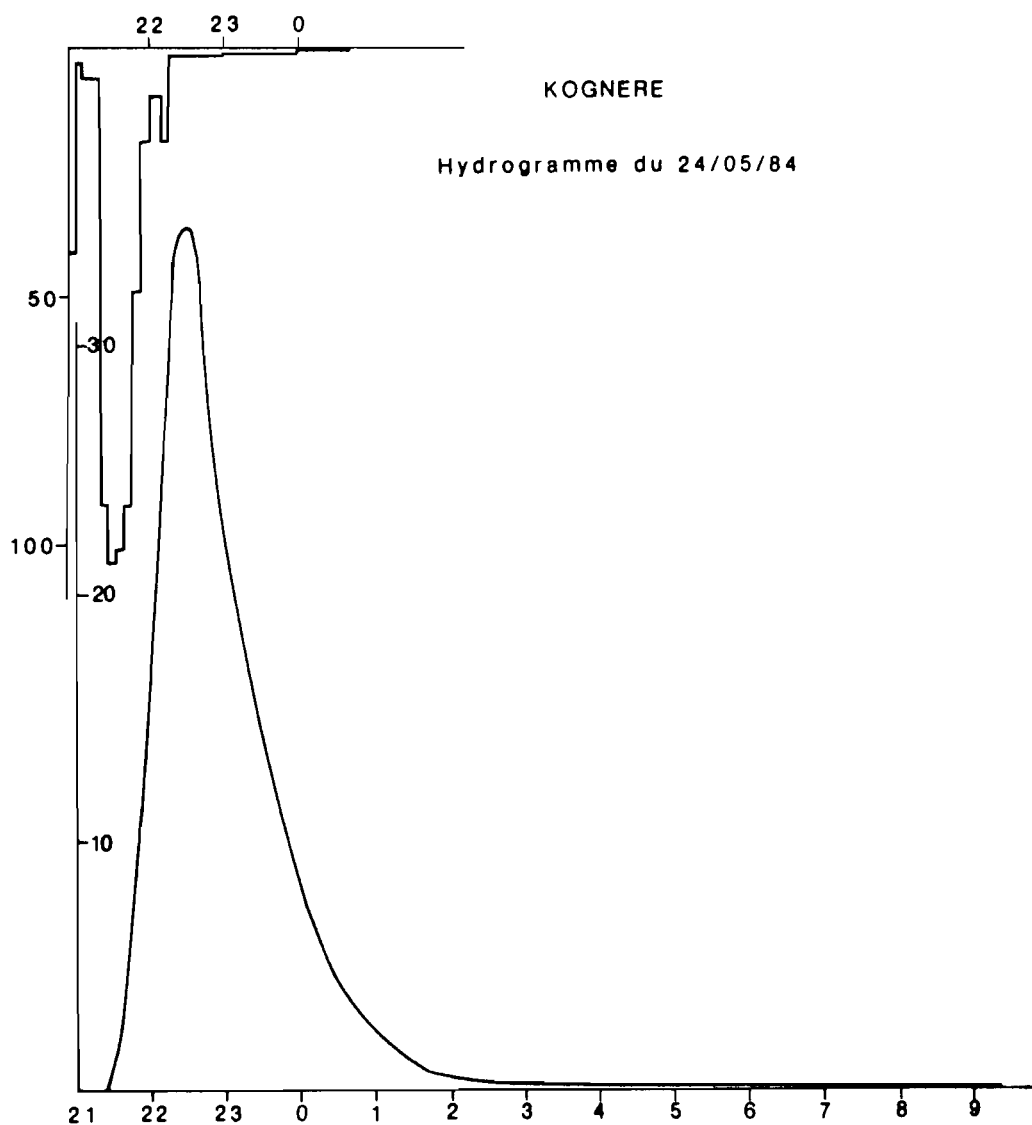
TABLEAU 1 SUITE

ANNEXE N° 4 - BASSIN VERSANT DE KOGNERE

1. Description des principales crues de la campagne 1984

Notons que seule la crue du 24 mai dépasse les $30 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. Elle résulte d'une averse assez homogène, 48,8 mm, avec un maximum au plein centre du bassin : 58,5 mm. Le corps de l'averse est simple il dure 1 heure avec une pointe d'intensité de 108 mm h^{-1} pendant 5 minutes, la traîne de très faible intensité dure près de 2 heures. La crue qui en résulte atteint débit de pointe de $34,9 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ a un temps de montée de 1h.10 et un temps de base de 11h.40. Survenant après une pluie de la veille, cette crue est caractérisée par des conditions de ruissellement favorables :

- Les sols sont relativement saturés.
- Le chapelet de mares occupant le lit mineur est entièrement en eau, et on assiste à un débordement et un écoulement dès le début de la pluie.



2. Tableaux des caractéristiques des crues

PMX : hauteur de pluie maximale recueillie sur le bassin (mm)

PMY : hauteur de pluie moyenne sur le bassin (mm)

IK : Indice des pluies antérieures (mm)

PIK : Produit de P par IK

VR : Volume ruisselé (10^6 m^3)

LR : Lame ruisselée (mm)

Qmx : Débit de pointe (m^3/s)

TM : Temps de montée (heure-minute)

TR : Temps de réponse (heure-minute)

TB : Temps de base (heure-minute)

CARACTERISTIQUES DES CRUES SUR LE BASSIN DE KOGNERE (19,8 KM2)

OBS	DATE	PMX	PMY	IK	PIK	VR	LR	QMX	TM	TR	TB	KR
1	06-07-60	56.4	33.4	4.1	136.9	58.2	2.9	4.80	2.00	2.00	-	0.088006
2	17-07-60	39.0	27.0	5.7	153.9	56.1	2.8	4.10	3.00	3.20	-	0.104938
3	17-07-60	58.0	41.9	25.5	1068	227.0	11	10.50	3.10	2.55	-	0.273619
4	01-08-60	62.1	47.8	16.6	793.5	142.0	7.2	7.20	3.30	4.00	-	0.150036
5	04-08-60	20.7	14.0	13.2	184.8	25.8	1.3	1.40	1.20	6.00	-	0.093074
6	05-09-60	34.0	26.6	4.1	109.1	39.3	2.0	1.90	2.40	6.40	-	0.074618
7	20-06-61	28.6	22.5	15.0	337.5	0.6	0.0	0.20	0.20	3.45	-	0.001347
8	03-08-61	54.5	35.5	9.0	319.5	56.1	2.8	4.40	0.45	2.40	-	0.079812
9	18-08-61	98.0	79.5	2.2	174.9	236.0	12	14.50	2.40	2.30	-	0.149927
10	02-09-61	53.3	46.3	3.0	138.9	71.7	3.6	2.90	6.40	8.00	-	0.078212
11	15-07-62	52.0	44.2	6.4	282.9	23.9	1.2	1.40	5.20	5.40	-	0.027309
12	03-08-62	54.9	47.6	3.7	176.1	98.1	5.0	3.70	6.30	7.05	-	0.104087
13	18-08-62	180.0	140.0	14.5	2030	716.0	36	25.10	2.20	3.10	-	0.258297
14	20-08-62	74.6	36.8	58.0	2134	131.0	6.6	4.80	6.00	6.40	-	0.179787
15	24-08-62	23.6	20.3	12.8	259.8	120.0	6.1	5.70	5.00	5.20	-	0.298552
16	26-08-62	20.3	17.5	13.7	239.7	30.6	1.5	1.10	4.30	-	-	0.088312
17	28-08-62	53.3	42.9	19.1	819.4	215.0	11	9.30	5.00	6.50	-	0.253114
18	29-08-62	33.6	30.2	37.1	1120	236.0	12	8.90	5.30	-	-	0.394675
19	01-09-62	29.0	24.1	15.2	366.3	104.0	5.3	3.50	7.20	7.15	-	0.217947
20	03-09-62	35.5	28.3	23.7	670.7	220.0	11	7.50	6.15	6.05	-	0.392619
21	04-09-62	17.6	14.7	1.6	23.5	143.0	7.2	4.70	6.20	-	-	0.491308
22	16-09-62	30.2	27.2	1.6	43.5	25.9	1.3	1.50	1.40	-	-	0.048091
23	17-09-62	29.5	21.8	17.6	383.7	155.0	7.8	5.50	6.20	8.10	-	0.359096
24	21-09-62	55.2	36.6	5.4	197.6	141.0	7.1	4.70	5.30	6.15	-	0.194569
25	27-09-62	34.0	23.7	6.5	154.0	71.8	3.6	3.00	5.20	6.40	-	0.153007
26	23-05-84	26.2	16.1	0.6	9.7	2.5	0.1	0.53	1.10	2.12	7.3	0.007842
27	24-05-84	58.5	48.8	10.5	512.4	196.0	9.9	34.90	1.10	1.10	11.4	0.202848
28	31-05-84	24.0	21.9	2.1	46.0	4.1	0.2	0.80	1.00	2.40	8.3	0.009455
29	13-06-84	37.1	35.6	3.1	110.4	67.7	3.4	11.10	1.20	1.50	8.4	0.096045
30	06-07-84	31.7	29.7	0.2	5.9	31.8	1.6	5.72	1.30	2.10	7.4	0.054076
31	07-07-84	20.1	13.6	20.5	278.8	14.9	0.8	1.23	1.10	2.20	12.0	0.055333
32	15-08-84	67.1	38.3	3.0	114.9	36.0	1.8	3.27	1.20	3.20	13.0	0.047472
33	18-08-84	17.3	15.4	15.3	235.6	13.5	0.7	0.58	1.55	4.30	20.0	0.044274
34	08-09-84	30.0	26.4	10.4	274.6	27.1	1.4	2.22	1.50	4.30	17.2	0.051844

TABLEAU 1

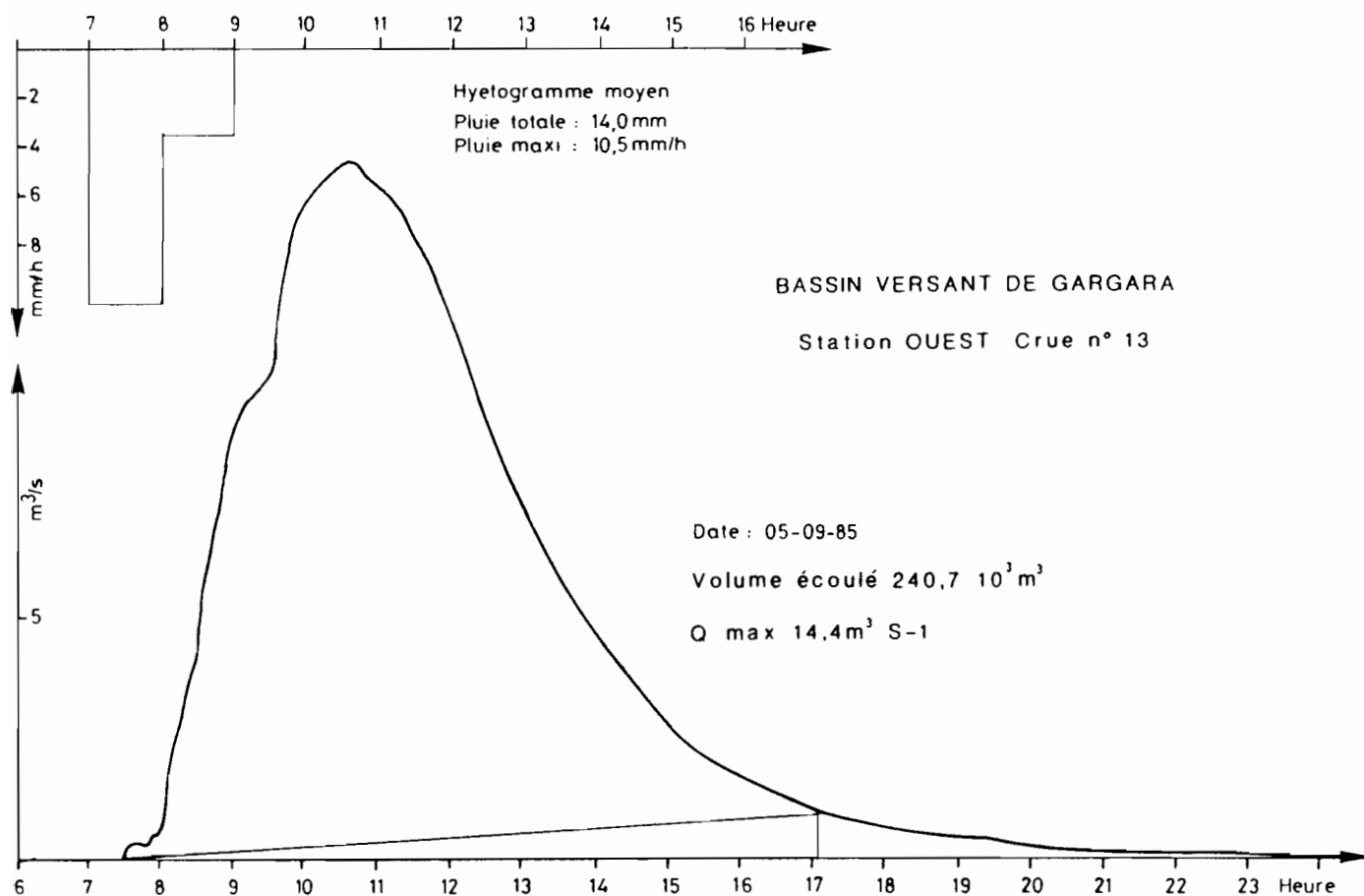
ANNEXE N° 5 - BASSINS VERSANTS DE GAGARA EST ET DE GAGARA OUEST

1. Description des principales crues de la campagne 1985

Au mois de juin un orage très localisé sur l'amont des deux bassins provoque une petite crue ($4,82 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ en débit de pointe) sur le marigot est tandis qu'il reste sans effet sur le marigot ouest. Ces orages sont caractéristiques du début de saison des pluies. Entre le 10 et le 15 août un épisode pluvieux de plusieurs averses permet une bonne humectation des sols du bassin et donne lieu à trois crues dont la plus importante survient le 12 août $15,5 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ à GAGARA OUEST et $12,2 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ à GAGARA EST en débit de pointe.

