

Etudes et Thèses



COMPLEXITÉ HYDROLOGIQUE DU PETIT BASSIN VERSANT

EXEMPLE EN SAVANE HUMIDE
BOORO-BOROTOU (CÔTE D'IVOIRE)

Pierre CHEVALLIER

suivi d'une postface de J. A. RODIER

Éditions de l'ORSTOM

INSTITUT FRANÇAIS DE RECHERCHE SCIENTIFIQUE POUR LE DÉVELOPPEMENT EN COOPÉRATION

ERRATUM

ETUDES ET THESES PIERRE CHEVALLIER

ANNEXE : p 311 à 328

Au lieu de (1,36 km"), il faut lire (1,36 km²)

Pierre CHEVALLIER

**COMPLEXITÉ HYDROLOGIQUE
DU PETIT BASSIN VERSANT**

EXEMPLE EN SAVANE HUMIDE
BOORO-BOROTOU (CÔTE D'IVOIRE)

suivi d'une postface de J. A. RODIER

Editions de l'ORSTOM

INSTITUT FRANÇAIS DE RECHERCHE SCIENTIFIQUE POUR LE DÉVELOPPEMENT EN COOPÉRATION

Collection **ÉTUDES et THÈSES**

PARIS 1990

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 destinées 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 ayants cause, est illicite» (alinéa 1^{er} 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.

Nous avons aussi des Edifices tres-grands & tres-spacieux, où nous imitons & représentons en quelque sorte ce qui se fait dans l'air : comme la neige, la grêle, la pluie, les tonnerres, les éclairs, les foudres, la generation de quelques petits animaux tels que sont les Mouches, les Grenoüilles, les Sauterelles & autres. Nous y formons des pluies artificielles sans eau, avec d'autres matieres composées.

La Nouvelle Atlantide de Francis Bacon, Chancelier d'Angleterre (1627), traduite en François par M.R. et publiée à Paris en 1702.

- Je dois vous prévenir que les crues sont provoquées par la pluie et non par une série de nombres aléatoires !

- Ah bon ?

Dialogue imaginaire d'après Klemes (1988)

AVERTISSEMENT

Le lecteur trouvera en *Postface* à cet ouvrage un texte que Jean Rodier a écrit initialement comme une *mise au point* sur l'esprit dans lequel ont été conduites les recherches sur bassins représentatifs à l'ORSTOM.

Estimant que, plus qu'une simple mise au point, ce texte pouvait constituer un document important, j'ai demandé à Jean Rodier de le reprendre pour qu'il devienne non seulement un complément critique à mon travail, mais aussi un rappel historique indispensable à un moment où certains hydrologues se trouvent parfois un peu désorientés.

Il a accepté très gentiment cette tâche dans sa retraite active et j'en suis particulièrement honoré et reconnaissant.

Montpellier, le 30 août 1989
Pierre Chevallier

RESUME

Un petit bassin versant (1,36 km²) a été suivi pendant quatre années complètes dans une région de savane humide du Nord-Ouest de la Côte d'Ivoire. Des observations fines ont été réalisées non seulement sur les termes du bilan hydrique (précipitations, stockages souterrains, évaporation, écoulements), mais aussi sur le milieu naturel (géologie, sols, végétation, climat). Des expériences de simulation de pluies, de traçage des écoulements de crues ou de suivis neutroniques de profils hydriques ont complété l'information de base. L'interprétation de ces observations et de ces expérimentations conduit à une analyse d'une part des crues, dégagant en particulier des formes d'hydrogrammes caractéristiques, d'autre part du tarissement prenant en compte des effets évapotranspiratoires spectaculaires. Un schéma de fonctionnement est proposé sur un versant-type du bassin. La mise en évidence des chemins de l'eau conduit à admettre que tous les processus de l'écoulement proposés par l'hydrologie scientifique récente se combinent et évoluent dans le temps et dans l'espace. Une application des données d'observations est réalisée sur trois modèles conceptuels globaux (Crec 5, Modglo et Modibi) et un modèle distribué (Modcou) en tentant de prendre en compte les mécanismes décrits pour l'écoulement.

Cette étude s'insère dans un contexte de réflexion sur les mécanismes du cycle de l'eau et leur approche à travers la technique des petits bassins versants. Les doutes, les questions et les remises en cause de certaines certitudes anciennes se font de plus en plus aigus chez les hydrologues qui s'intéressent aux processus de l'écoulement et à leur modélisation.

MOTS CLES

Petit bassin versant, infiltration, simulation de pluies, crue, tarissement, processus d'écoulement, modélisation, Côte d'Ivoire.

Hydrological complexity of the small watershed. Example in the humid savannah. Booro-Borotou (Ivory Coast).

Pierre Chevallier

ABSTRACT

A small watershed (1,36 km²) located in North-West Ivory Coast was monitored during four years in order to study the water cycle mechanisms taking place in a humid savannah region. Observations were carried out concerning the components of the water balance (rainfall, groundwater storage, evaporation, runoff) as well as some characteristics of the natural environment (geology, soil, vegetation, climate). In addition, simulated rainfall and flood tracer experiments and soil water content neutronic measurements were also performed. The ensuing data processing allowed to determine some characteristic patterns of the flood hydrograms, and to exhibit the dramatic influence of the evapotranspiration on the depletion curves. A functioning scheme is proposed for a idealistic slope of the catchment. Several flow processes, as described by various hydrological theorys, combine to form the water paths, involving in space and time. The ability of four different hydrological models to account for these specific flow patterns was tested.

This work is part of a broader reflexion regarding the water cycle mechanisms and their study through small catchment experiments. Doubts, questions and the challenging of some old theorys are becoming more accute among many hydrologists interested in the analysis and modeling of the flow processes.

KEYWORDS

Small watershed, infiltration, rainfall simulation, flood, depletion, flow process, modelisation, Ivory Coast.

PLAN

Résumé / Abstract / Mots clés	5
Plan	7
Avant-propos	8
Introduction	11
1. Réflexions	13
1.1. Bassins versants représentatifs à l'ORSTOM	15
1.2. Les chemins de l'eau	21
1.3. Les interrogations récentes	28
2. Observations	31
2.1. Contexte géographique	33
2.2. Géologie	38
2.3. Pédologie	45
2.4. Végétation	60
2.5. Climat	65
2.6. Précipitations	74
2.7. Evaporation	86
2.8. Stockages souterrains	91
2.9. Ecoulements	96
3. Expérimentations	103
3.1. Simulation de pluies	105
3.2. Profils hydriques	143
3.3. Traçage des écoulements	153
4. Interprétation	161
4.1. Bilan hydrologique	163
4.2. Les crues	174
4.3. Le tarissement	205
4.4. Le fonctionnement	218
5. Modélisation	227
5.1. Modèles globaux	229
5.2. Le modèle couplé	250
5.3. Perspectives	265
Conclusions	269
Bibliographie	283
Table des matières	297
Nomenclature des figures et tableaux	303
Annexes	309
Cartes hors-texte	333

AVANT-PROPOS

Remerciements

Je ne veux pas faillir à la tradition qui fait débiter une thèse par des remerciements à ceux qui ont accepté la tâche assez ingrate de la juger et à ceux qui en ont été les co-artisans puisqu'un tel travail ne peut jamais être une entreprise solitaire. Je le fais avec beaucoup de plaisir, mais aussi avec l'angoisse d'oublier certains ; je leur demande d'avance de m'en excuser.

Je suis reconnaissant à Monsieur le Professeur Bocquillon d'avoir accepté que cette thèse soit réalisée sous la bannière du Laboratoire d'Hydrologie Mathématique de Montpellier et d'avoir pu dans un emploi du temps serré, faire une place aux discussions et au travail de mise au point.

Monsieur le Professeur de Marsily a accepté d'être l'un des rapporteurs de ce travail et je l'en remercie vivement. Les entretiens que nous avons eus ont été passionnants et je suis particulièrement sensible à l'accueil qu'il m'a réservé dans sa maison familiale de Fontvieille et au temps qu'il m'y a consacré en le prenant sur ses congés.

Comment exprimer mon amitié pour Monsieur Georges Girard, l'autre rapporteur de cette thèse et mon *parrain* scientifique depuis mon entrée à l'ORSTOM voici 13 ans ? Toute mon activité a été soumise à son appréciation depuis le début et il m'a toujours jugé sans ménagement. Il était impensable qu'il ne fasse pas partie de ce jury.

Monsieur Pierre Dubreuil a été mon premier professeur d'Hydrologie à Toulouse en 1975 ; avec Messieurs Rodier et Roche, il m'a fait confiance en me recrutant comme élève à l'ORSTOM et en m'affectant au Mali où lui-même avait fait ses débuts bien des années auparavant. Je suis flatté par l'attention qu'il a consacrée à mon travail et par l'intérêt qu'il y a accordé.

Monsieur Bernard Pouyaud est non seulement mon *chef* administratif depuis plusieurs années, d'abord en Côte d'Ivoire où il a permis la mise en place du programme Hyperbav, puis à Montpellier où il m'a accueilli dans le cadre du Laboratoire d'Hydrologie, et maintenant comme responsable du Département des Eaux Continentales ; mais il est aussi le collègue et l'ami dans l'aventure de la Mare d'Oursi. Il était logique que je lui demande d'être le directeur de cette thèse, tâche qu'il a acceptée très gentiment et qu'il a menée sans complaisance, attitude dont je lui suis très reconnaissant.

Après les juges il faut remercier tous ceux qui ont participé au travail réalisé à Booro-Borotou et à Adiopodoumé dans le cadre du Programme Hyperbav.

Ce sont :

- les techniciens de recherches sans qui rien n'aurait pu se faire : Marc Berthelot, Jacky Etienne, Jean-Louis Janeau, Jean-Marc Lapetite et André Mahieux.
- les chercheurs permanents du programme qui n'ont cessé de partager leurs résultats et leurs réflexions depuis le lancement du projet ; le mémoire présenté ici reprend parfois très largement leur travaux : Daniel Boa, Mameiri Camara, Emmanuel Fritsch, Jean-Marc Iris, Michel Lepage, Danielle Mitja, Olivier Planchon, Serge Tano, Christian Valentin.
- les adjoints et observateurs ivoiriens : Osseyini Amany, Abou Bamba, Sounsounna Diallo, Emmanuel Dibi Konan, Ouattara Doguimé, Germain Kouamé Kouassi, Marcel Kouamé, Bernard Yao Kouakou, André Mongo Sami, Yao Thomas (pour la partie hydrologique et pédologique du programme).
- tous les villageois de Booro-Borotou qui ont travaillé temporairement sur le programme et le chef du village, Monsieur Bamba.
- les chercheurs qui, sans être impliqués à plein temps dans le programme, lui ont accordé de l'intérêt et du temps et y ont même contribué par des études : Alain Gioda de l'ORSTOM, Pierre Leblond et Bernard Morel de l'Ecole Nationale Supérieure des Travaux Publics de Yamoussoukro.

- les stagiaires et le Volontaire du Service National qui ont participé aux travaux : Christelle Gnaman, Mohamed Hasnaoui, Brou Kouamé, Férid Sakly, Luc Savy.
- les responsables scientifiques de l'ORSTOM qui nous ont fait confiance et qui, pour certains, nous ont visité sur le terrain ; et en particulier parmi eux : Pierre Audry, Alain Casenave, Jacques Claude, Jean Collinet, Yves Gillon, Georges Pédro.
- les visiteurs de marque avec qui nous avons eu le plaisir de partager nos questions sur le terrain et tout particulièrement : Marc Bordas (IPH Porto Alegre), André Gougou (ENSTP Yamoussoukro), André Lévêque (ORSTOM), Henri Puig (Université Paris 6), Michel Vauclin (Institut de Mécanique, Grenoble).
- les services administratifs et techniques d'Adiopodoumé et parmi ceux qui ont été les plus sollicités : Adiko Amoncho, Jean-Claude Burgaud, Paul Capgras, Guy Chefson, Jean Claveau, André Dubreucq, Jean Launay, Alain Rocheteau, Norbert Silvera et Françoise Topart.
- les collègues et amis de Côte d'Ivoire qui ont encouragé notre travail et qui ont été sollicités sur des problèmes qui se posaient et notamment : Jacques Bourges, Yoro Gballou, Guy Hainnaux, Saramatou Koné, Eric Mollard, Bruno Monteny, Robert Randon, Mamadou Sakho, Serge Savary, Laurent Tchagba.
- les autorités de Côte d'Ivoire et en particulier Monsieur le Ministre de la Recherche Scientifique, Monsieur le Préfet de Touba, Monsieur le Sous-Préfet de Borotou, Monsieur le Directeur de l'Eau, Messieurs les responsables de l'Agence Nationale des Aéroports et de la Météorologie.
- les responsables et les équipes du Programme de Lutte contre l'Onchocercose de l'OMS à Odienné, Bouaké et Bamako ; en particulier Pierre Guillet.

Je tiens de plus à saluer ici la mémoire de deux de nos collègues qui nous ont quittés : Jean-Michel Simon, qui avait participé aux premières prospections sur le terrain dans la région de Korhogo et Maurice Tourné qui nous avait donné de précieux conseils au moment de l'établissement de la carte topographique du bassin.

- Et puis il y a tous ceux de Montpellier qui ont participé à l'élaboration du travail de synthèse :
- ceux qui ont été mis à contribution directe et active et qui ont consacré une part non négligeable de leur temps à m'aider : François Delclaux, Christian Depraetere, Alain Dezetter, Jean-Pierre Debuiche, Jean-Louis Davoine, Daniel Ibiza, Thierry Lebel, Michel Noirot, Patrick Raous et Nathalie Rouché.
 - ceux qui m'ont permis de forger ou de peaufiner certains raisonnements ou jugements sur les comportements hydrologiques, au cours d'échanges parfois animés : Jean Albergel, Jean-Marie Fritsch, Frédéric Moniod, Pierre Ribstein.
 - ceux, collègues et amis, qui m'ont supporté, encouragé, conseillé et aidé ; il est impossible de tous les nommer ici ; mais plus particulièrement : Christophe Bouvier, Jean-François Boyer, Joelle Caner, Antoine Cornet, Claudine Dieulin-Picard, Michel Gautier, Michel Grouzis, Jacques Guiscafre, Michel Hoepffner, Yann l'Hôte, Jean-Claude Klein, Marie-Christine Layrolle, Jean-Claude Marcourel, Jean-Claude Olivry, Eugenio Rabbia, Jeannette Razanamiadana, Maryse Sicard.
 - ceux enfin qui, sans être montpelliérains, ont été consultés : Bruno Ambroise (CEREG - CNRS, Strasbourg), Keith Beven (Université de Lancaster), Emmanuel Ledoux (CIG - Ecole des Mines de Paris, Fontainebleau), Hubert Morel-Seytoux (Colorado State University, Fort Collins) et Jean-Claude Pion (Institut de Géologie, Strasbourg).

Parmi toutes ces personnes, il y en a deux avec qui la collaboration a été particulièrement étroite, quotidienne : Jean-Marc Lapetite à Adiopodoumé et Olivier Planchon à Montpellier. Qu'ils reçoivent ici le témoignage de mon amitié.

Je remercie enfin mes parents : Marjolaine Chevallier qui dans ses recherches historiques a trouvé la jolie citation de Francis Bacon qui ouvre ce mémoire ; Max-Alain Chevallier qui a effectué une dernière lecture avec l'oeil attentif du spécialiste surtout en textes anciens, mais aussi en thèses récentes, même si l'hydrologie est assez loin de ses préoccupations...

Cela a-t-il un sens de remercier Josyane et David ?

INTRODUCTION

Le programme Hyperbav

Le programme HYdroPEdologique de Recherche sur Bassin Versant (Hyperbav) a été lancé en 1982 à l'initiative d'une petite équipe de chercheurs de l'ORSTOM installée à Adiopodoumé en Côte d'Ivoire : Emmanuel Fritsch (pédologue structuraliste), Jean-Marc Iris (pédologue géostatisticien), Christian Valentin (pédologue de la surface) et Pierre Chevallier (hydrologue). L'idée initiale était de profiter de la réunion de cette équipe jeune, mais ayant déjà acquis individuellement des compétences spécifiques, pour étudier de façon la plus exhaustive possible un petit bassin versant en mettant en commun les spécialités personnelles. L'objectif se trouvait dans l'intitulé de l'unité de recherche de rattachement des proposants : *processus de transformation, fonctionnement et transfert à l'interface sol-plante-atmosphère*.

Ce projet a rencontré un succès certain auprès des animateurs scientifiques de l'ORSTOM à un moment où l'Institut se restructurait pour donner une plus grande priorité aux approches multidisciplinaires et des crédits de fonctionnement assez larges ont été accordés.

L'équipe initiale a été complétée par Daniel Boa (pédologue des gravillons), Mameiri Camara (pédologue des milieux cultivés), Danielle Mitja (botaniste), Olivier Planchon (hydropédologue des systèmes ravinaires), Michel Lepage et Serge Tano (zoologistes des termites). Cette étude devait également servir de creuset pour la mise au point de nouvelles méthodes de mesures et d'acquisition de données, développées par Jean-Louis Janeau (pédologue) et Jean-Marc Lapetite (hydrologue).

Une année a été nécessaire pour définir le site d'élection et mettre en place le programme à Booro-Borotou dans le Nord-Ouest de la Côte d'Ivoire. Trois années de mesure sur le terrain avaient été programmées ; mais la dernière année ayant été particulièrement déficitaire en écoulement, une année supplémentaire a été décidée. De façon à ne pas trop disperser les résultats et à garder l'esprit de *communauté* de travail dans lequel le projet avait été conçu, une échéance commune a été fixée au mois de septembre 1989 pour l'ensemble des travaux. A cette date doit se tenir un séminaire ouvert où tous les participants présenteront leurs résultats.

Il faut insister sur l'esprit d'équipe qui a prévalu tout au long de ce programme et sur les échanges permanents entre les différents participants dont toutes les mesures et observations ont été mises en commun. Bien-sûr, chacun avait ses méthodes et son rythme de travail ; chacun avait son objectif et sa spécialité. En dehors des thèses de doctorat (sept prévues : celles de Daniel Boa, Mameiri Camara, Jean-Marc Iris, Danielle Mitja, Olivier Planchon, Serge Tano et celle-ci) presque obligatoirement individuelles, il a été convenu que dans la mesure du possible la valorisation des travaux réalisés soit toujours une présentation à plusieurs auteurs.

Dans le présent mémoire de thèse on retrouvera les effets de cette approche en équipe avec de larges emprunts aux résultats obtenus et aux analyses menées par les autres *hyperbaveux*.

L'étude hydrologique

Ce travail porte le titre de *Complexité hydrologique du petit bassin versant*.

Les plus récentes études complètes de petits bassins versants à l'ORSTOM en Afrique de l'Ouest avaient porté sur des milieux considérés alors comme relativement simples à décrire : les bassins forestiers de Taï (Côte d'Ivoire), les bassins versants sahéliens de la Mare d'Oursi (Burkina Faso) ou de Mouda (Cameroun). Dès la proposition du programme Hyperbav, Girard mettait en garde

sur le choix d'un milieu de savane humide, en insistant sur la complexité des processus d'écoulements déjà partiellement mis en évidence par les études un peu plus anciennes du bassin versant de Waraniéné-Korhogo et des bassins versants de Sakassou (toujours en Côte d'Ivoire).

Dubreuil (1983, corr. pers) avait critiqué notre proposition qui ne mettait pas assez en avant l'importance des mécanismes de l'écoulement (approche qu'il qualifiait de naturaliste) et ajoutait en particulier qu'il fallait s'intéresser aux écoulements *hypodermiques* (selon la terminologie en vigueur). Nous n'avions à ce moment pas très bien compris ce qu'il entendait, obnubilés par les schémas classiques d'étude de bassin versant à l'ORSTOM. Avec l'avancement de l'étude et la compréhension progressive des mécanismes de fonctionnement du bassin versant de Booro-Borotou, nous avons mieux saisi la démarche envisagée par Dubreuil et la construction de ce mémoire emprunte assez largement à sa vision initiale en s'éloignant très nettement des présentations traditionnelles à l'ORSTOM.

Dans la première partie, intitulée *Réflexions*, le premier chapitre (1.1) introduit et critique (au sens large) la problématique étudiée par l'ORSTOM à travers le grand nombre de bassins versants mis en place depuis 1951. Le second chapitre (1.2) propose un exposé sur les *chemins de l'eau* tel qu'ils sont perçus par les hydrologues à l'échelle du bassin versant élémentaire. Dans le troisième chapitre (1.3) on s'interroge avec deux éminents chercheurs sur les perspectives et les orientations futures de l'hydrologie scientifique face à la complexité spatiale et dynamique des processus. Cette première partie est destinée à fixer le contexte scientifique et l'état d'esprit dans lequel l'étude de Booro-Borotou est présentée.

La deuxième partie propose une synthèse des *observations* réalisées sur le bassin versant de Booro-Borotou. Ces observations sont inhabituellement détaillées sur toutes les disciplines non-directement hydrologiques, mais dont on peut considérer qu'elles influencent notablement les mécanismes de l'écoulement. On trouvera des exposés sur le contexte géographique (chapitre 2.1), la géologie et la géophysique (chapitre 2.2), les sols (chapitre 2.3), la végétation (chapitre 2.4), le climat (chapitre 2.5), les précipitations (chapitre 2.6), l'évaporation (chapitre 2.7), les stockages souterrains (chapitre 2.8) et enfin les écoulements (chapitre 2.9).

Des mesures spécifiques sur le bilan hydrique ont été réalisées, nécessitant des techniques particulières. Elles sont présentées dans la troisième partie, intitulée *Expérimentations* et concernent la simulation de pluies (chapitre 3.1), l'étude de deux profils hydriques (chapitre 3.2) et une tentative de traçage des écoulements à partir du système ravinaire (chapitre 3.3). Ces expériences sont analysées en insistant sur les informations qu'elles apportent pour la description et la compréhension des processus de l'écoulement.

La quatrième partie présente l'*interprétation* des résultats exposés dans les deux parties précédentes à la lumière des questions posées et des schémas présentés dans la première partie. Après une analyse du bilan hydrique global (chapitre 4.1), des crues (chapitre 4.2) et du tarissement (chapitre 4.3), le chapitre 4.4 synthétise l'ensemble de l'information et des analyses pour proposer un schéma de fonctionnement général du bassin versant de Booro-Borotou.

L'étude aurait pu s'arrêter là ; mais l'un des principaux intérêts de la connaissance des mécanismes hydrologiques réside dans leur application à la *modélisation* des processus de l'écoulement qui constitue la cinquième et dernière partie de ce mémoire. Les données de Booro-Borotou ont été appliquées à deux types de modèles conceptuels déterministes : des modèles globaux (Crec 5, Modglo, Modibi ; chapitre 5.1) et un modèle distribué, le modèle couplé ORSTOM-Ecole des Mines (chapitre 5.2). Le chapitre 5.3 tire la leçon des méthodes et des résultats de ces modélisations

PREMIERE PARTIE :
REFLEXIONS

1.1. BASSINS VERSANTS REPRESENTATIFS A L'ORSTOM

Depuis 1951 (Dubreuil et al., 1972) les hydrologues de l'ORSTOM ont étudié entre trois et quatre cents bassins versants qualifiés de *représentatifs* éparpillés sur quatre continents (seule l'Asie n'a pas été concernée). L'investissement en hommes, en matériel et en moyens de fonctionnement a été considérable. Depuis quelques années pour des raisons diverses cette activité s'est recentrée. Le nombre de bassins versants représentatifs en activité a considérablement diminué.

Il ne s'agit pas pour nous de faire le bilan de cette activité dont Dubreuil a fait récemment un bon résumé (1985), mais simplement de tenter d'exposer les réflexions qu'elle nous inspire au moment d'achever la synthèse des travaux réalisés sur les derniers en date de ces bassins représentatifs, les bassins versants de Booro-Borotou en Côte d'Ivoire.

Roche (1986) qui représente avec Dubreuil et Rodier la *mémoire* de l'ORSTOM dans ce domaine donne la définition suivante :

Le bassin versant représentatif est un bassin spécialement choisi et équipé pour étudier le mécanisme de l'eau dans un contexte physiographique donné. Une répartition géographique rationnelle des bassins représentatifs demande une analyse préalable de la région concernée et sa division en zones homogènes : dans la pratique il est rare qu'on procède ainsi et l'implantation des bassins représentatifs est plutôt circonstancielle. Leur taille varie de quelques hectares à quelques milliers de km (le plus fréquemment de 5 à 100 km). Il est intéressant, pour rentabiliser leur exploitation et en tirer le maximum, d'imbriquer des bassins de tailles différentes et de physiographie variée. La durée d'exploitation est d'au moins trois ans mais peut aller jusqu'à 10 ans pour des bassins consacrés à des études phénoménologiques poussées.

Dubreuil (1974) précisait :

Le bassin versant représentatif est un bassin de petite superficie sur lequel on concentre d'importants moyens de mesure des paramètres hydropluviométriques. La forte densité des points de mesure et la cadence élevée des observations permettent de pallier en quelques années l'absence d'information hydrométrique à condition que l'on possède à proximité du bassin dans un climat identique une station de référence pluviométrique susceptible de fournir une connaissance statistique du régime des pluies. Cette condition remplie, le bassin versant représentatif ainsi équipé permet d'atteindre à la connaissance du régime hydrologique des petits cours d'eau et tout particulièrement à celle des crues.

Il complète cette définition dans un article en anglais (1985)¹

Rodier explique (1985) :

On a considéré la fréquence décennale car elle suffit pour beaucoup de petits ouvrages. Pour estimer les débits de cette fréquence décennale une note pratique a été mise au point (Rodier et Auvray, 1965). Elle repose sur l'utilisation de l'hydrogramme unitaire, l'estimation se faisant en trois temps :

1. Calcul de la hauteur de précipitation décennale, les caractéristiques de cette averse étant choisies proches des valeurs moyennes pour les fortes averses avec cependant un élément de caractère conservatif, l'averse de 24 heures est unique avec une seule pointe.
2. Estimation de la hauteur de ruissellement qui en résulte et donc du volume de crue par une série d'abaques.
3. Choix des caractéristiques de forme de l'hydrogramme unitaire par une autre série d'abaques et détermination du débit maximal qui en résulte.

Ces quelques extraits (bien sûr retirés de leur contexte) constituent un assez bon raccourci de ce que furent les lignes directrices des programmes de l'ORSTOM en matière de bassins représentatifs jusqu'au début des années 1980.

1. Several studies were conducted on small watersheds, "representative basins". The purpose of the work was to calculate the ten-year flood, using the size and slope of a catchment and the total permeability of its soils as the main parameter.

Ces orientations ne sont d'ailleurs pas loin des définitions et des objectifs proposés par un *guide international des pratiques en matière de recherche* édité par l'UNESCO (Toebes et Ouryvaev, 1970) à l'occasion de la Décennie Hydrologique Internationale. Ce guide propose quatre grands objectifs aux bassins représentatifs : la recherche fondamentale, l'influence des changements naturels, la prévision hydrologique, l'extension des données.

Pour des raisons historiques la plus grande part de l'activité connue de l'ORSTOM s'est principalement inscrite dans le troisième point (Roche, 1983) ; les autres objectifs n'étaient pas écartés, mais ils n'ont pas été suffisamment valorisés et sont souvent restés des résultats isolés, même parfois oubliés. En effet, comme le précise Dubreuil (1986b), à l'ORSTOM la destination première de ces études concerne l'évaluation de la ressource en eau et des événements exceptionnels dans le milieu semi-aride et intertropical pour des objectifs immédiats de développement villageois (alimentation humaine et animale, utilisation agricole), parfois urbain (assainissement pluvial) ou régional (dimensionnement de ponts routiers ou ferroviaires, aménagements hydrauliques).

1.1.1. Le bassin versant

Le compte-rendu d'une étude de bassin versant à l'ORSTOM a presque toujours la même forme. D'abord un exposé descriptif donne les grands traits du milieu naturel : la géologie, les sols, la végétation ; la description morphologique du bassin versant est en général associée à cet exposé. Ensuite vient un chapitre sur le contexte climatique régional insistant le plus souvent sur les précipitations dont les caractéristiques statistiques sont longuement décortiquées. La présentation des données de base hydrométriques intervient alors avec un luxe de détails sur les techniques de mesure et sur les difficultés de l'étalonnage. Le dernier chapitre est consacré à l'interprétation de ces observations.

L'objectif final de cette interprétation est pratiquement dans tous les cas l'obtention de l'hydrogramme de crue décennale sur le principe exposé par Rodier.

On peut déjà faire trois commentaires :

1. Il apparaît que les études de bassins versants à l'ORSTOM ont toujours très largement privilégié l'approche événementielle. Parmi tous les aspects du cycle de l'eau à l'échelle d'un bassin versant, ce sont les crues qui sont l'objet de toute l'attention de l'hydrologue. Cela a conduit à un dispositif de mesure et à des protocoles d'observation privilégiant ces événements, au point que très souvent la qualité des données d'observation se dégrade énormément en dehors des périodes de plus grande probabilité d'occurrence de ces crues. Cela a pour conséquence une connaissance générale assez approximative dans la plupart des cas des termes du bilan hydrique. Il est vrai cependant que dans les situations étudiées par l'ORSTOM qui s'intéressait en priorité au contexte climatique intertropical, la part des crues dans l'écoulement revêtait le plus souvent une importance majeure. L'étude des pluies et des débits de crues l'a souvent emporté devant celle des autres termes du bilan.
2. La crue décennale, objectif essentiel de ces études, contient déjà intrinsèquement un *a priori* conceptuel. Elle suppose admise toute une collection d'hypothèses sur la nature de l'écoulement en crue, sur les processus de l'infiltration et du ruissellement, sur la réponse globale d'un système considéré comme homogène. Longtemps c'est la représentation de l'hydrogramme unitaire (Sherman, 1932 et 1941) qui a prévalu, dont l'apparition coïncide avec celle de la théorie de l'écoulement formulée par Horton (1933). Cette représentation a peu à peu évolué vers des représentations en hydrogramme type (ou moyen, ou médian). Mais le concept est resté le même.
3. La part accordée à l'aspect météorologique et de mise en forme des données d'observation est souvent très importante ; elle constitue en quelque sorte la mise en avant du savoir faire technique de notre institut, particulièrement lorsque les conditions de réalisation sont considérées comme difficiles. Cela a d'ailleurs permis des développements technologiques importants.

Les méthodes employées sont toujours des méthodes que l'on peut qualifier d'explicatives. Il s'agit de trouver des relations entre un jeu de données d'entrée (essentiellement la pluie et le climat) et un jeu de données de sortie (les débits à l'exutoire). Pour reprendre une image classique on cherche à transformer un rectangle (l'échelon de précipitation) en triangle (la crue). Le problème paraît simple. Deux types d'approches sont proposées : approches que l'on pourra appeler *modèle* puisqu'il s'agit de représenter la réalité en la simplifiant. Nous distinguerons en suivant Ambroise et al. (1982) une approche statistique et une approche conceptuelle. Ici le terme *statistique* recouvre la notion de relation sous forme de loi qui lie les variables expliquées et explicatives ; le terme *conceptuel* fait intervenir une représentation *a priori* des mécanismes liant les variables étudiées.

1.1.1.1. Approche statistique

On peut d'abord tenter de résoudre le problème par un ensemble de relations mathématiques le plus souvent à l'aide de régressions simples (pluie, débit) ou multivariées faisant intervenir des paramètres explicatifs plus ou moins compliqués. La méthode de l'hydrogramme unitaire, bien que conceptuelle dans sa définition, n'est guère plus qu'un aboutissement complexe de ces relations (du moins dans son application).

Le principe est simple ; mais les difficultés surgissent immédiatement. De telles relations considèrent que le bassin est une boîte noire qui, pour une excitation que l'on suppose parfaitement définie par le jeu de paramètres d'entrée, offre une réponse standardisée. On cherche à passer directement de la cause au résultat, démarche caractéristique de l'ingénieur pour qui le résultat est le seul objectif, mais finalement assez peu scientifique. La description ainsi proposée ne fait jamais appel au fonctionnement interne du bassin. On peut représenter le problème avec une image simpliste : lorsque l'on frappe la touche "A" sur un clavier d'ordinateur, la lettre "A" se dessine immédiatement sur l'écran ; personne ne se soucie de l'immense complexité des processus mécaniques, électriques et électroniques qui ont conduit à ce résultat qui n'est jamais "B" ou autre chose (et heureusement !). Alors pourquoi cela ne fonctionnerait-il pas aussi bien sur un bassin versant ?

Une réponse évidente que l'on peut faire à ce type de question, c'est que les données d'entrée sont d'une qualité inadaptée à la précision de la question (si l'on tape avec le poing sur la touche "A", le résultat à l'écran risque de ne pas être obligatoirement "A"). Et en premier lieu on s'aperçoit que l'on ne sait pas mesurer objectivement la pluie en un endroit donné à un instant donné avec les dispositifs actuels (Rodda, 1968; Neff, 1977; Brunel, 1986; Chevallier et Lapetite, 1986; et de très nombreux autres auteurs...).

De plus toutes les données d'entrée sont mesurées ponctuellement et périodiquement, alors que les sorties concernent un ensemble qui fonctionne dans l'espace à trois dimensions et dans le temps. On est donc obligé de passer par une méthode de spatialisation des données d'entrée pour rester en conformité avec l'outil, méthode qui elle-même est conditionnée par un certain nombre d'hypothèses conceptuelles sur la structure spatiale et dynamique de l'averse (Berndtsson et Niemczynowicz, 1988).

Enfin, même en admettant que les données événementielles soient de bonne qualité, on s'est vite aperçu que le bassin versant avait une *mémoire* des événements antérieurs. Et donc, pour représenter les variations d'état liées à cette mémoire, on a cherché à la représenter elle aussi soit sous une forme explicative continue introduisant de nouveaux paramètres comme les indices de précipitations antérieures, soit sous une forme algorithmique séquentielle en réintroduisant un résultat de sortie comme le débit de base à l'entrée de notre boîte noire.

Avec ces méthodes le problème n'a pas été de savoir comment l'eau cheminait effectivement sur le bassin versant (approche naturaliste). Et pourtant la plupart des résultats proposés par les hydrologues en général et de l'ORSTOM en particulier a été obtenue avec une approche semblable et avec des résultats, somme toute, pas plus mauvais qu'avec des approches beaucoup plus complexes (voir par exemple Loague et Freeze, 1985).

Moniod (comm. orale) aime bien illustrer et défendre cette approche par une métaphore électrique très juste : on ne démontre pas la loi d'Ohm avec le mouvement brownien des électrons.

1.1.1.2. Approche conceptuelle

On s'est rapidement aperçu que l'approche statistique, souvent et improprement dénommée à l'ORSTOM *méthode globale*, non seulement n'était pas scientifiquement satisfaisante, mais surtout faisait intervenir implicitement des concepts physiques que les progrès techniques de mesure et de calcul permettaient de représenter directement.

L'approche conceptuelle s'est développée à l'ORSTOM dans deux directions faisant toutes deux intervenir la dynamique spatiale :

- une direction à dominante mathématique ; ce sont les modèles déterministes, d'abord globaux, puis distribués.
- une direction à dominante expérimentale ; ce sont les approches développées à partir de la simulation de pluie.

Nous y reviendrons largement dans notre mémoire et nous n'insisterons pas plus longtemps ici sur leur principe. On a même réalisé des applications combinant ces deux directions (Chevallier et al., 1985; Albergel et al., 1987).

