

T D M

TRAVAUX ET DOCUMENTS
MICROFICHÉS

N° 106

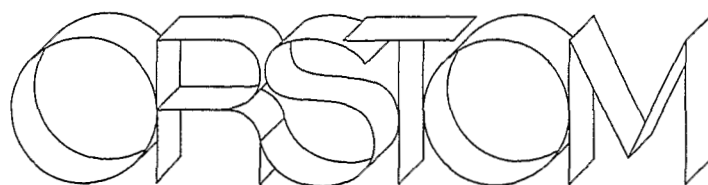
F 3

**STRUCTURE ET FONCTIONNEMENT
EN CRUE D'UN BASSIN VERSANT
SOUDANO-SAHÉLIEN
DANS LE NORD-CAMEROUN
(MOUDA, 18 KM²)**

Jean-Claude
NTONGA

ORSTOM
Éditions

TDM 106



Editions de l'ORSTOM

L'INSTITUT FRANÇAIS DE RECHERCHE SCIENTIFIQUE
POUR LE DÉVELOPPEMENT EN COOPÉRATION

Collection :

Travaux et Documents Microédités

PARIS 1993

ISBN : 2-7099-1174-4

© ORSTOM

F 3

«La loi du 11 mars 1957 n'autorisant, aux termes des alinéas 2
« et 3 de l'article 41, d'une part, que les «copies ou reproductions
« strictement réservées à l'usage privé du copiste et non des-
« tinées à une utilisation collective» et, d'autre part, que les
« analyses et les courtes citations dans un but d'exemple et
« d'illustration, «toute représentation ou reproduction intégrale,
« ou partielle, faite sans le consentement de l'auteur ou de ses
« ayants droit ou ayants cause, est illicite» (alinéa 1er de l'article 40).

« Cette représentation ou reproduction, par quelque procédé
« que ce soit, constituerait donc une contrefaçon sanctionnée par
« les articles 425 et suivants du Code pénal.»

UNIVERSITE DE YAOUNDE 1
UNIVERSITY OF YAOUNDE 1

FACULTE DES SCIENCES
DEPARTEMENT DES SCIENCES DE LA TERRE

**STRUCTURE ET FONCTIONNEMENT EN CRUE
D'UN BASSIN VERSANT SOUDANO-SAHELIE
DANS LE NORD-CAMEROUN (MOUDA, 18 km²)**

THESE

Présentée pour obtenir le grade de
DOCTEUR 3^{ème} CYCLE EN SCIENCES DE LA TERRE
Option : Géologie appliquée
Mention : Hydrologie

Par

NTONGA Jean Claude

Maître ès Sciences, DEA de Géologie appliquée et Ressources en
eau

Soutenue le 2 Juillet 1993 devant le jury composé de :

F.M. TCHOUA, Professeur	Président
P. CARRE, Maître de Recherche à l'ORSTOM	Rapporteur
H.B. DJEUDA TCHAPNGA, Chargé de cours	Examineur
E. NAAH, Maître de Recherche à l'IRGM	Examineur
J.C. OLIVRY, Directeur de Recherche à l'ORSTOM	Rapporteur

A BINDOP Emile Pascal, mon feu père,
à Ngo INAK Sophie, ma mère,
à Pauline, ma femme,
à Gaël, Maxime, mes enfants,
à tous mes parents.

AVANT-PROPOS

Une thèse n'est jamais une entreprise solitaire. La liste des contributions ne peut être exhaustive. Je suis reconnaissant à tous ceux qui de près ou de loin ont apporté leur pierre à ce travail.

Mes remerciements vont d'abord à ceux qui me font l'honneur de juger mon travail.

Le professeur M.F. TCHOUA a bien voulu assurer la co-direction des travaux de la thèse et la présidence du jury, je lui en suis infiniment reconnaissant. Au Département des Sciences de la Terre de la Faculté des Sciences, ses enseignements ont inculqué en moi l'esprit critique et d'observation si utile dans notre domaine de recherche.

Je remercie le D^r H.B. DJEUUDA TCHAPNGA, chargé de cours au Département des Sciences de la Terre de la Faculté des Sciences, d'avoir accepté d'être l'un des membres du jury. Les multiples entretiens que nous avons eus ont été très enrichissants pour ce travail.

Monsieur J.C. OLIVRY, directeur de recherche à l'ORSTOM, connaît tous les méandres de l'hydrologie du Cameroun où il a dirigé le Service Hydrologique (actuel Centre de Recherches Hydrologiques) pendant plusieurs années. Il a accepté de cautionner ce travail et d'en être le co-directeur et l'un des rapporteurs. Sa présence dans le jury me confirme dans mes choix de recherche en hydrologie.

Je remercie tout particulièrement Monsieur E. NAAH, maître de recherche et chef du Centre de Recherches Hydrologiques de l'IRGM, d'être l'un des juges de ce travail. Il m'a accueilli au CRH et m'a initié aux travaux de terrain. Mon premier contact avec l'hydrologie de la zone soudano-sahélienne du Cameroun, ce fut avec lui lors des études sur bassins représentatifs au Nord-Cameroun.

Monsieur P. CARRE, maître de recherche à l'ORSTOM est l'architecte de cette thèse. Il a participé à la mise en place et au suivi du programme pluridisciplinaire ci-dessous cité. Il a mobilisé les moyens financiers et scientifiques

indispensables à tout travail de recherche. Auprès de l'administration de l'ORSTOM il a toujours été l'interlocuteur efficace. Mes trois séjours au Laboratoire d'Hydrologie de Montpellier furent placés sous sa direction scientifique. Sa profonde connaissance de l'hydrologie du Cameroun a été un atout pour ce travail, il a accepté d'en être l'un des rapporteurs. Je suis fier de mériter la confiance de mon maître.

C'est à l'Université de Paris XI (Orsay) que j'ai découvert l'hydrologie scientifique. Je remercie le Professeur J.C. FONTES, directeur du Laboratoire d'Hydrologie et de Géochimie Isotopique à Orsay et coordonnateur des enseignements de DEA d'hydrologie (Orsay/Orstom) d'alors, de m'avoir appris à connaître le cycle de l'eau avec une approche naturaliste aussi bien que déterministe.

Cette thèse est une contribution à un programme de recherches pluridisciplinaires sur la "Conservation des ressources en eau et sol dans le Nord-Cameroun" mené depuis 1983 dans la zone soudano-sahélienne du Cameroun. Les travaux de terrain ont bénéficié d'un financement de l'ORSTOM à la faveur d'une opération de recherche en partenariat ORSTOM/MESIRES (IRGM) intitulée "Etude différenciée du ruissellement et de l'érosion et de leur impact sur le régime hydrique des sols dans la région de Maroua". C'est l'UR 2A (au sein du Département Eaux Continentales de l'ORSTOM) dont J.C. OLIVRY est le responsable qui a servi de cadre d'accueil à cette opération. Grâce à un contrat de formation-insertion, puis à une allocation de recherche ORSTOM, ce mémoire a pu être finalisé. Ce travail est donc le fruit d'une longue et fructueuse coopération entre l'ORSTOM et l'IRGM.

A l'IRGM, structure de recherche nationale qui m'a accueilli à ma sortie de l'Université de Yaoundé, je rends hommage au regretté directeur SOBA DJALLO qui n'a ménagé en son temps aucun effort dans la formation des jeunes chercheurs. A son successeur, G.E. EKODECK, je loue également ce profond désir

de promouvoir la qualité du personnel de la recherche au sein de l'Institut. Je me réjouis des discussions fort intéressantes et constructives que j'ai eues au cours de cette réflexion avec J.P. BOUM, chef adjoint du CRH. Le logiciel TIDHYP (Traitement Informatique des Données Hydro-Pluviométriques) écrit par lui a été d'un apport appréciable pour la modélisation des bassins versants de Mouda.

A l'ORSTOM, je remercie les responsables qui ont d'une manière ou d'une autre facilité mon insertion au sein des structures de recherche. Je pense à P. MATHIEU, alors représentant de l'ORSTOM au Cameroun, il a veillé à la concrétisation de mes deux premiers séjours à Montpellier. Je remercie J. BONVALLOT, actuel représentant de l'ORSTOM au Cameroun, pour toutes les facilités que j'ai eues pour la poursuite de mes travaux.

P. SEYLER, chercheur hydrologue à l'ORSTOM (Mission de Yaoundé) n'a cessé d'avoir une oreille attentive lors de la mise en forme définitive de ce document. Il a toujours trouvé des solutions efficaces et à temps.

Je remercie J. CLAUDE, alors directeur du Centre ORSTOM de Montpellier. A l'occasion d'une mission à Maroua en mars 1989, il a visité nos bassins versants, il m'a encouragé dans l'option d'étude proposée et m'a aidé à monter le projet de recherche en partenariat de l'opération sus-citée. Il a permis ensuite mon intégration dans le Réseau international de Recherche sur la Résistance à la Sécheresse (R3S), étendant par là même le réseau d'échanges d'informations scientifiques de la zone soudano-sahélienne.

Je remercie MM. G. JACCON et M. MOREL directeurs successifs du Laboratoire d'Hydrologie de l'ORSTOM à Montpellier de m'avoir accueilli lors de mes trois séjours au sein de cette structure de recherches.

A la direction générale, M. S. PIEYNS, le responsable d'alors de la MTF (Mission Technique de Formation) s'est toujours employé à nous assurer le maximum de confort et de sécurité.

Ma reconnaissance va ensuite à toute l'équipe de recherches pluridisciplinaires qui a partagé avec moi les longues

missions de terrain. Je pense particulièrement au CRH à B. BEDIANG, A. AYANGMA, H. MVOGO, NKOA FOE, au CNS de Maroua à F. MAINAM, P. DONFACK, D. MASSE, ABDOU MOUSSA. YAO et YALLA, habitants de Mouda, ont été des observateurs de bassin très attentifs à leur tâche, je leur en remercie.

J'ai bénéficié des conseils et des encouragements de H. MOUKOURI-KUOH, pédologue/IRA, R. PONTANIER pédologue/ORSTOM, C. FLORET, phyto-écologue/CNRS tous membres du programme pluridisciplinaire.

Au laboratoire d'hydrologie de Montpellier, j'ai eu des encouragements des amis : G. MAHE, A. LARAQUE, N'GOLONA NGOUNDOUL, Y. ARNAUD ..., qui étaient engagés dans la même voie que moi.

J.C. KLEIN et J. LERIQUE ont accepté de partager leurs bureaux lors de mes séjours au laboratoire, je leur en suis infiniment reconnaissant.

Je remercie H. LUBES d'avoir éclairé ma voie dans la modélisation du bassin de Mouda. Y. L'HOTE a accepté de lire et de corriger une partie de ce travail, je lui témoigne ma profonde gratitude.

J.P. DEBUICHE et J.M. SULLIVAN de l'Unité de Cartographie du Laboratoire ont réalisé certains montages du document.

SEINY BOUKAR alors chef de l'antenne du CNS de l'IRA à Maroua, m'a offert toutes les facilités de travail sur le terrain quand le plus souvent je me trouvais en difficultés. Loin d'être considérée uniquement comme l'expression de l'amitié qui nous lie, cette coopération entre différents acteurs nationaux de la recherche est à encourager.

NKOA FOE, dessinateur au CRH a réalisé le montage de la plus grande partie des tableaux et figures de cet ouvrage. Son dévouement sans pareil par ces moments difficiles que connaissent les structures de la recherche, a été d'un apport décisif pour ce travail, qu'il trouve ici l'expression de ma profonde gratitude.

RESUME

Un ensemble de cinq bassins versants emboîtés (superficie de 2,5 à 18,1 km²) a été suivi pendant trois années complètes dans la zone soudano-sahélienne du Nord-Cameroun.

Des observations fines tant sur les principaux termes du bilan hydrique (précipitations, écoulements) que sur le milieu naturel (sols, végétation et états de surface) ont permis de mettre en évidence les différences de comportement des unités identifiées.

Le fonctionnement hydrodynamique dominant est de type superficiel (ruissellement rapide de surface prépondérant par rapport aux autres types d'écoulement tels que l'écoulement de sub-surface, vidange de nappe ...).

Un modèle distribué par événement "averse-crue" est utilisé et améliore la compréhension des mécanismes de production du ruissellement lors des crues à l'exutoire de 18,1 km².

MOTS CLES

Soudano-sahélien

Etat de surface

Bassin versant représentatif

Averse-Crue

Processus d'écoulement

Modèle pluie-débit

ABSTRACT

The principal components of the water balance (rainfall and runoff) have been measured during three years in five watersheds of an area between 2,5 and 18,1 km² located in the sudano-sahelian zone of the North Cameroon.

The differences in behaviour of the identified units are shown by the hydrological results and the characteristics of the natural environment (soil, vegetation and surface features).

The surface runoff, more than the others forms of flows as subsurface runoff and groundwater, contributes greatly to the total flow.

A distributed model is applied to each storm-flood event and enhances an understanding of the runoff mechanisms during floods at the catchment outlet of 18,1 km².

KEY WORDS

Sudano-sahelian

Surface feature

Representative catchment

Storm-Flood

Flow process

Rainfall-Runoff modelling

SOMMAIRE

INTRODUCTION	9
Chapitre 1 : CARACTERISTIQUES DU MILIEU NATUREL	
1.1 : Description géographique de la région	17
1.2 : Traits du climat	19
1.3 : Géologie et géomorphologie	48
1.4 : Sols et végétation	51
1.5 : Grands ensembles hydrographiques	54
Chapitre 2 : IDENTIFICATION ET ETUDE DES MODELES DE FONCTIONNEMENT HYDROLOGIQUE (HYDRO-SEQUENCES) DANS LES BASSINS VERSANTS DE MOUDA	
2.1 : Problématique	64
2.2 : Méthodes d'identification	65
2.3 : Principales caractéristiques pédologiques et états de surface des milieux étudiés	70
2.4 : Etude des modèles de fonctionnement hydrologique dans le bassin de Mouda	81
2.5 : Conclusions	111
Chapitre 3 : FONCTIONNEMENT HYDROLOGIQUE DU SYSTEME DE MOUDA ET MODELISATION	
3.1 : Introduction	116
3.2 : Système hydrologique de Mouda : apports et crues	117
3.3 : Fonctionnement hydrologique du système de Mouda	128
3.4 : Modélisation	131
CONCLUSION	185
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	190
TABLE DES MATIERES	203
LISTE DES FIGURES	208
LISTE DES TABLEAUX	212
ANNEXES	215

INTRODUCTION

Le contexte scientifique régional

Ce travail veut apporter sa "pierre" à la construction d'une hydrologie scientifique "camerounaise", entamée depuis un demi-siècle avec l'ouverture de stations d'observations des régimes des pluies et des rivières, et l'identification, par la statistique descriptive, des situations moyennes et de leur dispersion "ordinaire", objets de la première demande des aménagistes.

Mais les deux dernières décennies, avec une évolution marquée des hydro-climats et souvent des milieux de la zone soudano-sahélienne, ont attiré l'attention sur le caractère non stationnaire de la plupart des régimes fluvio-climatiques de l'Afrique Atlantique. Une revue récente en a été faite par Mahé, G. (1992).

Ce constat conduit à rappeler que l'évaluation hydrologique des milieux naturels ne saurait être complète en l'absence de progrès dans l'analyse du fonctionnement dynamique des éléments composant les systèmes hydrologiques, c'est à dire en l'absence de progrès dans la Recherche hydro-écologique.

En effet c'est seulement en identifiant mieux les liaisons pluie-débit-environnement, à l'intérieur de systèmes d'eau structurés au préalable, que l'on pourra : modifier les régimes dans le sens souhaité, préciser les règles de transfert des résultats hydrologiques aux bassins non instrumentés, prévoir les résultats de modifications extrêmes, localiser l'apparition des pollutions et modéliser leur propagation.

A cet égard, les perspectives ouvertes par les premières études sur petits bassins en Afrique de l'Ouest et au Nord-Cameroun, ont sans doute été limitées par un suivi insuffisant de l'environnement; c'est ce qui ressort d'un article d'Olivry, J.C. (1986).

Contribuer à faire progresser l'analyse et la simulation du fonctionnement des hydro-systèmes superficiels, telle est donc une ambition prioritaire du Centre de Recherches Hydrologiques (CRH) de Yaoundé. Celle-ci s'est manifestée à l'occasion de sa participation, dès 1983, à un programme de recherches

pluridisciplinaires de conservation des eaux et du sol, associant Hydrologues, Pédologues, Phyto-écologues du MESIRES (Ministère de l'Enseignement Supérieur, de l'Informatique et de la Recherche Scientifique du Cameroun) avec ceux de l'ORSTOM et du CNRS (France).

Certains travaux de même ambition thématique, appuyés sur la pluridisciplinarité pour la reconnaissance du milieu, ont été réalisés à la même époque sous les mêmes latitudes (zone sahélo-soudanienne) en Afrique de l'Ouest inter-tropicale. On peut citer, sans être exhaustif, de récents travaux de l'ORSTOM : Rodier, J. (1992); Chevallier, P. et al. (1985, 1990); Albergel, J. et al. (1987); Casenave, A. et Valentin, C. (1985, 1988).

Au Nord-Cameroun, les études ont été conduites au piémont oriental des Monts Mandara, dans un paysage peu représenté en Afrique de l'Ouest, celui des grands glacis dominés par les vertisols à fentes de dessiccation (argiles "smectiques" ou gonflantes, à forte proportion de montmorillonite) de la cuvette tchadienne.

Le bassin de Mouda (18 km^2), assez représentatif de l'environnement sahélo-soudanien anthropisé des glacis "vertisoliques" de la région de Maroua, a été retenu comme zone-test pour les observations communes aux trois disciplines.

Le milieu d'étude, et sa dynamique récente

Les plaines du piémont oriental des Monts Mandara sont situées dans la partie sahélo-soudanienne du Cameroun (du 9ème au 13ème parallèle Nord).

A la fin de la période coloniale, et malgré l'amélioration des conditions de sécurité dans la plaine, les massifs et les bordures des Mandara constituaient l'essentiel des espaces anthropisés. Aux fortes concentrations humaines des montagnes, de densité supérieure à $200 \text{ habitants au km}^2$ (Boutrais, 1973),

s'opposaient dans les plaines voisines les densités les plus faibles du Cameroun.

On ne s'aventurait dans la plaine inhabitée, la "brousse", que pour la coupe du bois ou bien le ramassage de l'herbe destinée au bétail en saison des pluies, de la paille pour les toits des cases en saison sèche ...

La rudesse du milieu montagnard et la recherche de meilleures conditions d'existence ont entraîné, à partir des années soixante, un flux migratoire important vers les plaines voisines : Boutrais, J. (1973) rapporte que sur 150.000 montagnards d'origine, plus de la moitié colonisaient déjà la plaine en 1970.

Dans le contexte socio-économique de la plaine (pratique du métayage), et des sécheresses récentes, les conséquences écologiques de cette anthropisation brutale, plus soucieuse "d'utilisation" que de "gestion durable", peuvent être considérées comme négatives. Ce sont en particulier : l'appauvrissement des sols et de la végétation arborée, la disparition des espèces herbacées pérennes, et donc l'augmentation du ruissellement et de l'agressivité de l'érosion.

Ces conséquences néfastes s'ajoutent aux traces de dégradation liées aux occupations humaines plus anciennes, voire préhistoriques.

Dans les plaines, les conditions d'existence sont devenues de plus en plus précaires : l'agriculture, la production de bois de chauffage, l'élevage et dans une moindre mesure la pêche, principales activités socio-économiques de la plaine sont largement tributaires du milieu et de son évolution.

C'est ce contexte, de modification de l'équilibre biologique des terroirs de la plaine, qui a été à l'origine du programme de recherches pluridisciplinaires évoqué plus haut.

Le programme pluridisciplinaire de Recherches

Les actions de recherche conduites avaient pour finalités la conservation des ressources du milieu dans le cadre de l'aménagement agro-sylvo-pastoral. Les études ont porté en même temps sur :

(i) la caractérisation et la cartographie des systèmes écologiques d'une zone test, permettant de préciser la distribution spatiale et l'utilisation des ressources d'un terroir, ainsi que la dynamique actuelle du milieu face à certaines perturbations;

(ii) le cycle de vie des espèces végétales spontanées en relation avec le partage de la ressource hydrique du sol sur les principaux types de milieu de la région de Mouda;

(iii) la caractérisation et la quantification, à différentes échelles d'espace et de temps, du ruissellement et des pertes en sol dans les principaux systèmes écologiques. Un accent particulier a été mis sur les facteurs conditionnels de ces phénomènes et les problèmes de transfert d'échelle.

Pour chaque action de recherche et pour le terroir de Mouda, l'approche pluridisciplinaire (hydrologie, pédologie, phyto-écologie) aussi intégrée que possible au niveau de la mini-parcelle de un mètre carré de surface, a facilité le recueil d'un maximum d'informations sur l'état et la dynamique des principaux milieux. Cette démarche a permis de préciser plus rapidement les interprétations et les modèles.

Les volets pédologie et phyto-écologie, visant l'identification des différents systèmes écologiques, se sont intéressés à la caractérisation des sols et de la couverture végétale, et à l'étude des relations sol/eau et plante/eau : voir CNRS, IRA, IRGM, ORSTOM (1988) dans un rapport de recherche à la CEE, puis Sèyni-Boukar, L. (1990), Seghieri, J. (1990). Plus récemment Massé, D. (1991) a traité dans sa thèse de la régénération du comportement hydrique des vertisols dégradés.

Alors que les réflexions des pédologues et des phyto-écologues étaient appuyées sur des observations à l'échelle des

parcelles, le projet et les travaux du centre de Recherches Hydrologiques (CRH) de l'IRGM concernaient l'analyse et le fonctionnement en crue de l'ensemble de l'hydro-système de Mouda (18 km²), associés à une interprétation hydrologique de l'environnement dans les sous-ensembles contributifs. Il s'agissait à plus long terme de permettre la simulation de scénarii "distribués" de fonctionnements hydrologiques pour l'évaluation des effets d'aménagement (mise en culture, constitution de réserves de biefs, rectifications de lits...). Le CRH appuyait donc, par son matériel et ses personnels, les observations hydro-géodynamiques (en régime de pluie naturelle ou simulée) sur mini-parcelles représentatives d'unité-sol typique, mais progressivement développait les travaux hydro-pluviométriques sur des versants types (échelle de l'hectare) : en plus des observations sur le bassin de 18 km², deux fonctionnaient en 1985, illustrant des comportements extrêmes (très favorable et très défavorable) du point de vue du ruissellement.

Dès 1987, un modèle global d'écoulement volumique par averse était proposé par Thébé, B. (1987). La contribution relative de chaque type de sol représenté sur le bassin était évaluée à partir des réactions respectives des parcelles représentatives sous pluies simulées, exprimées au préalable en fonction de la pluie. L'ensemble des contributions volumiques était pondéré par un coefficient d'ajustement unique sur l'année hydrologique et l'ensemble du bassin. Des chroniques d'écoulement, issues d'un bassin de Mouda supposé "stable", étaient enfin proposées, année par année, à partir des observations pluviométriques de longue durée à la station synoptique de Maroua-Salak.

L'objet étudié et l'objectif proposé

L'étude concerne les hydrogrammes de crue observés à Miyamloa, l'exutoire du bassin de Mouda.

En référence à ce qui a été dit plus haut sur les intentions "hydrologiques" du programme pluridisciplinaire, l'objectif

est de proposer, par événement, un modèle pluie-débit distribué des crues les plus fréquentes, et non des seules crues exceptionnelles.

Pour cela, à partir de l'ensemble des observations et en particulier les plus récentes sur l'hydro-pluviométrie de quatre sous-bassins, nous montrerons que les différentes contributions rapides à l'écoulement se font principalement suivant la voie superficielle, par ruissellement quasi-immédiat sur des espaces importants puis acheminement par tronçons successifs, à l'occasion d'événements averses-crues. Toujours à partir des observations, nous aurons à construire la structure du modèle, en accord :

- d'un côté avec les contributions potentielles de chaque élément, que l'on comparera avec le volume observé à l'exutoire pour en assurer la signification.

- mais aussi avec l'organisation, et les caractéristiques hydrauliques de propagation du chevelu hydrographique. On envisagera la croissance de la vitesse moyenne de propagation avec le débit.

La première partie de ce travail situe notre zone d'étude dans le contexte physique général de la frange sahélo-soudanienne du Cameroun. Après l'identification et la caractérisation des différentes organisations "hydrodynamiques" dans la deuxième partie, nous abordons dans la troisième partie le problème du transfert et de la composition des écoulements à l'exutoire, tout en tenant compte des spécificités de chaque sous-bassin.

CHAPITRE 1

CARACTERISTIQUES DU MILIEU NATUREL

1.1. DESCRIPTION GEOGRAPHIQUE DE LA REGION.

La région du Nord-Cameroun, qui regroupe administrativement trois provinces (Adamaoua, Nord, Extrême-Nord), s'étend depuis les hautes terres de l'Adamaoua jusqu'au Lac Tchad.

Comprise entre les 8ème et 13ème parallèles Nord, elle est soumise au climat tropical à deux saisons très contrastées. Les différentes nuances climatiques à l'intérieur de cette zone doivent leurs traits aux conditions géographiques et surtout à la latitude (Suchel, 1972). Ainsi se juxtaposent du Nord au Sud du Nord-Cameroun des nuances allant du type sahélien au type soudanien humide avec des variantes de plaine et de plateau.

Mouda et ses environs (cf. carte de situation fig. 1.1), appartiennent au type soudanien à tendance sèche ou plus précisément sahélo-soudanien géographiquement défini par la bande située entre le 10ème et le 11ème parallèle Nord.

Cette bande camerounaise tire la spécificité de ses paysages de deux unités géomorphologiques fort distinctes :

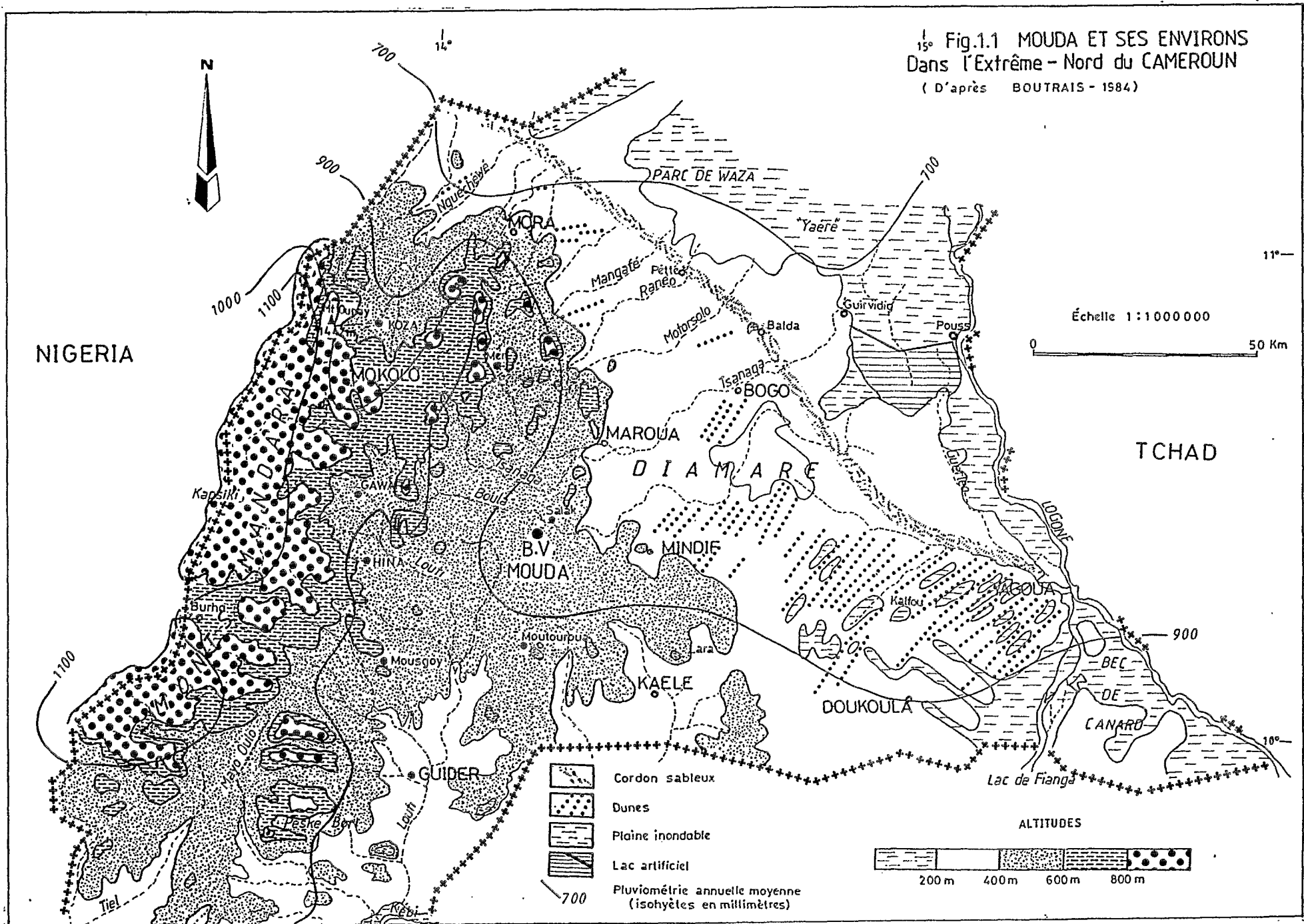
- les Monts Mandara dominant au Nord-Ouest
- la vaste plaine tchadienne, à l'Est.

Les Monts Mandara forment un ensemble de plateaux (hautes terres) faisant frontière entre le Cameroun et le Nigéria sur 150 km de long du Nord au Sud, et s'étalant sur une cinquantaine de kilomètres de large au Cameroun.

Ils sont constitués de petites et moyennes montagnes (point culminant à 1500 m au mont Oupay au Nord de Mokolo). Cependant la brutalité du relief par rapport aux plaines avoisinantes (420 m en moyenne) leur donne l'allure de vraies montagnes tropicales.

Au voisinage des montagnes se développent les piémonts, zones de basses terres formées dans le même substratum que les

Fig.1.1 MOUDA ET SES ENVIRONS
 Dans l'Extrême - Nord du CAMEROUN
 (D'après BOUTRAIS - 1984)



plateaux : granites ou migmatites et gneiss très granitisés. Ce sont les pédiments et les glacis.

Les plaines sont caractérisées par des dénivellations très faibles par rapport à la zone des pédiments. Les pentes moyennes y sont assez faibles : 0,76 % en bordure des massifs; 0,2 % pour la surface sub-horizontale de la plaine du Diamaré; 0,08 % à l'approche du cordon sableux, qui marque au quaternaire l'extension méridionale maximale du lac Tchad.

Le bassin tchadien du Cameroun s'étend de la zone de socle du piémont jusqu'au lac Tchad au Nord et au Logone à l'Est. C'est une plaine sédimentaire de comblement alluvial avec remaniement éolien. Elle est traversée de part en part par un grand cordon sableux (rivage d'un ancien lac Tchad) qui individualise deux ensembles :

- la plaine du Logone au Nord et à l'Est du cordon
- les plaines comprises entre ce cordon sableux et les monts Mandara. C'est dans ces plaines de piémont, comme celle de Mora ou celle du Diamaré, que se trouvent les bassins versants représentatifs de Mouda.

Les principaux cours d'eau (mayo en fulfuldé, langue peuhl du Nord-Cameroun) de la région, issus des Monts Mandara et descendant dans les plaines, ont fini par envoyer la pénéplaine cristalline sous-jacente par des dépôts importants de matériaux. Quand la force du courant le permet, les mayos entretiennent des épandages importants au delà du cordon sableux dans la plaine d'inondation des yaérés.

1.2. TRAITS DU CLIMAT.

1.2.1. Généralités, circulation atmosphérique en Afrique de l'Ouest.

De nombreux travaux traitent de la climatologie tropicale.

Une revue des travaux récents sur ce sujet a été présentée par Mahé, G. (1992).

La circulation atmosphérique générale sur l'Afrique tropicale est caractérisée par :

- une circulation méridienne organisée en cellules de Hadley,
- une circulation zonale avec des courants-jet organisée en cellules de Walker, et
- une forte variation saisonnière.

La circulation méridienne s'effectue de l'équateur vers les pôles en altitude et des pôles vers l'équateur au sol par l'intermédiaire de vents d'est (alizés). Elle se présente sous forme d'une zone d'ascendance, basses pressions vers l'équateur et d'une zone de subsidence, hautes pressions tropicales vers 30° de latitude.

Les transferts d'énergie entre les régions intertropicales surchauffées et les hautes latitudes plus froides constituent le principal moteur des courants méridiens de la circulation tropicale.

La circulation zonale met en valeur les échanges horizontaux à grande échelle, elle fait apparaître de forts vents d'ouest (courants-jets ou jets). Ceux-ci soufflent en Afrique entre 30° N et 30° S, au-dessus du flux de mousson on les trouve entre 5.000 et 12.000 mètres d'altitude.

Les transferts d'énergie, évoqués ci-dessus, engendrent la formation des centres d'action d'origine thermique : hautes pressions polaires et basses pressions équatoriales d'où sont issus les vents.

L'anticyclone de Sainte-Hélène domine l'ensemble du golfe de Guinée. L'alizé de secteur SE qui en est issu est dévié au passage de l'équateur par la rotation terrestre. Il est attiré par les dépressions continentales et prend le nom de flux de mousson de secteur SW.

On distingue deux anticyclones au Nord : ce sont les anticyclones des Açores et de Lybie. L'anticyclone égypto-lybien fournit un flux d'alizé continental sec et chaud de secteur NE et E connu sous le nom d'harmattan.

La zone de contact dynamique des circulations atmosphériques est appelée équateur météorologique (EM).

(La Zone Inter-Tropicale de Convergence (ZITC) est un autre nom de l'équateur météorologique).

L'équateur météorologique constitue une barrière, chaque hémisphère météorologique ayant une certaine autonomie énergétique. Les échanges énergétiques sont pratiquement nuls à travers cette barrière.

Au-dessus de l'Afrique de l'Ouest, l'EM présente une structure en front, de pente très inclinée, s'abaissant de l'équateur vers le Nord, appelée également Front Inter-Tropical (FIT).

La migration de la trace au sol de l'EM est commandée par le mouvement zénithal du soleil. Le FIT prend ses positions extrêmes (fig. 1.2), méridionale vers 5° N en janvier-février et septentrionale vers 20° N en juillet-août.

La migration de la trace au sol de l'EM et les variations saisonnières du régime du flux de mousson sont à l'origine des différents climats observés autour du golfe de Guinée. Ces deux paramètres conditionnent :

- le début,
- la durée et la fin de la saison,
- la hauteur des précipitations et,
- le type même des précipitations.

Le secteur d'étude limité par la bande des 10 et 11èmes parallèles Nord fait partie de la zone 2 de la figure 1.2.

La zone 2, tout comme la zone 4, est saisonnièrement sous l'influence du flux de mousson, mais se trouve rarement sous la structure centrale de l'EM, où la mousson est la plus épaisse. Les principaux utilisateurs de l'humidité du flux de mousson sont les lignes de grain.

Le climat général de la bande des 10 et 11èmes parallèles Nord en Afrique de l'Ouest est de type soudanien à tendance sèche ou sahélo-soudanien, caractérisé par deux saisons contrastées :

- une saison sèche d'octobre à avril (7 mois) au sens d'Aubreville (moins de 30 mm/mois) et,
- une saison des pluies de mai à septembre (5 mois).

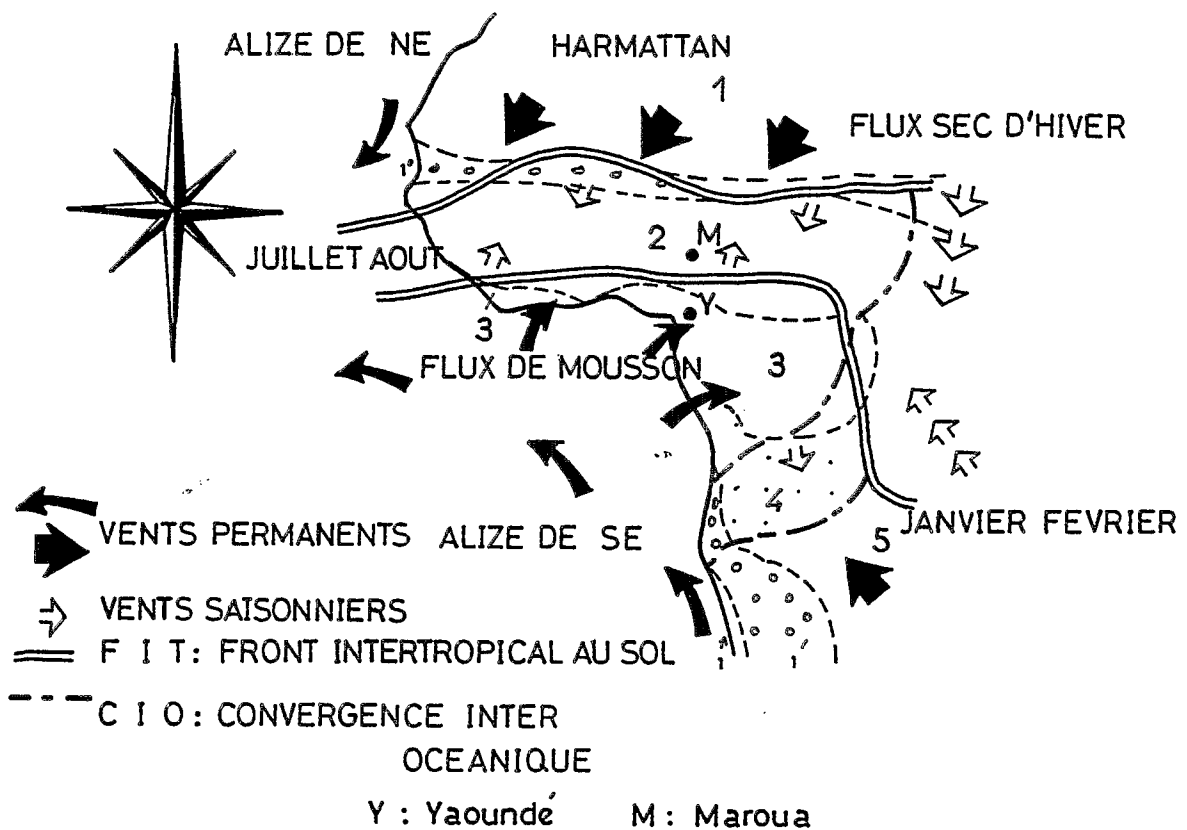


Fig.1.2 Schéma des principaux flux de masses d'air en Afrique de l'ouest et centrale durant les deux situations extrêmes de l'année: janvier-février et juillet-août (in Mahé 1992)

(Zonations végétales 1:déserts; 1'steppe et brousses à épineux; 2,4 et 5: savanes herbacées à arborées 3:forêt dense)

1.2.2. Paramètres principaux du climat.

Les stations climatiques de longue durée, Maroua-Agro (par 10°34' Lat N et 14°18' Long E) et Maroua-Salak (par 10°28' Lat N et 14°15' Long E) situées respectivement à 30 km et 10 km au Nord des sites expérimentaux de Mouda nous ont servi pour la présentation climatique du secteur d'étude. Ce résumé est tiré principalement des travaux d'Olivry (1986) et de Suchel (1972).

Outre les précipitations, nous étudions d'autres paramètres climatiques qui peuvent influencer le cycle de l'eau dans un sens ou dans un autre, ce sont : les vents, les températures, l'humidité de l'air et l'évaporation.

1.2.2.1. Les vents.

Les vents dominants sont de secteur Sud-Ouest (Mousson) et Nord-Est (Harmattan). La région est cependant le siège d'une prépondérance de vents de direction Nord-Est pendant une bonne partie de l'année (plus de 6 mois) : janvier et octobre sont les mois où ces vents sont les plus importants.

Les vents ne sont pas très violents (vitesse moyenne de 2 à 4 m/s) comme le montre le tableau n° 1.1 (station de Maroua-Salak).

Station	Calmes V < 1 m/s	2-4	Vents en m/s			
			5-6	7-14	15-21	< 21
MAROUA	38	50	10	2	-	-

Tableau n° 1.1 Fréquence moyenne de la vitesse des vents pour les mois de janvier juillet et octobre
(d'après Olivry, 1986)

A l'examen du tableau n° 1.2 portant sur une année de mesures de vitesse des vents (janvier 87 à janvier 88) à la station de

Maroua-Salak, on note l'existence des vents forts pour la région : $V > 4$ m/s lors des mois d'avril et mai. Juin et juillet sont également le siège des vents assez forts ($v \geq 3$ m/s).

Station	J 87	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	J 88
Maroua-Salak	3.1	3.4	3.2	4.6	4.3	3.1	3.1	2.4	2.4	2.7	1.9	2.2	1.8

Tableau n° 1.2 Vitesse moyenne journalière du vent (m/s)
(source Météo. Nat.)

Ceci est en relation avec le caractère orageux des précipitations du premier tiers de la saison des pluies. A cette période, on observe des écarts entre mesures de pluie à 1,50 m du sol et au sol dus à ce phénomène : les vents sont plus faibles au sol qu'à 1,50 m du sol.

Thébé (1987) a observé sur le bassin de Mouda, et pour la période du début de la saison jusqu'au 15 juillet, que les pluies mesurées à 1,50 m du sol étaient sous-estimées de 10 à 15 % et souvent jusqu'à 25 %. Des observations entre pluie au sol (P_{sol}) et pluie à 1,50 m du sol (P_{150}) au cours des saisons de pluie 1984 et 1985, il tire deux relations :

a) début de la saison au 15 Juillet :

$$P_{sol} = 1,09P_{150} + 0,644 \quad r^2 = 0,989 \text{ pour 19 observations.}$$

b) ensemble de la saison :

$$P_{sol} = 1,04P_{150} + 0,523 \quad r^2 = 0,992 \text{ pour 54 observations.}$$

Des résultats similaires au sujet de l'influence du vent sur les précipitations ont été obtenus sous les mêmes latitudes par Chevallier (1986), B. Sevruk (1985), De Brun (1985).

1.2.2.2. Les températures.

Dans le tableau n° 1.3 sont indiquées les variations et les moyennes de température à l'échelle mensuelle et annuelle aux stations de Maroua-Salak et Mokolo.

Les températures minimales mensuelles sont observées en décembre et janvier. Pour trois mois, mars, avril, mai, on obtient des valeurs parmi les plus fortes de l'année avec un maximum en avril, mois qui correspond à la fin de la saison sèche.

Il faut noter la relative douceur du temps à Mokolo par rapport à Maroua-Salak, due à sa position en altitude dans les Monts Mandara (795 mètres).

Stations	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Année
Maroua-Salak													
(15 ans) TX	32.7	35.3	38.5	39.2	37.6	34.0	31.6	30.0	31.5	34.6	35.1	33.6	34.5
Tn	16.9	18.6	22.3	24.9	24.3	22.2	21.7	21.2	20.9	20.5	19.0	17.1	20.8
Moy	24.9	27.0	30.8	31.0	31.0	28.2	26.6	25.6	26.2	27.7	27.1	25.3	27.7
Tx-Tn	15.8	16.7	16.2	14.3	13.3	11.8	9.9	8.8	10.6	14.1	16.1	16.5	13.7
Mokolo													
Tx	31.3	31.7	35.0	36.8	35.2	31.7	29.3	27.5	29.6	31.8	32.6	30.3	32.0
Tn	17.8	18.7	22.2	24.3	22.4	20.6	19.5	19.6	19.0	19.8	19.5	17.5	21.1
Moy	24.6	25.2	28.6	30.5	28.8	26.2	24.4	23.5	24.3	25.8	26.0	23.9	26.6
Tx-Tn	13.5	13.0	12.8	12.5	12.8	11.1	9.8	7.9	10.6	12.0	13.1	12.8	10.9

Tableau n° 1.3 Températures moyennes
 Tx : températures maximale
 Tn : températures minimale
 Tx-Tn : amplitude thermique

1.2.2.3. L'humidité relative de l'air.

L'humidité relative de l'air, soit son degré hygrométrique, est définie par rapport aux conditions de saturation de l'air. Deux valeurs journalières (le minimum et le maximum) ainsi qu'il est indiqué dans le tableau n° 1.4 traduisent l'évolution interannuelle de ce paramètre climatique.

Sur deux années (1983 et 1984) de relevés du degré hygrométrique, des températures et des pluies (tab. n° 1.5) à Maroua-Salak, on note que les maxima de l'humidité relative 97 % en août 83 et 96 % en juillet 84 sont liés en général au minimum des températures et à l'importance des précipitations pour ces deux mois. Les minima, quant à eux, sont observés en février, mars, avril 83 (14 %) et février 84 (12 %).

Station	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Année
Max	34	27	23	47	67	91	90	94	95	82	50	40	62
Maroua-salak													
Min	15	12	12	18	33	51	60	68	62	38	22	18	34

Tableau n° 1.4 Humidité relative
Moyennes mensuelles en %

Station	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Année
Max	36	31	29	33	65	88	95	97	96	63	41	43	60
Maroua-Salak 1983													
Min	20	14	14	14	23	36	53	54	45	21	17	21	28
Max	36	29	31	57	90	85	96	95	94	75	36	36	61
Maroua-Salak 1984													
Min	17	12	14	19	32	31	45	44	42	27	16	17	26

Tableau n° 1.5 Humidité relative en %
1983 et 1984 (Météo.Nat)

1.2.2.4. L'évaporation et l'évapotranspiration.

L'évaporation est un terme très important du bilan hydrologique, elle est très fortement corrélée aux autres paramètres climatiques étudiés ci-dessus. Elle est définie par l'ensemble des phénomènes qui transforment l'eau en vapeur par un processus physique.

La comparaison des résultats entre stations de mesures est généralement délicate, les normes d'installation et d'exploitation n'étant pas strictement les mêmes partout.

Il est d'usage de comparer les valeurs d'évaporation données par un bac Colorado et les valeurs d'évaporation potentielle calculée par différentes formules (Turc, Penman, etc...).

Nous donnons dans le tableau n° 1.6 les valeurs d'évaporation en millimètres sur bac Colorado aux postes de mesures de Maroua-Salak et de Mokolo.

Station	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Année
Maroua Salak 54-56	233	252	316	351	285	195	161	124	132	186	249	254	2738
Mokolo 54-56	313	316	344	345	245	156	126	112	144	198	249	248	2797

Tableau n° 1.6 Evaporation sur bac Colorado en (mm)

Pour la période 1954 à 1956, le maximum d'évaporation se situe en avril (moyenne de 11,7 mm/j pour Maroua-Salak) et le minimum en août (4,0 mm/j).

L'évapotranspiration potentielle (ETP) est définie par Thornthwaite comme la hauteur d'eau qui serait effectivement évaporée si les ressources en eau mobilisables étaient à chaque instant au moins égales à celles qui peuvent être transformées en vapeur par le jeu des facteurs hydrométéorologiques et d'une végétation "normalisée".

Selon les formules de Penman et Turc, l'ETP annuelle serait respectivement de 1832 et 2000 mm dans la région de Maroua-Salak.

Sa variation mensuelle d'après la formule de Penman est donnée dans le tableau n° 1.7. Les valeurs suivantes de l'ETP sont tirées d'un tableau d'un ensemble d'auteurs : Suchel, Guis et la Météorologie nationale, sur les températures, les précipitations, l'évaporation, le déficit hydrique et l'humidité relative de l'air dans la région de Maroua.

J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Année
147	160	194	190	190	145	130	110	125	156	153	132	1832

Tableau n° 1.7. Evapotranspiration dans la région de Maroua
(d'après SUCHEL, 1972; GUIS, 1972, METEO,
in PONTANIER et al., 1974)

1.2.2.5. La pluviométrie.

La pluviométrie régionale.

L'information pluviométrique de la bande camerounaise de 10 à 11 degrés de latitude Nord peut être résumée par les cartes des isohyètes annuelles (fig. 1.3) et le tableau n° 1.8.

Il ressort des deux cartes des isohyètes que la pluie moyenne diminue du Sud au Nord de notre zone d'étude.

Le tracé des isohyètes suit assez grossièrement celui des parallèles; mais ce schéma latitudinal de la répartition de la hauteur des précipitations annuelles est perturbé par l'orographie. Les tracés montent en latitude à proximité des massifs montagneux importants, ceux-ci étant des zones plus arrosées. Mokolo et sa région dans les Monts Mandara sont sur l'isohyète 1000 mm en année normale tandis que Maroua dans la plaine ne reçoit que 780 mm d'eau par an.

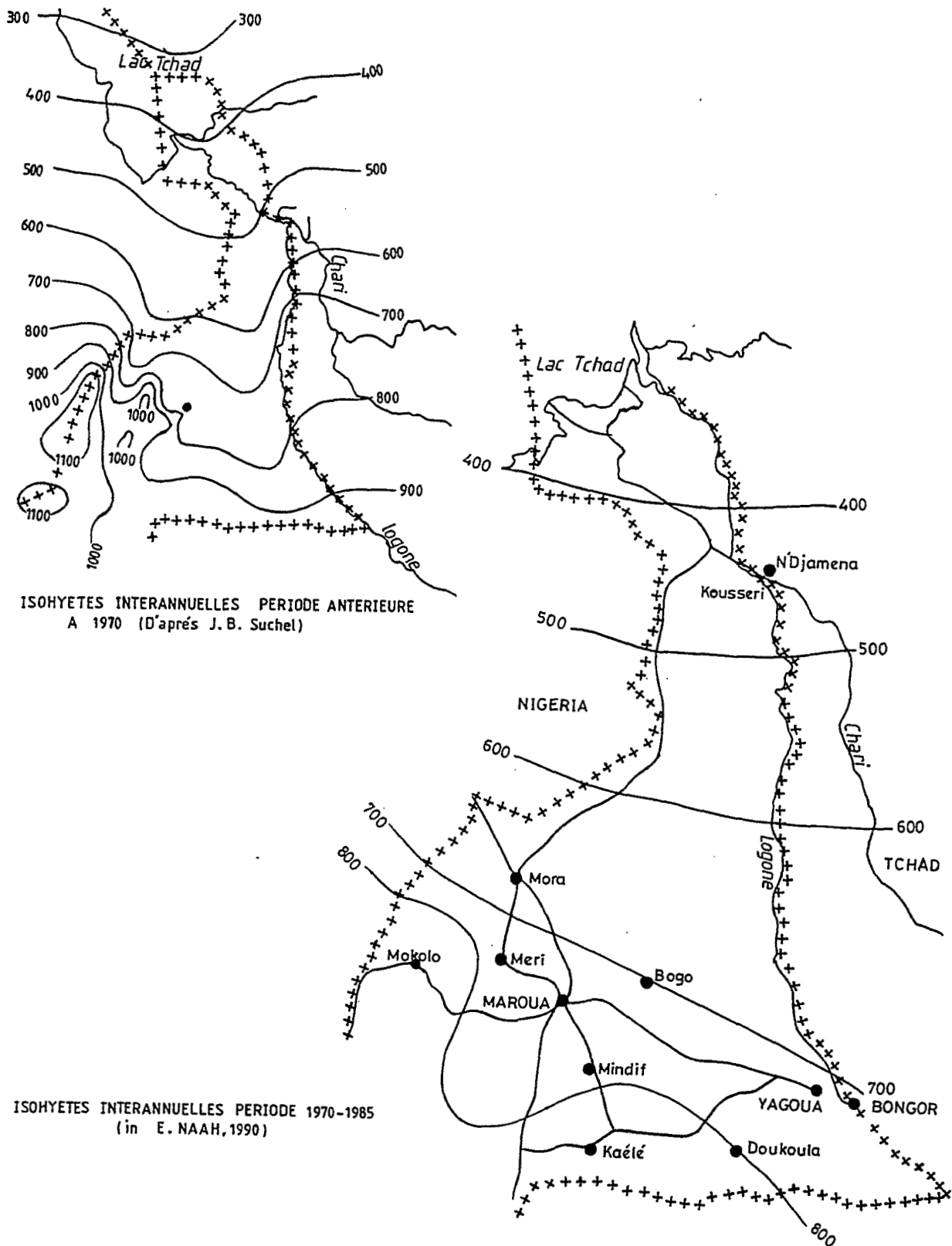


Fig.1.3 POSITION DES ISOHYETES INTERANNUELLES DANS
L'EXTREME-NORD DU CAMEROUN
(Périodes antérieure et postérieure à 1970)

Le caractère sec de la région tient essentiellement à la longueur de la saison sèche et à sa rigueur; on y observe 6 à 7 mois de pluviométrie nulle.

La saison des pluies qui s'étend de mai à octobre est dominée par les mois de juillet et août qui représentent près des 2/3 de la pluviométrie annuelle (tab. n° 1.8).

STATIONS	MARS	AVRIL	MAI	JUIN	JUILLET	AOUT	SEPT	OCT	NOV	DEC	TOTAL
PMAROUA AGRO(44ans) 1.1		12.0	59.8	105.8	194.5	245.1	132.3	25.1	0.4		776.1
PMAROUA SALAK(18ans) 3.7		20.6	62.9	134.3	215.9	241.3	156.9	30.1	0.4		866.1
PMOUDA 84		—	109.0	54.0	288.0	128.0	81.7	(32.0)			(693.0)
PMOUDA 85		0.0	93.0	110.0	311.0	289.0	111.0	0.0			(914.0)
PMOUDA 86		0.0	16.2	48.0	285.0	220.7	179.0	(23.5)	(10.0)		(782.6)
PMOUDA 87		0.0	37.8	130.0	94.3	197.2	115.9	9.7			594.9
PMOUDA 88			(38.1)	(52.6)	207.6	306.3	224.4	0.0			(829.0)
PMOUDA 89		(31.3)	(95.1)	145.6	186.4	148.1	108.4	0.0			(714.9)
PMOUDA 90		42.6	84.6	213.9	184.7	143.4	52.2	39.4			760.8

P MOUDA AGRO 776.1 mm

moy

ET: 114,8

CV = 0,148

Tableau n° 1.8 Pluviométrie moyenne (mm) à Mouda, Maroua salak, Maroua agro

On observe une grande variabilité interannuelle de la pluviométrie dans cette région. La station de Maroua-Agro (fig. 1.4) illustre les fluctuations de la pluviométrie d'une année à l'autre. Sur 44 années d'observations (de 1947 à 1990) on peut relever de forts maxima dépassant 1000 mm en 1951 (1017 mm), 1962 (1011 mm), 1980 (1010 mm) et de très faibles minima inférieurs à 600 mm en 1984 (530 mm).

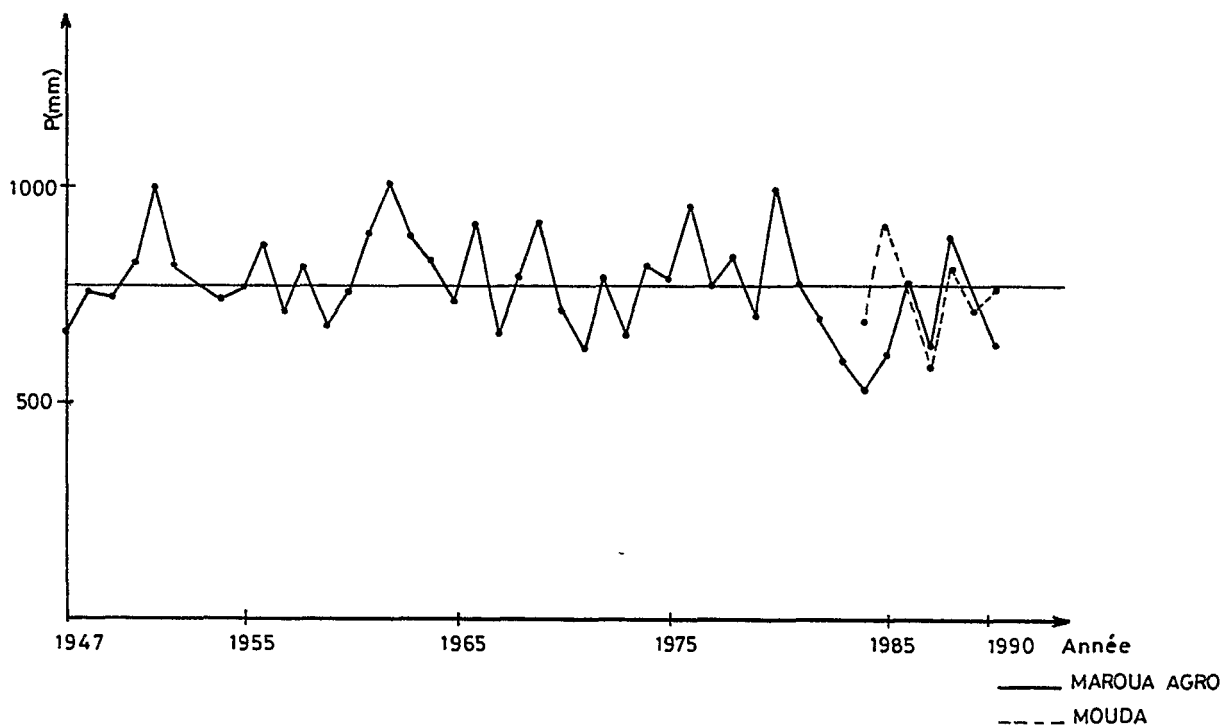


Fig.1.4 VARIATIONS INTERANNUELLES DE LA PLUVIOMETRIE A MAROUA AGRO

La pluviométrie moyenne annuelle à Maroua-Salak est de 877 mm (18 années d'observation).

Olivry (1986) a présenté des études statistiques des pluies annuelles, mensuelles et journalières de 16 postes de la région pour des durées d'observation allant de 16 à 44 années. Pour Maroua-Agro et Maroua-Salak représentatifs du secteur d'étude, les données statistiques sont résumées dans trois tableaux : n°s 1.9, 1.10 et 1.11.