Le 26 août, une ligne de grains donne lieu à un écoulement généralisé provoquant une crue qui atteint $13,2 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ sur le bassin est et de $11,9 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ sur le bassin ouest.

Le 5 septembre en fin de saison des pluies une ligne de grains provoque une averse bien répartie sur tous les postes pluviométriques des deux bassins. Le corps de pluie dure deux heures et la traîne est inexistante, l'intensité maximum en 10 minutes est de 80 mm/h . Il en résulte sur chaque bassin une crue à pointe unique qui atteint $15,3 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ sur le marigot est et $14,4 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ sur le marigot ouest



2. Tableaux des caractéristiques des crues

PMX : hauteur de pluie maximale recueillie sur le bassin (mm)

PMY : hauteur de pluie moyenne sur le bassin (mm)

IK : Indice des pluies antérieures (mm)

PIK : Produit de P par IK

VR : Volume ruisselé (10^6 m^3)

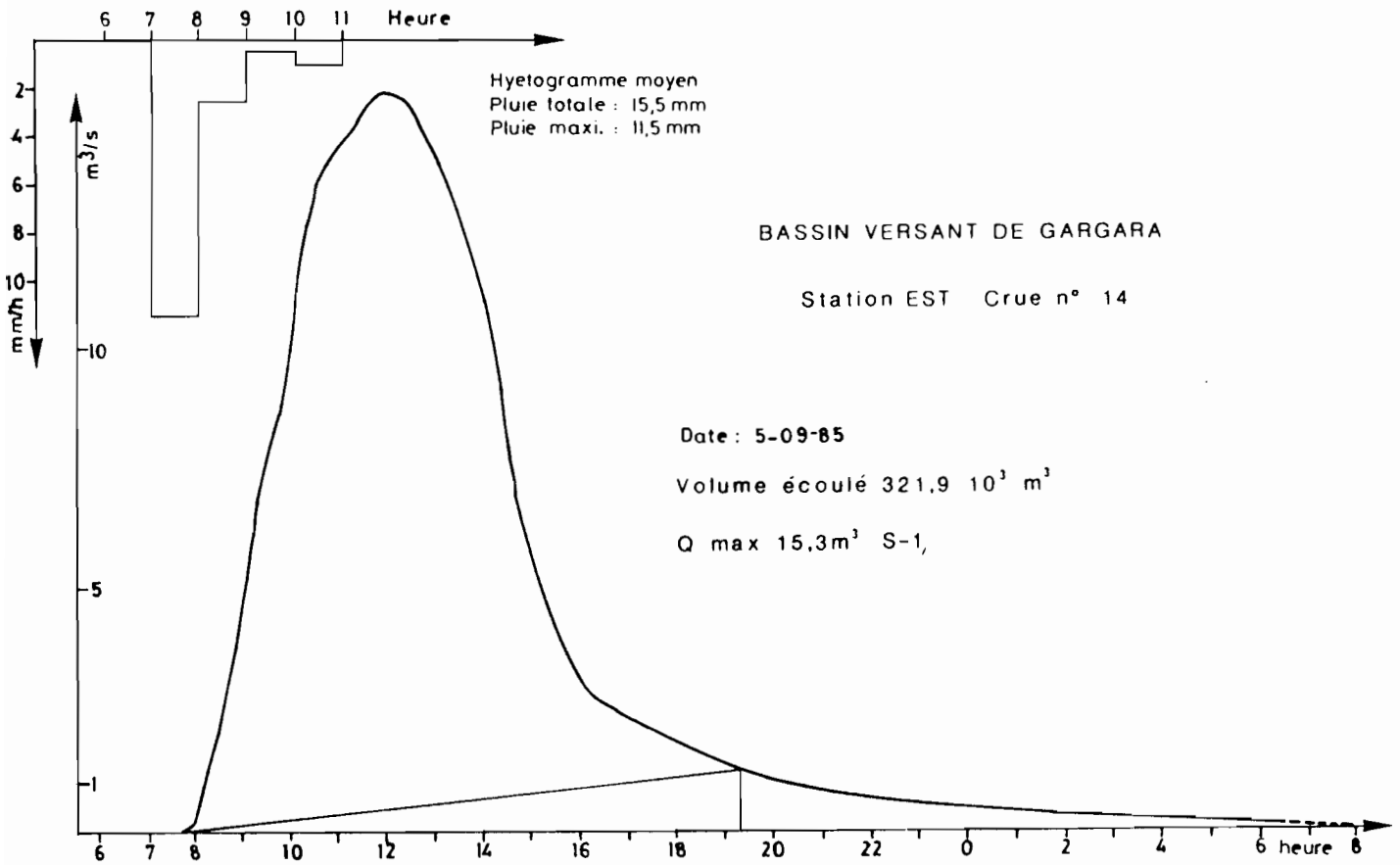
LR : Lamme ruisselée (mm)

Qmx : Débit de pointe (m^3/s)

TM : Temps de montée (heure-minute)

TR : Temps de réponse (heure-minute)

TB : Temps de base (heure-minute)



CARACTERISTIQUES DES CRUES SUR LE BASSIN DE GAGARA E(35.0 KM2)

OBS	DATE	AN	PMX	PMY	IK	PIK	VR	LR	KR	QMX	TM	TR	TB
1	31-07-56	56	90.0	68.0	-	.	305.00	8.7	0.13	11.50	3.00	3.25	-
2	18-08-56	56	38.5	26.5	-	.	165.00	4.7	0.18	4.00	10.25	10.25	-
3	20-08-56	56	60.0	49.0	-	.	450.00	13	0.26	7.60	11.00	-	-
4	29-08-56	56	19.5	17.5	-	.	63.00	1.8	0.10	2.90	4.75	5.15	-
5	01-09-56	56	110.0	70.5	-	.	1050.00	30	0.43	23.00	10.30	11.30	-
6	04-09-56	56	33.6	27.0	-	.	595.00	17	0.63	3.90	11.00	18.00	-
7	27-07-57	57	65.3	51.0	-	.	170.00	4.9	0.10	6.00	5.00	5.30	-
8	03-08-57	57	45.2	37.0	-	.	220.00	6.3	0.17	8.70	4.75	5.00	-
9	09-08-57	57	44.8	40.0	-	.	295.00	8.4	0.21	7.90	5.25	6.30	-
10	14-08-57	57	24.3	15.5	-	.	145.00	4.1	0.27	4.80	6.25	7.00	-
11	22-08-57	57	23.2	11.0	-	.	130.00	3.7	0.34	4.60	6.75	7.15	-
12	24-08-57	57	28.4	22.0	-	.	195.00	5.6	0.25	4.90	8.00	8.15	-
13	18-06-85	85	18.3	12.6	0.0	0.0	52.05	1.5	0.12	4.80	1.00	1.50	7.55
14	01-07-85	85	18.0	11.3	0.1	1.1	110.00	3.1	0.28	10.10	1.42	3.00	12.47
15	06-07-85	85	9.5	3.4	1.0	3.4	10.14	0.3	0.09	0.76	1.25	4.20	9.55
16	10-07-85	85	18.8	12.3	0.9	11.1	117.20	3.3	0.27	14.20	1.55	3.00	16.10
17	20-07-85	85	13.6	9.7	0.1	1.0	35.02	1.0	0.10	2.40	0.30	3.80	17.44
18	04-08-85	85	21.6	13.9	0.1	1.4	155.30	4.4	0.32	7.20	2.40	2.00	18.16
19	11-08-85	85	11.6	7.2	4.7	33.8	40.71	1.2	0.16	4.70	0.46	3.75	12.51
20	12-08-85	85	24.7	14.2	2.9	41.2	136.60	3.9	0.27	12.20	1.28	2.50	13.00
21	13-08-85	85	16.9	10.1	10.4	105.0	116.70	3.3	0.33	6.30	2.45	3.50	27.00
22	15-08-85	85	6.7	4.8	7.5	36.0	14.71	0.4	0.09	0.92	1.30	3.20	18.58
23	26-08-85	85	23.3	22.1	0.2	4.4	252.10	7.2	0.33	13.20	3.30	3.80	25.33
24	05-09-85	85	26.3	19.3	2.8	54.0	321.90	9.2	0.48	15.30	4.15	4.50	10.10
25	14-09-85	85	10.3	7.5	0.9	6.7	40.95	1.2	0.16	2.20	1.50	3.30	15.31

TABLEAU 1

CARACTERISTIQUES DES CRUES SUR LE BASSIN DE GAGARA O(24.3 KM2)

OBS	DATE	AN	PMX	PMY	IK	PIK	VR	LR	KR	QMX	TM	TR	TB
1	31-07-56	56	50.3	42.0	--	.	303.00	12	0.30	22.7	--	3.30	--
2	18-08-56	56	30.0	23.0	--	.	64.00	2.6	0.11	3.2	4.40	--	--
3	23-08-56	56	19.6	17.5	--	.	74.00	3.0	0.17	3.6	4.40	5.30	--
4	29-08-56	56	18.5	14.5	--	.	71.00	2.9	0.20	3.9	--	4.45	--
5	01-09-56	56	116.0	98.0	--	.	1340.00	55	0.56	36.0	--	--	--
6	04-09-56	56	40.0	25.0	--	.	148.00	6.1	0.24	7.4	4.25	5.45	--
7	27-07-57	57	49.1	42.0	--	.	197.00	8.1	0.19	12.5	--	4.00	--
8	03-08-57	57	57.5	36.0	--	.	415.00	17	0.47	25.5	3.55	4.00	--
9	09-08-57	57	41.5	35.0	--	.	239.00	9.8	0.28	14.8	4.00	6.00	--
10	14-08-57	57	19.3	16.0	--	.	113.00	4.7	0.29	6.6	3.25	4.30	--
11	24-08-57	57	30.1	18.5	--	.	114.00	4.7	0.25	5.7	4.30	4.00	--
12	01-07-85	85	18.0	14.1	0.1	1.4	91.42	3.8	0.27	11.4	1.52	3.00	14.21
13	03-07-85	85	14.5	8.9	5.3	47.2	68.61	2.8	0.32	10.0	0.42	--	17.52
14	10-07-85	85	17.4	11.2	0.5	5.6	58.35	2.4	0.21	5.9	2.28	3.00	16.33
15	20-07-85	85	13.4	9.4	0.1	0.9	27.74	1.1	0.12	3.7	0.22	3.00	13.55
16	26-07-85	85	15.4	7.6	1.3	9.9	44.53	1.8	0.24	5.3	1.35	1.25	16.44
17	04-08-85	85	17.2	14.6	0.2	2.9	64.30	2.6	0.18	5.2	3.00	--	23.10
18	11-08-85	85	14.3	7.5	5.0	37.5	21.68	0.9	0.12	1.6	1.32	1.50	16.12
19	12-08-85	85	27.6	14.6	3.0	43.8	157.90	6.5	0.45	15.5	9.25	2.40	18.45
20	13-08-85	85	16.2	10.5	10.7	112.3	109.30	4.5	0.43	7.1	4.40	1.10	22.56
21	15-08-85	85	20.4	6.8	7.8	53.0	18.86	0.8	0.11	1.7	0.23	0.30	15.40
22	17-08-85	85	11.4	10.3	5.4	55.6	75.36	3.1	0.30	6.5	2.40	2.40	13.50
23	26-08-85	85	23.3	20.7	0.2	4.1	168.40	6.9	0.33	11.9	3.17	3.15	19.41
24	05-09-85	85	22.6	18.9	1.3	24.6	240.70	9.9	0.52	14.4	3.08	3.05	18.32

TABLEAU 2

ANNEXE N° 6 - REALISATION DE LA CARTE DES ETATS DE SURFACE

- TRAVAUX DE TERRAIN

Depuis les premiers travaux menés dans le nord du BURKINA FASO (VALENTIN, 1981) les techniques de relevé ont eu tendance à se normaliser. Il reste néanmoins que la méthode est suffisamment souple pour s'adapter aux différentes conditions de milieu, d'accessibilité et en fonction des documents de bases existants (aucun, carte topographique, photos aériennes récentes ou anciennes).