On peut cependant noter que l'objectif prioritaire reste toujours l'évaluation de cette fameuse *crue décennale*. La connotation statistique devenant gênante dans une représentation conceptuelle faisant intervenir un plus grand nombre de paramètres dynamiques et spatialisés, on l'appelle désormais *crue d'étude*. Mais son principe reste le même et, ce qui est sans doute le plus ennuyeux scientifiquement, sous-entend toujours la représentation initiale en hydrogramme unitaire (ou type) et admet toujours implicitement un fonctionnement exclusivement hortonien.

1.1.2. La représentativité

Une fois les résultats acquis sur le bassin versant dit *représentatif*, le problème se complique puisqu'il s'agit de faire intervenir cette fameuse notion de représentativité. Et tout d'abord de quoi le bassin versant est-il représentatif ? Roche (1986) dans sa définition parle d'un *contexte physiographique donné*. Toebes et Ouryvaev (1970) parlent de *région hydrologique*. Une définition plus complète est formulée par le Conseil Australien des Ressources en Eau (AWRC, 1969) qui semble être le seul à avoir systématisé cette notion pour créer un réseau extensif qui couvre l'ensemble du pays (Rodda, 1976)².

De façon générale à l'ORSTOM, la notion de représentativité est étroitement liée à l'objectif prioritaire qu'est la *crue d'étude* (nous l'appellerons désormais de cette façon). Il faut en effet voir que l'intérêt essentiel de cette notion de représentativité est d'établir des méthodes les plus efficaces possible pour étendre les résultats observés et analysés sur les bassins versants étudiés à d'autres bassins dont le comportement est considéré comme semblable. Rodier (1982) précise même :

La transposition des résultats est une opération qui devrait être absolument générale chaque fois que l'on aménage un bassin représentatif. Et cependant il est difficile de dire que dans la plupart des cas cette transposition ait été réussie. Nous irons jusqu'à dire que parfois, on y songe même plus quand on arrive au stade de l'interprétation (...).

2. A catchment which contains within its boundaries a complex of land forms, geology, land use and vegetation which can be recognized in many other catchments of a similar size throughout a particular region.

D'après l'inventaire dressé par Dubreuil et al. (1972) qui reste toujours d'actualité, le premier critère est la grande région climatique, elle-même étroitement associée à la forme végétale dominante (du moins pour la zone inter-tropicale). En écartant le milieu urbain dont la problématique est très particulière et qui n'entre pas dans notre étude, on oppose la *forêt* au *sahel*, la *savane* venant s'intercaler. On parle également du domaine *humide* (forêt, savane) que l'on oppose au domaine *sec* ou *aride* (savane, steppe, désert...). Le second critère est le substratum géologique souvent regroupé en trois grandes familles : granite et assimilés, schistes et assimilés, roches volcano-sédimentaires. Un troisième critère intervient qui est la taille du bassin versant. Pour Rodier (1975) il y a quatre grandes classes : quelques hectares, de 2 à 40 km, de 40 à 500 km, plus de 1000 km.

A partir des classes définies sur ces critères, les caractéristiques hydrologiques sont différenciées sur des facteurs géomorphologiques (Dubreuil, 1986). Les méthodes de calcul correspondent au type d'approche employée pour l'analyse des résultats sur les bassins : approches statistique ou conceptuelle.

Pour l'évaluation du débit maximal de la *crue d'étude*, Rodier et Auvray (1965), dans une étude qui est encore systématiquement utilisée par les projeteurs en Afrique, utilisaient les notions de pente moyenne et de perméabilité globale pour une gamme de bassins couvrant l'ensemble de l'Afrique Occidentale; Guiscafé et al. (1976) en Martinique et Molinier (1981) dans la savane congolaise ne font intervenir que la superficie du bassin versant.

Avec les techniques modélistes ou de simulation de pluies, c'est la notion de zones de comportement hydrodynamique homogène qui intervient, zones dont plusieurs peuvent coexister sur un bassin versant et dont la contribution totale est proportionnelle à la superficie d'occupation. Cette méthode appliquée à la zone sahélienne pour laquelle on considère que c'est l'*état de surface* du sol qui règle le comportement hydrodynamique (voir chapitre 3.2) a conduit à l'établissement d'un catalogue de référence de ces états de surface dont les propriétés hydrodynamiques sont évaluées à l'aide de la simulation de pluie (Casenave et Valentin, 1988). En zone forestière, c'est plutôt des notions topographiques (très liées à l'organisation structurale des sols) qui sont proposées (Casenave et al., 1982). Les notions utilisées par les modèles (Modglo, Modibi ou Modcou, voir cinquième partie), sont plus vagues et laissées à l'arbitrage de l'utilisateur. On peut parler de *paysages*. C'est sur la base d'une caractérisation des états de surface, qu'Albergel et al. (1987) ont réalisé un transfert des résultats obtenus sur les bassins versants d'Oursi aux bassins versants de Gagara en utilisant une cartographie thématique établie automatiquement par traitement d'image satellitaire.

On s'aperçoit donc que la notion de *représentativité* du bassin versant est indissociable de l'approche analytique de départ. Rodier (1982) lorsqu'il distingue des *catégories* de transposition l'admet implicitement.

Dans les études de l'ORSTOM, la représentativité à une signification directement liée à l'approche soit statistique, soit conceptuelle des problèmes ; mais elle n'intervient jamais explicitement en tant que notion naturaliste. On ne considère pas que la représentativité est directement liée aux processus naturels qui régissent et distribuent les termes du cycle de l'eau.

Rodier (1982) précise même que toutes les transpositions (et donc la façon de définir la représentativité) ne demandent pas la même rigueur dans les opérations. Dans les applications générales de l'ORSTOM orientées vers la reconstitution d'événements hydrologiques, seul le résultat importe (la crue d'étude, par exemple) et on peut s'autoriser une marge d'erreur, accepter une certaine tolérance. Mais ce n'est plus du tout le cas si l'on cherche à comprendre les mécanismes du cycle de l'eau sur un terrain considéré comme représentatif et ensuite que l'on cherche à les étendre à la région dont il est représentatif. L'erreur n'est plus permise et la complexité de la description devient indispensable.

Nous n'avons pas encore évoqué la bouteille à l'encre que constituent les problèmes d'échelle. Ils sont bien sûr indissociables de la notion de représentativité. Klemes (1983) explique que les concepts hydrologiques ne sont pas des concepts continus lorsque l'on change d'échelle. Les relations

prises en évidence pour une échelle donnée ne sont pas forcément applicables à une échelle différente. Mais, si cela est vrai pour les problèmes hydrologiques, cela est également vrai pour les approches géomorphologiques. Dans un contexte physiographique donné, l'expérience nous a montré que l'on trouve des solutions de continuité entre les superficies de bassins versants selon l'échelle (versant, cours d'eau de premier ordre, d'ordre supérieur). On peut, par exemple, parfaitement affirmer que dans la région à substratum de la famille granitique de Côte d'Ivoire et des pays voisins, la superficie des bassins versants de cours d'eau élémentaire (donc intégrant tous les éléments du paysage, mais ne présentant pas de plaine d'inondation de quelque importance) a une superficie comprise entre 0,5 et 4 km². Mais le niveau d'échelle suivant, celui du bassin versant de deuxième ordre avec plaine d'inondation aura une superficie de plus de 25 km². Entre les deux, il n'y a rien. Les classes de superficie de Rodier illustrent parfaitement cette propriété.

A cela il faut rajouter la variabilité spatiale des averses dont l'extension et les caractéristiques varient considérablement, influençant directement la genèse des écoulements (Pilgrim, 1983). Une averse considérée comme homogène à l'échelle de notre bassin de premier ordre ne pourra pas être transférée telle quelle à un bassin d'échelle supérieure, parce qu'une dynamique spatiale devra être prise en compte.

1.1.3. L'étude de Booro-Borotou

A la différence de la grande majorité des études de bassins versants représentatifs de l'ORSTOM, l'objectif du programme entrepris à Booro-Borotou n'avait pas la priorité de la *crue d'étude*. Dans le projet initial (août 1982) et avant même que le site d'implantation ne soit choisi on trouvait le texte suivant :

Les sections de pédologie et d'hydrologie (...) se proposent d'entreprendre, d'ici début 1983, l'étude détaillée sur formation granitique d'un petit bassin versant (superficie inférieure à 400 ha) représentatif de la région Centre-Ouest des savanes de Côte d'Ivoire. (...) Deux types d'approche, l'une naturaliste, l'autre géostatistique, sont envisagés. (...). Les principales voies de recherche seront les suivantes :

- relation entre état de surface et infiltration (dans l'espace et dans le temps) ;
- lois de l'infiltration et de la filtration en fonction de la différenciation verticale des sols ;
- relation entre pluviométrie et stock en eau pour chaque type de sol (hauteur des pluies, répartition fréquentielle, volant hydrique, classement des sols suivant leur sensibilité à la "sécheresse") ;
- incidence des variations de stock en eau sur le ruissellement et l'infiltration ;
- relation entre les caractéristiques physiques (porosité, structure) et l'hydrodynamique interne ;
- modélisation de l'écoulement du bassin versant (confrontation de l'approche naturaliste et géostatistique), éventuellement extension générale des résultats.

Pour réaliser cet objectif ambitieux, l'équipe s'était donné à l'origine deux ans. En réalité il aura fallu au moins sept ans pour l'approcher (la synthèse générale est prévue pour septembre 1989). En effet, et les moyens mis à notre disposition sont là pour le montrer, nous ne souhaitons pas que Booro-Borotou soit une étude de bassin versant comme les 300 autres (assertion maintes fois répétée depuis par nos responsables scientifiques inquiets...). Il ne s'agissait plus (ou alors au passage) d'établir des relations statistiques entre les termes du bilan hydrique, mais d'essayer de comprendre les mécanismes et les processus mis en jeu à une échelle la plus fine possible. Finalement la modélisation de ces mécanismes devait constituer en quelque sorte à la fois la synthèse et la validation des connaissances acquises.

1.2. LES CHEMINS DE L'EAU

La théorie de l'infiltration de Horton (1933) a longtemps été le fondement de tous les concepts et de toutes les approches tentant de décrire les mécanismes de l'écoulement. Puis avec Hewlett et Hibbert (1967) est apparu une autre représentation. Et depuis un certain nombre de chercheurs se sont attelés à la tâche fondamentale d'essayer de suivre les chemins parcourus par l'écoulement dans le système naturel complexe que constitue le bassin versant.

Kirkby (1988) explique ce regain d'intérêt en constatant que dans les années 1960 et 1970 on s'est appliqué, particulièrement chez les hydrologues anglo-saxons, à étudier expérimentalement les versants (le même Kirkby a édité en 1978 un ouvrage collectif sous le titre "Hillslope Hydrology" qui est un peu le manifeste de ces études) pour développer les modèles de prévisions déterministes.

Il est apparu en effet que pour résoudre le problème posé par la fameuse *boîte noire* la solution la plus satisfaisante semblait être la modélisation. Parallèlement on assistait à un formidable développement des moyens de calcul et les limites de la simulation mathématique semblaient repoussées très loin. Par effet d'enchaînement on a assisté à une floraison extraordinaire de modèles déterministes, jusqu'au point de ne plus avoir assez de données de terrain pour les alimenter. En effet les coûts de calcul diminuant, et les coûts d'exploitation sur le terrain devenant de plus en plus élevés, la tendance à privilégier les calculs au détriment des observations devenait inquiétante. Par réaction des études plus fines et plus exigeantes ont été entreprises et ont abouti à ces révisions des concepts traditionnels sur la formation des écoulements et des crues des versants et des petits bassins élémentaires.

On trouve dans la littérature plusieurs exposés du contexte historique dans lequel se sont développés ces théories, en particulier chez Freeze (1972), Chorley (1978), Dunne (1983), Fritsch (1988) ou Kirkby (1988).

Aujourd'hui, on admet qu'il existe une grande variété de conditions de fonctionnement et de processus. Il nous paraît important d'en présenter les principaux traits.

Ces processus font intervenir l'ensemble du système constitué par l'eau, le sol, la végétation et l'atmosphère. Ils sont presque toujours décrits sur l'entité géomorphologique que constitue le *versant* et qui semble être admise comme la plus petite entité géographique sur laquelle on peut observer la presque totalité des mécanismes du cycle de l'eau, de la précipitation au cours d'eau de premier ordre. Cette notion de *versant* des hydrologues recouvre très exactement la même notion que l'on appelle souvent *toposéquence* chez les pédologues ou les géologues.

Dunne (1978, 1983) distingue et schématise (figure 1.201) trois grandes catégories de processus : l'écoulement de surface (ruissellement, *Horton overland flow*, chemin n°1), l'écoulement rapide de subsurface (*subsurface stormflow*, chemin n°3), et l'écoulement sur surface saturée (*saturation overland flow*, chemin n°4). Le chemin n°2 (écoulement de base) est celui suivi par l'eau qui s'infiltré en profondeur et atteint la nappe, la restitution dans le cours d'eau se faisant sous forme de vidange du réservoir phréatique. Les trois premières catégories de processus sont évidemment susceptibles d'alimenter ce type de chemin. On note que les catégories sont dénommées d'après la partie visible pour l'observateur de l'écoulement consécutif à un événement pluvieux. Kirkby (1988) adopte la même classification, mais préfère le terme plus général d'écoulement rapide interne (*throughflow*) pour le chemin n°3 en observant que le terme de subsurface introduit une précision de localisation dont la réalité n'est pas prouvée jusqu'à présent.

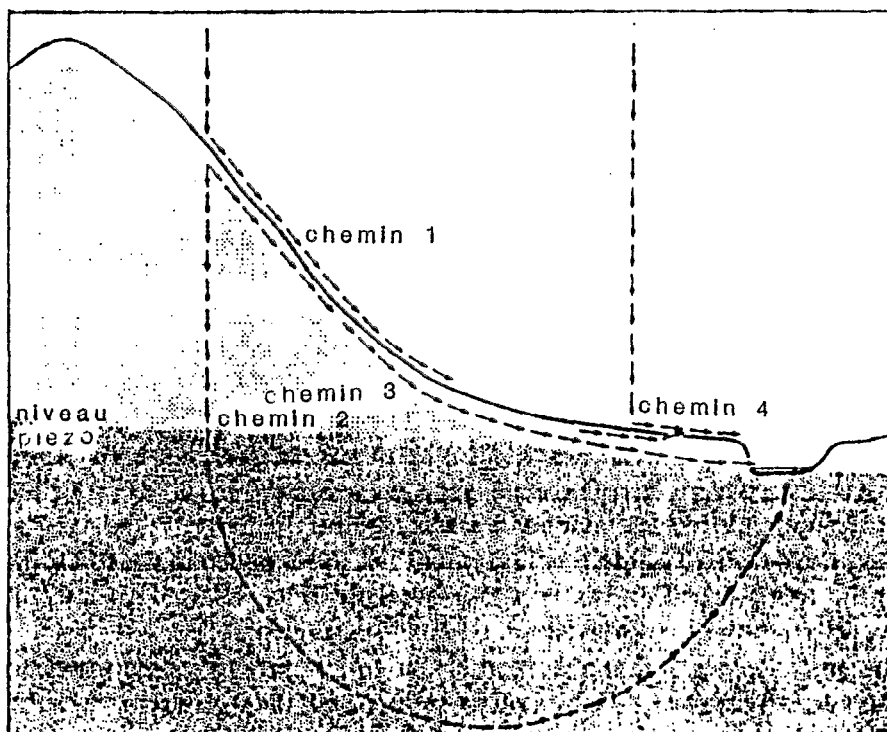


FIG. 1.201 : LES CHEMINS DE L'ECOULEMENT SUR LE VERSANT
D'APRES DUNNE, 1973

1.2.1. L'écoulement de surface (*Horton overland flow, chemin n°1*)

Avec Chorley (1978), il nous paraît utile de citer intégralement Horton (1933)³.

Dunne (1978) dresse un inventaire des endroits où il a vu du ruissellement hortonien. Il en conclut par élimination que les régions où il est le plus rare sont les régions humides en affirmant qu'il n'en a jamais observé sur de grandes surfaces en région humide.

A l'opposé, tous les hydrologues ayant travaillé dans le milieu sahélien ont en mémoire ces extraordinaires images de ruissellement en nappe couvrant des glacis de plusieurs dizaines d'hectares (par exemple Chevallier et al., 1985).

1.2.2. L'écoulement rapide interne (*throughflow, subsurface flow, chemin n°3*)

Pour Beven (1988, qui emploie le mot *interflow* et à qui nous empruntons les principaux éléments de ce paragraphe) les mécanismes de l'écoulement rapide interne ne sont pas encore vraiment compris (voir également Kirkby, 1988) et cela explique la grande variété des terminologies employées. Cet écoulement se produit en milieu saturé comme non saturé et dans les directions verticales comme latérales. De nombreux auteurs ont décrit ce type d'écoulement et Hewlett (1974) en a dressé un premier inventaire.

Pour matérialiser ces écoulements des expériences ont été faites utilisant des traceurs naturels destinés à séparer les écoulements (en particulier : Sklash et Farvolden, 1979 ; Pearce et al., 1986 ; Sklash et al., 1986). Elles ont conduit à quelques surprises, montrant en effet qu'une part importante de l'eau qui s'écoulait tant dans le cours d'eau que sous les versants provenait d'un stockage précédent et non de l'averse ayant provoqué l'écoulement. Beven distingue quatre types d'écoulement rapide interne (*rapid subsurface runoff*) : l'effet piston (*translatory flow*), l'écoulement dans la macroporosité tubulaire (*macropores flow*), l'intumescence de nappe (*groundwater ridging*) et l'écoulement de retour (*return flow*).

3. The surface of a permeable soil acts like a diverting dam and head-gate in a stream... with varying rain-intensity, all of the rain is absorbed for intensities not exceeding the infiltration capacity, while for excess rainfall there is a constant rate of absorption as long the infiltration capacity is unchanged. As in the case of the dam and head-gate, there is usually some pondage which remains to be disposed of after the supply to the stream is cut off, so in the case of infiltration, surface-detention remains after rain ends. Infiltration divides rainfall into two parts, which thereafter pursues different courses through the hydrological cycle. One part goes via overland flow and stream-channels to the sea as surface runoff ; the other goes initially into the soil and thence through the groundwater flow again to the stream or else is returned to the air by evaporative processes. The soil therefore acts as a separating surface and the author believes that various hydrologic problems are simplified by starting at this surface and pursuing the subsequent course of each part of the rainfall as so divided, separately.

1.2.2.1. *L'effet piston (translatory flow)*

Il est défini par Hewlett et Hibbert (1967)⁴

1.2.2.2. *L'écoulement dans la macroporosité tubulaire (macropores flow)*

Dans un article de 1982, Beven et German font le point sur les travaux entrepris pour étudier les écoulements rapides dans la macroporosité tubulaire. Ils considèrent qu'un macropore est une ouverture de la matrice que constitue le sol dans laquelle est susceptible de se produire un écoulement obéissant aux lois de l'hydraulique en canaux (Beven et Clarke, 1986). Les forces capillaires de la matrice non saturée n'interviennent pas directement dans ce processus.

L'origine de ces macropores est diverse : activité faunique dans le sol, racines des plantes, cassures ou fissures du sol, conduites naturelles formées par l'action érosive des écoulements.

Il semble cependant admis que ce type d'écoulement a une extension limitée sur le versant et ne dépasse guère un ordre de grandeur de la dizaine de mètres. Les véritables *conduites* internes observées quelquefois (Girard, comm. pers., 1987) restent une exception dans les milieux non karstiques.

1.2.2.3. *L'intumescence de nappe (groundwater ridging)*

Décrit par Ragan dès 1968, ce type d'écoulement a été analysé à partir d'observations utilisant des traceurs par Sklash et Farvolden (1979). Il s'agit d'une remontée sensible du niveau de base de la nappe pendant les averses augmentant significativement le débit de base. Ce phénomène est expliqué par un changement brusque d'état de la frange capillaire (couche limite) non-saturée qui assure la transition avec la surface de la zone saturée, le gradient de pression qui affecte cette frange devenant brusquement positif sous l'action de l'infiltration dans les horizons supérieurs au moment de l'averse. Des réservoirs saturés près du cours d'eau peuvent contrôler de façon importante ce type de processus.

1.2.2.4. *L'écoulement de retour (return flow)*

Si le niveau piézométrique et la frange capillaire sont près de la surface du sol, il ne faut qu'une petite quantité d'eau pour saturer le sol entre la surface et la nappe. Cela peut conduire à une réapparition en surface des écoulements rapides internes qui peuvent être d'origine diverses (voir figure n°1.201). Sklash et Farvolden (1979) le montrent à l'aide de traceurs isotopiques naturels sur un bassin de l'Ontario.

4. (The translatory flow is) a contribution to direct flow of water already stored in the soil mantle before rainfall began. It will be released in large quantities only when the soil is within the field capacity range or wetter. Above the zone of saturation we may regard such movement as due to thickening of the water films surrounding soil particles and a resulting pulse in water flux as the saturated zone is approached... Such movement may be verified in an elementary manner by allowing a soil column to drain to field capacity in the laboratory and slowly adding a unit of water at the top. Some water will flow from the bottom almost immediately, but it will be apparent that is not the same water added at the top. Translatory flow as a factor in direct flow will prevail chiefly in the lower and mid-slope portions of our model watershed. Upslope translatory flow may be regarded as a pulse in soil moisture which will migrate slowly downslope.

1.2.3. L'écoulement sur surface saturée (saturation overland flow, chemin n°4)

La théorie de l'écoulement sur surface (temporairement) saturée vient compléter celle de l'écoulement rapide interne. C'est en effet par les études des écoulements de retour, qu'est apparu le concept d'*aires participantes* ou *contributives variables* (*variable contributive areas*) (Hewlett et Hibbert, 1967 ; Ragan, 1970 ; Freeze, 1972 ; pour citer quelques auteurs pionniers... ; Mérot, à paraître, en fait une bonne présentation en français).

Dunne (1983) explique que cet écoulement apparaît et se développe lorsque les sols deviennent saturés en surface avec la remontée de la nappe jusqu'à affleurer la surface du sol. Lors d'événements pluvieux, la conséquence immédiate est un ruissellement direct sur cette surface saturée, doublé d'un effet d'écoulement interne de retour créé par cette remontée de la saturation. Pour Dunne ce type d'écoulement est dominant dans les contextes à végétation dense, sur des sols peu épais à niveau piézométrique élevé, sur des bas de versant concave à fond large et pente douce. Les variations saisonnières du niveau de la nappe règlent l'extension de la surface où les sols restent saturés.

De très nombreuses études expérimentales confirment ce concept, essentiellement en milieu tempéré ou en zone forestière. On notera par exemple en France les études récentes réalisées sur le bassin du Ringelbach dans les Hautes-Vosges (Ambroise 1986 et 1988) ou sur le bassin de Carnoët en Bretagne (Cosandey, 1986).

1.2.4. Synthèse

Pour terminer ce chapitre, il nous paraît intéressant de reproduire deux figures présentant synthétiquement les origines et les conséquences rapportées au bassin versant de la différenciation de ces chemins de l'eau :

- L'une (figure n° 1.202) est proposée par Dunne (1983) et replace les différents types d'écoulement dans le contexte géomorphologique faisant intervenir d'une part le climat, la végétation et l'occupation du sol et d'autre part la topographie et la nature des sols.

- L'autre (figure n°1.203) est due à Kirkby (1988). Elle est établie sur la base de données collationnées par Dunne (1978) et propose une schématisation des réponses des bassins versants selon le type d'écoulement, réponses caractérisées par le temps de réponse (temps séparant le centre de gravité de l'averse du centre de gravité de la crue, *lag time*) et par le débit spécifique maximal, rapporté à la superficie du bassin versant.

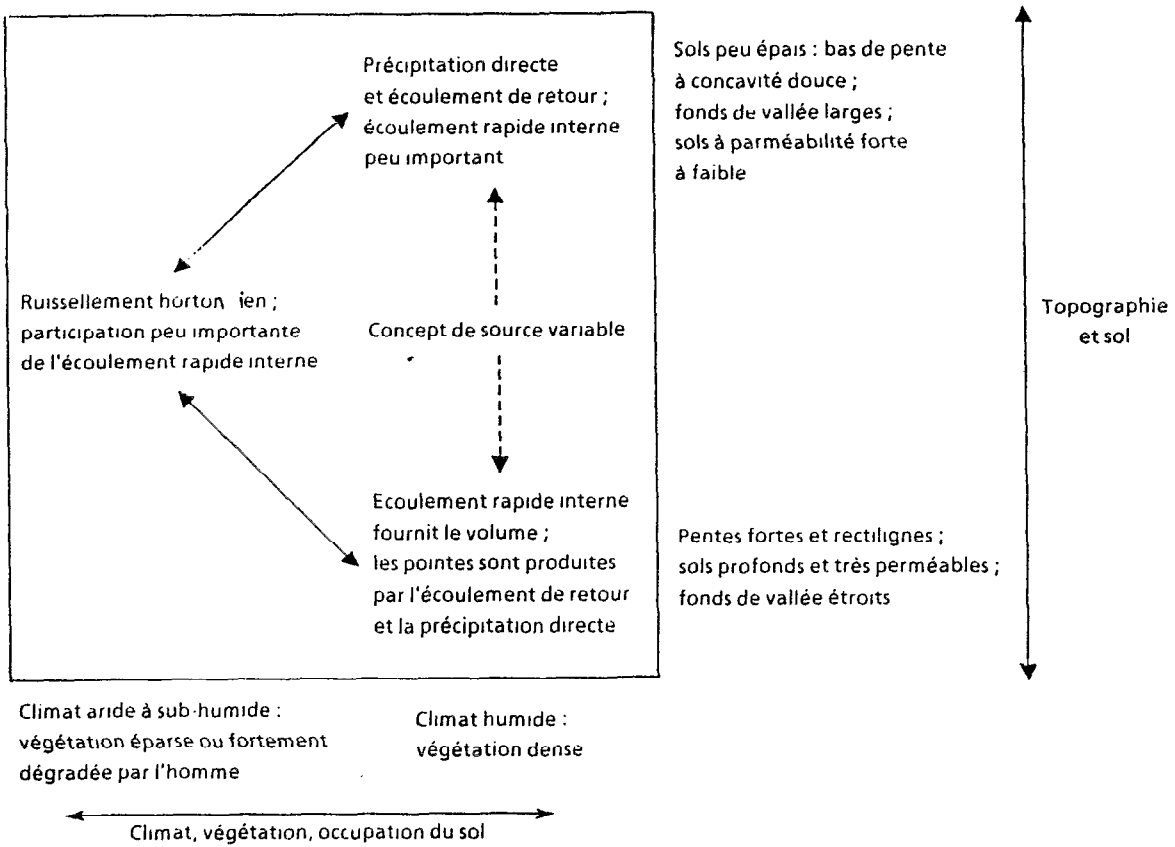


FIG. 1.202 : REPRESENTATION DES DIFFERENTS PROCESSUS D'ÉCOULEMENT EN RELATION AVEC LE MILIEU NATUREL D'APRES DUNNE, 1983

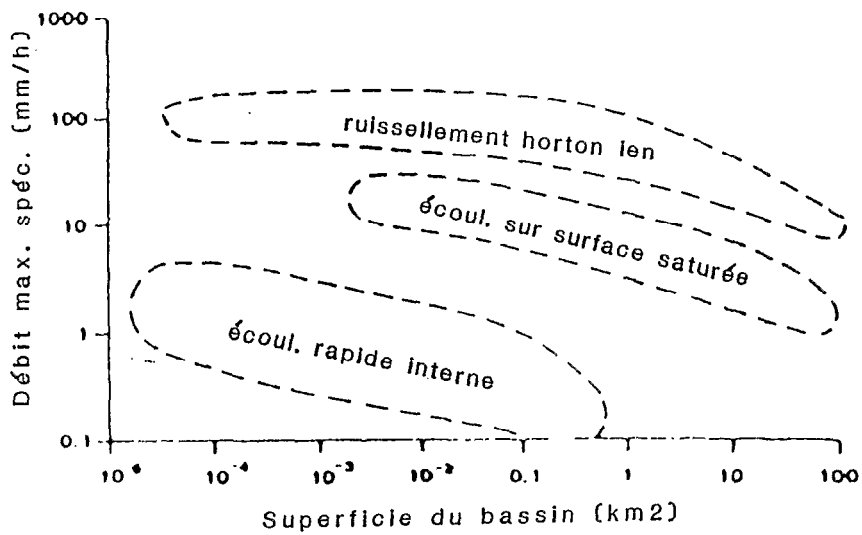
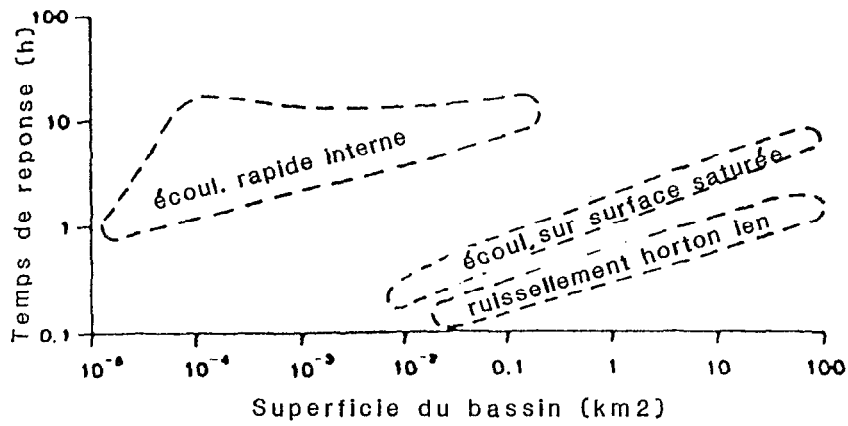


FIG.1.203 : REPONSE SCHEMATISEE DU BASSIN VERSANT ,
 SELON LE PROCESSUS D'ECOULEMENT (D'APRES KIRKBY, 1988)

1.3. LES INTERROGATIONS RECENTES

Ces chemins de l'écoulement ont tous été plus ou moins bien observés, vérifiés. Il n'est cependant pas possible de suivre le cheminement d'une goutte de pluie pour avoir une idée exacte de son parcours réel (ah ! la belle histoire des albums du Père Castor qui raconte l'aventure de Perlette, la goutte de pluie dans son merveilleux voyage jusqu'à la mer...); et si on le pouvait, les surprises seraient sans doute de taille. La complexité de ce cheminement amène quelques hydrologues et non des moindres, à remettre en question la démarche scientifique de l'hydrologie.

Il nous paraît essentiel d'évoquer ici ces interrogations, parce qu'elles situent exactement le contexte de notre étude de Booro-Borotou. Notre thèse se distingue de l'approche hydrologique classique dont la démarche *scientifique* peut être contestée, par une recherche des mécanismes naturels, recherche dont on mesure rapidement les *infinies complications* puisque résultant de l'interaction d'un grand nombre de facteurs naturels ou anthropiques à toutes les échelles d'espace et de temps.

Nous évoquerons ces interrogations à partir des réflexions de deux chercheurs, dont les travaux dans le domaine de l'hydrologie analytique sont reconnus parmi les plus éminents d'aujourd'hui : Keith Beven et Viktor Klemes, actuel Président de l'Association Internationale des Sciences Hydrologiques.

1.3.1. Vers une nouvelle conception de l'hydrologie (Beven,1987)

Beven (traduction en français proposée par Moniod, 1987) constate un certain nombre de contradictions fondamentales entre l'observation et la théorie de la science hydrologique:

- la séparation sur l'hydrogramme entre le débit de base et l'écoulement de crue n'a pas de sens physique ;

- les hypothèses d'homogénéité utilisées pour prévoir les réactions des bassins versants ne correspondent à rien de naturel ;

- la loi de Darcy ne décrit pas correctement dans certaines situations les processus d'écoulement (par exemple dans la macroporosité tubulaire, alors qu'elle est le fondement de toutes les représentations, même les plus sophistiquées.

Cela revient à constater que la théorie de l'hydrologie scientifique a été développée sur des notions vérifiées en laboratoire et qui n'ont pas véritablement de correspondance à l'échelle du bassin versant et de la complexité du milieu naturel. Il faut donc définir une nouvelle structure théorique.

Beven se fonde sur des théories épistémologiques à propos des changements dans la science pour penser que cette nouvelle structure (paradigme) correspond à une remise en question totale des concepts, nécessaire et inévitable. Ces nouveaux concepts existent mais correspondent pour le moment à des perceptions personnelles qu'il décrit pour lui comme une *variabilité complexe spatiale et temporelle des entrées, des chemins d'eau et des réactions dynamiques non-linéaires aux effets de la variabilité spatiale des précipitations, de la couverture végétale, de la structure du sol et de la topographie.*

Il n'est pas possible d'identifier tous les paramètres influençant les chemins de l'eau à l'échelle quasi-pontuelle nécessitée par l'hétérogénéité spatiale du système. Et apparaît donc le concept d'incertitude qui n'est pas compatible avec les théories actuelles, même celles qui président à l'établissement des modèles récents *physiques* distribués.

Beven voit deux espoirs prometteurs :

- le premier est que l'incertitude et le doute sur les méthodes et les techniques de prédiction se généralisent ; il faut *une honnêteté intellectuelle bien plus grande qu'avec nos méthodologies coutumières qui sont illusoire.*

- le second est qu'il est probable que nos théories actuelles ne soient pas les meilleures pour développer les approches stochastiques. L'intégration des phénomènes à toutes les échelles (et en particulier l'étude des *chemins de l'eau*) devrait conduire à reconsidérer ces approches stochastiques et à en estimer les incertitudes plus rigoureusement.

Beven pense que la *révolution* provocatrice de cette mutation viendra plus probablement de l'évolution des outils de calculs que d'une découverte conceptuelle permettant de sortir du désarroi actuel.

1.3.2. Dilettantisme ou perspectives en hydrologie ? (Klemes, 1986 et 1988)

Dans deux articles successifs, Klemes fait une analyse extrêmement critique de l'état de la science hydrologique. Il se fait même provocateur dans le premier, intitulé : *Dilettantisme en hydrologie : transition ou destin ?*, en interpellant :

Will the hydrologists please stand up and be counted !

Sa réflexion est fondée sur le fait que l'hydrologie n'existe pas vraiment en temps que discipline scientifique (dans l'acception universitaire de cette expression) et qu'au départ les hydrologues sont d'abord des spécialistes de la forêt, des géographes, des ingénieurs en électronique, des géologues, des analystes de systèmes, des physiciens, des mathématiciens, des botanistes ou, le plus souvent, des ingénieurs en génie civil. L'hydrologie est donc vue par le petit bout de lorgnette de personnes spécialisées dans un domaine et dont les lacunes dans les autres domaines sont considérables. Il n'est guère possible pour un hydrologue actuel d'avoir une vision multidisciplinaire globale et saine, vision qui semble être la voie nécessaire pour appréhender solidement les phénomènes étudiés.

Cela conduit à des erreurs fondamentales de conception et particulièrement dans les modèles. Un bon modèle en effet ne suffit pas pour fournir un bon travail. Il doit d'abord être employé pour la bonne cause.

Klemes illustre son propos de nombreux exemples et insiste en particulier sur les techniques mathématiques d'extrapolation qui sont souvent des absurdités hydrologiques. Dans sa conclusion, il redoute l'évolution actuelle d'une discipline qui n'a pas encore réussi à s'affirmer comme une véritable science et met en garde contre un dilettantisme (nous employons le même mot que le texte original, mais on pourrait parler d'amateurisme...) que, toujours provocateur, il compare à l'alchimie ou à l'astrologie.