Station	Nb an	P max	P méd	P min	Ec. Type	Années Humides			Int Conf 95 %	Années Sèches	
						T = 20 ans	T = 10 ans	An. Moy		T = 20 ans	T = 10 ans
Maroua Agro	40	1120	778	600	142	1055	1003	805	45	613	555
Maroua Salak	18	1119	850	617	123	1085	1040	877	61	678	719

Tableau n° 1.9 - Répartition statistique des pluies annuelles (OLIVRY, 1986)

Station	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Maroua-Agro												
Moy.	0	0	1	15	59	105	193	145	145	27	0	0
Ec. Type	0	0	3	23	41	48	58	68	66	30	0	0
Maroua-Salak												
Moy.	0	0	3,7	20,6	62,9	134,3	215,9	241,3	156,9	30,1	0,35	0
Ec. Type	0	0	7,4	15,8	34,0	59,6	70,7	69,4	52,4	28,9	1,4	0

Tableau n° 1.10 Répartition statistique des pluies mensuelles (Olivry, 1986)

Averses journalières (mm) de période de retour							
	1 an	2 ans	5 ans	10 ans	20 ans	50 ans	100 ans
Maroua-Agro	65	76	91	105	117	130	146

Tableau n° 1.11 Ajustement d'une loi de Pearson III aux hauteurs d'averses tombées en 24 heures (Olivry, 1986)

D'autres études des pluies journalières portent sur l'irrégularité des saisons et ont été effectuées par le CIEH (1978); celles-ci confirment le caractère irrégulier du climat dans la région.

Ainsi pour la station de Maroua-Agro, de 1948 à 1983, avec 29 années disponibles, on note que :

- si la fin de la saison des pluies est définie par la dernière pluie supérieure ou égale à 15 mm, alors elle a lieu 1 année sur cinq avant le 15 septembre, 1 année sur 2 avant le 30 septembre, et 1 année sur cinq après le 15 octobre.

- pour les périodes sèches définies par des pluies inférieures à 10 mm, il y a en moyenne par année 1 à 2 (moyenne 1,34) périodes sèches de 10 jours par an au moins et une période sèche de 15 jours au moins tous les trois ans, et ceci entre le 1er et le 30 septembre.

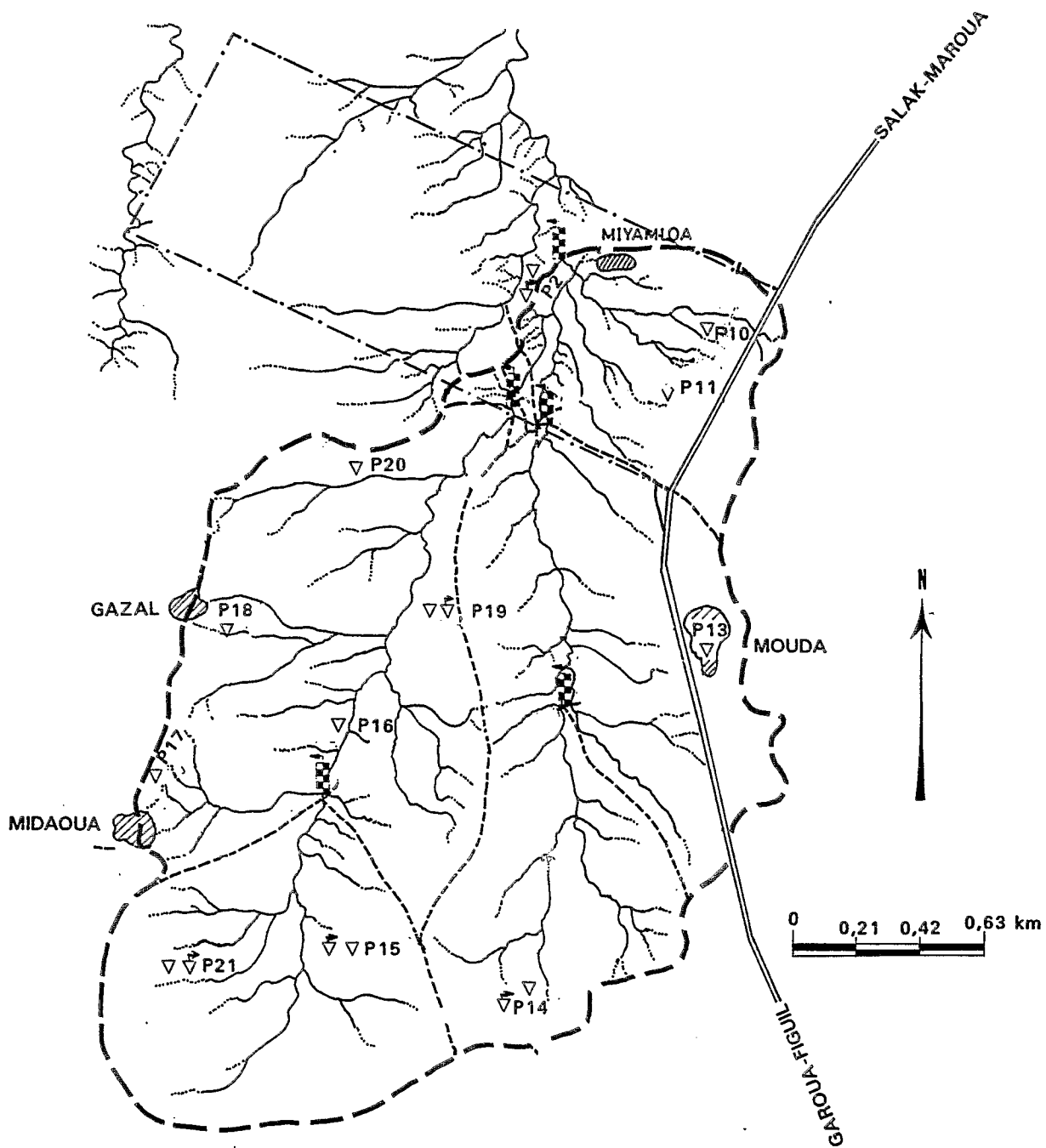
A l'observation de la position des isohyètes interannuelles de 1970 à 1985 dans l'Extrême-Nord du Cameroun (fig. 1.3), la sécheresse récente qui doit être caractérisée à une échelle dépassant le cadre de notre région d'étude, s'est manifestée par un décalage des isohyètes vers le Sud de près de 100 km pour la période 1970 - 1985 par rapport à la période d'avant 1970 étudiée par Suchel (1972)

La pluviométrie locale des bassins de Mouda.

Généralités.

L'information pluviométrique des bassins de Mouda est donnée par 12 postes de mesures (fig. 1.5) dont 2 ou 3 pluviographes opérationnels suivant les années pendant les trois années d'observations 1988, 1989 et 1990.

Les postes de mesures sont répartis de façon optimale sur les 18,1 km² que couvre le système emboîté, soit une densité de 1 poste pour 1,5 km².



LÉGENDE

- LIMITE DE BASSIN
- LIMITE DE SOUS-BASSIN
- . - LAYON IRA/MAROUA

- COURS D'EAU
- LIMNIGRAPHE
- PLUVIOGRAPHE
- PLUVIOMETRE

Fig-1-5 BASSIN VERSANT DE MOUDA

(SITUATION ET RÉSEAU DE MESURES HYDROPLUVIOMÉTRIQUES)

Le tableau n° 1.8 (voir ci-dessus) récapitule les valeurs mensuelles et annuelles de la pluviométrie sur le système de Mouda à l'exutoire du Miyamloa. La figure n° 1.6 compare les données de notre période d'étude à la moyenne interannuelle de Maroua-Agro (44 ans).

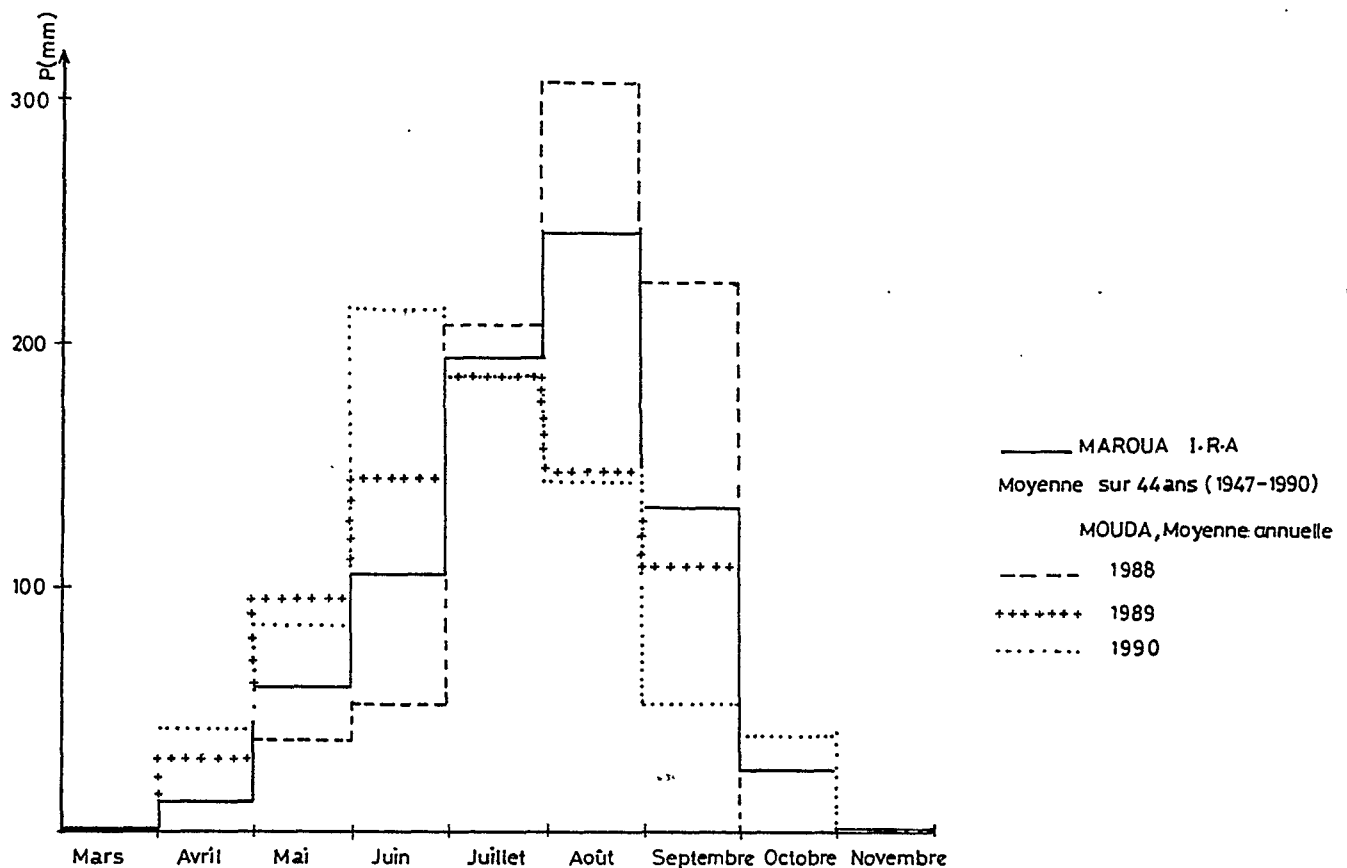


Fig.1.6 PRECIPITATIONS A MOUDA (1988-1990)

Si nous considérons que le poste de Maroua-Salak situé à 10 km au Nord de Mouda, a les mêmes caractéristiques géographiques (altitude, situation par rapport aux Monts Mandara etc...) que Mouda, nous dirons qu'à Mouda, des trois années de notre étude, seule 1988 peut être considérée comme une année moyenne à tendance humide. Au contraire 1989 et 1990 rappellent déjà les années sèches avec une fréquence élevée des périodes sèches et une précocité de la saison (tab. 1.8 et tab. 1.12).

Quatre fortes averses (3 annuelles et une décennale) sont tombées au cours de notre période de référence; une annuelle est tombée le 09/05/89 et la décennale le 29/06/90.

Contribution des fortes pluies au module pluviométrique.

Pour un état de surface donné à l'échelle du bassin, peu d'études sur l'hydrodynamique des différents états de surface des sols à l'échelle des bassins versants font cas de la fraction pluviométrique (somme des pluies journalières pour un seuil pluviométrique donné) qui contribue le plus soit à l'économie de l'eau pour le sol (par infiltration) soit à la perte de l'eau par le sol (par ruissellement).

En revanche, les études récentes sur la sécheresse au Sahel (Bader, 1984, Albergel, 1987, Ribstein, 1990, etc...) attribuent à la fraction pluviométrique supérieure à 40 mm une part importante dans la reconstitution du stock d'eau dans le sol. Cette valeur de 40 mm est considérée comme seuil au-delà duquel toute pluie est dite forte. Toutefois, dans le cadre de notre étude, ce seuil a été ramené à 30 mm.

La fraction pluviométrique de 40 mm, malgré sa faible occurrence dans la saison des pluies, a contribué pour plus du 1/3 au module pluviométrique (pluies > 1 mm) en 1989 à Mouda.

Le tableau n° 1.12 synthétise l'importance des pluies journalières supérieures ou égales à 40 mm dans la réalisation de la hauteur de la pluie annuelle. Les données de ce tableau constituent entre autre une indication sur la variabilité spatiale de la pluie sur le système des bassins de Mouda.

		Bassin versant					
		Mouda amont	Mouda aval	Midaoua amont	Midaoua aval	Miyamloa	Mayo Gazal
1988	Nb. pluies ≥ 1 mm	52	51	51	50	52	42
	Nb. pluies ≥ 40mm	9	5	6	3	5	7
	% Nb. pluies ≥ 40 mm	<u>17</u>	<u>10</u>	<u>12</u>	<u>6</u>	<u>10</u>	<u>17</u>
	V. pluies (mm) ≥ 1 mm	872,9	878,1	799,4	773,0	827,1	646,9
	V. pluies (mm) ≥ 40 mm	429,8	254,5	319,9	180,5	246,2	337,0
	V (%) pluies ≥ 40 mm	<u>49</u>	<u>29</u>	<u>40</u>	<u>23</u>	<u>30</u>	<u>52</u>
1989	Nb. pluies ≥ 1 mm	48	50	48	51	51	49
	Nb. pluies ≥ 40mm	5	4	4	4	4	6
	% Nb pluies ≥ 40 mm	<u>10</u>	<u>8</u>	<u>8</u>	<u>8</u>	<u>8</u>	<u>12</u>
	V. pluies (mm) ≥ 1 mm	737,0	717,1	706,5	717,8	714,9	756,2
	V. pluies (mm) ≥ 40 mm	249,0	209,3	211,2	213,7	212,8	322,5
	V (%) pluies ≥ 40 mm	<u>34</u>	<u>29</u>	<u>30</u>	<u>30</u>	<u>30</u>	<u>43</u>
1990	Nb. pluies ≥ 1 mm	50	52	48	51	51	52
	Nb. pluies ≥ 40mm	2	2	2	3	2	3
	% Nb pluies ≥ 40mm	<u>4</u>	<u>4</u>	<u>4</u>	<u>6</u>	<u>4</u>	<u>6</u>
	V. pluies (mm) ≥ 1 mm	736,8	764,4	704,6	738,8	758,2	800,5
	V. pluies (mm) ≥ 40 mm	151,5	147,2	150,1	190,7	149,4	226,5
	V (%) pluies ≥ 40 mm	<u>21</u>	<u>19</u>	<u>21</u>	<u>27</u>	<u>20</u>	<u>28</u>

Tableau n° 1.12 Contribution de la fraction pluviométrique ≥ 40mm dans la hauteur de la pluie annuelle

Dans ce tableau sont indiqués :

- le nombre (Nb.) et le pourcentage (% Nb) des pluies pour le seuil pluviométrique considéré (40 mm),
- le volume (V.) et le pourcentage en volume (V(%)) pour le seuil pluviométrique considéré.

De ce tableau, on note que les pluies journalières de hauteur supérieure ou égale à 40 mm représentent en moyenne 8 % du nombre total des pluies ≥ 1 mm mais contribuent pour près du 1/3 à la hauteur totale annuelle.

Importance volumétrique des différentes tranches d'intensité

L'information "hauteur d'eau journalière" ne nous fournit qu'une indication sur l'économie potentielle (ruissellement ou infiltration) en eau dont peut bénéficier le système en 24 heures. Mais la répartition de cette "économie" entre les principaux termes du bilan hydrique des sols dépend surtout de la distribution dans le temps des quantités d'eau.

Le pluviographe ordinaire (type Précis Mécanique à augets basculeurs) quand il est judicieusement employé (respect des normes d'installation et d'exploitation) reste un outil efficace pour l'étude des intensités, de la structure et de la forme des averses.

Nous nous sommes aidés de 2 ou 3 pluviographes pour 18,1 km², bien qu'il soit conseillé pour les zones semi-arides à averses orageuses et localisées une densité d'au moins un pluviographe pour 2,5 km² (Dubreuil, 1966).

Le réseau de mesures pluviographiques opérationnel pour nos années d'études était composé des postes suivants (fig. 1.5) :

En 1988

PG 14, PG 21, PG 2 qui contrôlent respectivement les bassins de Mayo Mouda amont, Mayo Midaoua amont et Mayo Miyamloa (exutoire du système);

En 1989

PG 14, PG 21 (pour les mêmes bassins qu'en 1988);

En 1990

PG 15 contrôle les bassins amont des Mayos Mouda et Midaoua, PG 19 couvre les bassins intermédiaires des Mayos Mouda et Midaoua, PG 2 étant placé à l'exutoire général du système.

Nous avons étudié pour deux années, 1989 et 1990 (période pendant laquelle nous avons eu des relevés pluviographiques intégraux complets pour toute la saison pluvieuse) la contribution en hauteur de la précipitation annuelle de 2 tranches d'intensité pour des pluies supérieures à 3 mm. Notre choix s'est porté sur les tranches d'intensités les plus fortes qui sont une caractéristique principale des fortes averses locales.

Les tranches d'intensités $50 \leq I < 100$ mm/h et $I > 100$ mm/h ont été étudiées.

A l'examen du tableau n° 1.13, on constate que la tranche des intensités $50 < I < 100$ mm/h représente en moyenne 18 % de la pluie totale, tandis que la tranche de $I > 100$ mm/h contribue seulement pour près de 5 % en hauteur de la précipitation annuelle.

Intensités (mm/h)	Hauteurs (mm)	Année	
		1989 (31/05 - Fin saison)	1990
Totalité	h (mm)	595	665
	%	100	100
$50 \leq I < 100$	h (mm)	112,2	114,1
	%	18,8	17,4
$I \geq 100$	h (mm)	31,4	28,6
	%	5,3	4,4

Tableau n° 1.13 Contribution en hauteur et en pourcentage de deux tranches de fortes intensités à la pluviométrie annuelle pour les pluies supérieures à 3 mm à Mouda

Une étude précédente de Kaiser (non publiée) portant sur 4 années d'enregistrements pluviographiques à Maroua-Agro (1980, 1981, 1982, 1983) confirme ces résultats. Sur la base des dépouillements de cette chronique pluviographique, l'auteur tire les conclusions suivantes :

- les intensités moyennes supérieures à 100 mm/h sont exceptionnelles. En effet, pendant notre période d'étude, nous n'avons relevé qu'une averse d'intensité 342 mm/h en 5 mn au PG 2 (poste de l'exutoire), le 29 juin 1990.

- les averses d'une intensité moyenne supérieure ou égale à 50 mm/h contribuent en hauteur à près de 20 % des hauteurs annuelles précipitées.

- les averses d'intensité moyenne supérieure ou égale à 30 mm/h représentent près de 50 % des totaux annuels corrigés.

Structure et forme des averses.

Il est communément admis par les hydrologues du "SAHEL" (Rodier, 1964) que les fortes pluies du Sahel ont une forme assez homogène : un corps d'averse à fortes intensités auquel succède une traîne à faibles intensités.

Suchel (1972), dans sa description des différents types de pluies rencontrées au Cameroun souligne que les "lignes de grains", constituent le type de précipitations le plus habituel, même au coeur de la saison des pluies dans le Nord Cameroun.

Les lignes de grain sont des intrusions du flux d'est dans le flux de mousson, soulevant l'air humide en un front mobile le long duquel se produisent orages et averses (Mahé, 1992).

Ribstein (1990) sur la base des travaux de Testud (1984) et de Roux (1987) a décrit le modèle de circulation des masses d'air à l'intérieur des lignes de grain (fig. 1.7).

Pour un observateur au sol ce modèle de circulation se caractérise par le passage du "front de rafale" qui se traduit par des intensités très fortes (jusqu'à 200 mm/h).

La vitesse de déplacement des lignes de grain (50 km/h environ) et la largeur du front (50 km au maximum) permettent de prévoir une première période (corps d'averse) de pluie intense qui dure généralement moins d'une heure. Derrière ce front suit le passage de l'"enclume" qui se traduit par des précipitations moins intenses et plus uniformes. Pour Testud (in Ribstein, 1990), le développement de l'enclume peut atteindre 200 km, ce qui explique des pluies uniformes d'assez longue durée.

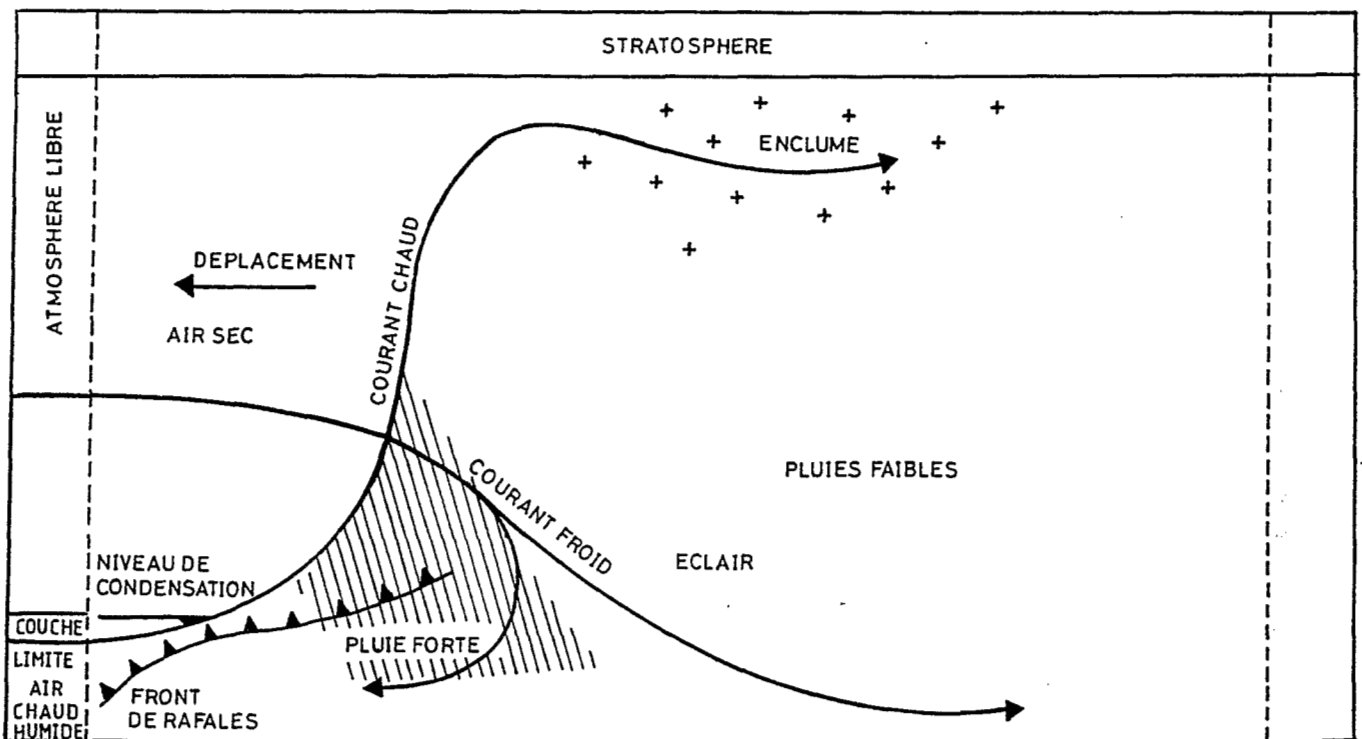


Fig.1.7: Modèle de circulation des masses d'air à l'intérieur des lignes de grains.
(in RIBSTEIN, 1990)

Ce schéma, corps d'averse à fortes intensités et traîne à faibles intensités des fortes averses de notre zone, est confirmé par un mode de représentation graphique adimensionnel des données pluviographiques.

Huff (1967) propose d'établir des diagrammes sans dimension des formes de pluie en portant la proportion de hauteur totale précipitée en fonction de la proportion du temps total depuis le début de l'averse.

A partir d'un échantillon d'averses, Huff en déduit des types de pluie selon que la partie intense se situe dans le 1er, 2ème, 3ème, 4ème quartile.

Notre choix s'est porté sur 4 averses. Elles ont pour caractéristiques d'être dans l'échantillon des plus fortes averses de notre période d'étude et de couvrir les deux "périodes" de la saison des pluies (effet saisonnier, cf. chap. II).

Averses choisies.

DATE	PLUVIOGRAPHE DE REFERENCE	P (mm)	DUREE TOTALE DE L'AVERSE (mn)
23/08/88	PG 14	58,0	180
30/07/89	PG 14	50,0	217
29/06/90	PG 2	110,0	325
08/06/90	PG BUSE	64,5	130

Les figures 1.8 et 1.9 montrent les diagrammes de Huff où le volume est donné en volume cumulé et en pourcentage de volume et le temps en pourcentage.

Si nous ne considérons que le 1er quartile (25 % du temps total compté à partir du début de l'averse) de la période pluvieuse, nous avons les résultats suivants :

- averse du 08/06/90 : 84 % de l'averse dans le 1er quartile,
- averse du 29/06/90 : 70 % de l'averse dans le 1er quartile,
- averse du 30/07/89 : 75 % de l'averse dans le 1er quartile,
- averse du 23/08/88 : 70 % de l'averse dans le 1er quartile.

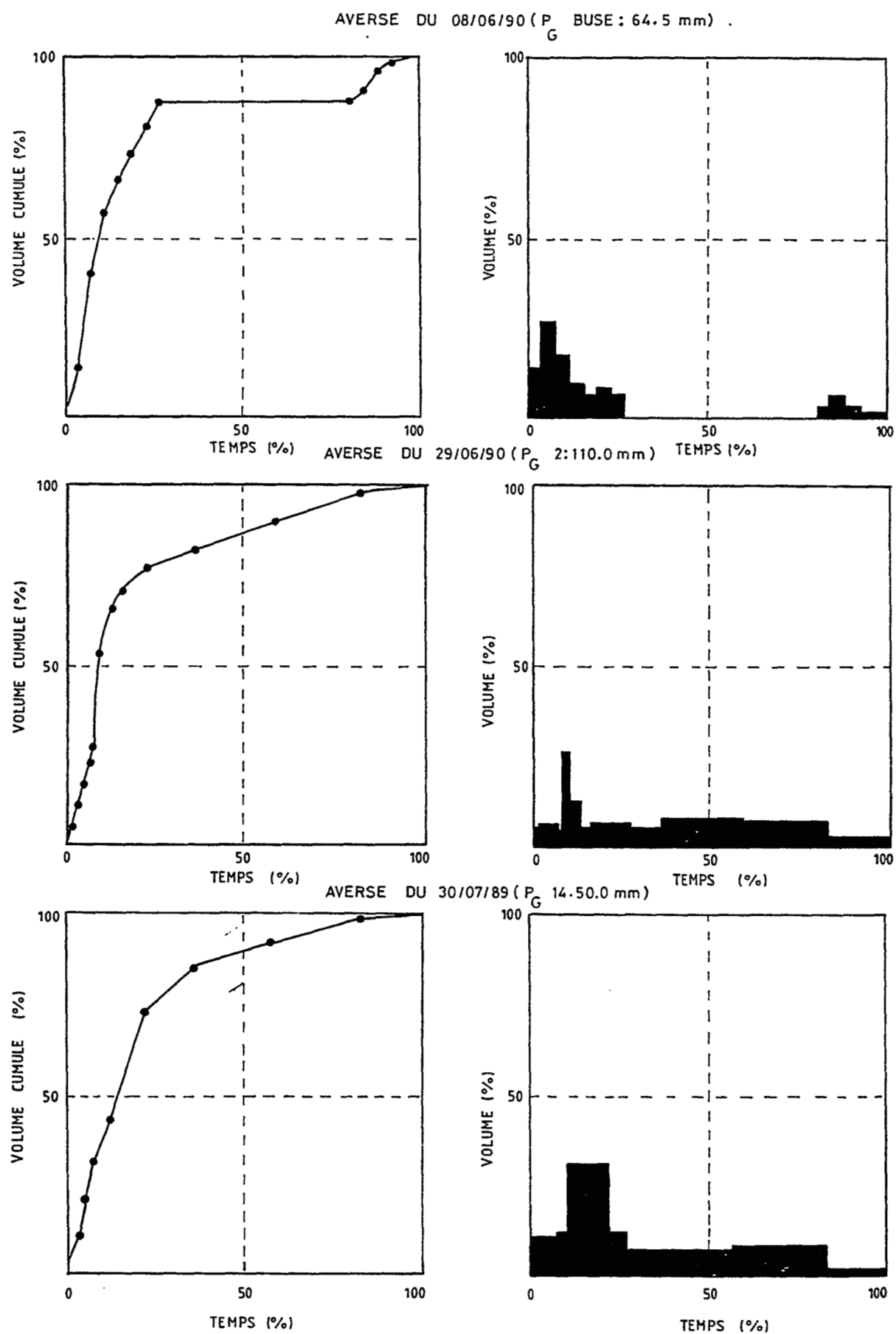


Fig.1.8 DISTRIBUTION DES VOLUMES PRECIPITES EN FONCTION DU TEMPS ET FORME DES FORTES PLUIES A MOUDA(1^{re} Période)

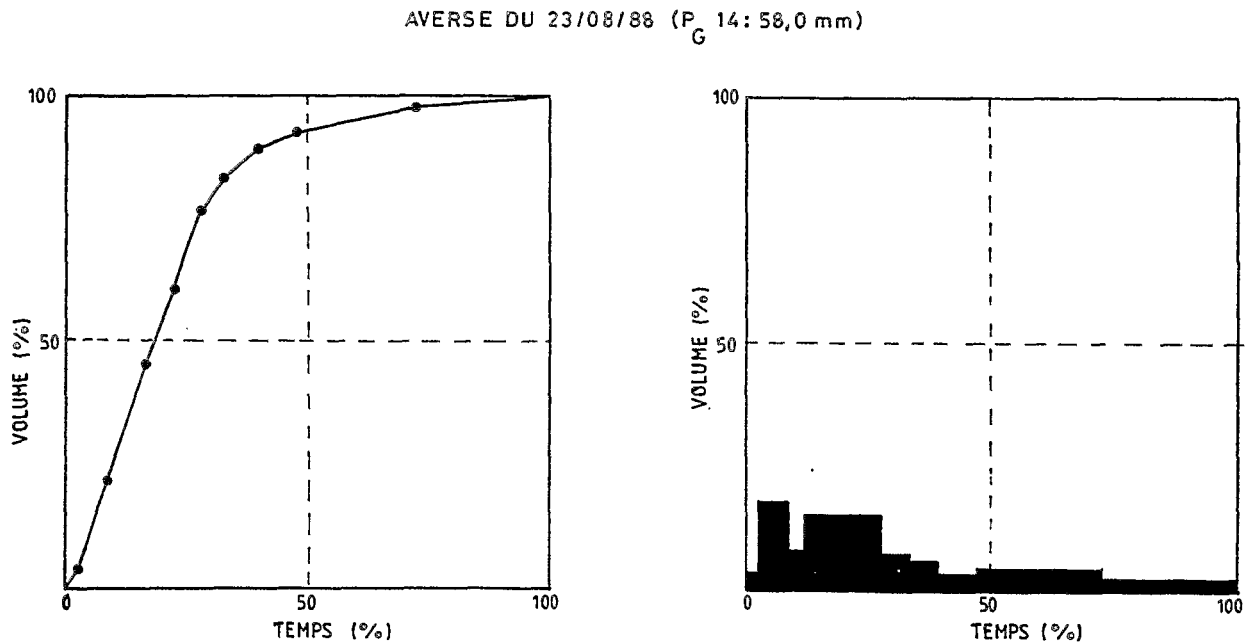


Fig.1.9 DISTRIBUTION DES VOLUMES PRECIPITES EN FONCTION DU TEMPS ET FORME DES FORTES PLUIES A MOUDA (2^e Periode)

Ces résultats, bien qu'obtenus à partir d'un échantillon réduit (3 années d'observations et lacunes fréquentes dues aux pannes des enregistreurs) confirment le schéma corps et traîne des fortes averses de la région d'étude.

Variabilité spatiale des averses.

Les modèles hydrologiques par événement (cf. chap. 3.4), qu'ils soient globaux (type hydrogramme unitaire, etc...) ou distribués (type Girard, type RORB, etc...) sont appliqués sur des petits bassins sahéliens avec des petits pas de temps (de l'ordre de la dizaine de minutes) afin de tenir compte de l'évolution des phénomènes hydropluviométriques en fonction du temps (Girard, 1972 et 1975; Chevallier, 1985; Ibiza, 1985; Ribstein, 1990).

Or la variabilité spatiale de pluie augmente d'autant plus que le pas de temps diminue; généralement la zone de pluie intense se déplace sur le bassin et n'est pas simultanée sur tous les postes de mesure. Seule une bonne densité de pluviographes à peu près équivalente à celle des pluviomètres sur le bassin nous aurait permis de calculer la pluie moyenne sur des petits pas de temps. Néanmoins la pluie moyenne calculée par la méthode de Thiessen (1911) sur ces bassins à l'échelle de l'averse peut être considérée comme un bon estimateur de la pluie réelle (Ntonga et al., 1990).

A titre d'exemple nous présentons sur la figure 1.10 un cas typique d'averse présentant des variations spatio-temporelles. Pour cette averse du 06/08/88, les données pluviographiques proviennent de 2 postes de mesures : le pluviographe de Midaoua (PG 21) et le pluviographe de Miyamloa (PG 2). Ces 2 pluviographes, distants de 5,4 km (en suivant le lit du Mayo Midaoua en rive gauche du mayo Miyamloa) et situés respectivement à l'extrême amont et à l'exutoire du bassin recueillent ce jour 49,0 et 21,0 mm. L'averse commence en amont à 16 h 54 mn avec des fortes intensités (61,2 mm/h), suivies d'un deuxième corps qui débute à 22 h 48 mn et enregistre 16,7 mm. L'averse ne débute en aval du bassin qu'à 23 h 13 mn, soit 25 mn après le début du 2^{ème} corps du PG 21. Les fortes intensités sont également relevées à l'aval, 84 mm/h puis 54 mm/h 15 minutes après le début de l'averse.

Cette averse à deux corps en amont et à 1 corps en aval justifie le choix de différentes échelles du versant pour une meilleure connaissance des processus hydropluviométriques.

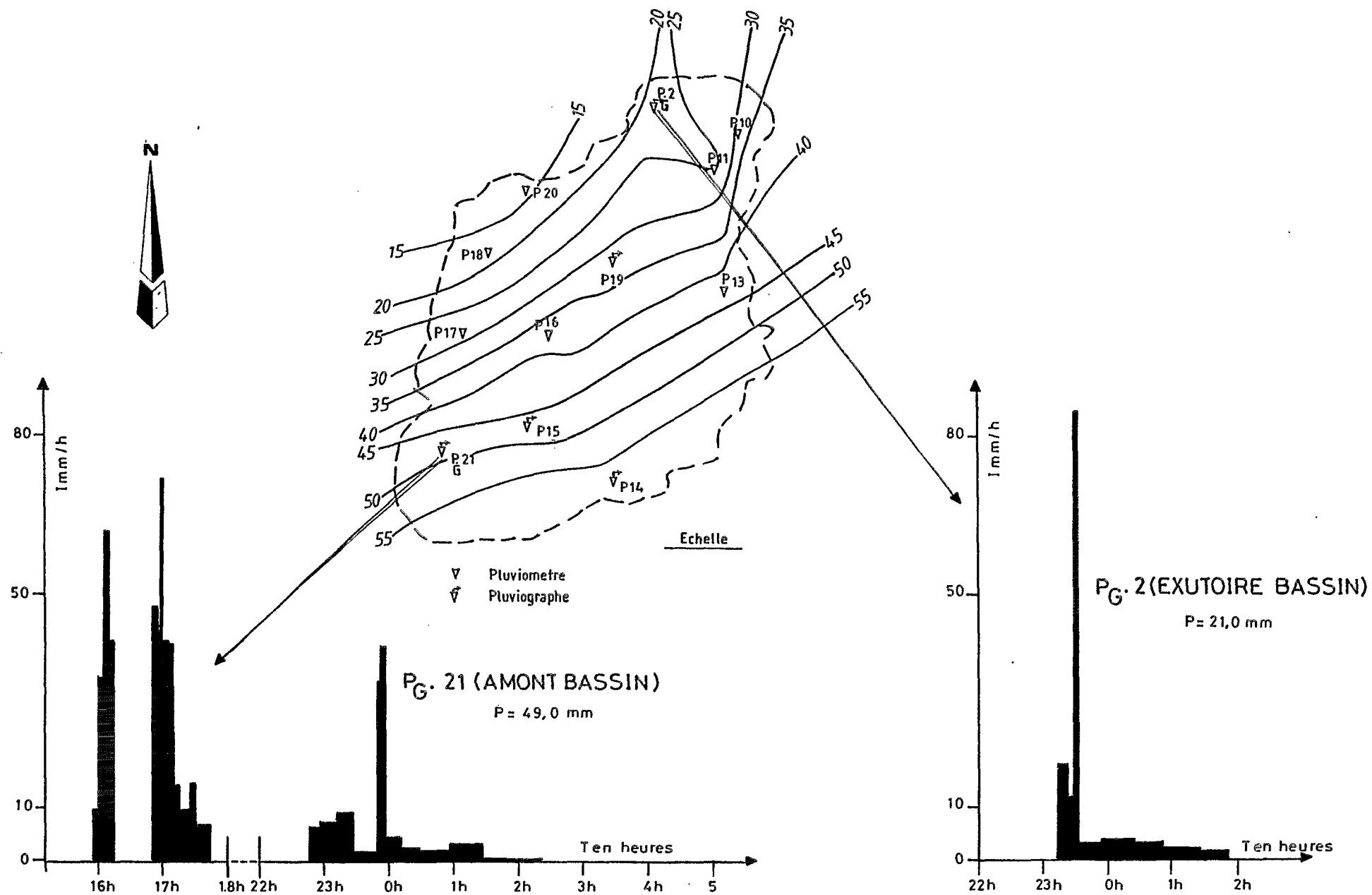


Fig. 1.10 ISOHYETES ET HYETOGRAMMES DE L' AVERSE DU 06/8/88 BASSIN DE MOUDA

1.2.3. Conclusion sur le climat.

En conclusion sur le climat, on note que l'ensemble de la région, compte tenu des caractéristiques des paramètres climatiques étudiés (en particulier l'humidité relative, les températures, les précipitations) présente des traits d'aridité très marqués.

D'après la carte de répartition mondiale des régions arides (UNESCO, 1977), la zone d'étude se trouve dans l'aire semi-aride avec pour repères principaux :

- une sécheresse d'hiver dominante.
($0,20 < P/ETP \text{ Penman} < 0,5$). En effet $P/ETP \text{ Penman} = 0,44$ à Maroua;
- un hiver chaud (moyenne du mois le plus froid comprise entre 20 et 30°C). Moyenne de janvier = 24,9°C à Maroua;
- un été très chaud (moyenne du mois le plus chaud supérieure à 30°C). Moyenne d'avril = 32,3°C dans notre région;
- une saison sèche de sept mois au sens d'Aubreville (moins de 30 mm/mois).

Nous avons également souligné la spécificité climatique de notre zone d'étude due à la grande variabilité des précipitations annuelles et aux particularités des caractéristiques des averses (distribution spatio-temporelle, intensités, forme, etc...)

Cette spécificité climatique aura des conséquences sur la formation des crues, et ceci à travers les modifications induites sur les états de surface, la végétation et les pratiques anthropiques.

1.3. GEOLOGIE ET GEOMORPHOLOGIE.

Les unités géologiques, conditionnent les paysages et les sols.

Ce paragraphe a été rédigé à partir des travaux de Dumort et Peronne (1966) résumés dans la notice explicative sur la feuille Maroua, et de l'esquisse géologique proposée par Brabant et Gavaud (1984) (fig. 1.11).

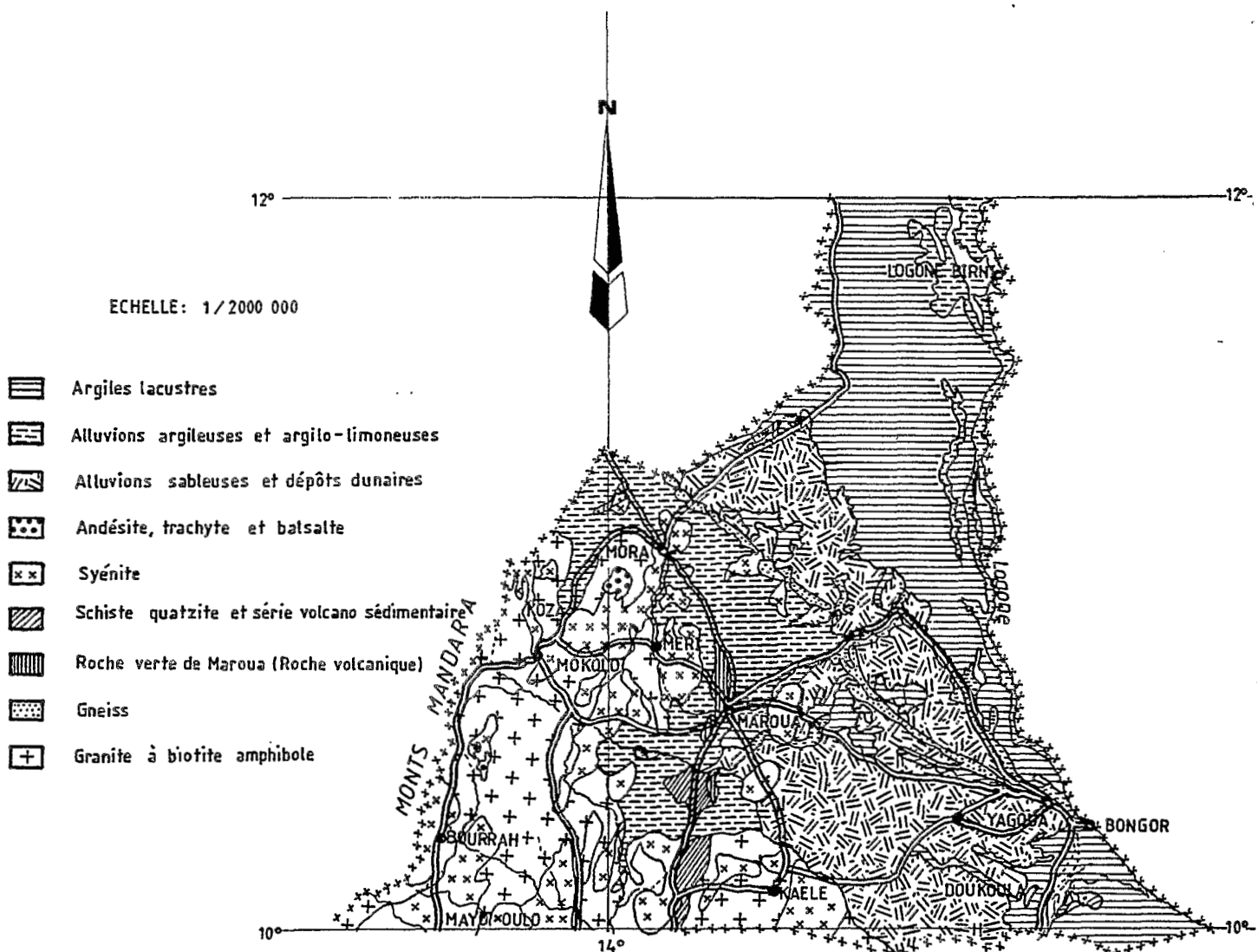


Fig.1.11 ESQUISSE GEOLOGIQUE (D'après P. BRABANT et AL., 1984)

Du point de vue géomorphologique, ainsi que nous l'avons noté précédemment, deux ensembles bien distincts définissent le paysage de la région :

- la plaine comprenant plusieurs entités dont la dépression tchadienne, le glacis sableux à l'est d'une ligne Maroua-Kaélé, la pénéplaine à inselbergs dont les collines de Mouda, la plaine alluviale de piémont,

- les Monts Mandara comprenant des plateaux d'altitude et des ensembles montagneux.

Deux entités géologiques de caractères très différents se dégagent, ce sont le sédimentaire et le socle (bouclier précambrien). Ils occupent la presque totalité de la région étudiée.

Les roches volcaniques pour leur part ne se retrouvent qu'à l'état de placages réduits et de petites intrusions.

Le sédimentaire.

Il comprend des formations superficielles de faible étendue issues du socle, et des formations du sédimentaire tchadien beaucoup plus importantes.

Le sédimentaire superficiel occupe les positions hautes dans la pénéplaine, on le retrouve sous forme de lambeaux latéritiques (continental terminal) et de terrasses de cailloutis de quartz et de pisolithes.

Les formations tchadiennes sont composées d'alluvions du Logone-et-Chari et des mayos des Monts Mandara, des argiles lacustres et des sables anciens. Le paysage sédimentaire de la région est dominée par le karal (argile noire tropicale de type montmorillonite dans la vaste zone inondable des yaérés) et la grande dune (formée de sables anciens) qui traverse la région en écharpe de Limani à Yagoua sur 150 km de long et de 0,5 à 4 km de large. Cette dune matérialiserait les rives du dernier paléo-Tchad (cf. figure 1.1 en début de première partie).

Le socle.

Le socle, ennoyé sous le sédimentaire tchadien, affleure de façon continue des zones montagneuses de l'Ouest jusqu'à la pénéplaine du Sud. Il apparaît de façon sporadique sous forme d'inselbergs dans la zone centrale.

Le groupe vulcano-sédimentaire de Maroua (orienté 10° Est) avec une extension de 80 km de long et 10 km de large présente des traces de métamorphisme plus ou moins nettes (ensemble épimétamorphique).

De ce groupe, il s'est dégagé des termes orientés (schistes tufacés, cinérites, quartzites sériciteux) et des termes massifs (diabases, andésites, dacites, rhyodacites).

Dans les collines de Mouda, ce sont les termes massifs acides et les quartzites qui paraissent dominer.

Le socle a été le siège, au précambrien, de métamorphisme (dit mésozonal) qui a induit deux séries différenciées :

- la série non migmatique, assez localisée comporte essentiellement des gneiss divers, des quartzites comme ceux de Gazal, des leptynites;

- la série migmatique forme l'essentiel des Monts Mandara. Elle est formée de granites et de roches qui leur sont associées : gneiss embréchites, anatexites, granites d'anatexie.

Le socle affleure également sous forme d'intrusions plutoniques.

On peut citer le Rocher de Gréa, le Massif de Balda (granite dominant), les complexes de Mouhour et de Waza et le pic de Mindif (syénite dominante) comme étant représentatifs de ce socle intrusif.

Les roches volcaniques.

Les épanchements volcaniques les plus fréquents sont les trachytes (plateau des Kapsikis dans les Monts Mandara) et les basaltes (Sud-Ouest des Kapsikis).

Ces roches se présentent sous forme de pointements, de filons et d'aiguilles élancées correspondant sans doute à une activité volcanique ancienne de type péléen.

1.4. SOLS ET VEGETATION.

1.4.1. Sols.

La pédogenèse au Nord-Cameroun, beaucoup plus diversifiée que dans les parties Sud et Ouest du pays, est influencée principalement par 3 facteurs (J. Embrechts, 1978) :

- le climat, à saison sèche prononcée, donne lieu à une pédogenèse ferrugineuse : sols moins profonds que dans la zone ferralitique du Sud, conservation d'une réserve de minéraux altérables, et lessivage d'argile. Au Nord-Cameroun les sols ferrugineux constituent les sols zonaux.

- la nature de la roche mère oriente dans une grande mesure l'évolution pédologique. Sur matériaux acides les sols évoluent vers des sols ferrugineux lessivés en position de bon drainage, et vers des sols hydromorphes à pseudogley s'ils sont saisonnièrement inondés. Sur matériaux basiques riches en fer, l'évolution pédologique aboutit à la formation de sols fersiallitiques en conditions de bon drainage et, de vertisols, de sols sodiques ou de sols hydromorphes à gley si le drainage est mauvais.

- la position topographique, troisième facteur important de la pédogenèse, joue un rôle très important sur le degré d'érosion et les conditions de drainage des sols.

Brabant et Gavaud (1985) regroupent les sols du Nord-Cameroun en 60 unités cartographiques (U.C).

L'unité cartographique peut être constituée de deux ou d'une seule catégorie de sols, mais elle est surtout caractérisée par le modelé, le matériau originel et la végétation, la situation climatique et topographique générale.

Les unités cartographiques ainsi définies peuvent se regrouper géographiquement en paysages pédologiques; Brabant et Gavaud en distinguent cinq :

- les sols squelettiques des paysages montagnards,
- les sols évolués des pédiments et des glacis d'altération,
- les sols des glacis colluviaux,
- les sols exondés des alluvions anciennes,
- les sols des alluvions récentes et actuelles.

Le paysage pédologique dominant à Mouda est celui des sols évolués des pédiments et de glacis d'altération. Ces sols appartiennent à deux unités cartographiques.

Le plateau du versant ouest de Mouda est dominé par les sols de l'unité n° 18 ayant pour dénomination :

caténas des pédiments ondulés et disséqués à buttes-témoins cuirassés; sur granite, gneiss, anatectite, micaschiste. sols ferrugineux tropicaux; sols lessivés tropicaux et planosols dominants - à cuirasse résiduelle - à planosols molliques.

L'unité n° 29 définie ainsi :

combinaison ou mosaïque à faciès varié de sols des pédiments aplanis, localement très ravinés sur diverses roches basiques, vertisols à pédoclimat sec, localement associés à des sols fersiallitiques, phase érodée fréquente, faciès dégradé : planosolique, solonetzique (hardé) occupe la vallée de Mouda.

Les sols de la bordure Est du bassin sont rattachés au paysage pédologique des sols squelettiques des paysages montagnards. Les sols de cette petite frange du bassin sont définis par l'unité cartographique n° 8 :

sols des hautes collines et des massifs montagneux sur basaltes, andésite, dolérite, calcoschiste, sols régosoliques à faciès fersiallitique dominant, localement vertique.

En terme de contraintes et d'aptitudes des terres, la dégradation de la plupart des catégories des sols en vastes étendues de terre non cultivable et stérile (hardé en fufuldé) est une constante dans le paysage de notre secteur d'étude.

La quasi généralisation de la pellicule de battance sur ces sols de glacis, entraîne un régime hydrique médiocre caractérisé par une faible perméabilité des horizons de surface et une forte érosion, offrant un paysage de bad-lands présentant des ravines et des griffes d'érosion parfois spectaculaires (Brabant et Gavaud, 1985).

1.4.2. Végétation.

La végétation naturelle de la région s'est adaptée en se diversifiant aux conditions édaphiques étudiées ci-dessus.

Letouzey (1978), dans sa subdivision du Nord-Cameroun en secteurs phytogéographiques, situe notre zone d'étude dans le secteur phytogéographique sahélo-soudanien.

La végétation de Mouda est formée par une steppe à épineux où l'on trouve des éléments soudaniens et des éléments sahéliens. Les éléments soudaniens se retrouvent généralement dans les champs et cultures et forment des forêts claires; ce sont : *Acacia albida*, *Balanites aegyptiaca*, *Vétis integrifolia*, *Tamarindus indica*, *Ziziphus spinachristi*, etc...

Les éléments sahéliens, dont la pénétration dans ce secteur est le fait de dégradations anthropiques, peuplent les sols grisâtres sablo-argileux en surface et argileux en profondeur (hardés); ce sont : *Acacia seyal*, *Acacia senegal*, *Boscia senegalensis*, etc...

La végétation herbacée se trouve sous forme de tapis entre les fourrés d'épineux. Elle est constituée d'espèces annuelles :

Schoenelfedia gracilis, *Loudetia togoensis*, *Schizachyrium exile*, etc... qui habituellement ne peuplent l'espace que pendant la seule durée de la saison des pluies.

Les rythmes de la végétation herbacée sont liés en grande partie à la nature du substrat (sol) et les disponibilités hydriques de celui-ci.

L'augmentation croissante observée des éléments sahéliens dans cette zone est un élément marqueur parmi d'autres de la rupture des équilibres et de la dégradation en cours de l'écosystème.

1.5. GRANDS ENSEMBLES HYDROGRAPHIQUES.

1.5.1. Mayos des Monts Mandara.

Les rivières ou "mayo" issues des Monts Mandara (cf. figure 1.1, paragraphe 1.1) présentent un caractère torrentiel accusé dans leur partie montagneuse, les lits sont alors rectilignes avec des pentes très fortes. L'érosion est très active et sélective, elle laisse le sol à nu; les éléments moyens et fins sont emportés par le ruissellement, les mayos coulent alors à fleur de rocher.

Les caractéristiques d'écoulement de ces cours d'eau dans la plaine alluviale présentent un contraste très net avec la configuration précédente; ici les pentes ont fortement diminué, le lit mineur serpente au milieu d'un lit majeur de grande taille. Le caractère temporaire de l'écoulement est accentué vers l'aval par l'absorption de l'eau par les sables du lit; les rivières présentent alors des caractères deltaïques avec d'innombrables bras morts secs ou inondables.

La dégradation du réseau hydrographique est une constante du paysage de ces mayos dans leur zone de plaine alluviale. Tillement (1970) note par exemple que le cours inférieur du

mayo Tsanaga s'est déplacé de 10 km vers le Sud entre 1954 et 1963.

Les mayos les plus importants se dirigent vers la dépression tchadienne (yaérés) après avoir franchi l'ancien cordon littoral de Limani.

Leurs bassins d'alimentation en montagne, constituent le principal apport du ruissellement de surface. Les coefficients de ruissellement vont décroissant de la zone montagneuse vers la plaine (Naah, 1990).

Du Nord au Sud de notre région d'étude, les mayos Kéréwa, Kolofata, Ngansawé, Sava drainent la plaine alluviale de Mora. Les mayos Mangafé, Ranéo, Motorsolo, Tsanaga, Boula drainent la plaine du Diamaré.

Tous ces mayos, malgré leurs grands bassins d'alimentation (1535 km^2 pour le mayo Tsanaga à Bogo avant son épandage dans le Yaéré, 1517 km^2 pour le mayo Boula à Dargala) sont des cours d'eau temporaires avec écoulement quasi permanent de juillet à septembre (quand la saison des pluies est bien installée), et de larges lits de sable à sec le reste de l'année.

1.5.2. Mayos des glacis et des plaines.

D'innombrables mayos naissent d'une hiérarchisation des eaux de ruissellement à partir des glacis et des plaines qui les alimentent.

De tailles modestes (de l'hectare à moins de 50 km^2), leurs bassins présentent moins de dégradation hydrographique.

Le bassin du mayo Miyamloa ($18,1 \text{ km}^2$), objet de notre étude, rentre dans cette classe. Il prend sa source en rive gauche, sur le plateau ferrugineux de Gazal (altitude 496 m) et sur le glacis vertisolique de Midaoua (alt. 470 m) et en rive droite, sur le glacis vertisolique de Mouda à l'altitude 470 m.

Le mayo Miyamloa est l'un de nombreux affluents de 3ème ordre (classification de Schumm) du mayo Boula. Il se jette dans l'un des affluents en rive droite du mayo Boula à la cote 421 m. La confluence de cet affluent en rive droite avec le

lit principal du mayo Boula se trouve à 7,5 km (à Doubozo) de l'exutoire du Miyamloa.

Signalons qu'en dehors de ces deux entités du réseau hydrographique, à l'Extrême-Est de notre région coule le Logone dont l'écoulement est pérenne.

Le Logone constitue le tiers de l'alimentation en eaux du lac Tchad.

Les eaux souterraines de la zone se retrouvent dans plusieurs types de nappes (Olivry, 1986) :

- les nappes d'altération superficielle du socle, qui sont des petites nappes localisées, essentiellement alimentées par l'infiltration directe des eaux de pluie à l'amont des versants,

- les nappes de thalwegs secondaires (qui se constituent au moment des crues),

- les nappes de la cuvette tchadienne de plus grande étendue qui sont alimentées par sous-écoulement à partir des mayos des Monts Mandara ou du lit du Logone.

1.6. BASSINS VERSANTS DU MIYAMLOA OBSERVES DE 1988 A 1990.

1.6.1. Caractéristiques physiques.

Les bassins versants de Mouda constituent un ensemble de 5 bassins emboîtés. La présentation générale du réseau hydrographique a été faite au paragraphe 1.5.2 (voir aussi figure 1.5 du paragraphe 1.2.2.5).

Le mayo Miyamloa est le cours d'eau principal. Il est formé de 2 axes majeurs d'alimentation; le mayo Midaoua en rive gauche et le mayo Mouda en rive droite. Ces 2 mayos prennent respectivement naissance sur les glacis vertisoliques des villages de Midaoua et de Mouda. Ils drainent chacun deux bassins (1 en amont et 1 en aval).

Les cours de ces 2 mayos débutent généralement par des ravines d'érosion en forme de V avant de traverser dans leurs parties hautes des zones d'affleurement du socle (gneiss leptynitique, quartzite, schiste tufacé). Plus en aval, les berges peu encaissées délimitent des lits sableux, peu profonds et larges par endroits. Les 2 mayos traversent le layon CRA/IRA (Maroua) par 2 radiers submersibles (à la même altitude de 445 m) situés respectivement à 5,668 et à 4,335 km de leurs sources les plus amont. Les 2 radiers sont les exutoires naturels de leurs bassins aval. La confluence des 2 mayos est à moins d'un kilomètre des deux radiers : 0,765 km pour le mayo Midaoua et 0,871 km pour le mayo Mouda. Le mayo Miyamloa qui en naît, coule dans un lit assez sableux et profond avant d'atteindre son exutoire à 0,404 km plus en aval.

De 1988 à 1990, le "grand ensemble de Mouda" (18,1 km²) est composé des bassins suivants :

en rive gauche

(i) le mayo Midaoua à st amont, (ii) le mayo Midaoua à st aval,

en rive droite

(iii) le mayo Mouda à st amont, (iv) le mayo Mouda à st aval

(v) le mayo Miyamloa à Mouda est l'exutoire général du système.

(st est employé pour station)

Les principales caractéristiques physiques des bassins étudiés ont été déduites de la carte de Maroua 1c au 1/50.000 et du fond topographique au 1/21250 du bassin versant de Mouda (CEE, 1988). Elles sont rassemblées dans le tableau 1.14.