Pour l'ensemble des bassins étudiés étaient disponibles des photos aériennes au 50 000^{ème} de bonne qualité, des agrandissements, une carte topographique au 200 000^{ème}. Le faible relief et la végétation relativement claire de nos bassins ont permis une prospection aisée en voiture tout terrain en saison sèche. Un cheminement a donc été réalisé le long de tous les axes carrossables du terrain et a permis de noter les discontinuités d'états de surface et de réaliser une description systématique de points d'observation distribués à des intervalles plus ou moins réguliers et en fonction de la compréhension immédiate du cartographe.

Suivant VALENTIN "la densité des points nécessaire varie en fonction de la qualité des "documents accessoires" : photographie aérienne, carte topographique ... du type de paysage : son degré de mise en culture, la couverture végétale, etc ... et de "l'équation personnelle du cartographe" : "un pédologue spécialiste des états de surfaces aura besoin d'un nombre plus restreint d'observations qu'un débutant".

Pour chaque point d'observation est consigné l'ensemble des descriptions faites aussi complètement que possible. Le point d'observation se définit par le champ de vision. A cette échelle il est fréquent que les états de surface apparaissent sous la forme de mosaïques constituées de plusieurs unités considérées comme homogènes. Ces unités sont considérées comme des "surfaces élémentaires" appartenant à une même unité cartographique.

Les descriptions sont faites en plusieurs étapes, on note d'abord la situation du point sur la photo aérienne, puis les principaux traits de son environnement immédiat (proximité d'un village, d'une maison, d'un champ etc) enfin on procédera à la description des surfaces élémentaires.

Il nous paraît important de présenter ici la méthode de description des surfaces élémentaires et de la représentation cartographique extraite de la publication de VALENTIN (1985).

Couvert végétal

* Couvert arboré : la densité et le type de distribution des grands arbres sont des paramètres qui peuvent aisément être relevés sur le terrain. Leur identification sur photographies aériennes facilite ensuite le tracé de certaines limites. Les ligneux sont décrits en fonction de leurs strates principales définies par des limites de hauteur (exemple : > 15 m, entre 10 et 15 m, entre 5 et 10 m, entre 2 et 5 m, entre 1 et 2 m, < 1 m). Pour chacune des strates, on s'efforce de noter :

- le pourcentage de recouvrement,
- la distance moyenne entre les individus,
- le type de distribution, régulière, aléatoire, en îlots (bosquets), ...
- éventuellement : l'espèce dominante, ou significative, le type de port, ...

* Tapis herbacé : les mêmes critères sont pris en compte. Une attention particulière est portée sur les relations entre les caractères du tapis herbacé et les autres composantes de l'état de surface (les graminées sont par exemple associées à un recouvrement sableux).

* Végétation de surface : les principales caractéristiques (recouvrement, ...) des végétaux de surface sont relevées. Il est souvent possible de noter ainsi la présence plus ou moins marquée de plantes rampantes, de mousses, de lichens, d'algues, de graines ou de très jeunes pousses.

* Résidus végétaux : qu'il s'agisse de végétation naturelle ou de culture, il est important d'estimer le recouvrement assuré par les organes végétaux morts pas encore humifiés. Ils peuvent être en place (herbes sèches dressées), inclinés, ou sur le sol et plus ou moins fragmentés. Il est bien sûr utile de relever également la présence de cendres et d'autres indices de brûlis.

Organisations pédologiques superficielles

* Litière : constituée de résidus végétaux plus transformés que précédemment, la litière est souvent discrète, voire absente en zone de savane. Nous incluons sous cette rubrique les éventuels chevelus racinaires affleurants.

* Activité faunique : ce n'est pas l'activité faunique proprement dite qui est appréciée, mais plutôt la nature et le recouvrement des différentes constructions opérées par la mésofaune : termitières, placages de récoltes de termites, fourmilières, turricules de vers, ...

* Microrelief : les principales caractéristiques du microrelief (forme, amplitude, relations avec le sens de plus grande pente, etc ...) sont relevées, surtout lorsqu'il présente une grande régularité (buttes, billons, ...)

* Indices de migration de constituants : il peut s'agir de dépôts (érosion hydrique ou déflation éolienne), de transports (traces d'écoulement en nappe ou hiérarchisé ou de dépôts). Citons, à titre d'exemple, la hauteur de salissures par rejaillissement sur les tiges des herbes, l'importance des déchaussements, l'existence de figures en piédestal (microbuttes témoins), de griffes, d'atterrissements sableux, etc ...

* microprofil : les matériaux pédologiques présentent souvent des différenciations verticales assez nettes à proximité de la surface. Il est possible de distinguer, même à l'oeil nu, une ou plusieurs organisations lamellaires ou pelliculaires, que nous désignons par le terme de "micro-horizon". Les caractères les plus importants à noter en sont : l'épaisseur, l'humidité lors de la description, la continuité, la couleur, la taille des constituants, le type (fentes, vésicules, ...) et le développement de la porosité, la dureté, la fragilité et le type de relation avec le micro-horizon suivant (estimé par le degré de discordance). Cette succession de micro-horizons correspond souvent à des "processus de réorganisation" qui conduisent à une distribution granulométrique verticale inverse de celle qui résulte de la sédimentation : les matériaux les plus grossiers (galets, gravillons ou sables) recouvrent une pellicule plasmique ou sont enchassés en elle. Il arrive que cette succession verticale se répète sur les premiers centimètres de l'horizon superficiel, conférant ainsi à celui-ci une structure lamellaire bien marquée.

La description d'une surface élémentaire ne se contente pas de dresser l'inventaire des principaux éléments de l'état de surface, elle doit chercher à caractériser leurs relations : concentration des constructions mésofauniques à la base des touffes végétales, organisations pelliculaires très discrètes sous le tapis herbacé, mais développées dans les zones nues, etc ... En dépit de ce début d'interprétation, les travaux de terrain s'achèvent sans que les différents points d'observations aient été classés selon une classification prédéterminée. A ce stade de l'étude, il n'est en effet pas souhaitable de hiérarchiser les différentes composantes des états de surface.

Pour chaque bassin étudié une cinquantaine de points d'observations ont été décrits pour des cheminements allant de la dizaine à la vingtaine de kilomètres.

- REPRESENTATION CARTOGRAPHIQUE

Mise en ordre des relevés.

La représentation cartographique nécessite d'identifier des unités définies en fonction des caractéristiques communes à plusieurs points d'observation. La première phase consiste à établir un fichier de ces différents points et de leurs caractères. Il est alors possible de procéder à un premier regroupement des points les plus semblables. Cette opération pourrait éventuellement être automatisée : une analyse en composantes principales doit être à même de faciliter l'identification de ces groupes. Le nombre de ces derniers est le plus souvent incompatible avec une représentation cartographique simple. Les unités seraient généralement trop petites pour être dessinées aux échelles habituelles (1/50 000 ou 1/30 000). Il convient par conséquent de condenser encore l'information en associant plusieurs groupes au sein de la même unité.

Définition des unités cartographiques.

La représentation cartographique répond à deux impératifs en termes de :

* Contenu : chaque unité cartographique doit être définie en fonction des surfaces élémentaires qui la composent et des pourcentages occupés par ces surfaces. Pour hiérarchiser les facteurs et définir ainsi les unités, il est nécessaire, contrairement à la phase de terrain, de recourir à l'état actuel de nos connaissances sur les relations entre les différentes composantes du milieu et l'aptitude au ruissellement. En zone pré-désertique, les regroupements s'effectueront en privilégiant les organisations pédologiques superficielles alors que ce sont les types de peuplements végétaux qui différencieront, par exemple, les unités en savane humide.

* Limites : le tracé doit être possible à partir des deux documents disponibles : relevés de terrain, carte topographique, photographies aériennes, ... Il se trouve souvent facilité par les relations génétiques, ou simplement topographiques, des différentes unités. Comme pour la couverture pédologique, la distribution des états de surface est ordonnée. La mise en évidence d'un tel ordre, et son éventuelle compréhension, limitent considérablement les risques d'erreur, surtout lorsque l'on ne dispose pas de photographies aériennes. Elles fournissent également des renseignements sur la dynamique actuelle des versants.

Disposant de photos aériennes récentes pour les bassins étudiés les limites de chaque unité cartographique a été établie par photo-interprétation. Chaque point d'observation a été reporté sur la photo aérienne, une nouvelle correspondance entre caractéristiques dominantes des points d'observation et des paramètres de la photo (grisé, présence de points noirs : arbres, ou de points blancs : termitières épigées, taches nues, position topographique) a été réalisée. Cette

correspondance devient "la clé" d'interprétation qui permet de dresser le document cartographique.

- REALISATION DE LA CARTE DE SURFACE DU BASSIN VERSANT DE KOGNERE

- DESCRIPTION DES UNITES CARTOGRAPHIQUES DU BASSIN DE KOGNERE (VALENTIN, 1985)

Tableau : principales caractéristiques des unités cartographiques.

Paramètres	1	2	3	4	5	6	7
Végétation							
* arborée :							
hauteur moyenne (m)	7,7	5,3	5,8	6,9	4,5	5,5	4,5
variation (m)	3-15	2,5-10	3-10	4-10	4-5	3-8	2-7
distance moyenne (m)	33	33	29	32	40	43	5
variation (m)	5-100	5-100	10-70	5-50	30-50	15-70	-
* recru arboré							
hauteur moyenne (m)	1,2	1,2	0,8	0,9	2,0	0,9	8
variation (m)	1,0-1,5	0,7-2,0	0,5-2,0	0-1,5	-	0,8-1,0	8
distance moyenne (m)	5	6	8	20	10	27	8
variation (m)	3-10	2-15	1,5-20	2-70	-	10-44	8
*strate herbacée							
hauteur moyenne (m)	0,8	1,1	0,9	1,1	0,1	0,1	0,3
variation (m)	0,2-1,5	0,5-1,5	0,5-1,5	0,2-2,0	-	-	-
recouvremt moyen (%)	42	31	25	20	13	20	50
variation (%)	20-50	5-70	0-50	-	5-20	-	-
Surfaces							
*réorganisations	+	++	+++	+++	+++	++	++
*érosion	++	+	+++	+	+++	+++	++
*termitières	+	+++	++	+	0	0	0

Intensité ou présence : 0 = nulle ou très faible + = faible

++ = moyenne +++ = forte

Sept unités ont été définies. Leurs principales caractéristiques sont présentées au tableau ci-dessus. Nous y ajoutons certaines remarques.

Unité n° 1 : cuirasse et surfaces gravillonnaires.

Cette unité est celle qui est (à juste titre) la plus délaissée par l'agriculture. Peut-être faut-il voir là la cause d'une végétation relativement dense. C'est en effet dans cette unité que l'on rencontre les arbres les plus hauts, les recrûs ligneux les plus denses et un couvert herbacé assez développé. Les réorganisations superficielles se limitent à la présence d'environ 20% de taches nues gravillonnaires et légèrement pelliculaires. L'érosion, par contre y est assez forte.

Cette unité se localise essentiellement en haut des versants, en positions d'interfluves, et correspond à la présence de cuirasse ou carapace affleurante sous forme de chicots ou plus souvent sub-affleurante.

Unité n° 2 : surfaces à sables grossiers et termitières.

Cette unité se caractérise surtout par la présence d'une forte densité de termitières épigée, facilement reconnaissables sur photographies aériennes. Ces termitières, une fois érodées, laissent des taches nues, indurées et légèrement convexes. Les réorganisations superficielles correspondent à des taches nues pelliculaires (20%) incluant gravillons et sables grossiers. Cette unité se situe généralement à l'aval de la précédente sur des sols peu épais. Peu cultivée, cette unité résiste assez bien à l'érosion.

Unité n° 3 : surfaces à sables grossiers et termitières, très érodées.

Cette unité dérive de la précédente par une dégradation due à une surexploitation culturale. Celle-ci associée à la sécheresse de la dernière décennie a entraîné des dénudations locales du sol, favorisant ainsi des réorganisations superficielles importantes et une érosion intense. Ce type de surface n'est pas sans rappeler celles que l'on rencontre plus au nord en zone sahélienne. Aussi peut-on qualifier ce phénomène de "sahélisation" (cf. interprétations de photographies aériennes de 1956 et de 1980, et pl. photo.n°6)

Unité n° 4 : surfaces pelliculaires sans sables grossiers ni gravillons.

Cette unité correspond sensiblement aux sols ferrugineux tropicaux, traditionnellement cultivés sur ce bassin. Bien que soumis à de fortes réorganisations superficielles lors de la mise en culture (pellicules peu perméables), ils résistent assez bien à l'érosion. Ces sols, plus profonds que ceux des unités précédentes, offrent, très probablement, de meilleures réserves hydriques.

Unité n° 5 : surfaces érodées à sables grossiers, sans termitières.