Dans le second article, très récent, il résume son propos en ramenant le problème au fait que l'hydrologie est considérée le plus souvent comme une discipline technique et non comme une véritable science. Mais il pense que l'avenir de l'hydrologie est brillant et avance trois arguments :

- avec une vision plus planétaire, l'échelle d'appréhension par l'homme du milieu naturel devient plus importante et va vers la recherche d'une connaissance et d'une compréhension plus large des interactions des différents éléments en jeu.

- les techniques d'observation et d'acquisition de données s'améliorent alors que jusqu'à présent ce n'était que des termes mineurs (en volume) du bilan hydrique à l'échelle du globe que l'on était capable d'appréhender (les pluies continentales, les débits). On peut beaucoup espérer des techniques nouvelles comme la télédétection, et surtout du développement des moyens de calcul.

- l'ère prochaine sera celle des sciences biologiques et géophysiques. En étudiant systématiquement les interactions entre les processus les plus variés, il est possible de faire profiter une science des progrès techniques d'une autre. On peut penser que la multitude des grandes et petites techniques utiles va se rassembler pour constituer une nouvelle science technologique, formant un *total* plus grand que la somme des *parties*.

1.3.3. Conclusion en forme d'introduction à l'étude de Booro- Borotou

L'étude des bassins versants de Booro-Borotou est à l'image de ces interrogations, même si le bilan mondial envisagé par Klemes n'explique probablement jamais le fonctionnement du petit bassin versant. Et on sentira parfois notre perplexité devant des résultats ou devant des méthodes que nous avons pourtant utilisées, développées et analysées.

Un certain nombre de contradictions apparaîtront, souvent dues à une opposition entre une interprétation d'ingénieur et un doute commandé par l'honnêteté scientifique. Ce mémoire apparaîtra à l'image de l'ingénieur hydraulicien (que nous sommes) intimement persuadé, comme l'expose Klemes, de son amateurisme dans la plus grande part des disciplines scientifiques. Ces disciplines lui sont pourtant nécessaires pour décortiquer les processus de fonctionnement du bassin ; le large emprunt à ses collègues géologues, pédologues et botanistes le montre bien. Le sentiment d'impuissance et la nécessité de rester modeste devant la complexité intrinsèque du milieu naturel domine souvent.

Ces interrogations et les résultats de l'étude de Booro- Borotou amèneront sans doute le lecteur à se poser deux questions essentielles :

Enfin, cette étude, menée avec des moyens humains et financiers importants, apporte-t-elle quelque chose de plus ou de différent au regard des études précédentes de l'ORSTOM ?

Les voies proposées pour décrire les phénomènes, les concepts adoptés pour construire les modèles, les variables mesurées pour appréhender les mécanismes, faut-il les remettre en cause ?

DEUXIEME PARTIE :
OBSERVATIONS

2.1. CONTEXTE GEOGRAPHIQUE

2.1.1. Généralités

L'ensemble de bassins versants étudiés dans le cadre du programme Hyperbav se place au nord-ouest de la Côte d'Ivoire à 25 km au nord de la ville de Touba (environ 5000 habitants) (figures 2.101 et 2.102).

Le campement qui a servi aussi bien de logement que de base de travail est installé à proximité immédiate de la zone d'étude dans le village de Booro-Borotou (environ 300 habitants). Ses coordonnées géographiques sont :

Latitude : 8°28' nord

Longitude: 7°35' ouest

Altitude : 455 m dans le nivellement général de l'Afrique Occidentale

L'accès est facile par la route goudronnée A7 de Daloa à Odienné par Man qui longe le village de Booro-Borotou. Des liaisons quotidiennes par cars et des liaisons aériennes tri-hebdomadaires existent entre Abidjan et Touba. La distance par la route d'Abidjan à Booro-Borotou est de 730 km.

La population du village rattachée à l'ethnie Mahou du groupe Malinké est de confession musulmane. Son activité est exclusivement agricole. Les infrastructures collectives sont très limitées : un petit marché, une école publique (trois classes) et une école coranique, un bon forage d'eau potable équipé d'une pompe à bras Bodin, une mosquée et un petit hangar agricole. Il n'y a pas de commerce permanent de quelque importance, ni de structure de santé. Administrativement, le village dont le chef a une importance essentielle est rattachée à la sous-préfecture de Borotou (40 km au nord) du département de Touba. Quelques ressortissants du village ont émigré vers Daloa, San Pedro et Abidjan ; mais on ne les voit que très rarement revenir au village.

L'agriculture est diversifiée en cultures vivrières (arachide, manioc, riz, niébé, plantain, gombo, maïs, igname) et en cultures de rente (coton surtout, riz). Elle est très faiblement mécanisée, les paysans faisant appel à l'organisme coopératif uniquement pour le défrichage et le labour effectués par des engins lourds et exclusivement pour les cultures de rente. L'élevage est limité à quelques animaux de case (volaille, moutons). Mais le village de Booro-Borotou se trouve sur l'un des axes de transit du bétail sur pied venant du Sahel malien et se dirigeant vers les agglomérations de basse Côte d'Ivoire. La chasse, officiellement interdite, revêt une importance plus traditionnelle que significative.

L'organisation annuelle des activités villageoises est presque immuable et ne se décale qu'en relation avec l'arrivée précoce ou tardive des pluies. La saison d'intense activité agricole commence avec les grosses averses en avril-mai et ne s'achève qu'après la récolte du coton en décembre-janvier. Cette période de décembre-janvier correspond également à celle des feux de brousse pratiqués systématiquement sur la quasi-totalité de l'espace. Les finalités de ces feux ne sont pas toujours très claires (chasse, nettoyage, effet régénérateur sur la végétation...) ; leurs conséquences, longtemps combattues par les thèses officielles, ne sont plus jugées aussi totalement catastrophiques sur l'environnement (comme le montre le film *La Cendre et la Vie*, 1983, de Gillon et d'une équipe d'écologistes). Enfin la période de février à avril est celle des travaux généraux d'utilité collective (réfection des pistes, entretien du puits, de l'école, de la mosquée) ou individuelle (remise en état des habitations) ; c'est aussi l'époque des fêtes villageoises.

FIG. 2.101 : CARTE DE SITUATION. REPUBLIQUE DE COTE D'IVOIRE

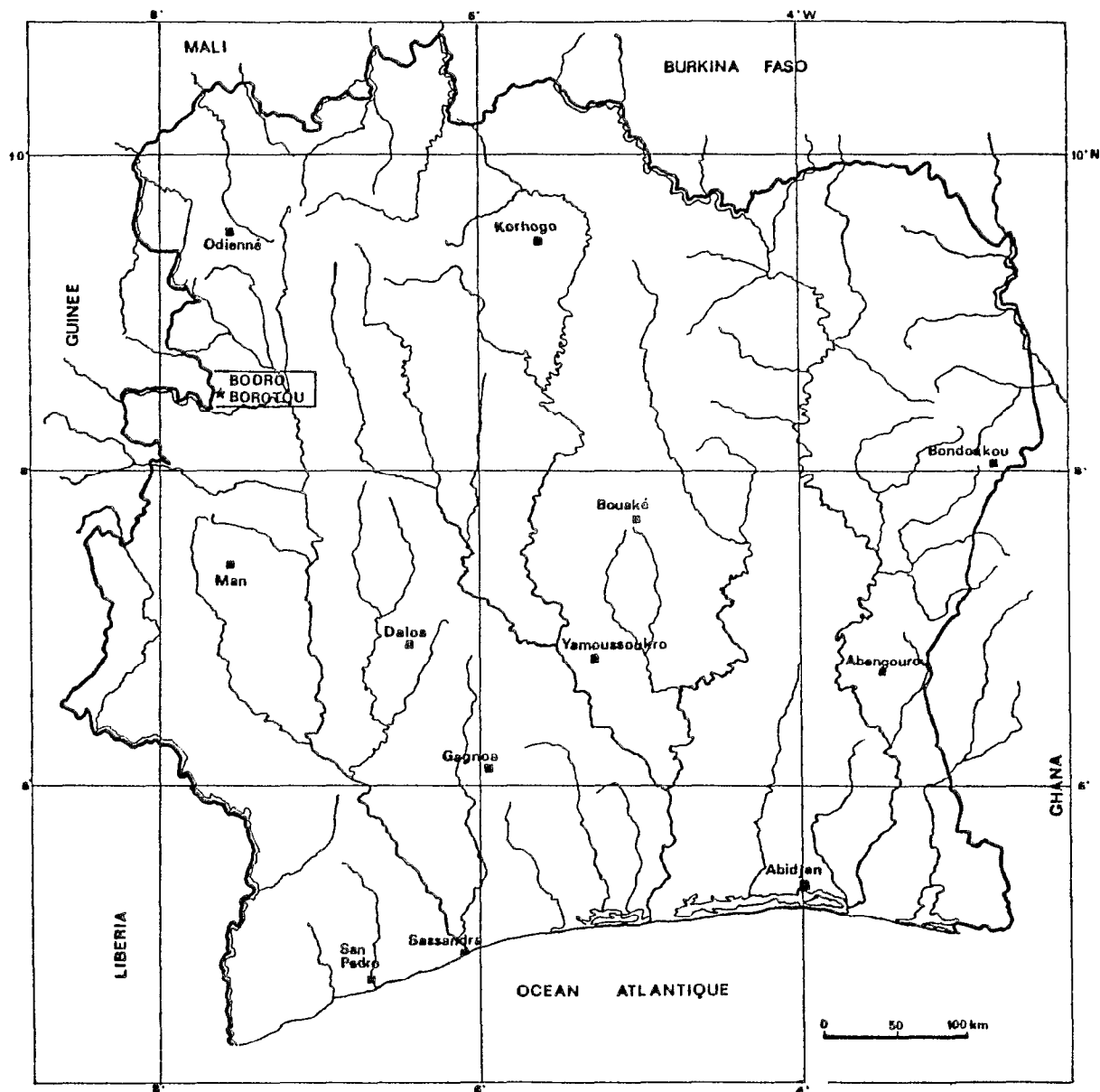
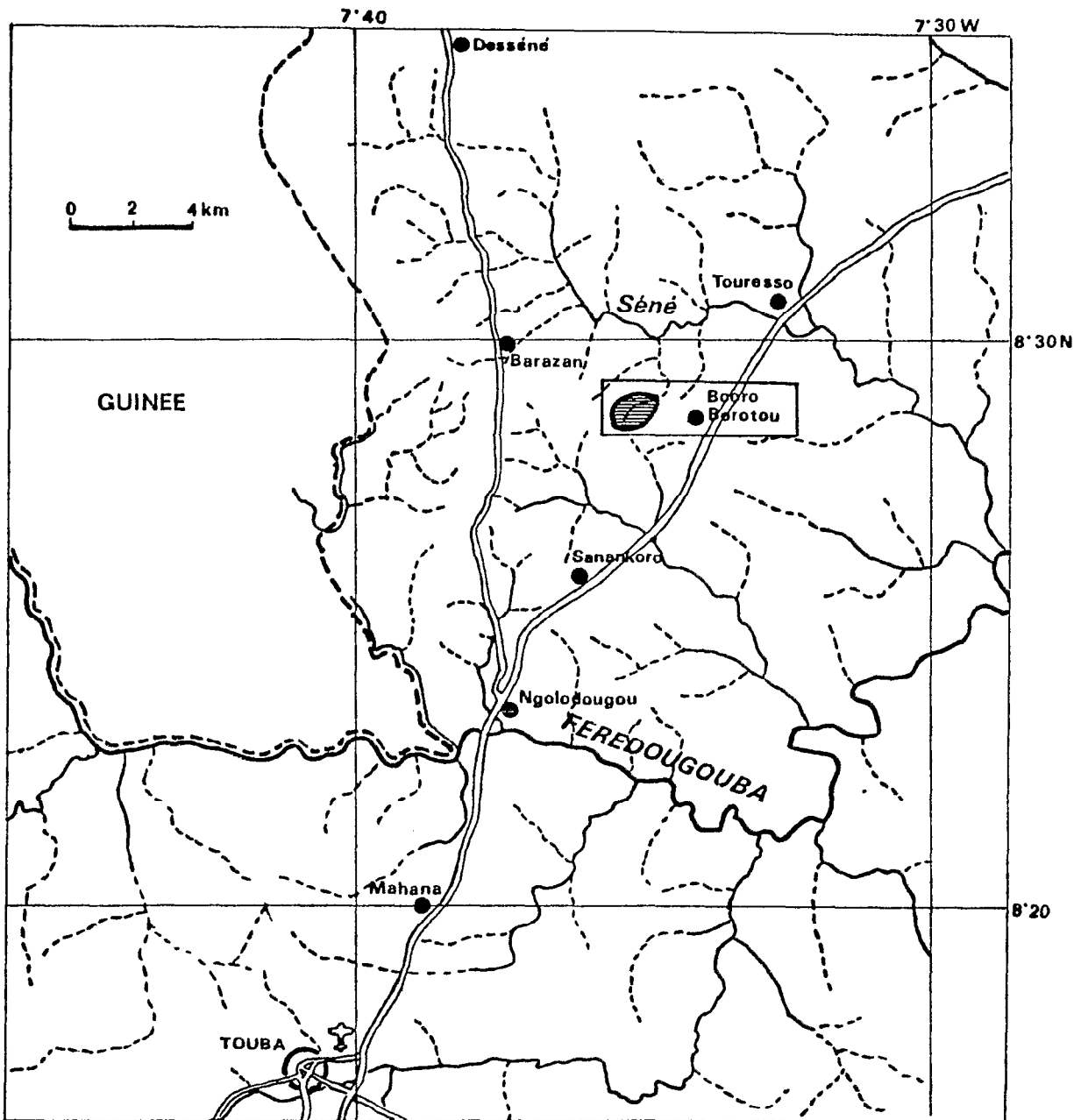


FIG. 2.102 : CARTE DE SITUATION. REGION DE TOUBA



2.1.2. Le milieu régional

Avant de rentrer dans le détail et la description de la région de Booro-Borotou, il faut la situer dans le contexte du milieu naturel de la Côte d'Ivoire. Pour cela ce paragraphe reprend très sommairement les différentes parties de l'ouvrage collectif que l'ORSTOM a consacré à ce sujet (1971).

Dans sa monographie sur les aspects de la géomorphologie de la Côte d'Ivoire, Avenard place la région de Booro-Borotou sur la retombée orientale de la dorsale guinéenne dans son compartiment nord-ouest. C'est un plateau assez étendu dont les altitudes se situent entre 400 et 450 m à substratum granitique ou gneissique d'où émergent de rares reliefs individualisés.

Eldin situe Booro-Borotou dans la zone climatique B, définie par l'existence de deux saisons (sèche et humide) et une période d'Harmattan pendant 3 à 5 mois (vent sec du nord-est). On parle de *climat tropical subhumide*. Le déficit hydrique cumulé y est compris entre 600 et 850 mm, pour une durée de saison sèche de 7 à 8 mois.

Cela correspond au domaine végétal subsoudanais (Guillaumet et Adjanohoun). C'est le domaine des forêts claires et des savanes denses. On y trouve des forêts galeries à proximité des cours d'eau et des flots forestiers denses de type sec. Le sous-bois herbacé et la saison sèche de longue durée y favorise les feux de brousse.

Perraud enfin, classe les sols de la région comme *sols ferrallitiques fortement désaturés* qui couvrent tout l'ouest et le sud de la Côte d'Ivoire. Ils sont estimés *indurés peu profonds* et aux propriétés physiques *médiocres*.

2.1.3. Les bassins versants

Trois bassins versants ont été équipés dans le cadre du Programme Hyperbav (cartes hors-texte):

- **Booro-Borotou Principal**, 1,36 km , qui est l'objet essentiel de ce travail ;
- **Booro-Borotou Amont**, 0,455 km , qui constitue un sous-bassin du précédent ;
- **la Séné à Touresso**, 111 km , qui contient les deux bassins de Booro-Borotou.

Les cours d'eau qui drainent ces bassins versants sont des tributaires de la Séné, affluent de moyenne importance en rive droite de la FéréDougouba (ou Bagbé) qui constitue un peu plus à l'aval avec la Boa et la Tienba le fleuve Sassandra. Le Sassandra se jette dans l'Océan Atlantique à côté de la ville qui porte le même nom (déformation du nom donné par les explorateurs portugais : *São Alexandra*). Son bassin total couvre une superficie de 75 000 km² (Girard et al., 1971).

Les caractéristiques d'installations et d'équipement de ces bassins ont été détaillées dans les rapports d'installation et de campagnes (Chevallier et al., 1985, 1986, 1987 et 1988). Elles sont résumées dans le tableau 2.101.

Ces caractéristiques ont été déterminées à partir des cartes IGN de la région (coupure de Touba au 1/200 000, 1961), d'une couverture photographique au 1/50 000 (IGN, 1954/55) et enfin d'un levé topographique précis réalisé sur le bassin versant principal de Booro-Borotou (carte h.t.), complété par une exploration détaillée du terrain.

Tableau 2.101

Caractéristiques des trois bassins étudiés

	Booro-Borotou Principal	Booro-Borotou Amont	Séné à Touresso
inform.	1092599171	1092599172	1092599173
Coordonnées géographiques exut.	08°28'53"N 07°34'43"W	08°28'35"N 07°35'07"W	08°30'19"N 07°32'28"W
Surface (km2)	1,36	0,455	111
Périmètre (km)	4,92	3,00	48,2
Indice de compacité	1,18	1,25	1,28
Longueur rect. équivalent (km)	1,62	1,08	17,9
Altitude max. (Niv. Gén. en m)	474,5	474,5	913
Altitude exutoire (Niv. Gén. en m)	426,5	439,2	394,5
Indice global de pente (m/km)	22,2	26,6	7,54
Indice de pente de Roche (1963)	0,180	0,179	0,106

A ces trois bassins versants qui constituent le dispositif de base il faut ajouter quatre stations hydrométriques complémentaires, dont la durée de fonctionnement a été plus limitée, installées pour une étude fine sur la genèse et le fonctionnement des ravines sur le bassin versant principal de Booro-Borotou (Planchon, thèse à soutenir en 1989) ; il s'agit des stations :

1092599174, *Ravine des Hollandais*, fonctionnement en 1986 et 1987 ;
 1092588175, *Ravine des Amoureux*, fonctionnement en 1986 et 1987 ;
 1092599176, *Ravine Iris*, fonctionnement en 1988 ;
 1092599177, *Protogriffe Iris*, fonctionnement en 1988.

Ces quatre installations sont décrites par Planchon et n'interviendront dans ce mémoire que pour étayer notre propos le cas échéant.

2.2. GEOLOGIQUE

Ce chapitre est issu des observations et de textes inédits de Bernard Morel (1987) et de Pierre Leblond (1988), assistés des étudiants en géologie de l'Ecole Nationale Supérieure des Travaux Publics de Yamoussoukro.

2.2.1. Situation géologique

Le secteur étudié appartient à la carte géologique au 1/500 000 d'Odienné. Il a été cartographié comme une zone de *granite à hypersthène* contenant des lentilles de *quartzites à magnétites et amphibolo-pyroxénites plagioclasiques à hypersthène* (Couture, 1968). Il n'existe pas d'étude géologique relative à cette région en dehors de la carte, sauf un court article de Couture (1951) et une note inédite de Pougnet 1955) que résume Bessole (1977).

D'après Pougnet, la zone d'étude ferait partie de la série ferrifère de Touba appartenant au socle libérien du domaine guinéen. Une datation a été effectuée sur un *granite migmatitique* de la région de Ngolodougou (8°25'N - 7°38'W) et a donné un âge de 1929 ± 45 millions d'années (Bonhomme, 1962), ce qui correspondrait au Birrimien.

2.2.2. Formations géologiques

Quatre formations couvrent l'essentiel de la région (limitée au bassin versant de la Séné à Touresso) (cartes hors- texte); il s'agit :

- de *gneiss migmatitique à hypersthène*, de loin la plus importante ;
- de *gneiss migmatitique à biotite*;
- d'*amphibolo-pyroxénite plagioclasique*, en lentilles dans les gneiss ;
- de *quartzites*, également en lentilles et formant des ensembles complexes où dominent les *quartzites à pyroxène-grenat* et les *quartzites à magnétite* intimement liées, accompagnées parfois par des faciès à *sillimanite*.

Deux autres formations sont aussi cartographiables, mais occupent moins de 1% de la surface. Ce sont :

- le *gneiss à cordiérite-sillimanite-grenat* ;
- des filons de *microgabbro kimberlitique*.

On rencontre également de petits filons tardifs de *granite à biotite* et de *granite à amphibole*.

Il est intéressant de décrire rapidement le mode de gisement et l'aspect macroscopique de ces formations :

2.2.2.1. Les formations gneissiques

Gneiss migmatitiques à hypersthène :

A eux seuls, ils occupent 80% de la région étudiée. Ils affleurent sous forme de vastes dalles ou de dômes (dos de baleine) et d'inselbergs. Ils ont l'aspect d'une roche mésocrate, gris clair à gris foncé, avec des colorations brun verdâtre caractéristiques du faciès. Ils ont à grain moyen localement riche en ferro-magnésiens et présentent un litage fruste se transformant par endroit en une simple orientation minérale.

Gneiss migmatitiques à biotite :

Ils affleurent essentiellement sous forme de dômes ou inselbergs. Ce sont des roches claires, blanc grisâtre, souvent rosées, à grain moyen, relativement pauvres en ferro-magnésie. Le litage est souvent bien visible mais peut devenir très fruste. Ils se distinguent du faciès précédent par l'absence de coloration brun verdâtre typique du gneiss migmatitique à hypersthène. Il existe localement de petites enclaves d'amphibolite dans cette roche.

Gneiss à cordiérite-sillimanite-grenat :

Peu fréquents, ce sont des gneiss hyperalumineux affleurant à deux endroits dans la région (ouest de Massabouédougou et au pied de la colline 669 vers Desséné) sous forme de dalles ou de petits dômes se débitant en blocs. C'est une roche assez sombre dans son ensemble, qui est formée, plutôt que par une succession de lits, par de petites lentilles ou boudins quartzo-feldspathiques dont les contours sont soulignés par un réseau dense composé d'un ensemble biotite-sillimanite-cordiérite. Cette dernière n'est généralement pas déterminable à l'oeil nu. Les grenats se répartissent de préférence dans les passées sombres, mais on les rencontre aussi en moins grand nombre dans les zones quartzo-feldspathiques.

2.2.2.2. Les formations lenticulaires

Amphibolo-pyroxénites plagioclasiques :

La plupart du temps, elles affleurent en un alignement de boules de diamètre décimétrique à métrique occupant parfois d'assez vastes surfaces. Elles sont souvent associées à des quartzites à magnétite et/ou grenat. On peut parfois les observer en place dans les gneiss migmatitiques où elles forment des lentilles de taille variable généralement discordantes sur le litage des gneiss. En fait on constate que cette discordance est fonction de la taille des lentilles ; c'est à dire que, si celle-ci est de petite dimension, le litage des gneiss et l'orientation de la lentille seront sensiblement parallèles. Par contre si les dimensions de la lentille sont importantes, alors les directions respectives vont faire un angle qui peut aller jusqu'à 90°. C'est une roche mélanocrate à grain fin à moyen, riche en ferromagnésien se regroupant parfois en petites taches et en plagioclases. Les minéraux peuvent présenter une légère orientation, mais dans la plupart des cas, la roche apparaît avec une texture grenue homogène.

Quartzites :

On peut en distinguer trois types principaux : les quartzites à pyroxène grenat, les quartzites à magnétite et les quartzites à sillimanite. Les deux premiers types sont de loin les plus importants et les seuls cartographiables. Ces roches forment des complexes où ces différents faciès alternent, mais où généralement l'un prédomine largement sur l'autre. De plus elles sont très souvent associées à des amphibolo-pyroxénites. Elles forment des collines pentues, herbacées, à sommet plus ou moins arrondi d'aspect caractéristique constituant les plus hauts sommets de la région (914 m), mais aussi de petites bosses très arrondies à pente douce. Paradoxalement on les trouve peu souvent à l'affleurement proprement dit, mais plutôt sous forme de blocs épars, parallélépipédiques, dont les dimensions n'excèdent que rarement plusieurs décimètres. Nous avons pu observer quelques petits blocs en inclusion dans des gneiss migmatitiques. Les quartzites à pyroxène-grenat sont des roches sombres à gros éclat caractéristique, assez finement grenue où apparaît localement une sorte de litage souligné par de petites bandes quartzieuses ou à pyroxène-grenat. Les minéraux, à part le quartz, sont souvent difficilement visibles, mais exceptionnellement, ils peuvent atteindre un centimètre de diamètre. Les quartzites à magnétite sont des roches bien litées où alternent des lits plurimillimétriques à pluricentimétriques de quartz et de minerais parfois fortement plissotés. Ces lits peuvent atteindre des dimensions métriques (ouest de Ngolodougou). Un quatrième type de formation est plus rare : les quartzites à sillimanite qui sont des roches massives, blanches, finement grenues.

2.2.2.3. Les formations filoniennes

Microgabbros kimberlitiques :

Localisés dans la moitié nord du terrain, ils apparaissent sous forme de filons longs et étroits discordants dans les gneiss migmatitiques, ou sous forme d'un alignement de boules pluridécimétriques. C'est une roche mélanocrate paraissant finement grenue et où une texture doléritique est parfois visible. La présence de petites taches sombres d'olivine mouchetant la roche est souvent caractéristique.

Granites filoniens :

Ils sont en mince filons, ne dépassant pas un mètre de large, sécants sur le litage des gneiss migmatitiques. Ils sont rares sur le terrain. On en distingue deux sortes : un granite à grain fin, à biotite, de couleur rosâtre, peu riche en ferromagnésien et un granite à grain moyen, à amphibole, de teinte blanche, un peu plus riche en ferromagnésien.

2.2.3. Relations entre les formations géologiques

2.2.3.1. Relation des formations gneissiques entre elles

Le passage d'une formation gneisso-migmatitique à une autre n'est pas net quoique très rapide. On peut ainsi observer sur le terrain des *zones mixtes* où les faciès à hypersthènes alternent avec ceux à biotite seule. Il semble que les gneiss migmatitiques à biotite forment comme des *îlots* ayant résisté à une migmatitisation plus poussée qui se traduit par la présence d'orthopyroxène et par un litage généralement beaucoup plus fruste dans les gneiss à hypersthène. Le gneiss à cordiérite-sillimanite-grenat semble lié au faciès à biotite à l'intérieur duquel il formerait des passées hyperalumineuses. Là encore l'association cordiérite-sillimanite-grenat indique un métamorphisme de moins haute intensité (amphibolite faciès de basse pression) que celui qui préside à l'apparition de l'orthopyroxène (granulite faciès).

2.2.3.2. Relations des formations lenticulaires entre elles

A l'affleurement les trois faciès se présentent soit seuls, surtout si la lentille est de petite dimension, soit en association deux par deux ou, plus rarement, les trois ensembles. Les quartzites à sillimanite forment des passées au sein des autres quartzites. Souvent l'un des faciès prédomine largement sur les autres. Les contacts entre ces différentes roches sont nets et elles peuvent former des alternances de lits à l'intérieur des lentilles.

2.2.3.3. Relations formations gneissiques / formations lenticulaires

Les formations lenticulaires sont en général en contact franc avec l'encaissant. En certains endroits on observe des phénomènes d'assimilation des amphibolopyroxénites par les gneiss.

2.2.4. Relations formations géologiques / cuirasses latéritiques

Si on compare la carte d'affleurement où sont répertoriées les zones à cuirasses latéritiques et la carte géologique, on constate que la répartition de ces zones est assez indépendante de la nature des formations géologiques ; toutefois, il existe certaines relations particulières entre ces cuirasses et les quartzites.

On peut observer sur le terrain quatre types de gisements baptisés par nous en *plateau*, en *auréole*, en *atoll* et en *terrasse*, et au moins deux niveaux de cuirassements :

- *gisements en plateaux* : c'est le plus fréquent, la cuirasse occupe alors une grande surface en continu (jusqu'à 4 km²) et camoufle complètement les formations géologiques.
- *gisements en auréole* : dans ce cas la zone cuirassée cerne plus ou moins complètement un affleurement rocheux (inselberg ou colline de quartzite) et se trouve en contact direct avec celui-ci. Dans certains cas on a pu observer que la cuirasse était *posée* directement sur la roche saine sans altérite entre les deux.
- *gisements en atoll* : type particulier que l'on observe autour de certaines collines de quartzites ; la cuirasse forme des îlots discontinus plus ou moins grands entourant à une certaine distance l'affleurement rocheux.

- *gisement en terrasse* : strictement associé aux formations lenticulaires, la cuirasse forme alors une terrasse suspendue au flanc des collines de quartzites et d'amphibolopyroxénite. Cette disposition particulière suggère que cette terrasse est un lambeau d'un niveau cuirassé plus ancien non encore repris dans la formation actuelle. Cette impression semble confirmée par l'existence de quelques petites et rares *buttes témoins* de cuirasses surplombant le principal niveau cuirassé.

2.2.5. Etude structurale

2.2.5.1. Les déformations cassantes

La région semble marquée par une grande direction de fracturation : N 130°, accompagnée par des cassures N 0-10° et N 80°. Les directions de filons soulignent les orientations précédentes, surtout la N 0° et rajoutent une direction N 100- 110°.

Les directions N 130° et N 0° ressortent bien aussi en photos aériennes et photos LANDSAT et semblent donc les deux directions majeures pour la région.

2.2.5.2. Les déformations souples

Les gneiss migmatitiques semblent affectés par de grands plis isoclinaux, pluri-kilométriques à pluri-hectométriques à plan axial vertical et flancs parallèles, ce qui se traduit par une grande homogénéité dans la répartition de la schistosité.

2.2.6. Approche géophysique (d'après Leblond, 1988)

2.2.6.1. Objectifs et méthodes

Pour améliorer la connaissance de la zone souterraine du bassin versant, il est nécessaire d'avoir une bonne idée des formations aquifères constituées par les altérites et la partie superficielle altérée ou fracturée du socle métamorphique connu par les quelques affleurements dispersés sur le bassin.

Une campagne géophysique a pu être menée sur le bassin, malheureusement sommaire, de nombreux problèmes techniques ayant entravé le bon déroulement des mesures. Ses objectifs étaient :

- déterminer l'existence et la position des discontinuités géologiques et structurales du socle masqué par les altérites ;
- déterminer les variations relatives de l'épaisseur du manteau d'altération ;
- établir les relations susceptibles d'exister entre les zones cuirassées superficielles et la morphologie du toit du socle ;
- éventuellement définir les limites d'extension latérale des systèmes pédologiques et la présence de réservoir souterrain.

La méthode retenue est celle du dispositif Schlumberger tant pour les sondages électriques que pour les profils de résistivité.

Sondages électriques.

Il permettent d'évaluer en un point donné les couches d'*isorésistivité* du sol et donc d'avoir une indication sur l'alternance des différents horizons, la profondeur du manteau d'altération et la position du toit de la roche mère.

Profils de résistivité

Ils consistent à mesurer le long de transects (profils) la résistivité électrique pour un écartement constant des électrodes. On estime que les résultats obtenus concernent les caractéristiques du souterrain à une profondeur égale au 1/10 ème de l'écartement. A Booro-Borotou 9 profils de résistivité ont été réalisés pour des écartements de 40 m et de 70 m. On établit à partir de ces profils des cartes d'isorésistivité permettant de déceler des anomalies que l'on interprète en terme de positionnement du socle ou d'épaisseur de l'altération.

2.2.6.2. Résultats

Nous ne disposons des résultats que de deux sondages électriques dont la localisation n'est pas précisée. Cependant ils donnent des indications intéressantes sur l'ordre de grandeur :

- sondage SE1 : l'altération apparaît à 6 m et le socle serait à 19,5 m.
- sondage SE2 : une altérite homogène (en résistivité) apparaît à 10,4 m et le socle serait à près de 46 m.

Les cartes de résistivité apparentes (figures n° 2.201 et 2.202) mettent en évidence plusieurs zones à anomalies contrastées. Les géologues en tirent les conclusions suivantes :

- un épaissement progressif des altérites (qui sont semble-t- il essentiellement composées de kaolinites) en direction de l'exutoire ;
- une alternance des zones à résistivité faible ou élevé qui correspond probablement à l'alternance entre les formations gneissique et amphibolitiques ;
- un ensemble d'accidents importants qui recourent cette structure.

2.2.6.3. Conclusion

Leblond conclut :

La position et l'orientation des grandes zones de discontinuité géologique sont définies. Elles sont allongées selon deux directions majeures : NM 0° à 10° E et NM 40° à 60° E et une direction secondaire NM 80° à 90° Est. Les anomalies superficielles ont sensiblement les mêmes orientations ; la présence des niveaux gravillonnaires n'entraîne que des déviations mineures.

L'épaisseur du manteau d'altération est sensiblement plus importante vers le nord-est dans la région de l'exutoire que dans la partie centrale ou la périphérie du bassin.

Pratiquement on peut interpréter ces conclusions en notant qu'il n'y a pas sur le bassin versant de Booro-Borotou de fracture géologique majeure autorisant une fuite vers le bas des réserves hydriques. De plus il est probable que le toit du socle est très accidenté, offrant un ensemble d'ondulations d'assez grande amplitude. Les directions sont approximativement perpendiculaires à celle du talweg et correspondent aux directions structurales des ensembles géologiques et pédologiques du bassin décelables à partir des observations superficielles.