Bassin du mayo	MIDAOUA à st amont	MIDAOUA à st aval	MOUDA à st amont	MOUDA à st aval	MIYAMLOA à Mouda
lettre bassin	A	B	C	D	E
coord.géog.					
Lat N	10°21'28"	10°22'55"	10°21'52"	10°22'51"	10°23'50"
Long E	14°12'25"	14°13'04"	14°13'16"	14°13'10"	14°13'17"
Alt. exut.(m)	460	445	458	445	438
Alt. max. (m)	477	496	470	580	580
Superf. (km ²)	3,73	9,24	2,5	6,37	18,1
Périm. (m)	7,01	13,4	6,4	11,1	18,7
Long. rec.équi. (m)	-	4,72	1,81	3,92	6,6
larg. rec.équi (m)	-	1,96	1,38	1,63	2,74
Coef. comp.	1,01	1,23	1,13	1,23	1,23
déniv. tot. (m)	17	51	12	135	142
Pente. moy. (%)	0,77	1,08	0,66	3,44	2,15
m/km	7,7	10,8	6,63	34,4	21,5

Tableau n° 1.14. Caractéristiques physiques
des bassins versants de Mouda

Les superficies sont assez modestes, elles sont données ci-dessous en km^2 :

Midaoua amont : 3,73; Midaoua aval : 9,24

Mouda amont : 2,5; Mouda aval : 6,37

Miyamloa à Mouda : 18,1.

Le coefficient de compacité (k_c) a 3 valeurs : 1,01 pour le Midaoua amont; 1,13 pour le Mouda amont et 1,23 pour les 3 bassins aval. La valeur de $k_c = 0,28PA^{-1/2}$ est égale à 1 pour un bassin circulaire et croît au fur et à mesure que la déformation s'accroît. La forme de Midaoua amont s'apparente à un cercle de rayon $R = 1,09 \text{ km}^2$, Mouda amont présente également une forme très ramassée et compacte. Les bassins aval ont des formes plus allongées. Les caractéristiques de forme influencent les temps de transfert.

La pente moyenne I est égale au rapport D/L où D et L sont la dénivelée du bassin et la longueur du rectangle équivalent. I représente pleinement le relief d'un bassin quand la superficie de celui-ci n'excède pas 500 km^2 (Dubreuil, 1965). Les valeurs de I sont assez faibles pour les bassins du mayo Midaoua et celui du mayo Mouda amont, et légèrement élevées pour le mayo Mouda aval et le Miyamloa; ceci s'explique par la présence des collines dans le flanc Est du bassin. Notons toutefois que ces fortes valeurs de I n'influencent pas le ruissellement, la zone la plus perméable du système étant située dans cette partie du bassin (voir paragraphe 2.4.2.2 du chapitre 2).

Les pentes dans le bassin sont en général très faibles. Pendant la saison des pluies et entre deux averses, les lits des cours d'eau peuvent constituer des réserves importantes d'eau stagnante utilisées pour les usages domestiques et pour le bétail.

1.6.2. Réseau de mesures hydro-pluviométriques.

La pluie et l'écoulement sont les termes du cycle de l'eau les plus faciles à mesurer. Dans un réseau classique de mesures tel que le nôtre, leurs valeurs dans le temps et l'espace sont fournies pour la pluie, par le pluviomètre "Association" et le pluviographe et pour les écoulements par l'échelle

limnimétrique et le limnigraphe. A cause de la brièveté des événements "averse-crue" dans nos bassins, tous les enregistreurs sont à rotation journalière.

Le tableau n° 1.15 présente les caractéristiques du réseau opérationnel en 1990.

Bassin du mayo	MIDAOUA à st amont	MIDAOUA à st aval	MOUDA à st amont	MOUDA à st aval	MIYAMLOA à Mouda
Superf. (km ²)	3,73	9,24	2,5	6,37	18,1
Nombre pluviom.	1	5	1	2	9
Nombre pluviog.	1	2	0	1	3
Caract. échelle	2 m	2 m	2 m	2 m	5 m
Caract. limnig.	D = 24 h R = 1/5	D = 32 h R = 1/10	D = 24 h R = 1/5	D = 24 h R = 1/5	D = 32 h R = 1/10

Tableau n° 1.15. Caractéristiques du réseau de mesures en 1990
(D = durée de révolution, R = réduction des hauteurs)

Les réseaux hydrographiques et de mesures des bassins de la rive gauche sont présentés sur les figures 1.12 et 1.13; ceux de la rive droite sur les figures 1.14 et 1.15.

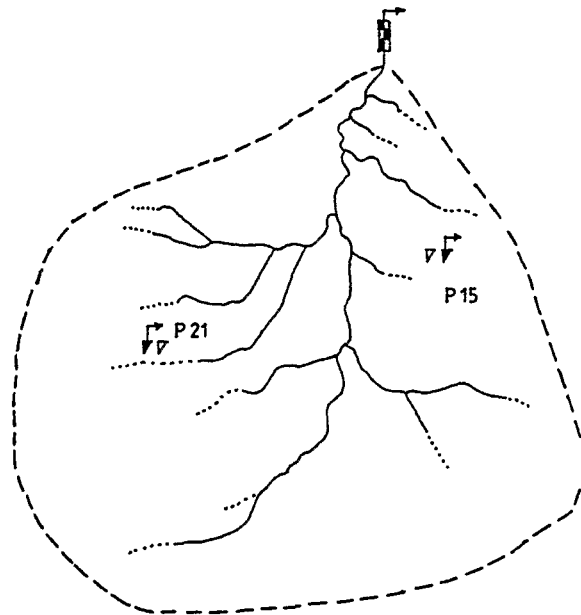


Fig • 1.12 BASSIN VERSANT DE MIDAOUA AMONT

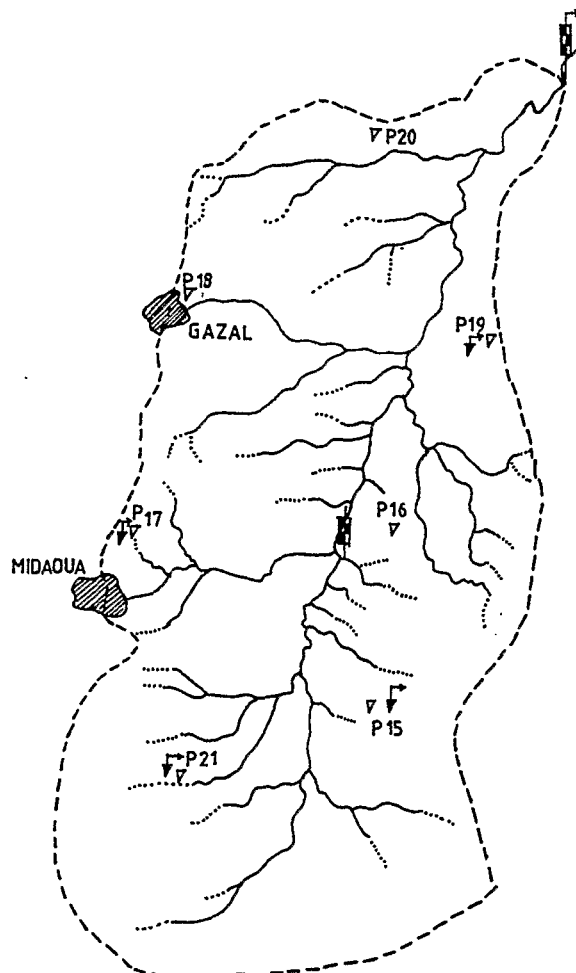
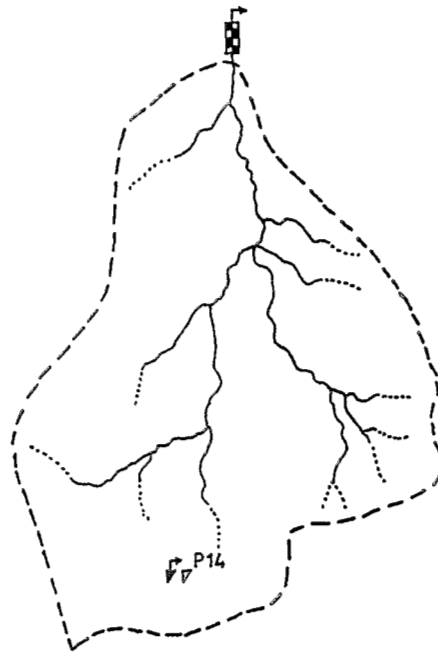


Fig • 1.13 BASSIN VERSANT DE MIDAOUA AVAL

CARTES D'ÉQUIPEMENT HYDROPLUVIOMETRIQUE

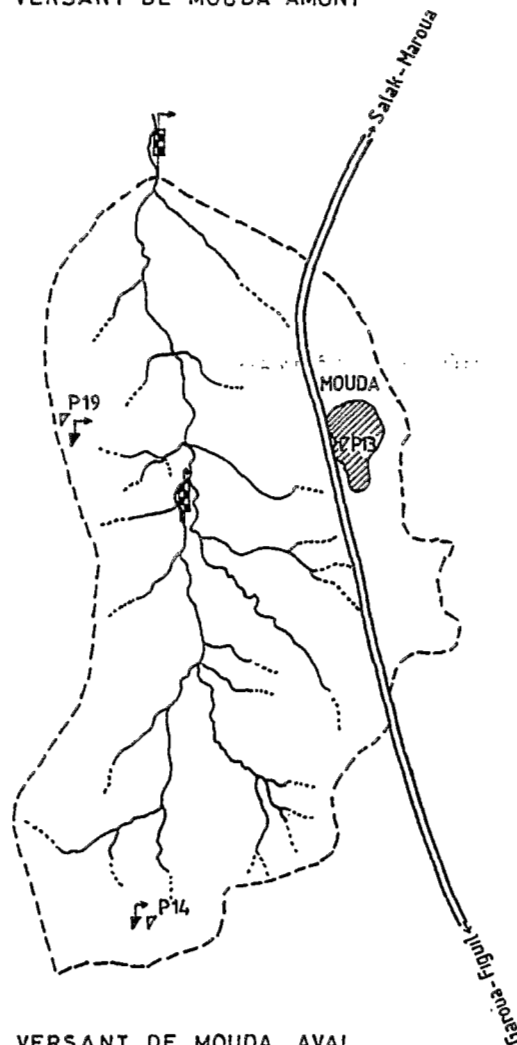


0 212,50 850 Km



 Limnigraphie
 Pluviomètre
 Pluviographe

Fig - 1.14 BASSIN VERSANT DE MOUDA AMONT



0 212,50 850 Km

Fig - 1.15 BASSIN VERSANT DE MOUDA AVAL

CARTES D'EQUIPEMENT HYDROPLUVIOMETRIQUE

CHAPITRE 2

IDENTIFICATION ET ETUDE DES MODELES DE FONCTIONNEMENT HYDROLOGIQUE (HYDRO-SEQUENCES) DANS LES BASSINS VERSANTS DE MOUDA

2.1. PROBLEMATIQUE.

Plusieurs études récentes, entre autres celles menées par l'ORSTOM (Albergel, 1988 ; Casenave et Valentin, 1989 ; Collinet et al., 1980 ; Thébé, 1987 ; etc...) montrent que les facteurs conditionnels de l'hydrodynamique superficielle des sols de la zone soudano-sahélienne sont par ordre d'importance :

(i) la pluie et ses caractéristiques (hauteur, intensité, fréquence)

(ii) les états de surface (organisations pédologiques superficielles)

(iii) l'état de la végétation (recouvrement des herbacées).

Le secteur de Mouda, fortement anthropisé, a une toposéquence caractéristique de la région schématisée par les (i) sols fersiallitiques de colline, (ii) vertisols et hardés de plaine, (iii) ferrugineux de plateau.

L'étude de ce bassin-test, représentatif de la zone des glacis des Monts Mandara et de la plaine du Diamaré porte sur le milieu (état et bilan des ressources en eau et sol) et son évolution (étude des facteurs de dégradation du milieu et conservation des ressources).

Le ruissellement et l'infiltration (par alimentation et recharge du stock hydrique des sols) sont les termes qui caractérisent le mieux l'hydrodynamique des sols de notre zone d'étude.

Les sécheresses récentes et l'anthropisation excessive du milieu ont favorisé, sur la majorité des types de sols, la prédominance du ruissellement sur l'infiltration.

Les effets du ruissellement rapide peuvent accélérer la dégradation du milieu.

Nous nous proposons, dans cette partie de notre travail, d'analyser les relations existant entre le ruissellement et

l'évolution saisonnière dans l'espace des principaux facteurs conditionnels de l'hydrodynamique superficielle.

Certaines interrogations sont soulevées.

* Peut-on, à une période donnée de la saison, mettre en évidence la prédominance d'un facteur ou d'un groupe de facteurs sur les autres par rapport à la production du ruissellement rapide à l'exutoire ?

* Peut-on identifier, dans l'espace, des unités (sol-végétation-eau) qui favoriseraient plus ou moins le ruissellement suivant l'avancement de la saison des pluies ?

Notre objectif est de proposer des modèles de fonctionnement hydrologique. Nous les appellerons aussi "hydro-séquences".

Différentes échelles d'observations des processus hydro-pluviométriques vont être considérées : parcelles (1 m^2) sous pluies naturelles, versant (0,3 ha), mini-bassin (5,87 et 53,8 ha) et seront prises en compte pour l'essai de partage du temps et de l'espace.

Les sous chapitres 2.2 et 2.3 ont été rédigés à partir d'un rapport de recherche à la CEE (1988). Ce rapport, dont mention a été faite dans le chapitre consacré à l'introduction de ce mémoire, rassemble les résultats de recherche d'une équipe pluridisciplinaire sur le thème : "Utilisation et conservation des ressources en sol et en eau au Nord-Cameroun".

2.2. METHODES D'IDENTIFICATION.

Le principe de la méthode d'étude écologique du milieu (système sol-végétation-climat) qui a été retenue est une approche écosystémique (Floret et al., 1981).

Cette démarche différencie plusieurs niveaux de perception écologique :

- la région écologique
- le secteur écologique

- le système écologique.

Le climat et l'utilisation du sol définissent la région écologique. Entité homogène, elle est subdivisée en secteurs écologiques (séquence sol-végétation).

Le secteur écologique à son tour est divisé en systèmes écologiques.

Le système écologique est la plus petite unité écologique où il y a homogénéité de la végétation. Ici les actions de l'homme et des autres êtres vivants du milieu sont le mieux perçues. Le système écologique est l'unité sol-végétation et son utilisation par l'homme.

Les figures 2.1a et 2.1b montrent la carte des systèmes écologiques du bassin versant de Mouda.

Quinze systèmes écologiques ont été répertoriés et regroupés en quatre secteurs écologiques :

- le secteur des collines sur roches vulcano-sédimentaires, et des versants de raccordement (FS3, FS2, fs)
- le secteur des glacis couverts à pente douce (VM2, VM1, vm, VD, vd, HV et HN)
- le secteur du plateau ferrugineux (FR2, FR1, fr et HF)
- le secteur ripicole (A)

Les systèmes écologiques sont représentés par des sigles composés d'une ou de deux lettres, souvent suivies d'un chiffre indiquant l'indice de dégradation. L'indice le plus faible est affecté au système le plus dégradé.

Les différents écosystèmes sont répartis le long de la toposéquence-type de Mouda (fig. 2.2).

Le fonctionnement hydrologique du bassin peut être appréhendé à partir de ses composantes superficielles spatialisées; les cartes des systèmes écologiques constituent alors des indicateurs de la définition spatiale et temporelle des modèles de fonctionnement hydrologique (hydro-séquences).

En dehors des parcelles de 1 m², trois "hydroséquences-types" ont été retenues pour la recherche d'une dynamique saisonnière des relations pluie-débit sur le bassin de Mouda.

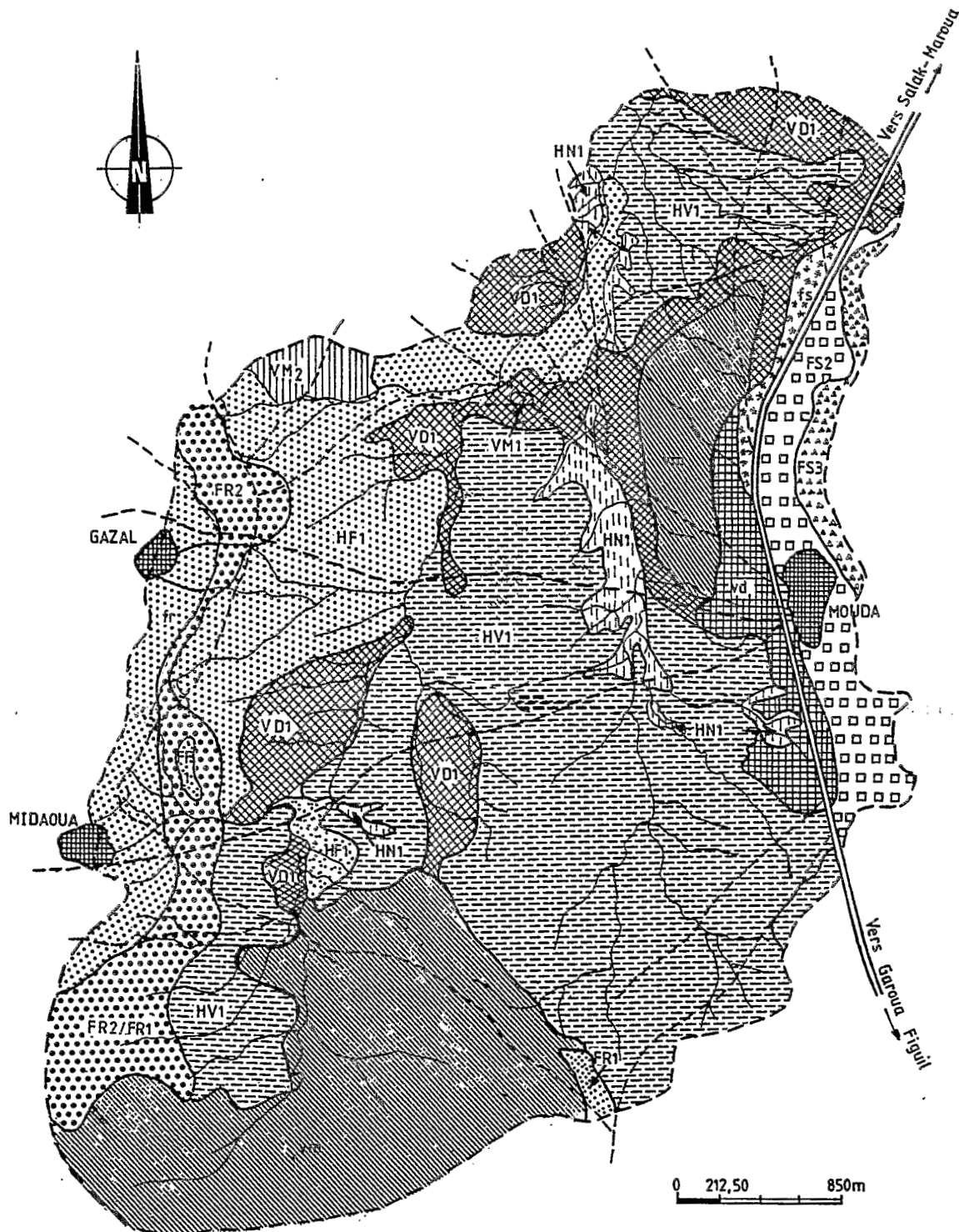


Fig.2.1a CARTE DES SYSTEMES ECOLOGIQUES DE MOUDA

(CEE, 1988)

SIGLES DES SYSTEMES		FS3	FS2	fs	VM2	VM1	vm	VO	vd	HV	HN	HF	fr	FR2	FR1	A
RELIEF LITHOLOGIE GEOMORPHOLOGIE (SECTEURS ECOLOGIQUES)		Collines et versants de r. cordement - pente 5 à 30% altitude 450/600m série vulcano-sédimentaire de MAROUA Roches basiques et affleurements de roches acides			Glacis couvert à pente douce 3 à 1%. Façonné sur des argiles sombres à nodules calcaires; griffes et bad-lands à l'aval et à proximité des axes de drainage. Altitude: 440 / 460m						Pénéplaine avec bombements gneiss et quartzite. Pente: 7 à 1% Altitude: 500 / 450 m				Lits mineur majeur et terrasses du Mayo Alluvions 400 - 450m	
SOLS	TYPE PEDOLOGIQUE DOMINANT	Sols peu évolués à faciès fersiallitique (Régosoliques) vers le bas, sols fersiallitiques à faciès vertique			Vertisol à pédoclimat sec			Vertisol à pédoclimat sec Faciès dégradé planosolique localement hardé (solonetz)			Idem faciès dégradé régosolique (hardé)		Sols ferrugineux différenciés et indurés (charge importante) Localement faciès planosolique dégradé en hardé (HF1)			Sol peu évolué alluvial
	RUISSELLEMENT EROSION	Ruissellement et érosion faible très localisé			Faible érosion Ruisselle - ment fort si saturé en sur-face			Très fort ruissellement pouvant dépasser 50 %			Très fort ruiss. Ravins griffes		Ruissellement et érosion moyens; très sensibles si cultures			Faible
	EFFICACITE MOYENNE DES PLUIES	90 - 100		80-90	75 - 80		80- 90	50-70	65- 80	20 - 50			90 - 100	80 - 90	80-90	
	R.U (mm / 50 cm)	30 / 60	70 / 80		70 / 80			60 / 70		50 / 50	60 / 70	30 / 40	35 / 50		60 / 70	
ACTIVITES HUMAINES	HABITAT, POINT D'EAU	Habitat, dense, quartiers (puits temporaires)			Pas d'habitat						Pas de point d'eau			Habitat dense (villages) qq. puits temporaires		néant qq. puits
	UTILISATION DES TERRES	Parcours bois	Plantations forées - tieres	cultures jachère coton, mil de saison	parcours bois	jachère ancienne parcours	culture sorgho de contre - saison régulier	parcours bois	culture coton, sorgho contre saison jachère	Utilisation faible parcours et cueillette du bois			culture saison jachère coton S.A.	parcours cueillette du bois	parcours	
VEGETATION SPONTANEE	TYPE PHYSIONOMIQUE (FORMATION)	Savane arborée et herbeuse		savane - parc; herbacées chaumes	Savane arbustive à épineux		culture ou chaume	savane arbustive à épineux	culture ou chaume	Savane arbustive très claire			culture ou chaume	savane arborée	savane arbustive	Ripisylve
	ESPECES LIGNEUSES	Boswellia dalzielii Sterculia setigera A. leiocarpus C. glutinosum		A. albida Pilio - stigma reticulata	(sauf vm et vd)		Acacia hockii		Anogeissus leiocarpus						A. leiocarpus D. mospiloforetum	
	DOMINANTES				Acacia seyal comb. glom. Dich. glom.	Acacia seyal pilius reticulata		Ziziphus mauritiana Dichrosta- chys glome- rata		Dichrosta- chys combretum glutinosum	Glomera Combretum fragrans	Lannea humilis Sclero carya birrea		A. leiocar- pus S. birrea S. setigera	C. glutinosum Anona sene- galensis Preticulata	
	ESPECES HERBACEES	Andropogon gayanus			Loudetia togoensis						Loudetia togoensis					
	DOMINANTES	Thelepogon elegans		L. togoensis	Andropogon gayanus			Schoenel glacilis Chloris lampropa- ria		S. gracilis Michrochloa indica Aristida sp	Schizachy- rium exile Chloris lampropa- ria	Dactylocte- rium aegyptium Brachiaria stigma		Sporobolus festivus Cassia mimosoides	Setaria pumila	Pernisetum Pedicelatum
	ETAT DU COUVERT VEGETAL	très bon	bon	faible sauf si culture	assez bon		bon	faible sauf à culture	moyen	faible			très bon	bon	très bon	
	% COUVERT DES PERENNES	40-50	25-30	5	20-30	20-30	20-30	5	20	5-7	15	5-8	7	30-50	30-40	40 - 60
SURFACE - en ha - en %		18,5 1,1	106 5,9	12,5 0,7	348 19,2			225 12	55 3,0	603 33,3	62 3,4	205 11,3	69 3,8	106 5,9		

Fig.2.1 b (suite)LEGENDE DE LA CARTE DES SYSTEMES ECOLOGIQUES DU BASSIN VERSANT DE MOUDA
(CEE, 1988)

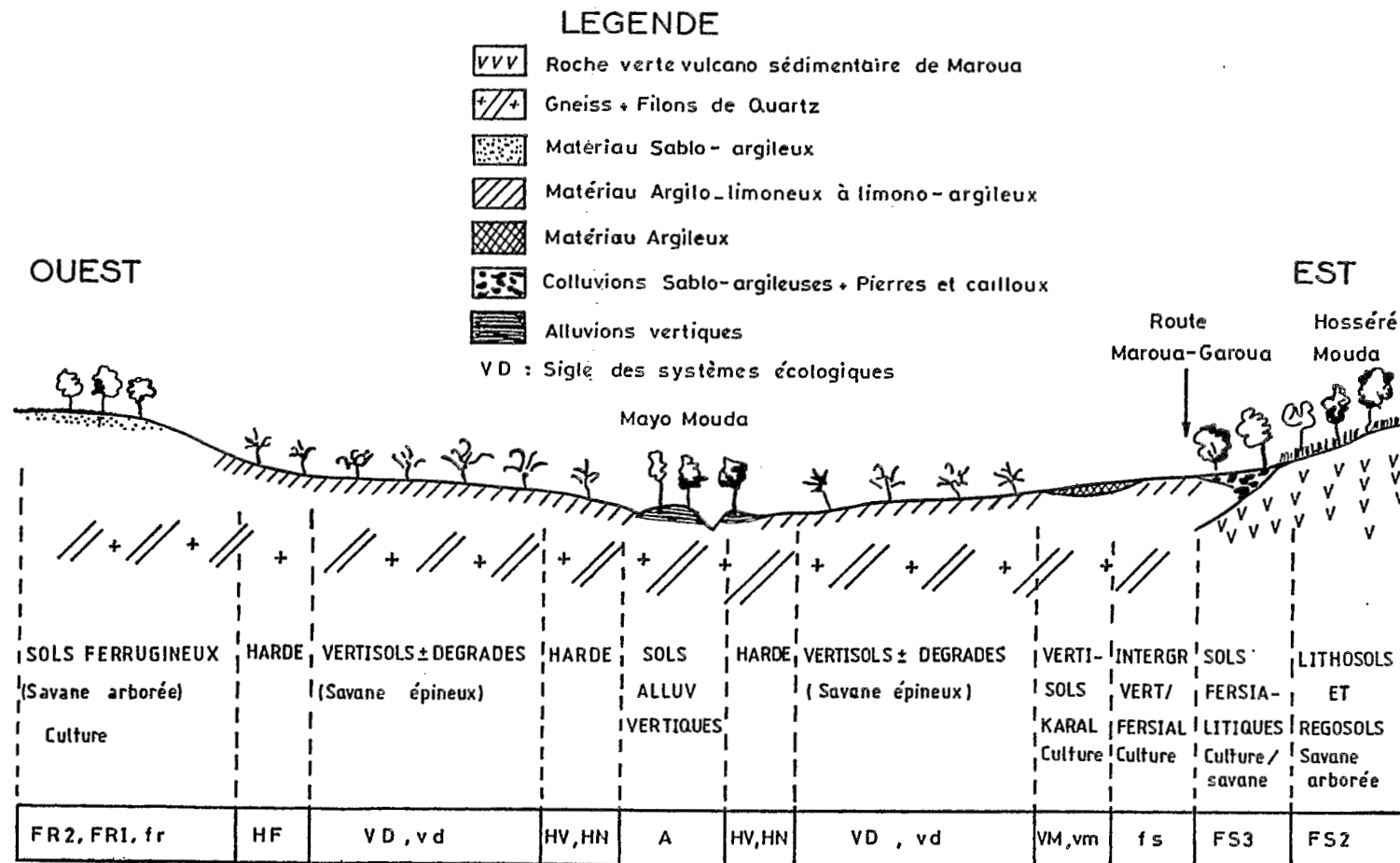


Fig. 2-2 SYSTEMES ECOLOGIQUES DE MOUDA

2.3. PRINCIPALES CARACTERISTIQUES PEDOLOGIQUES ET ETATS DE SURFACE DES MILIEUX ETUDIES.

Notre description des principaux milieux rencontrés dans les bassins de Mouda privilégie les états de surface du sol. En effet, les résultats acquis des mesures sous pluies simulées au cours des dix dernières années dans la zone soudano-sahélienne (Collinet et Lafforgue, 1979; Valentin, 1981) ont permis d'y mettre en évidence l'influence déterminante des états de surface sur le comportement des sols vis-à-vis de l'eau.

Casenave et Valentin (1988) ont précisé ce qu'il faut entendre par état de surface. Un état de surface peut désigner :

un ensemble de (i) surfaces élémentaires uniques, (ii) juxtaposées, (iii) ou combinées.

La surface élémentaire est la plus petite surface homogène qui intègre les éléments du milieu suivants : le couvert végétal, la surface du sol et les organisations pédologiques superficielles qui ont subi des transformations.

Le secteur écologique des glacis couverts à pente douce est le plus représenté à Mouda (71,9 % du bassin). Les sols de ce secteur sont constitués de la séquence des vertisols (fig. 2.2).

La majorité des observations (descriptions et analyses) ont été faites sur sites et sur parcelles élémentaires de 1 m².

Nous rappellerons les caractéristiques de surface des séquences vertisolique, ferrugineuse, fersiallitique, puis celles de trois modèles de fonctionnement hydrologique.

Les données sur les "hydro-séquences" que nous nous proposons d'étudier ont été recueillies à l'issue des campagnes de mesures hydro-pluviométriques courantes sur trois versants de petite taille faisant partie du système de Mouda. La particularité de ces versants est de présenter chacun l'un ou l'autre des états de surface-type de Mouda. Ceci permet la spatialisation de l'étude de la dynamique saisonnière du ruissellement.

Il ne sera pas fait mention, dans la description des états de surface de ceux des sols du secteur ripicole. Notons qu'il s'agit des sols peu évolués, alluviaux. Ils constituent les lits mineur et majeur et les terrasses du mayo. Ils présentent des risques d'inondation fréquente.

2.3.1. La séquence des vertisols.

2.3.1.1. Vertisols modaux (VM2, VM1, vm)

Ce sont des vertisols "naturels". Dans le bassin, ils sont localisés à mi-pente du glacis reliant la colline de Mouda et le mayo Mouda. Ils sont caractérisés par une teinte gris foncé à noir. La teneur en argile est constante dans tout le profil (40 à 50 %) et de type essentiellement smectitique. Ce dernier élément confère aux vertisols modaux leurs principales caractéristiques de surface : surface craquelée par de larges fentes de retrait (2-3 cm) pendant la saison sèche formant un réseau polygonal allant jusqu'à 1 mètre de profondeur; micro relief bosselé (type "gilgai"); gonflement en saison pluvieuse. Il existe localement des éléments de pellicule de battance sur des surfaces réduites n'excédant pas le dm^2 . Le réseau de fentes constitue la macroporosité de ces sols à l'état sec.

La végétation herbacée est formée par *Andropogons gayanus* et *Loudetia togoensis* qui assurent un recouvrement de 100 % (sur site étudié) pendant la saison de la végétation.

Ces sols représentent 19,2 % de la surface du bassin du Miyamloa (voir figures 2.1a et 2.1b).

2.3.1.2. Vertisols dégradés (VD, vd)

Les états de surface de ces sols présentent déjà les signes de dégradation : faible expression des caractères vertisoliques marquée en surface par un micro relief plat et des rares fentes de retrait. La pellicule de battance, assez épaisse (3 mm) et développée (recouvrement de 60 % de la parcelle de 1 m^2) alterne avec les plages sableuses. Le fait marquant ici

est l'enrichissement en sable et l'appauvrissement en argile des cinq premiers centimètres du sol.

La végétation herbacée est dominée par *Loudetia togoensis* et *Chloris lamproparia*.

Les vertisols dégradés occupent 15 % du bassin (voir figures 2.1a et 2.1b).

2.3.1.3. Sols "hardé" (HV)

Le terme "hardé" en "fufuldé" (langue peuhl du Nord-Cameroun) désigne tout terrain, généralement à faible végétation arbustive et graminéenne, à très forte compacité et très peu perméable, et duquel l'agriculteur sait qu'il ne tirera qu'une récolte très médiocre (Vaille, in Seiny, 1990).

Cette définition des hardés traduit l'expression des caractéristiques de la surface du sol et s'applique à certains vertisols.

La pellicule de battance est généralisée, localement renforcée par la présence de lichens et d'algues de couleur sombre. La surface est lisse, sans aspérités.

La profondeur de dégradation atteint 20 cm où l'on note l'absence de structure, de pores et d'activité biologique. Les nodules calcaires (autre caractéristique de la séquence des vertisols) apparaissent à plus faible profondeur (40-50 cm).

Le recouvrement de la strate herbacée pérenne dominée par *Schoenfeldia gracilis*, *Microchloa indica* et *Aristida hordeacea* ne dépasse guère les 5 à 7 %.

Les hardés se retrouvent à proximité de l'axe de drainage de la cuvette de Mouda et occupent 33,3 % du bassin (voir figures 2.1a et 2.1b).

2.3.1.4. Régosols sur matériaux à nodules calcaires (HN)

Ces sols correspondent au stade ultime de la dégradation des vertisols. L'érosion en nappe a décapé le sol jusqu'à l'horizon à nodules calcaires. Les caractères vertisoliques de ces sols n'existent plus en surface : fentes de retrait en saison sèche et phénomènes de gonflement ont disparu. Cependant la pellicule de battance est moins développée que

sur les deux stades de dégradation précédents. La structuration, la rugosité et la porosité de la surface sont meilleures que celles du vertisol dégradé et du hardé. Ceci entraîne suivant les années un développement relativement important des herbacées (*Schizachyrium exile* et *Chloris lamproparia*).

Les régosols sont observés le long des axes de drainage du mayo et forment des paysages de "bad-lands" (ravines et griffes d'érosion). Ils représentent 3,4 % de la surface du bassin (voir figures 2.1a et 2.1b).

Conclusion sur la description des caractéristiques de surface de la séquence dégradée des vertisols.

Les sols de cette séquence représentent 71,9 % de la surface du bassin du Miyamloa.

La dégradation des vertisols est essentiellement superficielle et physique (Seiny, 1990). Selon Gavaud (1971), les processus de dégradation sont d'abord d'origine anthropique avant d'être relayés par l'érosion hydrique. Ces processus se traduisent par une perte de structure; d'abord prismatique, elle devient polyédrique puis massive. Il y a un développement quasi généralisé de la pellicule de battance. Le résultat est une modification importante du fonctionnement hydrodynamique de ces sols.

L'imperméabilisation des structures de surface et l'absence de la végétation herbacée privilégient les processus du ruissellement sur ceux de l'infiltration.

La figure 2.3 montre le schéma simplifié de la dégradation des vertisols.

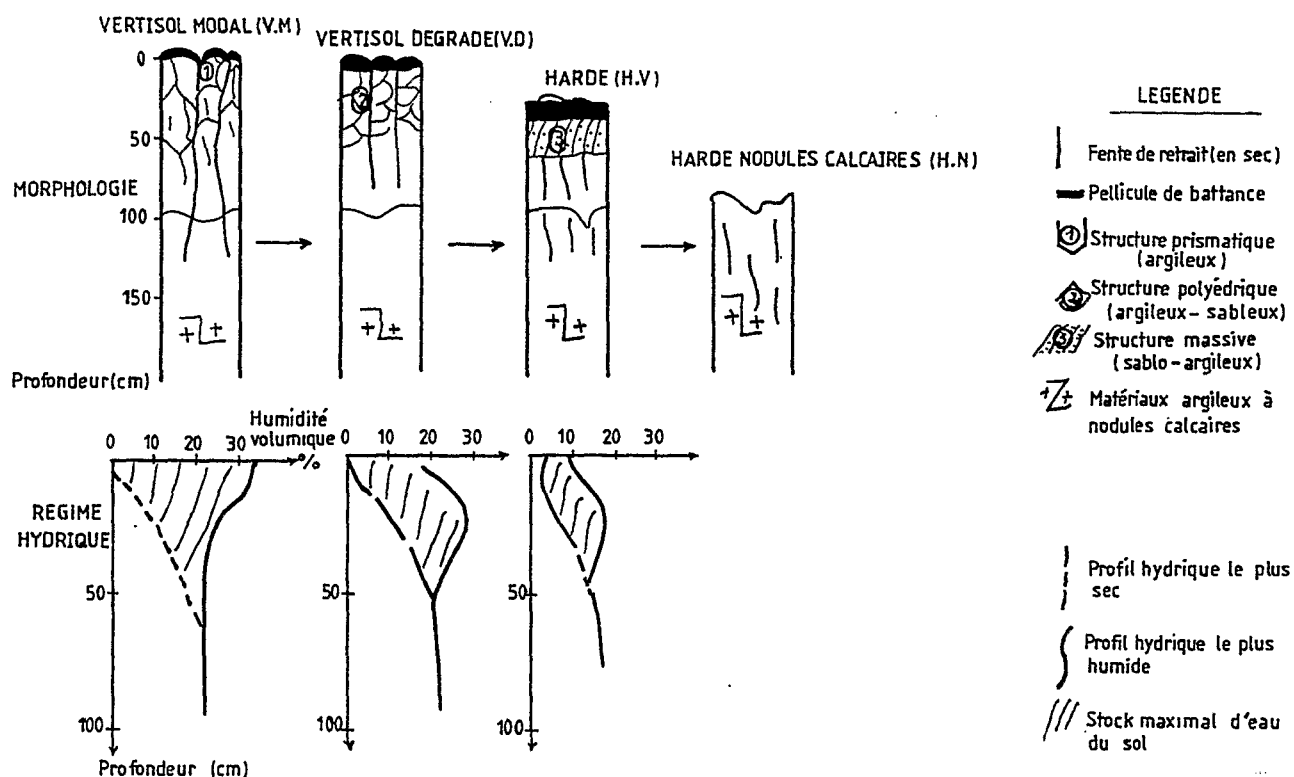


Fig. 2.3 DYNAMIQUE D'UN SECTEUR ECOLOGIQUE DU NORD CAMEROUN
Exemple de la dégradation des vertisols dans le bassin versant de Mouda

2.3.2. La séquence des sols ferrugineux (FR2, FR1, fr)

Les sols ferrugineux occupent le plateau qui domine le versant Ouest du mayo Miyamloa. Le matériau parental est un gneiss à biotite et à deux micas, le même qui constitue la colline de Gazal.

Ces sols présentent une structure peu développée en surface. La texture est sablo-argileuse en surface avec 20 à 25 % de graviers, pierres et blocs (quartz, éléments de cuirasse). L'argile tend à s'accumuler en profondeur où elle colmate les pores. La faible teneur en argile (surtout en surface), la nature de ces argiles (kaolinite) et la faible teneur en matières organiques exposent ces sols à la battance. Sur ces

parcelles, Théb  (1987) a observé un recouvrement de 20   60 % de la pellicule de battance.

La couverture herbacée, dominée par *Loudetia togoensis*, *Sporobolus festivus*, *Spermacoce rulliae* et *Setaria pumila*, peut avoir un recouvrement de 100 % en fin de la saison des pluies.

Tout comme les vertisols modaux, les "ferrugineux" de Mouda sont le siège d'activités anthropiques qui, mal conduites, finissent par rompre l'équilibre du milieu. La mise en culture sans restauration, les feux de brousse fréquents, les parcours abusifs sont quelques pratiques qui entraînent la dégradation des ferrugineux. Le résultat est un "hard " (HF) en bas de pente caractérisé par une surface glacée avec épandage de gravillons, de cailloux ferruginisés. La pellicule de battance est bien développée et recouverte par endroits par un voile sableux.

Ce ferrugineux "hard is " est en général en contact avec le vertisol modal ou avec le vertisol dégradé.

Les ferrugineux indurés (FR2, FR1, fr) ont une faible extension (9,7 %) tandis que leur faciès hard  occupe 11,3 % du bassin (voir figures 2.1a et 2.1b).

2.3.3. Les sols régosoliques des collines (FS3, FS2)

Ces sols sont une association de lithosols et des sols peu évolués développés sur les collines de Mouda (roches vertes de Maroua). Le faciès est fersiallitique.

Les sols sont bien structurés, très poreux et riches en matières organiques. La texture est équilibrée. Ces sols emballent 50 % de matériau lithique très hétérogène.

La pellicule de battance est inexistante. La surface est plutôt formée de pierres et de cailloux incorporés dans une matrice où on trouve une litière importante. C'est un milieu très poreux et à très forte perméabilité.

En bas de pente, c'est un glacis de texture grossière présentant un intergrade court (fs) en contact avec les vertisols à l'aval.

La végétation herbacée (*Andropogon gayanus* et *Th l pogon elegans*) est abondante toute l'année. Th b  (1987) note sur

les parcelles de simulation de pluie un recouvrement de 90 % sous forme de paille en novembre 1985.

La séquence fersiallitique (FS3, FS2, fs) couvre 7,7 % du bassin du Miyamloa (voir figures 2.1a et 2.1b). Le mini bassin de 58 700 m² (situé sur le flanc Est du grand bassin) étudié par Thébé (1987) en 1985 est composé uniquement de régosols de collines.

2.3.4. Hydro-séquence "hardé-vertisol dégradé".

Elle est délimitée par le bassin versant n°2 étudié par Thébé (1987). Ce bassin de 3 000 m² doit son nom de "bassin hardé" à l'importante représentativité des sols hardés qui occupent 51 % de sa superficie en amont. La surface du sol hardé est nue, sans végétation avec une pellicule de battance généralisée. Le vertisol dégradé et le régosol sur matériau à nodules calcaires occupent respectivement 28 et 21 % du bassin en aval.

La carte des états de surface est présentée sur la figure 2.4.

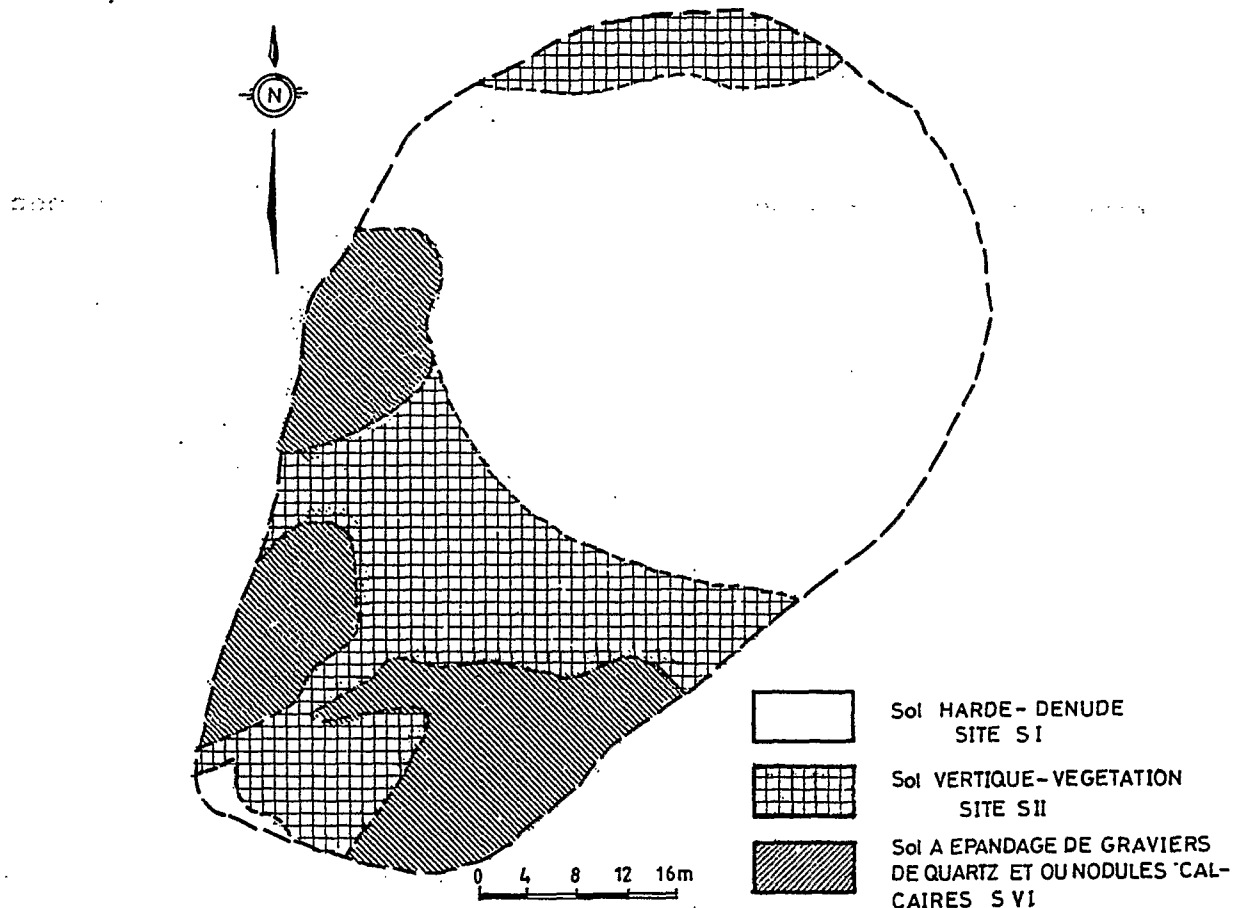


Fig. 2.4 CARTE DES ETATS DE SURFACE DU BASSIN "Hardé"

2.3.5. Hydro-séquence "fersiallitique".

L'hydro-séquence "fersiallitique" délimite un bassin de 0,0587 km² situé sur le flanc Est du bassin du Miyamloa sur la colline, à proximité du village de Mouda. Le bassin a fait l'objet d'observations en 1985 (Thébé, 1987).

Le sol est un régosol de colline qui couvre la totalité du bassin. Les caractéristiques du sol et de l'état de surface ont été décrits au paragraphe 2.3.3.

Signalons qu'ici la végétation est rapidement abondante dès le début de la saison des pluies.

2.3.6. Hydro-séquence "ferrugineux-vertisol dégradé".

Elle est délimitée par un bassin de 0,538 km² créé en 1988 près des sites actuels (Ntonga, 1991(a)).

La séquence des ferrugineux (fr, FR2, FR1, HF) constitue le type pédologique dominant, 4/5 de la surface soit près de 0,43 km² en amont. Le ferrugineux dégradé (hardé ou HF), sur une petite bande, entre en contact direct avec le vertisol dégradé qui couvre le 1/5 du bassin restant en aval. Les états de surface sont ceux décrits aux paragraphes 2.3.2 et 2.3.1.2. Ils sont présentés sur la figure 2.5.

Trois strates constituent le peuplement végétal du domaine ferrugineux :

la strate arborée, la strate arbustive, la strate herbacée. Les deux premières ont un recouvrement de l'ordre de 35 % tandis qu'en fin de saison des pluies la strate herbacée atteint un taux de recouvrement de 60 à 70 %.

La partie ferrugineuse du bassin est en grande partie sous cultures (coton, sorgho, niébe, arachide) pendant la saison pluvieuse.

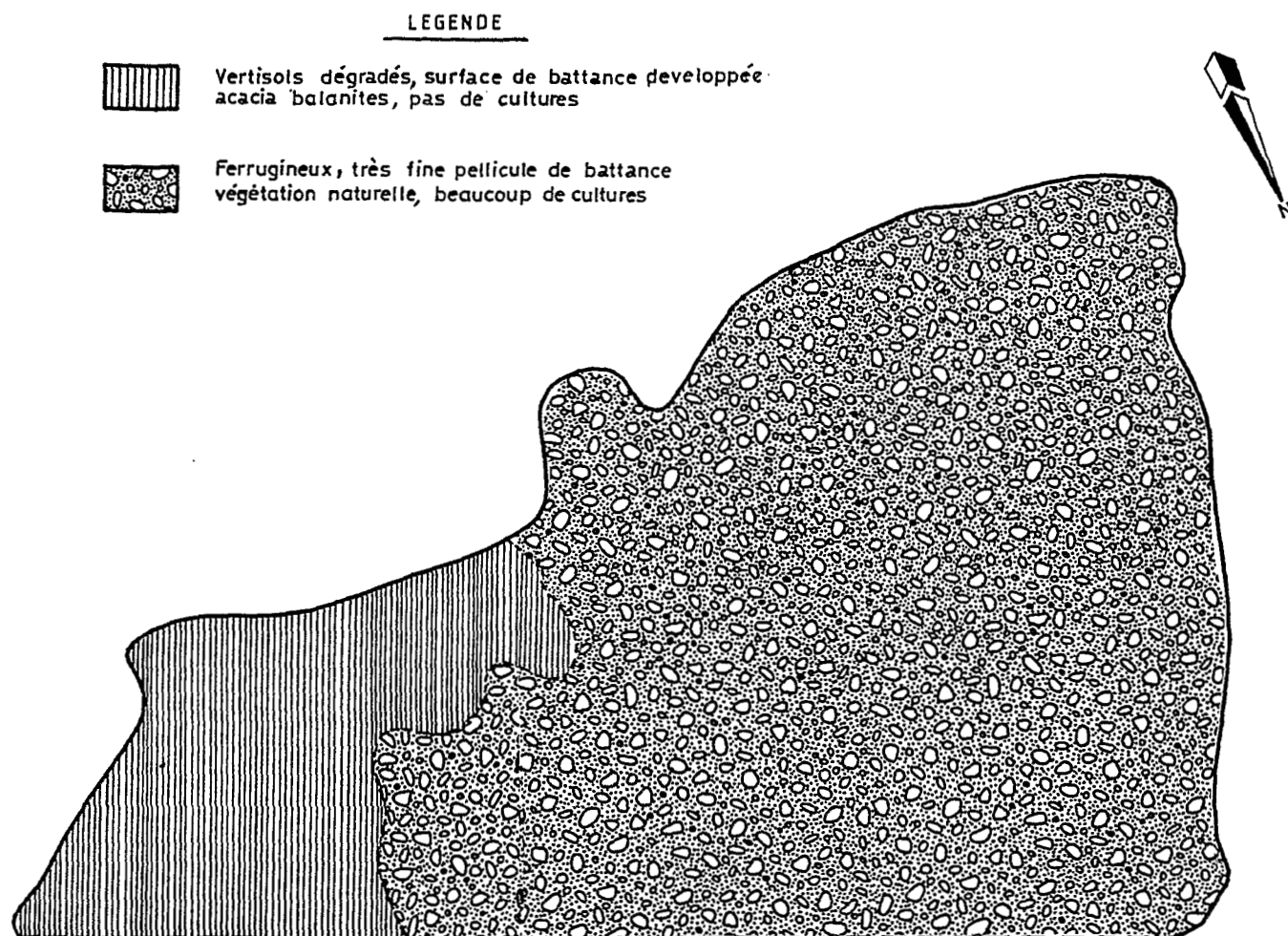


Fig .2.5 BASSIN "Ferrugineux" MAYO GAZAL-MOUDA
CARTE DES ECOSYSTEMES

2.3.7. Répartition des états de surface dans le système emboîté du Miyamloa

La répartition des états de surface par bassin versant du système du Miyamloa est donnée ci-dessus. Elle est également résumée sur la figure 2.6.

Le mayo Midaoua amont :

Les vertisols modaux (Vm) occupent les deux tiers de la superficie, le tiers restant est occupé en proportions égales par le ferrugineux dégradé (FR2, FR1) et une forme "hardé" du

vertisol. La presque totalité du bassin est en cultures pendant toute la saison des pluies.

Le mayo Midaoua aval :

En plus des états de surface du bassin précédent, celui-ci comporte des ferrugineux sur une mince bande étirée sur sa limite ouest entre les villages de Midaoua et de Gazal. Le reste du bassin est occupé par le ferrugineux dégradé (HF1) et la séquence dégradée du vertisol (VD1, HV1, HN1). Le coton et le mouskouari se partagent la surface du ferrugineux, les vertisols dégradés sont localement cultivés en mouskouari.

Le mayo Mouda amont :

Sa surface est totalement occupée par le hardé (HV1); elle reste dénudée toute l'année. Une petite plage de vertisols modaux à l'extrême amont du bassin permet d'observer un îlot de verdure (mouskouari) sur ce glacis pendant la saison des pluies.

Le mayo Mouda aval :

Les axes de drainage sont occupés par les régosols à nodules calcaires (HN1). En bas de pente de la colline, on rencontre des plages fersiallitiques (FS2, fs) de faible importance en contact avec des petites plages de vertisols modaux et de vertisols dégradés. La zone de bas de colline est la plus cultivée de ce bassin. L'amont du bassin est formé des états de surface de Mouda amont : forme "hardé" du vertisol.

Le mayo Miyamloa à Mouda :

En plus des états de surface des 4 ensembles précédents, il comporte les termes dégradés des vertisols sur 2,49 Km² de bassin intermédiaire. Cette partie du bassin n'est pas cultivée. Elle sert de parcours pour les animaux.

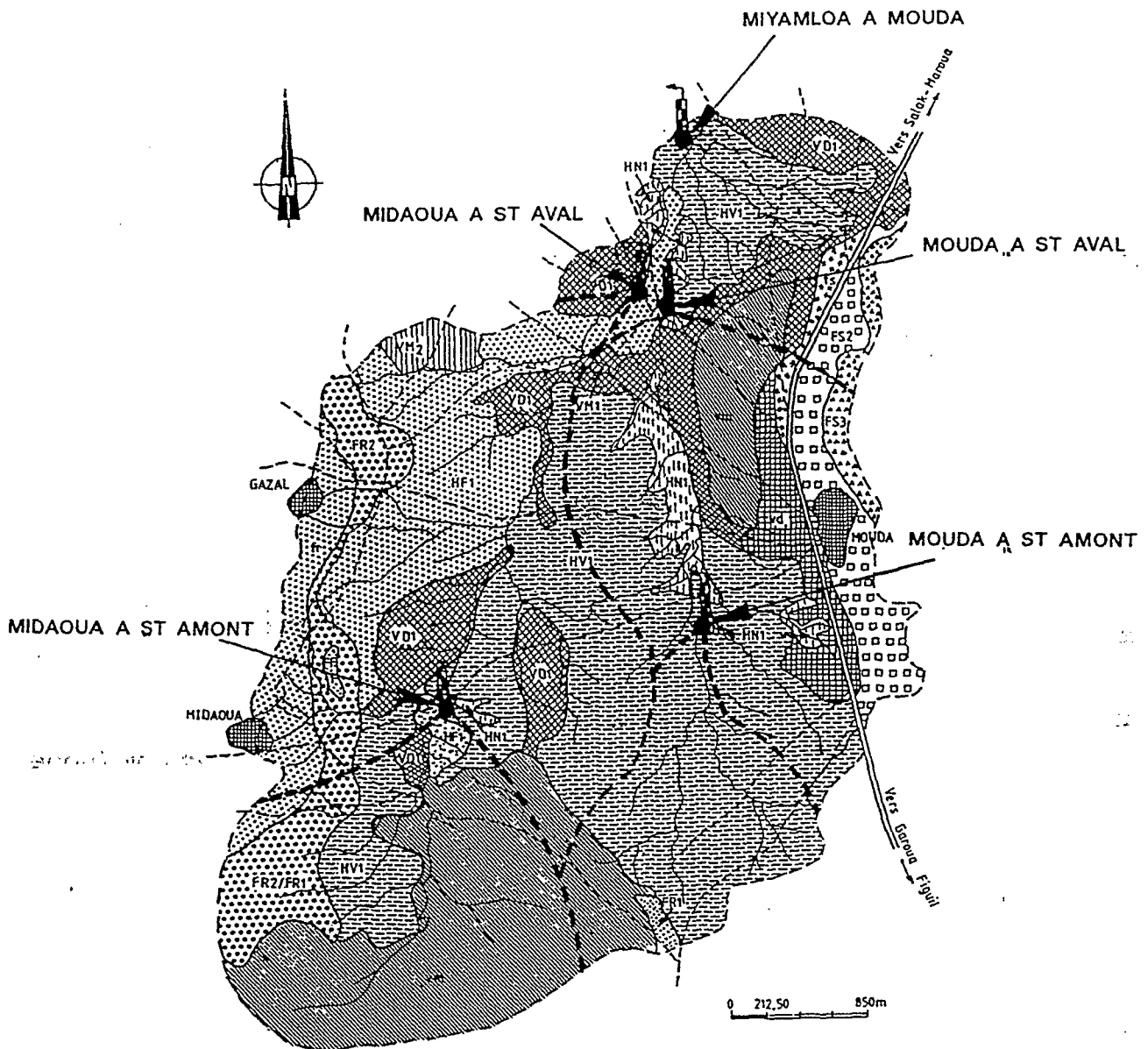


Fig. 2.6 CARTE DES SYSTEMES ECOLOGIQUES DE MOUDA (CEE, 1988)

----- Limite de sous bassin

(Légende des systèmes écologiques voir Fig.2.1b)

Conclusion sur les états de surface des sols étudiés.

Les vertisols et les sols ferrugineux sont les principaux sols de notre bassin d'étude. Ils occupent près de 92 % de celui-ci (dont 72 % des vertisols).

Plusieurs travaux, dont ceux de Gavaud (1971), Brabant et Gavaud (1985), Pontanier et al., (1984) expliquent la dégradation actuelle de ces deux types de sols par les effets combinés des sécheresses récentes et des pratiques anthropiques.

Cette dégradation se traduit en surface par la perte des structures initiales; les sols ainsi fragilisés sont exposés aux phénomènes de battance et d'érosion.

Les termes dégradés des deux types de sols occupent près de 70 % du bassin du Miyamloa. Leur caractéristique commune de surface est la généralisation d'un horizon sableux (plus ou moins épais selon le stade de dégradation) compact et imperméable, localement renforcé de lichens, d'algues ou de paille.

L'importance de la séquence des sols dégradés laisse entrevoir pour notre bassin, la dépendance quasi exclusive de l'hydrodynamique superficielle vis-à-vis des états de surface.

2.4. ETUDE DES MODELES DE FONCTIONNEMENT HYDROLOGIQUE DANS LE BASSIN DE MOUDA.

2.4.1. Méthodes

La carte des écosystèmes de Mouda établit la distribution des différents états de surface; on en déduit le pourcentage de superficie occupée par chaque état de surface dans le bassin.

Le ruissellement de surface, comme nous le verrons dans la troisième partie de ce travail, est la seule forme d'écoulement observée des eaux de pluie sur le bassin. Son importance à l'exutoire dépend en partie des états de surface et de leur organisation dans l'espace.