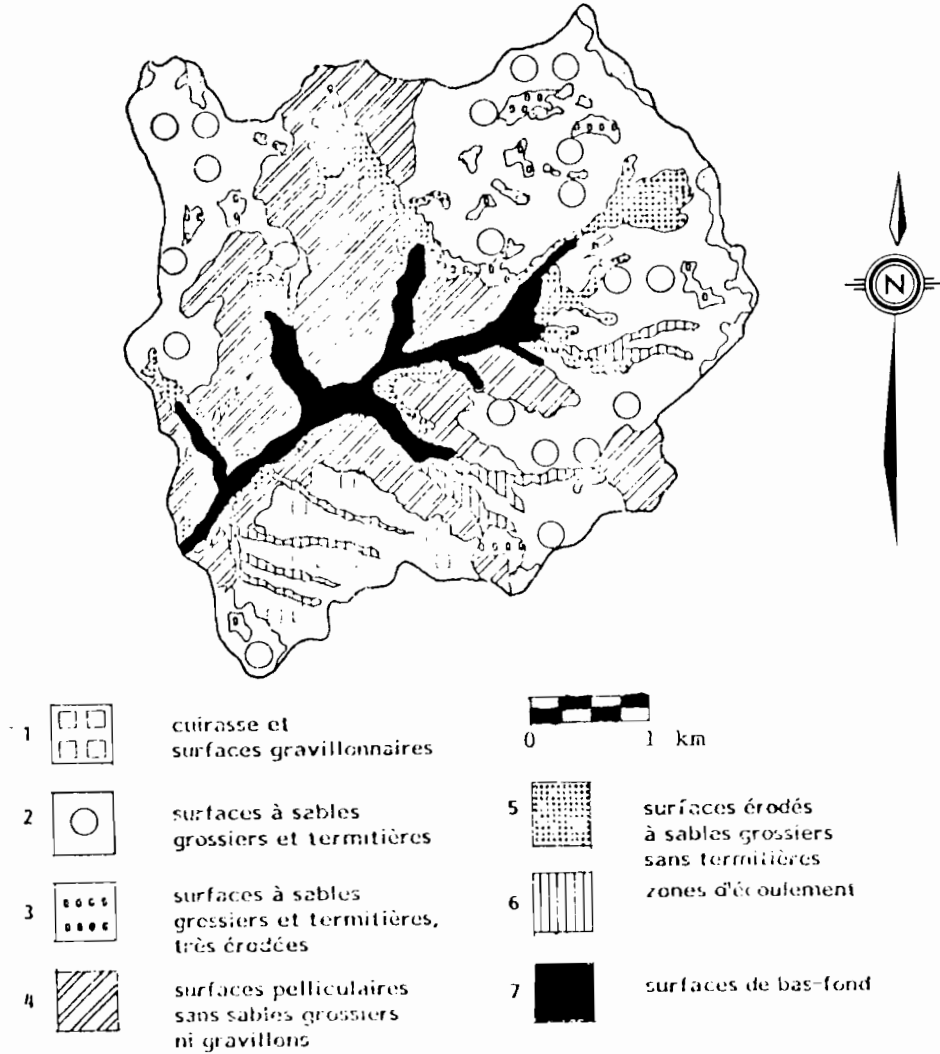
Il s'agit de l'unité la plus dénudée. L'herbe y est rare du fait du pâturage quand elle n'est pas absente. Cette unité correspond à plusieurs zones très dégradées par l'érosion : pente de raccord aux marigots, proximité des villages et campements, champs en pente ... Elle se distingue de l'unité 3 par l'absence de termitières.

Unité n° 6 : zones d'écoulement.

Il s'agit des surfaces qui, sans être le bas-fond, correspondent à des zones d'écoulement de l'eau. La végétation y est peu développée. Les surfaces présentent des pellicules, et des indices d'hydromorphie. L'érosion y est surtout linéaire. Ces surfaces se localisent surtout en rive gauche et sont peu cultivées.

Unité n° 7 : bas-fond.

La végétation se résume à une ligne d'arbres, assez dense, le long du marigot. Les surfaces hydromorphes présentent des variations latérales entre taches nues et zones à recouvrements sableux peu épais (1 cm). L'érosion y est moyennement marquée.



d'après VALENTIN (1985)

Références bibliographiques

VALENTIN C., 1981 - Esquisse au 1/25000ème des différenciations morpho-structurales de la surface des sols d'un petit bassin versant sahélien (POLAKA-OURSI Nord de la HAUTE-VOLTA). ORSTOM, ABIDJAN, 11 p.

VALENTIN C., 1985 - Différencier les milieux selon leur aptitude au ruissellement : une cartographie adaptée aux besoins hydrologiques. *Journées hydrologiques de l'ORSTOM à MONTPELLIER (17-18 septembre 1985). Colloques et séminaires*. Ed. ORSTOM. pp. 50-74.

**ANNEXE N° 7 - AJUSTEMENT DU MODELE SIMULATEUR SUR LES PRINCIPALES CRUES
OBSERVEES DANS LA PERIODE RECENTE**

BASSIN 1 pour bassin versant de BINNDE

2 pour bassin versant de KAZANGA

3 pour bassin versant de KUO

4 pour bassin versant de KOGNERE

5 pour bassin versant de GAGARA-OUEST

6 pour bassin versant de GAGARA-EST

Lro : Lame ruisselée observée sur le bassin (mm)

Lrs : Lame ruisselée reconstituée à partir de la fonction de production du bassin (mm)

A et B : Coefficient de la fonction de calage

Lrc : Lame ruisselée calculée par le modèle (mm)

DLR : $|Lrc - Lro|$

AJUSTEMENT DU MODELE SIMULATEUR

OBS	BASSIN	LRO	LRS	A	B	LRC	DLR
1	1	9.4	8.1	1.39	0.0	11.259	1.859
2	1	1.5	3.2	1.39	0.0	4.448	2.948
3	1	8.5	4.4	1.39	0.0	6.116	2.384
4	1	1.7	2.4	1.39	0.0	3.336	1.636
5	1	3.6	1.9	1.39	0.0	2.641	0.959
6	1	2.0	1.1	1.39	0.0	1.529	0.471
7	1	1.2	1.4	1.39	0.0	1.946	0.746
8	1	1.0	0.6	1.39	0.0	0.834	0.166
9	1	1.7	0.8	1.39	0.0	1.112	0.588
10	1	1.8	0.5	1.39	0.0	0.695	1.105
11	1	1.8	1.0	1.39	0.0	1.390	0.410
12	1	2.0	0.9	1.39	0.0	1.251	0.749
13	1	7.3	5.4	1.39	0.0	7.506	0.206
14	1	4.6	3.4	1.39	0.0	4.726	0.126
15	1	9.2	7.0	1.39	0.0	9.730	0.530
16	1	2.3	0.1	1.39	0.0	0.139	2.161
17	1	6.1	3.5	1.39	0.0	4.865	1.235
18	1	5.1	1.9	1.39	0.0	2.641	2.459
19	1	3.3	3.7	1.39	0.0	5.143	1.843
20	1	3.0	0.8	1.39	0.0	1.112	1.888
21	1	4.1	1.0	1.39	0.0	1.390	2.710
22	1	1.6	0.6	1.39	0.0	0.834	0.766
23	1	4.2	2.2	1.39	0.0	3.058	1.142
24	2	4.8	5.8	1.10	0.0	6.380	1.580
25	2	1.4	2.7	1.10	0.0	2.970	1.570
26	2	8.9	10.5	1.10	0.0	11.550	2.650
27	2	3.5	1.1	1.10	0.0	1.210	2.290
28	2	5.6	3.9	1.10	0.0	4.290	1.310
29	2	1.2	2.3	1.10	0.0	2.530	1.330
30	2	7.5	4.7	1.10	0.0	5.170	2.330
31	2	1.9	1.3	1.10	0.0	1.430	0.470
32	2	5.5	6.5	1.10	0.0	7.150	1.650
33	2	7.0	6.4	1.10	0.0	7.040	0.040
34	2	1.3	1.2	1.10	0.0	1.320	0.020
35	2	2.3	3.0	1.10	0.0	3.300	1.000
36	2	2.8	5.1	1.10	0.0	5.610	2.810
37	3	6.5	27.7	0.44	-5.5	6.688	0.188
38	3	8.1	28.5	0.44	-5.5	7.040	1.060
39	3	6.8	20.5	0.44	-5.5	3.520	3.280
40	3	2.1	19.1	0.44	-5.5	2.904	0.804
41	3	6.8	27.9	0.44	-5.5	6.776	0.024
42	3	14.5	46.3	0.44	-5.5	14.872	0.372
43	3	2.1	16.7	0.44	-5.5	1.848	0.252
44	3	5.1	21.7	0.44	-5.5	4.048	1.052
45	4	9.9	20.3	0.60	-2.3	9.880	0.020
46	4	3.4	12.2	0.60	-2.3	5.020	1.620
47	4	1.6	8.8	0.60	-2.3	2.980	1.380
48	4	1.8	13.6	0.60	-2.3	5.860	4.060
49	4	1.4	7.8	0.60	-2.3	2.380	0.980
50	5	3.3	5.6	0.80	0.0	4.480	1.180
51	5	2.5	1.6	0.80	0.0	1.280	1.220
52	5	1.9	3.2	0.80	0.0	2.560	0.660
53	5	1.4	0.7	0.80	0.0	0.560	0.840
54	5	2.0	6.1	0.80	0.0	4.880	2.880
55	5	6.1	6.1	0.80	0.0	4.880	1.220

AJUSTEMENT DU MODELE SIMULATEUR

OBS	BASSIN	LRO	LRS	A	B	LRC	DLR
56	5	3.4	2.7	0.80	0	2.160	1.240
57	5	2.5	2.6	0.80	0	2.080	0.420
58	5	11.2	10.9	0.80	0	8.720	2.480
59	5	6.3	12.0	0.80	0	9.600	3.300
60	6	1.3	4.0	0.66	0	2.640	1.340
61	6	2.8	2.7	0.66	0	1.782	1.018
62	6	4.6	3.5	0.66	0	2.310	2.290
63	6	2.5	4.6	0.66	0	3.036	0.536
64	6	1.2	0.4	0.66	0	0.264	0.936
65	6	3.6	5.0	0.66	0	3.300	0.300
66	6	2.8	2.0	0.66	0	1.320	1.480
67	6	1.5	1.8	0.66	0	1.188	0.312
68	6	6.3	12.2	0.66	0	8.052	1.752
69	6	7.9	9.6	0.66	0	6.336	1.564

TABLEAU 1 SUITE

ANNEXE N° 8 - LE MODELE A DISCRETISATION SPATIALE

1. Généralités sur le modèle

La première étape de la discrétisation spatiale est la représentation du bassin versant sous la forme d'une partition de carreaux dont la taille est adaptée à la morphologie et à la physiologie du bassin. Ces carreaux peuvent être, divisés en 4, 16 ou 64 sous carreaux pour préciser certains aspects caractéristiques du bassin.

Sur cet ensemble de carreaux représentatifs du système hydrologique les auteurs de ce modèle définissent cinq fonctions interconnectées qui modélisent le cycle de l'eau.

- Une *fonction d'entrée* représente les apports au système (précipitations surtout, mais aussi éventuellement, apports extérieurs de débits de surface ou souterrain).

- Une *fonction de production*, pour un état de surface donné du sol, définit les termes du bilan hydrique, c'est-à-dire, la répartition des apports entre l'évapotranspiration, le ruissellement et l'infiltration.

- Une *fonction de transfert de surface* définit les conditions de passage d'un carreau au suivant de l'écoulement de surface obtenu par la fonction de production. Elle nécessite la discrétisation de la topographie par carreau.

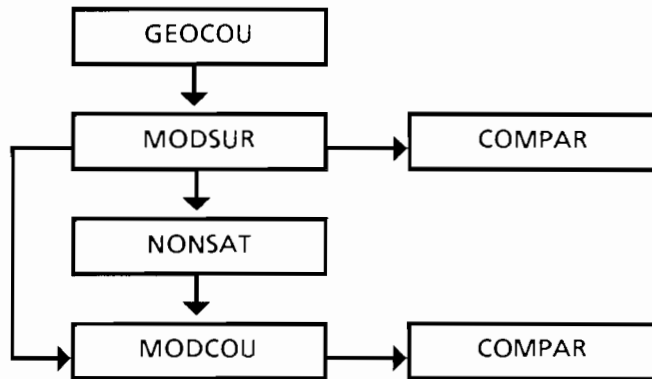
- Une *fonction de transfert souterrain* définit les conditions de passage d'un carreau au suivant des volumes d'eau stockés ou transitant dans la zone souterraine.

- Une *fonction d'échange surface - souterrain* établit les conditions d'échanges réciproques dans la "zone tampon" entre les écoulements de surface et les écoulements souterrains.

Ces cinq fonctions doivent être parfaitement définies spatialement et temporellement (choix d'un pas de temps et de maille compatibles avec le problème à résoudre).

2. Organisation du "modèle couplé."

Le "modèle couplé" (GIRARD, LEDOUX, VILLENEUVE, 1981) est constitué de cinq modules organisés de la manière suivante :



Le programme GEOCOU fait la discrétisation géographique du système hydrologique et organise les mailles entre elles.