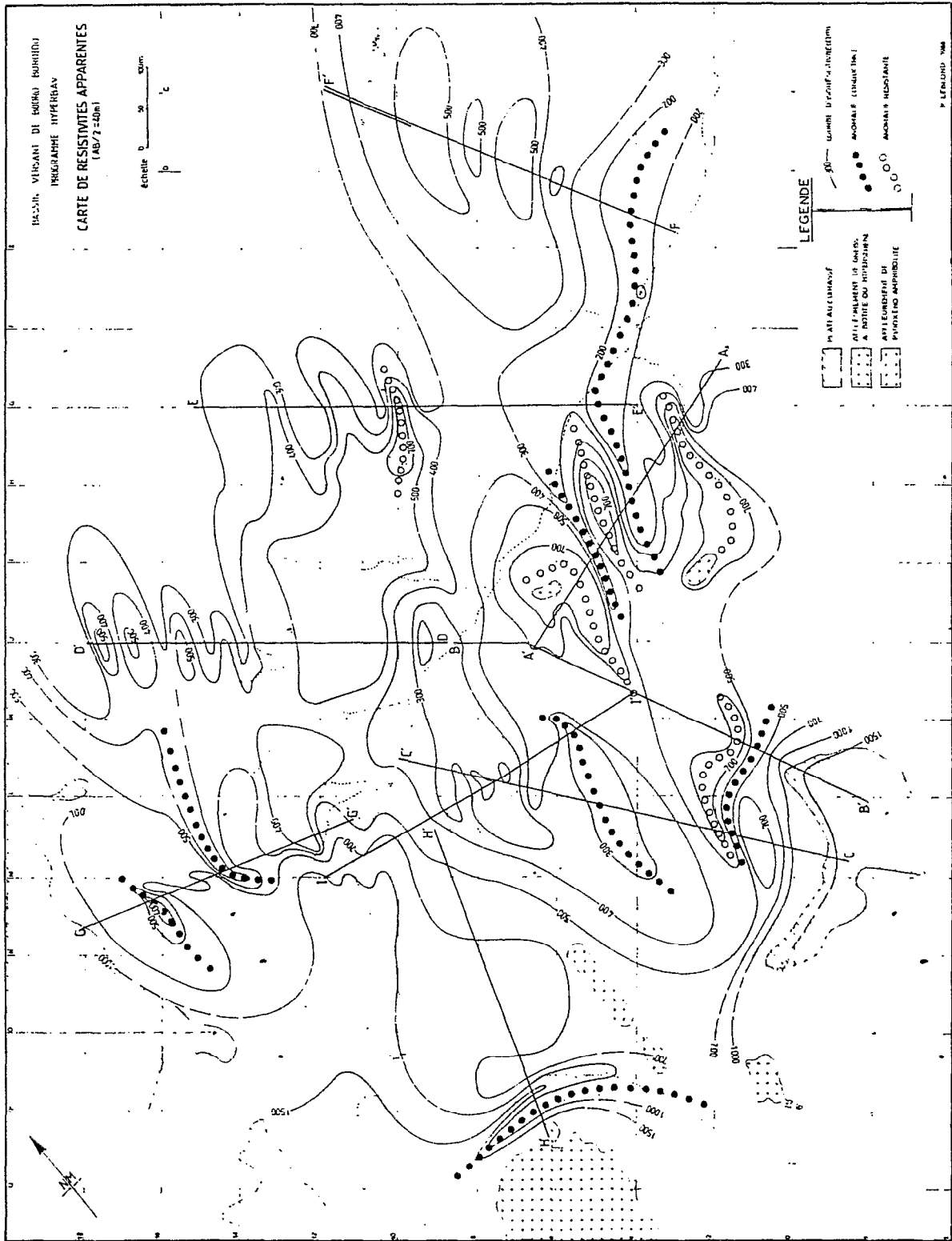


FIG. 2.201 : CARTE DES RESISTIVITES APPARENTES
demi distance : 40 m

LEBLOND, 1988

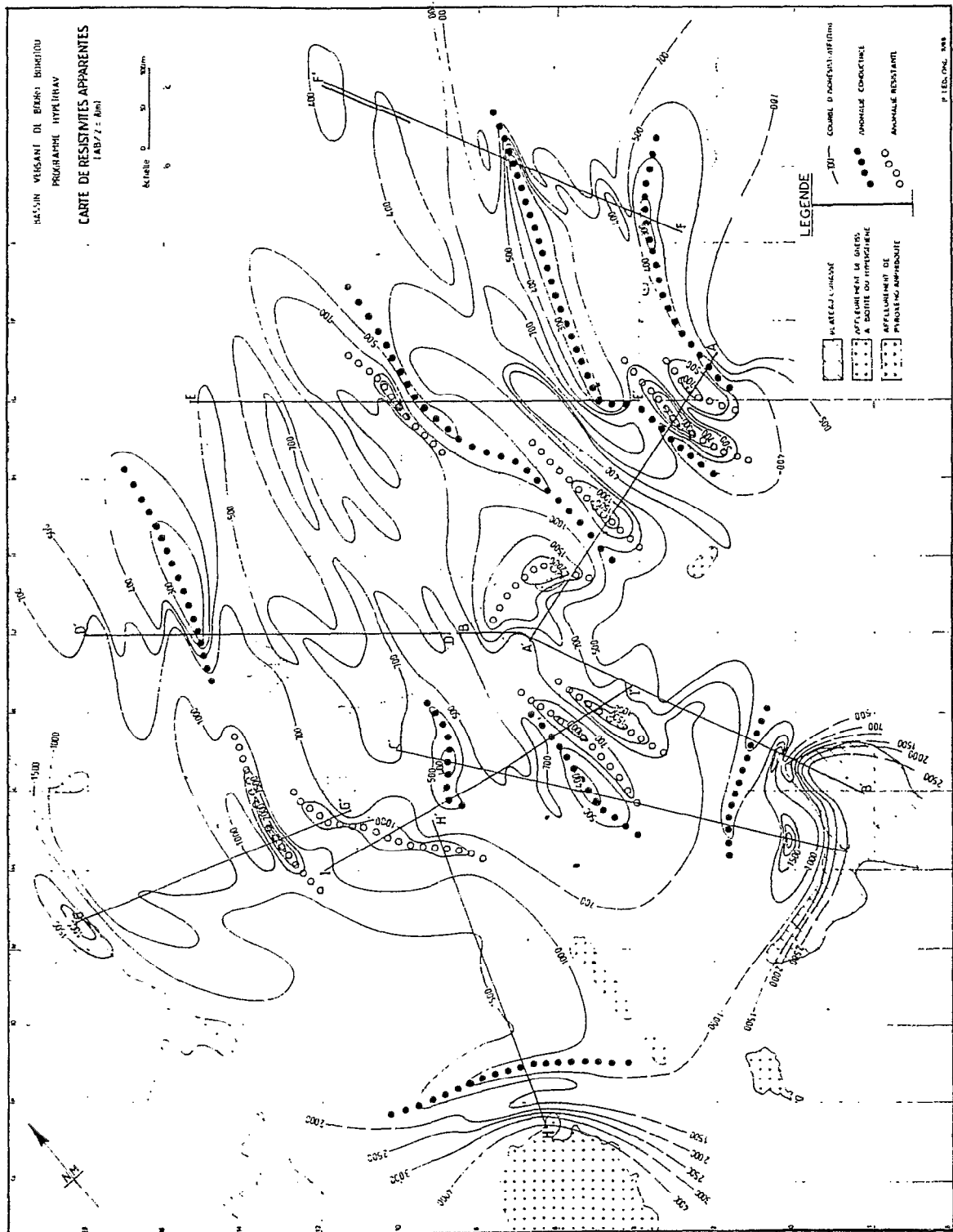


FIG. 2.202 : CARTE DES RESISTIVITES APPARENTES
demi distance : 70 m

LEBLOND, 1988

2.3. PEDOLOGIE

Les cinq premiers points de ce chapitre sont issus d'un texte rédigé par Olivier Planchon à partir de ses propres travaux et de ceux de Jean-Marc Iris et d'Emmanuel Fritsch. Le sixième point est rédigé à partir des travaux de Christian Valentin.

2.3.1. Présentation générale

Les plateaux cuirassés qui bordent le bassin sont les reliques d'une formation pédologique ancienne, au détriment de laquelle se sont formés les sols du bassin. C'est le domaine *ferralitique*. Trois systèmes pédogénétiques ont contribué à la formation de ces sols : un *système ferrugineux*, un *système cuirassé* et un *système hydromorphe*. Ces systèmes sont *a priori* indépendants les uns des autres, si bien que, selon leur extension relative, chacun d'entre eux peut transformer des matériaux issus de n'importe quel autre. Néanmoins il existe pour chacun d'eux une partie du bassin où leur activité est la plus importante et où c'est l'un d'entre eux, à l'exclusion des autres, qui marque le paysage géomorphologique.

2.3.2. Le domaine ferralitique.

Paysage associé : plateaux et talus

Extension : 10,7 % de la superficie du bassin

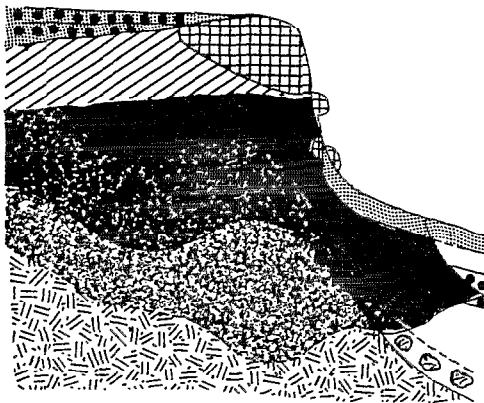
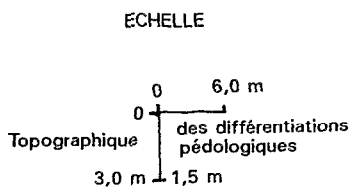
2.3.2.1. Pédogenèse

Les formations cuirassées des plateaux ont le plus souvent un faciès altéritique : elles se seraient différenciées directement dans le manteau d'altération. Elles sont actuellement en phase de régression, ce qui est un phénomène omniprésent en Afrique de l'Ouest, comme le précise Leprun (1977) citant Muller (1974). Ici, la régression se fait d'une part en profondeur au profit d'un horizon rouge argileux, et d'autre part en surface au profit d'un horizon gravillonnaire.

L'horizon rouge qui se développe en profondeur est un matériau typiquement ferralitique. Il a pu être décrit en de nombreux endroits en Afrique de l'Ouest sur des roches mères très variées (par Chauvel, Bocquier et Pédro -1977- sur des grès argileux de Casamance au Sénégal ou par Muller au Cameroun). Il est caractérisé par une structure appelée pseudo-sables par les micro-morphologues. Ce sont des petits amas globulaires de 100 microns environ, constitués de kaolinite et d'hydrates de fer englobant des grains de quartz. Ces pseudo-sables s'assemblent eux-mêmes par entassement, laissant entre eux de nombreux vides communicants.

Ce matériau s'est probablement formé dans des sols profonds et en climat tropical humide. Rapproché de la surface et sous un climat plus sec que celui qui a permis sa formation, il est en déséquilibre et se transforme selon des mécanismes déjà décrits par Chauvel, Bocquier et Pédro (1977) dans les sols de Casamance au Sénégal. A Booro-Borotou, ces transformations sont très avancées mais sous les cuirasses des plateaux on peut encore observer des poches de pseudo-sables ayant conservé leur structure originelle.

En surface la dégradation de la cuirasse se fait par l'intensification de la ségrégation du fer et conduit à la formation d'une nappe de gravillons ferrugineux pisolitiques selon un mécanisme décrit par Nahon et Millot (1977). La figure n° 2.301 illustre ces transformations.











-  Horizon humifère brun rougeâtre et de pénétration humifère rouge brunâtre A a AS
-  Horizon rouge A
-  Horizon glébulaire (nodules concrétions...)
-  Blocs de cuirasse
-  Cuirasse
-  Carapace
-  Horizon rouge A à noyaux altéritiques
-  Isaltérite à nombreux macropores tubulaires contenant matrice rouge A
-  Isaltérite à structure grenue ou granoblastique conservée et à coloration lithochrome (blanc-jaune, rouge foncé)

FIG 2.301: Les altérations et les différenciations des sols du domaine ferrallitique (plateau, talus) (d'après Fritsch et al., 1986)

2.3.2.2. Géomorphologie

Les plateaux ont des pentes faibles, inférieures à 4 %. Pour l'une des quatre buttes du bassin versant la surface du plateau est concave et les eaux de ruissellement forment une petite mare d'eau stagnante en saison des pluies.

Les plateaux sont raccordés aux versants par des talus de 6 mètres de dénivelée. La pente moyenne des talus est en général de 25 % mais peut être localement plus douce (13 %), selon l'état de dégradation de la cuirasse. Lorsque la cuirasse est encore massive, le raccord avec le talus est brutal, la pente est concave et forte ; alors que, lorsque la cuirasse est déjà fracturée en gros blocs, la pente du talus est convexo-concave et plus faible.

2.3.3. Le système ferrugineux

Paysage associé : pentes rectilignes de haut de versant.

2.3.3.1. Pédogenèse

C'est un système exclusivement soustractif qui appauvrit les sols en fer et en argile à partir de la surface. Cet appauvrissement entraîne une dégradation de la structure du sol, dont l'origine est l'effondrement de la structure initiale des pseudo-sables, qui se transforme brutalement en une structure plus classique, polyédrique subanguleuse (PSA), où les sables ne sont plus entourés par le complexe kaolinite-hydrates de fer et jouent donc le rôle classique de squelette. Le tableau 2.301 décrit les étapes de cette dégradation.

La première étape est marquée par la disparition des pseudo-sables. La couleur passe graduellement de 2,5 YR à 5 YR. Les caractéristiques du sol restent bonnes au sens agronomique. La structure est fine et très bien marquée.

L'étape suivante de la dégradation donne des sols ocres sablo-argileux ou argilo-sableux, de structure polyédrique subanguleuse peu nette. En saison sèche la structure peut devenir massive et compacte ; le sol se débite en éclats ; la macroporosité n'est représentée que par quelques pores tubulaires d'origine faunique. Le changement de couleur, qui passe de 5 YR à 7,5 YR est généralement concordant avec la dégradation de la structure, mais ce n'est pas systématique si bien que l'on peut observer dans les toposéquences les plus à l'aval du bassin des sols de type *ocre*, mais dont la couleur est encore rouge. La dégradation donne ensuite des sols jaunes, sableux ou sablo-argileux. La structure est massive mais de cohésion plus faible que dans les sols ocres.

Le stade ultime de dégradation donne des sols sableux, blancs, bouillants. Ce stade est également le stade ultime de l'évolution du système hydromorphe.

2.3.3.2. Extension et évolution

Le système se développe dans un premier temps de l'amont vers l'aval, si bien qu'*a priori* les sols les plus rouges se trouvent à l'amont des versants, et les sols les plus décolorés se trouvent en bas de versant. Mais ce schéma simple est perturbé par la présence d'une induration à mi-versant qui dans un deuxième temps bloque l'évolution du système. On peut dans les cas extrêmes aboutir à l'inversion du premier schéma et trouver les sols les plus colorés à proximité de la mi-versant alors que les sols de haut de versant auront continué leur évolution et seront donc plus dégradés. Enfin dans un troisième temps l'évolution dépasse le niveau induré et atteint l'ensemble du versant.

Tableau n°2.301

Principales caractéristiques des sols dans le système ferrugineux

	domaine	système ferrugineux			
	ferrallitique	Rouge	Ocre	Jaune	Blanc
Superficie (en % de la superficie du b.v.)	10,7	39,4	33,0	9,3	5,9
<i>Horizon humifère</i>					
Couleur	brun-rouge	brun-noir	brun	noir ou gris	noir ou gris
Code	2,5 YR 4/4 5 YR 3/2	5 YR 3/2	7,5 YR 4/3 7,5 YR 4/2	10 YR 3/1 10 YR 5/2	10 YR 3/1 10 YR 5/2
Teneur en argile	33 %	30 %	15 à 20 %	3 à 10 %	3 à 5 %
Structure principale					
Type	nuciforme	nuciforme	PSA	nuciforme compacte	nuciforme compacte
Structure secondaire					
Type	micropédique	micropédique	nuciforme		
<i>Premier horizon minéral</i>					
Couleur	rouge	rouge	ocre	jaune	blanc
Code	2,5 YR 5/6	2,5 à 5 YR 4/6 à 5/5	7,5 YR 5/6	10 YR 6/4	10 YR 7/1
Teneur en argile	70 %	54 %	30 à 40 %	5 à 25 %	5 %
Structure principale					
Type	pseudo-sable	PSA à faces de compression	PSA massive en saison sèche	massive	boulante
Structure secondaire					
Type			se débite en éclats		

Cette évolution est schématisée dans l'espace et dans le temps par la figure n°2.302.

La carte des sols (hors texte) présente l'extension cartographique des différentes unités du système. L'affluement du système cuirassé a également été représenté. Les toposéquences qui ont permis de décrire les trois stades de la figure n°2.302 sont figurées sur la carte.

ECHELLE

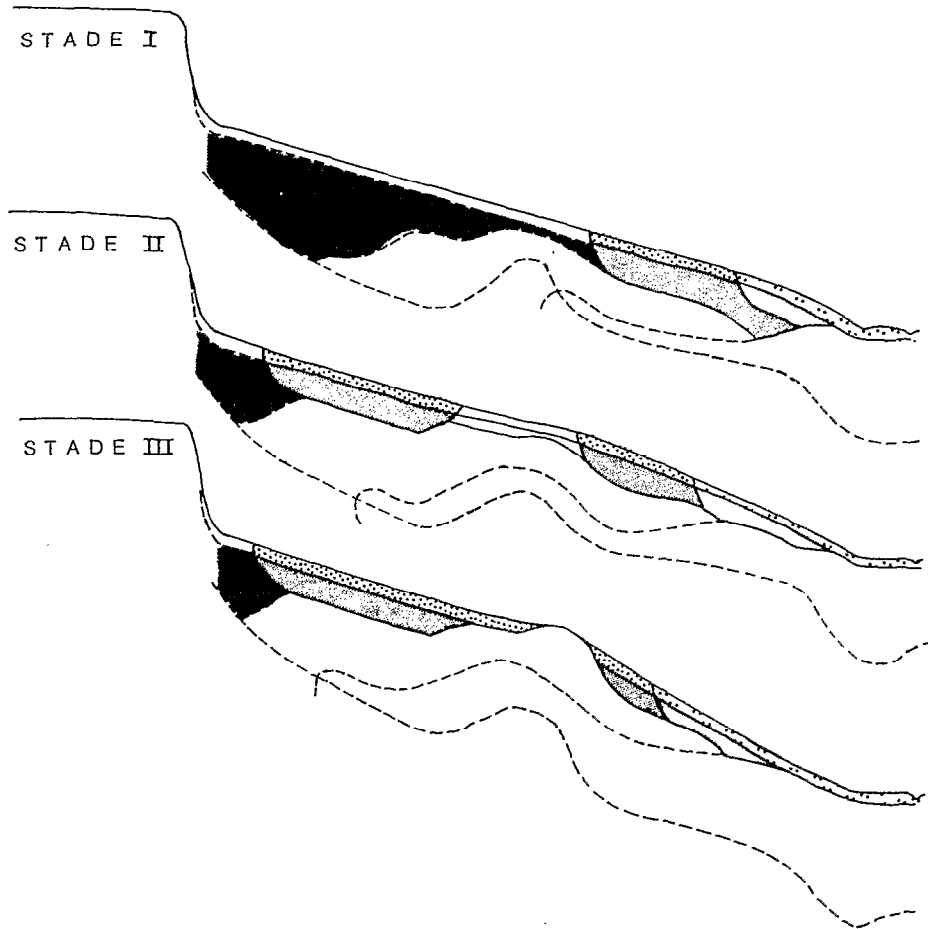
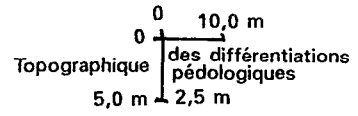


FIG 2.302 L'extension dans l'espace et dans le temps des différenciations du système transformant supérieur amont dans la formation supergène

(d'après Fritsch et al., 1986)






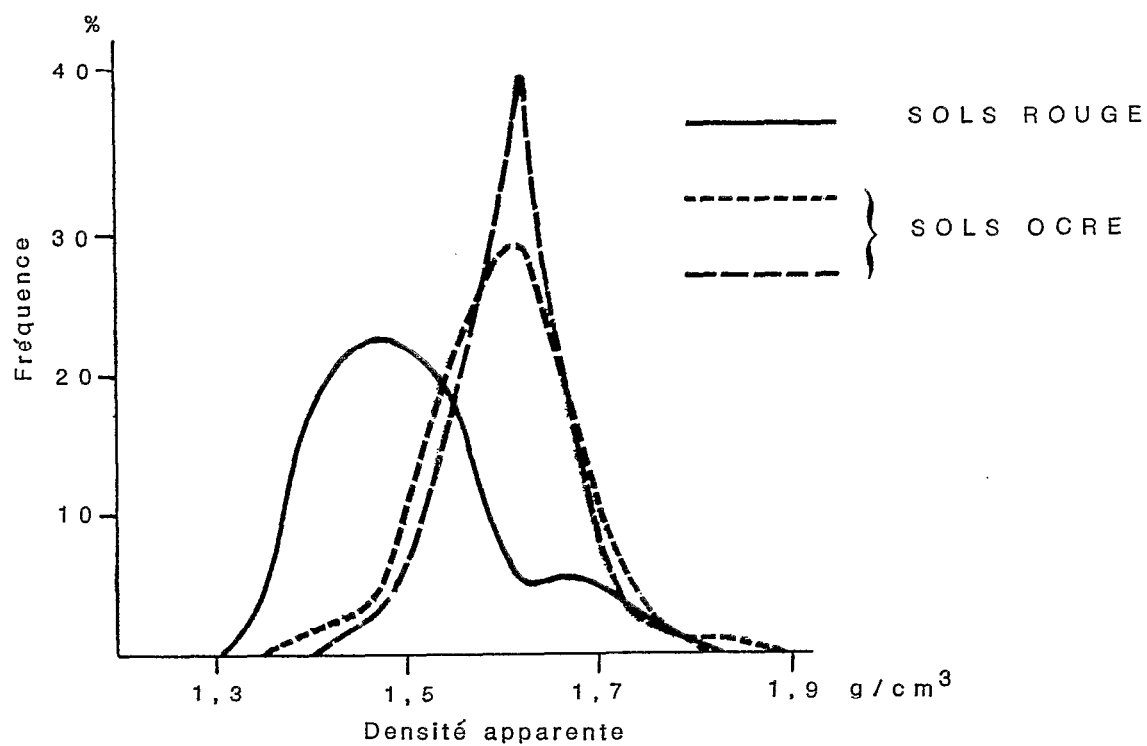
-  Horizon rouge A
-  Horizon humifère brun foncé SA et de pénétration humifère ocre brunâtre SA a AS
-  Horizon ocre AS
-  Horizon humifère gris foncé S et de pénétration humifère brun-jaune S a SA
-  Horizon jaune SA a S

FIG 2.303 : DISTRIBUTION DES VALEURS DE DENSITE APPARENTE
DANS LES SOLS ROUGES ET OCRES
(d'apres Iris, 1986)



La dynamique de l'évolution du système a été étudiée par Iris (1987). L'étude porte sur la variabilité spatiale de la densité apparente dans les sols rouges et les sols ocres. La figure n°2.303 montre que les sols rouges et les sols ocres sont bien identifiés par la distribution des valeurs de densité apparente, et permet de considérer cette valeur comme caractéristique des deux sols. Elle correspond à l'effondrement de la structure du sol, déjà décrite. L'étude de sa variabilité spatiale a permis à l'auteur de formuler des hypothèses sur l'évolution pédodynamique de ces matériaux ainsi que sur leur état d'équilibre.

L'étude confirme que les matériaux rouges sont en déséquilibre avec les conditions du milieu. L'effondrement de la structure macroscopique s'effectue brutalement et sous l'effet de modifications mineures, telles que l'ouverture d'un chablis. A ces transformations brutales succède une évolution plus régulière de la structure dans les matériaux ocres sous savane qui peut éventuellement être stoppée à un stade intermédiaire par la réinstallation d'un couvert forestier homogène.

2.3.3.3. Géomorphologie

A la simplicité des phénomènes mis en jeu dans ce système correspond une simplicité des paysages qui lui sont associés : les pentes de haut de versant sont rectilignes ou légèrement concaves. Le plus souvent la pente est de 4% bien que la partie nord de la rive gauche soit caractérisée par des pentes plus faibles (2%) auxquelles sont associées des paysages un peu particuliers sur le bassin. C'est là que l'on trouve la savane boisée décrite plus loin et caractérisée par la présence de très gros arbres et de plusieurs étages de couronnes. C'est également dans cette partie du bassin que le système ferrugineux, bloqué au stade 2 de la figure n°2.302, a permis l'apparition en haut de versant de sols jaunes alors que des sols rouges subsistent encore au contact de l'induration de mi-versant.

2.3.4. Le système cuirassé

Paysage associé : la rupture de pente de mi-versant

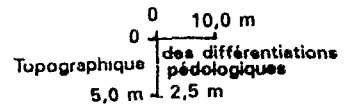
2.3.4.1. Pédogenèse








Le système cuirassé est caractérisé par l'affleurement d'une cuirasse à la mi-versant, il est toujours associé à la rupture de pente, et correspond toujours à une remontée du manteau d'altération. La figure 2.304 résume ces caractères généraux.

L'extension du système cuirassé n'est pas limitée à la seule induration de mi-versant. De l'amont vers l'aval, cinq différenciations apparaissent successivement, emboîtées les unes dans les autres (figure n°2.305). Les deux premières sont le siège d'une redistribution du fer à l'échelle centimétrique, et probablement de son exportation limitée vers l'aval. Les matériaux issus de ces différenciations sont légèrement bariolés. L'induration *stricto sensu* n'affecte, graduellement, que les trois différenciations suivantes. La redistribution du fer à l'échelle centimétrique continue, mais elle s'accompagne d'un enrichissement général en fer. On voit d'abord apparaître des réticules disjoints, légèrement indurés. Ils sont friables dans les premiers stades et sont plus secs au toucher que la matrice argileuse. Ces réticules deviennent coalescents vers l'aval, puis évoluent en carapace, et enfin en cuirasse. Toute cette évolution se fait en contact avec le manteau d'altération, si bien que des noyaux altéritiques peuvent se trouver piégés en plus ou moins grande quantité dans la cuirasse.

Enfin, ce système cuirassé se démantèle à partir de la surface de la même façon que les plateaux cuirassés, en produisant des nappes de gravillons, mais aussi à partir de la profondeur sous l'action du système hydromorphe.

ECHELLE



-  Noyaux altéritique
-  Blocs de carapace ou de cuirasse
-  Cuirasse
-  Carapace
-  Horizon légèrement bariolé à fond rouge dominant
-  Horizon bariolé à fond ocre à dominante A à AS
-  Horizon bariolé à réticules légèrement indurés disjoints puis coalescents vers l'aval (faciès pseudonodulaire)

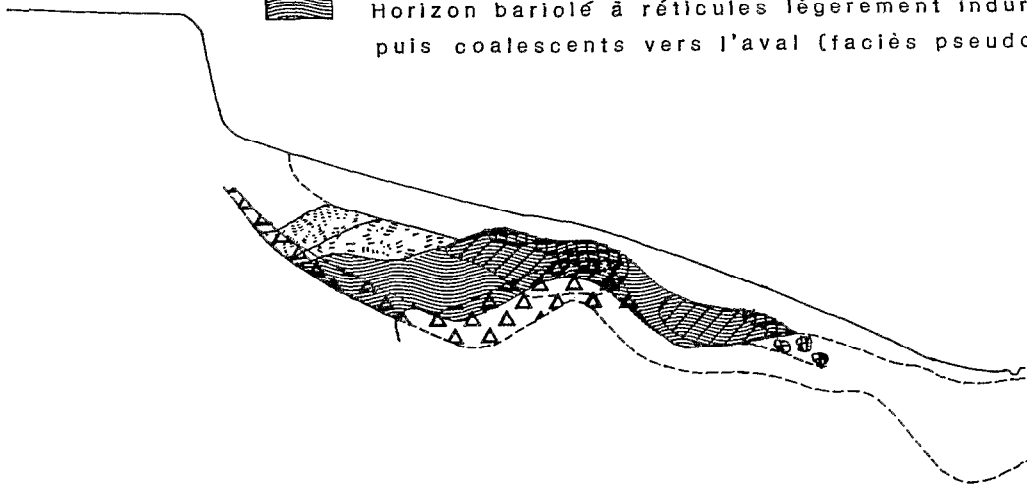


FIG 2.304

Les différenciations du système transformant inférieur amont
(d'après Fritsch et al., 1986)

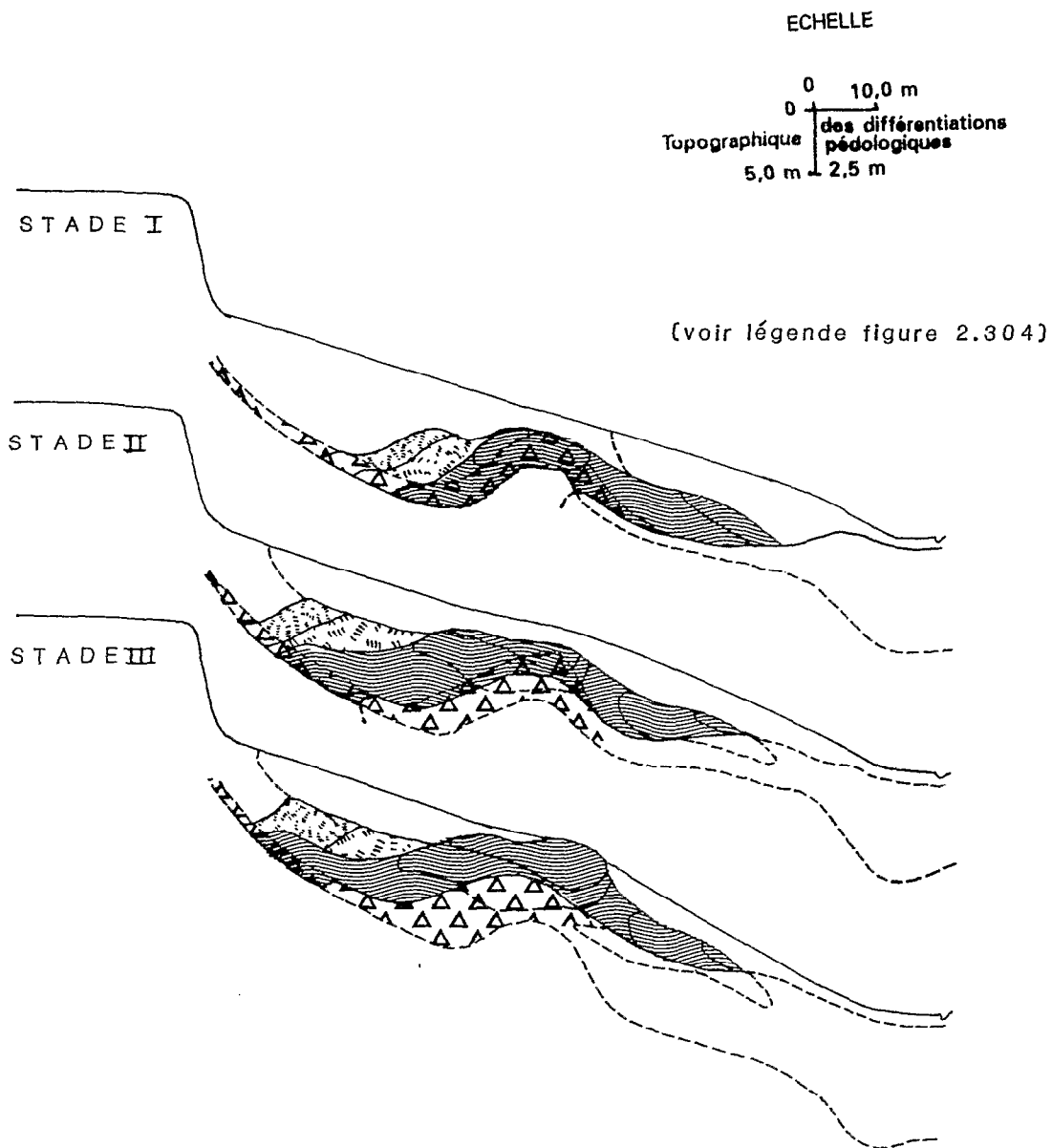


FIG 2.305

L'extension dans l'espace et dans le temps des différenciations du système transformant inférieur amont dans la formation supergène (d'après Fritsch et al., 1986)

2.3.4.2. Extension

La figure n°2.306 présente l'extension du système cuirassé. On s'est toutefois limité aux formations indurées proprement dites (cuirasse et carapace) dont l'extension est connue avec une très grande précision grâce à 1700 trous de 80 cm de profondeur creusés selon une maille régulière de dix mètres de côté au niveau de la mi-versant (Boa et Fritsch, 1987). L'extension des premiers stades de différenciation n'est connue que le long des neuf toposéquences qui peuvent être éloignées les unes des autres de 300 mètres, si bien que leur extension spatiale n'est pas connue avec une précision suffisante pour pouvoir figurer sur la même carte.

2.3.4.3. Géomorphologie

A la mi-versant les pentes atteignent 10 à 15%. L'affleurement du système cuirassé est toujours associé à une rupture de pente généralement légère, mais qui dans un cas sur le bassin prend la forme d'un petit talus abrupt d'un mètre et demi de dénivelée. Ces différences ne sont pas dues à l'évolution particulière du système cuirassé lui-même mais à celle du système hydromorphe à l'aval.

2.3.5. Le système hydromorphe

Paysages associés : le bas-fond et les bas de versants concaves.

Extension : 1,7 % de la superficie du bassin versant

2.3.5.1. Pédogenèse

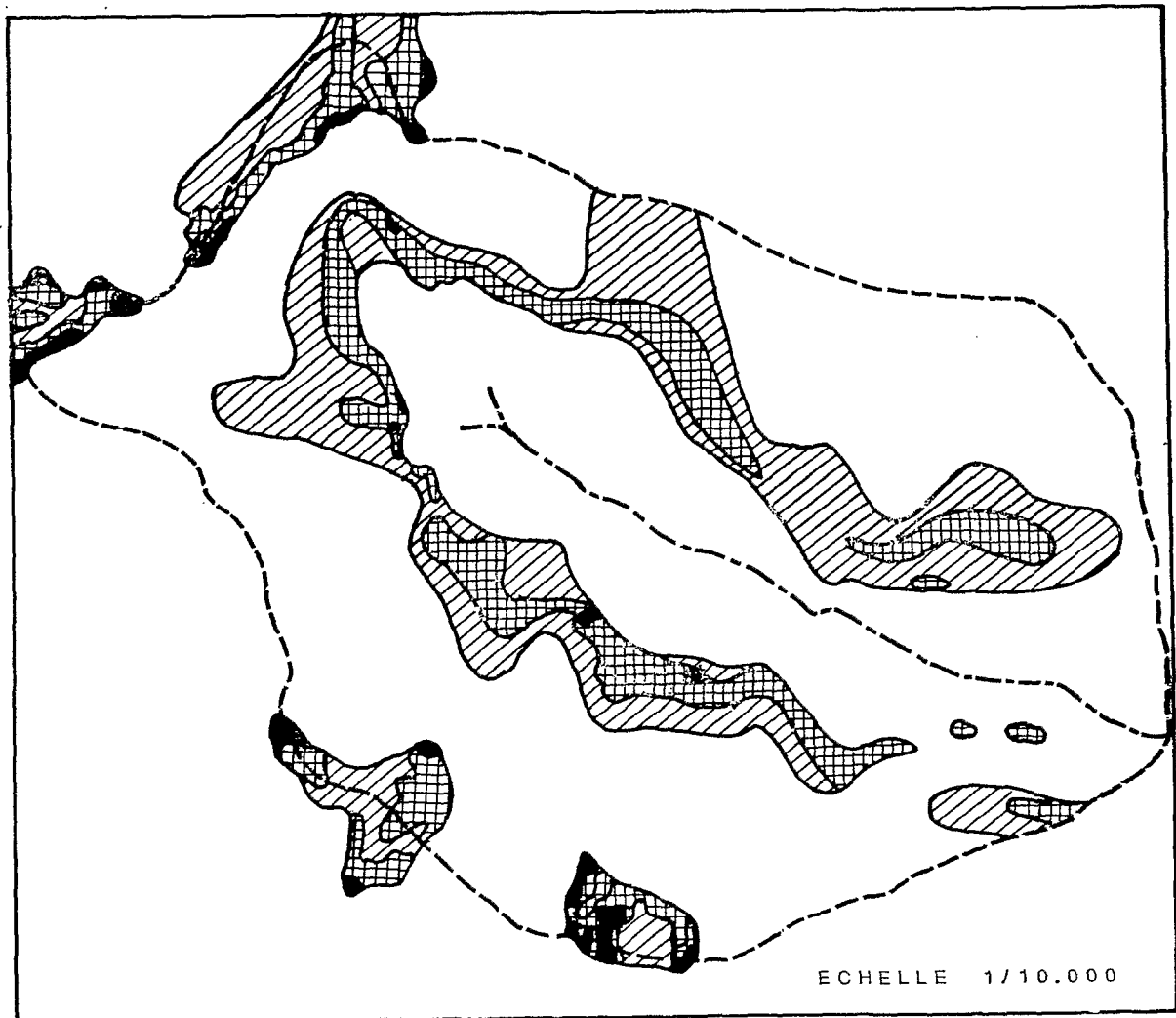
Ce système se développe au détriment des deux systèmes précédents (ferrugineux et cuirassé), et également au détriment de la zone d'altération elle-même. Les différenciations du système recoupent ainsi toutes les autres, si bien que l'on y trouve des matériaux très variés. Néanmoins, les phénomènes pédogénétiques mis en jeu sont peu nombreux et la variété des matériaux produits dépend principalement de celle des matériaux d'origine.