L'analyse des redistributions rapides superficielles nous conduit à proposer un essai de partage de l'espace et du temps dans le milieu.

Les pluies et débits (lames ruisselées) observés dans le temps à l'exutoire des différentes unités constituent notre matériel d'étude. Les unités d'observations des lames ruisselées ont été choisies de manière à représenter les différentes situations rencontrées dans le bassin.

Le principe de l'analyse est basé sur l'étude de la relation $L_r = f(P)$ où L_r et P désignent respectivement la lame ruisselée et la hauteur de pluie moyenne cumulées du début de la saison des pluies jusqu'à un instant donné de la saison.

Plusieurs études (Albergel, 1988 ; Casenave et Valentin, 1989 ; Collinet et al., 1980 ; Thébé, 1987 ; etc...) montrent que la hauteur de pluie P et un indice des pluies antérieures IK sont des variables qui expliquent le ruissellement dans la zone d'étude.

A. Casenave (1982) et P. Chevallier (1983) définissent IK comme un indice pluviométrique permettant d'évaluer l'état d'humectation des sols. Cet indice tient compte de la hauteur des pluies et de leur répartition dans le temps. L'équation proposée est :

$$IK_n = (IK_{n-1} + P_{n-1})e^{-at}$$

où

IK_n = valeur de l'indice avant la pluie n

IK_{n-1} = valeur de l'indice avant la pluie $n-1$

P_{n-1} = hauteur de la pluie $n-1$

t = temps en fraction de jours, séparant la fin de la pluie $n-1$ du début de la pluie n

a = coefficient d'ajustement = 0,5

Sous pluie simulée la lame ruisselée augmente avec IK .

Seguis (1986) note cependant que durant la saison pluvieuse, les variations de I_k sont moins importantes que dans les protocoles de simulation de pluie et la probabilité d'avoir un I_k fort pour de grosses averses est très faible.

Pour chaque type d'état de surface donné, une courbe exprimant la relation $L_r(P)$ est ajustée. La fonction $L_r(P)$ peut être approchée par une droite d'équation :

$$\Sigma I_r = a \Sigma P + b$$

où

$\Sigma I_r = L_r$ et $\Sigma P = P$ ont été définis plus haut.

Cette droite caractérise la "mémoire" du système et permet d'apprécier les effets des "facteurs saisonniers" sur le ruissellement.

Les changements significatifs, tels que la rupture durable de la pente de cette droite, peuvent indiquer des modes différents de production du ruissellement (autre que la pluie et ses caractéristiques) au cours de la saison.

Deux types d'unités représentant deux échelles différentes ont été retenues pour cette analyse :

(1) la parcelle élémentaire (1 m^2)

Les parcelles de 1 m^2 ont fait l'objet d'observations sous pluies simulées en 1983 et 1984 sur tous les types de sols du bassin et sous pluies naturelles en 1985 sur le hardé, le régosol sur matériau à nodules calcaires et le vertisol dégradé (Thébé, 1987). L'objectif était de caler une fonction de production des lames ruisselées naturelles à partir du modèle "simulateur".

Nous utiliserons les données sur les lames ruisselées obtenues sous pluies naturelles en 1985.

(2) le versant ($\times 10^{-3} \text{ km}^2$)

Les états de surface des 3 versants retenus ont été décrits plus haut.

Les résultats d'observations des pluies et des lames ruisselées nous viennent de Thébé (1987) pour les bassins "Hardé" et "Fersiallitique" et de Ntonga (1991 (a)) pour le bassin "Ferrugineux-Vertisol dégradé"

2.4.2. Modèles de fonctionnement hydrologique

2.4.2.1. A l'échelle de la parcelle

Dispositif de mesure

La parcelle sur site de mesures est matérialisée par un cadre métallique de 1 m² enfoncé dans le sol de 5 cm environ.

L'exutoire "naturel" est la bordure aval de la parcelle. Une série de trous sur cette face aval du cadre permet de recueillir à 1 mètre plus loin à travers un canal collecteur, les eaux de ruissellement dans un bidon de 45 litres.

La hauteur de pluie (au sol) est donnée par un pluviomètre au sol. Après chaque averse, on mesure la pluie au pluviomètre et la lame ruisselée (en vidant le bidon, 1 litre équivaut à 1 mm de lame ruisselée).

Les données sur parcelles couvrent la période du 31/05 au 02/09/85.

Données et résultats sur parcelle "hardé"

Le tableau n° 2.1 résume les données de pluies et de ruissellement mois par mois pour la période ci-dessus indiquée.

	P (mm)	Lr (mm)	Kr (%)
MAI	17,0	12,5	73,5
JUIN	149,2	115,0	77,1
JUILLET	353,5	269,2	76,2
AOÛT	257,5	184,3	71,6
SEPTEMBRE	67,0	58,3	87,0

Tableau n° 2.1. Pluies et ruissellement sur la parcelle "hardé" du 31/05 au 02/09/85 (in Thébé, 1987)

Les données globales pour cette période sont :

P : 844,2 mm

Lr : 639,3 mm

Kr : 75,7 % (Kr = coefficient de ruissellement = Lr/P).

Le report des couples (Σl_r , Σl_p) sur un graphique (fig. 2.7) nous donne une droite unique qui représente la fonction de production du ruissellement tout au long de la saison pluvieuse.

L'équation de la droite est :

$$Lr = 0,748P + 1,238.$$

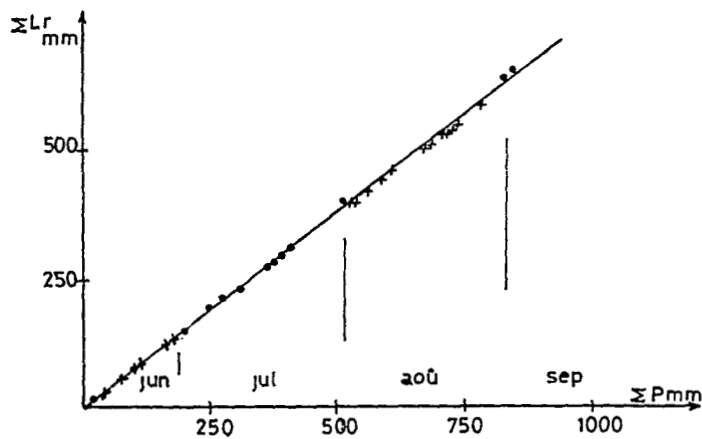
Le coefficient de corrélation est de $r = 0,999$ (très proche de 1) pour 33 observations.

Cette droite permet d'apprécier l'aptitude au ruissellement du milieu "hardé".

L'état de surface est caractérisé tout au long de la saison par la présence généralisée d'une pellicule de battance; dans ces conditions la pluie est le seul "producteur" du ruissellement.

Toutes les données sont sur une droite de pente positive (r positif).

Le coefficient de ruissellement Kr, représenté par la pente de chaque segment de droite joignant deux points successifs n'est



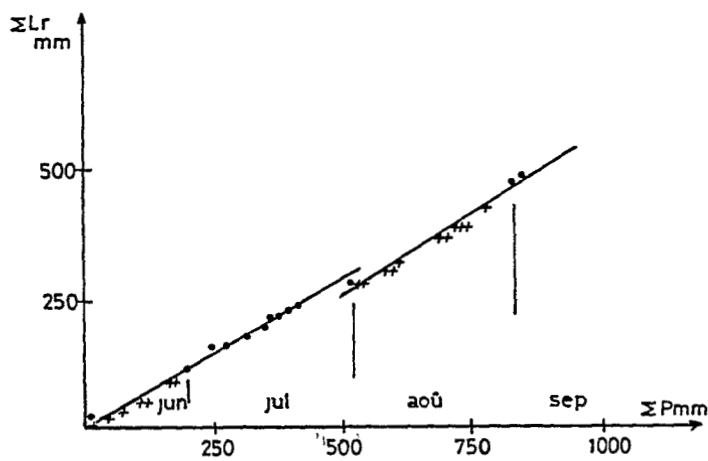
PARCELLE SI P1 1985
HARDE, surface très battante, pas de végétation

$P_m = 844,2 \text{ mm (31/05 - 02/09)}$

$L_r = 639,3 \text{ mm (-II-)}$

$K_r = 75,7 \% \text{ (-II-)}$

Fig. 2.7 VARIATIONS SAISONNIERES DU RUISSELEMENT SUR LA PARCELLE "Harde"



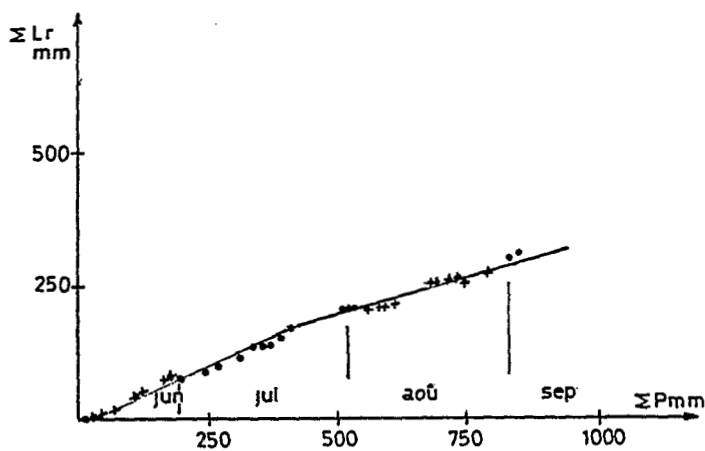
PARCELLE SVI P17 1985
Regosol à nodule calcaires, surface battante
annuelles tardives

$P_m = 844,2 \text{ mm (31/05 - 02/09)}$

$L_r = 478,4 \text{ mm (-II-)}$

$K_r = 56,7 \% \text{ (-II-)}$

Fig. 2.8 VARIATIONS SAISONNIERES DU RUISSELEMENT SUR LA PARCELLE "Régosol"



PARCELLE SII P5 1985
Vertisol dégradé, faible battance, végétation à
base d'annuelles

$P_m = 844,2 \text{ mm (31/05 - 02/09)}$

$L_r = 289,4 \text{ mm (-II-)}$

$K_r = 34,3 \% \text{ (-II-)}$

Fig. 2.9 VARIATIONS SAISONNIERES DU RUISSELEMENT SUR LA PARCELLE "Vertisol dégradé"

fonction que de la hauteur de la pluie et augmente avec elle, quel que soit le moment d'occurrence de celle-ci dans la saison pluvieuse.

Données et résultats sur parcelle "régosol sur matériau à nodules calcaires".

Le tableau n° 2.2 résume les données de pluies et de ruissellement pour la période du 31/05 au 02/09/85.

	P (mm)	Lr (mm)	Kr (%)
MAI	17,0	9,0	52,9
JUIN	149,2	85,3	57,2
JUILLET	353,5	187,1	72,7
AOUT	257,5	144,0	55,9
SEPTEMBRE	67,0	53,0	79,1

Tableau n° 2.2. Pluies et ruissellement sur la parcelle "régosol sur matériau à nodules calcaires" du 31/05 au 02/09/85 (in Thébé, 1987)

Les données globales pour la saison pluvieuse sont :

P : 844,2 mm

Lr : 478,4 mm

Kr : 56,7 %

On observe que les couples (Lr, P) se regroupent autour de deux droites à peu près parallèles, décalées d'une constante à l'origine des axes (fig. 2.8).

Cette observation laisse présager, pour ce milieu, un effet saisonnier sur le ruissellement et suggère le partage du temps, de la saison pluvieuse en deux périodes.

Caractéristiques des deux périodes.

1ère période : du 31/05 au 25/07/85

$P_1 = 411,7$ mm $Lr_1 = 236,4$ mm $Kr_1 = 57,4$ %

Equation de la droite : $Lr_1 = 0,587P - 4,409$

$r_1 = 0,999$ pour 17 observations

2ème période : du 31/07 au 02/09/85

$P_2 = 432,5$ mm $Lr_2 = 242,0$ mm $Kr_2 = 56,0$ %

Equation de la droite : $Lr_2 = 0,597P - 36,129$

$r_2 = 0,996$ pour 16 observations

(les indices 1 et 2 indiquent respectivement la 1ère période et la 2ème période de la saison pluvieuse).

Les coefficients de ruissellement $Kr_1 = 57,4$ % et $Kr_2 = 56$ % sont faibles par rapport à celui du "hardé" (75,7 % pour toute la saison) et sont significatifs.

Les caractéristiques des averses (hauteur, intensité, fréquence) sont les mêmes pour les trois parcelles retenues, une décroissance des pentes des droites (Lr , P) indique l'intervention d'un ou d'autres facteurs dans les processus du ruissellement.

La végétation herbacée, bien que peu abondante dans ce milieu, joue un rôle "inhibiteur" sur le ruissellement rapide de surface tout au long de son installation pendant la saison. Cette action de ralentissement est combinée à celle du faible développement de la pellicule de battance qui tendrait à favoriser l'infiltration. IL a été montré (Thébé, 1987; Seiny, 1990) que ce sol bien qu'étant le stade ultime de dégradation de la séquence du vertisol présentait un meilleur comportement hydrodynamique vis-à-vis de l'infiltration que le sol "hardé".

Données et résultats sur parcelle "vertisol dégradé"

Les données de pluies et de ruissellement pour la période du 31/05 au 02/09/85 sont résumées dans le tableau n° 2.3.

	P (mm)	Lr (mm)	Kr (%)
MAI	17,0	4,5	26,5
JUIN	149,2	75,2	50,4
JUILLET	353,5	130,1	36,8
AOUT	257,5	66,7	25,9
SEPTEMBRE	67,0	12,9	19,3

Tableau n° 2.3 . Pluies et ruissellement sur la parcelle
"vertisol dégradé" du 31/05 au 12/09/85
(in Thébé, 1987)

Les données globales pour la saison de pluies sont:

P : 844,2 mm

Lr : 289,4 mm

Kr : 34,3 %

L'hydrodynamique superficielle du vertisol dégradé tranche avec celle du hardé type.

Comme pour le régosol sur matériau à nodules calcaires, on observe également deux groupes de points autour de deux droites mais de direction différente dans le temps (fig. 2.9).

Les deux droites représentent les deux périodes de la saison pluvieuse précédemment identifiées pour le régosol.

Caractéristiques des deux périodes.

1ère période : du 31/05 au 25/07/85

$P_1 = 411,7 \text{ mm}$ $Lr_1 = 169,8 \text{ mm}$ $Kr_1 = 41,2 \%$

Equation de la droite : $Lr_1 = 0,404P - 0,125$

$r_1 = 0,996$ pour 17 observations

2ème période : du 31/07 au 02/09/85

$P_2 = 432,5 \text{ mm}$ $Lr_2 = 119,6 \text{ mm}$ $Kr_2 = 27,7 \%$

Equation de la droite : $Lr_2 = 0,28P + 59,586$

$r_2 = 0,981$ pour 16 observations

Les coefficients de ruissellement, $Kr_1 = 41,2 \%$ et $Kr_2 = 27,7 \%$ ainsi que les coefficients de corrélation diminuent avec l'avancée de la saison et laissent entrevoir l'intervention d'autres facteurs saisonniers.

Les valeurs de Kr illustrent clairement l'effet saisonnier sur le ruissellement.

La végétation herbacée est dans la phase de sa mise en place dans la première période. Le couvert végétal n'est pas encore dense, mais d'autres facteurs saisonniers comme l'activité mésofaunique qui accompagnent la mise en place de la végétation peuvent favoriser l'infiltration (Albergel et al., 1985).

La deuxième période, avec une diminution notable du coefficient de ruissellement ($Kr_2 = 27,7 \%$) correspond à la phase de stabilisation de la végétation herbacée à base d'annuelles vers fin juillet. Fin août le recouvrement maximum est atteint. Thébé (1987) note alors un recouvrement de 45 % pour cette parcelle.

La végétation herbacée, quand elle est dense, contribue à fragiliser la pellicule de battance; l'infiltration augmente.

On remarquera que, pour la même hauteur de pluie, le Kr de la deuxième période sera plus faible que celui de la première période.

2.4.2.2. A l'échelle du versant

Versant "hardé-vertisol dégradé"

Dispositif de mesure

Nous rappelons les principales caractéristiques physiques du bassin et les dispositifs de mesures tels que décrits par Thébé (1987).

Le bassin "hardé" est situé à proximité de l'exutoire du mayo principal (le mayo Miyamloa). Il a été délimité par une levée de terre.

Les caractéristiques physiques sont rassemblées dans le tableau suivant :

S(m ²)	P(m)	kc	L(m)	l(m)	D(cm)	I(%)	Ip
3000	223	1,14	66,1	53,9	207	3,1	0,24

où

- S = superficie du bassin
- P = périmètre
- Kc = coefficient de compacité de Gravelius
- L et l longueur et largeur du rectangle équivalent
- D = dénivelée totale
- I = pente moyenne
- Ip = indice de pente de Roche

La dénivelée totale (D = 207 cm) et l'indice de compacité (Kc= 1,14) dénotent un bassin très plat et très compact de forme ramassée.

Le réseau hydrographique est très peu marqué, il n'apparaît que dans le tiers aval du bassin (occupé par le vertisol dégradé) sous forme d'une petite rigole assez encaissée.

L'équipement hydro-pluviométrique (fig. 2.10) comprend :

- pour les mesures de la pluie : 3 pluviomètres "Association" à lecture directe et un pluviographe journalier (PG 2)

- pour les mesures de hauteurs d'eau, un limnigraphe OTT à mouvement rapide (durée de révolution 3 h 12 mn).

Les débits sont mesurés par un déversoir triangulaire doublé d'un seuil NEYRTEC à la sortie d'une fosse. La fosse est le véritable exutoire du bassin.

L'évolution de l'état hydrique des différents sols du bassin était suivie par 6 tubes de mesures neutroniques.

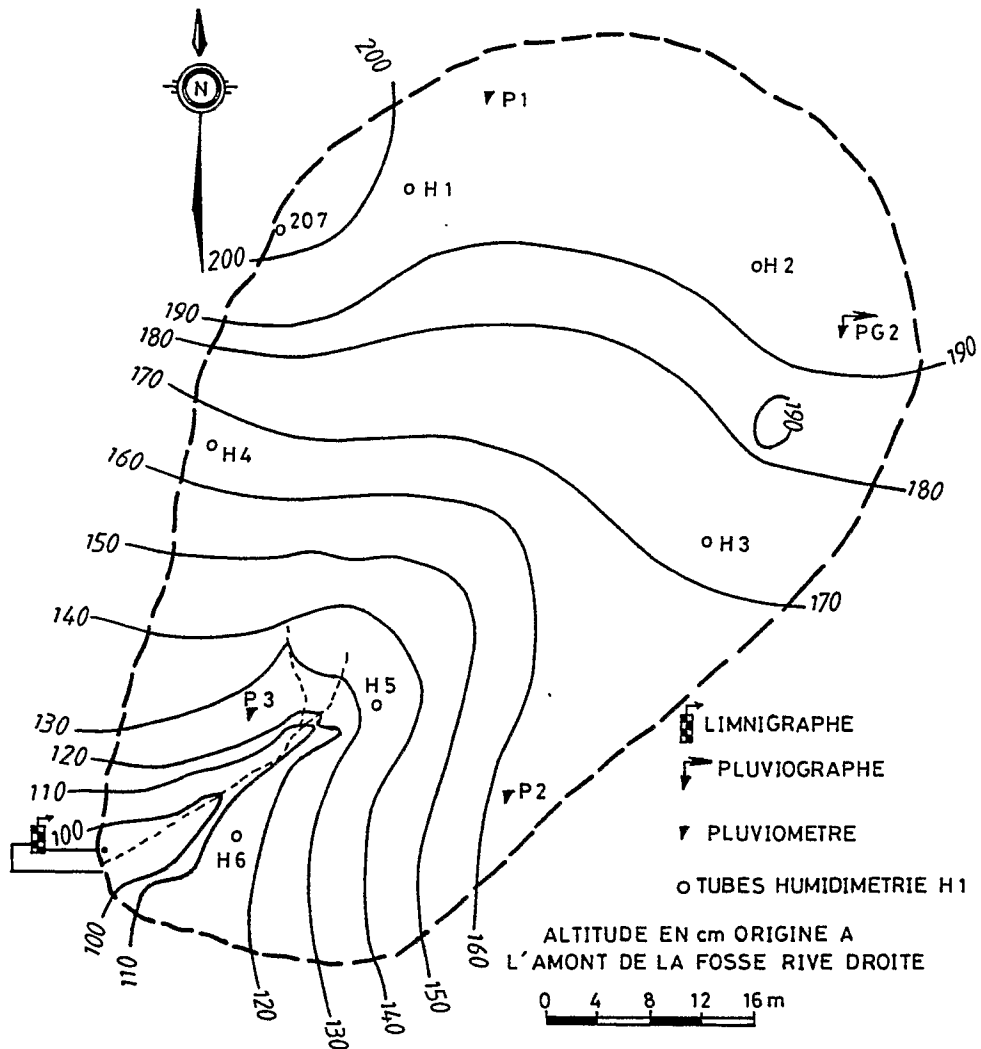


Fig. 2.10 RESEAU HYDROGRAPHIQUE ET RESEAU DE MESURES
DU BASSIN "Hardé"

Données et résultats.

La forme de présentation des données de pluies et ruissellement que nous adoptons ici est celle du bilan hydrologique.

Le bilan hydrologique est mené à l'exutoire des bassins. Il est défini comme le décompte des entrées (précipitations) et des sorties (évaporation, ruissellement, et écoulement) d'un système d'eau dans un intervalle de temps donné. Le choix du

pas de temps est très important et est déterminé par l'objectif fixé; cependant, pour diverses raisons pratiques, il ne peut être aussi précis que souhaitable.

Pour l'étude de la variation saisonnière de la lame ruisselée et de celle de l'organisation hydrodynamique de nos bassins, l'échelle de l'averse rend mieux compte des processus hydrodynamiques superficiels.

Les principaux termes du bilan hydrologique, pour une période préalablement définie, sont :

P : précipitation (mm)

Lr : lame écoulee (mm)

De : déficit d'écoulement = $P - Lr$ (mm)

Kr : coefficient de ruissellement (%) = Lr/P

A l'échelle mensuelle (année 1985) et annuelle (1984, 1985), les termes du bilan hydrologique sont donnés dans les tableaux n°s 2.4 et 2.5.

MOIS	P (mm)	Lr (mm)	Kr (%)	De (mm)
MAI	64,5	25,4	39,4	39,1
JUIN	140,8	74,6	53,0	66,2
JUILLET	341,4	210,8	61,7	130,6
AOÛT	236,6	131,8	55,7	104,8
SEPTEMBRE	157,5	49,1	31,2	108,4

Tableau n° 2.4. Bilan mensuel (1985) Bassin "hardé"
(in Thébé, 1987)

ANNEE	P (mm)	Lr (mm)	Kr (%)	De (mm)
1984	624,0	274,0	44,0	350,0
1985	940,8	491,7	52,3	449,1

Tableau n° 2.5. Bilan annuel Bassin "hardé"
(in Thébé, 1987)

Nous n'avons considéré que les données de 1985 pour analyser la relation $L_r(P)$.

La relation $L_r(P)$ se présente sous forme d'une droite continue d'équation :

$$L_r = 0,57P - 14,02$$

avec $r = 0,999$ pour 67 observations.

Le bassin "hardé-vertisol dégradé" se comporte vis-à-vis du ruissellement comme la parcelle "hardé" étudiée précédemment (cf. 2.4.2.1). Tout comme sur cette parcelle, l'effet saisonnier n'influence pas le ruissellement. A l'examen de la figure 2.11, on constate que seules les caractéristiques de la pluie expliquent la lame ruisselée.

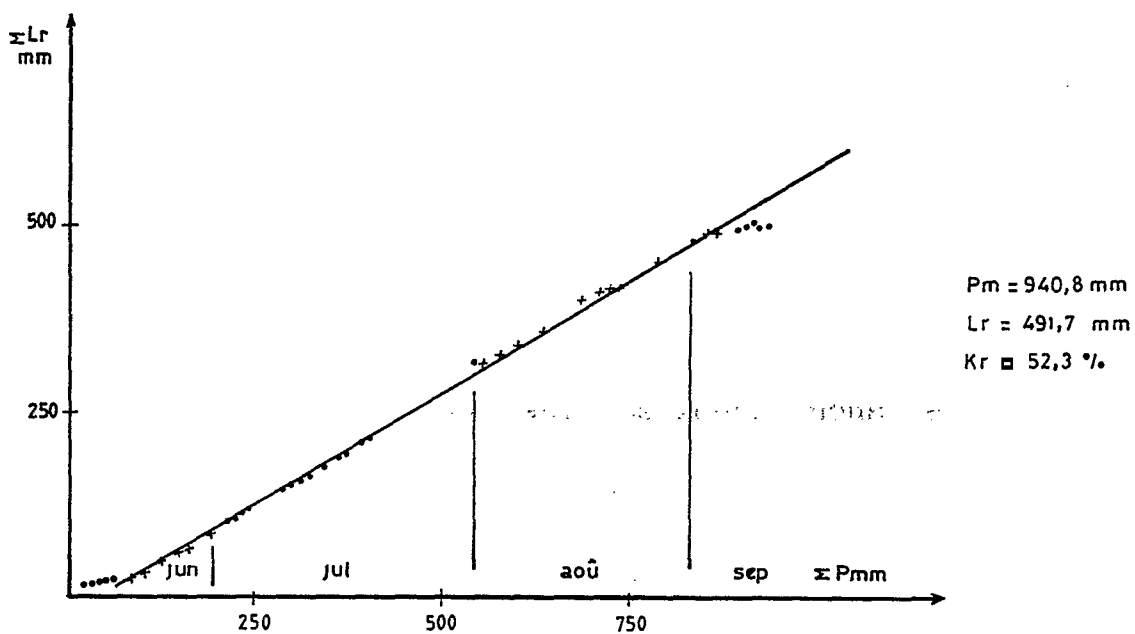


Fig. 2.11 VARIATIONS SAISONNIERES DU RUISELLEMENT SUR LE BASSIN "Harde" EN 1985

Cette unité est occupée à 72 % par des sols hardés et des régosols à nodules calcaires (voir fig. 2.4 du paragraphe 2.3.4). L'évolution saisonnière du recouvrement herbacé des 28 % de la surface occupée par les vertisols dégradés n'a que très peu d'effet sur le ruissellement. Thébé (1987) note

d'ailleurs que l'introduction de facteurs secondaires autres que la hauteur de l'averse pour expliquer la lame ruisselée dans ce milieu n'apporte pas d'amélioration significative, une grande partie des sols de ce bassin restant dénudée en toutes saisons.

Si sur ce bassin de 3 000 m² composé de 3 états de surface différents (fig. 2.4) : Hardé (51 %), Régosol à nodules calcaires (21 %), Vertisol dégradé (28 %), la dynamique saisonnière est celle du "hardé" (pas d'effet saisonnier sur le ruissellement), il a donc été possible de mettre en évidence un "modèle de fonctionnement hydrologique" basé uniquement sur l'espace.

En effet on a constaté qu'une pluie homogène dans l'espace et à une seule pointe d'intensité engendrait à l'exutoire une crue à deux pointes (fig. 2.12, crue du 14 août 1985).

Une expérience (en août 1986) en 2 volets :

(i) mise en place d'une "ligne de sel" à l'aval de la zone "hardé" (amont du bassin) et mesure de la conductivité des eaux de ruissellement à l'entrée de la fosse (exutoire)

(ii) marquage à la fluorescéine de la même zone pour tracer les rigoles d'écoulement et hiérarchiser les écoulements,

a précisé l'organisation hydrodynamique du bassin "hardé".

Il apparaît sur la figure 2.13 de la crue du 8 août 1986 que l'"hydrogramme de sel" qui survient dans les premières minutes de la montée de la crue correspond au ruissellement de la zone amont du bassin.

On peut donc conclure que la première pointe de crue est provoquée par les eaux de ruissellement du "hardé" et du "régosol" (en petite proportion), la deuxième étant formée par l'adjonction du ruissellement sur le reste du bassin.

L'hydrodynamique superficielle de ce bassin s'organise d'amont en aval, du "hardé" vers le "vertisol dégradé".

Ce fonctionnement s'explique par la rapidité de réaction des sols hardés dénudés à une averse et par la relative

infiltration sur le vertisol dégradé à l'aval avec un recouvrement herbacé plus ou moins dense.

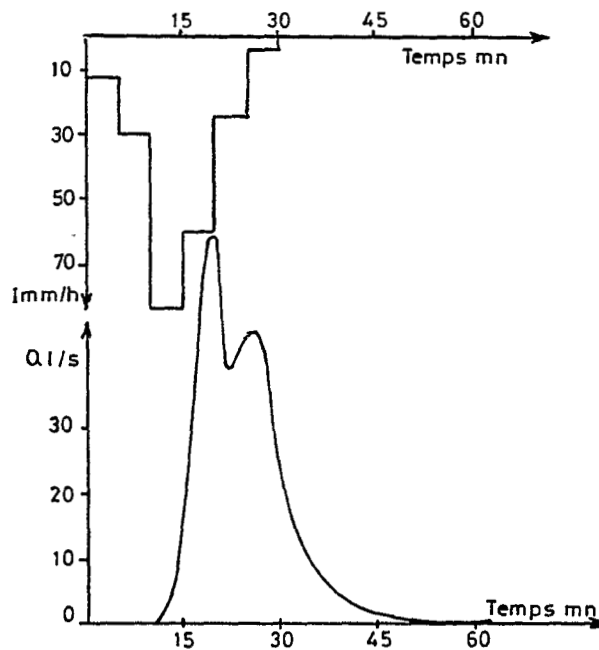


Fig. 2.12 CRUE DU 14 AOÛT 1985
(Bassin "Hardé")

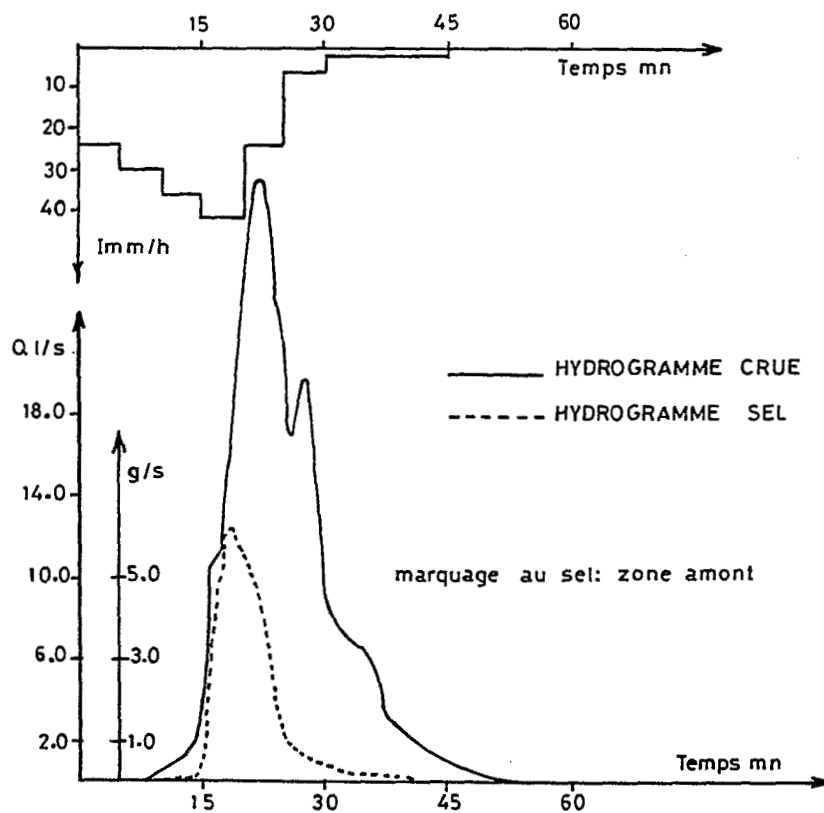


Fig. 2.13 HYDROGRAMME DE CRUE ET HYDROGRAMME DE SEL
DU 8 AOÛT 1986 (Bassin "Hardé")

A partir des observations sur sites et sur parcelles sous pluies simulées et sous pluies naturelles, une fonction de production des lames ruisselées a été établie par Thébé (1987).

Son expression est :

$$Lr = 0,51Lr_1 + 0,28Lr_2 + 0,21Lr_6$$

où

Lr_1 , Lr_2 , Lr_6 correspondent respectivement aux fonctions de production de la parcelle hardé, vertisol dégradé, et régosol à nodules calcaires, calées par le modèle "simulateur".

Cette fonction de production a permis d'estimer les parts en ruissellement de chaque état de surface du bassin. Les résultats sont présentés dans le tableau n° 2.6

Date	VOLUMES OBSERVES(m ³ /s)		VOLUMES CALCULES(m ³ /s)	
	Hydrogr n° 1 (SI-SVI)	Hydrogr n° 2 (SII)	Hydrogr n° 1 (SI-SVI)	Hydrogr n° 2 (SII)
04.05.85	38.1	9.6	39.3	13.3
14.06.85	15.5	4.2	12.7	4.3
10.07.85	24.3	4.7	20.2	7.5
14.07.85	31.2	6.9	29.0	9.9
17.07.85	39.6	9.8	32.8	11.9
21.07.85	29.5	12.1	22.7	6.7
25.07.85	27.3	3.3	15.9	3.1
14.08.85	38.4	8.3	21.1	4.3

Tableau n° 2.6 Volumes observés et calculés; Crues du bassin
" hardé" (in Thébé 1987)

SI, SII, SVI, désignent respectivement le hardé, le vertisol dégradé et le régosol à nodules calcaires.

Hydrogr. n° 1 et Hydrogr. n° 2 représentent successivement les hydrogrammes de la 1ère et de la 2ème pointe de crue.

Il se dégage de ce tableau que le sol hardé produit majoritairement le ruissellement rapide de surface (environ 80 % en toute période de mai à août). La dynamique saisonnière de l'ensemble du versant peut donc être assimilée à celle du "hardé".

Il nous paraît cependant important de relever que l'organisation du ruissellement rapide dans l'espace telle que nous avons essayé de la schématiser pour ce bassin ne peut être mise aussi facilement en évidence sur des grandes unités. Ici les temps de transfert sont assez importants, et à cela s'ajoute la forte variabilité spatiale de perméabilité.

Versant "ferrugineux-vertisol dégradé".

Dispositif de mesure.

Le bassin est situé en face des parcelles d'expérimentation de réhabilitation des sols du Centre National des Sols de l'IRA. Il a été mis en service le 19/07/88. On y accède par le layon de l'IRA qui traverse les deux radiers des mayos Mouda et Midaoua.

Une carte topographique (fig. 2.14) a été levée au 1/2500 entre les 02/05 et 05/11/90. Celle-ci nous a permis de déterminer les principales caractéristiques physiques du bassin (Ntonga, 1991). Elles sont résumées ci-dessous.

Altitude de l'exutoire : 448 m

Coordonnées géographiques de l'exutoire : 10°23'05" Lat N
14°12'43" Long E

S(km ²)	P(km)	kc	L(km)	l(km)	D(cm)	I(%)
0,538	3,38	1,29	1,05	0,64	1802	1,72

S, P, kc, L, l, D et I ont été définis précédemment.

Tout comme le bassin "hardé-vertisol dégradé", une grande partie de ce versant est situé sur le glacis de Mouda. Sa pente moyenne ($I = 1,72 \%$) et son indice de Gravelius ($k_c = 1,29$) en font un bassin très plat et compact. Les pentes augmentent néanmoins en amont, à l'extrémité Sud-Est du bassin à l'approche du bombement ferrugineux de Gazal (limite Sud-Est du bassin). La présence de nombreux replats dus à cette singularité du relief ne favorise pas le ruissellement.

Les eaux de ruissellement sont collectées par un drain (mayo Gazal) qui prend sa source sur le glacis vertisolique à l'extrême Sud-Ouest du bassin. Long de 300 mètres environ, ce mayo draine en particulier les vertisols dégradés, les ferrugineux déversant très partiellement leurs eaux dans une rigole (ravine d'érosion) qui longe le layon IRA sur près de 775 m (de l'exutoire au layon n° 7 de nivellement).

La topographie et le réseau hydrographique sont présentés sur la figure 2.14.

En dehors des deux axes de drainage décrits ci-dessus, la topographie du bassin donne naissance à des zones de petites mares temporaires; celles-ci peuvent occasionner un ruissellement très lent après arrêt de la pluie.

Le dispositif de mesures hydro-pluviométriques est composé, du 26/07/88 au 30/11/89, d'un pluviomètre placé sur le vertisol dégradé. Dès le 10/05/90, un pluviographe journalier installé sur le ferrugineux complète l'équipement pluviométrique. Ces deux appareils sont placés chacun à 1 mètre du sol.

Les débits sont mesurés à partir d'une station hydrométrique située en rive gauche du mayo à l'entrée d'une buse (vrai exutoire du bassin). La station est équipée depuis le 19/07/88 d'une échelle de 2 m doublée d'un limnigraphe journalier (avec un rapport de réduction des hauteurs de 1/5). La figure 2.14 montre l'emplacement du dispositif de mesures.

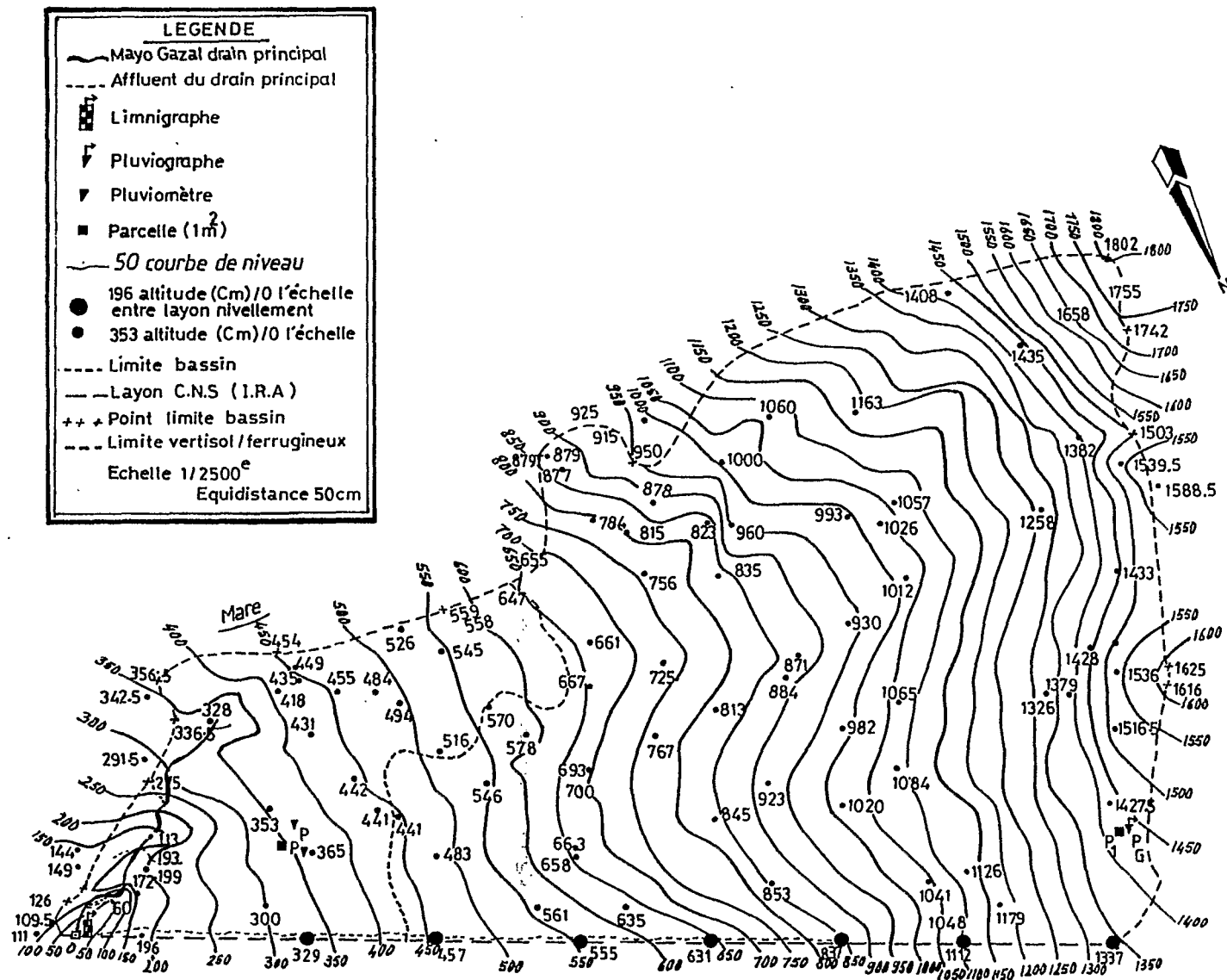


Fig. 2.14 BASSIN "Ferrugineux" MAYO GAZAL-MOUDA TOPOGRAPHIE

Mouda Maroua
Avril Novembre
1990

Le fond topographique du 1/2500 a été utilisé pour établir la carte des écosystèmes du bassin (cf. figure 2.5 du paragraphe 2.3.6), le domaine ferrugineux y occupe 0,433 km², soit 80,5 % du bassin et les vertisols dégradés, 0,105 km², soit 19,5 % du bassin.

Données et résultats.

Les résultats de l'étude hydrologique de ce bassin ont fait l'objet d'un rapport de recherche (Ntonga, 1991).

Nous présentons l'information des trois années d'études (1988, 1989, 1990) sous forme de bilans hydrologiques (tab. n° 2.6 et tab. n° 2.7). Nous examinerons ensuite, l'évolution saisonnière du ruissellement en 1990, année où le dispositif de mesures a le mieux fonctionné.

ANNEE	P (mm)	Lr (mm)	Kr (%)	De (mm)
1988	(632,3)	136,7	21,6	(495,6)
1989	(756,3)	(41,8)	(5,5)	(714,5)
1990	803,4	95,4	11,9	708,0

Tableau n° 2.7. Bilan annuel
Bassin "Ferrugineux-Vertisol dégradé"

MOIS	P (mm)	Lr (mm)	Kr (%)	De (mm)
AVRIL	32,6	0,0	0,0	32,6
MAI	46,8	0,0	0,0	46,8
JUIN	269,0	55,9	20,8	213,1
JUILLET	200,0	27,3	13,7	186,3
AOÛT	178,1	12,0	6,7	166,2
SEPTEMBRE	49,7	0,2	0,4	49,5
OCTOBRE	27,2	0,0	0,0	27,2

Tableau n° 2.8. Bilan mensuel 1990
Bassin "Ferrugineux-Vertisol dégradé"

(les valeurs entre parenthèses (x) sont incertaines)

A l'examen des deux tableaux, on note la faible réaction du bassin vis-à-vis du ruissellement. Les coefficients de ruissellement sont de 21,6 % en 1988 et de 11,9 % en 1990. Celui de 1989 (5,5 %) ne tient pas compte des lacunes hydrométriques pour des pluies de 57,0 mm et de 43,0 mm respectivement les 8 et 16 septembre. La faiblesse du ruissellement de ce bassin est expliquée par la forte infiltrabilité du "ferrugineux" (80,5 % du bassin), en grande proportion occupé par les cultures pendant la deuxième partie de la saison pluvieuse.

Si on considère qu'en 1990, l'installation de la saison des pluies est effective dès fin mai (régularité et importance des hauteurs des averses) pour ce bassin, l'analyse du ruissellement par représentation graphique des couples (Lr, P) observés suggère le partage du temps.

Les couples (Lr, P) sont organisés autour de 2 droites (fig. 2.15). Ces droites définissent deux périodes dans la saison pluvieuse.

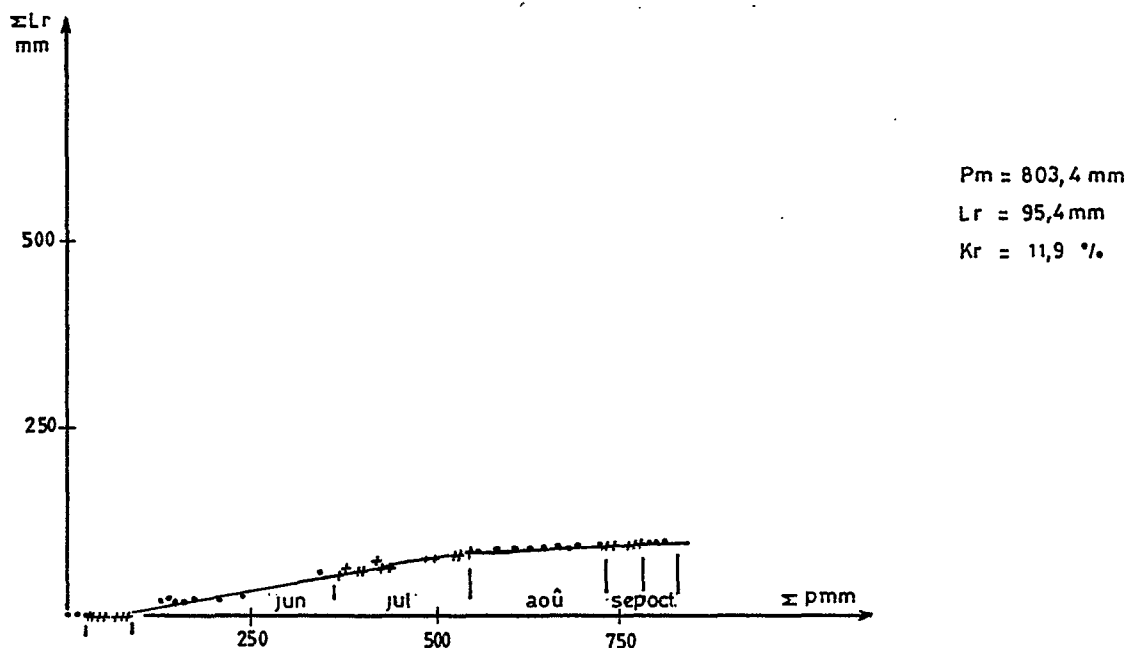


Fig. 2.15 VARIATIONS SAISONNIÈRES DU RUISELLEMENT SUR LE MAYO GAZAL EN 1990

Caractéristiques des deux périodes.

1ère période : du 31/05 au 31/07/90.

$P_1 = 548,4 \text{ mm}$ $Lr_1 = 83,2 \text{ mm}$ $Kr_1 = 15,2 \%$

Equation de la droite : $Lr_1 = 0,177P_1 - 10,196$

$r_1 = 0,997$ pour 25 observations

2ème période : du 01/08 au 31/10/90.

$P_2 = 255,0 \text{ mm}$ $Lr_2 = 12,2 \text{ mm}$ $Kr_2 = 4,78 \%$

Equation de la droite : $Lr_2 = 0,052P_2 + 55,339$

$r_2 = 0,975$ pour 28 observations

Le vertisol dégradé (19,5 % du bassin), avec un très faible recouvrement herbacé en toute saison, produit majoritairement le ruissellement et impose son "comportement" à l'ensemble du bassin, pendant la première période de la saison définie ci-dessus. On constate donc que les petites zones imperméables à l'exutoire de ce bassin perméable ont eu une grande influence sur le ruissellement total du bassin pendant cette période.

La deuxième période de la saison, du 31/07 au 31/10/90, se caractérise par une baisse notable des coefficients de ruissellement : 6,7 % en août, 4,4 % en septembre, 0 % en octobre (cf. tab. n° 2.8). Le coefficient de ruissellement global pour cette période $Kr_2 = 4,78 \%$ (moins du tiers de celui de la première période) et le coefficient de corrélation $r_2 = 0,975$ suggèrent la prise en compte d'autres "facteurs saisonniers" autre que la pluie pour l'explication de la lame ruisselée. En effet, le développement et le recouvrement des cultures et de la végétation herbacée sur le domaine ferrugineux sont maximaux pendant cette période de la saison. Ces facteurs saisonniers, outre leurs influences mécaniques sur l'écoulement (résistance au ruissellement d'autant plus grande que le tapis herbacé est dense), fragilisent la pellicule de battance du "ferrugineux" et induisent l'effet du calendrier sur le ruissellement. Les processus d'infiltration du domaine ferrugineux dominant sur ceux de ruissellement rapide de surface du bassin total pendant cette période.

Notons toutefois que les valeurs des coefficients de ruissellement observées lors des "événements exceptionnels" de la pluviométrie sont liées à la nature et à la fréquence de ceux-ci, quelle que soit la période de la saison des pluies. Pour ces événements, la phase de croissance maximum de la végétation herbacée en fin de saison, caractérisée par une faible densité de recouvrement de la surface totale n'est pas un facteur déterminant du ruissellement.

En vue de l'étude du comportement du bassin en crue en regard de ses composantes spatiales, nous avons analysé plusieurs événements "averse-crue". Il ressort de cette analyse qu'une averse homogène à une seule pointe d'intensité donne à l'exutoire une crue à deux pointes. Quelques exemples sont illustrés sur les figures 2.16, 2.17 et 2.18.

Cette observation, tout comme pour le bassin "hardé", suggère un partage de l'espace pour l'étude des redistributions rapides superficielles.

Il a été observé, lors de la crue du 06/07/90, un "traçage colorimétrique" naturel qui pourrait bien expliquer la différenciation de l'alimentation du débit à l'exutoire.

La première montée sur l'hydrogramme est due aux eaux de ruissellement de couleur "gris foncé à noir". Leur passage dure jusqu'à l'amorce de la deuxième montée où on observe l'arrivée d'un mélange d'eaux de couleur "noire et rougeâtre" avec une dominance du "rouge".

Ces observations ont été faites simultanément à la buse (entrée des eaux) et au limnigraphe (correspondance entre montées sur le limnigramme et passage des eaux "colorées").

Les eaux "noires" proviennent des vertisols (argiles de type smectitique). La première pointe de crue est provoquée par le ruissellement du vertisol dégradé. La décrue du vertisol peut durer longtemps après la fin de la pluie. Elle est entretenue par la vidange lente de nombreuses petites mares existant sur cette partie du bassin.

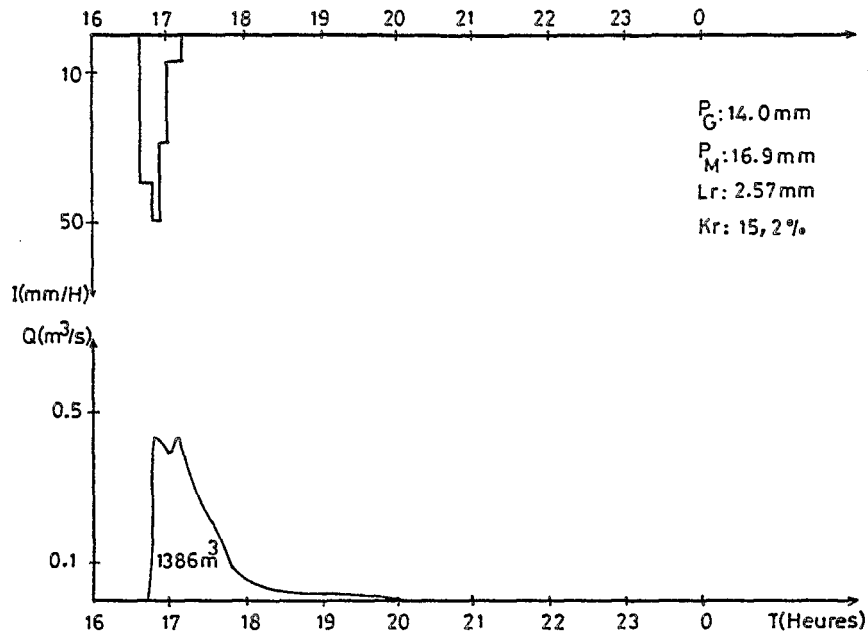


Fig.2.16 EVENEMENT AVERSE-CRUE DU 06/07/90
(BASSIN "Ferrugineux")

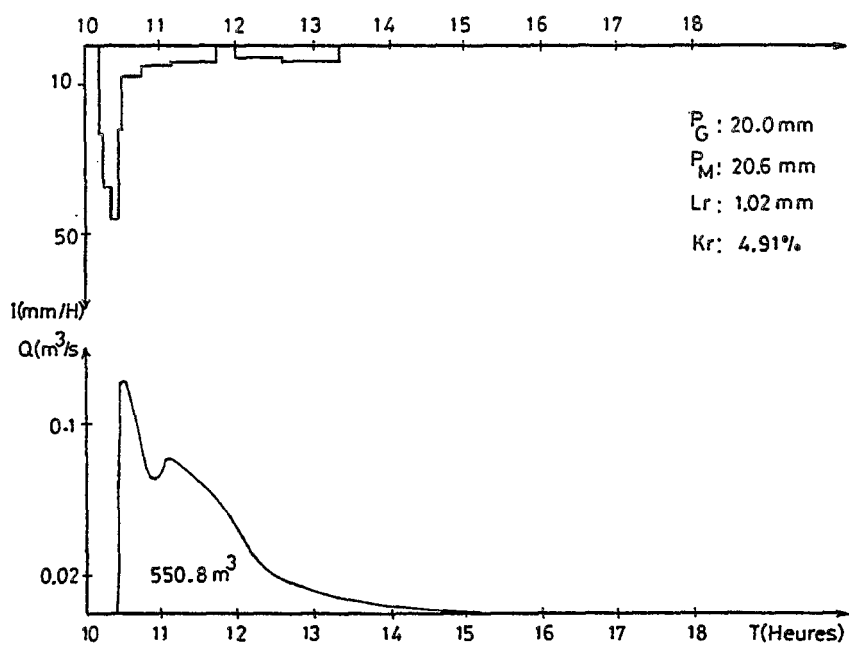


Fig.2.17 EVENEMENT AVERSE-CRUE DU 14/07/90
(BASSIN "Ferrugineux")

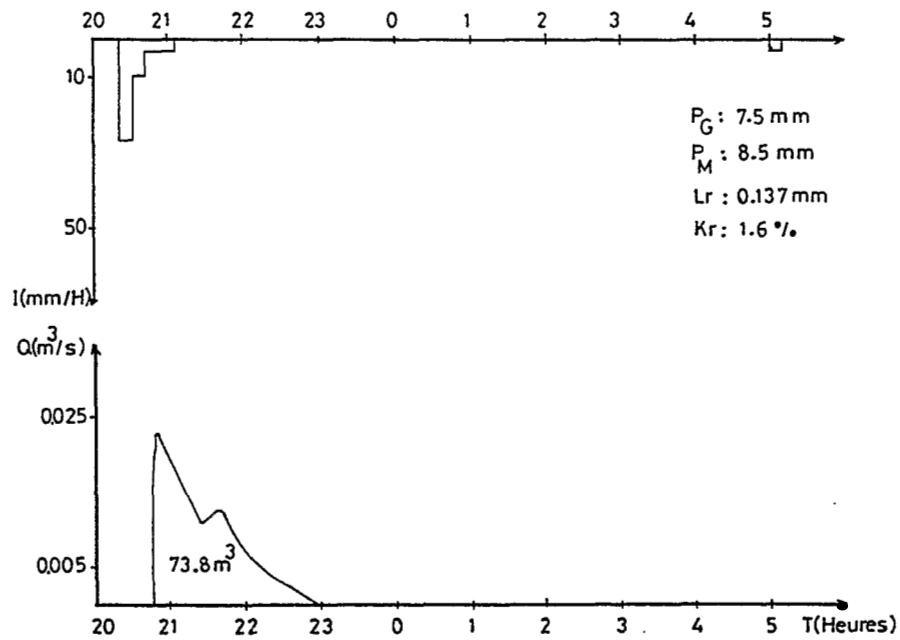


Fig. 2.18 EVENEMENT AVERSE-CRUE DES 21-22 /07/90
(BASSIN "Ferrugineux")

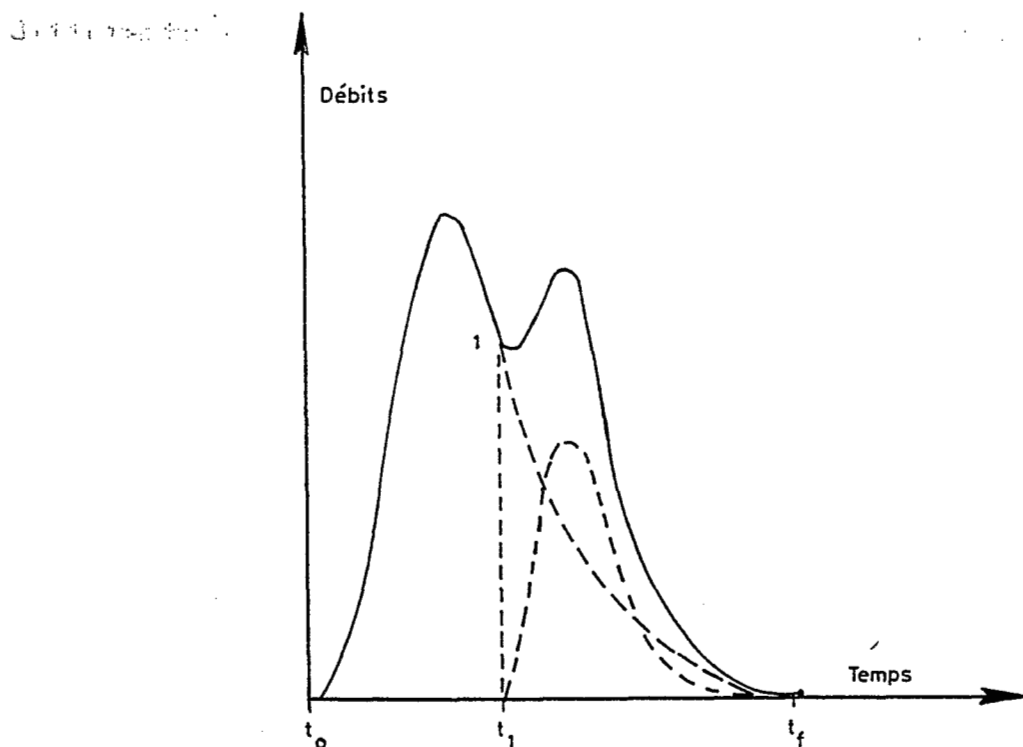


Fig. 2.19 SCHEMA DE SEPARATION DES HYDROGRAMMES

La deuxième pointe de crue survient sur la courbe de décrue du secteur vertisol; elle est provoquée par le ruissellement du système ferrugineux.

Signalons que ce "traçage colorimétrique" a été aussi observé pour d'autres crues.

Le fonctionnement hydrodynamique de ce bassin peut être expliqué par un schéma simplifié de séparation des hydrogrammes pour une même crue (fig. 2.19).