Le programme MODSUR à partir de la fonction de production évalue la répartition des apports entre ruissellement et infiltration.

Le programme NONSAT assure le transfert entre la surface et la nappe.

Le programme MODCOU établit le bilan hydrologique complet.

Le programme COMPAR compare les résultats obtenus par la simulation et les résultats observés sur une période dont les données de base ont servi au calage du modèle.

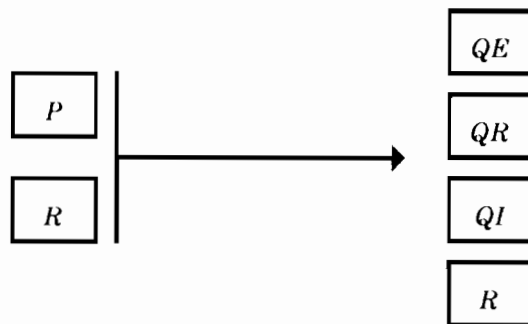
Dans l'étude des bassins versants de GAGARA et dans celle du bassin versant de POLAKA. Seuls les modules GEOCOU, MODSUR et COMPAR ont été utilisés. En effet, sur ces bassins les débits enregistrés à l'exutoire sont dûs exclusivement au ruissellement. Les relations entre la nappe alluviale et le débit de la rivière n'intéressent qu'une partie assez négligeable de l'hydrogramme. Le pas de temps de calcul choisi est de 36 minutes ($= 1/40$ jour), il correspond à une durée suffisamment courte pour simuler des crues qui durent en moyenne une douzaine d'heures, mais un peu longue pour simuler la montée (2 à 3 heures).

3. La fonction de production de surface utilisant les résultats de la simulation de pluie (CHEVALLIER et al 1985).

GIRARD et al utilisent une fonction de production qui tente d'approcher le plus près possible les mécanismes du cycle de l'eau. Cette méthode met en oeuvre une série de réservoirs qui se vident les uns dans les autres. La fonction de production est définie par des lois de vidange dont les paramètres sont calés sur les observations. Elle donne la priorité à l'infiltration, le volume ruisselé est par conséquent la différence entre la pluie d'une part l'infiltration, le stockage, l'évaporation d'autre part.

CHEVALLIER a mis au point une fonction de production donnant la priorité au ruissellement et pouvant utiliser directement les relations obtenues sous pluie simulée exprimant la lame ruisselée en fonction de la hauteur de précipitation et l'indice des précipitations antérieures (IK). Cette démarche, de la physique du sol, trouve sa justification dans une zone climatique où le terme majeur du cycle de l'eau n'est pas l'infiltration. CHEVALLIER propose l'organisation de la fonction de production suivant le modèle décrit ci-dessous.

- Schéma général de la production.



QI infiltration

P hauteur de précipitation

R stockage superficiel

QE évapotranspiration réelle

QR ruissellement.

L'évapotranspiration réelle est calculée par approximation en prenant pour QE la moitié de l'évapotranspiration potentielle calculée par la formule de PENMAN (in RIOU, 1975)

$$- QE = 0,5 * ETP$$

Cette estimation adoptée par GIRARD pour l'étude de l'Oued GHORFA en MAURITANIE (1975) est communément admise pour le SAHEL par les hydrologues de l'ORSTOM, lorsque les données sont insuffisantes pour mieux faire.

La simulation de pluie permet de construire une équation caractéristique pour une parcelle expérimentale et par extension pour un "thème" de surface.

$$QR = AA * P + AB * IK + AC * P * IK - AD \quad (1)$$

P = hauteur de la précipitation

IK = indice des précipitations antérieures au début de l'averse.

AA AB AC AD sont des constantes caractéristiques.

L'équation (1) est valable pour une averse prise dans son intégralité. Si les pas de temps de calcul utilisés pour la modélisation sont courts, cette équation n'est plus valable puisque la précipitation est à cheval sur deux ou plusieurs pas de temps successifs. Pour résoudre ce problème CHEVALLIER propose la solution suivante :

Pour un état d'humectation donné, la pluie d'imbibition correspond à la valeur de P maximale qui donne un ruissellement nul c'est à dire :

$$PI = (AD - AB * IK) / (AA + AC * IK)$$

Pour la hauteur de précipitation, on se fixe une valeur seuil en dessous de laquelle on considère qu'il n'y a pas de précipitation ou qu'elle est négligeable. Cette valeur permet de fractionner les averses pour un ou plusieurs pas de temps sans précipitation significative. Elle est toujours choisie inférieure à la valeur de la pluie d'imbibition la plus faible pour la durée du pas de temps du calcul.

Pour un pas de temps donné il y a six cas possibles :

- | | |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------|
| 1. P est inférieure au seuil ou nulle : | QR est nul |
| 2. Début d'averse et P est inférieure à la pluie d'imbibition : | QR est nul |
| 3. Début d'averse et P est supérieure à la pluie d'imbibition : | QR est calculé par l'équation 1 |
| 4. Averse en cours et pluie cumulée depuis le début de l'averse inférieure à la pluie d'imbibition : | QR est nul |
| 5. Averse en cours de pluie cumulée qui devient supérieure à la pluie d'imbibition : | QR est calculé par l'équation 1 |
| 6. Averse en cours ayant déjà ruisselé : | QR est calculé par (1) |

Remarque : pour tous les pas de temps l'indice des précipitations antérieures IK qui caractérise les conditions initiales d'humectation conserve la valeur calculée au début du premier pas de temps.

Notons que GIRARD et RODIER (1979) proposaient pour la transposition à des petits pas de temps, une équation de production établie à l'échelle de l'averse légèrement différente de la relation (1).

Pour définir entièrement cette fonction de production, il ne reste plus qu'à donner les relations caractérisant les volumes infiltrés (QI) et le stockage en fin d'averse (Rf).

Si l'on désigne par RP l'ensemble des apports on peut écrire

$$RP : P + R_i$$

P = précipitations

R_i = stockage superficiel au début du calcul.

L'infiltration est limitée par une valeur maximale FN correspondant à la capacité limite d'infiltration pour la durée du pas de temps du calcul.

$$\text{Si } DQI = RP - QR - QE$$

RP = ensemble des apports

QR = volume ruisselé

QE = volume évaporé

$QI = \text{AMIN } 1 (FN, DQI)$

$R_f = \text{AMAX } 1 (0, RP - QR - QE - QI)$

AMIN 1 et AMAX 1 sont les expressions des fonctions valeurs réelles minimales et maximales de deux arguments réels.

4. Application de la télédétection et de la simulation de pluie à la connaissance du fonctionnement hydrologique d'un bassin versant.

Comme nous l'avons vu au chapitre 4.1.1. la réalisation d'une cartographie des états de surfaces nécessite l'intervention d'un pédologue averti et spécialiste des organisations superficielles. Ce travail de cartographie requiert en plus d'une prospection fine sur le terrain, d'une étude d'interprétation assez longue. La télédétection satellitaire apparaît naturellement comme un outil séduisant pour "la constitution d'une base de données d'occupation du sol" (LOINTIER et PIEYNS, 1981). La région sahélienne est particulièrement favorisée pour une telle démarche : très bonne visibilité satellitaire, paysage nettement diversifiable, densité de végétation couvrante faible, implantation humaine très peu dense ...

L'association d'une base de données physiographiques obtenue par télédétection et du modèle à discrétisation spatiale est un procédé déjà connu des hydrologues de l'ORSTOM. GILLE (1985) a utilisé le fichier physiographique des bassins de la MEUSE et de la MOSELLE obtenu à partir du traitement d'image LANDSAT pour modéliser les écoulements de surface de ces bassins. C'est

également le fichier physiographique LANDSAT élaboré par LOINTIER et LORTIC (1986) qui a été utilisé par CHEVALLIER et al (1985) pour modéliser le fonctionnement hydrologique de la mare d'OURSI.

Nous nous servons de ce dernier travail pour la mise en forme des données physiographiques des bassins de GAGARA ; d'autant plus que ces derniers se trouvent sur les mêmes "scènes" LANDSAT que la mare d'OURSI (ces "scènes" LANDSAT couvrent une superficie de 180x180 km centrées sur un point légèrement à l'ouest de la ville de DORI).

4.1. Etablissement du fichier des données physiographiques.

L'image choisie pour établir le fichier des données physiographiques des bassins de GAGARA est la même que celle étudiée dans le cadre de la modélisation de la mare d'OURSI : image du 4 février 1976 disponible à l'atelier de télédétection de l'ORSTOM et sur laquelle 4 canaux radiométriques du MSS (MultiSpectral Scanner) sont disponibles :

- canal 4 de 0,5 à 0,6 micromètres (vert)
- canal 5 de 0,6 à 0,7 micromètres (rouge)
- canal 6 de 0,7 à 0,8 micromètres (infra rouge proche)
- canal 7 de 0,8 à 1,1 micromètres (infra rouge)

Les opérations de traitement d'image ont été réalisées sur un ordinateur spécialisé PERICOLOR 1000 qui possède un certain nombre de fonctions et de séquences préprogrammées pour résoudre les problèmes de l'analyse d'images. Les logiciels utilisés sont ceux que l'Atelier de télédétection de l'ORSTOM a développé.

4.2. Tracé des limites des bassins versants

Ce tracé a été réalisé directement à l'écran sur le PERICOLOR 1000 à l'aide de son système "Track ball" (des marqueurs peuvent être utilisés pour matérialiser des limites quelconques). Il faut cependant noter que le pixel marqué perd sa caractéristique propre. Afin de visualiser les détails du terrain nous avons utilisé la composition colorée classique 4, 5, 7 avec un zoom de deux fois. Une carte des bassins au 50 000ème a servi d'élément de référence.

Une caractéristique du PERICOLOR est de visualiser une image carrée de 256 pixels de côté. Cela signifie que chaque pixel apparaît sous la forme d'un carré. Cette déformation n'est pas trop gênante. Sur l'écran nous obtenons une image des bassins, dont l'échelle est du même ordre de

grandeur que celle de la carte de référence (1/36 000e en horizontal et 1/50 000 en vertical à l'incrément de 1) ; ce qui facilite la comparaison entre carte et écran.

Le tableau ci-dessous compare les surfaces réelles des bassins et celle obtenue par le tracé manuel de l'écran.

Tableau - Surface réelle et surface LANDSAT des bassins versants de GAGARA.

Bassin versant	Nombre de pixels	Surface LANDSAT km ²	Surface réelle km ²
GAGARA EST	7463	32,84	35,00
GAGARA OUEST	5623	24,74	24,30

4.3. Etude des thèmes de surfaces.

Les possibilités de programmation des opérations manuelles du PERICOLOR permettent de faire apparaître rapidement les combinaisons linéaires de canaux et ensuite d'utiliser une procédure LOTERIE (ORSTOM, 1977 et 1978) pour attribuer un thème de surface à un ensemble de pixels. La procédure LOTERIE permet par consultation de la carte vérité terrain et grâce à la connaissance du milieu de classer les pixels en un certain nombre de lots. A chaque pixel est attribué un numéro de lot que l'on peut matérialiser à l'écran par une couleur. En partant de l'hypothèse que les bassins de GAGARA n'avaient pas été cartographiés, nous avons appliqué la même composition de canaux et la même LOTERIE que celles définies pour la mare d'OURSIS.

Références bibliographiques

CHEVALLIER P., CLAUDE J., POUYAUD B., BERNARD A. (1985)

Pluies et crues au SAHEL. Hydrologie de la mare d'OURSIS (BURKINA-FASO). *Travaux et documents n° 150_* ORSTOM PARIS, 251 p.

GILLE E. (1985).

Contribution à l'étude hydrologique des bassins de la MEUSE et de la MOSELLE : problématique de l'utilisation d'un modèle couplé à discrétisation spatiale. *Thèse de docteur de 3ème cycle. Ecole supérieure des Mines de PARIS et Université Pierre et Marie CURIE*, 213 p.

GIRARD G. (1975)

Application du modèle à discrétisation spatiale au bassin versant de l'OUED GHORFA (MAURITANIE). *Cah. ORSTOM, Sér. hydrol.*, vol. XII, n° 3, pp. 167-188.

GIRARD G., LEDOUX E., VILLENEUVE J.P. (1981)

Le modèle couplé. Simulation conjointe des écoulements de surface et des écoulements souterrains dans un système hydrologique. *Cah. ORSTOM, Sér. hydrol.* n° 4. 1981. pp. 151-178.

GIRARD G., RODIER J.A. (1979).

Application de modèles mathématiques déterministes à l'étude des crues et de l'écoulement annuel en zone sahélienne. "The hydrology of areas of low precipitations". *Proceedings of the CANBERRA symp. IAHS-IAHS publ.* n° 128.

LOINTIER M., LORTIC B. (1984).

Mare d'OURSIS (HAUTE-VOLTA). Traitement numérique de la vue LANDSAT du 4 février 1976. *Rapport ORSTOM CAYENNE. Multigr.* 13 p.

LOINTIER H., PIEYNS S. (1981).