A l'amont du système il y a une intense redistribution du fer, et son exportation partielle vers l'aval. Ceci est à l'origine des deux premières séries de différenciations (figure n°2.307) qui sont caractérisées par des matériaux réticulés ou marbrés et dont la couleur s'éclaircit vers la profondeur.

A l'aval du système l'hydromorphie s'accroît, l'exportation du fer prend le pas sur sa redistribution et s'accompagne alors d'une exportation des argiles.




Au contact du manteau d'altération on observe parfois la néo-formation d'argile gonflante, qui est propice à l'imperméabilisation localisée de la zone d'altération.

FIG 2.306



ECHELLE 1/10.000

(d'après Fritsch et al., 1986)

-  Cuirasse affleurante
-  Cuirasse ou carapace comprise entre 0 et 45 cm de profondeur
-  Carapace a plus de 45 cm de profondeur

L'extention des formations cuirassées et carapacées dans le bassin versant de BOORO BOROTOU (plateau:Haut Glacis,Haut de versant:Moyen gris)

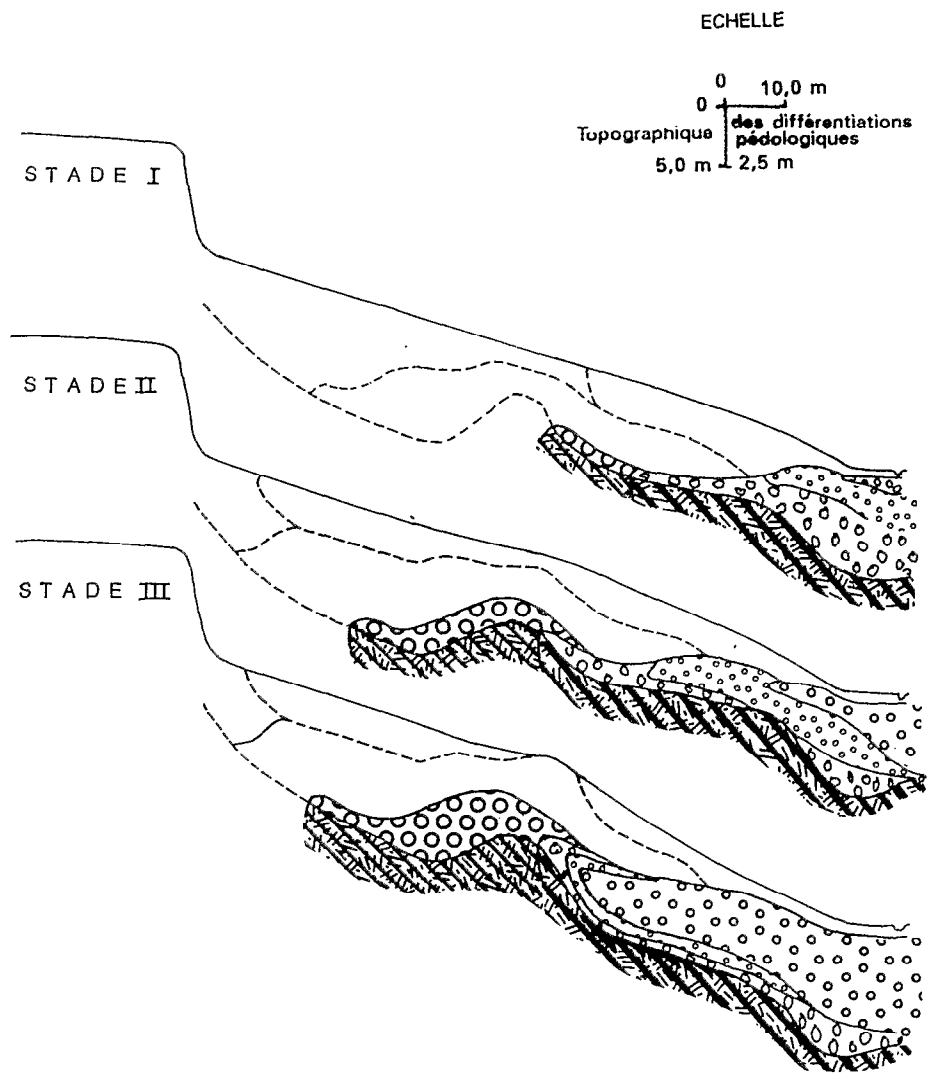


FIG 2.307 L'extension dans l'espace et dans le temps des différenciations du système transformant inférieur aval dans la formation supergène (d'après Fritsch et al., 1986)



Horizon bariolé à réticules légèrement indurés à plages blanches



Horizon bariolé à fond blanc à gris dominant (marbrures jaunes, ocre, parfois rouges). A à AS



Horizon gris à marbrures ocre, jaunes jaune pâle, SA



Horizon gris clair à blanc avec ou sans marbrures jaune pâle, S, boullant



Isaltérite marbrée : réticules rouges bordés de jaune sur fond blanc



Isaltérite hydromorphe : veines subverticales jaune ocre, jaune pâle, blanc vitreux sur fond gris verdâtre à gris bleuté



Isaltérite hydromorphe à caractère vertical : la partie supérieure de l'isaltérite et certaines veines subverticales sont nettement argileuses, fentes de retrait.

2.3.5.2. Extension et développement, géomorphologie associée

Le système se développe en remontant à partir du bas de versant le long d'axes privilégiés perpendiculaires au marigot. Ces zones de forte activité du système hydromorphe sont, d'une part, systématiquement associées au développement de pentes convexo-concaves puis concaves sur le bas de versant et, d'autre part, coïncident avec des ondulations géologiques (Leblond et Morel, 1988, document inédit).

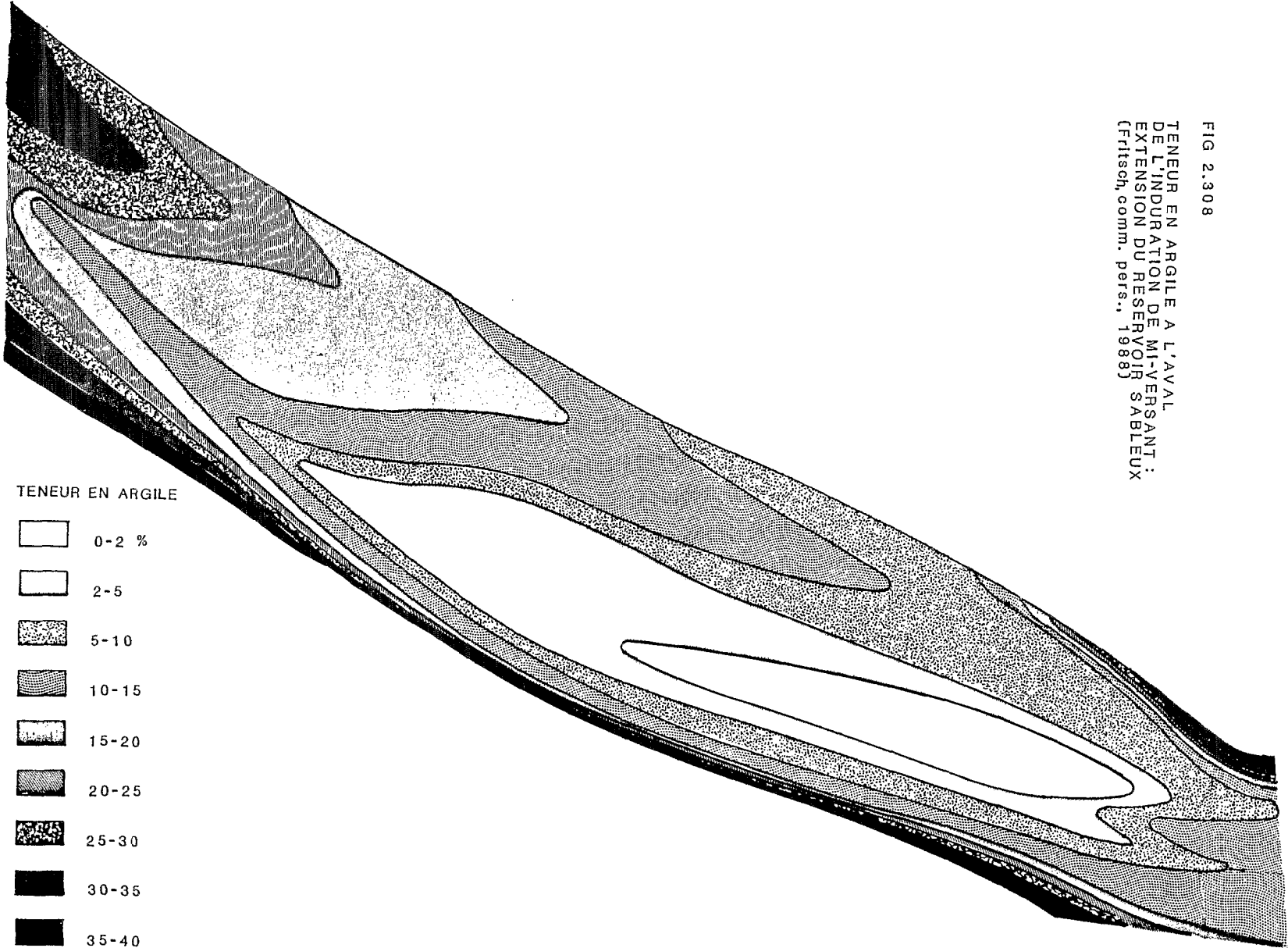
On peut ici aussi distinguer trois stades de développement du système. Dans un premier temps il est peu développé et la pente du bas de versant reste convexe jusqu'au marigot. C'est le cas général à l'extérieur des axes de développement dont nous avons parlé. Puis la pente devient convexo-concave en même temps que se développe le long de l'axe d'activité du système une dépression en forme de langue qui remonte vers la mi-versant. Le développement de ces dépressions provoque l'apparition d'ondulations des versants dont l'amplitude peut atteindre 1,5 mètres et dont la longueur est de 100 mètres environ. Sur ce point le bassin versant est très dissymétrique, les ondulations étant très développées et très régulières en rive droite, alors qu'elles sont quasiment inexistantes en rive gauche où le système hydromorphe est moins actif. Enfin dans les cas extrêmes le système peut venir *buter* sur le système cuirassé. La pente devient strictement concave et la rupture de pente de mi-versant associée au système cuirassé est très accusée. Le système est alors le lieu d'une érosion chimique importante qui permet en profondeur le développement d'une grande poche sableuse qui peut remonter dans les cas extrêmes tels que celui présenté par la figure n°2.308 jusque sous l'induration de mi-versant.

2.3.6. Les états de surface

Casenave et Valentin (1988) précisent dans un mémoire récent ce qu'il faut entendre par *état de surface* et leur intérêt pour une approche nouvelle de l'hydrodynamique superficielle. Un *état de surface* est constitué par un ensemble de *surfaces élémentaires* uniques, juxtaposées ou combinées. Une surface élémentaire intègre à un instant donné le couvert végétal, la surface du sol et les organisations pédologiques superficielles (les 10 premiers millimètres) qui ont subi des transformations sous l'effet de facteurs météorologiques, fauniques ou anthropiques.

La méthode de cartographie de ces états de surface est largement décrite dans le chapitre 17 de l'ouvrage cité. L'approche est le plus souvent réalisée par échantillonnage et tient compte d'un certain nombre de paramètres qui concernent :

- Pour le couvert végétal,
 - * les strates arborée, arbustive, herbacée et le tapis végétal ;
 - * le recouvrement des différentes strates par les résidus végétaux ;
 - * le type de la formation végétale.
- Pour la surface *stricto sensu*,
 - * le relief ;
 - * l'érosion ;
 - * l'activité faunique et les micro-horizons ;
- Les relations entre surfaces élémentaires.



TENEUR EN ARGILE

- 0-2 %
- 2-5
- 5-10
- 10-15
- 15-20
- 20-25
- 25-30
- 30-35
- 35-40

FIG 2.308
TENEUR EN ARGILE A L'AVANT
DE L'INDURATION DE MI-VERSANT :
EXTENSION DU RESERVOIR SABLEUX
(Fritsch, comm. pers., 1988)

La carte des états de surface présentée hors-texte a été dressée sur ces critères et nous les reprendrons de façon détaillée dans le chapitre 3.2 concernant la simulation de pluie.

Nous empruntons à Valentin, Fritsch et Planchon (1986) une description sommaire de ces principales surfaces :

Nous nous limiterons à certaines organisations pédologiques superficielles qui nous semblent les plus importantes quant à la dynamique de l'eau et de l'érosion. Nous laisserons ainsi de côté les surfaces à faibles réorganisations superficielles : celles qui se trouvent quasiment toute l'année sous un mulch de feuilles mortes (savane boisée, savane arbustive dense, savane boisée hydrophile et forêt galerie) ou sous un couvert herbacé très dense (savane herbeuse).

L'une des organisations de surface les plus caractéristiques du bassin s'individualise au sein de la savane arbustive claire. Elle se définit par l'existence d'un microrelief important lié aux touffes de graminées surélevées. Ces touffes sont le lieu d'une activité faunique intense alors que les plages inter-touffes présentent des réorganisations superficielles marquées (individualisation en micro-horizons sableux qui recouvrent une pellicule souvent associée à une porosité vésiculaire). C'est sur ce type de surface que les nids de *Trinervitermes* sont les plus nombreux (Janeau et Valentin, 1987). Ils sont entourés de plages nues pelliculaires dépourvues de végétation. Ce type de surface correspond à un ruissellement anastomosé marqué. Elle couvre tous les types de sols à l'exclusion des sols éluvies blancs à l'aval. Elle est peu représentée sur les sols rouges de l'amont.

La forme de ces limites laisse supposer qu'elle a tendance à régresser à l'aval et à progresser à l'amont.

En amont, elle est plus ou moins reliée à un autre type de surface qui pourrait la précéder dans le temps. Il s'agit d'organisations qui se développent en sommet de versant dans des clairières de forme digitée. Le micro-relief n'y est pas marqué. Bien que l'activité faunique y soit généralisée (nombreuses termitières de *Macrotermes*, les organisations superficielles couvrent une part importante de la surface (pellicules mamelonnées à fentes).

Les limites de la surface à fort micro-relief associé aux touffes sont nettement plus marquées à l'aval. Elles correspondent au contact assez brutal avec deux autres surfaces :

1. Dans les parties convexes, une surface *bande d'arrêt*. Il s'agit de zones caractérisées par un couvert herbacé dense, sans micro-relief, sans réorganisation superficielle. Elles apparaissent essentiellement sur des sols jaunes. En saison des pluies on y observe la disparition du ruissellement en nappe ou concentré. Ces surfaces qui assurent une infiltration importante permettent l'alimentation d'une nappe peu profonde qui affleure plus à l'aval et se déverse en une ligne de sourcins située légèrement au dessus du marigot.

2. Dans les parties concaves, la savane herbeuse. La surface de ces zones marécageuses présente un micro-relief marqué, caractérisé par une très forte activité faunique (très nombreux turricules et la présence de nombreux canalicules de ruissellement s'y observe). La limite entre ces zones dépressionnaires et la surface à fort micro-relief associé aux touffes est très souvent soulignée par la présence de nids de *Cubitermes* (termitières champignons) disposées en arc de cercle.

Signalons enfin les affleurements gravillonnaires où l'on distingue aisément d'une part les surfaces à micro-relief souvent situées à l'aplomb d'un horizon induré subaffleurant et d'autre part les surfaces planes où la carapace est plus profonde.

2.4. VEGETATION

Ce chapitre est rédigé à partir des observations et des cartes de Danielle Mitja, complétés par des entretiens.

2.4.1. Cartographie des grandes zones végétales

2.4.1.1. Méthode

L'analyse des photographies aériennes est complétée par des relevés à l'intersection des layons de repérage du bassin versant.

Six grandes zones de végétation sont différenciées (carte hors texte) essentiellement sur des critères de densité et de hauteur des ligneux :

- la forêt galerie ;
- la savane boisée ;
- la savane arborée ;
- la savane arbustive ;
- la savane herbeuse ;
- les champs.

2.4.1.2. Description sommaire des zones de végétation

a) La forêt galerie (7,4% de la superficie du bassin versant)

Elle est représentée par un lambeau de forêt dense entourant le marigot. Les ligneux peuvent atteindre 30 à 40 mètres. Les espèces ligneuses caractéristiques de ce milieu sont : *Elaeis guineensis*, *Carapa procera*, *Mitragyna ciliata*, *Uapaca paludosa*, *Xylopiya aetiopica*, *Spondianthus preusii*, *Napoleona sp.*, *Sterculia tragacantha*, *Pseudospondias sp.*, *Diospyros mespiliformis*, *Berlinia sp.*, *Anthonotha macrophylla*...

Les herbacées sont peu nombreuses en nombre d'individus. On rencontre des graminées telles que *Olyra latifolia*, *Scleria vogeliana*, et d'autres herbacées telles que *Marantochloa congensis*, *Culcasia liberica*, *Anchomanes difformis*, *Nervilia sp.*, *Geophila sp.*

Les lianes ligneuses sont représentées par *Tetracera protatoria*, et *Smilax kraussiana* et les lianes herbacées par *Dioscorea sp.*

On rencontre dans ce lambeau de forêt des jachères à divers stades de reconstitution avec des espèces caractéristiques des recrûs forestiers.

b) La savane boisée

Elle correspond à des arbres de plus de 8 m de haut.

Les espèces ligneuses les plus courantes sont : *Lophira lanceolata*, *Terminalia glaucescens*, *Crossopteryx febrifuga*, *Afrormosia laxiflora*, *Prosopis africana*, *Pterocarpus erinaceus*, *Daniellia oliveri*, *Parinari curatellifolia*, *Combretum nigricans*, *Piliostigma thonningii*, *Hymenocardia acida*...

La couverture herbacée est pratiquement continue et caractérisée par des graminées, telles que : *Andropogon gayanus*, *Andropogon tectorum*, *Beckeropsis unisetata*. Elles sont cespiteuses et présentent de larges feuilles courbées vers le bas. On rencontre aussi *Hyparrhenia smithiana*. Les autres herbacées ont aussi des feuilles larges : *Aframomum latifolium*, *Monechma depauperatum*, *Stylochiton barteri*, *Sida rhombifolia*.

Trois faciès existent :

* La savane boisée hygrophile (6,4%) :

On y observe des ligneux caractéristiques des milieux humides tels que *Cola cordifolia*, *Khaya senegalensis*, *Uapaca somon*. Les herbacées sont cespiteuses dans les zones proches des autres faciès de savane et deviennent unicaules quand on

s'approche de la forêt galerie avec des espèces telles que *Hyparrhenia gracilescens*. Une autre herbacée est bien représentée dans ce milieu : *Phaulopsis falcisepala*. Les lianes sont représentées par *Nauclea latifolia* et *Dioscorea spp.*

* La savane boisée haute (2,6%) :

Seules les espèces ligneuses de savane sont présentes ; certains individus de *Daniellia oliveri* et de *Lophira lanceolata* ont une taille avoisinant 20 mètres et sont largement dominants par rapport aux autres ligneux de taille généralement comprise entre 8 et 16 m. Les herbacées sont aussi caractérisées par des graminées monocaulées telles que *Hyparrhenia gracilescens*. Les lianes présentes sont *Mucuna pruriens*, *Clematis hirsuta* et *Smilax kraussiana*.

* La savane boisée basse (22,2%) :

On n'observe pas d'individus dominants. Les herbacées sont surtout cespiteuses. Les lianes ligneuses sont *Mucuna pruriens* et *Nauclea latifolia*.

c) La savane arborée

La densité des ligneux est beaucoup plus faible. Les espèces les mieux représentées sont *Lophira lanceolata*, *Daniellia oliveri*, *Terminalia macroptera*, *Pterocarpus erinaceus*, *Parinari curatellifolia*, *Hymenocardia acida*, *Afromosia laxiflora*, *Gardenia ternifolia*, *Cussonia barteri*, *Cochlospermum planchonii*.

La plupart des herbacées présentes sont des graminées cespiteuses : *Hyparrhenia smithiana*, *Andropogon acinodis*, *Andropogon schirensis*. Elles ont un port dressé et des feuilles étroites, tout comme les autres herbacées : *Eupatorium africanum*, *Vernonia guineensis*. Les lianes sont peu fréquentes.

Deux faciès sont observés :

* La savane arborée haute (3,1%) :

Cette unité de végétation présente de grands *Daniella oliveri* et *Lophira lanceolata*.

* La savane arborée basse (18,6%) :

Elle ne présente pas d'individus dominants par leur hauteur.

d) La savane arbustive

Les ligneux ne sont pratiquement représentés que par des petits arbres ou des arbustes (2 à 5 m). Les espèces présentes sont *Lophira lanceolata*, *Terminalia macroptera*, *Combretum nigricans*, *Pterocarpus erinaceus*, *Piliostigma thonningii*, *Cochlospermum planchonii*, *Psorospermum corymbiferum*. Les herbacées sont identiques à celles que l'on rencontre en savane arborée avec le même port. Les lianes sont peu fréquentes et herbacées seulement.

Deux faciès sont observés :

* La savane arbustive claire (20,4%) :

Le recouvrement des ligneux est inférieur à 20%.

* La savane arbustive dense (7,6%) :

Le recouvrement des ligneux est supérieur à 20% et ne dépasse pas 70%. Il s'agit en général de jachères récentes que l'on observe sur sols rouges ou ocres. Le microrelief est alors d'origine anthropique et correspond à d'anciennes buttes d'ignames ou billons de manioc. Cette unité présente la même structure que les précédentes mais les espèces rencontrées sont différentes. On retrouve des rejets de ligneux présents dans la parcelle avant la culture, ainsi que des ligneux pionniers tels que *Trema guineensis*. Souvent ce faciès est issu de l'abandon d'un champ cultivé sur savane boisée. Les herbacées sont : *Andropogon gayanus*, *Andropogon tectorum*, *Paspalum scorbiculatum*, *Cyanotis longiflora*, *Aframomum latifolium*, *Cucurlogo pilosa*, *Chlorophytum sp.*

e) La savane herbeuse

Les ligneux sont très faiblement représentés. Cette formation présente deux faciès :

* La savane herbeuse haute (3,0%) :

On la rencontre dans des bas fond humides sur sols ferrugineux jaunes le plus souvent. Les espèces caractéristiques sont *Andropogon macrophyllus*, *Loudetia phragmitoides*, *Saccolepis africana*, *Schizachyrium platyphyllum*, *Aspilia sp.*, *Crinum sp.*

* La savane herbeuse basse (0,9%) :

On la rencontre sur les plateaux cuirassés. Les espèces caractéristiques sont *Sporobolus pectinellus*, *Brachiaria distachoides*, *Loudetia kagerensis*, *Cyanotis sp.*, *Osmonda regalis*.

f) Les champs (7,7%)

Les cultures font l'objet de rotations annuelles et concernent la période d'avril à décembre. On trouve essentiellement du manioc, du maïs, du riz pluvial, de l'arachide, du pois de terre (niébé) et du gombo. Une parcelle était cultivée en coton la première année de notre étude, mais il n'y en a plus eu par la suite. La dernière année une parcelle d'environ un hectare était cultivée en igname sur buttes.

Le recouvrement ligneux est nul ou faible. Mais certains ligneux comme *Daniellia oliveri* et *Parkia biglobosa* peuvent être maintenus dans les parcelles. On observe des rejets de souches, de troncs ou de racines : *Daniellia oliveri*, *Lophira lanceolata*, *Albizia zygia*, *Terminalia glaucescens*.

Certaines herbacées sont spécifiques des champs et des très jeunes jachères : *Celosia laxa*, *Bidens pilosa*, *Blumea aurita*, *Mollgo nudicaulis*, *Digitaria horizontalis*, *Eragrostis tremula*, *HaploCorchorus olitorus*.

Certaines herbacées sont communes aux champs et à la savane : *Monechma depauperatum*, *Pandiaka heudelotii*, *Stylochiton hypogaeus*, *Aspilia rufa*, *Vernonia guineensis*, *Mariscus umbellatus*, *Cucurigo pilosa*, *Cyanotis longiflora*, *Commelina aetiopica*, *Imperata cylindrica*, *Pennisetum sp.*, *Rottboellia exaltata*, *Aframomum latifolium*.

2.4.1.3. Cartographie selon les herbacées

La différenciation présentée dans le paragraphe précédent correspond à la classification habituelle sur des critères liés aux ligneux. Une autre représentation peut être intéressante parce que sans doute beaucoup plus étroitement associée aux rythmes saisonniers du feu et des pluies.

Six zones peuvent également être distinguées :

- la forêt galerie ;
- la savane herbeuse ;
- les champs (ces trois zones sont les mêmes que dans la description précédente) ;
- les zones à *Andropogon guayanus* et *A. tectorum* (grandes graminées cespitueuses) qui regroupent les zones à savane boisée basse et à savane arbustive dense ;
- les zones à *Hyparhenia gracilescens* (graminées unicaules) où se retrouvent les savanes boisées hygrophile et haute ;
- les zones à *Hyparhenia sp.* et *Andropogon nacinodis* (graminées cespitueuses basses).

2.4.2. Evolution saisonnière et biomasse

L'évolution saisonnière de la végétation a été suivie sur des parcelles bien délimitées et considérées comme représentatives des zones cartographiées.

Pour l'étude du comportement hydrique, c'est une information qu'il ne faut pas négliger puisqu'elle est fonction d'au moins deux des termes du bilan : l'évapotranspiration et l'infiltration (on peut y rajouter le stockage dans la zone non-saturée et dans les nappes).

Cette évolution est chiffrée ici par deux grandeurs :

- la biomasse verte dressée, qui a l'avantage d'être une grandeur facilement identifiable, mais qui a l'énorme inconvénient d'être acquise par une méthode destructrice et qui ne respecte donc pas l'unité de lieu dans l'évolution saisonnière.
- le nombre de points de contact avec des aiguilles mobiles sur une parcelle parfaitement identifiée (méthode des points quadrats) ; cette grandeur a l'avantage d'être d'une acquisition facile, rapide et non destructrice ; elle a l'inconvénient d'être réalisée sur des parcelles très petites (1 m), de ne pas reconnaître la végétation à une hauteur supérieure à 3 m et surtout d'être éminemment liée à la méthode de mesure.

Les tableaux n° 2.401 et 2.402 donnent par zones les résultats obtenus par ces deux méthodes en 1987.

2.4.3. Couverture

Dans toutes les zones une évaluation linéaire très précise du recouvrement au sol par les couronnes des ligneux a été réalisée. Cette évaluation est particulièrement intéressante pour l'hydrologue puisqu'elle correspond très exactement à la surface d'interception de la pluie par la végétation ligneuse.

Cependant les chiffres obtenus ne peuvent être que des valeurs par excès. En effet ils sont donnés comme la projection au sol de l'extension maximale des couronnes d'arbres sans tenir compte d'une quelconque densité foliaire qui varie avec les espèces, avec les saisons et avec l'épaisseur de la couronne. Les botanistes (Cornet et Grouzis, comm. orale, 1988) proposent une fourchette pour le recouvrement réel allant de 20 %, juste après le feu, à près de 100%. Il est nécessaire de préciser ici que la quasi totalité de la surface du bassin versant brûle chaque année.

Tableau n°2.401

Biomasse verte dressée (tonne/ha) sur parcelles représentatives

Date	Pn1 S.boisée basse	Pn2 S.boisée hygroph.	Pn3 S.arbust. claire	Pn4 S.boisée haute	Pn6 S.herb. haute	J12 S.arbust. dense
mar 87	0,7	0,5	3,1	0,8	1,6	3,0
août 87	2,1	1,9	7,6	2,3	11,2	5,7
oct 87	4,1	2,4	7,9	2,6	16,1	6,6

Tableau n°2.402

Nombre de contacts avec parties vivantes (points quadrats) pour 100 aiguilles

Date	Pn1 S.boisée basse	Pn2 S.boisée hygroph.	Pn3 S.arbust. claire	Pn4 S.boisée haute	Pn6 S.herb. haute	J12 S.arbust. dense
fév 87	10	2	33	16	45	36
mar 87	28	46	54	49	141	76
avr 87	41	54	75	46	100	32
mai 87	92	72	111	72	149	96
jun 87	165	145	190	162	238	124
juil 87	182	210	245	160	256	175
août 87	168	203	265	195	259	195
sep 87	164	194	268	191	178	223
oct 87	154	161	287	172	137	170
nov 87	101	130	165	102	132	111
déc 87	39	81	89	50	95	66

Les pourcentages de recouvrement mesurés par excès sont :

- savane arborée basse : 29 %
- savane arbustive dense : 35 %
- savane boisée haute : 65 %
- savane arbustive claire : 15 %
- savane boisée hygrophile : 79 %
- savane boisée basse : 74 %
- savane arborée haute : 41 %
- savane herbeuse et champs : moins de 10 %
- forêt galerie : plus de 90 %

2.5. CLIMAT

2.5.1. Généralités

Une station climatologique complète le dispositif d'observation des bassins versants de Booro-Borotou. Située à environ un kilomètre du village sur la droite de la route Touba- Odienné, elle est installée sur une parcelle inutilisée d'un "bloc C.I.D.T", vaste zone défrichée mécaniquement pour une mise en valeur agricole.

Ses coordonnées géographiques sont :

- latitude : 8° 28' 40" nord
- longitude : 7° 33' 20" ouest
- altitude : 455 m (Nivellement Général de l'Afrique de l'Ouest).

Les premières observations datent du 14 janvier 1984. La station est fermée le 31 mars 1988.

Les résultats complets des observations ont été publiés dans quatre rapports annuels (Chevallier et al, 1985, 1986, 1987 et 1988). On ne note que très peu de lacunes sur l'ensemble de la période d'observation.

Cette station climatologique se situe entre les stations synoptiques des aéroports de Man, Odienné et Séguéla, gérées par l'Agence de la Navigation Aérienne et de la Météorologie de Côte d'Ivoire (ANAM).

La station est installée dans un enclos carré de 20 m de côté enherbé naturellement et régulièrement fauché. Les relevés sont effectués à 6, 12 et 18 heures tous les jours par un observateur qualifié.

La station est équipée d'un dispositif complet de mesure de la pluviométrie décrit dans le chapitre 2.6.. Son abri météorologique contient un psychromètre à ventilation naturelle (mesure des températures sèches et humides) et des thermomètres à maximum et à minimum. Un héliographe du type Campbell fournit les durées d'insolation. La vitesse et la direction du vent sont enregistrés par un anémographe directionnel Lambrecht. Enfin deux bacs Colorado enterrés de type ORSTOM permettent les mesures classiques d'évaporation.

2.5.2. Températures

Les tableaux 2.501 et 2.502 font le point des températures extrêmes atteintes, minimales et maximales, mois après mois, pour les années 1984 à 1988. Les lignes inférieures, codés *inter*, regroupent les minima minimorum et les maxima maximorum mensuels sur cette période. On note les valeurs extrêmes de 9,0°C en décembre 1986 et de 38,0°C en avril 1987.

Les tableaux 2.503 et 2.504 présentent les moyennes mensuelles, annuelles et interannuelles des minima et maxima journaliers. Le tableau 2.505 enfin donne les moyennes mensuelles, annuelles et interannuelles des températures moyennes journalières calculées comme une moyenne pondérée des observations faites à 6, 12 et 18 heures. Cette moyenne s'est révélée plus proche de la réalité que la moyenne arithmétique des trois mêmes valeurs dans une étude menée par Pouyaud (1985) sur le lac de Bam au Burkina Faso.

Tableau 2.501

Températures maximales mensuelles, annuelles et interannuelles (en °C)

	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Jun	Jul	Août	Sep	Oct	Nov	Déc	Ann
1984			36,8	35,6	34,8	32,6	30,6	31,8	31,6	31,8	33,6	33,6	36,8
1985	36,4	37,8	37,4	35,4	33,6	32,4	30,6	31,6	32,0	33,2	35,4	34,4	37,8
1986	36,2	37,4	35,8	36,8	34,4	32,8	31,9	31,4	31,8	32,4	32,8	33,8	37,4
1987	37,0	36,8	37,5	38,0	36,2	33,4	32,2	32,2	31,6	32,2	35,0	34,3	38,0
1988	36,4	37,5	37,6										37,6
Inter	37,0	37,8	37,6	38,0	36,2	33,4	32,2	32,2	32,0	33,2	35,4	34,4	38,0

Tableau 2.502

Températures minimales mensuelles, annuelles et interannuelles (en °C)

	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Jun	Jul	Août	Sep	Oct	Nov	Déc	Ann
1984			18,4	20,0	19,4	18,2	18,4	18,0	17,2	18,8	15,4	10,4	10,4
1985	11,8	11,2	18,2	20,0	18,6	18,2	18,0	18,8	16,8	18,0	15,0	9,4	9,4
1986	10,5	11,5	17,8	19,2	19,6	18,2	18,8	16,6	18,0	18,0	12,5	9,0	9,0
1987	11,5	14,8	18,4	19,7	18,2	19,0	19,2	18,4	19,0	19,0	16,8	10,8	10,8
1988	11,4	12,0	19,0										11,4
Inter	10,5	11,2	17,8	19,2	18,2	18,2	18,0	16,6	16,8	18,0	12,5	9,0	9,0

Tableau 2.503

Moyennes mensuelles, annuelles et interannuelles des températures maximales journalières (en °C)

	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Jun	Jul	Août	Sep	Oct	Nov	Déc	Ann
1984			34,5	33,9	31,7	30,5	28,7	29,8	29,9	30,8	32,1	31,7	31,4
1985	33,9	34,5	34,6	33,7	31,2	29,5	28,7	29,0	29,6	31,0	32,8	31,3	31,6
1986	32,8	35,1	33,5	33,8	32,4	30,7	28,5	29,3	29,9	30,6	31,4	31,9	31,7
1987	34,3	35,2	34,8	35,8	32,8	30,4	30,5	29,3	29,9	30,6	33,0	31,7	32,4
1988	32,7	35,6	35,6										34,6
Inter	33,4	35,1	34,6	34,3	32,0	30,3	29,1	29,4	29,8	30,7	32,3	31,6	31,9

Tableau 2.504

Moyennes mensuelles, annuelles et interannuelles des températures minimales journalières (en °C)

	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Jun	Jul	Août	Sep	Oct	Nov	Déc	Ann
1984			22,1	22,7	21,5	20,1	20,0	20,1	19,9	20,0	18,8	13,9	19,9
1985	17,8	18,5	22,7	22,7	21,6	20,5	19,8	20,4	19,7	19,7	18,9	14,1	19,7
1986	15,3	19,7	21,4	22,3	21,6	20,7	20,2	20,1	19,8	19,6	17,4	13,3	19,3
1987	17,2	20,5	22,0	23,6	22,1	21,5	21,3	20,5	20,7	20,4	19,9	16,3	20,5
1988	15,3	19,3	22,6										
Inter	16,4	19,5	22,2	22,8	21,7	20,7	20,3	20,3	20,0	19,9	18,8	14,4	19,7

Tableau 2.505Moyennes mensuelles, annuelles et interannuelles des températures moyennes journalières (en °C) : $TM = (9.T(6h) + 6.T(12h) + 9.T(18h))/24$

	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Jun	Jul	Août	Sep	Oct	Nov	Déc	Ann
1984			28,6	28,0	26,5	25,2	23,9	24,7	24,3	25,0	24,9	22,2	25,3
1985	26,2	27,1	28,7	27,6	26,4	25,0	24,1	24,0	24,1	25,0	25,6	23,0	25,6
1986	24,6	28,8	27,4	27,6	26,8	25,7	24,1	24,3	24,2	24,5	24,0	22,6	25,4
1987	26,4	28,5	28,5	29,5	27,4	26,0	25,7	24,6	25,0	25,5	26,2	23,9	26,4
1988	24,6	28,8	29,1										
Inter	25,4	28,3	28,5	28,2	26,7	25,5	24,4	24,4	24,4	25,0	25,2	22,9	25,7

La figure 2.501 représente schématiquement les moyennes interannuelles de ces températures. On peut constater que les mois les plus chauds sont les mois de février à avril avec une nouvelle pointe en novembre. Les mois les plus froids sont ceux de décembre à février. On note que l'amplitude thermique varie entre la moyenne des minima et celle des maxima de 8,8°C en juillet à 17,8°C en janvier.