Le ruissellement de la partie aval (vertisol dégradé peu couvert, 1/5 du bassin) arrive en premier à l'exutoire au temps t_0 et dure jusqu'à la fin de l'écoulement au temps t_f . Le ruissellement de la partie amont (ferrugineux très cultivé, 4/5 du bassin) amorce la deuxième pointe de crue au temps t_1 . Ce ruissellement peut cesser avant la fin de l'écoulement à l'exutoire (absence des eaux "rougeâtres" pendant l'observation de la courbe finissante de décrue).

Le temps séparant les 2 pointes de crue est fonction des caractéristiques de l'averse, principalement sa durée et ses intensités maximales.

Selon le schéma simplifié évoqué ci-dessus (fig. 2.19) et à l'examen des figures 2.16, 2.17, 2.18 des événements averses-crues des 06/07, 14/07 et 21/07/90, il est possible d'estimer les volumes observés pour chaque partie du bassin (tab n° 2.9).

CRUE DU	VOLUME OBSERVE(m^3) Hydrog. vert.dégr	VOLUME OBSERVE(m^3) Hydrog. ferrug
06/07/90	1260,0	126,0
14/07/90	388,8	162,0
21/07/90	61,2	12,6

Tableau n° 2.9. Volumes (m^3) observés
Secteur vertisol et système ferrugineux

En terme de lames ruisselées (volumes ramenés aux surfaces respectives), on a les valeurs suivantes :

CRUE DU	Lr (mm) OBSERVEE vertisol	Lr (mm) OBSERVEE ferrugineux
06/07/90	12,0	0,291
14/07/90	3,7	0,374
21/07/90	0,583	0,029

Tableau n° 2.10. Lames ruisselées (mm)
Secteur vertisol et système ferrugineux

Au vu des tableaux ci-dessus, nous pouvons conclure que la contribution du ferrugineux au ruissellement total du bassin est très faible.

Notons toutefois que les événements averses-crues analysés correspondent à la période des travaux agricoles. A cette époque de la saison, le travail du sol limite le ruissellement et favorise l'infiltration sur les champs, notamment à ceux qui appartiennent au domaine ferrugineux.

Le bassin "ferrugineux-vertisol dégradé" est un modèle de fonctionnement hydrologique.

Tout comme le bassin "hardé", ce modèle de fonctionnement hydrologique est basé sur :

un partage de l'espace, induit par les différences de réaction à une averse des différents types de sol du bassin, et par ailleurs,

sur un partage du temps, induit par les caractéristiques des états de surface du domaine ferrugineux pendant une partie de la saison pluvieuse.

Versant "fersiallitique"

Dispositif de mesure

Le bassin est situé sur la colline de Mouda et présente les caractéristiques physiques suivantes :

$S(m^2)$	$P(m)$	k_c	$L(m)$	$l(m)$	$D(m)$	$I(\%)$	I_p
58700	1020	1,18	336	175	119	35	0,582

Le bassin est assez compact ($k_c = 1,18$), mais contrairement aux deux précédents, il présente un relief très marqué ($I = 35 \%$) dû à sa localisation dans le secteur des collines des roches vulcano-sédimentaires.

Le réseau hydrographique et le réseau de mesures sont présentés sur la figure 2.20.

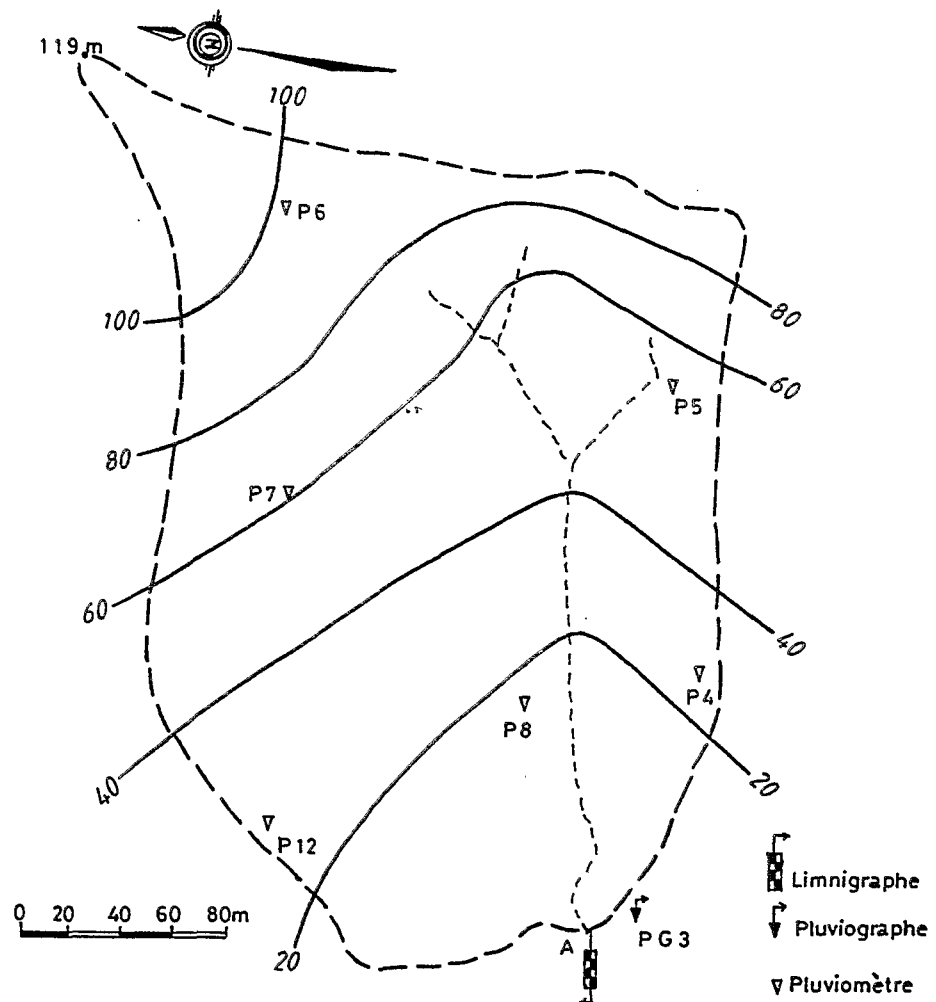


Fig. 2.20 RESEAU HYDROGRAPHIQUE ET RESEAU DE MESURES
DU VERSANT "Fersialitique"

Le dispositif de mesures hydropluviométriques a été mis en place en 1985. Il est composé de 6 pluviomètres "Association", d'un pluviographe journalier pour la pluviométrie et d'un limnigraphe OTT X journalier, d'un seuil jaugeur NEYRTEC pour la mesure du ruissellement.

L'état de surface tel que décrit au paragraphe 2.3.3 occupe la totalité du bassin.

Données et résultats

Le bassin a été observé uniquement pendant la saison des pluies de 1985.

Trois pluies seulement ont donné lieu à un ruissellement quantifiable par le dispositif de mesures.

Les caractéristiques globales des 3 événements averse-crue sont données dans le tableau n° 2.11.

DATE	P (mm)	Lr (mm)	Kr (%)
22/06/85	28,4	0,51	1,8
31/07/85	116,0	3,49	3,0
03/08/85	30,3	0,50	1,6

Tableau n° 2.11. Caractéristiques des événements averse-crue
Bassin "fersiallitique" en 1985

Les très faibles coefficients de ruissellement après les fortes averses de 1985 (année particulièrement humide) dénotent le comportement particulier de cette unité vis-à-vis du ruissellement par rapport au reste du bassin du Miyamloa.

Dans la classification de Rodier (1992) des bassins versants représentatifs étudiés au Sahel, ce bassin fait partie de la classe des "bassins très perméables" (T.P ou P5).

Cet auteur remarque que l'observation et l'étude des rares averses ayant ruisselé font admettre, pour ce bassin, les conditions de ruissellement suivantes :

$$PmA = PpA = 60-70 \text{ mm}$$

$$IK = 17 \text{ mm}$$

$$Kr = Lro/PmA = 0,015$$

où

PmA = hauteur moyenne "Association"

PpA = hauteur maximale ponctuelle lors d'une averse

IK = indice des précipitations antérieures

Pour PmA = 70 mm, il admet pour Kr la valeur de 1,7 %, voisine de 2 % (Rodier, 1989) et déduit $Lro = 70 \times 0,017 = 1,2 \text{ mm}$.

Ces différents résultats montrent que ce bassin ruisselle très peu. Toutefois, un léger ruissellement a pu être observé, pendant la campagne de mesures de 1985, pour des averses très importantes présentant des séquences d'intensités fortes et supérieures à 100 mm/h.

La participation de cet élément au ruissellement global peut être considérée comme négligeable. Nous ferons abstraction de ce milieu dans l'étude du bilan à l'exutoire de 18 km².

2.5. CONCLUSIONS.

Trois phases dans l'évolution saisonnière du recouvrement global de la strate herbacée en milieux sahéliens ont été mises en évidence par différents auteurs cités par Seghieri (1990). Il s'agit de :

la "phase d'établissement",

la "phase de la croissance rapide",

la "phase de stabilisation du recouvrement herbacé". Cette dernière phase correspond à l'arrêt de la croissance et au recouvrement maximal.

De l'étude des relations existant entre l'évolution des conditions hydriques du milieu des bassins versants de Mouda et l'évolution saisonnière du tapis végétal (Seghier, 1990), il ressort que la phase de stabilisation du recouvrement herbacé se situe en moyenne pour tous les types de sols (substrats) vers le mois d'août quels que soient leurs régimes hydriques.

L'effet saisonnier, dû à l'évolution du tapis herbacé est nettement visible sur les parcelles élémentaires du "régosol sur matériau à nodules calcaires" et du "vertisol dégradé". Nous avons pu montrer que le ruissellement sur ces parcelles était sous l'influence de deux périodes nettes de la saison pluvieuse de 1985. La première période va du 31/05 au 25/07/85 et la deuxième du 31/07 au 02/09/85.

Cet effet saisonnier est "absent" sur la parcelle "hardé" et moins visible sur 2 grandes unités (versant "hardé", versant "ferrugineux-vertisol dégradé"). Notons cependant que pour le versant "ferrugineux-vertisol dégradé", l'effet saisonnier sur le ruissellement, lié un peu plus au mode d'utilisation du sol que de la densité du couvert herbacé, apparaît et permet de partager la saison pluvieuse de 1990 en deux périodes.

La pluie (et ses caractéristiques) semble régir seule l'hydrodynamique superficielle. Pour ces milieux, les facteurs principaux du ruissellement sont hiérarchisés ainsi qu'il suit :

(i) la pluie, principalement : hauteur, intensités et fréquence dans le temps

(ii) les états de surface, principalement : les organisations pédologiques superficielles (plus la pellicule de battance est développée et se reconstitue vite, mieux elle favorise le ruissellement) et le couvert végétal (il doit atteindre un certain seuil de recouvrement, seuil de moins en moins atteint sur les grandes unités dans les conditions naturelles actuelles. Dans ce cas, le couvert végétal ne peut imposer un effet de calendrier au ruissellement). Par

ailleurs, les miniparcelles constituent un artefact favorable au développement de la végétation annuelle.

S'il est bien établi qu'il existe une relation étroite entre le degré d'évolution de la strate herbacée et le régime hydrique des sols (modulé par le régime pluviométrique local), la relation entre le ruissellement et l'évolution du couvert herbacé sur des surfaces de type versant est moins évidente et moins significative.

Le très faible ruissellement et/ou son absence observé(e) sur les "ferrugineux" et les "fersiallitiques" est dû à la nature de leurs sols (macroporosité très développée des fersiallitiques) et de l'utilisation qu'en fait l'homme (mise en cultures des ferrugineux).

Pour les fersiallitiques, la pluie n'est pas de loin le facteur principal du ruissellement.

La majeure partie des sols des "bassins versants de Mouda" est constituée de vertisols. Ce sont des sols argileux, le réseau de fentes (bien que peu dense) ne favorise pas l'infiltration. Dès les premières pluies, les fentes se ferment par gonflement des argiles : le ruissellement commence alors très tôt, même sur les vertisols modaux.

Dans les bassins de Mouda, les modèles de fonctionnement hydrologique ou "hydro-séquences" s'individualisent plus dans l'espace que dans le temps. Pour les grandes unités, l'effet du temps n'est pas très perceptible sur le ruissellement. La végétation herbacée a atteint dans ces milieux un seuil de dégradation ne lui permettant plus d'imposer sa dynamique saisonnière sur les redistributions rapides de surface.

Le mode de fonctionnement hydrodynamique du versant "fersiallitique" s'oppose à celui nettement superficiel du reste du bassin du Miyamloa. Son comportement (très défavorable) vis-à-vis du ruissellement souligne la diversité

des conditions édaphiques pouvant exister dans le milieu naturel et la complexité des transferts d'échelle spatiale.

CHAPITRE 3

FONCTIONNEMENT HYDROLOGIQUE DU SYSTEME DE MOUDA ET MODELISATION

3.1. INTRODUCTION.

L'opération de recherche pluridisciplinaire "Erosion et bilan hydrique des sols dans le Nord-Cameroun" (1982/1987) avait pour principal objectif la caractérisation des systèmes écologiques d'une zone-test (Mouda et ses environs) représentative de la plaine du Diamaré en vue de l'aménagement agro-sylvo-pastoral.

Le volet HYDROLOGIE, à partir des tests de ruissellement (et d'érosion) sous pluies simulées et sur parcelles isolées de 1 m^2 , a pour sa part, contribué au transfert d'échelle pour le milieu "hardé". Un dispositif hydropluviométrique fonctionnel dès 1984 sur l'ensemble de 18 km^2 dénommé "Bassins versants de Mouda" a permis d'aboutir à un modèle global d'écoulement par averse (Thébé, 1987).

Une structuration plus fine du bassin, associée à l'étude de l'influence de la dynamique saisonnière sur l'écoulement était nécessaire afin de préciser certains aspects dynamiques du fonctionnement hydrologique des différents ensembles identifiés sur la carte des systèmes écologiques.

C'est l'objectif premier de l'opération de recherche en partenariat ORSTOM (UR 2A) / MINRST (IRGM-CRH) qui a démarré en 1989 et est intitulée "Etude différenciée du ruissellement et de l'érosion et de leur impact sur le régime hydrique des sols dans la région de Maroua".

La technique des "bassins versants représentatifs" a été utilisée pour cette étude.

En 1987, 4 nouveaux bassins versants provenant de la subdivision du grand ensemble de $18,1 \text{ km}^2$ ont été équipés. Ils ont permis d'obtenir une information spatialisée sur les événements "averse-crue", indispensable pour la compréhension du fonctionnement en crue du bassin total.

3.2. SYSTEME HYDROLOGIQUE DE MOUDA : APPORTS ET CRUES.

3.2.1. Bilan hydrologique.

Nous avons défini les termes du bilan hydrologique pour une période donnée au chapitre 2 (cf. 2.4.2.2).

3.2.1.1. Bilan annuel.

Pour évaluer les termes du bilan annuel, le concept de l'année hydrologique est indispensable (Roche, 1986).

Roche définit l'année hydrologique comme l'année correspondant au cycle annuel de variation des débits, découpée dans l'année calendaire de manière à ce que les réserves du bassin soient minimales au début et à la fin de la période choisie.

D'une façon générale, l'équation du bilan annuel s'écrit :

$$P = Le + DS + ETR$$

où

P = pluie de l'année sur le bassin

Le = lame écoulée totale annuelle

DS = variation de stock (positive ou négative)

Comme nous le verrons dans la suite de cette partie de notre travail, les écoulements dans les bassins étudiés commencent avec les pluies et cessent avec elles, il n'existe pas en surface de débit fourni par la vidange des réserves souterraines. Dans ce cas, on peut admettre qu'à l'échelle annuelle la variation de stock DS est nulle. L'équation du bilan annuel devient :

$$P - Le = ETR = De$$

Le déficit d'écoulement (De), calculé par cette formule représenterait, à l'échelle annuelle, l'évapotranspiration réelle et l'infiltration.

Pour notre région (voir tableau n° 1.7 du chapitre 1), la saison des pluies ne s'installe de façon franche que de mai à

septembre, mais les pluies d'avril (plus ou moins abondantes selon les années) participent à la recharge hydrique des sols (en particulier des vertisols modaux). Il nous paraît donc logique de débiter l'année hydrologique sur les bassins de Mouda le 1er avril et de la terminer le 31 mars.

Les tableaux n°s 3.1, 3.2, 3.3, et 3.4 récapitulent les résultats concernant les principaux termes du bilan sur les deux axes d'alimentation du mayo Miyamloa, le tableau n° 3.5 présente le bilan annuel à l'exutoire général du système.

rive gauche

MAYO MIDAOUA à ST AMONT

Année	P (mm)	Lr (mm)	De (mm)	Kr (%)
1988	(799,4)	(223,8)	(575,6)	(28,0)
1989	709,2	64,6	644,6	9,1
1990	705,8	119,6	586,2	16,9

Tableau n° 3.1. Bilan annuel de Midaoua amont

MAYO MIDAOUA à ST AVAL

Année	P (mm)	Lr (mm)	De (mm)	Kr (%)
1988	(774,3)	(199,7)	(574,6)	(25,8)
1989	718,1	66,0	652,1	9,2
1990	741,3	161,4	579,9	21,8

Tableau n° 3.2. Bilan annuel de Midaoua aval

rive droite

MAYO MOUDA à ST AMONT

Année	P (mm)	Lr (mm)	De (mm)	Ke (%)
1988	(873,0)	(297,1)	(575,9)	(34,0)
1989	739,4	134,4	605,0	18,2
1990	739,7	170,6	569,1	23,1

Tableau n° 3.3. Bilan annuel de Mouda amont

MAYO MOUDA à ST AVAL

Année	P (mm)	Lr (mm)	De (mm)	Ke (%)
1988	(879,3)	(177,2)	(702,1)	(20,2)
1989	720,2	85,0	635,2	11,8
1990	766,6	146,8	619,8	19,1

Tableau n° 3.4. Bilan annuel de Mouda aval

exutoire du système : MAYO MIYAMLOA à MOUDA

Année	P (mm)	lr (mm)	De (mm)	Ke (%)
1988	(829,0)	(208,9)	(620,1)	(25,2)
1989	714,9	79,1	635,8	11,1
1990	760,8	(90,7)	(670,1)	(11,9)

Tableau n° 3.5. Bilan annuel du Miyamloa à Mouda

(Les valeurs entre parenthèses (x) indiquent les années avec lacunes d'observation).

A l'examen de ces tableaux, on peut faire les remarques suivantes :

En 1988, les bassins de la rive droite ont été plus arrosés que ceux de la rive gauche; en 1989 et 1990 les régimes pluviométriques ont présenté peu de différences sur les différents bassins du système. Si les coefficients de ruissellement ont varié d'une année à l'autre sur les différentes unités, on peut remarquer par contre une constance relative du déficit d'écoulement annuel sur ces bassins. Les pluies rechargent d'abord le stock hydrique du sol, l'excédent est la lame ruisselée observée à l'exutoire. Si on considère que l'ETP de Penman annuelle est de 1832 mm dans la région, le déficit évapotranspiratoire annuel serait de l'ordre de 1190 mm sur le grand ensemble. Les figures 3.1, 3.2 et 3.3 représentent les couples Le et P annuelles et montrent le rôle joué par les fortes pluies (et leur fréquence) dans la production des écoulements. Les années 1989 et 1990 ont eu pratiquement les mêmes quantités de pluie pour tous les bassins, mais le rapport $Le_{(1990)}/Le_{(1989)}$ est de 1,9 pour Midaoua amont, 2,4 pour Midaoua aval et 1,7 pour Mouda aval.

En 1989 on a observé 5 pluies avec une hauteur $\geq 30,0$ mm isolées dans le temps, en 1990, 7 pluies de hauteur $\geq 30,0$ mm sont tombées dans de bonnes conditions de saturation du sol. Ceci explique en partie les différences de comportement des bassins vis-à-vis du ruissellement pour 2 années ayant eu les mêmes quantités de pluie.

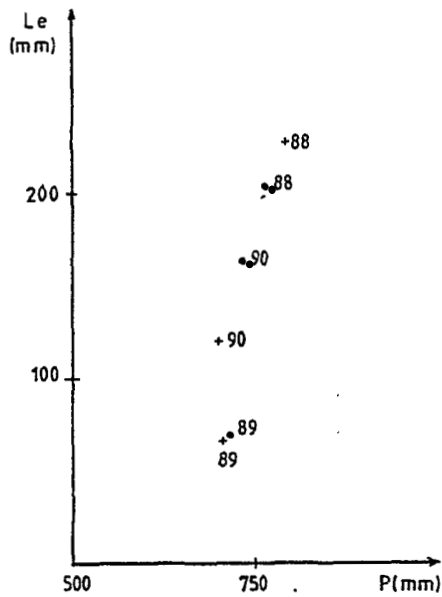


Fig. 3.1 BILAN ANNUEL: ECOULEMENT
- RIVE GAUCHE
+ MIDAOUA AMONT • MIDAOUA AVAL

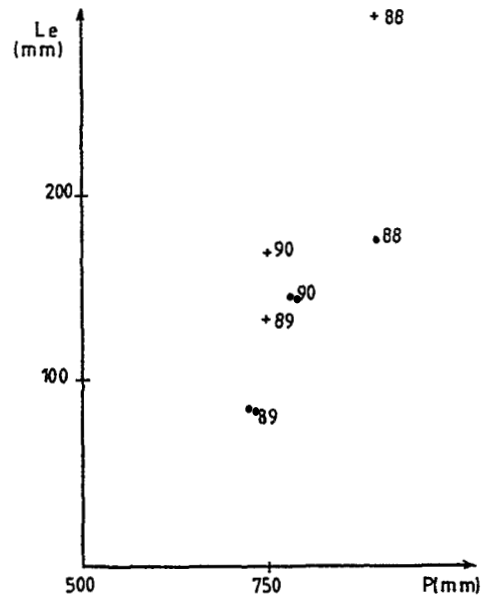


Fig. 3.2 BILAN ANNUEL: ECOULEMENT
RIVE DROITE
+ MOUDA AMONT • MOUDA AVAL

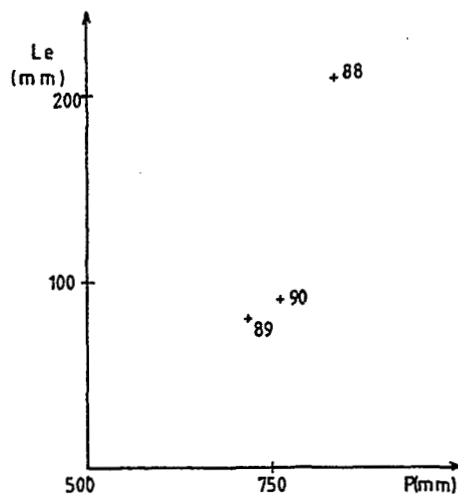


Fig. 3.3 BILAN ANNUEL: ECOULEMENT
MIYAMLOA A MOUDA

3.2.1.2. Bilan mensuel.

L'analyse en données mensuelles permet de mieux appréhender les évolutions saisonnières des différents termes du bilan.

Les tableaux n°s 3.6, 3.7, 3.8, 3.9 et 3.10 récapitulent les valeurs mensuelles des termes du bilan hydrologique de 1988 à 1990 sur les cinq bassins.

	AVR	MAI	JUN	JUL	AOU	SEP	OCT
1988							
P	-	-	(59,8)	178,4	348,8	212,4	
Lr	-	-	(10,9)	22,3	156,5	34,1	
De	-	-	(48,9)	156,1	192,3	178,3	
Kr	-	-	(18,2)	12,5	44,9	16,1	
1989							
P	22,5	92,2	145,3	198,9	145,9	104,4	
Lr	-	17,2	13,9	18,7	7,2	7,6	
De	-	75,0	131,4	180,2	138,7	96,8	
Kr	-	18,7	9,6	9,4	4,9	7,3	
1990							
P	44,5	87,6	189,6	165,9	120,2	47,9	50,1
Lr	-	7,2	47,9	56,7	4,3	(3,5)	-
De	-	80,4	141,7	109,2	115,9	(44,4)	-
Kr	-	8,2	25,3	34,2	3,6	(7,3)	-

Tableau n° 3.6. Bilan hydrologique mensuel de Midaoua amont

	AVR	MAI	JUN	JUL	AOU	SEP	OCT
1988							
P	-	-	(44,4)	184,7	307,4	237,8	
Lr	-	-	(3,4)	47,0	107,8	41,5	
De	-	-	(41,0)	137,7	199,6	196,3	
Kr	-	-	(7,7)	25,4	35,1	17,5	
1989							
P	30,2	96,1	150,8	187,9	146,5	106,6	
Lr	0,0	14,5	17,7	19,1	4,9	9,8	
De	30,2	81,6	133,1	168,8	141,6	96,8	
Kr	0,0	15,1	11,7	10,2	3,3	9,2	
1990							
P	40,0	85,5	213,8	172,4	142,2	49,0	(38,4)
Lr	-	10,7	96,8	43,8	9,9	0,2	-
De	-	74,8	117,0	128,6	132,3	48,8	-
Kr	-	12,5	45,3	25,4	7,0	0,4	-

Tableau n° 3.7. Bilan hydrologique mensuel de Midaoua aval

	AVR	MAI	JUN	JUL	AOU	SEP	OCT
1988							
P	(9,5)	(38,0)	(66,1)	200,7	356,8	201,9	
Lr	-	-	(24,3)	68,6	158,6	45,6	
De	-	-	(41,8)	132,1	198,2	156,3	
Kr	-	-	36,8	34,2	44,5	22,6	
1989							
P	22,3	(102,6)	142,6	194,9	176,6	100,4	
Lr	0,0	28,9	32,1	37,5	21,4	14,5	
De	22,3	73,7	110,5	157,4	155,2	85,9	
Kr	0,0	(28,2)	22,5	19,2	12,1	14,4	
1990							
P	47,2	98,3	193,8	188,0	130,4	51,4	(30,6)
Lr	-	17,1	85,0	46,1	21,4	1,0	-
De	-	81,2	108,8	141,9	109,0	50,4	-
Kr	-	17,4	43,9	24,5	16,4	1,9	-

Tableau n° 3.8. Bilan hydrologique mensuel de Mouda amont

	AVR	MAI	JUN	JUL	AOU	SEP	OCT
1988							
P	(9,5)	(38,0)	(52,3)	233,5	335,5	210,5	
Lr	-	-	(11,6)	63,5	69,8	43,9	
De	-	-	40,7	170,0	265,7	166,6	
Kr	-	-	22,2	27,2	20,8	20,9	
1989							
P	28,4	(98,9)	134,2	193,6	154,9	110,2	
Lr	0,0	(16,4)	24,4	21,9	10,1	12,2	
De	28,4	82,5	109,8	171,7	144,8	98,0	
Kr	0,0	16,6	18,2	11,3	6,5	11,1	
1990							
P	(47,1)	95,6	203,8	191,2	144,5	53,2	(31,2)
Lr	-	8,4	71,6	49,6	16,4	0,8	-
De	-	87,2	132,2	141,6	128,1	52,4	-
Kr	-	8,8	35,1	25,9	11,3	1,5	-

Tableau n° 3.9. Bilan hydrologique mensuel de Mouda aval

	AVR	MAI	JUN	JUL	AOU	SEP	OCT
1988							
P	-	(38,1)	(52,6)	207,6	306,3	224,4	
Lr	-	-	(3,8)	55,8	109,2	40,1	
De	-	-	(48,8)	151,8	197,1	184,3	
Kr	-	-	(7,2)	26,9	35,7	17,9	
1989							
P	31,3	(95,1)	145,6	186,4	148,1	108,4	
Lr	0,0	(18,6)	22,5	20,0	6,8	11,2	
De	31,3	76,5	123,1	166,4	141,3	97,2	
Kr	0,0	19,6	15,5	10,7	4,6	10,3	
1990							
P	(42,6)	84,6	213,9	184,7	143,4	52,2	39,4
Lr	-	6,8	(22,8)	44,7	16,0	0,4	-
De	-	77,8	(191,1)	140,0	127,4	51,8	-
Kr	-	8,0	(10,7)	24,2	11,2	0,8	-

Tableau n° 3.10. Bilan hydrologique mensuel
du Miyamloa à Mouda

(Les lacunes d'observation sont indiquées par les parenthèses et les tirets).

L'examen des tableaux mensuels montre que le déficit d'écoulement De (ou ETR) est relativement stable pendant les mois de pluies abondantes (juillet à septembre pour 1988, juin à août pour 1989 et 1990) et variable pendant les mois les moins pluvieux. Le cycle végétatif suit de près ce rythme saisonnier du déficit d'écoulement : le recouvrement des herbacées est régulier en période humide et variable en période sèche.

3.2.2. Evénements "averse-crue".

Notre objectif dans ce mémoire est surtout de comprendre le fonctionnement hydrologique du système de Mouda en période de crue. Il est alors essentiel de rappeler la notion de crue et de la replacer dans le contexte des bassins versants de Mouda.

Une crue peut être définie comme la réponse d'un bassin à une averse ou à un épisode pluvieux. La notion de crue est liée à celle de temps de concentration des eaux pluviales sur un bassin.

L'étude d'une crue est liée à des grandeurs qui, d'une part décrivent son hydrogramme (variation des débits en fonction du temps), et d'autre part, caractérisent l'événement pluvieux qui en est la cause.

3.2.2.1. Définition des grandeurs descriptives.

L'hydrogramme.

La figure 3.4 présente les grandeurs usuelles qui caractérisent la variation du débit.

Nous en retiendrons les principales.

- le débit de pointe (Q_{max})

C'est le débit maximal instantané observé

- le temps de montée (t_m)

Le temps de montée est la durée qui s'écoule entre le début de l'arrivée à l'exutoire du ruissellement et le maximum de l'hydrogramme de ruissellement

- le temps de réponse du bassin (t_p) ou "lag"

C'est l'intervalle de temps qui sépare le centre de gravité de la pluie efficace de celui de la crue afférente

- le temps de base (t_b)

C'est la durée du ruissellement

- le temps de concentration (t_c)

C'est le temps mis par une particule d'eau provenant de la partie du bassin la plus éloignée de l'exutoire pour parvenir à celui ci.

- le volume ruisselé (V_r)

Il est égal au volume de la pluie excédentaire et correspond au volume du ruissellement pur de l'hydrogramme de crue. Il lui correspond une lame ruisselée $L_r = V_r A^{-1}$ (A pour superficie).

L_r est un paramètre fondamental de description d'une crue, c'est la grandeur la plus facile à mettre en regard de la pluie moyenne. L_r sera l'un des critères de sélection des crues à étudier.

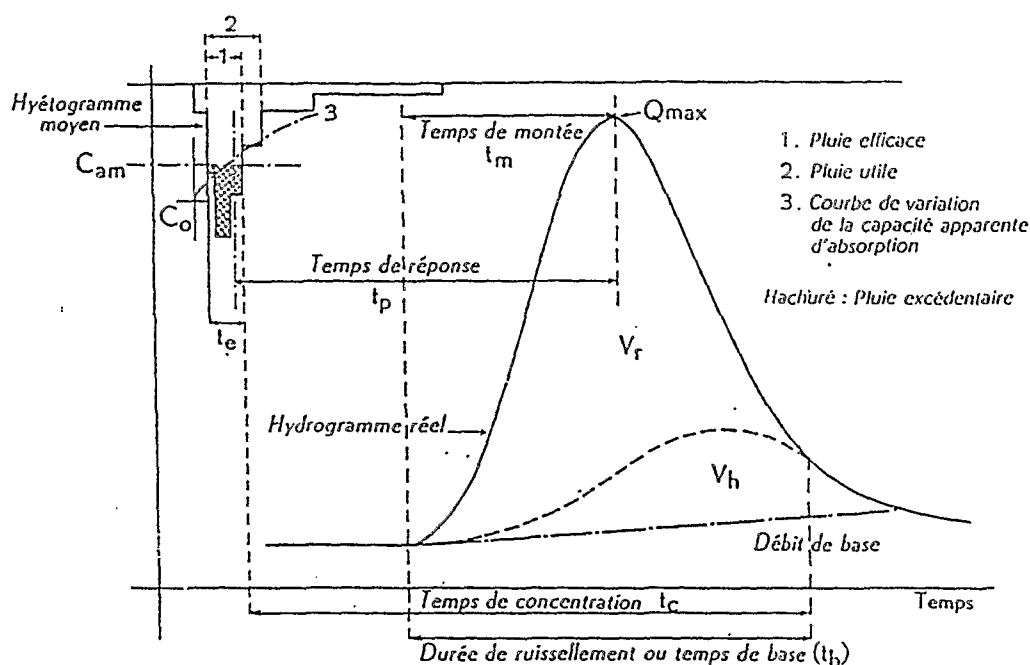


Fig. 3.4. PRINCIPALES CARACTERISTIQUES D'UNE CRUE
(ROCHE, 1963 - HYDROLOGIE DE SURFACE)

L'événement pluvieux.

La pluie est le premier facteur qui explique les caractéristiques de l'hydrogramme de crue définies dans le paragraphe précédent.

Les caractéristiques des averses de la zone d'étude ont été largement étudiées dans la première partie.

La crue étant nécessairement associée à une averse, il nous faut fixer un critère d'individualisation des averses.

Un examen minutieux des pluviogrammes de 1989 (PG 14) et de 1990 (PG 2) nous montre qu'il est exceptionnel d'avoir plus de 2 averses (de hauteur > 10 mm chacune) par jour. Seules deux averses, satisfaisant à cette condition de hauteur, espacées de moins de 24 heures (temps d'écart variant entre 17 et 21 heures) ont été observées six fois pendant notre période d'étude. Dans ce cas de figure, les hydrogrammes observés à l'exutoire du mayo Miyamloa montrent que la deuxième averse contribue à l'écoulement provoqué par la première averse.

On a évoqué dans la première partie, la structure et la forme, la variabilité spatiale des averses de notre région (cf. 1.2.2.5).

Notre critère d'individualisation est basé sur la réaction du bassin à deux averses qui se suivent dans le temps. Nous retiendrons qu'au cours de la crue, si l'averse s'interrompt et reprend avant que l'écoulement de crue induit par la première averse soit terminé, cette nouvelle averse sera considérée comme contributive à l'évènement analysé. Les deux averses constitueront le même épisode pluvieux.

Une averse sera définie par sa hauteur totale précipitée et par la hauteur de la pluie excédentaire. La pluie excédentaire ou pluie nette (P_n) est la pluie qui a ruisselé. Son volume (V_r) est égal au volume total de l'averse diminué du volume de la pluie qui s'est infiltrée, s'est évaporée ou a été interceptée par la végétation.

3.2.2.2. Echantillon des crues.

Comme l'étude porte sur le fonctionnement hydrodynamique du système de Mouda en période de crue, il est normal d'analyser en priorité les événements "averse-crue" ayant causé le ruissellement aux cinq exutoires. Nous retiendrons comme crue dans l'échantillon d'analyse toute crue induite par un seul épisode pluvieux et satisfaisant le critère d'observation spatiale (ruissellement observé aux cinq exutoires pour le même épisode pluvieux). A ces deux critères de sélection, nous ajoutons la condition de la lame de crue (L_r) supérieure à 1 mm à l'exutoire du système (Miyamloa à Mouda).

Ce sont généralement les fortes averses (cf. 1.2.2.5 et 3.2.1.1) et des averses moyennes survenant sur des sols "assez humidifiés" qui sont à l'origine des crues ayant ruisselé sur tout le bassin.

La constitution de l'échantillon a été faite à partir de l'observation des hydrogrammes observés de 1988 à 1990 à la station hydrométrique du mayo Miyamloa à Mouda. Pendant cette période, 31 crues (satisfaisant les critères de choix) dont 13

en 1988, 9 en 1989, 9 en 1990 ont été observées. Elles constitueront l'échantillon d'analyse. Leur répartition dans la saison est la suivante :

1988

Juillet (6), Août (4), Septembre (3)

1989

Mai (1), Juin (3), Juillet (3), Août (1), Septembre (1)

1990

Mai (2), Juin (3), Juillet (4)

Les temps de montée (t_m) à l'exutoire du Miyamloa sont assez variables : de 35 à 937 mn.

Les faibles valeurs de t_m : de 35 à 75 mn correspondent aux crues causées par des faibles averses ($12 < P_m < 25$ mm) limitées à une petite partie du bassin.

Les fortes valeurs de t_m : de 200 à 937 correspondent aux crues complexes, à plusieurs pointes, causées par des averses à plusieurs corps et longues dans le temps.

Les valeurs les plus fréquentes de t_m se situent entre 100 et 150 mn, 21 crues de 1988 à 1990 observées à Miyamloa ont leur temps de montée dans cet intervalle. Thébé (1987), par comparaison des hydrogrammes observés (réduits à un hydrogramme de volume constant) en 1984 et 1985, avait trouvé un temps de montée de 105 mn pour l'hydrogramme médian de ce bassin.

L'intervalle des t_m les plus fréquents correspond aux crues causées par des fortes averses ($P_m \geq 30,0$ mm) décrites par le schéma de Huff (1967), et par des pluies moyennes (11 pluies pour $15,6 < P < 29,3$ mm) tombant dans de bonnes conditions d'humectation des sols.

Le temps de base (t_b : durée du ruissellement) varie de 555 à 2155 mn. Thébé (1987) avait observé des valeurs comprises entre 240 et 385 mn.

L'analyse sur papier semi-logarithmique des hydrogrammes observés aux cinq exutoires de 1988 à 1990 montre qu'il n'y a pas d'écoulement permanent entre deux averses individualisées. Nous ne parlerons pas de différentes formes d'écoulement sur

nos bassins. La seule forme d'écoulement observée est le ruissellement; celui-ci peut durer longtemps après la fin de l'averse. C'est ce qui explique les valeurs élevées dans certains cas, du temps de base. La valeur du temps de base dépend de la distribution spatio-temporelle de l'averse et de l'état du milieu avant l'averse.

La grande proportion de crues (67,7 % de l'échantillon) présentant un temps de montée compris entre 100 et 150 mn pour des hauteurs de précipitation variant de 11,5 à 110 mm, confirme le fonctionnement typiquement superficiel du système. Les hydrogrammes d'un même bassin présenteront des formes semblables d'une crue à l'autre, modulées seulement par les caractéristiques des averses qui les produisent et l'état d'humectation du sol.

3.3. FONCTIONNEMENT HYDROLOGIQUE DU SYSTEME DE MOUDA.

Ce paragraphe est introductif à celui sur la modélisation des écoulements dans les bassins versants de Mouda.

Nous schématisons le fonctionnement hydrodynamique de l'ensemble du bassin à partir des résultats obtenus sur ceux de ses composantes spatialisées.

Trois versants-types ont été identifiés sur le bassin du Miyamloa à Mouda.

D'Est en Ouest sur une toposéquence type, on trouve une ligne de collines dont les flancs sont occupés par une savane arborée sur sols fersiallitiques (7,7 % de la superficie totale du bassin), suit ensuite la plaine formée par la séquence complète des vertisols : vertisols à fentes de retrait jusqu'aux bad-lands en passant par le hardé occupent les principaux axes de drainage. La végétation est une savane graminéenne. La plaine représente 70,9 % du bassin. Le troisième type de versant est formé sur le flanc Ouest par un bombement gneissique couvert d'un sol ferrugineux . Il occupe 21 % de la surface du bassin.

A ces trois versants-types correspondent des modes différents de fonctionnement hydrodynamique. Au mode nettement superficiel de la plaine s'oppose le mode interne de la colline (totale absence des processus de ruissellement). Entre ces deux modes, le plateau ferrugineux, selon le degré des effets de l'anthropisation peut présenter les caractéristiques de l'un ou de l'autre mode ou les deux à la fois.

Les cinq bassins étudiés ont un comportement qui privilégie le premier mode de fonctionnement.

La figure 3.5 montre la réponse des 5 bassins à une averse représentative de la saison des pluies et tombant dans les conditions moyennes de saturation des sols.

Les débits spécifiques de pointe de crue (débit maximal instantané rapporté à la superficie du bassin) ont été calculés pour cet événement du 08/06/89.

- Midaoua amont : 1653,9 l/skm²
- Midaoua aval : 1659,1 l/skm²
- Mouda amont : 4100,0 l/skm²
- Mouda aval : 2054,9 l/skm²
- Miyamloa à Mouda : 1484,0 l/skm²

Le mayo Mouda amont présente la plus forte valeur du débit spécifique pour cette crue. Ce bassin est totalement recouvert par le hardé. Les deux bassins de Midaoua ont les mêmes valeurs.

Si les mécanismes de fonctionnement diffèrent d'un versant à l'autre, l'écoulement sur le bassin total est lié à l'ensemble des différents versants. L'imperméabilisation dans le bassin est croissante en se rapprochant des axes de drainage. Cette partie occupe les 2/3 du bassin et concentre les hydrosystèmes les plus actifs; elle impose à l'exutoire un comportement hydrodynamique de type superficiel.

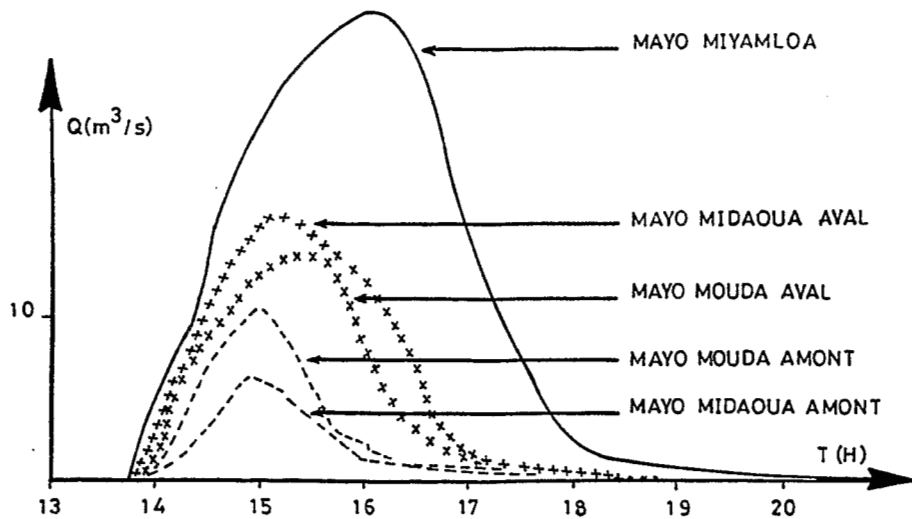
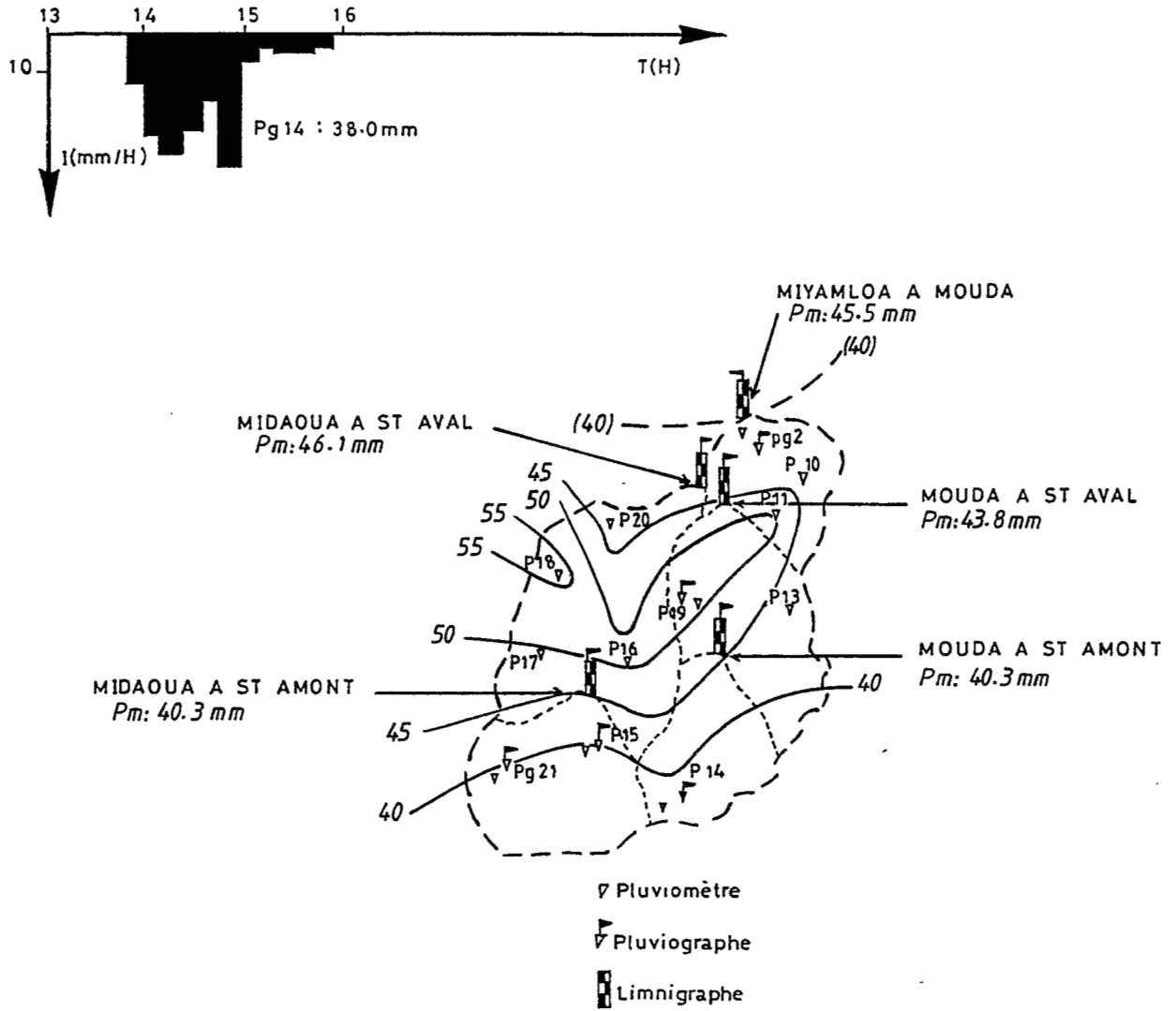


Fig. 3.5 AVERSE ET CRUE DU 08/06/89 SUR LE SYSTEME DE MOUDA

3.4. MODELISATION.

3.4.1. Généralités, systèmes hydrologiques et modèles.

Dans les paragraphes précédents nous avons essayé de comprendre le fonctionnement hydrologique des bassins versants de Mouda par analyse des données qualitatives (carte des états de surface) et quantitatives (bilans d'écoulement aux exutoires à différentes échelles d'espace et de temps). Une telle approche de la connaissance des mécanismes hydrologiques permet la modélisation des processus de production du ruissellement. C'est l'objectif de ce paragraphe.

Avant d'examiner les résultats obtenus après application des données des bassins versants de Mouda à un modèle, nous aurons auparavant rappelé les définitions de quelques termes usuels en modélisation hydrologique.

Dooge (1968) définit un système hydrologique comme un ensemble de processus physiques, chimiques ou biologiques qui transforment une/et ou des variables d'entrée en une/et ou des variables de sortie.

Les variables du système hydrologique sont liées au temps, pour cela elles sont à distinguer des paramètres physiques qui eux ne changent pas avec le temps (exemple : superficie d'un bassin).

Un modèle est une représentation simplifiée d'un système. Pour Naslin cité par Villiermaux et Antoine (1978), le modèle doit permettre de rendre compte de toutes les observations faites et de prévoir le comportement du système considéré dans des conditions différentes de celles qui ont donné naissance aux observations.

Les modèles hydrologiques sont des modèles mathématiques : le fonctionnement du système est représenté par un ensemble d'équations qui expriment les relations entre les variables et les paramètres.

La compréhension des mécanismes hydrologiques sur un bassin versant est le problème fondamental de l'hydrologie. La complexité de ces mécanismes dans un milieu tout aussi complexe a entraîné la profusion des modèles hydrologiques qui souvent ont l'empreinte de l'origine "scientifique" de l'hydrologue (hydrogéologue, géographe, mathématicien, hydraulicien, électronicien, etc ...).

Globalement, on s'accorde aujourd'hui pour une classification double des modèles hydrologiques. Elle est basée d'abord sur les échelles d'espace et de temps, puis sur la nature des variables et les relations existant entre ces variables (Clarke, 1973).

A l'échelle spatiale, un modèle est dit distribué (ou à discrétisation spatiale) quand les entrées, les sorties et les caractéristiques du système sont distribuées dans l'espace. Le modèle global ne tient pas compte de la variabilité spatiale, il considère que le bassin réagit "dans son ensemble" à l'événement climatologique.

A l'échelle temporelle, le modèle par événement est activé pour chaque crue tandis que le modèle en continu traite une crue comme un moment particulier d'un processus continu. Les modèles par événement permettent de négliger l'évapotranspiration, mais ils exigent une condition aux limites supplémentaire : l'humidité initiale du bassin.

La nature des variables et les relations existant entre elles, définissent la deuxième classification des modèles hydrologiques.

Les modèles stochastiques se distinguent des modèles déterministes par leurs variables aléatoires ayant une distribution de probabilité.

La distinction entre modèles conceptuels et modèles empiriques se fait selon que la forme de l'équation entre les variables est suggérée par les considérations physiques ou non. Clarke (1973) relève cependant que la distinction entre ces deux types de modèles est totalement artificielle, car beaucoup de

modèles dits conceptuels ont des équations à paramètres empiriques, il cite en exemple la loi de Darcy.

3.4.2. Choix du type de modèle pour le système hydrologique de Mouda.

Le choix d'un modèle est imposé par les objectifs que l'on veut atteindre lors de l'étude d'un système hydrologique.

Le principal objectif de notre étude demeure l'essai de compréhension des mécanismes de production du ruissellement lors des crues à l'exutoire d'un ensemble de 18,1 km² caractérisé par la variabilité des paramètres physiques et des caractéristiques liées au temps. Pour y parvenir, nous avons choisi l'approche par étude différenciée du ruissellement sur les différents bassins formant le système de Mouda.

L'objectif fixé tel que rappelé ci-dessus doit être compatible avec les données dont on dispose.

Trois années d'observations et de mesures nous ont permis d'avoir des données quantitatives et qualitatives sur chaque bassin.

(i) Pour mieux rendre compte des phénomènes observés sur le bassin, les pluies et les débits ont été obtenus à petits pas de temps. Pour chaque averse, 3 données sont disponibles; ce sont : la pluie moyenne sur l'ensemble du système, la pluie moyenne sur chaque bassin, un indice "assez grossier" de l'état initial de l'humidité de chaque unité, estimé par les pertes de pluies initiales.

Les caractéristiques des différents réseaux hydrographiques (principalement longueur des biefs) sont également connues.

(ii) Les caractéristiques de surface des bassins sont obtenues sur la carte des systèmes écologiques.

Face à la complexité du milieu physique caractérisé par les différences de comportement des unités vis-à-vis des événements "averse-crue", seule une approche spatiale du fonctionnement qui tienne compte des spécificités de chaque

unité, peut permettre une représentation des phénomènes se rapprochant autant que possible de la réalité.

Si l'adéquation entre objectif à atteindre et données disponibles est vérifiée, alors le modèle distribué peut proposer des solutions au problème posé.

Le principe du modèle distribué ou à discrétisation spatiale repose sur une subdivision du bassin versant en une multitude de parcelles élémentaires de même superficie (Girard, 1975). Girard ajoute que cette subdivision permet de saisir à une petite échelle la formation "in situ" de la lame d'eau disponible pour l'écoulement selon le type de couvert végétal, la nature et les caractéristiques des sols et du sous-sol.

Le modèle que nous avons appliqué au système de Mouda est basé sur les mêmes concepts, mais ici chacun des cinq bassins du système représente une parcelle élémentaire où les caractéristiques physiographiques interviennent au niveau de la fonction de transfert entre bassins.

L'événement "averse-crue" est l'objet principal de l'étude, le modèle distribué choisi est un modèle par événement.

RORB (runoff routing, la première version du modèle fut développée sur un ordinateur Burroughs B6700) est le modèle employé. Il a été élaboré par Laurenson, E.M et Mein, R.G. dès 1978 (Laurenson, Mein., 1990). La version 4.11 dont il est question dans nos applications existe depuis 1987.

3.4.3. Le modèle RORB : concepts et expressions analytiques, description et fonctionnement.

3.4.3.1. Concepts et expressions analytiques.

Concepts.

La pluie et le ruissellement à l'exutoire sont les seuls termes du bilan hydrologique modélisés par RORB, les autres termes tels que l'évapotranspiration, l'humidité du sol, les eaux souterraines (restitution des nappes) ne le sont pas. Dans notre bassin les effets de ces derniers termes du bilan

au niveau de l'événement "averse-crue" sont négligeables sur le débit observé à l'exutoire.

Comme la plupart des modèles pluies-débits, le modèle RORB est une association de deux sous-modèles.

Le premier sous-modèle ou fonction de production, transforme les pluies brutes P_B en pluies nettes P_N (pluie excédentaire) après soustraction des pertes.

Les pluies nettes engendrent les débits écoulés à l'exutoire au moyen du deuxième sous-modèle qui est la fonction de transfert.

La figure 3.6 montre le schéma général d'un modèle pluie-débit.

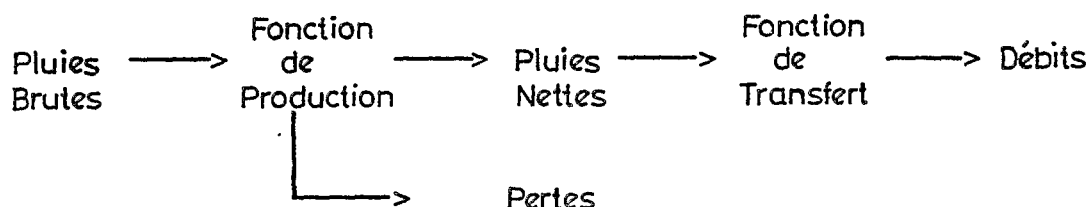


Fig.3.6 SCHEMA GENERAL D'UN MODELE PLUIE-DEBIT

Le principe de base du modèle RORB repose sur les effets du réseau de drainage (stockage et transmission des volumes) sur le ruissellement observé à l'exutoire.

Considérons une averse assez importante sur le bassin de façon à produire le ruissellement à l'exutoire et représentons sur un même graphique le hyétogramme de la pluie nette et l'hydrogramme de ruissellement (fig. 3.7). Les volumes de la pluie nette et du ruissellement sont égaux, mais on constate que l'hydrogramme de ruissellement est plus plat que le hyétogramme de la pluie nette et que son maximum arrive plus tard dans le temps.

Les effets du bassin sur l'hydrogramme d'entrée sont les mêmes que ceux d'un stockage. Ils se manifestent par :

- (i) l'atténuation de l'hydrogramme d'entrée, et

(ii) la translation de son maximum dans le temps.

Les effets du bassin sur la pluie excédentaire peuvent être simulés par la propagation des entrées (hyétogrammes de la pluie excédentaire) à travers une série de tronçons de stockage. Les hydrogrammes de ruissellement seront de plus en plus "mous" et leurs maximum de plus en plus décalés dans le temps (fig. 3.8).

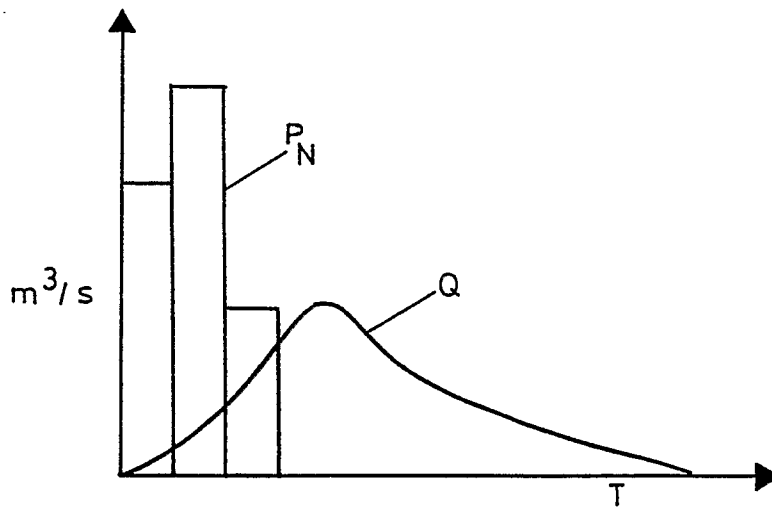


Fig . 3.7 EFFETS DU BASSIN SUR L' HYDROGRAMME

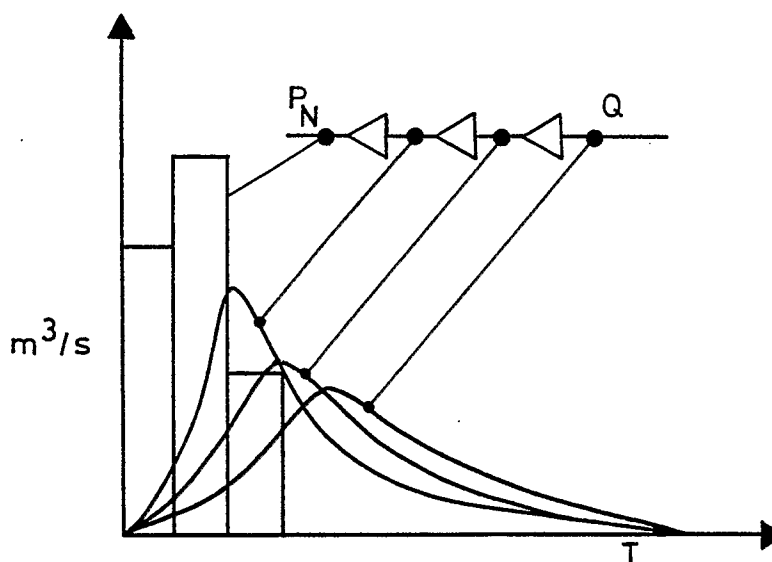


Fig . 3.8 SIMULATION DES EFFETS DU BASSIN SUR L' HYDROGRAMME
A TRAVERS UNE SERIE DE TRONCONS DE STOCKAGE

Expressions analytiques.

La fonction de production.

Le modèle RORB utilise le concept de pertes initiales et propose deux formulations pour la fonction de production.

Les pertes initiales sont définies comme la hauteur de pluie à satisfaire en "pertes" avant que toute sortie des sous-bassins ne commence.