Méthodologie de constitution d'une base de données d'occupations du sol par télédétection. *Initiation et documents techniques*, n° 47. ORSTOM PARIS, 85 p.

ORSTOM, télédétection (1977).

Télédétection n° 1 : les satellites d'observations de la terre LANDSAT. *Initiation et documents techniques* n° 34. ORSTOM PARIS, 47 p.

ORSTOM, télédétection (1978).

Télédétection n° 2 : analyse multivariable. Procédure LOTERIE. Application à l'analyse multispectrale en télédétection. *Initiation et documents techniques* n° 35. ORSTOM PARIS, 58 p.

RIOU C. (1975).

La détermination pratique de l'évaporation. Application à l'Afrique centrale. *Mémoires ORSTOM* n° 80 PARIS.

LISTE DES PLANCHES PHOTOGRAPHIQUES

PLANCHE 1	: BASSINS VERSANTS REPRESENTATIFS ET EXPERIMENTAUX	62
PLANCHE 2	: LE MINISIMULATEUR DE PLUIE ORSTOM	88
PLANCHE 3	: ORGANISATION SUPERFICIELLES DES SOLS	108
PLANCHE 4	: FACTEURS EXPLICATIFS DE L'INFILTRATION	154
PLANCHE 5	: UNITES CARTOGRAPHIQUES ; ZONES HOMOGENES PARTICIPANT AU RUISSELLEMENT	203
PLANCHE 6	: SAHELISATION DU B.V. DE KOGNERE	240

LISTE DES FIGURES

- Figure 1 : BURKINA-FASO - Présentation générale
- Figure 2 : BURKINA-FASO - Carte géologique simplifiée
- Figure 3 : BURKINA-FASO - Carte des sols
- Figure 4 : La position du BURKINA-FASO par rapport au F.I.T.
- Figure 5 : Roses des vents à la station climatologique d'OURSI
- Figure 6 : Températures (1961-1970)
- Figure 7 : Stations pluviométriques du BURKINA-FASO
- Figure 8 : Variations des isohyètes 500 et 900 mm au cours des six dernières décennies
- Figure 9 : Moyennes mobiles pondérées: pluviométries annuelles
- Figure 10 : Ajustement de la Loi normale à des pluviométries annuelles
- Figure 11 : BURKINA-FASO - Grandes zones de végétation
- Figure 12 : BURKINA-FASO - Densité de population en 1973
- Figure 13 : Bassins versants testés au simulateur de pluie au BURKINA-FASO
- Figure 14 : Bassins versants testés au simulateur de pluie au BURKINA-FASO
- Figure 15 : Schéma de fonctionnement du simulateur de pluie (version OUAGADOUGOU)
- Figure 16 : Partie mécanique du système d'aspersion - Principe de réglage de l'intensité de pluie
- Figure 17 : Représentation géométrique du mécanisme d'aspersion
- Figure 18 : Système d'arrosage d'une surface au sol
- Figure 19 : Test de la non uniformité de l'arrosage
- Figure 20 : Distribution de l'eau sur la surface au sol
- Figure 21 : BINNDE - Hydrogramme d'une pluie
- Figure 22 : BINNDE, pluie f sur la parcelle 10 - Intensité de la pluie et du ruissellement
- Figure 23 : Bassin de BINNDE - Profils hydriques avant chaque pluie. Parcelle 2 (végétation naturelle)
- Figure 24 : Profils hydriques avant et après une pluie de 96,7 mm sur les parcelles 10 et 11 du bassin de KOGNERE
- Figure 25 : Bassin versant de BINNDE - IK et H_v en fonction de t
- Figure 26 : Bassin versant de MOUDA - Relations pluies simulées-pluies naturelles
- Figure 27 : KOGNERE, site 2 parcelle 7 - Infiltration
- Figure 28 : GAGARA, site 1 parcelle 1 - Infiltration
- Figure 29 : KOGNERE, site 1 parcelle 5 - Infiltration
- Figure 30 : GAGARA, site 3 parcelle 9 - Infiltration

- Figure 31 : Infiltration : variation de la lame infiltrée et de l'intensité d'infiltration en fonction du temps
- Figure 32 : KOGNERE, parcelle 1 : intensité de la pluie-intensité de l'infiltration
- Figure 33 : Modèle de MOREL-SEYTOUX appliqué aux parcelles sous pluies simulées
- Figure 34 : Lames infiltrées reconstituées $LR = F(K, IS, D_2)$
- Figure 35 : AFC : représentation des variables dans le plan des axes 1 (vertical) et 2 (horizontal)
- Figure 36 : ACP avec 30 variables actives : représentation des variables dans le plan des axes 1 (horizontal) et 2 (vertical)
- Figure 37 : ACP des 17 observations "sol nu et cailloux"
- Figure 38 : ACP des 13 observations "culture et traitement standard"
- Figure 39 : ACP des 18 observations "végétation naturelle et brûlis"
- Figure 40 : ACP : représentation de 48 observations identifiées par leur position sur le versant
- Figure 41 : Lame ruisselée en fonction de la pluie pour un IK donné
- Figure 42 : Lame ruisselée en fonction de la pluie et de IK
- Figure 43 : α et β en fonction de P
- Figure 44 : Lames ruisselées reconstituées sur parcelles
- Figure 45 : Lames ruisselées B.V. KAZANGA $LR = F(PM, IK)$
- Figure 46 : NIEBSOBE à KOGNERE - Cotes en fonction du temps
- Figure 47 : Incertitude sur la valeur de a en fonction de Kr
- Figure 48 : Ajustement $LR = f(P)$: B.V. de JALAFANKA
- Figure 49 : Ajustement $LR = f(P)$: B.V. de BINNDE
- Figure 50 : Carte des états de surface des bassins versants de GAGARA
- Figure 51 : Carte des états de surface du bassin versant de KAZANGA
- Figure 52 : Carte des occupations des sols du bassin versant de BINNDE
- Figure 53 : Fonction de calage sur le bassin de BINNDE
- Figure 54 : Ajustement du modèle simulateur sur le bassin de BINNDE
- Figure 55 : Ajustements statistiques sur les DL_2 de 6 bassins
- Figure 56 : Comparaison des résidus sur les reconstitutions : période 82-83 et 63-65
- Figure 57 : Lames ruisselées observées (4 années) lames ruisselées reconstituées (34 années) sur le bassin versant de KAZANGA
- Figure 58 : Comparaison modèle 8 parcelles et modèle 3 parcelles
- Figure 59 : NORD-EST BURKINA-FASO - Situation des bassins versants de la mare d'OURSI et de GAGARA
- Figure 60 : Discrétisation des bassins versants de GAGARA
- Figure 61 : Zones pluviographiques des bassins versants de GAGARA

- Figure 62 : Bassins versants de GAGARA - Différenciations des états de surface à partir de l'image LANDSAT du 4 février 1976
- Figure 63 : GAGARA-EST - Modélisation des écoulements à partir de l'image LANDSAT
- Figure 64 : GAGARA-EST - Modélisation des écoulements à partir de l'image LANDSAT
- Figure 65 : GAGARA-OUEST - Modélisation des écoulements à partir de l'image LANDSAT
- Figure 66 : GAGARA-EST - Prédétermination de la crue d'étude
- Figure 67 : GAGARA-OUEST - Prédétermination de la crue d'étude
- Figure 68 : Bassin de KOGNERE - Comparaison de l'occupation des sols 1956, 1980
- Figure 69 : Bassin de KOGNERE - Comparaison des zones très érodées 1956, 1980
- Figure 70 : Lames ruisselées reconstituées sur le bassin versant de KOGNERE
- Figure 71 : Bassin versant de KAZANGA - Chronique reconstituée des lames ruisselées journalières
- Figure 72 : Bassin versant de KOGNERE - Chronique reconstituée des lames ruisselées journalières
- Figure 73 : Distribution statistique des lames ruisselées sur le bassin versant de KOGNERE
- Figure 74 : Distribution statistique des lames ruisselées sur le bassin versant de KAZANGA

LISTE DES ABREVIATIONS

- [1] ORSTOM - Institut français pour la recherche scientifique pour le développement en coopération
- [2] CIEH - Comité Interafricain d'Etudes Hydrauliques
- [3] ASECNA - Agence pour la SECurité de la Navigation Aérienne
- [4] IGN - Institut Géographique National (FRANCE)
- [5] IGHV - Institut Géographique de HAUTE-VOLTA
- [6] WAMEX - West African Monsoon Experiment
- [7] ETGA - Expérience Tropicale du GARP dans l'Atlantique
- [8] OMM - Organisation Météorologique Mondiale
- [9] UNSO - United Nations Sahelian Office
- [10] SOFITEX - SOciété des Flbres et TEXtiles

LISTE DES TABLEAUX

- Tableau n° 1 - ETP PENMAN $a = 0,05$ et $a = 0,15$
- Tableau n° 2 - Comparaison entre la moyenne mobile et la moyenne interannuelle pour les différentes stations climatologiques
- Tableau n° 3 - Comparaison des pluviométries de la période 1969-1984 à la décennale sèche établie par RODIER (1975).
- Tableau n° 4 - Occurrence des pluies maximales dans la période sèche.
- Tableau n° 5 - Fréquence observée et fréquence espérée.
- Tableau n° 6 - Occurrence des trois pluviométries journalières les plus fortes.
- Tableau n° 7 - Khi carré sur l'ensemble des stations
- Tableau n° 8 - Valeur de la pluie journalière de récurrence décennale estimée par un ajustement de la loi des fuites.
- Tableau n° 9 - Paramètres d'une distribution "Loi des fuites" sur des échantillons glissants de quinze ans avec un pas de cinq ans à la station de OUAGADOUGOU VILLE
- Tableau n° 10 - Ajustement sur des lois de GOODRICH. Relation hauteur durée fréquence à JALAFANKA (OURSI) (CHEVALLIER et al, 1985). Hauteurs en mm.
- Tableau n° 11 - Ajustement sur des lois de GOODRICH. Relation hauteur durée fréquence à OUAGADOUGOU (LE BARBE, 1980) hauteurs en mm.
- Tableau n° 12 - Principales caractéristiques climatiques et physiographiques des bassins versants étudiés.
- Tableau n° 13 - Forme des pluies simulées.
- Tableau n° 14 - Succession des pluies simulées.
- Tableau n° 15 - Parcelle n° 2 bassin de BINNDE
Humidité du sol et lame ruisselée.
- Tableau n° 16 - Profils hydriques avant et après une pluie de 96,7 mm sur les parcelles n° 10 et n° 11 du bassin versant de KOGNERE (BOULSA).
- Tableau n° 17 - BINNDE, écoulements préférentiels dans le sol.
- Tableau n° 18 - KOGNERE parcelle 7 Infiltration Lame infiltrée.
- Tableau n° 19 - Paramètres de l'infiltration.
- Tableau n° 20 a - Paramètres statistiques des variables d'infiltration.
- Tableau n° 20 b - Matrice des corrélations

- Tableau n° 21 - AFC : valeurs propres (valeur triviale : 1000)
- Tableau n° 22 - ACP: valeurs propres avec 30 variables.
- Tableau n° 23 - Reconstitution de lames ruisselées sur 5 parcelles pour deux pluies non utilisées dans l'établissement de la relation Lr, P, IK .
- Tableau n° 24 - Ecoulements mensuels et annuels du bassin de BINNDE.
- Tableau n° 25 - Modules à la station de BINNDE.
- Tableau n° 26 - Débits de pointe.
- Tableau n° 27 - Ecoulements mensuels du bassin de KAZANGA 54,8 km²
- Tableau n° 28 - Débits de pointes observés sur le bassin de KAZANGA
- Tableau n° 29 - Ecoulements mensuels du bassin de KOGNERE 19,8 km²
- Tableau n° 30 - Ecoulement annuel sur le bassin versant de KOGNERE.
- Tableau n° 31 - Débits de pointes à KOGNERE.
- Tableau n° 32 - Ecoulement mensuel et annuel sur le bassin versant de GAGARA OUEST (24,3 km²).
- Tableau n° 33 - Ecoulement mensuel et annuel sur le bassin versant de GAGARA EST (35,0 km²)
- Tableau n° 34 - Bilan annuel de l'écoulement.
- Tableau n° 35 - Lame ruisselée de la crue d'étude
- Tableau n° 36 - Estimation du paramètre "a" sur les deux périodes d'observation.
- Tableau n° 37 - Surfaces élémentaires de l'unité cartographique n°2 à BINNDE
- Tableau n° 38 - Fonction de calage
- Tableau n° 39 - Nombre de paramètres utilisés dans le modèle de reconstitution des lames ruisselées.
- Tableau n° 40 - Bassin de BINNDE : comparaison des reconstitutions sur les périodes 1961-1963 et 1982-1983
- Tableau n° 41 - Bassin de KAZANGA : comparaison sur les périodes 1961-1963 et 1982-1983
- Tableau n° 42 - Comparaison des séries : lames ruisselées calculées et observées sur le bassin de KAZANGA.
- Tableau n° 43 - Paramètres de la fonction de calage sur le bassin de la COMBA.
- Tableau n° 44 - Lame ruisselée de la crue d'étude.
- Tableau n° 45 - Thèmes de surface définis à OURSI (LOINTIER et LORTIC, 1984).
- Tableau n° 46 - Surface des bassins versants de GAGARA (surface réelle et surface discrétisée)

NOTES SUR LE DEBAT DE SOUTENANCE

Première PARTIE : LE MILIEU SOUDANO SAHELIEN ET SON CLIMAT, LE CAS DU BURKINA FASO.
P.23.