2.5.3. Humidités relatives

Les mesures au psychromètre des températures sèches et humides à 6, 12 et 18 heures ont permis le calcul des tensions de vapeur d'eau de l'air sous abri aux mêmes heures. Ces valeurs ont ensuite permis de calculer les humidités relatives correspondantes, puis leurs moyennes pondérées avec la même formulation que pour les températures. Ces résultats sont regroupés dans le tableau 2.506. La figure 2.502 présente l'histogramme des valeurs mensuelles interannuelles.

On observe sur ces données que la période où les humidités relatives sont les plus faibles correspondent aux mois de saison sèche (décembre à mars), mais dès le début des premières averses elles remontent pour devenir supérieures à 80% du mois de juin au mois de novembre. A 6 heures l'humidité relative est toujours supérieure à 80% ; elle reste même proche de la saturation pendant les mois de saison des pluies. Les humidités minimales peuvent être inférieures à 40 % en décembre ou janvier à 18 heures.

FIG 2.501

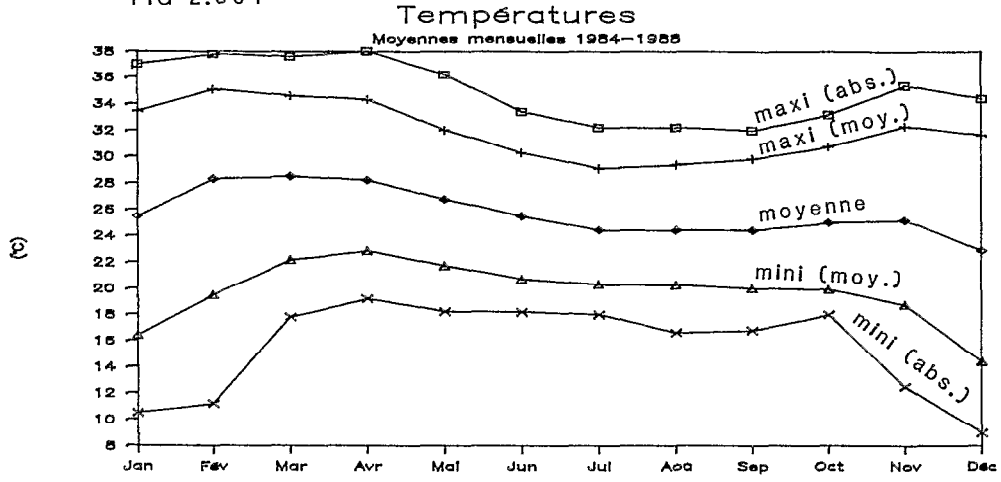


FIG 2.502

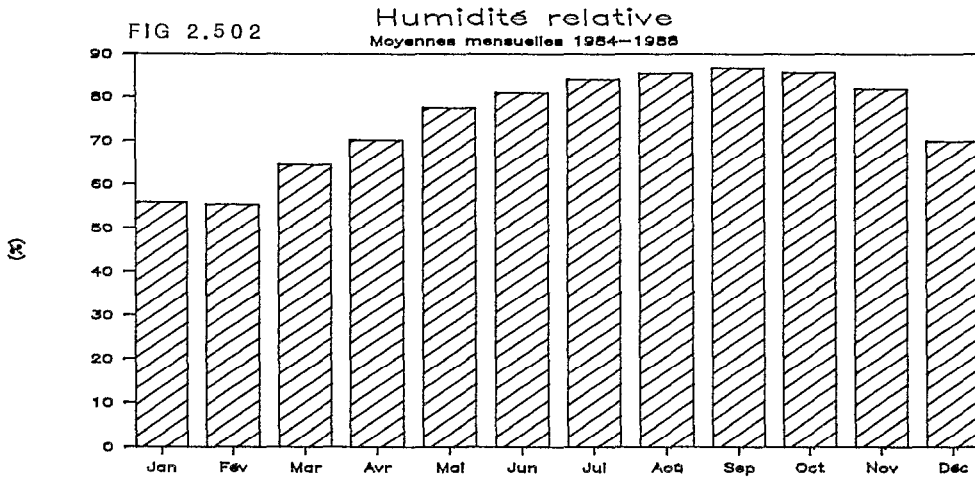


FIG 2.503

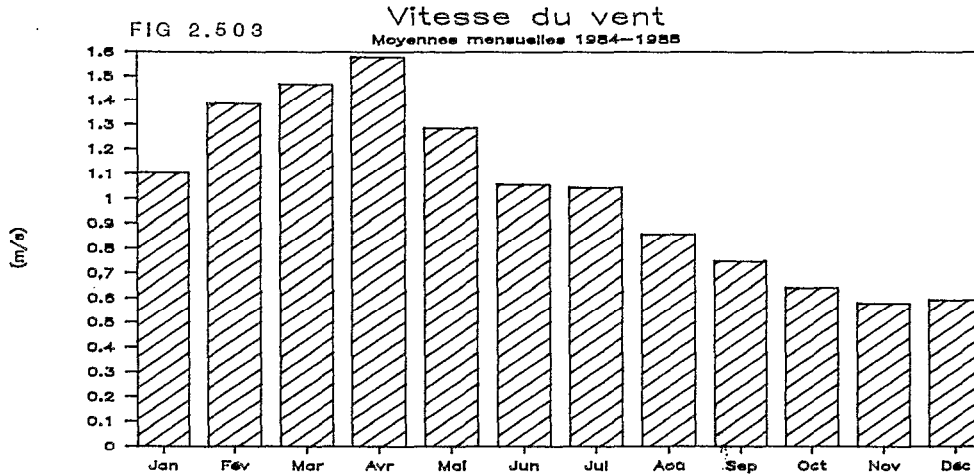


Tableau 2.506

Moyennes mensuelles, annuelles et interannuelles de l'hygrométrie moyenne journalière (en %)

	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Jun	Jul	Aoû	Sep	Oct	Nov	Déc	Ann
1984			65,6	71,1	77,9	81,6	86,2	86,2	87,2	87,5	84,6	73,0	80,1
1985	58,8	52,1	60,0	69,9	77,3	82,2	84,2	86,4	85,9	84,0	80,1	66,8	74,0
1986	48,4	56,8	67,8	74,7	79,5	78,3	83,4	84,6	87,8	86,2	80,4	68,2	74,7
1987	60,5	57,1	63,4	65,0	75,5	81,5	82,6	84,8	86,2	85,1	82,1	71,7	74,6
1988	56,1	55,9	66,0										
Inter	56,0	55,5	64,6	70,2	77,6	80,9	84,1	85,5	86,8	85,7	81,8	69,9	75,8

2.5.4. Vent

Les vitesses et les directions du vent enregistrées en continu sur l'anémographe Lambrecht sont dépouillées toutes les 6 heures (à 6, 12, 18 et 24 heures). A partir de ce dépouillement on évalue d'une part les moyennes de la vitesse du vent (tableau 2.507 et figure 2.503) et d'autre part les répartitions moyennes mensuelles des directions du vent (tableau 2.508 et figures 2.504).

On note que les vitesses du vent sont les plus élevées dans la période qui précède la saison des pluies (mars-avril) ; elles diminuent ensuite jusqu'en décembre. Ces vitesses sont par ailleurs très faibles dans leur ensemble.

Tableau 2.507

Vitesses du vent (en m/s) : moyennes mensuelles, annuelles et interannuelles

	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Jun	Jul	Aoû	Sep	Oct	Nov	Déc	Ann
1984	1,10	1,30	1,70	1,70	1,20	1,00	1,00	0,80	0,80	0,60	0,50	0,50	1,02
1985	1,23	1,41	1,60	1,61	1,52	1,21	1,07	0,90	0,82	0,73	0,73	0,74	1,13
1986	1,08	1,52	1,21	1,35	1,04	1,05	1,15	0,91	0,73	0,66	0,57	0,57	0,99
1987	1,18	1,46	1,32	1,65	1,38	0,97	0,96	0,82	0,64	0,58	0,52	0,56	1,00
1988	0,93	1,24	1,50										1,22
Inter	1,10	1,39	1,47	1,58	1,28	1,06	1,04	0,86	0,75	0,64	0,58	0,59	1,07

- Les directions privilégiées du vent évoluent nettement au cours de l'année :
- en décembre-janvier, le vent vient surtout de l'ouest, du nord et de l'est ; c'est la période d'Harmattan ;
 - en mai-juin, du sud et de l'ouest ;
 - au coeur de la saison des pluies, de l'ouest ; mais les averses et les lignes de grains arrivent en grande majorité de l'est et du nord-est ;
 - en octobre-novembre de l'ouest, mais aussi du sud-est et de l'est.

FIG 2.504

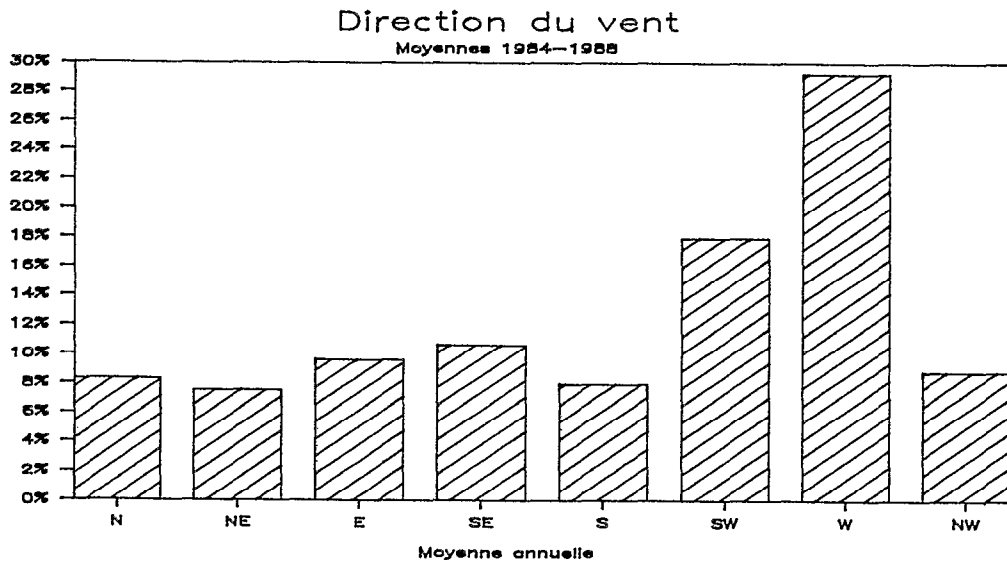
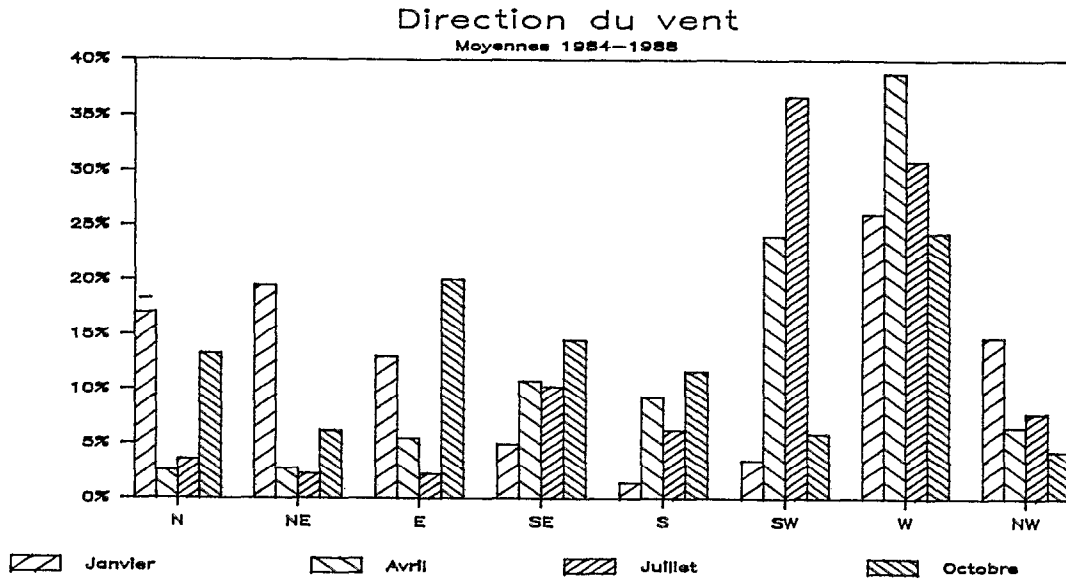


Tableau 2.508

Répartition mensuelle de la direction d'origine du vent suivant 8 directions (en %) : moyenne interannuelle.

	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Jun	Jul	Aoû	Sep	Oct	Nov	Déc	Ann
N	17,0%	7,6%	4,7%	2,5%	3,7%	4,0%	3,5%	5,2%	4,5%	13,3%	14,7%	19,1%	8,3%
NE	19,4%	12,4%	7,9%	2,7%	3,7%	2,2%	2,2%	4,0%	5,7%	6,1%	8,1%	15,9%	7,5%
E	13,0%	14,9%	8,4%	5,5%	7,7%	3,1%	2,3%	3,7%	8,1%	20,0%	15,9%	12,7%	9,6%
SE	4,9%	7,5%	8,9%	10,7%	10,3%	11,3%	10,2%	11,0%	15,3%	14,5%	14,3%	8,4%	10,6%
S	1,4%	3,6%	6,9%	9,2%	11,9%	13,0%	6,2%	7,7%	10,2%	11,6%	10,2%	3,6%	8,0%
SW	3,5%	10,5%	17,9%	24,0%	26,8%	34,2%	36,7%	26,2%	21,0%	5,9%	4,2%	4,6%	18,0%
W	26,0%	30,6%	35,1%	38,8%	30,8%	24,0%	30,8%	31,0%	29,2%	24,3%	27,5%	21,9%	29,2%
NW	14,7%	12,9%	10,1%	6,5%	5,1%	8,1%	7,8%	11,2%	6,0%	4,3%	5,1%	13,8%	8,8%

En moyenne annuelle c'est les vents d'ouest et du sud-ouest qui dominent.

2.5.5. Durée d'insolation et rayonnement global

Tableau 2.509

Moyennes mensuelles, annuelles et interannuelles de la durée journalière d'insolation en heures.

	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Jun	Jul	Aoû	Sep	Oct	Nov	Déc	Ann
1984	8,2	8,9	7,7	7,4	7,6	7,5	5,5	7,3	6,7	8,0	8,2	7,6	7,5
1985	8,2	7,1	5,7	6,4	7,3	6,2	5,2	5,6	6,3	7,9	8,1	7,4	6,8
1986	8,7	8,3	7,6	6,9	7,7	7,8	4,6	5,6	5,5	7,2	7,8	7,5	7,1
1987	7,6	8,3	6,9	7,6	7,1	6,4	7,2	5,0	5,1	7,3	7,4	7,2	6,9
1988	7,2	7,1	6,5										
Inter	8,0	7,9	6,9	7,1	7,4	7,0	5,6	5,9	5,9	7,6	7,9	7,4	7,1

Le dépouillement des bandes des héliographes a permis de dresser le tableau des moyennes mensuelles, annuelles et interannuelles des durées journalières d'insolation S en h (tableau 2.509 et figure 2.505). La connaissance de la latitude de Booro-Borotou permet le calcul (Perrin de Brichambaut, 1963) des moyennes mensuelles de la durée journalière maximale d'insolation S₀ et des moyennes mensuelles du rayonnement solaire à l'entrée de l'atmosphère G₀. Ces valeurs figurent au tableau 2.510).

On sait que la valeur journalière du rayonnement global G est liée à la durée journalière d'insolation S et aux valeurs correspondantes de G₀ et de S₀ (rayonnement solaire à l'entrée de l'atmosphère et durée d'insolation maximale) par une relation du type :

$$G = G_0 (A + B \cdot S/S_0)$$

FIG 2.505

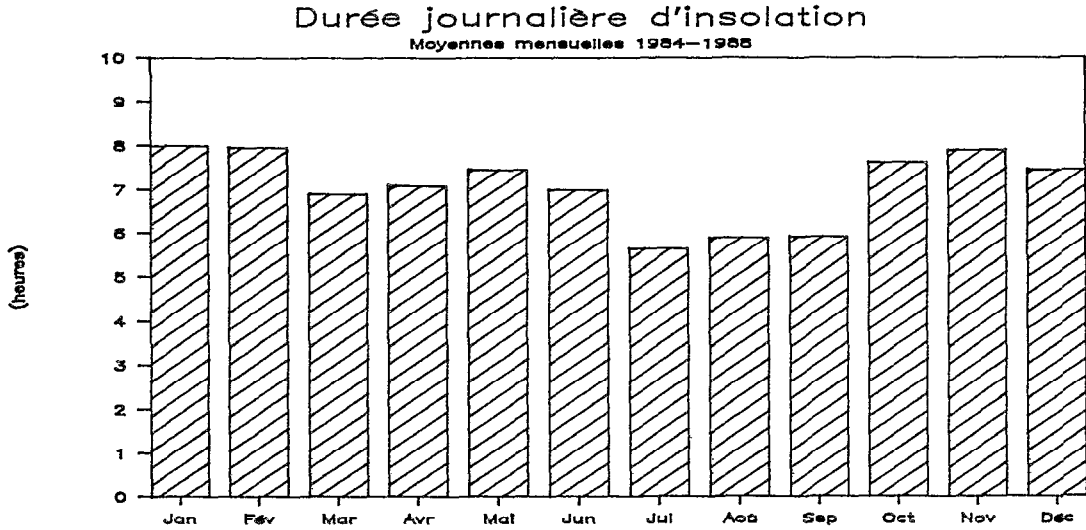


FIG 2.506

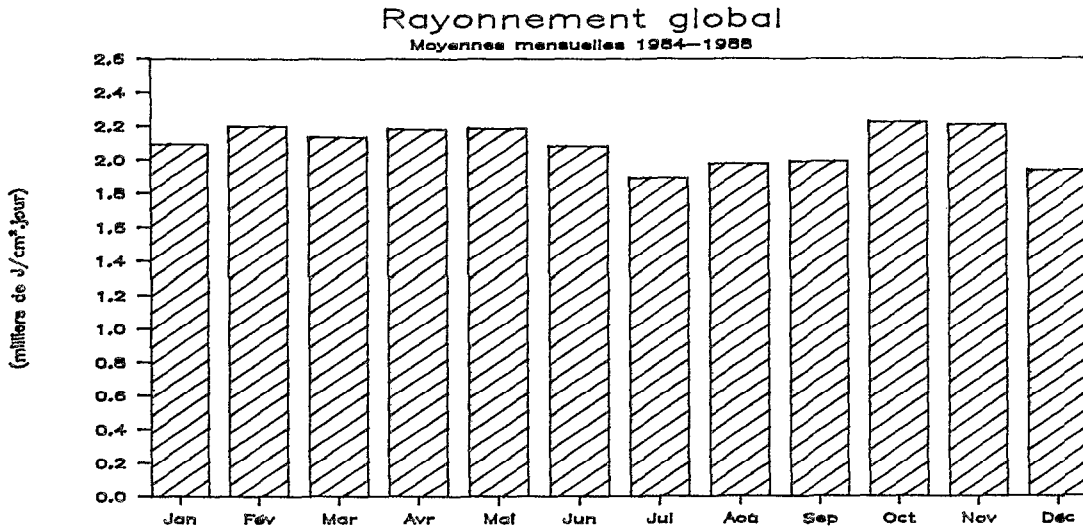


Tableau 2.510

Moyennes mensuelles et annuelles de la durée journalière maximale d'insolation S_0 (en heures).
Moyennes mensuelles et annuelles du rayonnement solaire à l'entrée de l'atmosphère G_0 (en $J/cm^2.jour$)

	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Jun	Jul	Août	Sep	Oct	Nov	Déc	Ann
S_0	11.8	12.0	12.1	12.3	12.5	12.5	12.5	12.4	12.2	12.0	11.8	11.7	12.2
G_0	3278	3484	3663	3721	3667	3606	3618	3674	3668	3570	3464	3203	3551

L'évaluation des constantes A et B est particulièrement difficile en l'absence d'observation directe. On trouve des chiffres très divers dans la littérature et cela est d'autant plus ennuyeux que ces valeurs (et en particulier B) constituent des paramètres très sensibles.

Penman (1956) prend pour évaluer l'évaporation sur le lac Volta (Ghana) $A=0,18$ et $B=0,55$. Davies (1965) donne, d'une part, $A=0,26$ et $B=0,54$ pour Kano ($12^\circ N$) au Nigéria et, d'autre part, $A=0,30$ et $B=0,37$ pour Accra (Ghana, $6^\circ N$). Monteny propose $A=0,29$ et $B=0,42$ pour Bouaké (comm. orale, 1985) ; pour les plantations de cannes à sucre de Banfora (Burkina Faso), il adopte une variation saisonnière : $A=0,13$ et $B=0,56$ de novembre à mars, $A=0,20$ et $B=0,48$ d'avril à octobre (Monteny, 1983). Riou (1975) préfère la formulation de Glover et Mc Culloch (1958) qui fait varier A en fonction de la latitude L : $A=0,29 \cos L$ et $B=0,52$. Brutsaert (1984) propose la moyenne de ces différents paramètres : $A=0,25$ et $B=0,50$.

Dans l'embarras du choix, c'est la formulation de Glover qui est adoptée pour l'étude de Booro-Borotou :

$$A = 0,286 \text{ et } B = 0,52$$

Les résultats obtenus pour G sont donnés dans le tableau 2.511 et représentés sur la figure 2.506.

Tableau 2.511

Moyennes mensuelles, annuelles et interannuelles du rayonnement global G en $J/cm^2.jour$.

G	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Jun	Jul	Août	Sep	Oct	Nov	Déc	Ann
1984	2125	2343	2263	2231	2211	2159	1872	2197	2117	2283	2256	1956	2168
1985	2125	2071	1948	2074	2165	1964	1827	1931	2053	2267	2241	1929	2050
1986	2197	2252	2247	2153	2226	2204	1736	1931	1926	2157	2194	1943	2097
1987	2038	2252	2137	2263	2135	1994	2130	1837	1863	2172	2133	1902	2071
1988	1980	2071	2074										2042
Inter	2093	2198	2134	2180	2184	2081	1891	1974	1990	2220	2206	1932	2090

2 6. PRECIPITATIONS

2.6.1. Le contexte régional(d'après Kouamé, 1986 et 1987, et Davoine, 1988)

2.6.1.1. Généralités

La région de Booro-Borotou appartient à la zone climatique dite *tropicale subhumide* (Eldin, 1971) caractérisée par deux saisons : une *saison sèche* pendant laquelle les précipitations sont rares et une *saison des pluies*. La limite géographique avec le climat dit *équatorial* à quatre saisons (deux sèches et deux humides) suit grossièrement le 8 ème parallèle (Rodier, 1964) et passe légèrement au sud de notre région. La proximité des reliefs de la dorsale guinéenne qui culminent au Mont Nimba à 1750 m influence probablement le régime des précipitations.

L'origine des précipitations est, de manière générale en Afrique de l'Ouest, liée à la confrontation permanente de deux masses d'air dont le contact constitue le *Front Intertropical (FIT)* :

- l'*Harmattan (ou alizé boréal)* est une masse d'air chaude et très sèche centrée sur les régions sahariennes.

- la *Mousson (ou alizé austral)* est une masse d'air humide et océanique dont la position moyenne est aux alentours de l'équateur.

Avec une périodicité annuelle, la lutte perpétuelle entre ces deux fronts donne l'avantage à la mousson en juillet-août et le FIT atteint sa position septentrionale qui se situe en moyenne sur une ligne qui va de l'embouchure du Sénégal au lac Tchad en passant par la boucle du Niger. L'harmattan gagne en janvier-février jusqu'à la côte du Golfe du Bénin. Ces fluctuations sont évidemment aléatoires d'une année à l'autre et sont à l'origine des phénomènes paroxysmiques d'inondations ou de sécheresses qui s'abattent régulièrement sur ces régions (Sircoulon, 1976 et 1984-85).

2.6.1.2. Statistiques régionales

Le réseau d'observation pluviométrique de la région n'est pas très dense et les postes observés sur une longue durée peu nombreux et souvent peu fiables. Après un inventaire des données disponibles, il a fallu se contenter des observations réalisées au poste de Touba entre 1939 et 1984 avec une importante lacune entre 1958 et 1965.

Le tableau 2.601 présente les valeurs statistiques de la pluviométrie obtenues par Kouamé (1986) pour tous les mois de l'année et l'année totale en utilisant le meilleur ajustement au sens du test de Brunet-Moret (1978) sur un choix de 10 lois possibles (Brunet-Moret, 1969, Ribstein, 1983, Lebel et Boyer, 1987).

La figure 2.601 représente sous forme d'histogramme les valeurs mensuelles moyennes décennales sèches et humides. Ce diagramme montre bien la saison sèche centrée sur les mois de novembre à février et la distribution dissymétrique des totaux mensuels culminant en septembre.

FIG 2.601

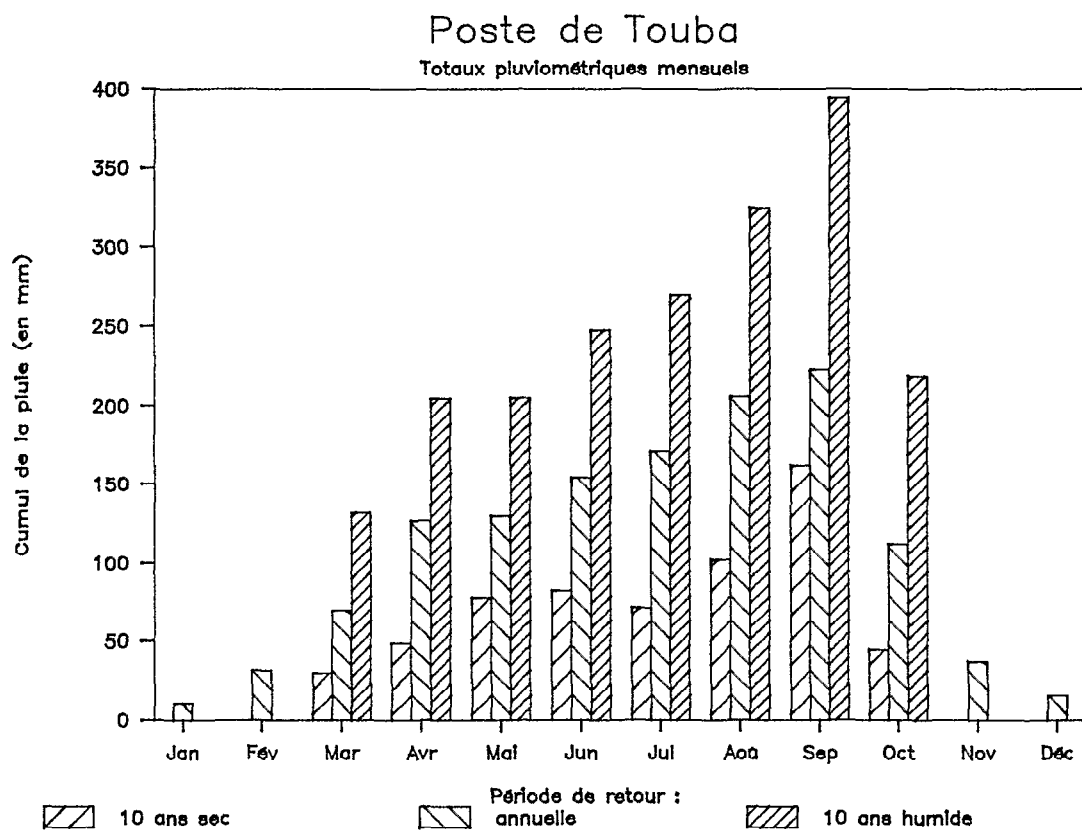


Tableau n°2.601

Pluviométrie annuelle et mensuelle à Touba pour différentes récurrences (en mm)

récurrence	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Jun	Jul	Aoû	Sep	Oct	Nov	Déc	Ann
seche :													
100 ans													840
50 ans													901
20 ans			21	34	67	66	51	78	153	30			992
10 ans			30	49	78	82	71	102	162	44			1073
5 ans													1171
2 ans	10	31	70	127	130	154	171	206	222	112	37	15	1359
humide :													
5 ans													1546
10 ans			132	205	205	248	269	324	394	218			1644
20 ans			156	219	229	278	289	357	485	259			1725
50 ans													1816
100 ans													1877
loi utilisée	moy.	moy.	Gum.	Fui.	Pe1	Gum.	Pe1	Gum.	Pe1	Gum.	moy.	moy.	Gau.

moy. = moyenne Gum. = Gumbel Fui. = Fuites Pe1 = Pearson I Gau. = Gauss

Les pluies journalières ont été analysées pour le même échantillon à l'aide d'une loi gaussol logarithmique tronquée (Chevallier et al., 1987). Le tableau 2.602 donne les valeurs obtenues pour différentes récurrences.

Tableau n°2.602

Pluviométrie journalière à Touba pour différentes récurrences (en mm)

récurrence	1 an	5 ans	10 ans	20 ans	50 ans	100 ans
	74,4	109	126	144	170	191

Le réseau d'observation pluviographique est très sommaire et seules les stations météorologiques synoptiques, en général attachées aux aéroports, disposent de longues séries. Les postes les plus proches de Booro-Borotou sont Man, Odienné et Séguéla. C'est à Odienné que le régime de précipitations paraît le plus proche de celui de notre région d'étude, encore que ce soit le plus éloigné des trois postes en distance (150 km environ) ; Man est, en effet, directement soumis à un régime climatique fortement influencé par le relief et Séguéla se trouve à la limite de la forêt et n'est plus sous la dorsale guinéenne.

Davoine (1988) a effectué une mise à jour de l'analyse des données pluviographiques d'Odienné, à partir desquelles Brunet-Moret (1967 et 1974) avait déjà extrait des caractéristiques hauteurs-durée-fréquence. Le tableau 2.603 présente les relations intensité-durée-récurrence obtenues sur une période de 18 années (1969 à 1986) sans trop de lacunes dont les diagrammes nous ont été communiqués par l'Agence Nationale des Aéroports et de la Météorologie de Côte d'Ivoire. Pour les

ajustements statistiques, ce sont des lois de Galton qui ont été retenues (Girard et Chaperon, 1971), de préférence aux lois de Goodrich ou de Fréchet.

Tableau n°2.603

Relations intensité-durée-réurrence pour le poste d'Odienné (en mm/h, minutes et années)

Durée	0.1 an	0.2 an	0.5 an	1 an	2 ans	5 ans	10 ans	20 ans	50 ans	100 ans
5	81,6	104	138	164	194	236	271	308	353	414
10	67,8	85,8	108	124	139	158	172	185	202	214
15	58,4	74,4	92,8	105	117	132	142	153	166	176
30	39,8	52,4	67,2	77,2	86,8	98,4	107	115	125	133
45	29,8	39,7	52,1	61,1	69,6	80,5	88,5	96,4	107	114
60	23,6	32,2	42,7	50,2	57,5	66,7	73,5	80,2	88,8	95,1
90	16,7	22,9	31,3	37,8	44,3	53,0	59,7	66,4	75,4	82,3
120	13,2	17,9	24,6	30,2	36,0	44,0	50,4	57,1	66,2	73,4
180	9,3	12,7	17,6	21,6	25,7	31,3	35,7	40,3	46,6	51,4

2.6.2. La pluie à Booro-Borotou

2.6.2.1. Le dispositif de mesure

Dans le cadre de l'étude de Booro-Borotou un dispositif important de mesure de la pluie a été mis en place :

* A la station météorologique, la pluie est contrôlée quotidiennement par un pluviographe Précis-Mécanique à augets basculeurs, par un pluviomètre de type Association à 1 m du sol, par un pluviomètre au sol de type Snowdon modifié ORSTOM et par un pluviomètre totalisateur.

* Sur le bassin versant de Booro-Borotou, les relevés sont également quotidiens sur deux pluviographes Précis-Mécanique à augets basculeurs, doublés en 1986 et 1987 par deux pluviographes Oedipe à acquisition directe sur cartouche mémoire et sur 10 pluviomètres de type Association, répartis régulièrement sur l'ensemble du bassin. Trois de ces postes, répartis sur une même toposéquence sont associés à des pluviomètres au sol de type Snowdon.

* Sur le bassin versant de la Séné, un poste pluviométrique à Touresso et trois postes pluviographiques, dont un Oedipe, sont suivis de façon moins régulières et offrent des observations complémentaires.

2.6.2.2. Les observations

Tous les relevés à ces postes sont consignés dans les rapports annuels de campagne ou dans les rapports climatologiques (Chevallier et al., 1986, 1987 et 1988). Il ne paraît pas utile d'en faire un exposé détaillé ici ; il apparaîtront dans l'analyse le moment venu. Cependant, et à titre de référence, les tableaux de pluviométrie moyenne (méthode de Thiessen) sur le bassin versant principal de Booro-Borotou sont donnés en annexe. Le tableau 2.604 récapitule les pluviométries mensuelles observées sur les quatre années hydrologiques d'une part ponctuellement à la station météorologique, d'autre part en moyennes calculées par la méthode de Thiessen sur le bassin versant principal et le bassin versant amont.