La première formulation de la production est le modèle "0" avec pertes initiales suivies d'une fraction constante de perte pour chaque pas de temps Δt ; c'est une extension du concept du coefficient de ruissellement.

La deuxième formulation est le modèle "1" avec pertes initiales suivies d'un taux de perte constant. Le ruissellement commence après satisfaction d'une hauteur par perte. Pour le reste des pas de temps, la quantité de pluie perdue pour le ruissellement est constante.

Cette deuxième formulation se rapproche de la fonction de production utilisant la capacité d'absorption moyenne (fonction ϕ -index des anglo-saxons, Morel-Seytoux, 1981).

L'expression de la fonction ϕ -index est :

$$\sum_{i=1}^k P_N(i) = \sum_{i=1}^k P_B(i) - kCAM - P_{imb}$$

où

$P_B(k)$ = lame totale d'eau précipitée sur le bassin dans l'intervalle $(k-1, k)$ en mm

$P_N(k)$ = pluie nette supposée atteindre l'exutoire du bassin par ruissellement en mm

P_{imb} = pluie d'imbibition en mm

CAM = capacité d'absorption moyenne en mm/h

i, k = intervalle de temps

CAM est considérée constante au cours du temps et quelle que soit l'intensité de la pluie.

Le modèle "0" est plus adapté aux bassins urbains ou partiellement urbains, le modèle "1" représente mieux les mécanismes de pertes des bassins ruraux. Nous avons utilisé le modèle "1" pour la production dans le système de Mouda. Les figures 3.9 et 3.10 montrent les deux modèles de perte proposés par RORB.

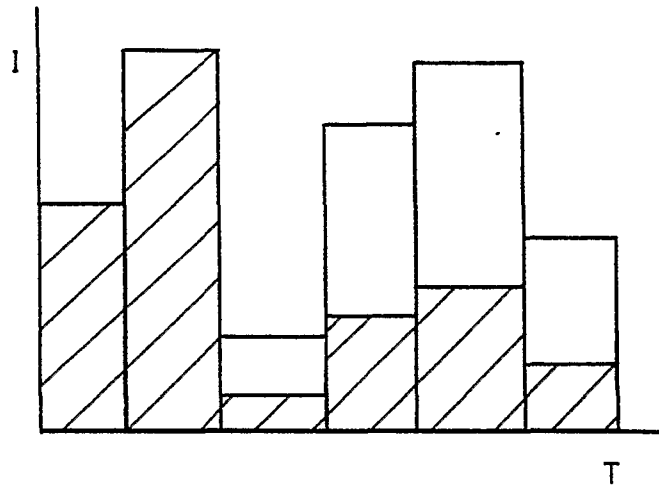


Fig. 3.9 MODELE "0" : Pertes initiales, puis pertes proportionnelles (constantes) à l'intensité

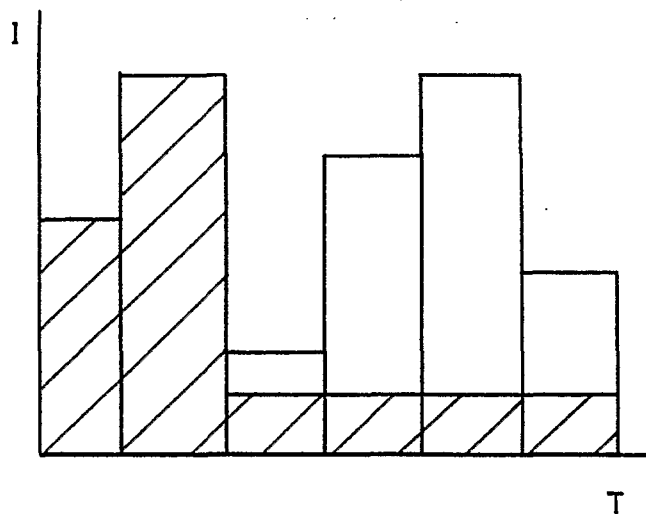


Fig. 3.10 MODELE "1" : Pertes initiales, puis intensité constante de perte

La fonction de transfert.

La pluie nette (ou pluie excédentaire) obtenue par la fonction de production est transformée par le réseau de drainage en ruissellement à l'exutoire au moyen de la fonction de transfert de RORB.

Le bassin est un ensemble d'éléments conceptuels non linéaires de stockage, ceux-ci constituent les éléments essentiels de la transformation.

L'effet de stockage d'un élément non linéaire peut être exprimé par l'expression suivante :

$$S = kQ^m \quad (1)$$

où

Q = débit à la sortie du tronçon de stockage (m^3/s)

S = volume d'eau dans le réservoir conceptuel (m^3)

k = paramètre lié au temps de parcours de l'eau dans le tronçon

m = exposant exprimant la non linéarité du bassin

La relation qui lie les entrées (Q_e) et les sorties (Q_s) pour un élément non linéaire de stockage est obtenue par l'équation de continuité :

$$Q_e - Q_s = dS/dt \quad (2)$$

La solution de l'équation (2) est obtenue numériquement par le passage à une équation différentielle non linéaire :

$$Q_s + mkQ_s^{m-1}(dQ/dt) = Q_e \quad (3)$$

Définitions de k et m

Revenons à l'équation (1). Théoriquement, n'importe quelle équation d'écoulement à surface libre peut prendre cette forme.

Considérons le cas simple d'un écoulement uniforme dans un bief rectangulaire assez large et de longueur L . Dans ce cas, le rayon hydraulique est approximativement égal à la profondeur Y . Le volume d'eau stocké dans le bief est :

$$S = AL = L^2 Y \quad (4)$$

où

A = section mouillée en m^2

Y = profondeur en m

L = largeur en m

Le débit dans le bief est donné par l'équation de Manning-Strickler :

$$Q = (1,49/n) L Y^{5/3} S_b^{1/2} \quad (5)$$

où

n = coefficient de rugosité de Manning

S_b = pente de fond

En éliminant Y par substitution de l'équation (4) par (5), on obtient :

$$S = (n^{0,6} L^{0,4}) (Q^{0,6}) / (1,27 S_b^{0,3}) \quad (6)$$

L'équation (6) a la même forme que l'équation (1), alors

$$m = 0,6$$

$$\text{et } k = (n^{0,6} L^{0,4}) / (1,27 S_b^{0,3})$$

L'élément de stockage est complètement défini par m et k .

m varie entre 0,6 et 1,0. Une valeur de 1 exprime la linéarité du bassin (cas de l'hydrogramme unitaire). Plusieurs observations lors des crues, ont montré clairement la non linéarité du bassin versant par la forte corrélation entre le "lag" du bassin et le débit moyen de la crue (Arthur J. Askew, 1970).

K, paramètre lié au temps de parcours de l'eau dans un élément non linéaire peut être décomposé en deux autres paramètres

k_C et k_R

avec

k_C , coefficient empirique appliqué au bassin total, et

k_R , coefficient adimensionnel, exprimant le rapport du temps de stockage dans un tronçon du réseau, pour un débit quelconque, au temps total de stockage de tous les tronçons du réseau pour le même débit.

L'équation (6) montre que k_R est une fonction des caractéristiques du bief : longueur, largeur, rugosité et pente de fond. Dans les cours d'eau naturels, les effets de la pente et de la rugosité se compensent, k_R est alors proportionnel à la longueur L. k_R est calculé pour chaque élément conceptuel de stockage.

La relation liant le lag et le débit moyen de la crue peut être formulée empiriquement par :

$$t = k_C Q^p$$

où

t = temps de réponse (lag du bassin)

Q = débit moyen à l'exutoire

k_C et p sont des constantes avec p de l'ordre -0,25.

k_C et m sont les paramètres d'ajustement du modèle RORB, k_C en est le principal (Russel G.Mein et al., 1974).

3.4.3.2. Description et fonctionnement.

L'application des données d'un événement "averse-crue" au modèle se fait en trois étapes distinctes, mais indissociables.

ETAPE 1 : détermination de la séquence des opérations
simulant le comportement du bassin lors d'un
événement "averse-crue"

Rappelons que pour RORB, les parcelles élémentaires du modèle distribué type Girard sont remplacées par les sous-bassins et par les aires interstations débitmétriques provenant de la subdivision du bassin total. Ces nouvelles unités spatiales constituent les aires d'alimentation.

Les écoulements de chaque aire peuvent être ou non contrôlés par une station hydrométrique. Les aires d'alimentation peuvent également être définies par des tributaires importants par où les écoulements entrent dans le modèle. Nous avons considéré 5 aires de production du ruissellement dénommées A, B, C, D, E désignant respectivement les mayos Midaoua amont ($3,73 \text{ km}^2$), Midaoua aval ($5,51 \text{ km}^2$), Mouda amont ($2,5 \text{ km}^2$), Mouda aval ($3,87 \text{ km}^2$), Miyamloa ($2,49 \text{ km}^2$). Il faut noter que pour Midaoua aval, Mouda aval et Miyamloa, les aires des bassins d'alimentation correspondent aux aires interstations (par exemple "B" correspond à l'aire comprise entre la station de jaugeage de Midaoua amont et la station de jaugeage de Midaoua aval).

L'hydrogramme de la pluie nette entre dans le modèle par un point adjacent au centre de gravité de l'aire d'alimentation et situé sur le tributaire principal. Ce point est appelé noeud. Tous les points d'entrée et les stations de jaugeage sont représentés par des noeuds. Notre bassin en comporte dix.

Le tronçon du cours d'eau compris entre deux noeuds est appelé tronçon à modèle de stockage. Notre système en compte neuf numérotés de 1 à 9. Les longueurs de ces tronçons varient de 0,468 à 2 km, elles constituent pour le cas d'étude de notre bassin les seules caractéristiques du réseau de drainage dont a besoin cette première étape du modèle.

Dans un cas simple de bassin (pas d'écoulement de base, pas de restitution d'eau dans le réseau à partir de réservoirs

importants, pas d'entrées latérales...) comme celui du Miyamloa, les hydrogrammes d'entrée dans un tronçon proviennent de :

- (i) la pluie nette locale, pour les aires amont
- (ii) la pluie nette locale et l'hydrogramme provenant d'un tronçon amont, pour les aires interstations.

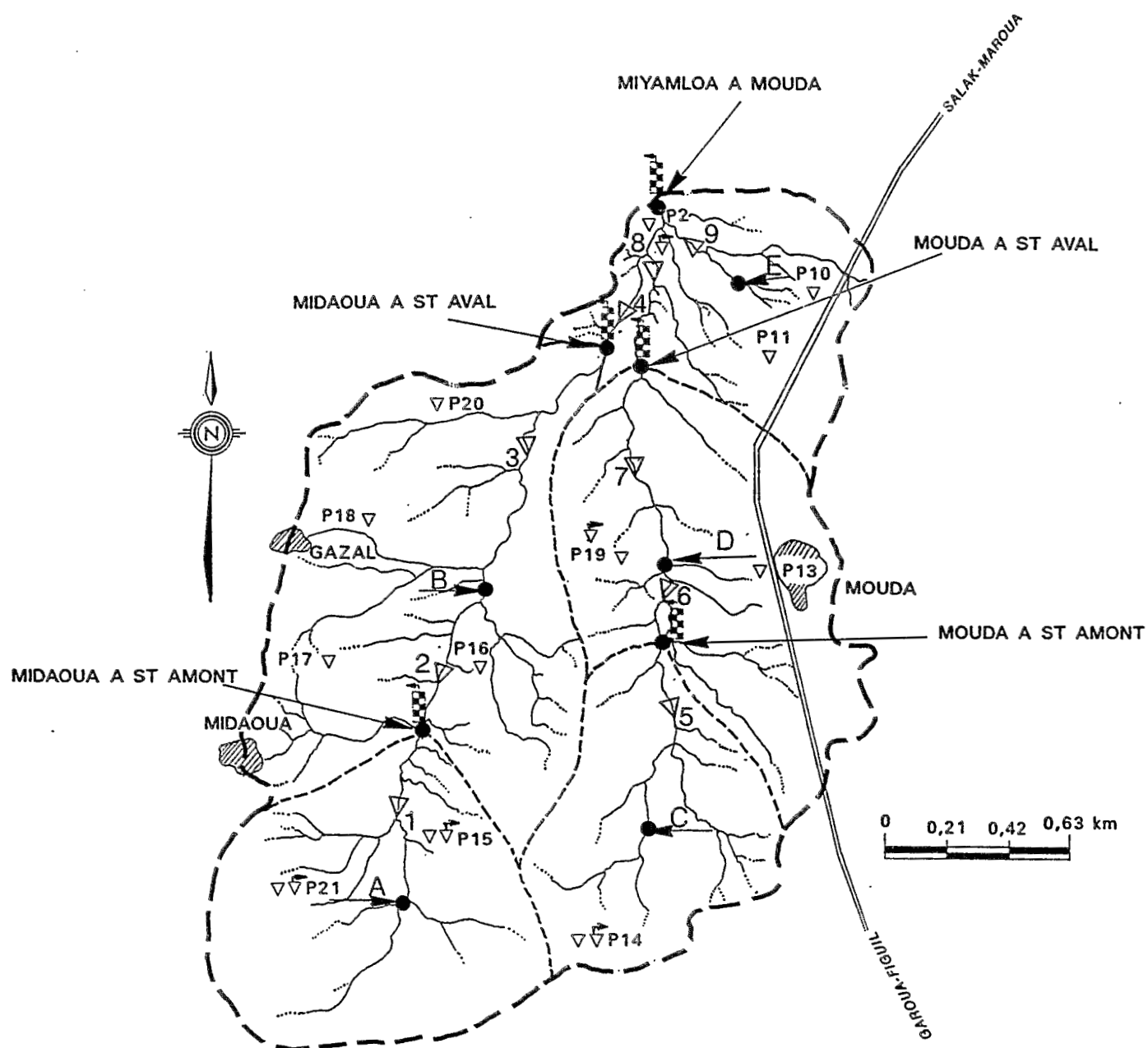
La séquence des opérations est organisée de l'amont vers l'aval du bassin autour d'un vecteur contrôle, chaque donnée est associée à une opération définie par un code. Le tableau n° 3.11 présente le vecteur contrôle construit pour le bassin versant du Miyamloa et la figure 3.11 montre l'organisation du même bassin pour la modélisation avec RORB.

<u>Opération n°</u>	<u>Code</u>	<u>Description de l'opération</u>
1	1	Propagation des entrées de "A" (hydrogramme de la pluie nette) à travers le tronçon à modèle de stockage n° 1
2	7.1	Comparaison des hydrogrammes calculé et observé à la station amont du mayo Midaoua
3	5	Propagation de l'hydrogramme calculé à travers le tronçon n° 2
4	2	Composition des entrées de "B" (hydrogramme de la pluie nette) et de l'hydrogramme de l'opération n° 3; propagation de l'hydrogramme résultant à travers le tronçon n° 3
5	7.1	Comparaison des hydrogrammes calculé et observé à la station aval du mayo Midaoua
6	5	Propagation de l'hydrogramme calculé à travers le tronçon n° 4
7	3	Mise en mémoire de l'hydrogramme total du mayo Midaoua obtenu à l'opération n° 6; fin des calculs des débits de la rive gauche; remise à zéro

Tableau n° 3.11. Vecteur contrôle du modèle RORB pour le mayo Miyamloa à Mouda

<u>Opération n°</u>	<u>Code</u>	<u>Description de l'opération</u>
8	1	Propagation des entrées de "C" (hydrogramme la pluie nette) à travers le tronçon n° 5
9	7.1	Comparaison des hydrogrammes calculé et observé à la station amont de mayo Mouda
10	5	Propagation de l'hydrogramme calculé à travers le tronçon n° 6
11	2	Composition des entrées de "D" (hydrogramme de la pluie nette) et de l'hydrogramme de l'opération n° 10; propagation de l'hydrogramme résultant à travers le tronçon n° 7
12	7.1	Comparaison des hydrogrammes calculé et observé à la station aval du mayo Mouda
13	5	Propagation de l'hydrogramme calculé à travers le tronçon n° 8
14	3	Mise en mémoire de l'hydrogramme total du mayo Mouda obtenu à l'opération n° 13; fin des calculs des débits de la rive droite; remise à zéro
15	1	Propagation des entrées de "E" (hydrogramme de la pluie nette) à travers le tronçon n° 9
16	4	Rappel et composition des hydrogrammes des opérations n°s 14 et 15
17	4	Rappel de l'hydrogramme de l'opération n° 7 et composition avec l'hydrogramme composé de l'opération n° 16
18	7.1	Comparaison des hydrogrammes calculé et observé à la station de Mouda du mayo Miyamloa, exutoire général
19	0	Fin des opérations du vecteur contrôle

Tableau n° 3.11 (suite). Vecteur contrôle du modèle RORB
pour le mayo Miyamloa à Mouda



LÉGENDE

— — — LIMITE DE BASSIN

· · · · · LIMITE DE SOUS-BASSIN

— — — COURS D'EAU

● NOEUD

△ TRONÇON À MODÈLE DE STOCKAGE



ENTRÉES DU SOUS-BASSIN



STATION DE JAUGEAGE



PLUVIOGRAPHE



PLUVIOMÈTRE

Fig.3.11 BASSIN VERSANT DU MAYO MIYAMLOA A MOUDA
(AIRES D'ALIMENTATION ET NOEUDS DU MODELE)

ETAPE 2 : détermination des paramètres physiques et des variables à modéliser

La subdivision du bassin telle que la propose RORB permet de modéliser la variabilité spatiale de la pluie et des pertes, du ruissellement, des caractéristiques des tronçons de stockage.

A cette deuxième étape les données pour chaque aire d'alimentation portent sur :

- (i) la superficie
- (ii) la pluie moyenne
- (iii) l'hydrogramme observé à l'exutoire

La répartition temporelle de la pluie est donnée par un ou plusieurs pluviographes, dans ce dernier cas, chaque aire d'alimentation est référencée à un seul pluviographe, généralement le plus proche.

Le(s) hyétogramme(s) et les hydrogrammes sont entrés sous forme discrétisée. Un pas de temps (Dt en heure) constant est adopté pour tout l'événement "averse-crue". Le pas de temps est choisi de façon à bien définir les hydrogrammes. Le choix de Dt tel que au moins cinq points se situent sur la courbe de montée de l'hydrogramme est jugé satisfaisant (Russel G.Mein, 1974). Nous avons choisi à chaque fois Dt d'un événement en fonction du temps de montée le plus faible des 5 hydrogrammes observés.

Les valeurs suivantes de Dt ont été retenues :

1/2 h (30 mn) pour l'événement du 19/07/90

1/5 h (12 mn) pour les événements des 08/06/89, 29/0690, 30/07/89 et 29/09/88.

Les données élaborées lors de l'étape 2 sont saisies immédiatement après celles de l'étape 1 (vecteur contrôle) sur un même fichier. Ce fichier est le fichier des données utilisé par RORB (fichier.dat). Il est unique pour chaque événement "averse-crue".

ETAPE 3 : recherche des paramètres d'ajustement du modèle

L'adéquation d'un modèle à la représentation d'un système passe obligatoirement par 3 phases : l'ajustement, la validation, le projet ou simulation.

Ajustement (mode FIT dans RORB)

L'ajustement consiste à représenter "au mieux" l'échantillon de calage des événements "averse-crue" observés. Il s'agit d'ajuster pour le bassin total les paramètres k_c et m .

La procédure est la suivante :

L'hydrogramme de la pluie nette entre dans le modèle par le noeud de l'aire d'alimentation, il s'ajoute éventuellement à un écoulement existant dans le bief, l'ensemble est propagé dans le tronçon.

L'équation de continuité, exprimée sous la forme suivante est utilisée pour propager l'écoulement d'un noeud à un autre :

$$(Q_e(t) + Q_e(t+1))/2 - (Q_s(t+1))/2 = (S(t+1) - S(t))/Dt$$

où

Q_e = débit d'entrée dans le tronçon de stockage

Q_s = débit de sortie du tronçon de stockage

S = volume d'eau dans le tronçon de stockage donné par l'équation (1) du paragraphe 3.4.3.1

Dt = pas de temps

Pour le premier essai d'ajustement, le modèle propose $m = 0,8$ et une valeur de k_c donnée par l'expression suivante :

$$k_c = 2,2A^{0,5}(Q_p/2)^{0,8-m}$$

où

A = superficie du bassin total

Q_p = maximum instantané de l'hydrogramme total

Pour le bassin du Miyamloa à Mouda ($18,1 \text{ km}^2$), si on retient $m = 0,8$; k_c proposée pour le premier ajustement sera :
 $k_c = 2,2 \times 18,1^{0,5} = 9,4$.

k_c et m s'appliquent au bassin total.

A partir de la connaissance que l'on a du système (estimation de l'humidité initiale des différents sous-bassins), il s'agira par essais successifs d'ajustement de retenir le ou les couples de k_c et m qui représentent au mieux l'échantillon de calage.

Validation (mode TEST)

Le modèle est évalué en fonction de sa capacité à reproduire des observations des événements non utilisés dans la phase de calage. Les paramètres k_c et m déterminés dans la phase précédente sont appliqués à ces observations. Cette phase est indispensable pour un bon test du modèle, elle est déterminante pour le choix définitif des meilleurs paramètres du modèle.

Projet ou simulation (mode DESIGN)

Quand les paramètres du modèle sont définitivement retenus après calage et validation, le modèle peut être utilisé pour prévoir le comportement du bassin

(i) sous différentes hypothèses de projet (crue de projet liée à une averse de fréquence rare...),

(ii) après aménagement hydraulique (construction d'un réservoir, rectification du réseau de drainage, etc...). Dans ce cas, un nouveau vecteur contrôle doit être construit pour tenir compte des nouvelles conditions de drainage.

3.4.4. Echantillon des événements "averse-crue"

3.4.4.1. Choix de l'échantillon

L'échantillon des événements auquel on applique le modèle doit remplir deux conditions :

(i) représentativité de l'échantillon : l'échantillon doit être représentatif du phénomène étudié,

(ii) qualité des données : les données des événements doivent être de bonne qualité (pas de lacunes) pour mieux représenter la totalité du processus étudié.

La deuxième partie de ce mémoire nous a permis d'identifier trois modèles de fonctionnement hydrologique (hydro-séquence type) à l'échelle du versant. Nous avons essayé de les situer par rapport aux trois phases de l'évolution du recouvrement des herbacées (Seghier, 1990). Les résultats obtenus sur parcelle du vertisol dégradé (effet saisonnier, cf. 2.4.2.1) suggèrent plutôt le partage de la saison en deux périodes :

1ère période : début de saison - fin Juillet

2ème période : fin Juillet - fin de saison

Dans le paragraphe 3.2.2.2. de cette partie, nous avons identifié 31 crues de faible à forte pour les 3 saisons de 1988, 1989 et 1990. Les pluies de hauteur supérieure ou égale à 30,0 mm participent pour 70 % à la hauteur totale des pluies ayant provoqué les crues.

Vingt événements "averse-crue" sur les trente et un identifiés ont eu une PMOY à Miyamloa (bassin total) $\geq 30,0$ mm. Ces 20 événements représentent totalement le phénomène étudié. Nous n'en avons retenu que 4 (pour la modélisation) qui présentent des données pluviographiques et limnigraphiques complètes (deuxième critère d'échantillonnage). Ces 4 événements sont répartis sur les 2 périodes de la saison.

L'événement du 29/06/90, le plus important de la période d'étude, a été également modélisé, mais en mode PROJET, le limnigraphe de l'exutoire du système ayant été en panne ce jour.

Le tableau n° 3.12 présente l'échantillon des événements retenus, y sont indiquées les lames d'eau précipitées (en mm) sur chaque bassin lors de ces événements.

	MIDAOUA amont	MIDAOUA aval	MOUDA amont	MOUDA aval	MIYAMLOA à Mouda
1ère période					
08/06/89	40,3	46,1	40,3	43,8	45,5
29/06/90	85,0	92,3	86,0	92,6	94,8
19/07/90	65,1	56,9	65,5	54,6	54,6

2ème période

30/07/89	45,9	42,2	46,4	41,2	43,4
29/09/88	43,0	52,8	40,3	39,2	41,7

Tableau n° 3.12. Echantillon des événements "averse-crue"

Nous avons appliqué à l'échantillon les 3 fonctions de RORB. Les modes "FIT" et "TEST" ont été appliqués à chacune des deux périodes de la saison, le mode "DESIGN" n'a été appliqué qu'à l'événement du 29/06/90.

3.4.4.2. Caractéristiques des averses de l'échantillon.

La répartition spatiale des averses est donnée sur la figure 3.12.

Averse du 08/06/89

L'averse a un seul corps, elle est pratiquement homogène en hauteurs sur tout le bassin (tab n° 3.12). Localement des petites zones sont plus arrosées à l'Ouest et au centre du bassin (fig. 3.12). Les intensités sont moyennes (28,5 mm/h les 20 premières minutes).

Averse du 29/06/90

C'est l'événement pluvieux le plus fort des 3 saisons de pluies. Des maxima ponctuels de 110 mm ont été relevés. Les intensités sont tout aussi fortes (I est supérieure à 65 mm/h les 25 premières minutes avec une pointe exceptionnelle de 343,2 mm/h en 5 minutes, 30 minutes après le début de

l'averse. Le corps de l'averse a duré 50 minutes suivi d'une traîne de 4 h 35 mn. Cette averse présente les caractéristiques de l'averse décennale (voir tableau n° 1.11 du chapitre I).

Averse du 19/07/90

L'averse est étalée dans le temps (7h 53 mn) avec des intensités très moyennes de l'ordre de 10,5 mm/h pendant près de 60 minutes. Elle a donné 48,0 mm au PG 19 et 53,5 mm au PG 2. Cette averse a les caractéristiques en hauteur d'une averse annuelle (P_{moy} peu différente de 65,0 mm sur certains bassins du système).

Averse du 30/07/89.

C'est une averse brève dans le temps, 3 h 30 mn. Les pointes d'intensité sont concentrées dans les 45 premières minutes avec une intensité moyenne de 47,6 mm/h. La traîne dure 2 h 15 mn.

Averse du 29/09/88

Elle comporte 3 corps d'averse dont deux principaux. Un examen des pluviogrammes des 2 postes amont PG 21 et PG 14 montre l'irrégularité dans la répartition spatio-temporelle de l'averse. Le versant Ouest du Miyamloa est plus arrosé que le versant Est (fig. 3.12), les intensités y sont également plus fortes. Il en résulte des montées (crues) pour le deuxième et le troisième corps d'averse sur les bassins du mayo Midaoua alors qu'elles sont imperceptibles sur le mayo Mouda.

Dans la modélisation de cet événement, nous n'avons tenu compte que des deux premiers corps d'averse, le troisième étant considéré comme traîne de l'épisode pluvieux.

Cette dernière averse souligne l'irrégularité de la répartition de la pluie à l'échelle du temps et de l'espace et justifie le choix du modèle spatial distribué.

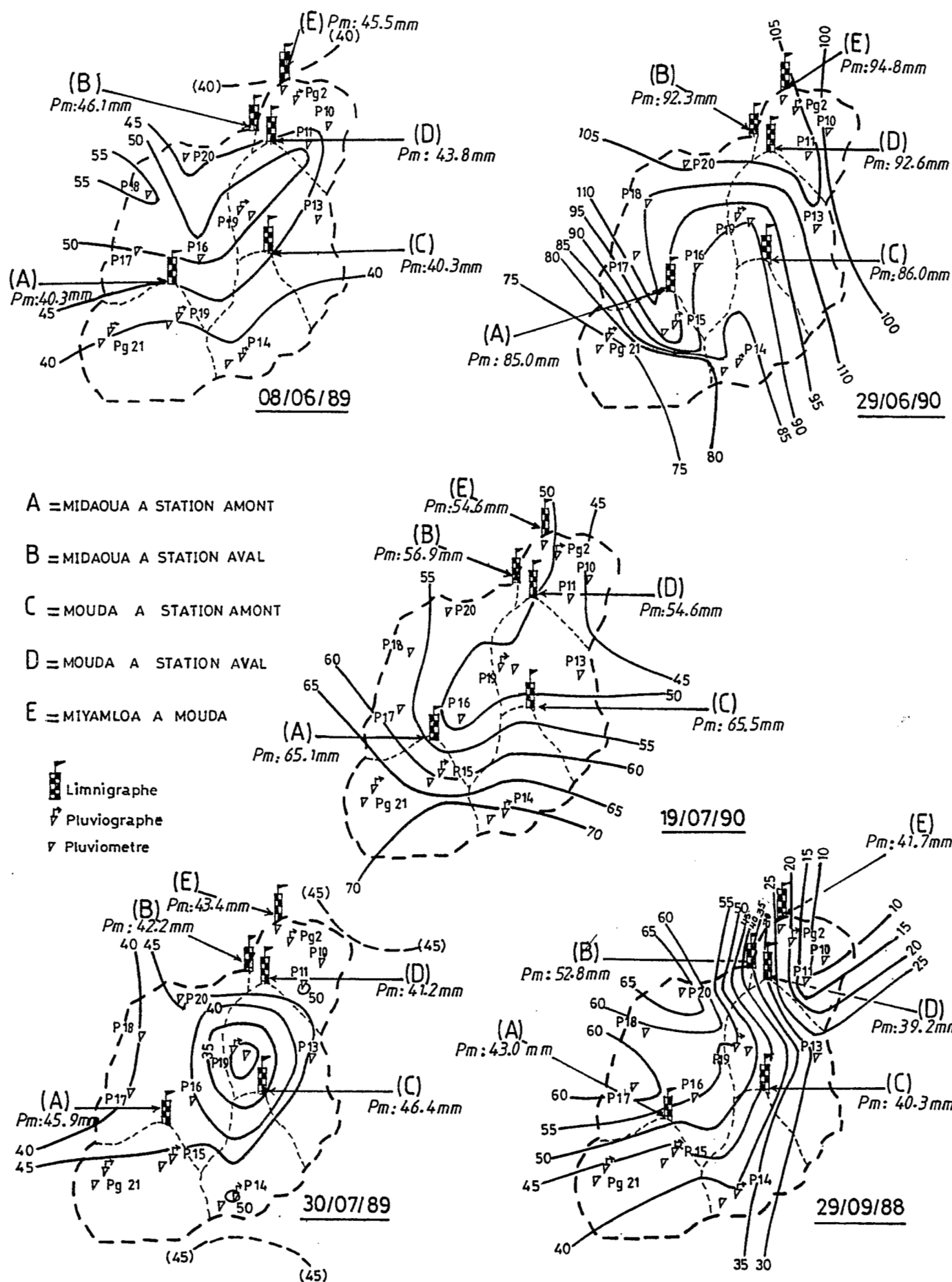


Fig . 3.12 ISOHYETES DES AVERSES DE L'ECHANTILLON

3.4.5. Application de RORB à l'échantillon et analyse des résultats.

3.4.5.1. Evénements de la première période.

Pour la première période (début saison - fin Juillet) deux événements ont été retenus. Le modèle a été calé sur l'événement du 19/07/90, la validation s'est faite sur celui du 08/06/89. Le modèle de perte pour ces deux phases est le modèle "1".

Ajustement du modèle à l'événement du 19/07/90

Paramètres k_c et m , choix des meilleurs indicateurs d'ajustement

Il s'agit de reconstituer les débits à l'aval du système à partir des composantes amont spatialisées. Si l'intérêt est plus porté sur la justesse de l'opération à l'exutoire du Miyamloa, nous tenons également compte du calage du modèle dans les autres unités du système.

Le choix de k_c et m lors des essais est déterminé par la minimisation des écarts par comparaison entre valeurs calculées et observées pour chaque bassin. Ces valeurs portent sur les caractéristiques de la crue et du bassin.

Nous avons retenu trois "indicateurs" pour la détermination du meilleur ajustement. Ce sont :

- (i) le débit maximum
- (ii) la moyenne des écarts absolus (écart absolu pour un $Dt(i)$ entre débit observé et débit calculé)
- (iii) le temps de réponse ou "lag"

Résultats.

- (i) le pas de temps Dt est 30 mn (0,5 h)
- (ii) le modèle de perte est le modèle "1". Les pertes de pluies initiales estimées et le taux de perte constant (calculé par le modèle) sont donnés ci-dessous pour chaque aire d'alimentation.

	P.P.I (mm)	T.P.C (mm/h)
MIDAOUA amont	5,0	7,49
MIDAOUA aval	10,0	8,59
MOUDA amont	5,0	11,06
MOUDA aval	15,0	5,58
MIYAMLOA à Mouda	15,0	7,00

(P.P.I = pertes de pluies initiales, T.P.C = taux de perte constant)

(iii) valeurs de k_C et m

Plusieurs essais en vue de la recherche du meilleur ajustement ont été effectués avec différents couples de k_C et m . Le choix de m détermine celui de k_C . Deux valeurs de m proposées par certains auteurs pour différentes études sur bassins ont été testées sur les bassins de Mouda. Ces valeurs sont :

0,8 (Mein.G et al., 1974) et 0,77 (Askew, 1970).

Les valeurs estimées les plus "vraisemblables" des pertes initiales, sont les mêmes pour tous les essais.

Les tableaux n°s 3.13, 3.14, 3.15 récapitulent, pour 3 essais, les valeurs de k_C et m et celles des "indicateurs" de l'ajustement.

Les valeurs des paramètres du premier ajustement $k_C = 9,4$ et $m = 0,8$ sont celles proposées par le modèle. Elles orientent la suite de l'ajustement.

Le premier essai (tab. n° 3.13) sous-estime systématiquement les valeurs des débits maximum et surestime les temps de réponse. A l'exutoire du Miyamloa on observe -68 % de diminution du débit maximum et une augmentation de 163,1 % du lag pour un Dt de 30 mn. La figure 3.13 montre les hydrogrammes calculés (Q cal) et observés (Q obs) ainsi que le hyétogramme de la pluie nette (P_N).

k_C est le principal paramètre d'ajustement du modèle (Russel G.Mein et al, 1974). Sa diminution accroît les pointes de crues tout en diminuant les "lag".

Les essais n° 2 (pour $k_C = 3,5$ et $m = 0,77$) et n° 3 (pour $k_C = 3,1$ et $m = 0,8$) donnent d'assez bonnes valeurs des 3 indicateurs d'ajustement. Un examen des résultats de calculs des 2 essais montre cependant un meilleur calage du modèle à l'ensemble de l'événement par l'essai n° 3.

Nous retiendrons les valeurs suivantes des paramètres du modèle pour la première période :

$$k_C = 3,1 \text{ et } m = 0,8.$$

La figure 3.14 donne les hydrogrammes ajustés avec les valeurs des paramètres k_C et m ci-dessus.

*** MAYO MIDAOUA A ST AMONT

	Hydrogramme		Erreur		
	Calc.	Observ.	Abs.	%	
Débit max. ,m ³ /s	8.40	13.00	-4.60	-35.4	
Moy. écarts abs. ,m ³ /s			.57	50.4	sur
période de calc.					
Lag (c.g. à c.g.),h	2.95	2.54	.41	16.1	

*** MAYO MIDAOUA A ST AVAL

	Hydrogramme		Erreur		
	Calc.	Observ.	Abs.	%	
Débit max. ,m ³ /s	5.23	16.00	-10.77	-67.3	
Moy. écarts abs. ,m ³ /s			2.0	102.2	sur
période de calc.					
Lag (c.g. à c.g.),h	7.12	2.92	4.20	144.1	

*** MAYO MOUDA A ST AMONT

	Hydrogramme		Erreur		
	Calc.	Observ.	Abs.	%	
Débit max. ,m ³ /s	3.443	9.000	-5.557	-61.7	
Moy. écarts abs. ,m ³ /s			.44	89.7	sur
période de calc.					
Lag (c.g. à c.g.),h	3.62	1.06	2.56	241.5	

*** MAYO MOUDA A ST AVAL

	Hydrogramme		Erreur		
	Calc.	Observ.	Abs.	%	
Débit max. ,m ³ /s	5.10	13.00	-7.90	-60.8	
Moy. écarts abs. ,m ³ /s			1.0	83.1	sur
période de calc.					
Lag (c.g. à c.g.),h	5.33	2.43	2.90	119.5	

*** MAYO MIYAMLOA A MOUDA

	Hydrogramme		Erreur		
	Calc.	Observ.	Abs.	%	
Débit max. ,m ³ /s	8.16	26.00	-17.84	-68.6	
Moy. écarts abs. ,m ³ /s			3.6	107.0	sur
période de calc.					
Lag (c.g. à c.g.),h	8.30	3.15	5.14	163.1	

Tableau n° 3.13. Quelques résultats d'ajustement de RORB
à l'événement "averse-crue" du 19/07/90
(Essai n° 1, $k_C = 9,4$; $m = 0,8$)

*** MAYO MIDAOUA A ST AMONT

	Hydrogramme		Erreur		
	Calc.	Observ.	Abs.	%	
Débit max. ,m ³ /s	15.54	13.00	2.54	19.5	
Moy. écarts abs. ,m ³ /s			1.0	83.9	sur
période de calc.					
Lag (c.g. à c.g.),h	1.11	2.54	-1.44	-56.4	

*** MAYO MIDAOUA A ST AVAL

	Hydrogramme		Erreur		
	Calc.	Observ.	Abs.	%	
Débit max. ,m ³ /s	16.61	16.00	.61	3.8	
Moy. écarts abs. ,m ³ /s			1.0	49.8	sur
période de calc.					
Lag (c.g. à c.g.),h	2.57	2.92	-.34	-11.8	

*** MAYO MOUDA A ST AMONT

	Hydrogramme		Erreur		
	Calc.	Observ.	Abs.	%	
Débit max. ,m ³ /s	7.313	9.000	-1.687	-18.7	
Moy. écarts abs. ,m ³ /s			.14	29.2	sur
période de calc.					
Lag (c.g. à c.g.),h	1.35	1.06	.29	27.7	

*** MAYO MOUDA A ST AVAL

	Hydrogramme		Erreur		
	Calc.	Observ.	Abs.	%	
Débit max. ,m ³ /s	12.85	13.00	-.15	-1.1	
Moy. écarts abs. ,m ³ /s			.60	52.1	sur
période de calc.					
Lag (c.g. à c.g.),h	1.92	2.43	-.51	-21.1	

*** MAYO MIYAMLOA A MOUDA

	Hydrogramme		Erreur		
	Calc.	Observ.	Abs.	%	
Débit max. ,m ³ /s	27.07	26.00	1.07	4.1	
Moy. écarts abs. ,m ³ /s			1.4	42.1	sur
période de calc.					
Lag (c.g. à c.g.),h	3.00	3.15	-.16	-5.0	

Tableau n° 3.14. Quelques résultats d'ajustement de RORB
à l'événement "averse-crue" du 19/07/90
(Essai n° 2, $k_c = 3,5$; $m = 0,77$)

*** MAYO MIDAOUA A ST AMONT

	Hydrogramme		Erreur		
	Calc.	Observ.	Abs.	%	
Débit max. ,m ³ /s	15.63	13.00	2.63	20.3	
Moy. écarts abs. ,m ³ /s			1.0	85.8	sur
période de calc.					
Lag (c.g. à c.g.),h	1.04	2.54	-1.50	-59.1	

*** MAYO MIDAOUA A ST AVAL

	Hydrogramme		Erreur		
	Calc.	Observ.	Abs.	%	
Débit max. ,m ³ /s	16.99	16.00	.99	6.2	
Moy. écarts abs. ,m ³ /s			1.0	50.9	sur
période de calc.					
Lag (c.g. à c.g.),h	2.39	2.92	-.52	-18.0	

*** MAYO MOUDA A ST AMONT

	Hydrogramme		Erreur		
	Calc.	Observ.	Abs.	%	
Débit max. ,m ³ /s	7.483	9.000	-1.517	-16.9	
Moy. écarts abs. ,m ³ /s			.13	26.0	sur
période de calc.					
Lag (c.g. à c.g.),h	1.24	1.06	.18	16.8	

*** MAYO MOUDA A ST AVAL

	Hydrogramme		Erreur		
	Calc.	Observ.	Abs.	%	
Débit max. ,m ³ /s	13.16	13.00	.16	1.2	
Moy. écarts abs. ,m ³ /s			.61	53.4	sur
période de calc.					
Lag (c.g. to c.g.),h	1.76	2.43	-.66	-27.4	

*** MAYO MIYAMLOA A MOUDA

	Hydrogramme		Erreur		
	Calc.	Observ.	Abs.	%	
Débit max. ,m ³ /s	27.81	26.00	1.81	6.9	
Moy. écarts abs. ,m ³ /s			1.4	43.4	sur
période de calc.					
Lag (c.m. to c.m.),h	2.77	3.15	-.38	-12.1	

Tableau n° 3.15. Quelques résultats d'ajustement de RORB
à l'événement "averse-crue" du 19/07/90
(Essai n° 3, $k_C = 3,1$; $m = 0,8$)

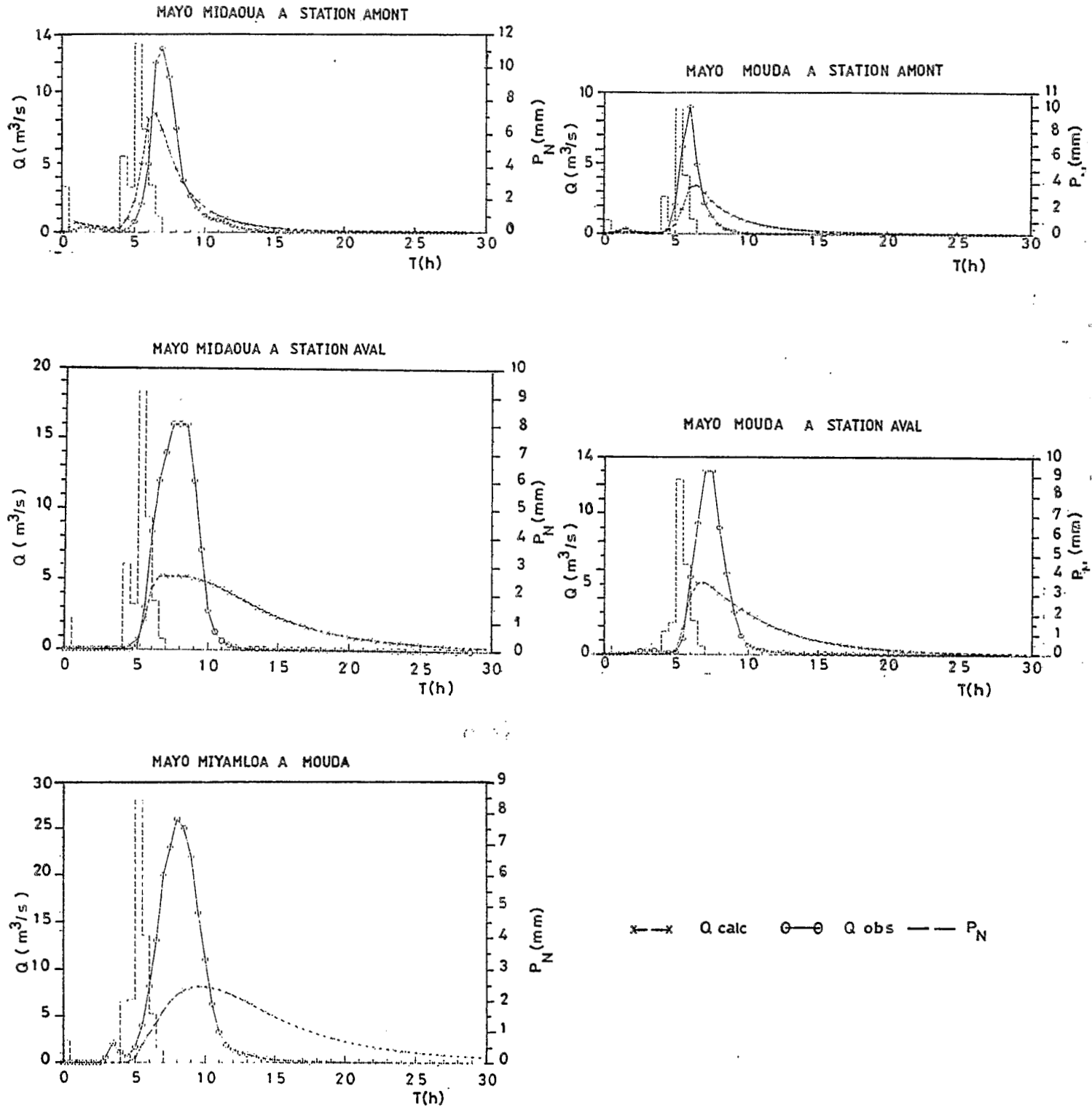


Fig. 3.13 AJUSTEMENT DU MODELE RORB A L'ÉVENEMENT "AVERSE-CRUE" DU 19/07/90
(Essai N°1 $K_C = 9,4$; $m = 0,8$)

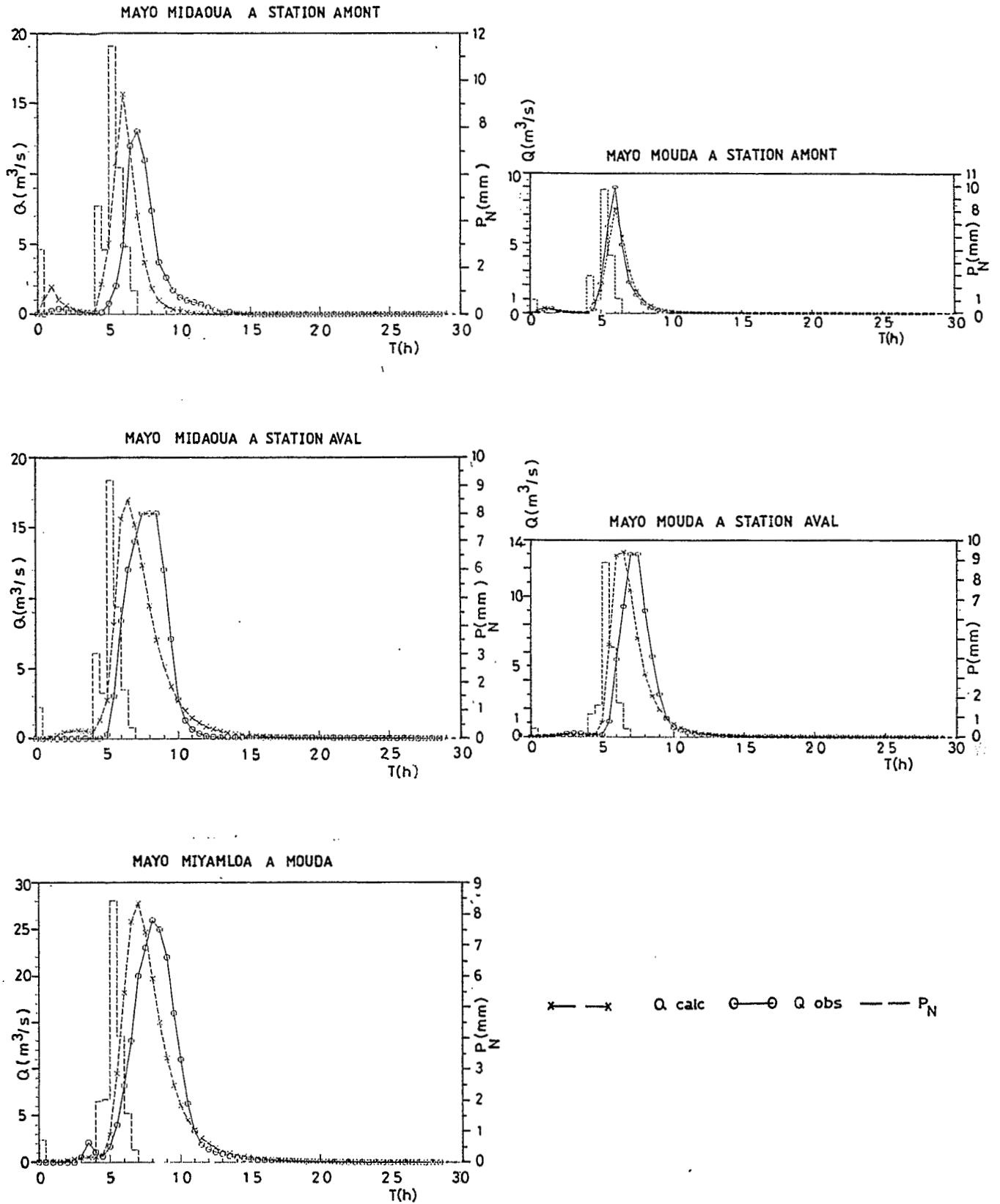


Fig. 3.14 AJUSTEMENT DU MODELE RORB A L'EVENEMENT "AVERSE-CRUE" DU 19/07/90
(Essai N°3 $K_c = 3,1$; $m = 0,8$)

Validation du modèle sur l'événement du 08/06/89.

Le pas de temps est de 12 mn (0,20 h).

La validation du modèle pour la première période s'est effectuée sur l'événement du 08/06/89 dont l'averse a été décrite au paragraphe 3.4.4.2.

Les valeurs estimées des pertes de pluies initiales sont données ci-dessous.

	P.P.I (mm)	T.P.C (mm/h)
MIDAOUA amont	5,0	23,39
MIDAOUA aval	10,0	21,86
MOUDA amont	5,0	12,20
MOUDA aval	15,0	16,58
MIYAMLOA à Mouda	10,0	9,66

Nous avons utilisé pour la validation du modèle, les valeurs de k_C et de m des essais d'ajustement n° 2 et n° 3 :

$k_C = 3,5$ et $m = 0,77$ pour l'essai n° 2,

$k_C = 3,1$ et $m = 0,80$ pour l'essai n° 3.

Les résultats sont présentés dans les tableaux n° 16 et n° 17 et confirment le choix de $k_C = 3,1$ et $m = 0,8$ pour la première période de la saison.

Les écarts entre valeurs observées et calculées des débits de pointe et des lag sont assez faibles pour le test n° 2. Les hydrogrammes sont également mieux reconstitués par le test n° 2 (faibles valeurs des moyennes des écarts absolus sur les débits).

Les hydrogrammes calculés par le modèle avec $k_C = 3,1$ et $m = 0,8$ sont présentés sur la figure 3.15.

*** MAYO MIDAOUA A ST AMONT

	Hydrogramme		Erreur		
	Calc.	Observ.	Abs.	%	
Débit max. ,m ³ /s	5.819	6.000	-.181	-3.0	
Moy. écarts abs. ,m ³ /s			.085	24.5	sur
période de calc.					
Lag (c.g. à c.g.),h	1.21	.78	.44	56.3	

*** MAYO MIDAOUA A ST AVAL

	Hydrogramme		Erreur		
	Calc.	Observ.	Abs.	%	
Débit max. ,m ³ /s	14.67	15.00	-.33	-2.2	
Moy. écarts abs. ,m ³ /s			.71	52.2	sur
période de calc.					
Lag (c.g. à c.g.),h	2.13	.91	1.21	133.1	

*** MAYO MOUDA A ST AMONT

	Hydrogramme		Erreur		
	Calc.	Observ.	Abs.	%	
Débit max. ,m ³ /s	8.897	9.900	- 1.003	-10.1	
Moy. écarts abs. ,m ³ /s			.17	29.4	sur
période de calc.					
Lag (c.g. à c.g.),h	1.14	.72	.42	59.0	

*** MAYO MOUDA A ST AVAL

	Hydrogramme		Erreur		
	Calc.	Observ.	Abs.	%	
Débit max. ,m ³ /s	14.12	13.00	1.12	8.6	
Moy. écarts abs. ,m ³ /s			.53	46.3	sur
période de calc.					
Lag (c.g. à c.g.),h	1.85	1.05	.80	76.0	

*** MAYO MIYAMLOA A MOUDA

	Hydrogramme		Erreur		
	Calc.	Observ.	Abs.	%	
Débit max. ,m ³ /s	24.90	27.00	-2.10	-7.8	
Moy. écarts abs. ,m ³ /s			1.3	39.9	sur
période de calc.					
Lag (c.g. à c.g.),h	2.44	1.45	.99	68.2	

Tableau n° 3.16. Quelques résultats de validation de RORB
sur l'événement "averse-crue" du 08/06/89
(Test n° 1, $k_C = 3,5$; $m = 0,77$)

*** MAYO MIDAOUA A ST AMONT

	Hydrogramme		Erreur		
	Calc.	Observ.	Abs.	%	
Débit max. ,m ³ /s	6.032	6.000	.032	.5	
Moy. écarts abs. ,m ³ /s			.074	21.3	sur
période de calc.					
Lag (c.g. à c.g.),h	1.08	.78	.30	38.9	

*** MAYO MIDAOUA A ST AVAL

	Hydrogramme		Erreur		
	Calc.	Observ.	Abs.	%	
Débit max. ,m ³ /s	15.17	15.00	.17	1.2	
Moy. écarts abs. ,m ³ /s			.65	47.5	sur
période de calc.					
Lag (c.g. à c.g.),h	1.93	.91	1.02	111.6	

*** MAYO MOUDA A ST AMONT

	Hydrogramme		Erreur		
	Calc.	Observ.	Abs.	%	
Débit max. ,m ³ /s	9.095	9.900	-.805	-8.1	
Moy. écarts abs. ,m ³ /s			.14	25.0	sur
période de calc.					
Lag (c.g. à c.g.),h	1.03	.72	.32	44.0	

*** MAYO MOUDA A ST AVAL

	Hydrogramme		Erreur		
	Calc.	Observ.	Abs.	%	
Débit max. ,m ³ /s	14.77	13.00	1.77	13.6	
Moy. écarts abs. ,m ³ /s			.49	42.4	sur
période de calc.					
Lag (c.g. à c.g.),h	1.68	1.05	.63	60.0	

*** MAYO MIYAMLOA A MOUDA

	Hydrogramme		Erreur		
	Calc.	Observ.	Abs.	%	
Débit max. ,m ³ /s	26.44	27.00	-.56	-2.1	
Moy. écarts abs. ,m ³ /s			1.2	36.3	sur
période de calc.					
Lag (c.g. à c.g.),h	2.22	1.45	.77	53.0	

Tableau n° 3.17. Quelques résultats de validation de RORB
sur l'événement "averse-crue" du 08/06/89
(Test n° 2, $k_c = 3,1$; $m = 0,8$)

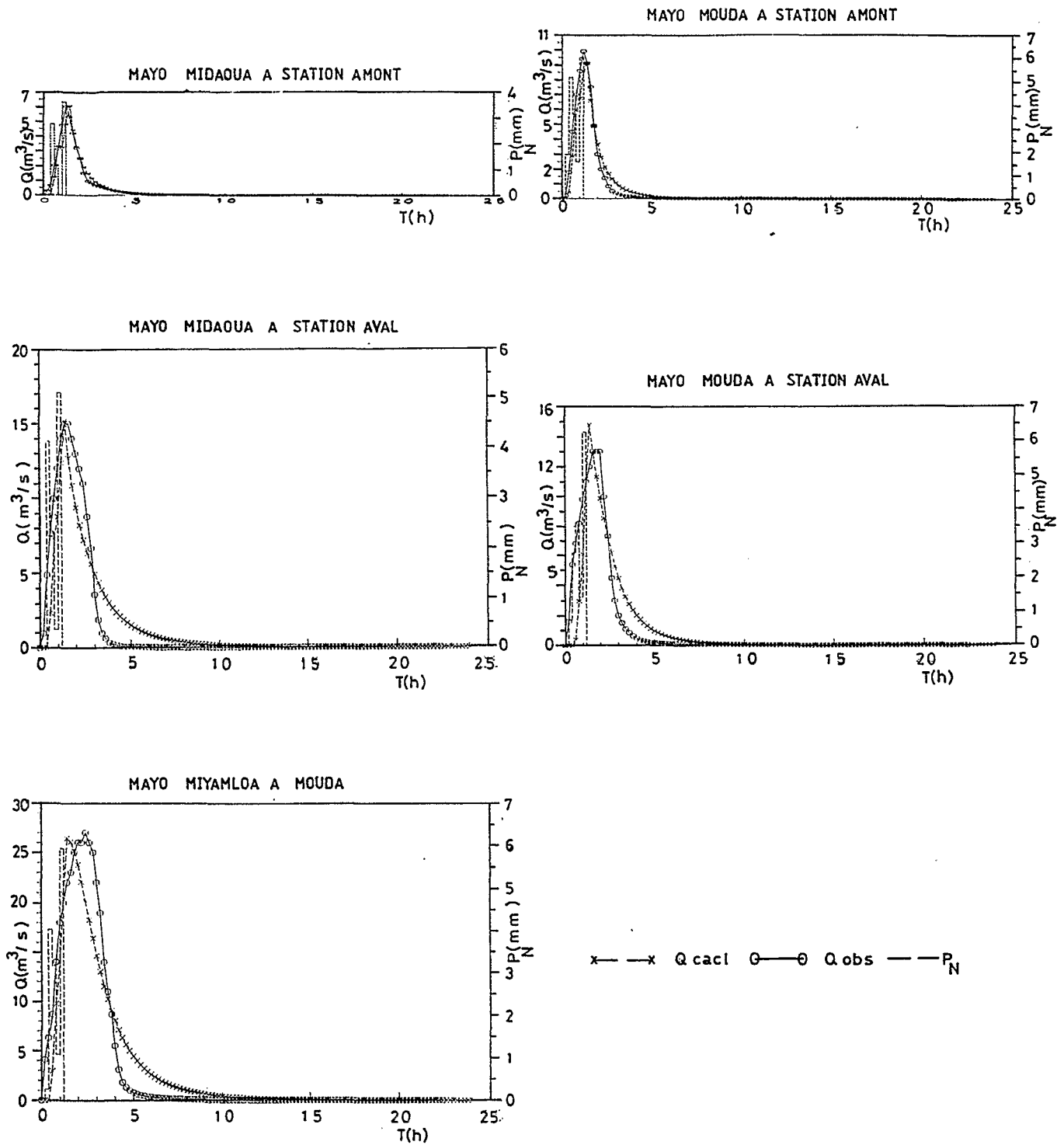


Fig .3.15 VALIDATION DU MODELE RORB A L'ÉVENEMENT "AVERSE -CRUE" DU 08/06/89
 ($K_c = 3,1$; $m = 0,8$)

3.4.5.2. Evénements de la deuxième période.

Les données des deux événements de cette période ont été appliquées au modèle RORB. Tout comme pour la première période, l'ajustement et la validation ont été faits.

Ajustement du modèle à l'événement du 29/09/88.

L'événement "averse-crue" du 29/09/88 est le cas typique de la variabilité spatiale de l'averse et des écoulements sur les bassins de la région.

Le versant Ouest du Miyamloa reçoit plus de "pluie" que le versant Est. Pour le même événement, on observe une crue complexe sur le mayo Midaoua et une crue simple sur le mayo Mouda.