J. CLAUDE précise les liens qui existent entre les sols, la géologie et les climats (paléoclimats et climat récent), au BURKINA FASO. A ce sujet, doit être cité l'ouvrage suivant : PION, J.C. (1977). *Altération des massifs cristallins basique en zone tropicale sèche. Etude de quelques toposéquences en Haute Volta. Sciences géologiques mémoire n°57 Université Louis PASTEUR de Strasbourg Institut de géologie.* 220 pp.

Il précise également qu'aurait pu être présentée la géomorphologie des grandes unités du pays et rappelle le travail suivant : JOLY, F., DEWOLF, Y., RIOU, G. (1980) : le bassin de la mare d'OURSI (HAUTE VOLTA). Etude géomorphologique et géodynamique contraintes naturelles. *Université PARIS VII, DGRST, Travaux du laboratoire de géographie physique n°7.*

J. CLAUDE remarque la singularité de la pluviométrie annuelle décennale sèche à la station de MARKOYE (tableau n°3 p. 42). Dans la critique des données pluviométriques, la station de MARKOYE montre des anomalies dues à de mauvaises observations pour quelques périodes. Si cette station a été retenue, c'est qu'elle est la plus septentrionale du pays et la seule typiquement sahélienne, dans l'étude des pluviométries annuelles et journalières les années douteuses ont été supprimées.

Sur l'étude pluviographique page 50, J.P. CARBONNEL regrette qu'une analyse statistique sur l'occurrence de nombre de pluies par jour n'aie pas été réalisée ; celle-ci pour différentes latitudes. En se référant aux travaux sur la pluviographie cités en bibliographie (BRUNET-MORET (1963) LE BARBE (1981) LAHAYE (1980)), les auteurs n'ont pas étudié la répartition des averses en fonction des jours pluvieux. Une étude est en cours à l'ORSTOM à l'occasion de la synthèse des travaux sur l'hydrologie urbaine en Afrique de l'Ouest (BOUVIER). En comparant simplement le nombre de jours de pluie et le nombre d'averses enregistrées à quelques postes caractéristiques, OURSI, NIAMEY, OUAGADOUGOU, il est possible de dire qu'à OURSI et à NIAMEY la probabilité d'avoir plus d'une averse par jour doit être très faible ; elle doit être plus forte à OUAGA Aéro où 1154 averses sont enregistrées entre 1954 et 1977 pour 1068 jours pluvieux soit 1,08 averse par jour en moyenne. Le critère de séparation des averses est une durée de 80 minutes avec une intensité inférieure à 5 mmh⁻¹ les averses de durée inférieure à 5 minutes ne sont pas prises en compte.

Deuxième partie : DISPOSITIFS EXPERIMENTAUX, VARIABLES MESUREES ELABORATION DES DONNEES.

G. DE MARSILY pose deux questions :

- Pourquoi les mesures de l'humidité des sols (p. 96) n'ont-elles pas été plus utilisées dans l'interprétation des données ? Ces mesures n'ont été réalisées que sur un nombre restreint de parcelles. Elles ont permis sur quelques cas de calculer le bilan hydrique de la parcelle. Les différences (tableau n°17) entre infiltration mesurée sur un tube de sonde à neutron et l'infiltration réelle (pluie - lame ruisselée) s'explique par des écoulements rapides suivant des chemins préférentiels à la sub surface. Ces écoulements ont été observés dans une tranchée creusée à 1 m en aval de la parcelle N°2 de BINNDE, ils ont lieu à 40 cm au dessous de la surface. Ce sont des écoulements rapides qui apparaissent en même temps que le ruissellement de surface et atteignent une valeur de 20% de ce dernier.

-L'évaporation ne fait pas partie des variables mesurées dans les protocoles de pluie simulée ou dans les observations de saison des pluies. Au cours de la pluie elle-même la durée expérimentale est trop courte pour que l'évaporation puisse être prise en considération. En climat sahélien, l'évaporation est une grandeur relativement constante d'une année à l'autre pour une même saison. Pour une modélisation, même au pas de temps journalier il est raisonnable d'utiliser les données d'évaporation décadaire moyenne.

R. LETOLLE signale qu'un marquage de l'eau de pluie simulée peut être réalisée à peu de frais avec de l'eau enrichie au deuterium. Il est alors possible de suivre finement les écoulements de subsurface.

Sur l'indice des précipitations antérieures choisi (p. 99) G. DE MARSILY demande si un ajustement du facteur de décroissance exponentielle α pour chaque sol n'aurait pas donné un indice plus représentatif du stock hydrique. Des essais ont été faits dans ce sens, on montre que pour les parcelles sur sol cultivé l'ajustement est meilleur pour une décroissance plus faible de $\alpha = -0,7$ alors que $\alpha = -0,3$ est meilleur pour les sols nus et lisses, sur les parcelles en végétation naturelle on obtient toutes les valeurs possible de α . En prenant $\alpha = -0,5$ pour toutes les parcelles il est possible de comparer leur comportement, pour une majorité de parcelles le choix de α entre $-0,3$ et $-0,7$ ne modifie pas significativement les corrélations. Le choix de cette valeur trouve sa justification dans la comparaison entre la décroissance et l'humidité volumique du sol dans son premier horizon (fig. 25) et celle de l'indice choisi.

Troisième partie : ANALYSE DU RUISSELLEMENT ET DE L'INFILTRATION.

A. CASENAVE fait remarquer que dans le classement des parcelles en 4 sous ensembles quant à la forme de la courbe "lame infiltrée fonction du temps" (page 114) le cas 2 "parcelle sans microrelief, recouverte d'une pellicule imperméable" et le cas 4 "parcelle très imperméable des glacis sahéliens" sont identiques. Ces deux cas ont été distingués pour insister sur cette similitude alors que les sols sont différents, dans le cas n°2 on peut avoir des parcelles sur sable alors que dans le cas n°4 nous nous trouvons sur des sols argileux. Il s'agit de bien montrer que dans cette zone climatique, la surface régit les phénomènes d'infiltration.

Sur les facteurs explicatifs de l'infiltration en milieu sahélien, P. DUBREUIL insiste sur le nombre de variables décrivant la pellicule de battance qui ressortent des analyses des données. Dans cette région, les organisations pelliculaires de surface sont en effet un facteur limitant l'infiltration. Nous remarquons cependant un biais dans cette analyse puisque nous entrons 6 variables pour caractériser ces organisations pelliculaires de surface tandis que la végétation ou l'activité mésofaunique qui sont également des facteurs majeurs pour expliquer l'infiltration ne sont décrits que par 2 variables chacune.

L'équation lame ruisselée en fonction de la pluie et de l'indice des précipitations antérieures
 $Lr = aP + bIK + cP.IK + d$ (p 149).

P. DUBREUIL demande quel est le pourcentage de la variance de Lr expliquée par cette relation. Globalement sur l'ensemble des pluies simulées la variance expliquée est de 82% (figure 44).

P. DUBREUIL demande de préciser l'apport des termes IK et $P.IK$ dans cette régression. Parmi tous les prédicteurs possibles nous avons vu que les prédicteurs relativement indépendants qui donnent le maximum de variance expliquée sont systématiquement P , $P.IK$, IK . Pour les parcelles les plus imperméables IK est parfois $P.IK$ ont un niveau de signification (seuil 5% du test de STUDENT) très faible et sont supprimés dans la relation. La forme des averses simulées ne permet pas de faire ressortir la variable intensité en un temps donné, toutes les averses étant composées des mêmes fréquences.

J. CLAUDE précise que le terme "pluie" multiplié par un "indice de pluie" (L^2) se retrouve dans plusieurs études, en écologie se retrouve ce terme pour le calcul de la biomasse (travaux de M. GROUZIS).

Pour P. HUBERT, cette équation est à rapprocher de celle obtenue par ajustement sur les pluies-lames ruisselées à l'échelle du bassin $Lr = \sqrt{p^2 + a^2} - a$ (p 172). En effet la première équation est

celle d'une hyperboloïde tandis que la seconde celle d'une hyperbole. L'équation $Lr = aP + bIK + cP.IK + d$ est celle de droites dans les plans $P = c^{te}$ ou $IK = c^{te}$ et celle d'hyperboles dans le plan $Lr = c^{te}$. L'équation $Lr = \sqrt{p + a^2} - a$ est celle d'une hyperbole équilatère d'asymptotes $Lr = P - a$ et $Lr = -P - a$

P. DUBREUIL remarque que dans toutes les études de petits bassins versants, les modèles proposés laissent une grande partie de la variance de la lame ruisselée non expliquée. Les variables choisies pour expliquer les variations de la lame ruisselée sur un même bassin sont toujours celles liées à la pluie, hauteur, intensité, indice des précipitations antérieures, hétérogénéité de la pluie sur le bassin versant. D'autres grandeurs varient en fonction du temps sur un bassin : niveau des nappes, stock hydrique dans la zone non saturée, développement de la végétation, de la mésofaune ... Tous ces facteurs ne jouent pas dans le même sens vis à vis du ruissellement. Leur mesure systématique n'est pas aisée. Que devrait-on prendre en compte en plus des variables directement liées à la pluie pour obtenir mieux que 50 à 60% de variance expliquée sur les coefficients de ruissellement ?

Une étude en cours en collaboration entre les hydrologues de l'ORSTOM et les hydromécaniciens de LOUVAIN, montre sur le bassin de TAIMA (100 km²) au sahel, que la fonction de production statistiquement la plus adaptée n'a pas la forme des équations d'infiltration mais une forme similaire à celle définie sur parcelle faisant intervenir de façon linéaire la pluie, un indice de pluie antérieure, et le produit de ces deux grandeurs.

Quatrième PARTIE : DU M2 AU KM2, EXTRAPOLATION AU BASSIN VERSANT DES PARAMETRES HYDROLOGIQUES DEFINIS SUR PARCELLE.

L'ensemble des questions est centré sur la fonction de calage et sur l'utilisation du modèle couplé ORSTOM- ECOLE DES MINES que G. DE MARSILY aurait préféré voir nommé INRS-ORSTOM-ECOLE DES MINES.

Le modèle à discrétisation spatiale, pour sa partie superficielle, a été mis au point par une collaboration INRS-ORSTOM, le modèle souterrain a été créé par l'ECOLE DES MINES. Le couplage surface-souterrain a été réalisé dans le cadre d'une collaboration ORSTOM-ECOLE DES MINES.

La fonction de production du ruissellement pour le bassin (§ 4.1.2.2, p 188) a été critiquée. La composition linéaire des ruissellements provenant de chaque aire participante du bassin néglige la position de ces unités les unes par rapport aux autres et l'interaction qu'une unité peut avoir sur le ruissellement d'une autre unité. On a tenté une modélisation qui s'inspire de celle du ruissellement urbain (LE BARBE, 1981) en considérant 3 classes d'unités (peu perméable,

moyennement perméable et perméable). et leur position par rapport au réseau hydrographique. La fonction de production de chaque unité est calculée à partir de la pluie qu'elle reçoit, plus une partie de l'eau de l'unité amont qui n'a pas été drainée par le réseau moins un stockage. Dans ce modèle deux coefficients supplémentaires par unité sont à calculer par optimisation, le coefficient de stockage de l'unité et le coefficient qui répartit la production entre l'eau directement récupérée par le réseau et celle qui ruisselle sur l'unité aval. On remplace alors la fonction de calage à un paramètre par un calage à 6 paramètres les résultats ne sont pas meilleurs que ceux obtenus avec la fonction de production par combinaison linéaire des ruissellements et le calage sur les mesures observées.

A. CASENAVE compare les résultats de la modélisation des ruissellements par la méthode du modèle INRS-ORSTOM-ECOLE DES MINES à la complexité de sa mise en oeuvre et s'interroge sur le bien fondé de faire appel à de "gros modèles". GIRARD rappelle l'ossature du modèle et explique comment il peut être utilisé avec différents niveaux de complexité. Dans notre cas nous n'avons utilisé que le "modem" de surface. La construction informatique du modèle donne une grande souplesse d'adaptation, il est possible de modifier une partie sans toucher à l'architecture du programme. C'était le seul logiciel à notre disposition où il était possible de changer la partie "production" en conservant la partie "fichier physiographique" et la partie "transfert". La discrétisation en maille de la surface du bassin s'accorde bien avec les techniques de la télédétection qui est une discrétisation à l'échelle du pixel. En partant d'une image satellite, la construction des fichiers "géométrie" et "physiographie" des bassins est assez simple.