Tableau n°2.604

Cumulés pluviométriques mensuels (représentation en années hydrologiques)

	Avr	Mai	Jun	Jul	Août	Sep	Oct	Nov	Déc	Jan	Fév	Mar	Ann
1984-85													
Météo	101,9	128,3	227,0	169,0	251,4	151,0	123,8	19,6	0,0	1,5	13,1	13,4	1200,0
Princ	96,4	113,0	218,1	165,8	225,5	151,7	147,5	14,2	0,0	1,7	11,0	16,5	1161,4
1985-86													
Météo	106,1	73,1	99,7	305,2	372,5	266,4	130,8	2,2	0,0	0,0	74,2	74,1	1504,3
Princ	101,7	67,6	131,7	331,8	398,5	265,5	107,7	2,2	0,0	0,0	46,4	74,4	1527,5
Amont	104,3	65,8	131,7	339,9	403,5	259,1	99,8	1,9	0,0	0,0	41,2	75,2	1522,4
1986-87													
Météo	72,3	117,1	96,5	165,1	127,0	169,3	129,5	28,9	0,0	0,0	42,4	42,6	990,7
Princ	66,0	128,0	112,8	157,1	129,1	207,3	152,3	24,8	0,0	1,1	35,4	58,7	1072,6
Amont	64,9	128,1	110,8	153,5	129,3	209,0	153,3	23,6	0,0	0,7	34,1	60,6	1067,9
1987-88													
Météo	21,1	187,5	193,9	139,8	294,2	219,3	67,0	17,5	11,3	0,0	0,0	51,6	1203,2
Princ	23,0	172,3	166,4	135,1	334,5	242,4	74,8	15,6	15,8	0,0	0,2	34,9	1215,0
Amont	21,5	167,8	162,6	135,9	338,6	248,0	74,0	15,8	14,9	0,0	0,2	34,7	1214,0
Moy 84-88													
Météo	75,3	126,5	154,3	194,8	261,3	201,5	112,8	17,1	2,8	0,4	32,4	45,4	1224,5
Princ	71,8	120,2	157,2	197,5	271,9	216,7	120,6	14,2	4,0	0,7	23,2	46,1	1244,1
Amont	63,6	120,6	135,0	209,8	290,5	238,7	109,0	13,8	5,0	0,2	25,2	56,8	1268,1

La figure 2.602 représente annuellement les observations au poste de la station météo. Sur la figure 2.603 on compare la moyenne des observations mensuelles des quatre années à la station météo de Booro-Borotou aux moyennes interannuelles du poste de Touba (calculées sur 33 années). On constate la bonne acceptabilité de cette comparaison au regard de la faiblesse de l'échantillon d'étude.

En valeurs annuelles, et en admettant l'identité statistique entre Touba et Booro-Borotou, les années 1984 et 1987 sont légèrement déficitaires (réurrence 3 années sèches), l'année 1985 est nettement excédentaire (réurrence 5 années humides) et l'année 1986 est largement déficitaire (réurrence entre 10 et 20 années sèches). Les observations mensuelles remarquables se situent en juillet et août 1985 dont les réurrences sont supérieures à 20 années humides, d'une part, en mars 1985 et en avril 1987 dont les réurrences sont supérieures à 20 années sèches, d'autre part.

Les plus fortes hauteurs journalières observées sont de 96 mm le 29 avril 1984 (au pluviomètre P22) et de 91 mm le 18 août 1985 au pluviomètre P29, valeurs dont la période de retour doit être de l'ordre de trois ans.

Enfin l'intensité la plus forte enregistrée sur le bassin en 5 minutes est de 166 mm/h le 16 juin 1984, ce qui correspond sur les courbes intensité-durée-fréquence d'Odienné à une réurrence annuelle. Ce résultat laisse perplexe : soit la période d'étude à Booro-Borotou est particulièrement pauvre en événements exceptionnels, soit (ce qui est plus vraisemblable) c'est la région d'Odienné (où la moyenne pluviométrique interannuelle est nettement supérieure) qui possède un régime où les averses sont plus violentes qu'à Booro. Une comparaison intéressante peut être faite avec Korhogo

(Camus et al., 1976) où l'intensité de 166 mm/h en 5 minutes aurait une récurrence de l'ordre de 3 à 5 ans, ce qui est sans doute plus proche de la réalité de Booro-Borotou.

Il faut enfin mentionner dans ce paragraphe l'étude réalisée par Chevallier et Lapetite (1986) sur la comparaison entre la pluie mesurée au sol sur les pluviomètres Snowdon et la pluie observée sur les pluviomètres standards dont la bague est à un mètre au dessus du sol. Les écarts mesurés à Booro-Borotou pendant trois ans (1984-1986) ne sont pas significatifs, même si de petites variations ont été notées le long de la toposéquence de mesure.

FIG 2.602

Pluviométrie mensuelle

Représentation en années hydrologiques

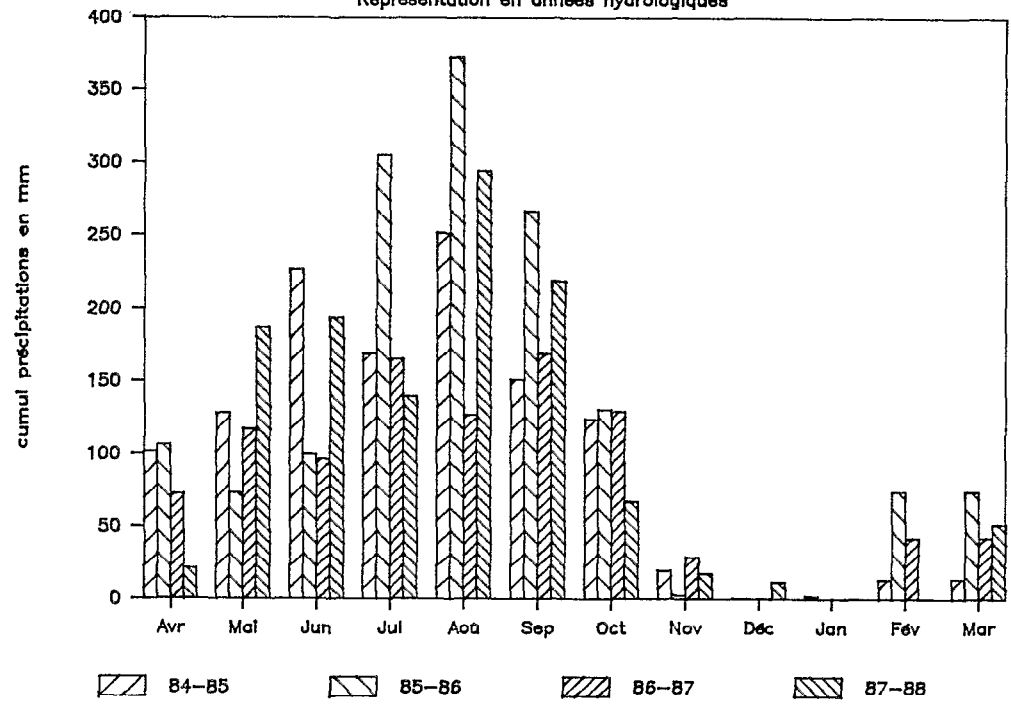
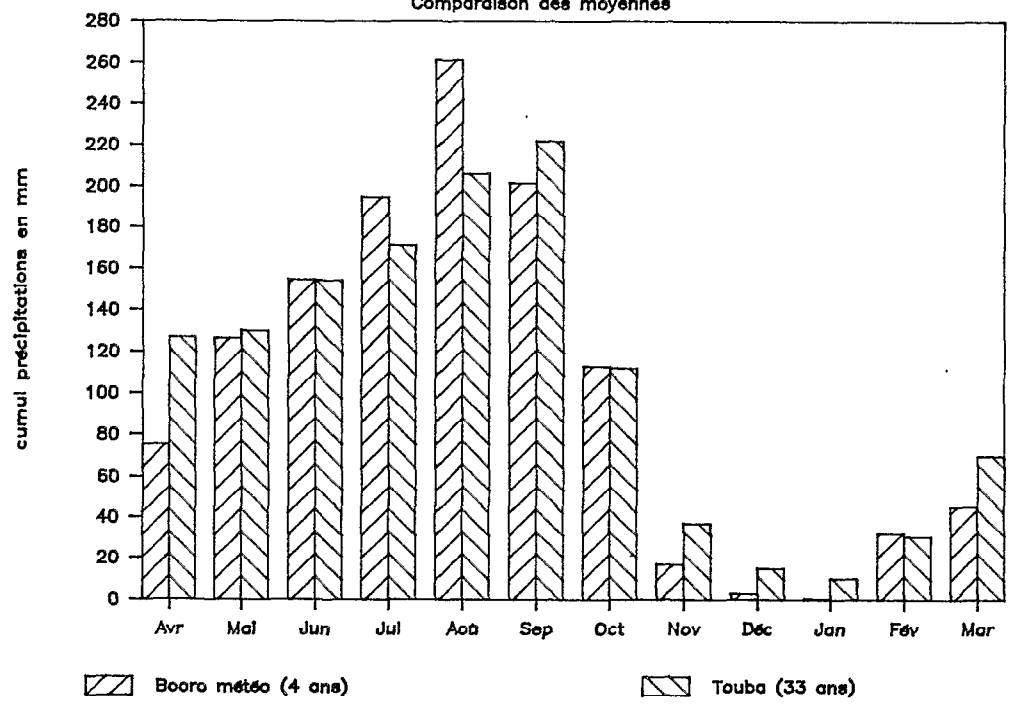


FIG 2.603

Pluviométrie mensuelle

Comparaison des moyennes



2.6.2.3. Variabilité spatiale et temporelle

Une première analyse sommaire est faite sur la pluviométrie journalière qui consiste à comparer les résultats obtenus en effectuant des moyennes de Thiessen sur différentes zones du bassin versant (moitié amont, moitié aval, rive droite, rive gauche, bas-fond, interfluve) et à comparer les résultats obtenus. Ceux-ci montrent une remarquable homogénéité et ne permettent pas d'isoler une quelconque influence topographique ou géographique sur la répartition spatiale des totaux journaliers à l'échelle du bassin versant de Booro-Borotou.

Kouamé (1987) a mené une étude intéressante sur la variabilité spatiale et temporelle des averses sur la région de Booro-Borotou. Il a analysé la totalité des données pluviographiques disponibles à la fin de la campagne 1986-1987 en adoptant deux critères de séparation des averses :

* un critère (n°1) qui permet d'individualiser l'intégralité des averses (la séparation se fait lorsque l'intensité enregistrée est inférieure à 2 mm/h pendant 60 minutes) ;

* un critère (n°2) qui permet d'individualiser les corps d'averse (intensité inférieure à 5 mm/h pendant 15 minutes).

Toutes les averses ne sont pas prises en considération et celles qui sont considérées comme trop faibles sont éliminées. Les seuils de troncature correspondent au tableau suivant :

Tableau n°2.605

Seuils de troncature adoptés pour différentes durées d'averse

Durée (en min.)	5	10	15	30	45	60	90	120	180
Hauteur (en mm)	3	4	5	7	9	11	14	16	19

Un premier résultat concerne la répartition en une ou plusieurs averses de la précipitation journalière. Il est résumé dans le tableau n°2.606. Les résultats obtenus par Camus et al. (1976) sur le bassin de Korhogo et par Lafforgue sur les bassins versants de Sakassou (1982) sont tout à fait comparables.

Tableau n°2.606

Pourcentage d'occurrence d'une ou de plusieurs averses en 24 heures

		Nombre d'averses en 24 h		
		1	2	3 et +
averse complète	critère 1	91%	7%	2%
	critère 2	86%	12%	2%
Korhogo		89%	9%	2%
Sakassou		81%	18%	1%

Cette répartition est cependant fonction de la hauteur de pluie journalière. La figure n°2.604 présente cette répartition entre une ou plusieurs averses par jour selon des classes de pluviométrie journalière. Le résultat obtenu à Booro est là encore comparé à ceux de Korhogo et de Sakassou.

Un autre résultat intéressant du travail de Kouamé est une analyse statistique portant sur les averses individualisées de trois années d'observations au pluviographe de la station météorologique et à l'un des pluviographes du bassin versant (P12). Cette analyse porte sur la durée séparant deux averses pendant la période de saison des pluies (mai à octobre), sur la durée de l'averse, sur la hauteur

de l'averse et enfin sur les hauteurs maximales pour diverses durées. Les résultats sont présentés dans le tableau n°2.607 ; mais il faut bien noter qu'il s'agit de valeurs fréquentielles en nombre d'individus et non d'une analyse statistique temporelle exprimée en fréquence de retour.

Kouamé propose enfin une analyse originale de la dynamique des averses sur le bassin versant de la Séné réalisée à partir des six postes pluviographiques fonctionnant simultanément en 1986. Il en conclut que les averses ont un sens de déplacement privilégié (figure n°2.605) vraisemblablement lié au reliefs de la frontière guinéenne au nord-ouest du bassin. Cette hypothèse n'est malheureusement étayée que par un petit nombre d'événements ; mais ce type d'approche a le mérite de n'être pratiquement jamais réalisé dans un tel contexte.

Le travail de Kouamé s'achève sur un essai de classification (évidemment approximatif) des événements pluvieux en trois catégories :

- les *tornades* dont l'intensité maximale est généralement supérieure à 50 mm/h. Ces averses sont violentes et durent entre 20 et 120 minutes. Elles concernent 40% des événements pluvieux.
- les *averses à caractère continu* dont les intensité sont modérées et qui peuvent présenter plusieurs pointes. Elles durent entre 30 et 180 minutes et concernent, elles aussi, 40% des évènements pluvieux.
- les *pluies de crachin* enfin ont des intensités qui restent inférieures à 20 mm/h, mais leur durée peut dépasser 300 minutes. Elles n'interviennent que dans 20 % des cas.

FIG 2.604

Pourcentage d'occurrence

d'une averse unique par jour de pluie

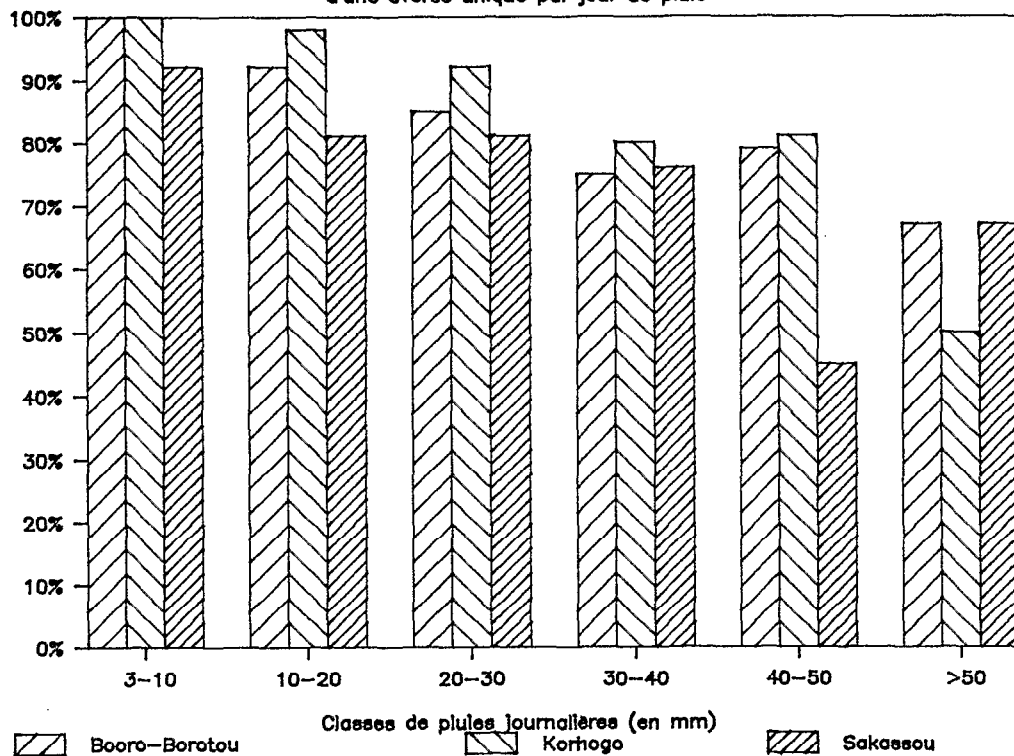
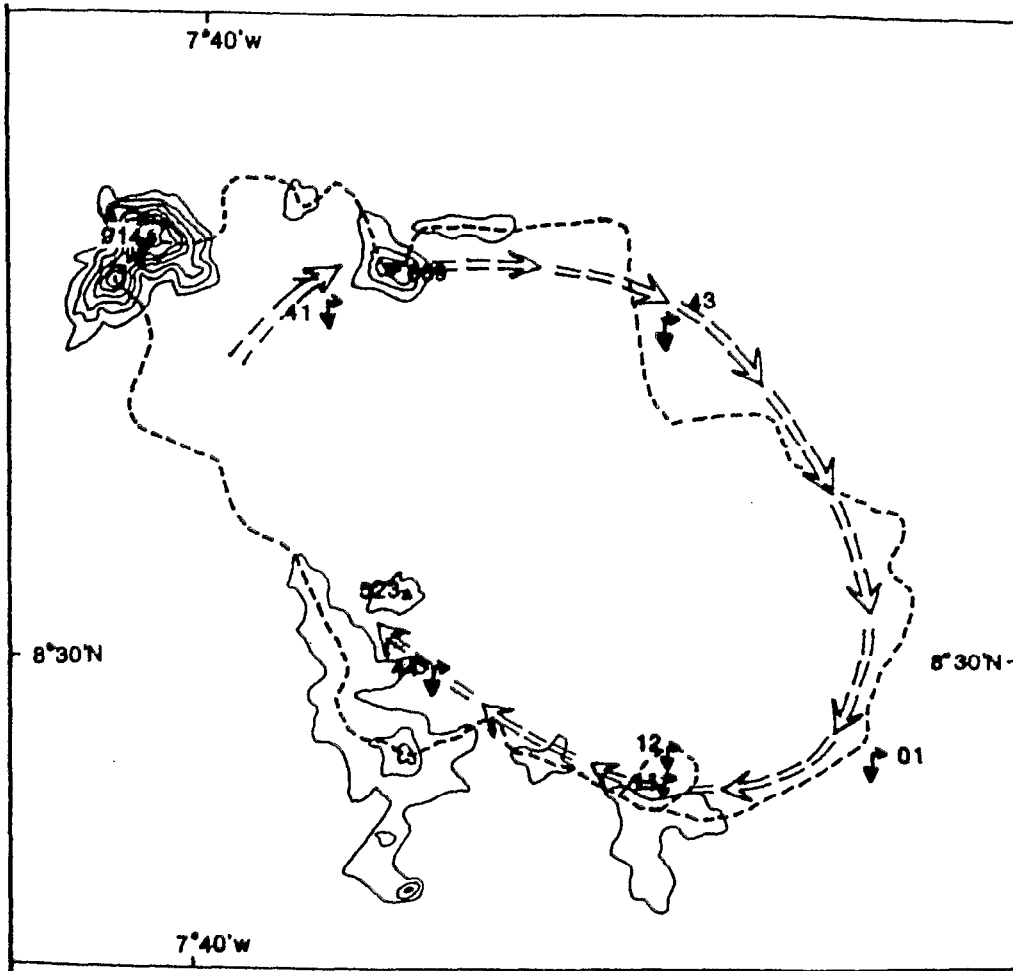


FIG. 2.605



CIRCULATION PRIVILEGIEE DES AVERSES
SUR LE BASSIN VERSANT DE LA SENE
(D'APRES KOUAME, 1987)

Tableau n°2.607

Statistique univariée sur les averses individualisées à Booro-Borotou

		Probabilité au non-dépassement						
		0,05	0,1	0,2	0,5	0,8	0,9	0,95
durée inter-averses (en min.)	crit. 1	331	728	1387	3485	7565	11030	14942
	crit. 2	148	507	1129	3273	7816	11958	16850
durée de l'averse (en min.)	crit. 1	11	16	25	60	134	198	270
	crit. 2	11	14	18	32	58	79	98
hauteur de l'averse (en mm)	crit. 1	4,9	5,6	7,0	11,7	22,1	31,6	43,0
	crit. 2	4,6	5,3	6,4	10,3	18,4	25,9	34,6
intensité max. en 5 min. (mm/h)	crit. 1	13,2	16,8	22,8	39,6	63,6	81,6	97,2
	crit. 2	14,4	18,0	25,2	40,8	63,6	80,4	97,2
intensité max. en 10 min. (mm/h)	crit. 1	11,4	15,0	20,4	33,6	53,4	67,2	81,6
	crit. 2	12,6	16,2	21,6	34,8	54,0	67,2	81,0
intensité max. en 15 min. (mm/h)	crit. 1	9,6	12,8	16,8	28,0	44,8	57,2	69,6
	crit. 2	11,2	14,0	18,0	28,8	45,2	57,2	69,2
intensité max. en 30 min. (mm/h)	crit. 1	6,8	8,4	10,8	18,0	30,2	39,6	49,6
	crit. 2	8,0	9,4	11,6	18,2	30,0	39,8	50,4
intensité max. en 45 min. (mm/h)	crit. 1	5,3	6,4	8,0	13,1	22,4	30,0	38,3
	crit. 2	6,1	6,9	8,3	12,8	22,1	30,1	39,5
intensité max. en 60 min. (mm/h)	crit. 1	4,3	5,1	6,3	10,2	17,7	23,9	30,9
	crit. 2	4,6	5,3	6,4	10,0	17,3	23,6	30,9
intensité max. en 90 min. (mm/h)	crit. 1	3,1	3,7	4,5	7,2	12,7	17,5	23,1
	crit. 2	3,1	3,5	4,3	6,8	11,9	16,5	21,9
intensité max. en 120 min. (mm/h)	crit. 1	2,5	2,8	3,5	5,6	10,1	14,0	18,6
	crit. 2	2,4	2,6	3,2	5,1	9,1	12,8	16,9
intensité max. en 180 min. (mm/h)	crit. 1	1,6	1,9	2,3	3,9	7,1	10,0	13,5
	crit. 2	1,5	1,8	2,1	3,4	6,1	8,6	11,5

2.7. EVAPORATION

2.7.1. Evapotranspiration potentielle

Riou (1975) montre que pour l'évaluation de l'évapotranspiration potentielle en Afrique tropicale, c'est la formule de Penman (1948) qui semble la mieux adaptée. Elle doit être employée de préférence à celle de Turc (1954/55) souvent utilisée en France ou à celle de Thornthwaite (1939) qui représentent mal les conditions climatiques tropicales.

Elle s'écrit :

$$ETP = \frac{\delta}{\delta + \Gamma} \frac{RN}{L} + \frac{\Gamma}{\delta + \Gamma} EA \quad (2.7.1)$$

où :

ETP, évapotranspiration d'après Penman (en mm/jour)

δ , dérivée en fonction de la température de la tension de vapeur d'eau saturante pour la température moyenne sous abri TM. Cette dérivée est commodément calculée (Pouyaud, 1985) par l'expression :

$$\delta = TM^{2/457} - TM/178 + 0.662 \text{ (en mb/}^{\circ}\text{c)} \quad (2.7.2)$$

L, chaleur latente d'évaporation de l'eau (242 J/mm.cm²) ;

Γ , constante psychrométrique fonction de la pression atmosphérique PA (ici considérée comme constante égale à 960 mb) et du coefficient psychrométrique (0,665) ;

RN, rayonnement net au dessus de la surface évaporante (en J/cm².jour) ;

EA, appelé *pouvoir évaporant de l'air* représente l'évaporation d'une nappe d'eau fictive à la température de l'air sous abri TM (en mm/jour).

2.7.1.1. Evaluation du rayonnement net RN

On calcule RN à partir des seules données climatologiques selon la formulation proposée par Riou (1975) :

$$RN = (1 - \alpha) G - \sigma TM^4 (0.4 - 0.05 \sqrt{ED}) (0.5 + 0.5 S/S_0) \quad (2.7.3)$$

Où :

α , albédo fonction de la réflectance de la surface du sol ;

G, rayonnement global (calculé au chapitre 2.5) ;

σ , constante de Stefan-Boltzmann (4,92.10⁻⁷ J.cm⁻².°K⁴/jour) ;

ED, moyenne de la tension de vapeur d'eau dans l'air (en mb) ;

TM, moyenne de la température sous abri (converti en °K) ;

S/S₀, rapport de la durée d'insolation à celle du jour (calculé au chapitre 2.5).

Les valeurs moyennes ED et TM doivent être évaluées à partir des trois relevés quotidiens à 6h, 12h et 18h. D'après Girard (comm. orale, 1988), il convient de prendre ces moyennes sur la période diurne de la journée et de ne pas tenir compte de la période nocturne pendant laquelle le rayonnement est négligeable. La prise en compte de la formulation adoptée au chapitre 2.5 conduirait à sousestimer les températures et à surestimer les tensions de vapeur. Pouyaud (comm. orale, 1988) pense au

contraire que l'ETP se calcule sur une période de 24 heures. Mais la grandeur cherchée étant une grandeur *potentielle*, ce débat n'est pas très important si les conditions sont bien précisées. Le mode de calcul adopté est finalement une moyenne arithmétique, en accordant un poids double à la valeur mesurée à midi.

2.7.1.2. Evaluation du pouvoir évaporant EA

Pour son utilisation dans la formule de Penman, on admet que le pouvoir évaporant EA suit une loi de la forme (équation de Dalton, 1802) :

$$EA = f(U) (EW - ED) \quad (2.7.4)$$

Où :

$f(U)$ est une fonction de la vitesse du vent. Riou (1975) propose une formulation simplifiée pour l'Afrique Centrale que nous adoptons :

$$f(U) = 0.24 U \quad (2.7.5)$$

EW est la tension de vapeur d'eau saturante correspondant à la température TM estimée par (Pouyaud, 1985) :

$$EW = TM^3 / 1386 - TM^2 / 286 + 0.71 TM + 4.8 \quad (2.7.6)$$

2.7.1.3. Evaluation de l'albédo

L'albédo est défini comme le rapport entre le rayonnement global réfléchi et le rayonnement incident correspondant sur une surface donnée.

Brutsaert (1984) résume dans un tableau les valeurs proposées par divers auteurs pour des types de surfaces caractéristiques. Nous en extrayons quelques lignes (tableau 2.701) :

Tableau 2.701

Valeurs moyennes de l'albédo pour différentes surfaces naturelles

Type de surface	albédo
Eau profonde	0.04-0.08
Sols sombres humides ; champs labourés	0.05-0.15
Sols gris ; champs dénudés	0.15-0.25
Herbe verte et végétation basse	0.15-0.25
Prairie sèche et savane	0.20-0.30
Forêt	0.15-0.25

Monteny (1981, et comm. orale, 1985) confirme ces valeurs et estime que l'albédo en région de savane humide (arborée dense) varie selon l'état de la végétation entre 0,15 et 0,25 :

- Un albédo de 0,15 correspond à la période qui suit immédiatement les brûlis où la strate basse est pratiquement inexistante et le sol noirci.
- Avec les premières pluies et l'apparition du couvert herbacé l'albédo va évoluer de 0,15 vers 0,25 au maximum de la période végétative.

Des nuances sont à prendre en considération avec la participation des zones de cultures. Mais en l'absence de mesures de rayonnement, on se contentera de ces valeurs moyennes (Tableau 2.702) :

Tableau 2.702

Valeurs mensuelles de l'albédo à Booro-Borotou

Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Jun	Jul	Aoû	Sep	Oct	Nov	Déc
0.15	0.15	0.15	0.15	0.20	0.20	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25

Un long débat est ouvert pour prendre en compte le passage du feu. Ce passage (voir paragraphe 4.3.2.3) intervient en moyenne entre le 15 décembre et le 31 janvier et le bassin est presque totalement brûlé en trois ou quatre *vagues* successives. Nous avons choisi de le faire figurer sous forme d'une solution de continuité dans la séquence des valeurs d'albédo. En effet la surface du sol passe de façon quasi instantanée d'une situation sèche et très encombrée par des herbes hautes (plus de 4 mètres) à un désert noirci où ne subsistent que les ligneux, souvent complètement défoliés. Nous concevons cependant que ce procédé est peu satisfaisant et mérite une réflexion qui nécessiterait des mesures beaucoup plus complètes.

Enfin les valeurs de l'albédo devraient de plus être nuancées d'une année sur l'autre en fonction de l'arrivée des pluies. En fait on ne note pas réellement de différence pour le démarrage végétatif qui se produit avec les premières pluies en avril-mai.

2.7.1.4. Résultats

En utilisant cette méthode de calcul, le tableau suivant rassemble les valeurs mensuelles obtenues pour l'évapotranspiration d'après Penman pour toute la période d'étude du bassin versant de Booro-Borotou (tableau 2.703).

Tableau 2.703

Evapotranspiration potentielle calculée par la formule de Penman (mm/jour)

ETP	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Jun	Jul	Aoû	Sep	Oct	Nov	Déc	Ann
1984			6,04	5,85	4,83	4,43	3,37	4,02	3,84	4,17	4,06	3,11	(4,37)
1985	4,97	5,28	5,33	5,39	4,85	4,05	3,35	3,48	3,72	4,20	4,20	3,26	4,34
1986	4,83	5,92	5,43	5,31	4,79	4,59	3,22	3,51	3,45	3,89	3,85	3,13	4,33
1987	4,81	5,84	5,46	6,14	4,89	4,11	4,07	3,34	3,38	3,99	3,96	3,17	4,43
1988	4,26	5,27	5,54										(5,02)
Inter	4,72	5,58	5,56	5,67	4,84	4,30	3,50	3,59	3,60	4,06	4,02	3,17	4,38
Total	146,1	158,9	172,3	170,1	149,9	128,8	108,5	111,1	107,9	125,9	120,4	98,26	1598,

La figure 2.701 présente l'histogramme moyen de ces évapotranspirations sur la période étudiée.

Le résultat obtenu est comparable avec le schéma proposé par Riou (1975) pour la zone tropicale humide où il avait obtenu 1613 mm pour Ba-illi et 1590 mm pour Bébédjia (Tchad), dans des conditions de précipitations sensiblement plus faibles. Penman lui-même (1956) évaluait l'évaporation sur le lac Volta (Ghana) à 1676 mm (avec un albédo de 0,10).

FIG 2.701

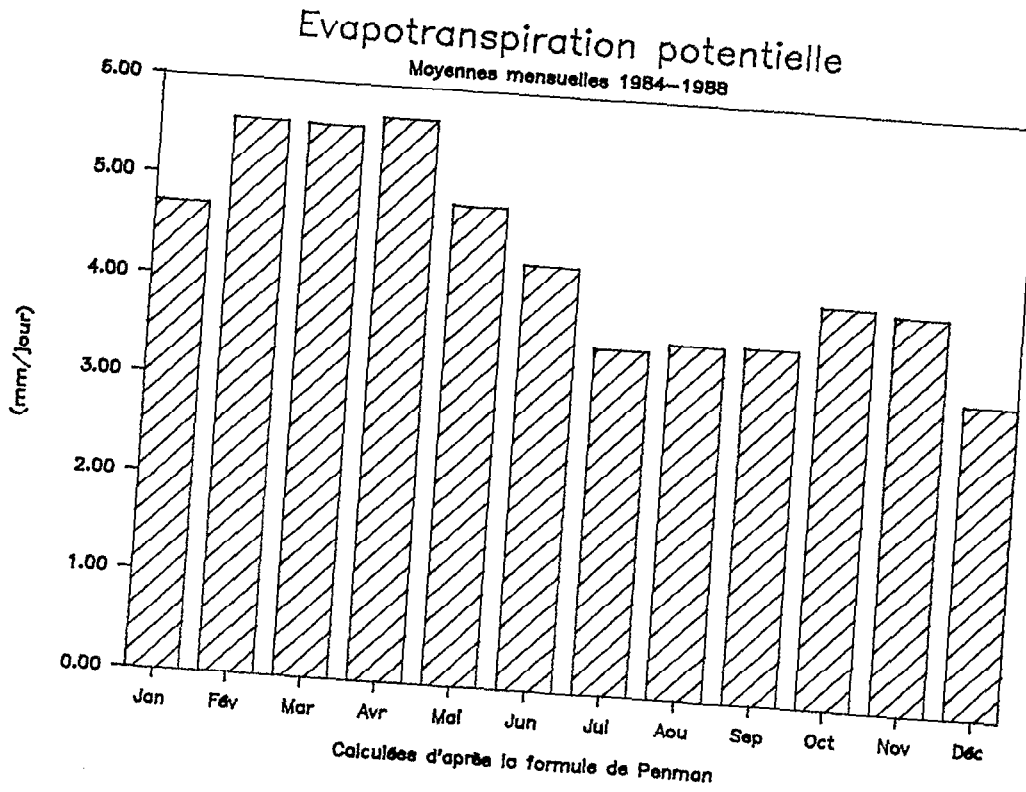
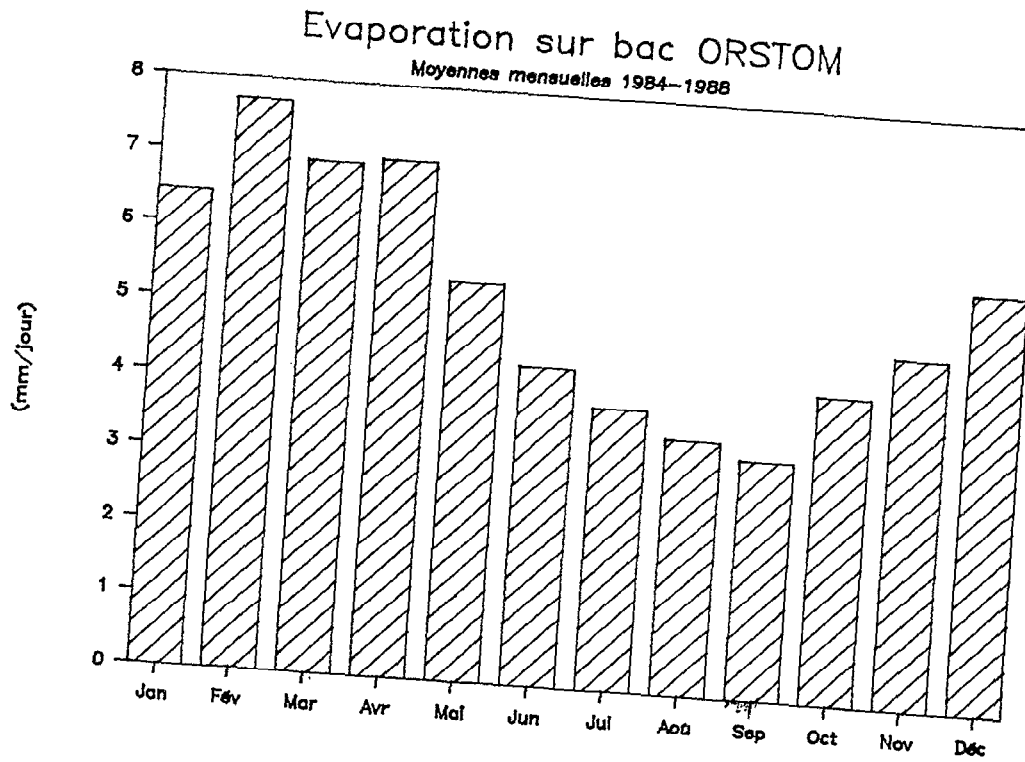


FIG 2.702



2.7.2. Evaporation sur bac Colorado

L'évaporation est mesurée sur bac Colorado type ORSTOM, enterré sur une profondeur de 50 cm, un rebord de 10 cm et couvrant une surface de un mètre carré ; les alentours sont plantés en pelouse naturelle, régulièrement fauchée. Le dispositif comporte deux bacs et la mesure est effectuée à 6 heures. La mise à niveau est repérée par une pointe affleurante dans l'un des coins. Les deux bacs sont remplis d'eau, le second étant recouvert d'une pellicule d'huile interdisant l'évaporation naturelle. L'ajout ou le retrait d'eau est effectué à l'aide d'une éprouvette graduée d'un litre (1 litre = 1 mm). En l'absence de précipitation, le niveau du bac 2 ne varie pas et l'évaporation est donnée par le complément fait au bac 1 pour le remettre à niveau. En cas de précipitation deux hypothèses sont possibles :

- La précipitation est inférieure à l'évaporation : l'évaporation est alors égale au rajout du bac 1 auquel on additionne le retrait du bac 2.
- La précipitation est supérieure à l'évaporation : l'évaporation est alors égale au retrait du bac 2 auquel on retranche le retrait du bac 1.

Le tableau 2.704 donne les valeurs moyennes sur la période d'étude.