Résultats

(i) le pas de temps est $\Delta t = 12 \text{ mn}$ (0,20 h)

(ii) Les paramètres de pertes ont été estimés pour chacun des deux corps d'averse principaux. Leurs valeurs sont données ci-dessous.

	P.P.I (mm)	T.P.C (mm/h)
MIDAOUA amont	1,0	40,66
	6,0	3,61
MIDAOUA aval	2,0	24,83
	6,0	10,22
MOUDA amont	1,0	0,00
	15,0	5,14
MOUDA aval	2,0	14,99
	6,0	5,83
MIYAMLOA à Mouda	0,0	1,37
	0,0	0,00

Pour chaque aire d'alimentation, la première ligne de ce tableau donne les valeurs de pertes pour le premier corps d'averse, et la deuxième ligne celles du deuxième corps.

(iii) valeurs de k_C et m

Les valeurs de k_C et m des 3 essais d'ajustement de la première période ont été réutilisées. Les tableaux n°s 18, 19 et 20 résument les résultats des 3 essais pour la deuxième période.

Le premier essai (voir tableau n° 3.18), tout comme pour la première période, sous-estime les débits de pointe et surestime les temps de réponse (fig 3.16).

Une diminution de la valeur de k_C pour les essais 2 et 3 améliore la qualité de l'ajustement. L'événement est mieux calé par l'essai n° 3 : faibles erreurs sur les débits maximum (particulièrement à l'exutoire du système) et sur les temps de réponse (tab. n° 3.20).

Les valeurs de $k_C = 3,1$ et $m = 0,8$ semblent mieux ajuster l'événement du 29/09/88 au modèle. Les hydrogrammes correspondants à cet essai sont présentés sur la figure 3.17.

*** MAYO MIDAOUA A ST AMONT

	Hydrogramme		Erreur		
	Calc.	Observ.	Abs.	%	
Débit max. ,m ³ /s	1.974	2.800	-.826	-29.5	
Moy. écarts abs. ,m ³ /s			.13	29.3	sur
période de calc.					
Lag (c.g. à c.g.),h	3.63	2.43	1.20	49.3	

*** MAYO MIDAOUA A ST AVAL

	Hydrogramme		Erreur		
	Calc.	Observ.	Abs.	%	
Débit max. ,m ³ /s	4.88	12.00	-7.12	-59.3	
Moy. écarts abs. ,m ³ /s			1.2	86.9	sur
période de calc.					
Lag (c.g. à c.g.),h	6.09	1.70	4.39	258.5	

*** MAYO MOUDA A ST AMONT

	Hydrogramme		Erreur		
	Calc.	Observ.	Abs.	%	
Débit max. ,m ³ /s	3.776	9.400	-5.624	-59.8	
Moy. écarts abs. ,m ³ /s			.39	90.5	sur
période de calc.					
Lag (c.g. à c.g.),h	3.57	.90	2.67	295.8	

*** MAYO MOUDA A ST AVAL

	Hydrogramme		Erreur		
	Calc.	Observ.	Abs.	%	
Débit max. ,m ³ /s	2.70	10.00	-7.30	-73.0	
Moy. écarts abs. ,m ³ /s			.84	97.4	sur
période de calc.					
Lag (c.g. à c.g.),h	5.94	2.00	3.94	196.6	

*** MAYO MIYAMLOA A MOUDA

	Hydrogramme		Erreur		
	Calc.	Observ.	Abs.	%	
Débit max. ,m ³ /s	4.19	20.00	-15.81	-79.0	
Moy. écarts abs. ,m ³ /s			2.4	97.1	sur
période de calc.					
Lag (c.g. à c.g.),h	8.06	2.42	5.64	232.5	

Tableau n° 3.18. Quelques résultats d'ajustement de RORB
à l'événement "averse-crue" du 29/09/88
(Essai n° 1, $k_c = 9,4$; $m = 0,8$)

*** MAYO MIDAOUA A ST AMONT

	Hydrogramme		Erreur		
	Calc.	Observ.	Abs.	%	
Débit max. ,m ³ /s	6.039	2.800	3.239	115.7	
Moy. écarts abs. ,m ³ /s			.24	54.5	sur
période de calc.					
Lag (c.g. à c.g.),h	1.34	2.43	-1.09	-44.8	

*** MAYO MIDAOUA A ST AVAL

	Hydrogramme		Erreur		
	Calc.	Observ.	Abs.	%	
Débit max. ,m ³ /s	16.26	12.00	4.26	35.5	
Moy. écarts abs. ,m ³ /s			.68	48.5	sur
période de calc.					
Lag (c.g. à c.g.),h	2.46	1.70	.76	44.8	

*** MAYO MOUDA A ST AMONT

	Hydrogramme		Erreur		
	Calc.	Observ.	Abs.	%	
Débit max. ,m ³ /s	10.79	9.40	1.39	14.8	
Moy. écarts abs. ,m ³ /s			.14	32.9	sur
période de calc.					
Lag (c.g. à c.g.),h	1.19	.90	.29	32.2	

*** MAYO MOUDA A ST AVAL

	Hydrogramme		Erreur		
	Calc.	Observ.	Abs.	%	
Débit max. ,m ³ /s	9.08	10.00	-.92	-9.2	
Moy. écarts abs. ,m ³ /s			.37	42.5	sur
période de calc.					
Lag (c.g. à c.g.),h	2.05	2.00	.05	2.4	

*** MAYO MIYAMLOA A MOUDA

	Hydrogramme		Erreur		
	Calc.	Observ.	Abs.	%	
Débit max. ,m ³ /s	15.34	20.00	-4.66	-23.3	
Moy. écarts abs. ,m ³ /s			.90	36.5	sur
période de calc.					
Lag (c.g. à c.g.),h	3.11	2.42	.69	28.3	

Tableau n° 3.19. Quelques résultats d'ajustement de RORB
à l'événement "averse-crue" du 29/09/88
(Essai n° 2, $k_c = 3,5$; $m = 0,77$)

*** MAYO MIDAOUA A ST AMONT

	Hydrogramme		Erreur		
	Calc.	Observ.	Abs.	%	
Débit max. ,m ³ /s	6.411	2.800	3.611	129.0	
Moy. écarts abs. ,m ³ /s			.27	60.0	sur
période de calc.					
Lag (c.g. à c.g.),h	1.18	2.43	-1.24	-51.2	

*** MAYO MIDAOUA A ST AVAL

	Hydrogramme		Erreur		
	Calc.	Observ.	Abs.	%	
Débit max. ,m ³ /s	16.88	12.00	4.88	40.7	
Moy. écarts abs. ,m ³ /s			.64	46.0	sur
période de calc.					
Lag (c.g. à c.g.),h	2.23	1.70	.53	31.1	

*** MAYO MOUDA A ST AMONT

	Hydrogramme		Erreur		
	Calc.	Observ.	Abs.	%	
Débit max. ,m ³ /s	11.27	9.40	1.87	19.9	
Moy. écarts abs. ,m ³ /s			.14	32.8	sur
période de calc.					
Lag (c.g. à c.g.),h	1.07	.90	.17	18.8	

*** MAYO MOUDA A ST AVAL

	Hydrogramme		Erreur		
	Calc.	Observ.	Abs.	%	
Débit max. ,m ³ /s	9.66	10.00	-.34	-3.4	
Moy. écarts abs. ,m ³ /s			.37	42.4	sur
période de calc.					
Lag (c.g. à c.g.),h	1.85	2.00	-.15	-7.7	

*** MAYO MIYAMLOA A MOUDA

	Hydrogramme		Erreur		
	Calc.	Observ.	Abs.	%	
Débit max. ,m ³ /s	16.50	20.00	-3.50	-17.5	
Moy. écarts abs. ,m ³ /s			.86	34.9	sur
période de calc.					
Lag (c.g. à c.g.),h	2.81	2.42	.39	16.0	

Tableau n° 3.20. Quelques résultats d'ajustement de RORB
à l'événement "averse-crue" du 29/09/88
(Essai n° 3, $k_c = 3,1$; $m = 0,8$)

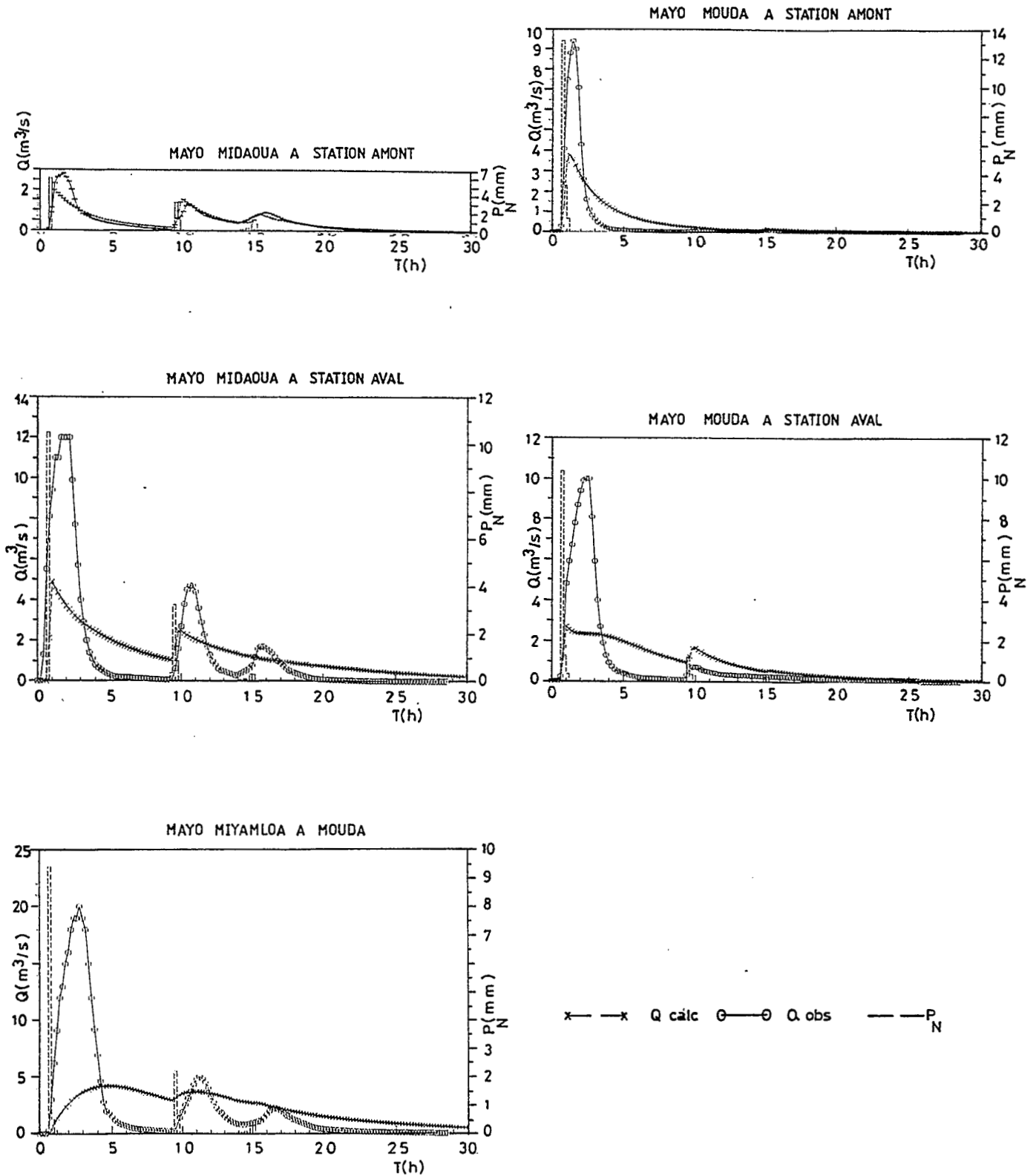


Fig . 3.16 AJUSTEMENT DU MODELE RORB A L' EVENEMENT "AVERSE-CRUE" DU 29/09/88
(Essai N°1 $K_c = 9,4$; $m = 0,8$)

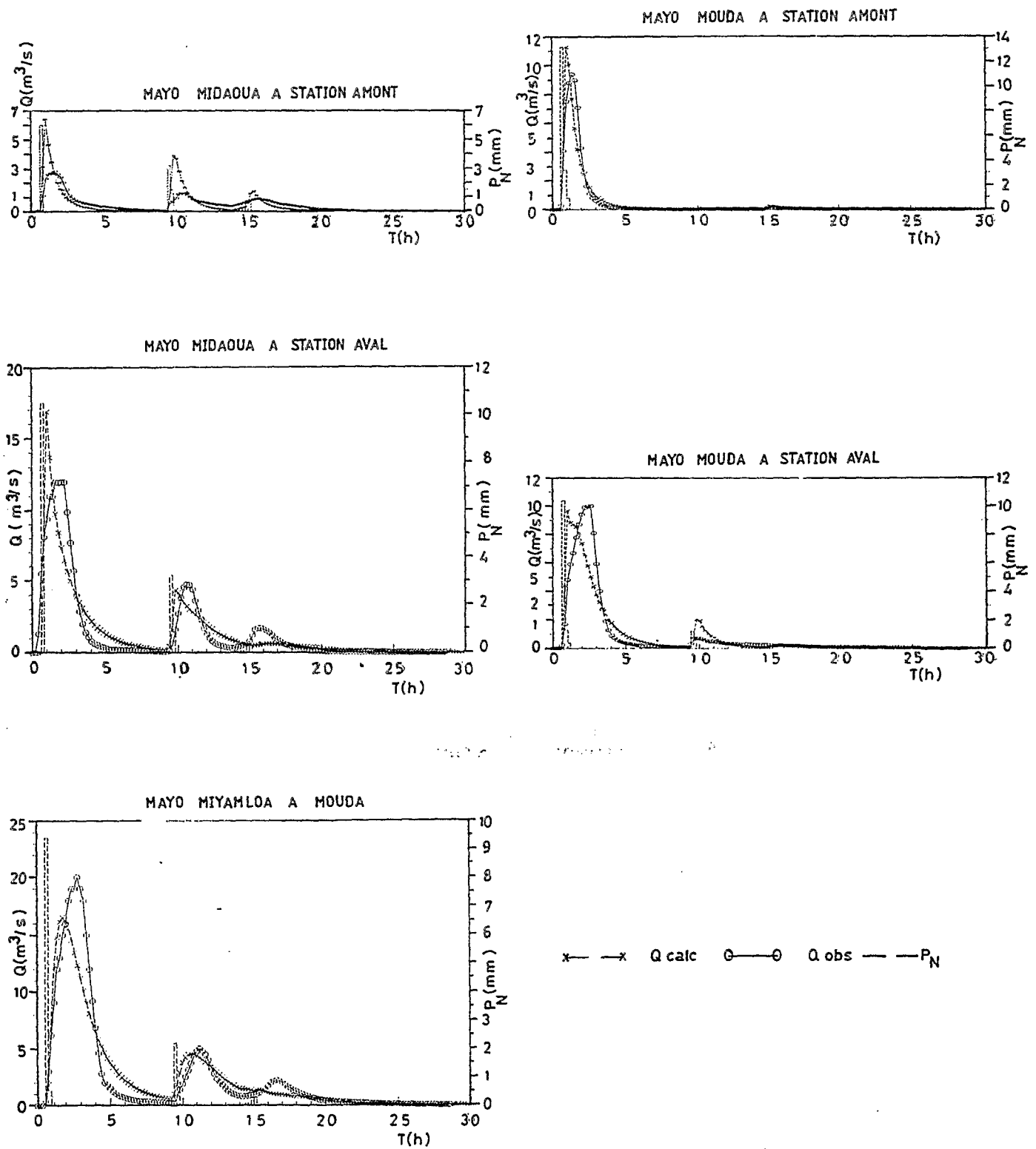


Fig. 3.17 AJUSTEMENT DU MODELE RORB A L'EVENEMENT 'AVERSE-CRUE' DU 29/09/88
(Essai N°3 $K_c = 3.1$; $m = 0.8$)

Validation du modèle sur l'événement du 30/07/89.

Le pas de temps de calcul est de 12 mn (0,20h).

Deux tests ont été réalisés avec les valeurs de k_c et m des essais n°s 2 et 3.

Les valeurs de pertes ci-dessous sont les mêmes pour les deux tests.

	P.P.I (mm)	T.P.C (mm/h)
MIDAOUA amont	10,0	23,91
MIDAOUA aval	5,0	19,15
MOUDA amont	3,0	19,57
MOUDA aval	25,0	5,17
MIYAMLOA à Mouda	5,0	35,36

Les résultats des calculs sont résumés dans les tableaux n° 21 et n° 22.

Le test n° 2, avec $k_c = 3,1$ et $m = 0,8$, reconstitue mieux les hydrogrammes dans l'ensemble du bassin (tab. n° 3.22). Les hydrogrammes calculés avec k_c et m du 2ème test sont donnés sur la figure 3.18.

*** MAYO MIDAOUA A ST AMONT

	Hydrogramme		Erreur		
	Calc.	Observ.	Abs.	%	
Débit max. ,m ³ /s	7.808	3.400	4.408	129.6	
Moy. écarts abs. ,m ³ /s			.27	68.7	sur
période de calc.					
Lag (c.g. à c.g.),h	1.12	2.04	-.92	-44.9	

*** MAYO MIDAOUA A ST AVAL

	Hydrogramme		Erreur		
	Calc.	Observ.	Abs.	%	
Débit max. ,m ³ /s	10.11	9.70	.41	4.2	
Moy. écarts abs. ,m ³ /s			.48	46.0	sur
période de calc.					
Lag (c.g. à c.g.),h	2.42	2.24	.18	7.9	

*** MAYO MOUDA A ST AMONT

	Hydrogramme		Erreur		
	Calc.	Observ.	Abs.	%	
Débit max. ,m ³ /s	8.188	8.300	-.112	-1.3	
Moy. écarts abs. ,m ³ /s			.20	45.2	sur
période de calc.					
Lag (c.g. à c.g.),h	1.17	1.23	-.06	-5.0	

*** MAYO MOUDA A ST AVAL

	Hydrogramme		Erreur		
	Calc.	Observ.	Abs.	%	
Débit max. ,m ³ /s	6.024	7.100	-1.076	-15.2	
Moy. écarts abs. ,m ³ /s			.23	39.9	sur
période de calc.					
Lag (c.g. à c.g.),h	2.45	2.38	.06	2.6	

*** MAYO MIYAMLOA A MOUDA

	Hydrogramme		Erreur		
	Calc.	Observ.	Abs.	%	
Débit max. ,m ³ /s	11.96	16.00	-4.04	-25.3	
Moy. écarts abs. ,m ³ /s			.68	36.6	sur
période de calc.					
Lag (c.g. à c.g.),h	3.10	2.55	.55	21.4	

Tableau n° 3.21. Quelques résultats de validation de RORB
sur l'événement "averse-crue" du 30/07/89
(Test n° 1, $k_C = 3,5$; $m = 0,77$)

*** MAYO MIDAOUA A ST AMONT

	Hydrogramme		Erreur		
	Calc.	Observ.	Abs.	%	
Débit max. ,m ³ /s	8.126	3.400	4.726	139.0	
Moy. écarts abs. ,m ³ /s			.29	73.5	sur
période de calc.					
Lag (c.g. à c.g.),h	1.01	2.04	-1.03	-50.6	

*** MAYO MIDAOUA A ST AVAL

	Hydrogramme		Erreur		
	Calc.	Observ.	Abs.	%	
Débit max. ,m ³ /s	10.62	9.70	.92	9.5	
Moy. écarts abs. ,m ³ /s			.46	44.3	sur
période de calc.					
Lag (c.g. à c.g.),h	2.18	2.24	-.06	-2.7	

*** MAYO MOUDA A ST AMONT

	Hydrogramme		Erreur		
	Calc.	Observ.	Abs.	%	
Débit max. ,m ³ /s	8.495	8.300	.195	2.4	
Moy. écarts abs. ,m ³ /s			.20	45.9	sur
période de calc.					
Lag (c.g. à c.g.),h	1.05	1.23	-.18	-14.7	

*** MAYO MOUDA A ST AVAL

	Hydrogramme		Erreur		
	Calc.	Observ.	Abs.	%	
Débit max. ,m ³ /s	6.553	7.100	-.547	-7.7	
Moy. écarts abs. ,m ³ /s			.23	39.5	sur
période de calc.					
Lag (c.g. à c.g.),h	2.18	2.38	-.20	-8.5	

*** MAYO MIYAMLOA A MOUDA

	Hydrogramme		Erreur		
	Calc.	Observ.	Abs.	%	
Débit max. ,m ³ /s	12.98	16.00	-3.02	-18.9	
Moy. écarts abs. ,m ³ /s			.66	35.3	sur
période de calc.					
Lag (c.g. à c.g.),h	2.78	2.55	.23	8.8	

Tableau n° 3.22. Quelques résultats de validation de RORB
sur l'événement "averse-crue" du 30/07/89
(Test n° 2, $k_c = 3,1$; $m = 0,8$)

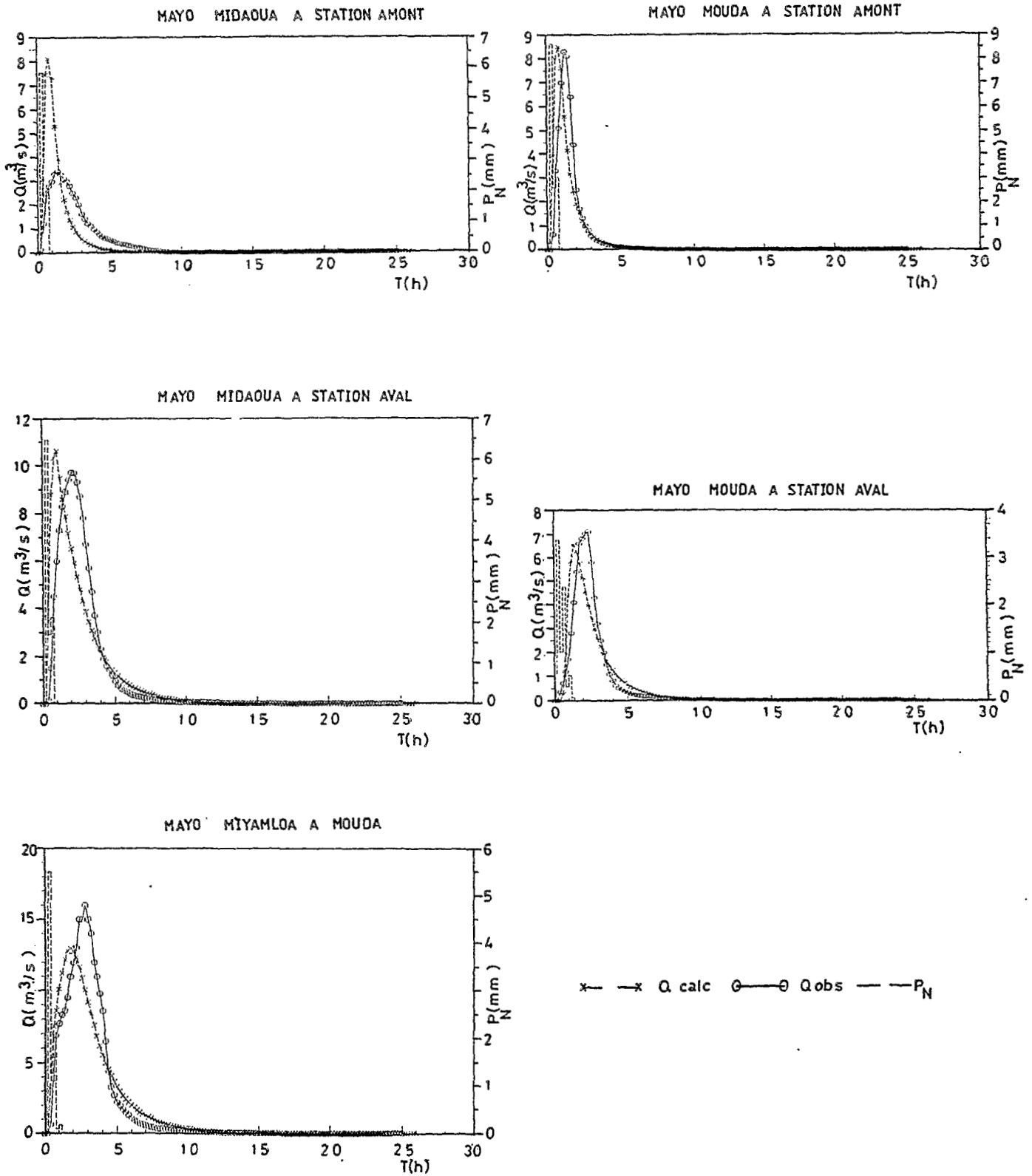


Fig. 3.18 VALIDATION DU MODELE RORB A L'EVENEMENT "AVERSE-CRUE" DU 30/07/89
 $(K_c = 3,1; m = 0,8)$

3.4.5.3. Discussion et conclusion.

Les paramètres k_c et m du modèle, caractéristiques définissant le réseau de drainage du système, ne présentent pas de variations sensibles d'une crue à une autre et d'une période de la saison à une autre. Ceci semble confirmer les principaux résultats obtenus sur l'essai de partage du temps : la réponse du système à une averse n'est pas liée à l'effet saisonnier induit par le couvert végétal; elle l'est plutôt par les caractéristiques des averses.

Seules les pertes initiales varient sensiblement d'un événement à un autre, elles sont fonction de

(i) l'écart en jours séparant l'averse pour laquelle l'ajustement est fait et une averse précédente ayant eu une influence notable sur l'état de saturation des bassins,

(ii) la nature de l'état de surface du bassin.

Les crues du mayo Mouda amont (fig. n°s 3.14, 3.15, 3.17, 3.18) sont mieux reconstituées par le modèle que celles des autres bassins. Le modèle RORB, dans la forme où nous l'avons employé pour les bassins de Mouda, privilégie les processus de ruissellement. L'ajustement se fera d'autant plus facilement que le ruissellement est de loin le terme le plus important de l'hydrodynamique des sols à l'échelle de l'averse. C'est le cas du bassin du mayo Mouda amont, occupé sur toute sa surface par le hardé dénudé en toutes saisons.

Les autres bassins réagissent aux averses en fonction de la nature des sols et des pratiques anthropiques.

Si les valeurs uniques de k_c (3,1) et m (0,8) pour toute période de la saison confirment l'absence de l'effet de la végétation sur l'hydrodynamique superficielle, le "défaut d'ajustement" constaté pour certains bassins pour le même événement souligne la diversité des milieux rencontrés dans le système de Mouda.

3.4.5.4. Simulation de l'événement du 29/06/90.

L'événement du 29/06/90 est le plus important de notre période d'étude, l'averse a une période de retour de 10 ans. Elle a été décrite au paragraphe 3.4.4.2 et au paragraphe 1.2.2.5 de la première partie.

Le fonctionnement hydrodynamique du système sera étudié pour cet événement par simulation du comportement des 4 unités amont. L'hydrogramme de l'exutoire général qui n'a pas été observé ce jour (panne du limnigraphe) sera calculé par la fonction "projet" de RORB.

Pour la simulation ou projet, le même bassin total est modélisé, le vecteur contrôle utilisé pour les phases d'ajustement et de validation peut être modifié pour tenir compte des conditions nouvelles imposées par le projet. Dans notre cas, seul le code 7.1 de l'opération n° 18 change et devient 7.0 pour tenir compte du fait que l'hydrogramme de l'exutoire a été calculé sans observation des débits à Miyamloa (voir tableau 3.11 du paragraphe 3.4.3.2).

Le pas de temps est de 12 mn.

Les paramètres k_c et m obtenus après ajustement et validation du modèle sont employés pour la simulation.

Afin de mieux comparer le comportement hydrodynamique des différents bassins, le modèle de perte est le modèle "0" qui utilise le concept du coefficient du ruissellement.

Pour chaque bassin, les paramètres de perte du modèle "0" sont estimés : hauteur par perte et coefficient d'écoulement. Les observations faites sur les différents bassins lors des événements "averse-crue" pendant trois années, peuvent permettre une estimation du coefficient d'écoulement proche de la réalité pour cet événement exceptionnel.

Après plusieurs essais, les valeurs suivantes des paramètres de pertes ont donné la meilleure reconstitution des débits sur les bassins amont observés :

	P.P.I (mm)	C.E
MIDAOUA amont	5,0	0,35
MIDAOUA aval	10,0	0,65
MOUDA amont	8,0	0,70
MOUDA aval	10,0	0,57

(C.E = coefficient d'écoulement)

Le tableau n° 23 résume les résultats de la simulation.

*** MAYO MIDAOUA A ST AMONT

	Hydrogramme		Erreur		
	Calc.	Observ.	Abs.	%	
Débit max. ,m ³ /s	20.03	20.00	.03	.2	
Moy. écarts abs. ,m ³ /s			1.1	54.8	sur
période de calc.					
Lag (c.g. à c.g.),h	.90	1.24	-.34	-27.7	

*** MAYO MIDAOUA A ST AVAL

	Hydrogramme		Erreur		
	Calc.	Observ.	Abs.	%	
Débit max. ,m ³ /s	49.01	49.00	.01	.0	
Moy. écarts abs. ,m ³ /s			3.1	34.8	sur
période de calc.					
Lag (c.g. à c.g.),h	1.53	1.34	.19	14.4	

*** MAYO MOUDA A ST AMONT

	Hydrogramme		Erreur		
	Calc.	Observ.	Abs.	%	
Débit max. ,m ³ /s	26.16	26.00	.16	.6	
Moy. écarts abs. ,m ³ /s			.58	27.6	sur
période de calc.					
Lag (c.g. à c.g.),h	.902	.610	.293	48.0	

*** MAYO MOUDA A ST AVAL

	Hydrogramme		Erreur		
	Calc.	Observ.	Abs.	%	
Débit max. ,m ³ /s	40.30	40.00	.30	.7	
Moy. écarts abs. ,m ³ /s			1.2	23.7	sur
période de calc.					
Lag (c.g. à c.g.),h	1.33	1.08	.25	23.3	

*** MAYO MIYAMLOA A MOUDA; caractéristiques de l'hydrogramme calculé

	Hydrogramme
	Calc.
Débit max. ,m ³ /s	79.20
Lag (c.g. à c.g.),h	1.82

Tableau n° 3.23. Quelques résultats de simulation par
RORB de l'événement du 29/06/90
(k_c = 3,1; m = 0,8)

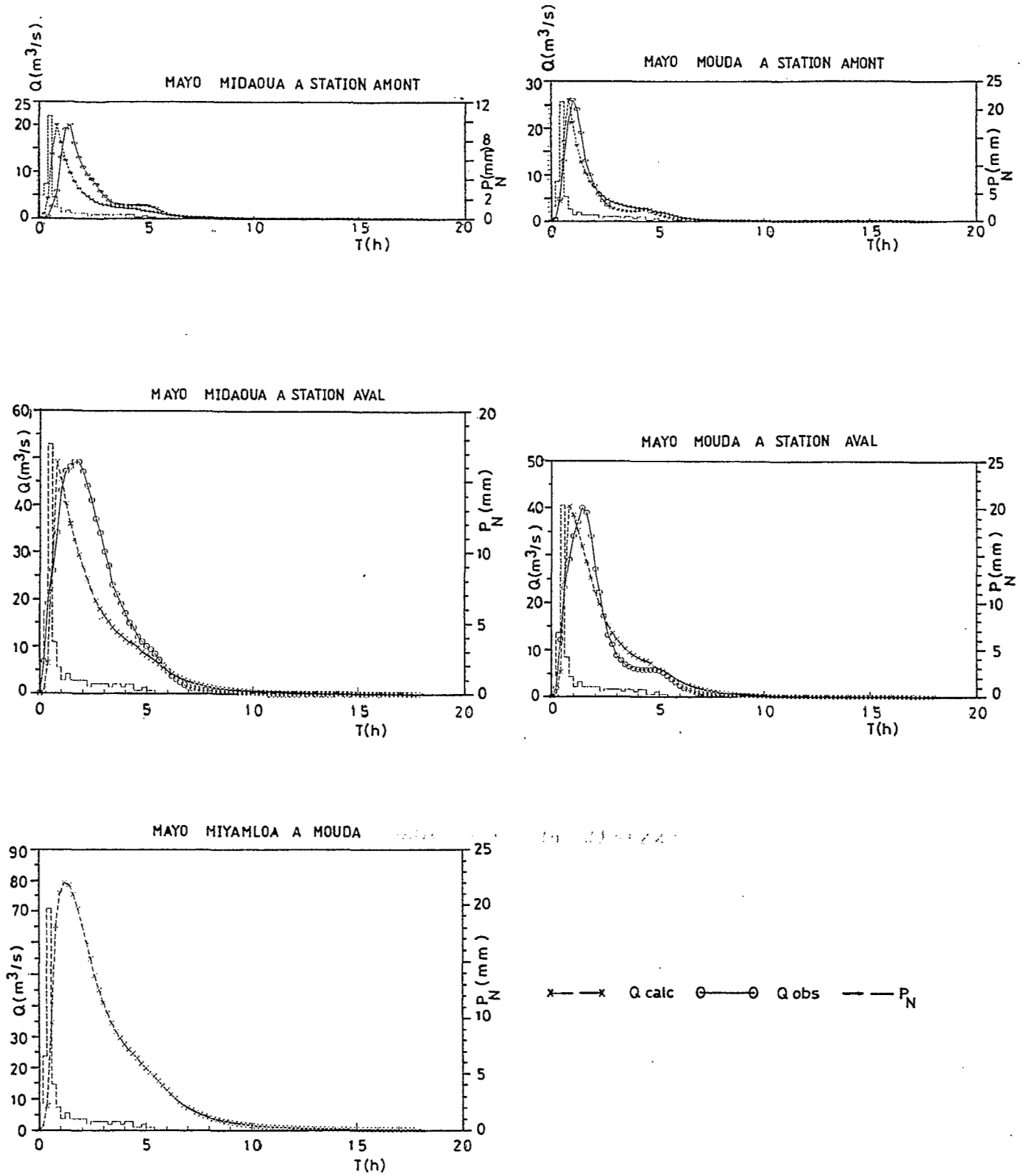


Fig.3.19 SIMULATION DE L'ÉVENEMENT "AVERSE-CRUE" DU 29/06/90
 $(K_c = 3,1; m = 0,8)$

Discussion.

La crue du 29/06/90 est assez bien reconstituée aux quatre exutoires amont. Les erreurs sur les valeurs des indicateurs de l'ajustement sont très faibles (voir tableau n° 3.23).

Ces résultats attestent d'une part, de la justesse des valeurs des paramètres k_c et m obtenues lors du calage et de la validation et d'autre part, des paramètres de pertes estimés, principalement les coefficients d'écoulement.

Les valeurs des coefficients d'écoulement estimées nous permettent de hiérarchiser la perméabilité des bassins lors de cet événement exceptionnel.

Le bassin du mayo Mouda amont présente le plus fort coefficient d'écoulement estimé à 0,70. Nous avons déjà noté la forte imperméabilité de cette unité liée à son état de surface.

L'aire interstation "B" du mayo Midaoua englobe deux villages (Midaoua et Gazal) densément peuplés; ici les activités anthropiques jouent un rôle important dans les processus hydrodynamiques de surface. La présence de ces 2 villages expliquerait la relative imperméabilité de ce sous-bassin :

C.E estimé à 0,65.

Le coefficient d'écoulement est moyen (0,57) pour l'aire interstation du mayo Mouda aval. Cette valeur est due à la présence des collines fersiallitiques sur le flanc Est du bassin. La forte perméabilité des collines a été démontrée dans la deuxième partie de ce travail.

Le bassin du mayo Midaoua amont avec un coefficient d'écoulement de 0,35, apparaît comme l'unité la plus perméable des hydrosystèmes actifs de Mouda. La nature des sols de ce bassin (vertisol modal et ferrugineux) et l'usage qu'il en est fait (cultures) favorisent les processus d'infiltration au détriment de ceux du ruissellement.

L'utilisation du modèle en mode de projet (DESIGN de RORB) nous a permis d'approcher le comportement de l'exutoire du système vis-à-vis de l'averse décennale du 29/06/90.

La pluie moyenne calculée par la méthode de Thiessen sur le bassin total est de 94,8 mm. Les paramètres de pertes estimés pour l'aire interstation "E" du Miyamloa se rapprochent de celles de l'aire B de Midaoua et ont pour valeurs : $P.P.I = 10$ mm et $C.E = 0,66$.

La figure 3.19 présente les 5 hydrogrammes obtenus par simulation pour l'événement du 29/06/90.

Le débit maximum de la crue décennale serait de 79,2 m³/s et le lag de 1,82 heures (109 minutes). Ces estimations des caractéristiques de la crue décennale nous semblent acceptables en regard des résultats obtenus aux exutoires amont lors de cette simulation.

3.4.6. Conclusions.

A la fin de cette troisième partie, quelques enseignements peuvent être tirés de l'application du modèle pluie-débit distribué à l'analyse des redistributions rapides de surface dans le bassin versant du Miyamloa.

Le choix d'une variante de ce modèle est imposé par la spécificité du milieu édaphique : différences de comportement des unités constituantes vis-à-vis des événements "averse-crue". Ces différences de réaction s'expliquent par l'hétérogénéité du milieu et par la spécificité du climat. Les pratiques anthropiques ont accentué ces différences. La pluie et le ruissellement sont alors les termes les plus importants du bilan hydrologique aux exutoires : ce sont les deux termes du bilan modélisés par RORB.

Les effets du bassin sur la pluie nette se manifestent à travers les tronçons de stockage. K_C et m définissent complètement l'élément de stockage et sont les principaux paramètres de calage du modèle RORB.

Les valeurs de $k_C = 3,1$ et $m = 0,8$ sont assez stables tout au long des trois saisons des pluies pour les crues choisies : ceci est expliqué par le faible effet saisonnier de la

végétation herbacée à l'échelle du bassin total pour les crues les plus fréquentes (moyennes à fortes), objet de notre étude.

Une méthode intéressante proposée par Weeks, W.D. (1980) pourrait conforter l'hypothèse de la "stabilité des processus de ruissellement" pour l'ensemble des 20 événements "averse-crue" avec $P \geq 30,0$ mm (cf. paragraphe 3.4.4.1). Cet auteur propose pour le choix du meilleur couple (k_C , m), l'utilisation pour le calage des crues, d'un échantillon de débits variés de crues. Pour chaque événement, plusieurs valeurs de m sont testées, et pour chaque valeur de m on fait varier k_C jusqu'à l'obtention du meilleur ajustement. Une courbe $k_C = f(m)$ est tracée pour chaque événement. La superposition des différentes courbes obtenues pour l'ensemble des événements indique, dans le cas de la stabilité des processus de ruissellement, un couple unique de k_C et m qui donne le meilleur ajustement pour tous les événements quelle que soit la période de la saison.

Les pannes fréquentes des enregistreurs (en particulier arrêts et décalages en temps entre les appareils) et les imprécisions de mesure sur les décrues n'ont pas permis d'appliquer la méthode de Weeks.

La reconstitution des crues non utilisées dans la phase de calage, est meilleure avec le couple $k_C = 3,1$ et $m = 0,8$ qu'avec le couple $k_C = 3,5$ et $m = 0,77$ et justifie le choix du premier couple pour le bassin versant du Miyamloa.

K_C et m sont définis à l'exutoire du bassin total; ceci pourrait bien expliquer le défaut d'ajustement constaté lors de certaines crues pour certains sous-bassins.

En l'absence des mesures de terrain, les caractéristiques de la crue décennale (débit maximal et lag) à l'exutoire du Miyamloa nous semblent assez bien estimées par le modèle si on considère que les résultats de la simulation obtenus aux quatre exutoires amont sont relativement satisfaisants. Une vérification des conditions d'écoulement à l'exutoire

principal aurait été cependant nécessaire pour confirmer ces résultats.

Le modèle distribué type RORB prend en compte les mécanismes variables de la production du ruissellement rapide de surface. A la lumière des résultats obtenus lors des trois phases de la modélisation, on constate que RORB assure une bonne reconstitution des crues sur l'ensemble du bassin.

Annexe 1

CONCLUSION

Ce travail rentre dans le cadre d'une réflexion menée dès 1983 par une équipe pluridisciplinaire sur un terroir en zone soudano-sahélienne du Cameroun soumise depuis aux contraintes climatiques et anthropiques. Le déséquilibre irréversible du milieu pourrait s'en suivre si des actions énergiques ne sont pas prises à temps en vue d'une meilleure gestion des ressources en eau et sol du milieu.

Dans ce contexte de modification de l'équilibre biologique du milieu de la plaine, le ruissellement de surface est prépondérant par rapport aux autres types d'écoulement (écoulement de sub-surface, vidange de nappe, ...) généralement rencontrés dans les études hydrologiques.

Les hydrogrammes de crue observés à l'exutoire du Miyamloa ont constitué l'objet de l'étude. Pour mener à bien cette étude, l'objectif a été d'avoir des observations hydro-pluviométriques sur les différents sous-bassins. La démarche que nous avons adoptée découle naturellement de cet objectif : spatialisation des observations au cours de trois campagnes de mesures correspondant à trois saisons de pluies et utilisation d'un modèle pluie-débit distribué par événement.

La problématique, tout au long de ce mémoire, a été construite sur deux questions; celles-ci doivent trouver leurs réponses au niveau des deux échelles d'observations hydro-pluviométriques :

- à l'échelle du temps, nous avons voulu savoir s'il existait un effet saisonnier sur le ruissellement;
- à l'échelle spatiale, nous avons examiné l'influence et l'apport en ruissellement à l'exutoire de 18,1 km² des différentes unités identifiées.

Nous pouvons dégager les principaux points qui nous semblent les plus saillants et essayer de proposer des réponses aux deux questions posées à la lumière des résultats acquis lors de cette étude.

le milieu :

les sécheresses récentes et l'anthropisation brutale sont les facteurs essentiels de la dégradation du milieu. Les principaux types de sol (vertisol et ferrugineux) subissent les influences de ces facteurs, leurs termes actuels, dégradés, sont des sols à texture sableuse et à faibles teneurs en matières organiques. Généralement situés sur des pentes très faibles, ces sols, devenus vulnérables, sont sujets à l'encroûtement de leurs horizons superficiels (pellicule de battance). L'aptitude au ruissellement est alors sous la dépendance quasi-exclusive des états de surface. Dans ces conditions, le ruissellement de surface est très important et la couverture herbacée très faible tout au long de la saison.

le fonctionnement :

l'étude du fonctionnement hydrologique du système de Mouda à partir de ses composantes spatialisées a permis de mettre en évidence des modèles de fonctionnement hydrologique que nous avons dénommés "hydro-séquences". La réaction des différentes unités vis-à-vis des averses suggère le partage de l'espace et du temps. Des trois versants identifiés sur la toposéquence-type de Mouda, deux constituent des hydrosystèmes actifs et un (versant fersiallitique) ne participe pas à la production du ruissellement rapide de surface à l'exutoire du bassin total. Des deux hydro-systèmes actifs, un (plaine vertisolique) couvre près de 71 % de la surface totale du bassin : celui-ci impose un fonctionnement hydrodynamique de type superficiel à l'exutoire du Miyamloa. La modélisation des écoulements a confirmé l'absence de l'effet saisonnier sur le ruissellement à cet exutoire.

la modélisation :

le modèle pluie-débit appliqué aux observations à l'issue de trois campagnes de mesures, est un modèle distribué par événement. Par rapport au modèle global (type hydrogramme unitaire), il nous a offert l'opportunité de tenir compte de l'information spatiale. Pour chaque sous-bassin : caractéristiques physiques, pluies, débits, états de surface par estimation d'un indice d'humidité antérieure, ont été déterminés. Les informations hydro-pluviométriques ont été analysées sur des petits pas de temps (de douze à trente minutes selon les caractéristiques de l'événement modélisé).

Le modèle RORB utilisé, reconstitue de façon acceptable les débits observés aux exutoires à l'échelle de l'événement. La constance des paramètres d'ajustement, $k_c = 3,1$ et $m = 0,8$, à l'exutoire du bassin total, tout au long de la saison pluvieuse confirme la stabilité des processus de ruissellement pour les événements "averse-crue" les plus fréquents dans le secteur d'étude. Si au niveau du bassin total, l'absence de l'effet saisonnier a pu être confirmé par le modèle, on ne peut pas en dire de même pour les autres unités, en particulier pour le système ferrugineux. En effet, nous avons montré, par l'analyse des relations saisonnières pluies-débits qu'il existait un effet saisonnier sur le système ferrugineux dû surtout à l'utilisation du sol par l'homme (type de pratique culturale) pendant une bonne partie de la saison pluvieuse.

K_c et m sont ajustés pour le bassin total : ils permettent d'appuyer l'hypothèse de la stabilité du processus de production du ruissellement à l'exutoire du bassin total et à une échelle de temps variable (journée, période de la saison ou toute la saison des débits) (Weeks, 1980). Des valeurs de k_c et m , ajustées à chaque sous bassin du système d'eau de Mouda (Linsley et al., 1958), auraient certainement montré clairement l'effet saisonnier sur le ruissellement dans le bassin de Midaoua amont.

A l'échelle de l'événement, la simulation a permis d'étudier le comportement hydrodynamique du bassin sous des conditions extrêmes, et permet également d'envisager l'étude des effets

d'aménagement, par exemple constitution de réserves, rectification des lits, etc...

les interrogations et les perspectives :

Nous avons essayé de proposer des réponses aux deux questions qui ont constitué le fil directeur de ce travail. La prise en compte des hétérogénéités spatiales pour la compréhension des mécanismes hydrologiques est capitale; pour cela il faut relever l'importance vers une large ouverture sur les disciplines connexes du milieu, leur méconnaissance peut conduire à une conceptualisation insuffisante des processus d'écoulement. Cependant, à la modélisation déterministe telle que proposée dans cette étude, on doit associer la modélisation stochastique (étude de distribution de probabilité) pour l'étude des phénomènes non linéaires comme la perméabilité (infiltration) globale d'un bassin versant.

Cet axe de recherche sur le milieu, initié par une équipe pluridisciplinaire dans les bassins versants de Mouda, ouvre la voie à :

- d'autres études sur l'hydrogéodynamique du bassin du Miyamloa, nous pensons à un programme de mesures et de modélisation des flux de matières conçu à l'ensemble du bassin;
- des études similaires sur d'autres milieux écologiques camerounais.

C'est là, pensons-nous, l'une des voies les plus sûres de la maîtrise des ressources de notre milieu devenu si fragile.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- ALDEGHERI M.(1956). Annonce des crues de la Benoué. ORSTOM, Service Hydrologique, Paris, in Annuaire de la France d'Outre-Mer, 1954, pp 11-22.
- ALBERGEL J.(1987). Genèse et prédétermination des crues au Burkina Faso. Du m^2 au km^2 , étude des paramètres hydrologiques et de leur évolution. Thèse de doctorat, Université Paris VI, 341 p.
- ALBERGEL J., RISBTEIN P. et VALENTIN C.(1985).
L'infiltration : quels facteurs explicatifs ? Analyse des résultats acquis sur 48 parcelles soumises à des simulations de pluies au Burkina Faso. Journées hydrologiques de l'ORSTOM à Montpellier. Coll. ORSTOM, Colloques et séminaires, pp 25-48.
- ASKEW A.J.(1970). Derivation of Formulae for Variable Lag Time. J. Hydrol., 10, pp 225-242.
- BADER J.C.(1984). Etude relative à l'évaluation du changement possible de la distribution des pluies intenses sur la saison pluvieuse au Sahel. Diplôme d'Etudes Approfondies, Univ. Paris Sud, Orsay, 58 p. + annexe.
- BASTIN G.(1984). Identification de la relation pluie-débit. Prévision des débits en temps réel. Session "crues et précipitations intenses". Vol. IV, I.N.P.G., Grenoble, 44 p.
- BEVEN K.J.(1987). Towards a new paradigm in hydrology. in Water for the Future : Hydrology in Perspective, Proceedings of the Rome Symposium, IAHS, Publ. n° 164, pp 393-403.
- BEVEN K.J. et WOOD E.F.(1983). Catchment geomorphology and the dynamics of runoff contributing areas. in I. Rodriguez-Iturbe and V.K. Gupta (guest-editors), Scale problems in hydrology. J. Hydrol., 65, pp 135-158.
- BOUTRAIS J.(1973). La colonisation des plaines par les montagnards au Nord du Cameroun (Monts Mandara). Travaux

et documents de l'ORSTOM n° 24. Paris, 1 vol., 227 p.,
31 fig., 16 pl. hors texte.

BOUTRAIS J., BOULET J., BEAUVILAIN A., GUBRY P., BARRETEAU D.,
DIEU M., BRETON R., SEIGNOBOS C., PONTIE G., MARGUERAT Y.,
HALLAIRE A. et FRECHOU H.(1984).

Le Nord du Cameroun. Des hommes, une région. Editions de
l'ORSTOM. Coll. Mémoires n° 102. Paris, 550 p.

BOYD M.J.(1981). A linear branched network model for storm
rainfall and runoff. Proc. of the International Symposium
on Rainfall-Runoff Modeling, May 18-21, 1981, Mississippi
State University, Edit. by Vigay P. Singh, Wat. Resour.
Publ., pp 111-124.

BOYD M.J., PILGRIM D.H. et CORDERY I.(1979). A storage routing
model based on catchment geomorphology. J. Hydrol., 42,
pp 209-230.

BOUVIER C. et ROSSEL F.(1992). Modélisation des crues sur le
bassin de Chalco-San Marcos (110 km²). Résultats et
applications. VIIIèmes Journées hydrologiques de l'ORSTOM
à Montpellier. (22- 23 septembre 1992), thème :
Régionalisation en hydrologie, application au
développement. Rec. prov. com.,pp 213-222.

BRABANT P. et GAVAUD M.(1985). Les sols et les ressources en
terre du Nord-Cameroun. Coll. Cartes et notice explicative
n° 103. MESRES-IRA, Yaoundé, ORSTOM, Paris. Ed. de
l'ORSTOM, 285 p. + six cartes couleurs hors texte.

BRUNET-MORET Y.(1965). Influence du corps de l'averse sur le
ruissellement d'un petit bassin (bassin du petit
Boundjouk). Cah. ORSTOM, sér. Hydrol., vol. 3, 32 p.

CADIER E.(1971). Hydrologie des mayos du Nord-Cameroun. Bassin
versant représentatif du Motorsolo. Rapport définitif
ORSTOM YAOUNDE, 173 p + annexes.

CARRE P.(1972). Quelques aspects du régime des apports
fluviaux de matériaux solides en suspension vers le lac

- Tchad. Cah. ORSTOM, sér. Hydrol., vol. IX, n° 1, pp 19-45.
- CASENAVE A. et VALENTIN C.(1988). Les états de surface de la zone sahélienne. Influence sur l'infiltration. ORSTOM - Communauté Economique Européenne, 232 p.
- CEE (1988). Utilisation et conservation des ressources en sol et en eau (Nord-Cameroun). Rapport final. Contrat TSD. A-216-CAM (DG12-CEE). MESRES-ORSTOM-CNRS, ronéo, 232 p.
- CEMAGREF (1980). Synthèse nationale sur les crues des petits bassins versants. La méthode SOCOSE. Ministère de l'agriculture - Service Régional d'Aménagement des Eaux. Fascicule 2, 45 p.
- CHEVALLIER P.(1983). L'indice de précipitations antérieures. Evaluation des sols des bassins représentatifs. Cah. ORSTOM, sér. Hydrol., vol. XX, n°s 3 et 4, pp 179-189.
- CHEVALLIER P.(1988). Complexité hydrologique du petit bassin versant. Exemple en savane humide, Booro-Borotou (Côte d'Ivoire). Thèse de doctorat, Univ. Sc. et Tech. du Languedoc, Montpellier, 336 p.
- CHEVALLIER P., CLAUDE J., POUYAUD B. et BERNARD A. (1985). Pluies et crues au sahel. Hydrologie de la mare d'Oursi (Burkina Faso). Travaux et documents de l'ORSTOM n° 190, Paris, 251 p.
- CHEVALLIER P. et LAPETITE J.M.(1986). Note sur les écarts observés entre les pluviomètres standards et les pluviomètres au sol en Afrique de l'Ouest. Hydrol. Continent., vol. 1(2), 1986 : 111-119.
- CLARKE R.T.(1973). Mathematical models in hydrology. Irrigation and Drainage Paper n° 19, Food and Agric. Org. (F.A.O), Rome , 282 p.
- COLLINET J. et VALENTIN C.(1979 a). Analyse des différents facteurs intervenant sur l'hydrodynamique superficielle. Nouvelles perspectives. Applications agronomiques. Cah.

ORSTOM, sér. Pédol., vol. XVII n° 4, pp. 283-328.

DE BRUN H.A.R.(1985). Results of the International Comparison of rain gauges with a reference Pit-gauge. Part. A : Basic stations. Royal Netherland Meteorological Institute, De BILT. Netherland in Work shop on the Correction of Precipitation Measurements, 1-3, april 1985. Zurich, pp 97-99

DISKIN M.H.(1981). Nonlinear hydrologic models. Proc. of the International Symposium on Rainfall-Runoff Modeling, May 18-21, 1981, Mississippi State University, Edit. by Vigay P. Singh, Wat. Resour. Publ., pp 127-146.

DOOGE J.C.I.(1968). The hydrologic cycle as a closed system. Bull. Int. Ass. Scient. Hydrol., 13 (1), 1968 pp 58-68.

DUBAND D.(1978). Hydrologie Statistique Approfondie. Cours de l'Ecole Nationale Supérieure de Grenoble, Institut National Polytechnique de Grenoble, 243 p.

DUBREUIL P.(1956). Etude des crues sur un petit bassin de la région de Maroua : le Bouloure. ORSTOM, Serv. Hydrol., Paris, 117 p.

DUBREUIL P.(1966). Bassins représentatifs et expérimentaux, réflexions sur le symposium A.I.S.H. de Budapest. Cah. ORSTOM, sér. Hydrol., n° 4 - Mai 1966, pp 15-26.

DUBREUIL P.(1974). Initiation à l'analyse hydrologique. Masson, Paris, 216 p.

DUBREUIL P., MORELL M. et SECHET P.(1975). Comportement et interactions des paramètres physiques des petits bassins versants semi-arides et intertropicaux. Cah. ORSTOM, sér. Hydrol., vol. XIII, n°1, pp 13-36.

DUJARDIN J.M (1980). Exemples concrets d'annonce des crues dans de petits bassins versants. La Houille Blanche, 4/5, pp 291-295.

DUMORT J.C. et PERONNE Y.(1966). Notice explicative sur la

- feuille de Maroua - Carte géologique au 1/500 000. Dir. Mines Géol. Cameroun, Paris 50 p.
- EMBRECHTS J.(1978). Genèse, cartographie et systématique des sols. Les principaux sols du Cameroun. Cours de l'Ecole Nationale Supérieure Agronomique (département des sciences du sol), Univ. de Yaoundé, 49 p.
- FLORET C., LE FLOC'H E. et PONTANIER R.(1981). Dynamique de systèmes écologiques de la zone aride. Application à l'aménagement sur des bases écologiques d'une zone de la Tunisie présaharienne. Oecol. Applic., vol. 2, 3 : 195-214
- GIRARD G.(1975a). 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.(1975b). Les modèles hydrologiques pour l'évaluation de la lame écoulée en zone sahélienne et leurs contraintes. Cah. ORSTOM, sér. Hydrol., vol. XII, n°3, pp 189-221.
- GUILLOT P. et DUBAND D.(1980). Fonction de transfert pluie-débit sur les bassins versants de l'ordre de 1000 km². La Houille Blanche, 4/5, pp 279-290.
- HUFF F.A.(1967). Time distribution of Rainfall in Heavy Storms. Wat. Resour. Res. 3,4, pp 1007-1019.
- IBIZA D.(1984-1985 b). Une fonction de production aux petits pas de temps. Cah. ORSTOM, sér. Hydrol., vol. XXI, n° 3, pp 51-98.
- IBIZA D.(1987). Transfert de surface : étude systématique du temps caractéristique h (temps de concentration) sur des bassins en zone intertropicale de 2 à 2000 km². Hydrol. continent., 2, 2 pp 101-115.
- KLEIN J.C.(1971). Intensité extraordinaire de la précipitation du 26 novembre 1970 dans la région des Grands Fonds de Guadeloupe. Cah. ORSTOM, sér. Hydrol., vol. VIII, n° 2,

pp 39-50.

KOHLER M.A et LINSLEY R.K.(1951). Predicting the runoff from storm rainfall. Weather Bureau, U.S. Dep. of Commerce, Washington, Research Paper n° 34, 9 p.

LAHAYE J.P.(1980). Etude des pluies journalières de fréquence rare dans les Etats membres du CIEH. Synthèse régionale de valeurs réduites des pluies maximales annuelles. Aspects théoriques. CIEH, Ouagadougou, 58 p + annexes.

LAURENSEN E.M. et MEIN R.G.(1990). Rorb - version 4. Runoff Routing Programm. User manual. Monash University, Department of Civil Engineering, ACADS and Montech Pty. Ltd, 186 p + annexes.

LETOUZEY R.(1978). Etudes phytogéographiques du Cameroun. Le Chevallier, Paris, 513 p.

L'HOTE Y.(1980). Prévision des crues de la Meurthe et de la Moselle par des méthodes de régressions simples ou multiples. Cah. ORSTOM, sér. Hydrol., vol. XVII, n° 3-4, pp 141-175.

LOAGUE K.M. et FREEZE R.A.(1985). A comparison of rainfall-runoff modeling techniques on small upland catchments. Wat. Resour. Res. 21, pp 229-248.

LUBES H.(1985). Identification des fonctions de production et de transfert dans un modèle hydrologique global. Application au bassin de l'Orbieu à Lagrasse. Diplôme d'Etudes Approfondies, Univ. Sc. et Tech. du Languedoc, Montpellier, 114 p.

MAHE G.(1992). Les écoulements fluviaux sur la façade atlantique de l'Afrique. Etude des éléments du bilan hydrique et variabilité interannuelle. Analyse de situations hydroclimatiques moyennes et extrêmes. Thèse, Univ. Paris Sud, Orsay, 385 p. + 151 p. annexes.

MASSE D.(1992). Amélioration du régime hydrique des sols

dégradés en vue de leur réhabilitation. Cas des vertisols du Nord Cameroun. Thèse Doct. Ingénieur, Inst. Polytech. de Toulouse. 187 p.