Quant aux résultats, leur validité est surtout fonction du but recherché. Pour nous, il s'agit de prédéterminer des crues de fréquence rare. le fait que le modèle reconstitue la forme et le volume des crues avec; certes, une dispersion relativement importante mais sans dérive systématique permet de proposer une "crue d'étude" (crue résultant d'une averse décennale type intervenant sur le bassin, toutes les autres conditions étant moyennes). Nous remarquons également une bonne reconstitution des volumes annuels ruisselés.

DECISION DU JURY.

Titre de Docteur de l'Université de PARIS VI accordé avec la mention très honorable et les félicitations du jury.

TABLE DES MATIERES

RESUME	5
ABSTRACT	6
REMERCIEMENTS	7
SOMMAIRE	11
INTRODUCTION	13
1. CONTEXTE ET HISTORIQUE DE L'ETUDE.	15
2. INTERET DES ETUDES SOUS PLUIE SIMULEE EN HYDROLOGIE.	18
3. OBJECTIFS SCIENTIFIQUES ET FINALITE EN TERME DE DEVELOPPEMENT DES ETUDES SOUS PLUIE SIMULEE EN ZONE SOUDANO SAHELIEENNE.	19
PREMIERE PARTIE	21
LE MILIEU SOUDANO SAHELIEEN ET SON CLIMAT :LE CAS DU BURKINA FASO.	
1.1 SITUATION GENERALE	23
1.2 GEOLOGIE.	25
1.3 LES SOLS.	27
1.4 LE CLIMAT.	29
1.4.1 Les facteurs généraux du climat burkinabé.	29
1.4.2 Les vents.	32
1.4.3 Température et humidité.	34
1.4.4 Evaporation.	35
1.4.5 L'évapotranspiration potentielle. (E.T.P.)	36
1.4.6. Les pluies.	37
1.4.6.1. Les données pluviométriques.	37
1.4.6.2. Les hauteurs pluviométriques annuelles.	38
1.4.6.3. Les hauteurs pluviométriques journalières.	43
1.4.6.4. Pluviomètre à 1 m et pluviomètre au sol.	49
1.4.6.5. Forme des averses.	50
1.4.6.6. Conclusions.	51

1.5. LA VEGETATION.	53
1.6. LES ACTIVITES HUMAINES ET LA TRANSFORMATION DU MILIEU.	56
1.6.1. Les activités humaines.	56
1.6.2. La dégradation du milieu	59
DEUXIEME PARTIE	
DISPOSITIFS EXPERIMENTAUX, VARIABLES MESUREES, ELABORATION DES DONNEES.	65
2.1. CARACTERES CLIMATIQUES PHYSIOGRAPHIQUES DES BASSINS VERSANTS ETUDIES SOUS PLUIES SIMULEES.	67
2.1.1. Les bassins versants sahéliens d'OURSI et de GAGARA.	67
2.1.2. Le bassin versant subsahélien de KOGNERE BOULSA.	69
2.1.3. Les bassins versants emboîtés de BINNDE et KAZANGA de la zone soudanienne.	71
2.1.4. Le bassin sud soudanien du KUO.	71
2.2. LA SIMULATION DE PLUIE ET LA PARCELLE.	74
2.2.1. Le mini-simulateur de pluie, type ORSTOM .	77
2.2.1.1. Description et fonctionnement.	77
2.2.1.2. Calcul théorique de la hauteur d'eau précipitée en chaque point de la parcelle.	79
2.2.2. Les dispositifs de mesures d'humidité.	85
2.3. LE PROTOCOLE DES PLUIES SIMULEES.	90
2.3.1. Forme des pluies et calendrier des mesures.	90
2.3.2. Les paramètres hydrologiques accessibles par la mesure sous pluie simulée.	95
2.3.3. Mesure de l'humidité des sols.	96
2.3.4. Validité des mesures sous pluies simulées.	101
2.4. LES CARACTERISTIQUES PHYSIQUES DE LA PARCELLE.	103

2.4.1.	Les caractéristiques de recouvrement du sol.	103
2.4.2.	Les organisations superficielles du sol.	103
2.4.3.	La description du profil pédologique.	105
2.5.	CONCLUSION.	105
TROISIEME PARTIE : ANALYSE DU RUISSELLEMENT ET DE L'INFILTRATION		111
3.1	ETUDE A L'ECHELLE DE LA PARCELLE.	113
3.1.1.	L'infiltration et les paramètres hydrodynamiques du sol.	113
3.1.1.1.	Parcelle homogène, sans microrelief et avec des réorganisations superficielles faibles ou moyennes.	114
3.1.1.2.	Parcelle sans microrelief, recouverte d'une pellicule imperméable continue.	115
3.1.1.3.	Parcelle hétérogène présentant un microrelief important et des organisations superficielles d'épaisseurs différentes.	117
3.1.1.4.	Parcelle très imperméable à forte réorganisation superficielle, des glaciaires argileux.	118
3.1.1.5.	Interprétation et modélisation.	119
3.1.1.5.1.	Interprétation des observations.	119
3.1.1.5.2.	Modélisation.	123
3.1.2.	Les facteurs explicatifs de l'infiltration en milieu sahélier.	132
3.1.2.1.	Données et méthodes	132
3.1.2.2.	Etudes des corrélations sur les variables hydrologiques.	134
3.1.2.3.	Etudes des corrélations entre les variables physiographiques.	136
3.1.2.4.	Résultats de l'AFC.	136
3.1.2.5.	Résultats de l'ACP.	138
3.1.2.6.	Conclusions.	148
3.1.3.	Le modèle "pluie - lame ruisselée" sur la parcelle.	149
3.1.3.1.	La relation "pluie, lame ruisselée, indice des précipitations antérieures".	149
3.1.3.2.	Validité de la relation entre lame ruisselée, pluie et indice des précipitations antérieures.	151
3.2.	Etude du ruissellement à l'échelle des bassins.	157
3.2.1.	Bassin versant de BINNDE. (9,7 km ²).	157
3.2.2.	Bassin versant de KAZANGA. (54,8 km ²).	162
3.2.3.	Bassin versant de KOGNERE (19,8 km ²).	165

3.2.4. Les bassins versants de GAGARA : GAGARA OUEST (24,3 km ²) et GAGARA EST (35,0 km ²).	167
3.2.5. Comportement moyen des bassins, prédétermination des crues de récurrence décennale et évolution de la perméabilité des bassins.	170
3.2.5.1. Prédétermination de la crue d'étude.	176
3.2.5.2. Evolution dans le temps du comportement moyen des bassins.	175
3.3. CONCLUSION.	176
 QUATRIEME PARTIE	
 DU M² AU KM², EXTRAPOLATION AU BASSIN VERSANT DES PARAMETRES HYDROLOGIQUES DEFINIS SUR PARCELLES .	
4.1 TRANSPOSITION DES RELATIONS PLUIE-LAME RUISSELEE A L'ECHELLE DU BASSIN AU PAS DE TEMPS JOURNALIER.	182
4.1.1. Une cartographie adaptée aux besoins hydrologiques en zone soudano sahélienne.	182
4.1.1.1. Modalités de réalisation.	182
4.1.1.2. Les cartes des états de surface des bassins étudiés.	183
4.1.2. Fonction de production du ruissellement.	186
4.1.2.1. Fonction de production du ruissellement pour une unité cartographique	186
4.1.2.2. Fonction de production du ruissellement pour le bassin.	188
4.1.2.3. Reconstitution des lames ruisselées sur le bassin.	189
4.1.3. Application de ce modèle à l'ensemble des bassins étudiés.	192
4.1.4. Validité et critique de ce modèle.	195
4.1.5. Stabilité de la fonction de calage.	197
4.1.6. Réduction du nombre de paramètres du modèle.	199
4.1.7. Prédétermination de la crue d'étude.	200
4.2. MODELISATION DU RUISSELLEMENT A PETITS PAS DE TEMPS AVEC DISCRETISATION DE ZONES PLUVIOMETRIQUES HOMOGENES..	205
4.2.1. Principaux résultats obtenus sur la mare d'OURSIS : les éléments de la transposition.	207
4.2.2. Application du modèle à discrétisation spatiale aux bassins versants de GAGARA.	208

4.2.2.1. Etablissement du fichier physiographique des bassins.	208
4.2.2.2. Reconstitution des crues.	214
4.2.3. Validité du modèle.	220
4.2.4. Prédétermination de la crue d'étude.	222
4.2.5. Discussion sur l'application du modèle à discrétisation spatiale.	228
4.3. APPLICATION DES TECHNIQUES DE SIMULATION DE PLUIE ET DE CARTOGRAPHIE DES ETATS DE SURFACE A L'ETUDE DES MODIFICATIONS DU COMPORTEMENT HYDROLOGIQUE DES BASSINS VERSANTS EXPERIMENTAUX.	229
4.3.1. Reconstitution des cartes des états de surface.	230
4.3.2. Effets comparés de la modification du régime des pluies et des caractères physiographiques du bassin.	233
4.3.3. Reconstitution d'une chronique de lames ruisselées sur les bassins de KOGNERE et de KAZANGA.	235
4.3.4. Discussion.	238
CONCLUSION GENERALE	243
1. LES THEMES SCIENTIFIQUES ETUDIES.	245
2. APPORTS TECHNOLOGIQUES.	246
3. APPLICATIONS DANS LES ACTIONS DE DEVELOPPEMENT.	247
4. PERSPECTIVES POUR CE PROGRAMME DE RECHERCHES.	248
BIBLIOGRAPHIE	251
ANNEXE N° 1 - LES PARCELLES DE SIMULATION DE PLUIES	277
ANNEXE N° 2 - BASSIN VERSANT DE BINNDE	286
ANNEXE N° 3 - BASSIN VERSANT DE KAZANGA	291
ANNEXE N° 4 - BASSIN VERSANT DE KOGNERE	295
ANNEXE N° 5 - BASSINS VERSANTS DE GAGARA EST ET DE GAGARA OUEST	298
ANNEXE N° 6 - REALISATION DE LA CARTE DES ETATS DE SURFACE	302

ANNEXE N° 7 - AJUSTEMENT DU MODELE SIMULATEUR SUR LES PRINCIPALES CRUES OBSERVEES DANS LA PERIODE RECENTE	310
ANNEXE N° 8 - LE MODELE A DISCRETISATION SPATIALE	313
1. Généralités sur le modèle	313
2. Organisation du "modèle couplé".	313
3. La fonction de production de surface utilisant les résultats de la simulation de pluie	314
4. Application de la télédétection et de la simulation de pluie à la connaissance du fonctionnement hydrologique d'un bassin versant.	317
4.1. Etablissement du fichier des données physiographiques.	318
4.2. Tracé des limites des bassins versants	318
4.3. Etude des thèmes de surfaces.	319
LISTE DES PLANCHES PHOTOGRAPHIQUES	321
LISTE DES FIGURES	322
LISTE DES ABREVIATIONS	325
LISTE DES TABLEAUX	326
NOTES SUR LE DEBAT DE SOUTENANCE	329
TABLE DES MATIERES	334

NOM : ALBERGEL

PRENOM : JEAN

TITRE : **GENESE ET PREDETERMINATION DES CRUES AU BURKINA FASO, du m² au km²
ETUDE DES PARAMETRES HYDROLOGIQUES ET DE LEUR EVOLUTION**

RESUME : Durant quatre années d'expérimentation au BURKINA FASO, huit bassins versants expérimentaux représentatifs de la diversité des conditions écologiques du pays ont été observés. Sur chaque bassin versant, les propriétés hydrodynamiques des sols ont été testées au mini simulateur de pluie. Une étude portant sur les facteurs explicatifs de l'infiltration a mis en relief l'aspect prépondérant des états de surface : couvert végétal, activité de la mésofaune, organisation pelliculaire de l'horizon superficiel du sol. Un modèle de reconstitution des lames ruisselées qui intègre les états de surface et leur caractérisation sous pluie simulée a été mis au point ; il conduit à la détermination des crues de fréquence rare, particulièrement des crues "d'étude", utilisées dans la conception des aménagements. La transposition des caractéristiques hydrologiques d'un bassin "connu" à un bassin "non observé" a été réalisée avec succès en associant à la simulation de pluie deux autres outils récents de l'hydrologie : la télédétection par satellite pour cartographier les états de surface, et le modèle à discrétisation spatiale "ORSTOM ECOLE DES MINES". La comparaison des observations hydrologiques faites dans les années soixante sur ces petits bassins versants aux observations de la période récente a mis en évidence l'augmentation des coefficients de ruissellement pendant la période sèche 1969-1984. La modification du régime hydrologique de ces bassins versants a été rapportée à la sécheresse actuelle et à la dégradation des états de surface. La chronique reconstituée des lames ruisselées de 1930 à 1984 sur deux bassins est tenue pour conforme à la réalité. Son analyse statistique montre que la sécheresse, en favorisant l'extension des zones sans végétation et la formation des pellicules de battance entraîne l'accroissement des coefficients de ruissellement journaliers et annuels.

MOTS CLES : BURKINA FASO ; simulateur de pluie ; bassin représentatif expérimental ; infiltration ; état de surface ; modèle hydrologique ; prédétermination des crues ; sécheresse.