- MEIN R.G., LAURENSEN E.M. et McMAHON T.A.(1974). Simple Nonlinear Model for Flood Estimation. Journal of the Hydraulics Division, ASCE, Vol. 100 n° HY11, Proc. Paper 10933, November, 1974, pp. 1507-1518.
- MINSHALL N.E.(1960). Predicting storm runoff on small experimental watersheds. J. Hydraul. Div., Am. Soc. Civ. Eng., 86, pp 7-38.
- MONIOD F.(1983). Deux paramètres pour caractériser le réseau hydrographique. Cah. ORSTOM, sér. Hydrol., vol. XX, n° 3-4 pp 191-203.
- NAAH E.(1978). Etude hydrologique du mayo Tsanaga à Minglia. Rapport définitif. ONAREST IRTISS - Yaoundé - Cameroun, 38 p. + figures + annexes.
- NAAH E.(1990). Hydrologie du grand Yaéré du Nord-Cameroun. Thèse de Doct. d'Etat, Univ. de Yaoundé, Faculté des Sciences, Département des Sciences de la Terre, 327 p + annexes.
- NAAH E. et NTONGA J.(1982). Etude hydrologique du mayo Oulo à Goloza. rapport hydrologique. Campagne 1981. DGRST - IRGM CRH, Yaoundé. multigr. 37 p. + annexes.
- NASH J.E et SUTCLIFFE J.V.(1970). River flow forecasting through conceptual models, 1, A discussion of principles, J. Hydrol., 10, pp 282-290.
- NASH J.E et FOLEY J.J.(1981). Linear models of rainfall-runoff systems. Proc. of the International Symposium on Rainfall-Runoff Modeling, May 18-21, 1981, Mississippi State University, Edit. by Vigay P. Singh, Wat. Resour. Pub., pp 51-66.
- N'GOLONA GOUNDOUL.(1992). Etude de la relation "averses -

crues". Application d'un modèle global et essais de mise au point d'un modèle distribué sur le bassin versant du BAM -BAM (TCAHD). Thèse de doctorat, Univ. d'Avignon et des Pays de Vaucluse, Avignon, 238 p. + annexes.

NTONGA J.C.(1984). Les systèmes d'annonce des crues.

Diplôme d'Etudes Approfondies, Univ. Paris Sud, Orsay
148 p.

NTONGA J.C.(1991). Etude différenciée du ruissellement et de l'érosion et de leur impact sur le régime hydrique des sols dans la région de Maroua (exemple d'un versant ferrugineux de 0,54 ha). Rapport hydrologique. Campagne 1990. MESIRES-IRGM/CRH, Yaoundé. multigr. 22 p. + annexes.

OLIVRY J.C.(1986). Fleuves et rivières du Cameroun. Collect. Monographies hydrologiques ORSTOM n° 9. MESRES/Yaoundé. ORSTOM/Paris 1986, 617 p. + annexes.

OLIVRY J.C.(1986). Méthode simplifiée de prédétermination des crues sur petits bassins en milieu inter-tropical : l'exemple du Cameroun. Journées d'hydrologie de Strasbourg. "crues et inondations". 16, 17, 18 oct. 1986.

ORSTOM, CIEH (1978). République du Cameroun. Précipitations journalières de l'origine des stations à 1972. ORSTOM Paris, tomes I et II.

PILGRIM D.H.(1983). Some problems in transferring hydrological relationships between small and large basins and between regions. in I. Rodriguez-Iturbe and V.K. Gupta (guest-editors), Scale problems in hydrology. J. Hydrol., 65 : 49-72.

PONTANIER R., MOUKOURI KUOH H., SAYOL R., SEINY-BOUKAR. et THEBE B.(1984).

Comportement hydrique et sensibilité à l'érosion de quelques sols du Nord-Cameroun soumis à des averses contrôlées. MESRES -IRA -IRGM, Yaoundé, Cameroun, 71 p.

PUECH C et CHABI-GONNI D.(1984). Méthode de calcul de débits

de crue décennale pour les petits et moyens bassins versants en Afrique de l'Ouest et centrale. CIEH, Ouagadougou, 91 p.

REMENIERAS G.(1972). L'hydrologie de l'ingénieur. Eyrolles, Paris, 456 p.

RIBSTEIN P.(1990). Modèles de crues et petits bassins versants au Sahel. Thèse de doctorat, Univ. Sc. et Tech. du Languedoc, Montpellier, 317 p.

RIBSTEIN P. et LEBEL T. (1988). L'hydrogramme unitaire appliqué à l'analyse des crues au Sahel. Comparaison de différentes méthodes d'identification. in : The Sahel Forum on the state-of-art of hydrology and hydrogeology in the arid and semi areas of Africa. Colloque UNESCO, Ouagadougou, pp 160-172.

ROCHE M.(1963). Hydrologie de surface. Gauthier-Villars éditeur, Paris, 383 p.

ROCHE M.F.(1986). Dictionnaire français d'hydrologie de surface. Masson, Paris, 288 p.

RODIER J.A.(1964). Régimes hydrologiques de l'Afrique noire à l'ouest du Congo. Mémoire ORSTOM n° 6, Paris, 138 p.

RODIER J.A.(1975). Evaluation de l'écoulement annuel dans le Sahel tropical africain. Travaux et documents de l'ORSTOM n° 46, Paris, 121 p.

RODIER J.A.(1984-1985). Caractéristiques des crues des petits bassins versants représentatifs au Sahel. Cah. ORSTOM, sér. Hydrol., vol. XXI, n° 2, pp 3-26 + annexes.

RODIER J.A.(1992). Du simulateur de pluie aux bassins représentatifs sahéliens. Collect. Etudes et Thèses, Edit. de L'ORSTOM, Paris, 76 p.

RODIER J.A. et AUVRAY C.(1965). Estimation des débits de crues décennales pour les bassins versants de superficie inférieure à 200 km² en Afrique occidentale. ORSTOM - CIEH

Paris, 46 p.

- RODIER J.A. et RISBTEIN. (1988). Estimation des caractéristiques de la crue décennale pour les petits bassins versants couvrant de 1 à 10 km². ORSTOM, Montpellier, 133 p.
- SEGUIS L.(1986). Recherche pour le Sahel, d'une fonction de production journalière (lame précipitée - lame écoulée). Thèse de doctorat, Univ. Sc et Tech. du Languedoc, Montpellier, 326 p.
- SEINY-BOUKAR L.(1990). Régime hydrique et dégradation des sols dans le Nord-Cameroun. Thèse de 3ème cycle, Univ. de Yaoundé, Faculté des Sciences, Département des Sciences de la Terre, 226 p. + annexes.
- SEVRUK B.(1985). Effects of wind and intensity of rain on the rain catch. International Comparison of national precipitation gauge with a reference Pit gauge. (Evaluation stations). Correction of precipitation measurement - Zurich, 1-3 april 1985, pp 251-256.
- SIGHOMNOU D., SIGHA N., NTONGA J.C. et NAAH E.(1990). Influence de la densité du réseau sur l'estimation de la pluie moyenne journalière : un exemple au Cameroun. Hydrol. Continent., 5, 1 pp 53-60.
- SIRCOULON J.(1976). Les données hydropluviométriques de la sécheresse récente en Afrique intertropicale. Comparaison avec les sécheresses "1913" et "1940". Cah. ORSTOM, sér. Hydrol., Numéro spécial Sécheresse, vol. XIII, n° 2, pp 75-174.
- SIRCOULON J.(1984-1985). La sécheresse en Afrique de l'Ouest. Comparaison des années 1982-1984 avec les années 1972-1973 Cah. ORSTOM, sér. Hydrol., vol. XXI, n° 4, pp 75-86.
- SEGHIERI J.(1990). Dynamique saisonnière d'une savane soudano-sahélienne au Nord-Cameroun. Thèse de doctorat, Univ. Sc. et Tech. du Languedoc, Montpellier, 200 p.

- SPOLIA S K. et CHANDER S.(1974). Modelling of surface runoff systems by an ARMA model. J. Hydrol., 22, pp 317-332.
- SUCHEL J.B.(1972). La répartition des pluies et les régions pluviométriques du Cameroun. Contribution à l'étude des climats de l'Afrique tropicale. CEGET, Univ. Féd. Cameroun, 287 p.
- THEBE B.(1987). Hydrodynamique de quelques sols du Nord-Cameroun, bassin versant de Mouda. Contribution à l'étude des transferts d'échelle. Thèse de doctorat d'Université, USTL, Montpellier, 306 p.
- THIESSEN A.(1911). Précipitations of large areas. Monthly weather rev. vol. 39, pp. 1082-1084.
- UNESCO (1977). Carte de la répartition mondiale des régions arides. Notes techniques du MAB.7. UNESCO. Paris.
- VALENTIN C.(1981). Organisations pelliculaires superficielles de quelques sols de région subdésertique (AGADEZ - NIGER). Dynamique de formation et conséquences sur l'économie de l'eau. Coll. Etudes et Thèses de l'ORSTOM. Thèse docteur troisième cycle. Université Paris VII, 229 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). Coll. colloques et séminaires. Ed. ORSTOM, pp. 50-74.
- VEN TE CHOW (1964). Handbook of applied hydrology, a compendium of water resources technology. Mac Graw Hill éd., New York, 1530 p.
- VILLERMAUX J. et ANTOINE B.(1978). Construction et ajustement des modèles mathématiques : une science ou un art. Bul. BRGM, 2° sér., III(4), pp 327-339.
- VOGEL JOHN L.(1980). Real time measurement of convective precipitation over an urban area. in "Hydrological

Forecasting". Proceed. Symp. I.A.H.S., Oxford, n° 129, pp 95-102.

VUILLAUME G.(1974). L'abattement des précipitations journalières en Afrique intertropicale. Variabilité et précision des calculs. Cah. ORSTOM, sér. Hydrol., vol. XI, n° 3, pp 327-339.

WEEKS W.D. (1980). Using the Laurenson Model : Traps for Young Players. Hydrology and Water Resources Symposium, The Institution of Engineers, Australia, pp 29-33.

TABLE DES MATIERES

TABLE DES MATIERES

INTRODUCTION	9
Chapitre 1 :	
CARACTERISTIQUES DU MILIEU NATUREL	
1.1. Description géographique du milieu	17
1.2. Traits du climat	19
1.2.1. Généralités, circulation atmosphérique en Afrique de l'Ouest	19
1.2.2. Paramètres principaux du climat	23
1.2.2.1. Les vents	23
1.2.2.2. Les températures	25
1.2.2.3. L'humidité relative de l'air	26
1.2.2.4. L'évaporation et l'évapotranspiration ...	27
1.2.2.5. La pluviométrie	28
1.2.3. Conclusion sur le climat	47
1.3. Géologie et géomorphologie	48
1.4. Sols et végétation	51
1.4.1. Sols	51
1.4.2. Végétation	53
1.5. Grands ensembles hydrographiques	54
1.5.1. Mayos des monts Mandara	54
1.5.2. Mayos des glacis et des plaines	55
1.6. Bassins versants du Miyamloa observés de 1988 à 1990	56
1.6.1. Caractéristiques physiques	56
1.6.2. Réseau de mesures hydro-pluviométriques	59

Chapitre 2 :

IDENTIFICATION ET ETUDE DES MODELES DE FONCTIONNEMENT HYDROLOGIQUE (HYDRO-SEQUENCES) DANS LES BASSINS VERSANTS DE MOUDA

2.1. Problématique	64
2.2. Méthodes d'identification	65
2.3. Principales caractéristiques pédologiques et états de surface des milieux étudiés	70
2.3.1. La séquence des vertisols	71
2.3.1.1. Vertisols modaux (VM2, VM1, vm)	71
2.3.1.2. Vertisols dégradés (VD, vd)	71
2.3.1.3. Sols "hardé" (HV)	72
2.3.1.4. Régosols sur matériaux à nodules calcaires (HN)	72
2.3.2. La séquence des sols ferrugineux (FR2, FR1, fr) ...	74
2.3.3. Les sols régosoliques des collines (FS3, FS2)	75
2.3.4. Hydro-séquence "hardé-vertisol dégradé"	76
2.3.5. Hydro-séquence "fersiallitique"	77
2.3.6. Hydro-séquence "ferrugineux-vertisol dégradé"	77
2.3.7. Répartition des états de surface dans le système emboîté du Miyamloa.....	78
2.4. Etude des modèles de fonctionnement hydrologique dans le bassin de Mouda	81
2.4.1. Méthodes	81
2.4.2. Modèles de fonctionnement hydrologique	84
2.4.2.1. A l'échelle de la parcelle	84
2.4.2.2. A l'échelle du versant	90
2.5. Conclusions	111

Chapitre 3 :

FONCTIONNEMENT HYDROLOGIQUE DU SYSTEME DE MOUDA ET MODELISATION

3.1. Introduction	116
3.2. Système hydrologique de Mouda : apports et crues	117
3.2.1. Bilan hydrologique	117
3.2.1.1. Bilan annuel	117
3.2.1.2. Bilan mensuel	121
3.2.2. Evénements "averse-crue"	123
3.2.2.1. Définition des grandeurs descriptives ...	124
3.2.2.2. Echantillon des crues	126
3.3. Fonctionnement hydrologique du système de Mouda	128
3.4. Modélisation	131
3.4.1. Généralités, systèmes hydrologiques et modèles	131
3.4.2. Choix du type de modèle pour le système hydrologique de Mouda	133
3.4.3. Le modèle RORB : concepts et expressions analytiques, description et fonctionnement	134
3.4.3.1. Concepts et expressions analytiques	134
3.4.3.2. Description et fonctionnement	141
3.4.4. Echantillon des événements "averse-crue"	148
3.4.4.1. Choix de l'échantillon	148
3.4.4.2. Caractéristiques des averses de l'échantillon	150
3.4.5. Application de RORB à l'échantillon et analyse des résultats	153
3.4.5.1. Evénements de la première période	153
3.4.5.2. Evénements de la deuxième période	165
3.4.5.3. Discussion et conclusion	176
3.4.5.4. Simulation de l'événement du 29/06/90 ...	177

3.4.6. Conclusions	182
CONCLUSION	185
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	190
TABLE DES MATIERES	203
LISTE DES FIGURES	208
LISTE DES TABLEAUX	212
ANNEXES	215

LISTE DES FIGURES

Chapitre 1 :

CARACTERISTIQUES DU MILIEU NATUREL

- Figure 1.1 : Mouda et ses environs dans l'Extrême-Nord du Cameroun
- Figure 1.2 : Schéma des principaux flux de masses d'air en Afrique de l'Ouest et Centrale durant les deux situations extrêmes de l'année : janvier-février et juillet-août
- Figure 1.3 : Position des isohyètes interannuelles dans l'Extrême-Nord du Cameroun
- Figure 1.4 : Variations interannuelles de la pluviométrie à Maroua Agro
- Figure 1.5 : Bassin versant de Mouda (situation et réseau de mesures hydropluviométriques)
- Figure 1.6 : Précipitations à Mouda (1988 - 1990)
- Figure 1.7 : Modèle de circulation des masses d'air à l'intérieur des lignes de grains
- Figure 1.8 : Distribution des volumes précipités en fonction du temps et forme des fortes pluies à Mouda (première période)
- Figure 1.9 : Distribution des volumes précipités en fonction du temps et forme des pluies à Mouda (deuxième période)
- Figure 1.10 : Isohyètes et hyétogrammes de l'averse du 06/08/88 Bassin de Mouda
- Figure 1.11 : Esquisse géologique
- Figure 1.12 : Carte d'équipement hydropluviométrique Bassin versant de Midaoua amont
- Figure 1.13 : Carte d'équipement hydropluviométrique Bassin versant de Midaoua aval
- Figure 1.14 : Carte d'équipement hydropluviométrique Bassin versant de Mouda amont
- Figure 1.15 : Carte d'équipement hydropluviométrique Bassin versant de Mouda aval

Chapitre 2 :

IDENTIFICATION ET ETUDE DES MODELES DE FONCTIONNEMENT
HYDROLOGIQUE (HYDRO-SEQUENCES) DANS LES BASSINS VERSANTS DE
MOUDA

- Figure 2.1a : Carte des systèmes écologiques de Mouda
- Figure 2.1b : Légende de la carte des systèmes écologiques du bassin versant de Mouda
- Figure 2.2 : Systèmes écologiques de Mouda
- Figure 2.3 : Dynamique d'un secteur écologique du Nord-Cameroun. Exemple de la dégradation des vertisols dans le bassin versant de Mouda
- Figure 2.4 : Carte des états de surface du bassin "hardé"
- Figure 2.5 : Bassin "Ferrugineux" Mayo Gazal - Mouda
Carte des écosystèmes
- Figure 2.6 : Carte des systèmes écologiques de Mouda
- Figure 2.7 : Variations saisonnières du ruissellement sur la parcelle "hardé"
- Figure 2.8 : Variations saisonnières du ruissellement sur la parcelle "régosol"
- Figure 2.9 : Variations saisonnières du ruissellement sur la parcelle "vertisol dégradé"
- Figure 2.10 : Réseau hydrographique et réseau de mesures du bassin "hardé"
- Figure 2.11 : Variations saisonnières du ruissellement sur le bassin "hardé" en 1985
- Figure 2.12 : Crue du 14 août 1985 (bassin "hardé")
- Figure 2.13 : Hydrogramme de crue et hydrogramme de sel du 8 août 1986 (bassin "hardé")
- Figure 2.14 : Bassin "ferrugineux" Mayo Gazal - Mouda
Topographie
- Figure 2.15 : Variations saisonnières du ruissellement sur le Mayo Gazal en 1990
- Figure 2.16 : Événement averse-crue du 06/07/90 (bassin "ferrugineux")
- Figure 2.17 : Événement averse-crue du 14/07/90 (bassin "ferrugineux")
- Figure 2.18 : Événement averse-crue des 21 - 22/07/90 (bassin "ferrugineux")

Figure 2.19 : Schéma de séparation des hydrogrammes

Figure 2.20 : Réseau hydrographique et réseau de mesures du versant "fersiallitique"

Chapitre 3 :

FONCTIONNEMENT HYDROLOGIQUE DU SYSTEME DE MOUDA

Figure 3.1 : Bilan annuel : écoulement rive gauche

Figure 3.2 : Bilan annuel : écoulement rive droite

Figure 3.3 : Bilan annuel : écoulement Miyamloa à Mouda

Figure 3.4 : Principales caractéristiques d'une crue

Figure 3.5 : Averse et crue du 08/06/90 sur le système de Mouda

Figure 3.6 : Schéma général d'un modèle pluie-débit

Figure 3.7 : Effets du bassin sur l'hydrogramme

Figure 3.8 : Simulation des effets du bassin sur l'hydrogramme à travers une série de tronçons de stockage

Figure 3.9 : Modèle "0" : pertes initiales, puis pertes proportionnelles (constantes) à l'intensité

Figure 3.10 : Modèle "1" : pertes initiales, puis intensité constante de perte

Figure 3.11 : Bassin versant du mayo Miyamloa à Mouda (aires d'alimentation et noeuds du modèle)

Figure 3.12 : Isohyètes des averses de l'échantillon

Figure 3.13 : Ajustement du modèle RORB à l'événement "averse-crue" du 19/07/90 (essai n° 1 $k_C = 9,4$; $m = 0,8$)

Figure 3.14 : Ajustement du modèle RORB à l'événement "averse-crue" du 19/07/90 (essai n° 3 $k_C = 3,1$; $m = 0,8$)

Figure 3.15 : Validation du modèle RORB à l'événement "averse-crue" du 08/06/89 ($k_C = 3,1$; $m = 0,8$)

Figure 3.16 : Ajustement du modèle RORB à l'événement "averse-crue" du 29/09/88 (essai n° 1 $k_C = 9,4$; $m = 0,8$)

Figure 3.17 : Ajustement du modèle RORB à l'événement "averse-crue" du 29/09/88

(essai n° 1 $k_C = 3,1$; $m = 0,8$)

Figure 3.18 : Validation du modèle RORB à l'événement
"averse-crue" du 30/07/89 ($k_C = 3,1$; $m = 0,8$)

Figure 3.19 : Simulation de l'événement "averse-crue" du
29/06/90 ($k_C = 3,1$; $m = 0,8$)

LISTE DES TABLEAUX

Chapitre 1 :

CARACTERISTIQUES DU MILIEU NATUREL

- Tableau 1.1: Fréquence moyenne de la vitesse des vents pour les mois de janvier et octobre
- Tableau 1.2 : Vitesse moyenne journalière du vent
- Tableau 1.3 : Températures moyennes
- Tableau 1.4 : Humidité relative - Moyennes mensuelles en %
- Tableau 1.5 : Humidité relative en % - 1983 et 1984
- Tableau 1.6 : Evaporation sur bac Colorado (mm)
- Tableau 1.7 : Evapotranspiration dans la région de Maroua
- Tableau 1.8 : Pluviométrie moyenne (mm) à Mouda, Maroua-Salak Maroua Agro
- Tableau 1.9 : Répartition statistique des pluies annuelles
- Tableau 1.10 : Répartition statistique des pluies mensuelles
- Tableau 1.11 : Ajustement d'une loi de Pearson III aux hauteurs d'averses tombées en 24 heures
- Tableau 1.12 : Contribution de la fraction pluviométrique ≥ 40 mm dans la hauteur de la pluie annuelle
- Tableau 1.13 : Contribution en hauteur et en pourcentage de deux tranches de fortes intensités à la pluviométrie annuelle pour les pluies supérieures à 3 mm à Mouda
- Tableau 1.14 : Caractéristiques physiques des bassins versants de Mouda
- Tableau 1.15 : Caractéristiques du réseau de mesures en 1990

Chapitre 2 :

IDENTIFICATION ET ETUDE DES MODELES DE FONCTIONNEMENT
HYDROLOGIQUE (HYDRO-SEQUENCES) DANS LES BASSINS VERSANTS DE
MOUDA

- Tableau 2.1 : Pluies et ruissellement sur la parcelle "hardé" du 31/05 au 02/09/85
- Tableau 2.2 : Pluies et ruissellement sur la parcelle

"régosol sur matériau à nodules calcaires" du
31/05 au 02/09/85

- Tableau 2.3 : Pluies et ruissellement sur la parcelle
"vertisol dégradé" du 31/05 au 02/09/85
- Tableau 2.4 : Bilan mensuel (1985) - Bassin "hardé"
- Tableau 2.5 : Bilan annuel - Bassin "hardé"
- Tableau 2.6 : Volumes observés et calculés : crues du bassin
"hardé"
- Tableau 2.7 : Bilan annuel - Bassin "ferrugineux-vertisol
dégradé"
- Tableau 2.8 : Bilan mensuel 1990 - Bassin "ferrugineux-
vertisol dégradé"
- Tableau 2.9 : Volumes (m^3) observés - Secteur vertisol et
système ferrugineux
- Tableau 2.10 : Lames ruisselées (mm) - Secteur vertisol et
système ferrugineux
- Tableau 2.11 : Caractéristiques des événements averse-crue
Bassin "fersiallitique" en 1985

Chapitre 3 :

FONCTIONNEMENT HYDROLOGIQUE DU SYSTEME DE MOUDA ET MODELISATION

- Tableau 3.1 : Bilan annuel de Midaoua amont
- Tableau 3.2 : Bilan annuel de Midaoua aval
- Tableau 3.3 : Bilan annuel de Mouda amont
- Tableau 3.4 : Bilan annuel de Mouda aval
- Tableau 3.5 : Bilan annuel du Miyamloa à Mouda
- Tableau 3.6 : Bilan hydrologique mensuel de Midaoua amont
- Tableau 3.7 : Bilan hydrologique mensuel de Midaoua aval
- Tableau 3.8 : Bilan hydrologique mensuel de Mouda amont
- Tableau 3.9 : Bilan hydrologique mensuel de Mouda aval
- Tableau 3.10 : Bilan hydrologique mensuel du Miyamloa à Mouda
- Tableau 3.11 : Vecteur contrôle du modèle RORB pour le mayo
Miyamloa à Mouda
- Tableau 3.12 : Echantillon des événements "avers-crue"
- Tableau 3.13 : Quelques résultats d'ajustement de RORB à
l'événement "averse-crue" du 19/07/90

(Essai n° 1, $k_C = 9,4$; $m = 0,8$)

Tableau 3.14 : Quelques résultats d'ajustement de RORB à l'événement "averse-crue" du 19/07/90

(Essai n° 2, $k_C = 3,5$; $m = 0,77$)

Tableau 3.15 : Quelques résultats d'ajustement de RORB à l'événement "averse-crue" du 19/07/90

(Essai n° 3, $k_C = 3,1$; $m = 0,8$)

Tableau 3.16 : Quelques résultats de validation de RORB sur l'événement "averse-crue" du 08/06/89

(Test n° 1, $k_C = 3,5$; $m = 0,77$)

Tableau 3.17 : Quelques résultats de validation de RORB sur l'événement "averse-crue" du 08/06/89

(Test n° 2, $k_C = 3,1$; $m = 0,8$)

Tableau 3.18 : Quelques résultats d'ajustement de RORB à l'événement "averse-crue" du 29/09/88

(Essai n° 1, $k_C = 9,4$; $m = 0,8$)

Tableau 3.19 : Quelques résultats d'ajustement de RORB à l'événement "averse-crue" du 29/09/88

(Essai n° 2, $k_C = 3,5$; $m = 0,77$)

Tableau 3.20 : Quelques résultats d'ajustement de RORB à l'événement "averse-crue" du 29/09/88

(Essai n° 3, $k_C = 3,1$; $m = 0,8$)

Tableau 3.21 : Quelques résultats de validation de RORB sur l'événement "averse-crue" du 30/07/89

(Test n° 1, $k_C = 3,5$; $m = 0,77$)

Tableau 3.22 : Quelques résultats de validation de RORB sur l'événement "averse-crue" du 30/07/89

(Test n° 2, $k_C = 3,1$; $m = 0,8$)

Tableau 3.23 : Quelques résultats de simulation par RORB de l'événement du 29/06/90 ($k_C = 3,1$; $m = 0,8$)

ANNEXES

ANNEXE 1 :
Pluviométrie moyenne journalière
des cinq bassins du système de Mouda
(1988, 1989, 1990)

PLUVIOMETRIE MOYENNE JOURNALIERE

Année 1988

Bassin versant de Midaoua amont (3,73 km²) - Moyennes de Thiessen

	Avr	Mai	Jun	Jul	Aoû	Sep	Oct
1					2.2		
2			9.0		16.0		
3	-	-		78.9			
4							
5							
6		-		47.3			
7				1.8	5.7		
8			8.4	1.1			
9				4.3			
10				16.1	16.1	6.5	
11				4.5	5.0		
12				11.5		19.4	
13			-				
14			-	10.4	33.8		
15							
16							
17				29.0	10.1	35.4	
18				1.7		4.6	
19					6.6		
20	-				5.5	29.1	
21		-					
22				3.1			
23				7.8	67.8	24.2	
24					41.6		
25							
26		-	41.3		15.1	26.3	
27				1.1			
28				38.3			
29		-			13.8	43.0	
30			18.5				
31				37.5			
total	-	-	59.8	178.4	348.8	212.4	

total annuel : 799.4 mm

(- : lacune d'observation; la journée pluviométrique du jour j va de 7h00 le jour j à 7h00 du jour j+1)

PLUVIOMETRIE MOYENNE JOURNALIERE

Année 1988

Bassin versant de Midaoua aval (9,24 km²) - Moyennes de Thiessen

	Avr	Mai	Jun	Jul	Aoû	Sep	Oct
1				0.1	1.5		
2			8.2		15.9		
3	-	-		71.7			
4							
5							
6		-		35.2			
7				2.1	5.5		
8			9.8	1.0			
9				6.5			
10				17.4	12.7	8.8	
11				4.3	5.8		
12				7.5		20.2	
13			-				
14			-	11.5	30.1		
15							
16							
17				27.9	7.4	37.1	
18				1.2		8.3	
19					5.9		
20	-				4.9	28.3	
21		-					
22				3.7	0.4		
23				14.8	56.0	25.7	
24	-				34.8		
25							
26		-	28.4		16.1	33.7	
27				0.8			
28				38.9			
29		-			16.7	52.8	
30			16.0				
31				38.7			
total	-	-	44.4	184.7	307.4	237.8	

total annuel : 774.3 mm

(- : lacune d'observation; la journée pluviométrique du jour j va de 7h00 le jour j à 7h00 du jour j+1)

PLUVIOMETRIE MOYENNE JOURNALIERE

Année 1988

Bassin versant de Mouda amont (2,5 km²) - Moyennes de Thiessen

	Avr	Mai	Jun	Jul	Aoû	Sep	Oct
1				0.1	2.1		
2			10.2		14.3		
3	13.0	1.0		71.1			
4							
5							
6		-		52.6			
7				2.2	6.3		
8			8.6	3.3			
9				5.6			
10				16.6	21.4	6.4	
11				1.8	3.2		
12				8.6		21.6	
13			3.0				
14			2.0	14.5	32.8		
15							
16							
17				40.0	9.8	33.6	
18				2.7		1.5	
19					11.8		
20	-				7.6	30.3	
21		8.0					
22				4.6	3.2	22.1	
23				10.3	60.2		
24	9.5				41.0		
25							
26		9.0	43.3		15.3	23.4	
27				1.5			
28				40.9			
29		8.0			15.6	40.3	
30			16.8				
31				40.4			
total	9.5	38.0	66.1	200.7	356.8	201.9	

total annuel : 873.0 mm

(- : lacune d'observation; la journée pluviométrique du jour j va de 7h00 le jour j à 7h00 du jour j+1)

PLUVIOMETRIE MOYENNE JOURNALIERE

Année 1988

Bassin versant de Mouda aval (6,37 km²) - Moyennes de Thiessen

	Avr	Mai	Jun	Jul	Aoû	Sep	Oct
1				0.4	0.8		
2			11.5		14.4		
3	13.0	1.0		62.8			
4							
5							
6		-		44.7			
7				2.5	5.9		
8			7.0	2.8			
9				9.0			
10				21.2	20.2	8.3	
11				2.3	3.8		
12				8.8		21.8	
13			3.0				
14			2.0	23.2	28.2		
15							
16							
17				37.5	7.7	34.3	
18				1.1		2.4	
19					12.2		
20	-				9.0	31.1	
21		8.0					
22				3.6	1.4	24.5	
23				30.1	61.0		
24	9.5				37.1		
25							
26		9.0	31.9		16.1	27.8	
27				1.2			
28				42.0			
29		8.0			16.6	39.2	
30			14.4				
31				44.0			
total	9.5	38.0	52.3	233.5	335.5	210.5	

total annuel : 879.3 mm

(- : lacune d'observation; la journée pluviométrique du jour j va de 7h00 le jour j à 7h00 du jour j+1)

PLUVIOMETRIE MOYENNE JOURNALIERE

Année 1988

Bassin versant du Miyamloa (18,1 km²) - Moyennes de Thiessen

	Avr	Mai	Jun	Jul	Aoû	Sep	Oct
1				0.3	1.1		
2			8.5		15.2		
3	13.0	1.0		65.1			
4							
5							
6		3.0		37.0			
7				2.3	5.6		
8			10.0	1.9			
9				6.4			
10				19.5	14.6	9.7	
11				3.1	4.6		
12				7.6		21.2	
13			3.0				
14			2.0	17.4	27.4		
15							
16				4.3			
17				27.8	6.7	36.8	
18				1.0		5.5	
19					9.3		
20	-				6.1	29.3	
21		8.1					
22				3.6	0.7	25.4	
23				20.9	56.4		
24	-				34.7		
25							
26		9.0	27.8		15.6	32.9	
27				0.9			
28				40.6			
29		8.0			17.2	41.7	
30			15.8				
31				42.4			
total	-	38.1	52.6	207.6	306.3	224.4	

total annuel : 829.0 mm

(- : lacune d'observation; la journée pluviométrique du jour j va de 7h00 le jour j à 7h00 du jour j+1)

PLUVIOMETRIE MOYENNE JOURNALIERE

Année 1989

Bassin versant de Midaoua amont (3,73 km²) - Moyennes de Thiessen

	Avr	Mai	Jun	Jul	Aoû	Sep	Oct
1				1.0	0.6		
2		14.9	16.3				
3					5.4		
4	-						
5			6.2	1.0			
6					0.3		
7	-	7.8	28.2	1.3			
8		40.3		4.9	54.0		
9	71.0			11.1			
10				2.0		3.2	
11			26.2	28.0			
12							
13							
14			18.1				
15				10.4	31.3		
16			0.2		14.3	28.4	
17				2.6			
18							
19			16.4	4.0	18.9	5.6	
20			1.9				
21		0.4		1.5		6.9	
22	0.4	0.8		34.3			
23		6.0					
24				8.8	24.6		
25					11.4		
26			13.9				
27					14.8		
28				10.7	7.6		
29			5.6				
30	22.1			45.9			
31		14.0			3.7		
total	22.5	92.2	145.3	198.9	145.9	104.4	

total annuel : 709.2 mm

(- : lacune d'observation; la journée pluviométrique du jour j va de 7h00 le jour j à 7h00 du jour j+1)

PLUVIOMETRIE MOYENNE JOURNALIERE

Année 1989

Bassin versant de Midaoua aval (9,24 km²) - Moyennes de Thiessen

	Avr	Mai	Jun	Jul	Aoû	Sep	Oct
1				1.1	1.2		
2		12.4	15.4				
3					4.6		
4	-						
5			7.2	4.5			
6							
7	-	6.9	28.4	1.7			
8		46.1		5.0	54.4		
9	71.0			10.4			
10				1.6		3.1	
11			32.4	28.5			
12							
13							
14			14.1				
15				12.8	26.6		
16			0.3		19.8	31.9	
17				1.8			
18							
19			14.3	3.7	20.1	6,9	
20			2.0				
21		2.0		1.5		4.5	
22	4.1	1.3		28.7			
23		8.0					
24				3.9	19.6		
25					10.4		
26			17.0				
27					13.7		
28				12.2	9,6		
29			5,3				
30	26.1			42.2			
31		13.8			4.0		
total	30.2	96.1	150.8	187.9	146.5	106.6	

total annuel : 718.1 mm

(- : lacune d'observation; la journée pluviométrique du jour j va de 7h00 le jour j à 7h00 du jour j+1)

PLUVIOMETRIE MOYENNE JOURNALIERE

Année 1989

Bassin versant de Mouda amont (2,5 km²) - Moyennes de Thiessen

	Avr	Mai	Jun	Jul	Août	Sep	Oct
1				1.0	0.7		
2		21.7	16.6				
3					5.3		
4	5.0				1.3		
5			7.3	0.3			
6							
7	-	11.8	36.4	4.8			
8		40.3		5.2	51.7		
9	69.3			17.1			
10				1.6		3.2	
11			31.0	28.2			
12							
13							
14			10.3				
15				10.8	41.3		
16			0.3	2.8	15.5	26.3	
17							
18							
19			10.8	2.9	21.1	4.3	
20			3.6				
21		0.4		1.2			
22	1.0	0.7		28.2		7.6	
23		5.4					
24				5.8	26.2		
25					15.3		
26			8.9				
27					18.8		
28				6.7	6.0		
29			3.9				
30	21.3			46.4			
31		21.8			4.0		
total	22.3	102.6	142.6	194.9	176.6	100.4	

total annuel : 739.4 mm

(- : lacune d'observation; la journée pluviométrique du jour j va de 7h00 le jour j à 7h00 du jour j+1)

PLUVIOMETRIE MOYENNE JOURNALIERE

Année 1989

Bassin versant de Mouda aval (6,37 km²) - Moyennes de Thiessen

	Avr	Mai	Jun	Jul	Aoû	Sep	Oct
1				1.2	1.4		
2		12.8	21.5				
3	5.0				3.4		
4					0.3		
5			8.5	0.9			
6							
7	-	10.9	34.6	3.5			
8		43.8		5.4	54.9		
9	69.4			13.2			
10				1.8		3.6	
11			32.5	30.0			
12							
13							
14			7.9				
15				12.6	31.1		
16			0.5	2.9	15.8	38.4	
17							
18							
19			8.3	3.4	23.6	4.0	
20			4.0				
21		0.6		1.5			
22	2.2	0.8		24.7		4.2	
23		7.3					
24				2.2	20.8		
25					13.6		
26			9.2				
27					14.4		
28				8.7	7.5		
29			4.3				
30	26.2			41.2			
31		15.8			3.9		
total	28.4	98.9	134.2	193.6	154.9	110.2	

total annuel : 720.2 mm

(- : lacune d'observation; la journée pluviométrique du jour j va de 7h00 le jour j à 7h00 du jour j+1)

PLUVIOMETRIE MOYENNE JOURNALIERE

Année 1989

Bassin versant du Miyamloa (18.1 km²) - Moyennes de Thiessen

	Avr	Mai	Jun	Jul	Aoû	Sep	Oct
1				1.4	1.5		
2		12.1	15.1				
3					4.0		
4	-						
5			8.1	4.0			
6							
7	-	8.8	29.8	3.7			
8		45.5		5.1	53.3		
9	70.6			11.1			
10				1.8		3.4	
11			34.3	29.6			
12							
13							
14			12.8				
15				13.1	25.1		
16			0.5		17.9	36.6	
17				2.1			
18							
19			11.7	3.4	25.1	5.8	
20			2.2				
21		1.9		1.5		3.8	
22	5.1	1.3		25.2			
23		7.2					
24				2.7	17.6		
25					10.8		
26			12.8				
27					13.8		
28				10.6	8.6		
29			4.9				
30	26.2			43.4			
31		14.1			3.9		
total	31.3	95.1	145.6	186.4	148.1	108.4	

total annuel : 714.9 mm

(- : lacune d'observation; la journée pluviométrique du jour j va de 7h00 le jour j à 7h00 du jour j+1)

PLUVIOMETRIE MOYENNE JOURNALIERE

Année 1990

Bassin versant de Midaoua amont (3,73 km²) - Moyennes de Thiessen

	Avr	Mai	Jun	Jul	Aoû	Sep	Oct
1				5.1	0.3		
2							
3	3.6				3.1	12.8	
4			26.0			1.7	
5							
6			8.0		1.0		
7	2.0			7.7			
8		30.3					
9					1.3		
10		14.6			29.6		
11				2.9		24.2	
12							
13					1.6		
14			0.3	14.7	10.5		
15					2.7	12.6	
16		2.6	1.1				
17			1.0	10.5			
18			12.6		3.9	5.4	
19				65.1	24.9		
20	30.0						
21			22.7				
22				30.9	6.4		
23					6.0		
24	12.0	1.6	32.0	4.5			
25		28.0			21.8		
26			4.6	0.6			
27							
28	2.5	10.0					
29			85.0				
30		25.2					
31				2.7			35.6
total	44.5	87.6	189.6	165.9	120.2	47.9	50.1
total annuel : 705.8 mm							

(- : lacune d'observation; la journée pluviométrique du jour j va de 7h00 le jour j à 7h00 du jour j+1)

PLUVIOMETRIE MOYENNE JOURNALIERE

Année 1990

Bassin versant de Midaoua aval (9,24 km²) - Moyennes de Thiessen

	Avr	Mai	Jun	Jul	Août	Sep	Oct
1				5.1	1.4		
2							
3	2.7			0.3	3.7	12.8	
4			30.3			3.8	
5							
6			11.4		1.1		
7	1.4		1.9	14.1			
8		41.5					
9					2.2		
10		14.0			26.9		
11				1.7		24.0	
12							
13					1.9		
14			0.9	17.1	14.0		
15					3.1	12.8	
16		3.3	1.3	1.0			
17			1.2	9.8			
18			13.3		8.2	3.3	
19				56.9	27.5		
20	21.2						
21			18.9				
22				32.3	7.7		
23					6.9		
24	11.7	4.0	33.1	3.3		0.5	
25		25.3			26.5		
26			11.3	0.8			
27							
28	7.1	9.6					
29			92.3				
30		25.2					
31				5.9			21.8
total	40.0	85.5	213.8	172.4	142.2	49.0	38.4
total annuel : 741.3 mm							

(- : lacune d'observation; la journée pluviométrique du jour j va de 7h00 le jour j à 7h00 du jour j+1)

PLUVIOMETRIE MOYENNE JOURNALIERE

Année 1990

Bassin versant de Mouda amont (2,5 km²) - Moyennes de Thiessen

	Avr	Mai	Jun	Jul	Aoû	Sep	Oct
1				6.6	0.9		
2							
3	2.7				5.4	15.7	
4			36.3			2.3	
5							
6	0.1		19.4		1.2		
7	6.7		0.1	7.2			
8		27.3					
9					2.1		
10		13.9			32.2		
11				1.8		24.7	
12							
13					2.5		
14			0.8	12.2	10.0		
15					3.2	12.0	
16		4.7	3.6	0.3			
17			2.4	10.0			
18			10.8		4.6	5.0	
19				65.5	25.2		
20	25.0						
21			31.2	4.8			
22				29.2	6.6		
23					8.6		
24	15.0	2.6	27.0	4.3			
25		27.8			23.7		
26			4.7	0.6		0.1	
27							
28	7.2	9.7					
29			86.0				
30		30.1					
31				3.5			12,6
total	47.2	98.3	193.8	188.0	130.4	51.4	30.6
total annuel : 739.7 mm							

(- : lacune d'observation; la journée pluviométrique du jour j va de 7h00 le jour j à 7h00 du jour j+1)

PLUVIOMETRIE MOYENNE JOURNALIERE

Année 1990

Bassin versant de Mouda aval (6,37 km²) - Moyennes de Thiessen

	Avr	Mai	Jun	Jul	Aoû	Sep	Oct
1				9.2	2.8		
2							
3	2.6				5.6	15.3	
4			37.4			3.3	
5							
6	0.1		23.8		1.7		
7	3.4		0.4	8.4			
8		25.8					
9					2.1		
10		13.3			31.8		
11				0.7		24.7	
12							
13					2.7		
14			2.3	15.8	10.1		
15					3.3	12.5	
16		6.2	3.6	1.1			
17			2.7	12.2			
18			12.0		8.6	3.5	
19				54.6	27.4		
20	23.0						
21			25.0	7.1			
22				28.5	5.8		
23							
24	15.4	4.8	31.0	3.9	9.3		
25		24.2			27.9		
26			8.8	0.7		0.3	
27							
28	8.7	12.4					
29			92.6				
30		28.6					
31				5.0			12.6
total	47.1	95.6	203.8	191.2	144.5	53.2	31.2

total annuel : 766.6 mm

(- : lacune d'observation; la journée pluviométrique du jour j va de 7h00 le jour j à 7h00 du jour j+1)

PLUVIOMETRIE MOYENNE JOURNALIERE

Année 1990

Bassin versant du Miyamloa (18,1 km²) - Moyennes de Thiessen

	Avr	Mai	Jun	Jul	Aoû	Sep	Oct
1		0.3		7.2	1.8	0.1	
2							
3	2.2			0.6	4.5	14.3	
4			35.7			4.3	
5							
6			16.8		1.3		
7	2.2		1.4	11.1			
8		34.9					
9					2.2		
10		13.2			28.5		
11				1.1		26.0	
12							
13					2.2		
14			1.5	17.0	12.8		
15					3.2	12.4	
16		4.1	2.1	1.7			
17			1.6	10.1			
18			13.7		8.1	3.1	
19				54.6	27.2		
20	20.2						
21			21.0				
22				34.7	7.3		
23							
24	13.0	5.1	31.6	3.4	6.9	0.7	
25		22.2			28.3		
26			12.4	0.7		0.2	
27							
28	9.4	11.4					
29			94.8				
30		24.2					
31				7.5			20.7
total	42.6	84.6	213.9	184.7	143.4	52.2	39.4

total annuel : 760.8 mm

(- : lacune d'observation; la journée pluviométrique du jour j va de 7h00 le jour j à 7h00 du jour j+1)

ANNEXE 2 :
Caractéristiques des crues pour $P_{moy} \geq 30,0$ mm à Miyamloa
des cinq bassins du système de Mouda
(1988, 1989, 1990)

CARACTERISTIQUES DES CRUES POUR PMOY $\geq 30,0$ mm à MIYAMLOA

BASSIN VERSANT DE : MIDAOUA AMONT

(3,73 km²)

N°	DATE	PMOY	QMAX	LR	TM	TB	TYPE	MODE
1	29.07.88	38.3	2.751	5.8	53	476	S	N
2	31.07.88	37.5	5.825	11.8	85	514	S	N
3	06.08.88	47.3	2.937	18.5	137	1165	C	N
4	17.09.88	35.4	3.225	5.9	75	454	S	N
5	26.09.88	26.3	0.437	1.0	65	330	S	N
6	29.09.88	43.0	2.780	12.1	55	1337	C	F
7	09.05.89	71.0	10.150	16.2	186	910	S	N
8	08.06.89	40.3	6.169	7.6	78	360	S	T
9	11.06.89	26.2	0.491	1.6	103	373	S	N
10	30.07.89	45.9	3.442	9.6	71	595	S	T
11	08.09.89	54.0	2.395	6.3	80	650	S	N
12	16.09.89	28.4	0.280	0.6	12	330	C	N
13	08.06.90	30.3	3.244	4.7	45	280	C	N
14	24.06.90	32.0	2.567	3.3	45	316	S	N
15	29.06.90	85.0	21.150	34.5	55	548	S	D
16	04.07.90	26.0	2.953	4.4	40	300	S	N
17	19.07.90	65.1	14.650	33.1	365	894	S	F
18	22.07.90	30.9	2.317	14.1	159	3317	S	N

Date : date de début de la crue

Pmoy : pluie moyenne sur le bassin (mm)

Qmax : débit maximum de la crue (m³.s⁻¹)

Lr : lame ruisselée totale (mm)

Tm : temps de montée (mn)

Tb : temps de base (mn)

Type : S = crue simple; C = crue complexe

Mode : F = crue pour ajustement (recherche des paramètres k_c et m du modèle); T = crue pour calage; D = crue pour simulation; N = crue non modélisée

CARACTERISTIQUES DES CRUES POUR PMOY $\geq 30,0$ mm à MIYAMLOA

BASSIN VERSANT DE : MIDAOUA AVAL

(9.24 km²)

N°	DATE	PMOY	QMAX	LR	TM	TB	TYPE	MODE
1	29.07.88	38.9	12.300	10.5	87	513	S	N
2	31.07.88	38.7	17.360	15.9	145	550	S	N
3	06.08.88	35.2	8.101	9.8	402	931	C	N
4	17.09.88	37.1	11.420	9.1	110	625	S	N
5	26.09.88	33.7	3.195	4.2	65	965	C	N
6	29.09.88	52.8	12.300	15.6	95	1205	C	F
7	09.05.89	71.0	23.800	14.5	105	275	S	N
8	08.06.89	46.1	15.330	12.1	77	372	S	T
9	11.06.89	32.4	3.450	3.2	86	561	S	N
10	30.07.89	42.2	9.724	10.1	94	525	S	T
11	08.09.89	54.4	8.902	7.1	80	420	S	N
12	16.09.89	31.9	1.724	1.7	25	570	S	N
13	08.06.90	41.5	17.360	15.8	55	490	S	N
14	24.06.90	33.1	12.300	10.0	80	473	S	N
15	29.06.90	92.3	49.630	60.5	95	650	S	D
16	04.07.90	30.3	10.990	7.5	96	402	S	N
17	19.07.90	56.9	16.660	22.0	384	1495	S	F
18	22.07.90	32.3	6.749	9.1	195	1387	s	N

Date : date de début de la crue

Pmoy : pluie moyenne sur le bassin (mm)

Qmax : débit maximum de la crue (m³.s⁻¹)

Lr : lame ruisselée totale (mm)

Tm : temps de montée (mn)

Tb : temps de base (mn)

Type : S = crue simple; C = crue complexe

Mode : F = crue pour ajustement (recherche des paramètres k_c et m du modèle); T = crue pour calage; D = crue pour simulation; N = crue non modélisée

CARACTERISTIQUES DES CRUES POUR PMOY $\geq 30,0$ mm à MIYAMLOA

BASSIN VERSANT DE : MOUDA AMONT

(2.5 km²)

N°	DATE	PMOY	QMAX	LR	TM	TB	TYPE	MODE
1	29.07.88	40.9	6.846	13.9	56	445	S	N
2	31.07.88	40.4	11.740	16.9	54	371	S	N
3	06.08.88	52.6	14.230	29.4	501	786	C	N
4	17.09.88	33.6	4.694	6.9	69	328	S	N
5	26.09.88	23.4	1.020	2.7	465	790	S	N
6	29.09.88	40.3	9.540	17.1	65	360	S	F
7	09.05.89	69.3	16.150	27.3	145	400	S	N
8	08.06.89	40.3	10.250	17.5	75	95	S	T
9	11.06.89	31.0	2.240	5.8	95	580	S	N
10	30.07.89	46.4	8.724	14.8	59	405	S	T
11	08.09.89	51.7	5.506	12.5	65	1145	C	N
12	16.09.89	26.3	1.020	1.9	25	475	C	N
13	08.06.90	27.3	3.596	5.1	110	331	C	N
14	24.06.90	27.0	6.158	9.6	40	383	S	N
15	29.06.90	86.0	27.210	51.0	60	455	C	D
16	04.07.90	36.3	3.946	7.2	25	323	S	N
17	19.07.90	65.5	10.390	20.0	337	565	C	F
18	22.07.90	29.2	3.102	10.9	300	661	C	N

Date : date de début de la crue

Pmoy : pluie moyenne sur le bassin (mm)

Qmax : débit maximum de la crue (m³.s⁻¹)

Lr : lame ruisselée totale (mm)

Tm : temps de montée (mn)

Tb : temps de base (mn)

Type : S = crue simple; C = crue complexe

Mode : F = crue pour ajustement (recherche des paramètres k_c et m du modèle); T = crue pour calage; D = crue pour simulation; N = crue non modélisée

CARACTERISTIQUES DES CRUES POUR PMOY $\geq 30,0$ mm à MIYAMLOA

BASSIN VERSANT DE : MOUDA AVAL

(6.37 km²)

N°	DATE	PMOY	QMAX	LR	TM	TB	TYPE	MODE
1	29.07.88	42.0	7.199	9.5	95	617	C	N
2	31.07.88	44.0	12.260	15.2	107	527	S	N
3	06.08.88	44.7	15.300	15.5	359	717	C	N
4	17/09.88	34.3	5.171	5.2	105	421	S	N
5	26.09.88	27.8	3.410	7.2	123	1268	C	N
6	29/09/88	39.2	10.300	11.8	130	751	C	F
7	09.05.89	69.4	18.160	15.9	95	300	S	N
8	08.06.89	43.8	13.090	14.3	115	495	S	T
9	11.06.89	32.5	3.135	5.0	145	685	S	N
10	30.07.89	41.2	7.199	7.7	130	640	S	T
11	08.09.89	54.9	5.999	7.1	80	500	S	N
12	16.09.89	38.4	3.135	3.1	70	575	S	N
13	08.06.90	25.8	3.700	3.5	156	503	C	N
14	24.06.90	31.0	7.156	8.9	62	688	S	N
15	29.06.90	92.6	40.560	49.3	85	540	S	D
16	04.07.90	37.4	9.204	9.4	65	449	S	N
17	19.07.90	54.6	13.950	18.1	336	672	S	F
18	22.07.90	28.5	5.440	9.5	88	663	S	N

Date : date de début de la crue

Pmoy : pluie moyenne sur le bassin (mm)

Qmax : débit maximum de la crue (m³.s⁻¹)

Lr : lame ruisselée totale (mm)

Tm : temps de montée (mn)

Tb : temps de base (mn)

Type : S = crue simple; C = crue complexe

Mode : F = crue pour ajustement (recherche des paramètres k_c et m du modèle); T = crue pour calage; D = crue pour simulation; N = crue non modélisée

CARACTERISTIQUES DES CRUES POUR PMOY $\geq 30,0$ mm à MIYAMLOA

BASSIN VERSANT DE : MIYAMLOA A MOUDA

(18.1 km²)

N°	DATE	PMOY	QMAX	LR	TM	TB	TYPE	MODE
1	29.07/88	40.6	18.680	11.2	155	860	S	N
2	31.07.88	42.4	29.710	18.9	135	660	S	N
3	06.08.88	37.0	23.910	13.8	383	1159	C	N
4	17.09.88	36.8	13.960	6.8	135	680	S	N
5	26.09.88	32.9	7.153	6.6	508	1374	C	N
6	29.09.88	41.7	19.500	13.7	136	1359	C	F
7	09.05.89	70.6	42.480	18.5	150	439	S	N
8	08.06.89	45.5	26.860	14.3	141	595	S	T
9	11.06.89	34.3	7.849	5.3	220	965	S	N
10	30.07.89	43.4	15.470	9.3	140	963	S	T
11	08.09.89	53.3	13.550	7.7	120	1400	S	N
12	16.09.89	36.6	5.290	3.3	100	770	S	N
13	08.06.90	34.9	15.030	8.8	192	835	S	N
14	24.06.90	31.6	18.150	7.9	100	633	S	N
15	29.06.90	94.8	-	-	-	-		D
16	04.07.90	35.7	17.260	9.5	115	840	S	N
17	19.07.90	54.6	26.310	18.9	317	1036	C	F
18	22.07.90	34.7	12.290	9.0	136	1165	S	N

Date : date de début de la crue

Pmoy : pluie moyenne sur le bassin (mm)

Qmax : débit maximum de la crue (m³.s⁻¹)

Lr : lame ruisselée totale (mm)

Tm : temps de montée (mn)

Tb : temps de base (mn)

Type : S = crue simple; C = crue complexe

Mode : F = crue pour ajustement (recherche des paramètres k_c et m du modèle); T = crue pour calage; D = crue pour simulation; N = crue non modélisée

(-) : lacune d'observation

ANNEXE : 3

Quelques exemples de sortie de la modélisation avec RORB d'un événement "averse - crue". Cas de l'événement du 19/07/90, bassin du mayo Mouda à la station amont

QUELQUES EXEMPLES DE SORTIE DE LA MODELISATION AVEC RORB D'UN
EVENEMENT "AVERSE - CRUE". CAS DE L'EVENEMENT DU 19/07/90,
BASSIN DU MAYO MOUDA A LA STATION AMONT.

Données sur le temps

Temps, en pas de temps à partir d'un temps initial
 Temps initial :
 19/07/90 2 PLUVIOG. Début aver : 3H00' à MOUDA (PG 19 : 48mm)
 MIYAMLOA (PG 2 : 53.5mm)
 Pas de temps (heures) = .50

Données des aires d'alimentation

Aire	Surface km ²	Dist.transf.moy. km	Aire Inter-station	Sous-bassin de de référence
A	3.73E+00	5.35E+00	1	1 2 5
B	5.51E+00	3.10E+00	2	2 5
C	2.50E+00	4.40E+00	3	3 4 5
D	3.87E+00	2.65E+00	4	4 5
E	2.49E+00	1.04E+00	5	5
S.tot:1.81E+01				
Dist. moy., km		3.36E+00		

Données des tronçons de stockage

Tronçon n°.	Longueur km	Temps de transfert relatif (k_r)	Type	Pente tronçon (%)
1	1.2	.360	Naturel	
2	1.0	.309	Naturel	
3	2.0	.595	Naturel	
4	1.1	.327	Naturel	
5	1.3	.381	Naturel	
6	.5	.140	Naturel	
7	1.4	.422	Naturel	
8	1.2	.366	Naturel	
9	1.0	.309	Naturel	

Fonction de production

Modèle "1" de perte

Pluie brute (mm, temps exprimé en pas de temps (h))
sur l'aire inter-station n° 3 : MAYO MOUDA A ST AMONT

Pas de temps	Sous bassin	Aire inter. station	Aire d'alim. C
--------------	-------------	---------------------	----------------

0	11.6	11.6	12
1	.0	.0	0
2	.0	.0	0
3	.0	.0	0
4	.0	.0	0
5	.7	.7	1
6	.0	.0	0
7	.0	.0	0
8	8.5	8.5	8
9	6.5	6.5	7
10	15.3	15.3	15
11	10.1	10.1	10
12	6.7	6.7	7
13	4.8	4.8	5
14	1.2	1.2	1
15	.1	.1	0

Tot.	65.5	65.5	66
N° ref pluviog.			1

Pluie nette (mm, temps exprimé en pas de temps (h))
sur l'aire inter-station n° 3 : MAYO MOUDA A ST AMONT

Pas de temps	Sous bassin	Aire inter. station	Aire d'alim. C
--------------	-------------	---------------------	----------------

0	1.1	1.1	1
1	.0	.0	0
2	.0	.0	0
3	.0	.0	0
4	.0	.0	0
5	.0	.0	0
6	.0	.0	0
7	.0	.0	0
8	2.9	2.9	3
9	1.0	1.0	1
10	9.8	9.8	10
11	4.6	4.6	5
12	1.2	1.2	1
13	.0	.0	0
14	.0	.0	0
15	.0	.0	0

Tot.	20.5	20.5	20
------	------	------	----

Fonction de transfert

Pas de temps (T) = .50 h

Temps en T	Débits,		X: Calc. O: Observ					
	Calc. m^3/s	Observ m^3/s	0	1.8	3.6	5.4	7.2	9.0
			I.....I.....I.....I.....I.....I.....I					
			*	5 pluie	10 nette	15 mm	20	25
0	.000	.000	*--					
1	.195	.022	*X-					
2	.382	.210	*OX					
3	.252	.370	*XO					
4	.172	.170	*O					
5	.121	.075	*X					
6	.087	.044	*					
7	.064	.029	*					
8	.048	.030	*-----					
9	.734	.260	*O -X-					
10	1.591	2.100	* -----X--O-----					
11	4.493	6.200	* -----		X	O		
12	7.483	9.000	* -----				X	O
13	5.531	4.900	*--			O X		
14	3.061	2.200	*	O X				
15	1.608	1.300	*					
16	.917	.690	* OX					
17	.556	.350	* OX					
18	.355	.210	*OX					
19	.235	.097	*O					
20	.161	.034	*X					
21	.114	.028	*X					
22	.082	.023	*					
23	.061	.019	*					
24	.046	.015	*					
25	.035	.012	*					
26	.027	.010	*					
27	.021	.009	*					
28	.017	.007	*					
29	.013	.006	*					
30	.011	.004	*					
31	.009	.003	*					
32	.007	.003	*					
33	.006	.003	*					
34	.005	.003	*					
35	.004	.003	*					
36	.004	.002	*					
37	.003	.002	*					
38	.003	.002	*					
39	.002	.002	*					
40	.002	.002	*					
41	.002	.001	*					
42	.001	.000	*					
			I.....I.....I.....I.....I.....I.....I					
			0	1.8	3.6	5.4	7.2	9.0

ISBN : 2-7099-1174-4
Éditions de l'ORSTOM
72, route d'Aulnay
93143 BONDY Cedex