Tableau 2.704

Evaporation moyenne sur bac Colorado ORSTOM en mm/jour

	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Jun	Jul	Aoû	Sep	Oct	Nov	Déc	Ann
1984	5,4	6,2	6,2	6,5	4,8	4,1	3,2	3,7	3,4	3,6	4,0	4,2	4,6
1985	6,2	7,8	6,8	6,1	5,6	4,3	3,3	3,1	3,3	4,6	5,0	5,7	5,1
1986	6,9	8,0	6,2	6,7	5,0	4,8	3,7	3,5	3,1	4,1	4,6	6,5	5,3
1987	6,6	8,3	7,5	8,7	6,2	4,1	5,1	3,6	3,2	4,4	5,4	6,3	5,8
1988	7,1	8,2	7,9										
Inter	6,4	7,7	6,9	7,0	5,4	4,3	3,8	3,5	3,2	4,2	4,7	5,7	5,2

La figure 2.702 présente l'histogramme des moyennes mensuelles interannuelles.

Le total annuel moyen de l'évaporation sur bac enterré Colorado est de 1898 mm. Il est légèrement supérieur à celui évalué pour l'évapotranspiration par la formule de Penman, ce qui est généralement le cas à cause d'une part des effets de bord de l'installation de mesure et d'autre part à un effet d'oasis de la station dans son ensemble (Pouyaud, comm. orale, 1988).

2.8. STOCKAGES SOUTERRAINS

L'évaluation des stockages souterrains que ce soit dans les nappes ou dans la zone non saturée est sans doute l'un des points faibles du dispositif d'observation des bassins de Booro-Borotou. Des mesures ont cependant été faites soit sur des sites tensio-neutroniques, soit dans des tubes piézométriques.

Dans le chapitre de description pédologique du bassin versant principal (chapitre 2.3), les possibilités d'aquifères importantes ont été localisées dans le réservoir sableux du bas-fond et de bas de versant (limité par l'induration de mi-pente). Sur les hauts de versants des possibilités de stockage saturé existent sans doute : l'altération profonde du substratum est là pour en témoigner ; mais les volumes stockés en nappe ne le sont sans doute que brièvement et dans des conditions saisonnières exceptionnelles.

2.8.1. La zone non saturée

Les observations de ce volet du programme Hyperbav sont à l'initiative d'Emmanuel Fritsch.

L'évaluation des stocks hydriques dans la zone non saturée est faite sur deux transects équipés de sites de mesures tensio-neutroniques. Le premier de ces transects est installé sur les sols rouges et ocres au dessus de l'induration de mi-versant à proximité des pluviographes P11/P51 (voir carte d'équipement du bassin versant). Il comporte 5 sites de mesure, comportant chacun un tube permettant des mesures de l'humidité dans le sol à l'aide d'une sonde neutronique et une batterie d'une douzaine de bougies tensiométriques installées à diverses profondeurs et reliées par des capillaires à un système de manomètres à mercure permettant de mesurer les potentiels de succion dans le sol. Le deuxième transect est installé sur les sols jaunes et de bas fond au dessous de l'induration de mi-versant et à proximité des champs. Les 6 sites de mesure comportent un dispositif identique à celui du transect amont.

Un protocole de relevé assez complexe a été mis en place qui imposait un minimum d'une observation par quinzaine ; la fréquence des passages intermédiaires liée à l'occurrence des précipitations pouvait atteindre un rythme presque quotidien en saison des pluies.

La mise en forme de ces observations n'est pas encore achevée à la date de rédaction de ce mémoire. L'étalonnage en particulier des tubes neutroniques n'est pas entièrement satisfaisant et nécessite des mesures complémentaires sur le terrain, mesures qui doivent être faites pendant l'hivernage 1988. Cependant nous proposons dans le chapitre 3.1 une analyse provisoire sur deux tubes neutroniques situés chacun au milieu des transects amont et aval.

2.8.2. La zone saturée

20 piézomètres installés sur le bassin versant permettent d'avoir une indication sur la variation des niveaux piézométriques.

Mis en place au cours de la saison sèche de 1985, ils sont constitués de tubes en PVC de 8 cm de diamètre ouverts au fond et *crépinés* (fentes horizontales à la scie réparties sur une hauteur de 1 m à 1,5 m à partir du fond). Le forage a été réalisé manuellement à la tarière aussi profond que possible, c'est à dire jusqu'à 4 mètres dans le meilleur des cas.

Le choix des emplacements était délicat, puisque réalisé après une seule année d'observations hydropluviométriques et avec des indications sur la structure pédologique encore fragmentaires. Il fallait trouver des sites où, d'une part, la nappe se trouve à une profondeur raisonnable et qui, d'autre part, soient représentatifs de cette nappe pour une utilisation profitable des futurs relevés.

Les sites se trouvent donc tous dans le bas fond (voir carte hors-texte sur les sites de mesures et l'équipement du bassin versant) et sur la partie inférieure des versants. La répartition dans le bas fond

est, autant que possible, régulière de part et d'autre du lit principal (piézomètres n° 4, 5, 6, 8, 9, 12, 15 et 16). Deux piézomètres (n°1 et 2) contrôlent l'amont du *cirque* topographique qui correspond à la *source* du cours d'eau principal et également qui fait office de collecteur des ravines drainant les eaux de ruissellement de l'amont du bassin. Trois piézomètres ont été installés le plus haut possible dans les dépressions assez larges (décrites au paragraphe 2.3.5.2) remontant le long des versants (n°3, 7 et 13). Enfin la totalité du transect tensio-neutronique aval en rive droite a été équipé à raison d'un piézomètre par site de mesure (n° 10, 17, 18, 19, 20 et 21).

Le piézomètre n°14 qui devait se trouver en rive gauche face au piézomètre n°12 n'a jamais été installé à cause de difficultés insurmontables de forage (entre autres, bris de tarière) sans doute liées à l'épaisse couche d'argile qui se trouve proche de la surface. Pour la même raison le piézomètre n°8 dont la profondeur de forage est restée inférieure à 2 mètres n'a jamais atteint la zone saturée.

Les relevés piézométriques sont effectués entre leur mise en place et la fin des observations, le 31 mars 1988, tous les cinq jours (à de rares exceptions près : priorité aux jaugeages en cas d'averses violentes, pannes de sonde). Les relevés sont réalisés en profondeur comptée à partir du haut du tube (qui dépasse du sol d'une hauteur allant de 10 à 25 cm) et mesurée avec une sonde lumineuse (deux électrodes qui ferment un circuit électrique). Tous les tubes ont été rattachés au nivellement du bassin et les cotes des niveaux piézométriques sont finalement données en altitude absolue dans le nivellement général de l'Afrique de l'Ouest.

Les figures n°2.801 à 2.806 donnent les variations des niveaux observées sur la totalité de la période d'étude à six piézomètres que l'on peut considérer comme représentatifs. On pourra consulter les rapports de campagne pour avoir la totalité des résultats (Chevallier et al., 1986, 1987 et 1988).

On peut noter que deux piézomètres (n°9 et 12) débordent pendant la saison humide et quelques semaines au delà. De plus, les piézomètres n°17 et 18 installés assez haut sur le versant ne sont pas assez profonds pour que la variation de niveau soit suivie totalement à la fin de la saison sèche.

En règle générale le niveau de la nappe atteint sa cote maximale à l'extrême fin de la saison des pluies juste après les dernières averses de quelque importance (fin octobre - début novembre). Le niveau décroît régulièrement à partir de cette date pour atteindre son minimum vers la mi-juillet, alors que les pluies ont déjà abondamment repris depuis plus de deux mois. Des anomalies dans la variation de ces niveaux sont notées, avec en particulier à certains endroits des remontées du niveau de la nappe en saison sèche en l'absence de précipitation ; nous y reviendrons.

FIG 2.801

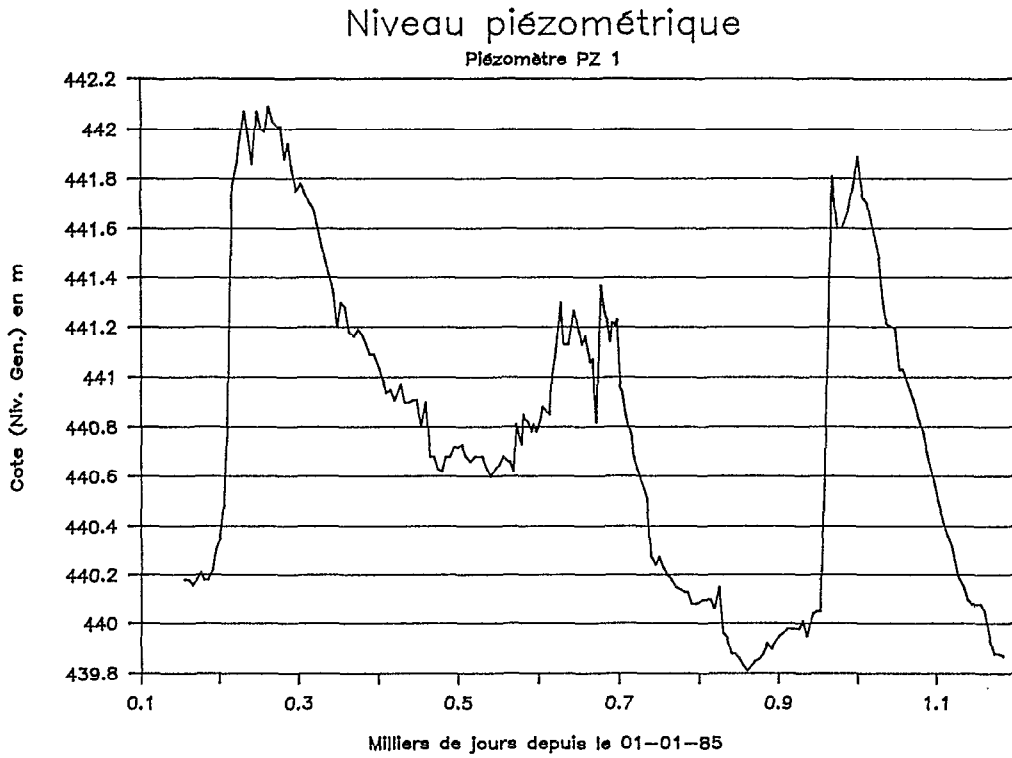


FIG 2.802

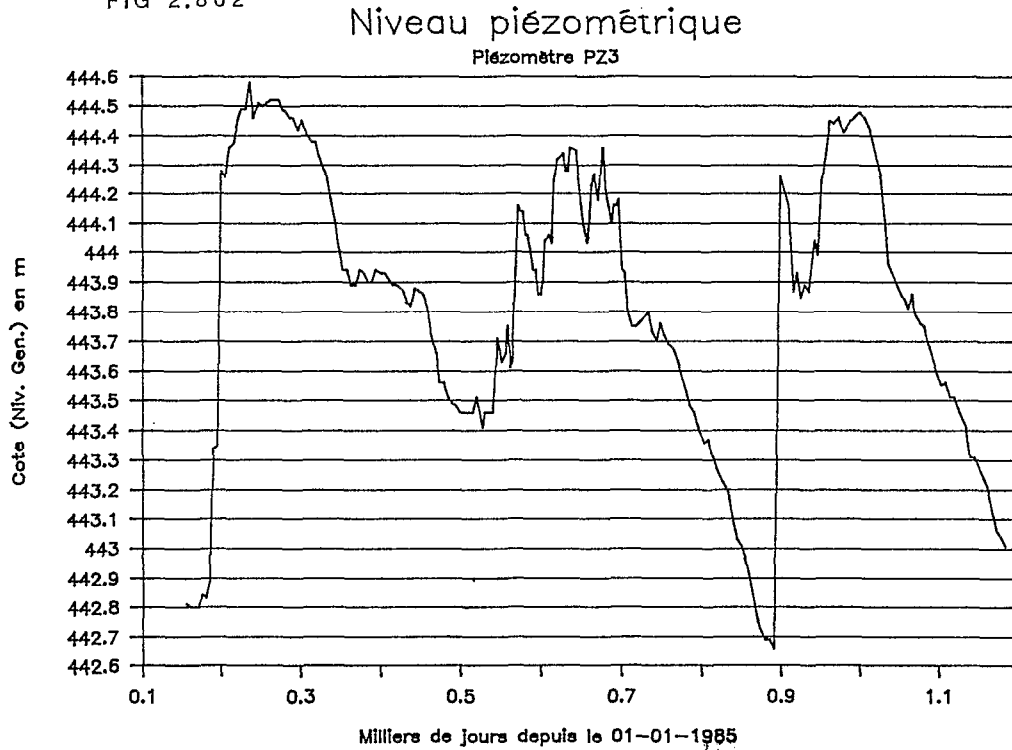


FIG 2.803

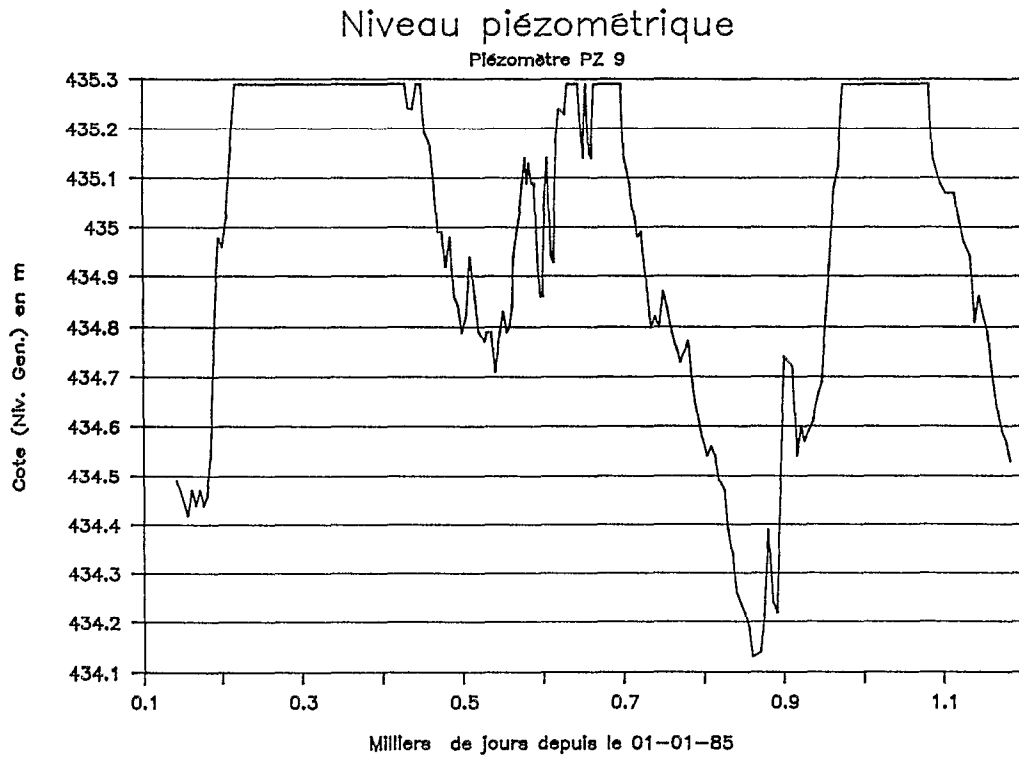


FIG 2.804

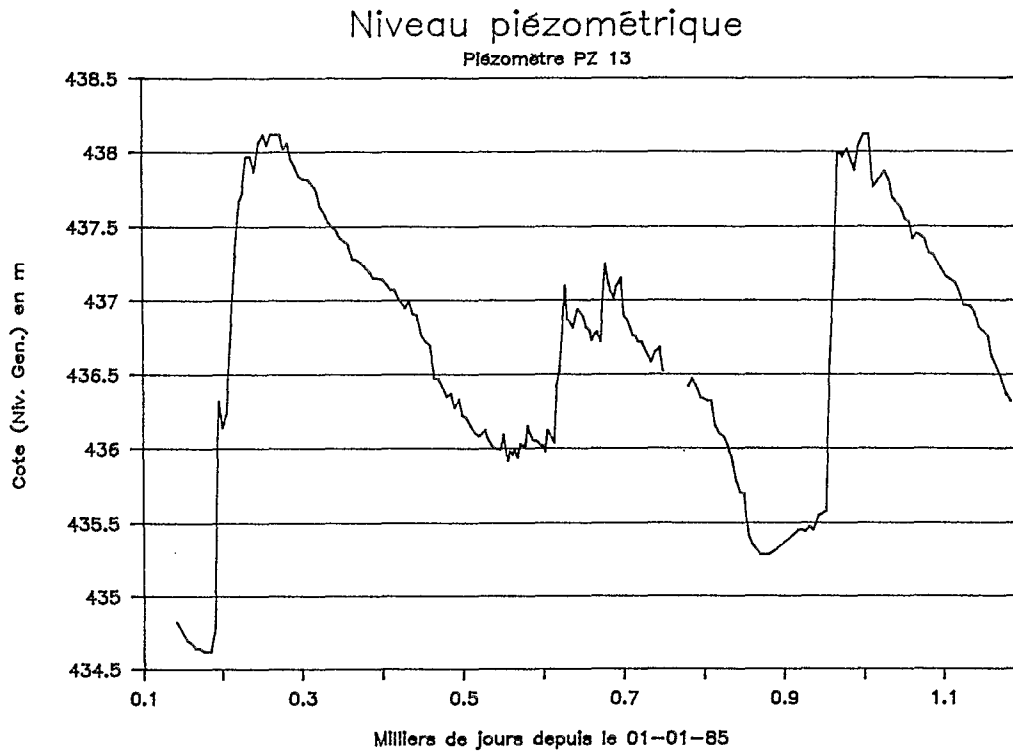


FIG 2.805

Niveau piézométrique

Piézoètre PZ 17

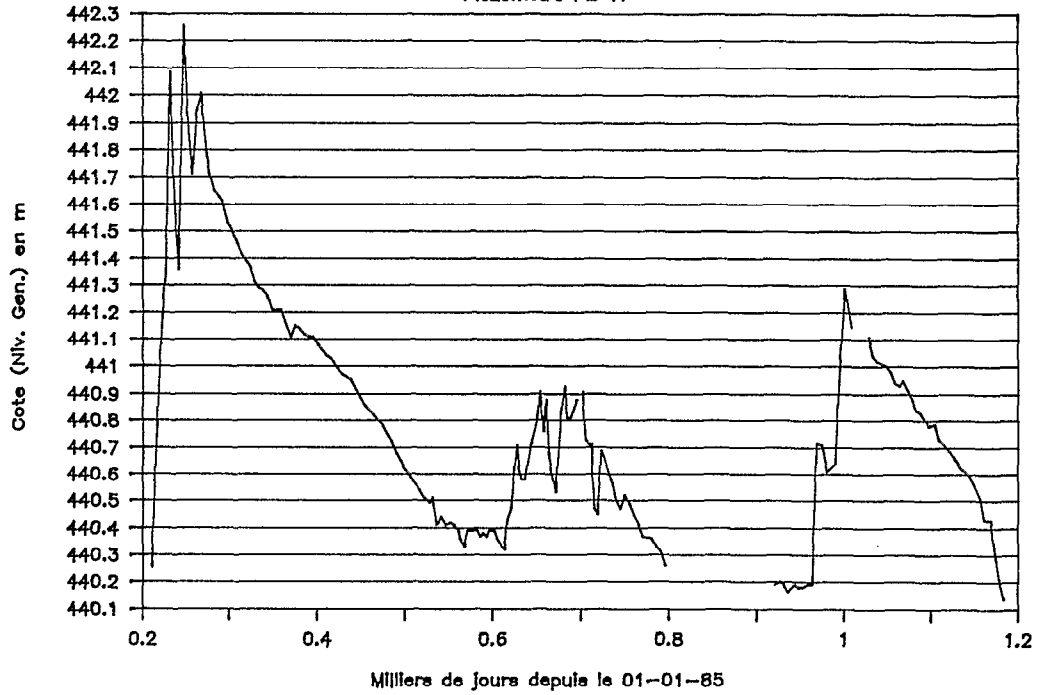
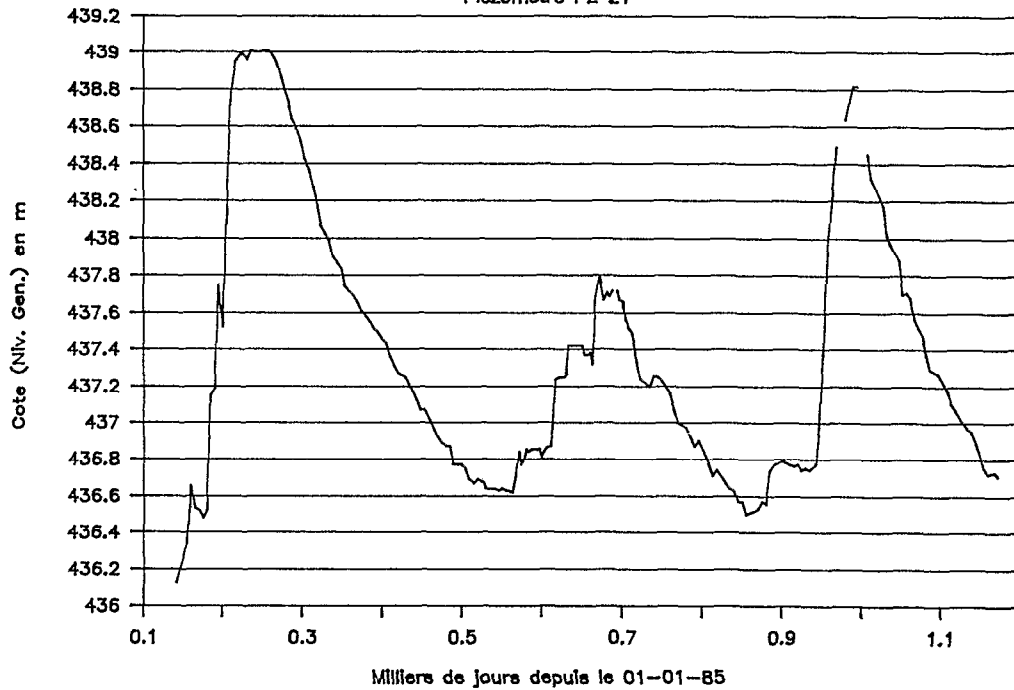


FIG 2.806

Niveau piézométrique

Piézoètre PZ 21



2.9. ECOULEMENTS

Dans le premier chapitre de cette partie, les caractéristiques physiographiques des trois bassins versants étudiés ont été données sans plus de précision. Il est bien évident que ces caractéristiques correspondent aux trois sections de cours d'eau équipées pour l'enregistrement des hauteurs d'eau et pour l'étalonnage permettant d'évaluer les débits transités. Avant de récapituler les observations à ces trois stations, une description sommaire s'impose.

2.9.1. Description sommaire des stations hydrométriques

Le rapport d'installation (Chevallier et al., 1986) et les trois rapports de campagne (Chevallier et al., 1986, 1987 et 1988) décrivent de façon détaillée les installations et les procédures d'étalonnage des trois stations. Le lecteur pourra s'y reporter le cas échéant.

2.9.1.1. Station de Booro-Borotou Principal

La station est installée sur un seuil rocheux qui affleure sur une centaine de mètres le fond du talweg. Elle est constituée d'un canal bétonné de 8 mètres de long et de 3,5 mètres de large où les écoulements sont concentrés par des digues en terre compactée, suivi d'un bassin de tranquillisation qui conduit à un déversoir triangulaire en mince paroi. Le canal a été équipé après la première saison des pluies de deux *trottoirs* reconcentrant les écoulements de moyennes eaux.

Deux limnigraphes à flotteurs et à déroulement journalier enregistrent les hauteurs d'eau :

- sur le déversoir (capteur 1), les écoulements de base et les faibles crues ;
- dans le canal (capteur 2), les écoulements de moyennes et hautes eaux.

L'étalonnage du capteur 1 a été établi à partir de 134 jaugeages réalisés soit par capacité (débits inférieurs à 3 l/s), soit au micro-moulinet. Il couvre une fourchette de débit de 0 à 110 l/s.

L'étalonnage du capteur 2 comporte deux tarages correspondant à la modification de la station en mars 1985. 65 jaugeages ont été réalisés entre 100 et 4000 l/s et la plus forte crue a été complètement suivie.

Les deux séries de débits ont été fusionnées selon le principe suivant :

- Tous les débits du capteur 1 correspondants à une cote supérieure à la cote de débordement du déversoir sont mis en lacune.
- Toutes ces lacunes sont complétées lorsque les données existent par les débits observés au capteur 2.

L'équipement lourd de cette station lui confère une parfaite stabilité et une très bonne précision dans les résultats obtenus. Les lacunes ou les observations douteuses sont rarissimes.

2.9.1.2. Station de Booro-Borotou Amont

La station amont a été installée au cours de la saison sèche de 1985 à la lumière de certaines observations pédologiques. Elle se situe au niveau d'un épais bouchon argileux qui provoque la disparition du bas-fond immédiatement à l'aval du *cirque*, vaste amphithéâtre qui reconcentre les écoulements de la tête de bassin versant.

Construite légèrement, elle est constituée d'une passerelle posée sur deux culées bétonnées de part et d'autre du lit de la rivière bien encaissé à cet endroit. Le lit du cours d'eau n'a pas été retouché ; il est seulement désherbé sommairement pour faciliter les mesures de débits. Un limnigraphe à flotteur et à rotation journalière enregistre les hauteurs d'eau.

Cette station ne dispose pas de *contrôle* aval et le lit n'est pas stabilisé. De plus, le socle n'étant pas affleurant, elle suppose un inféreflux qui n'est pas évaluable.

L'étalonnage, dans ces conditions, ne peut pas être de bonne qualité, particulièrement en faible écoulement. Il est établi sur trois périodes de tarage à partir de 58 jaugeages qui, malheureusement, ne couvrent pas en 1985 toute la gamme des hauteurs observées. Il faudra se contenter d'une qualité assez sommaire des observations qui sont cependant là, aussi, pratiquement complètes sur la période d'étude.

2.9.1.3. Station de la Séné à Touresso

Mise en service comme Booro-Borotou Amont au cours de la saison sèche de 1985, la station est installée sur le pont de la route nationale A7 (Daloa à Odienné) à environ 30 km au nord de Touba. Ce pont est formé de deux passes de 3,5 mètres de large pour un tirant d'air de 4 mètres. Le radier est bétonné et déborde assez largement à l'aval et à l'amont. Un limnigraphe à flotteur et à rotation hebdomadaire enregistre les hauteurs d'eau.

Deux points sont à noter à propos de cette installation :

- En très basses eaux, le flotteur repose sur le radier et les écoulements ne sont plus enregistrés correctement. Des lectures d'échelles sont alors faites quotidiennement pour pallier l'absence d'information.
- Le pont est installé dans une courbe de la rivière et des différences de cotes significatives ont été notées en forte crue entre la rive droite (où se trouve le limnigraphe) et la rive gauche (où se trouve l'échelle de contrôle). Les corrections nécessaires ont été faites pour l'étalonnage.

L'étalonnage de cette station est établi à partir de 35 jaugeages qui couvrent la totalité des hauteurs enregistrées. Cet étalonnage est resté parfaitement stable pendant toute la durée de l'étude.

2.9.2. Ecoulements

On trouvera en annexe les débits moyens journaliers à la station principale. Ils sont présentés en *année hydrologique* (du 1er avril au 31 mars), ce qui donne une meilleure approche globale pour l'évaluation des bilans hydriques annuels.

Les tableaux ci-dessous récapitulent les lames mensuelles écoulées et les lames cumulées des écoulements rapides de crue aux trois stations :

Tableau n° 2.901

Lames mensuelles écoulées et cumul des écoulements rapides de crue à Booro-Borotou Principal (mm)

	Avr	Mai	Jun	Jul	Août	Sep	Oct	Nov	Déc	Jan	Fév	Mar	Ann
1984-85	0,14	0,70	6,21	5,18	9,49	21,3	11,9	2,84	0,99	0,44	0,01	0	59,2
1985-86	0	0	0,15	13,5	80,1	70,3	27,0	8,16	2,91	1,35	0,78	1,23	205
1986-87	1,26	1,86	2,82	1,87	2,91	8,01	5,77	4,63	0,96	0,43	0	0	30,5
1987-88	0	0	1,53	1,17	21,7	36,4	20,1	3,19	1,41	0,21	0	0	85,7
1984-85	0	0	2,00	0,47	1,13	4,13	1,84	0	0	0	0	0	9,6
1985-86	0	0	0	3,37	19,6	7,60	2,07	0	0	0	0	0	32,6
1986-87	0	0	0,13	0,24	0,62	3,01	2,07	0	0	0	0	0	6,1
1987-88	0	0	0,69	0,24	9,81	13,1	1,94	0	0	0	0	0	25,7

Tableau n° 2.902

Lames mensuelles écoulées et cumul des écoulements rapides de crue à Booro-Borotou Amont (mm)

	Avr	Mai	Jun	Jul	Aoû	Sep	Oct	Nov	Déc	Jan	Fév	Mar	Ann
1985-86	0	0	0	27,5	81,8	55,8	26,1	11,4	0	0	0	0	203
1986-87	0	0	0	0,94	0,62	4,98	5,79	5,24	0	0	0	0	17,6
1987-88	0	0	0,05	0	25,7	49,6	46,5	11,5	0	0	0	0	133
1985-86	0	0	0	2,01	24,7	13,8	0,71	0	0	0	0	0	41,2
1986-87	0	0	0	0,18	0,13	1,24	2,17	0	0	0	0	0	3,7
1987-88	0	0	0	0	10,1	8,17	1,00	0	0	0	0	0	19,3

Tableau n° 2.903

Lames écoulées mensuelles et cumul des écoulements rapides de crue de la Séné à Touresso (mm)

	Avr	Mai	Jun	Jul	Aoû	Sep	Oct	Nov	Déc	Jan	Fév	Mar	Ann
1985-86	0	0	0	12,5	70,7	79,2	28,2	6,00	1,66	0,84	0,19	0,82	200,1
1986-87	0	0	0,68	1,42	2,10	2,76	0,97	1,05	0	0	0	0	9,3
1987-88	0	0	0,05	0,39	13,1	27,8	13,8	0,12	0	0	0	0	55,2
1985-86	0	0	0,4	2,62	11,8	18,1	1,25	0	0	0	0	0	33,8
1986-87	0	0	0	0,51	0	1,13	0	0,19	0	0	0	0	1,83
1987-88	0	0	0	0,37	5,68	4,85	1,02	0	0	0	0	0	11,9

Les figures 2.901 à 2.903 permettent de comparer les lames écoulées mensuelles d'une année sur l'autre.

FIG 2.901

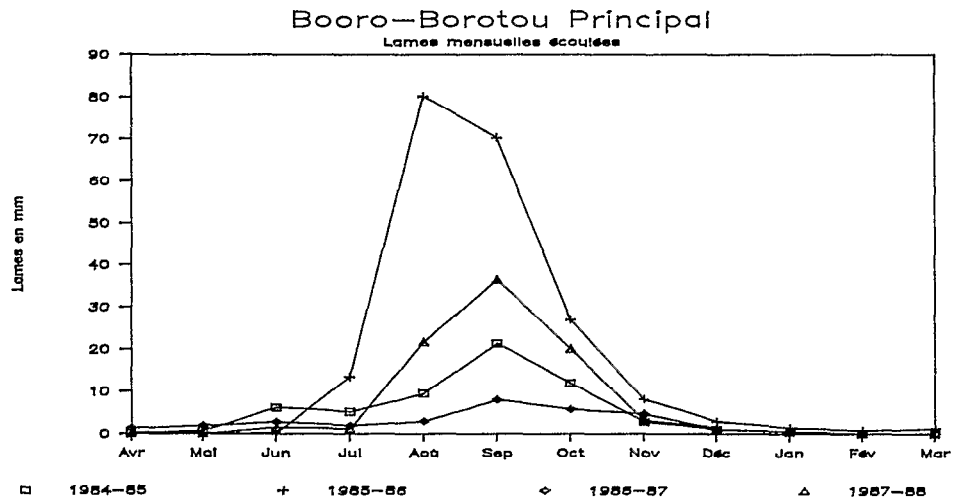


FIG 2.902

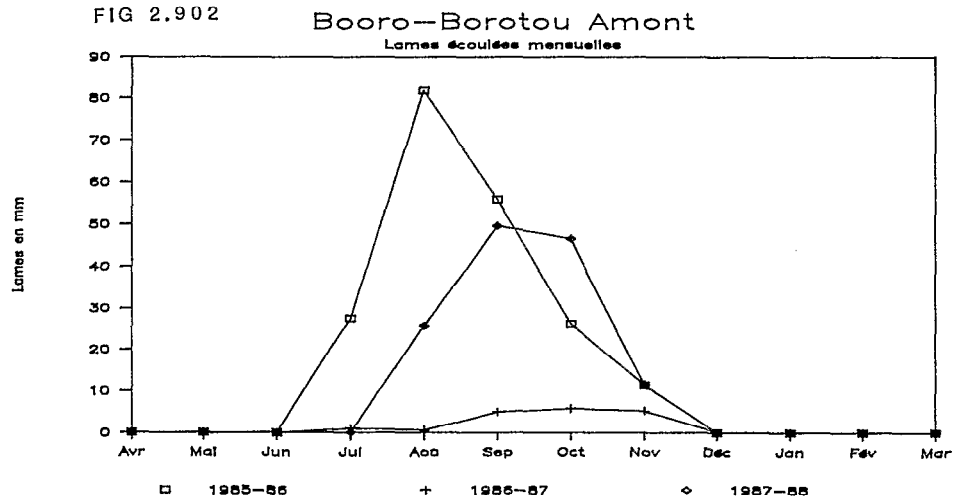
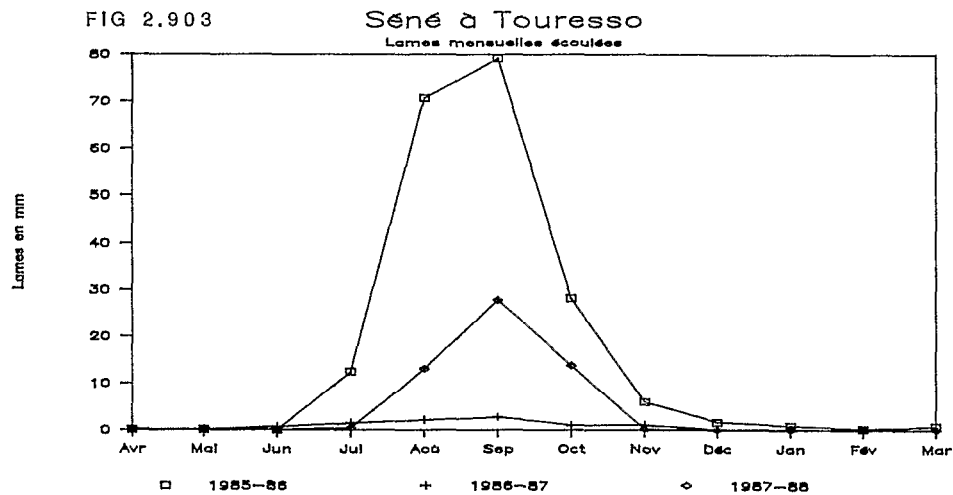


FIG 2.903



2.9.3. Ecoulement rapide de crue

Par définition, on appellera écoulement rapide de crue la part de l'écoulement qui se superpose à l'écoulement de base consécutivement à un événement pluvieux. Cet écoulement dont les chemins peuvent être multiples (voir chapitre 1.2) se produit dans les quelques heures qui suivent les épisodes pluvieux et constitue les phénomènes de crues.

Le problème est la séparation de cet écoulement de l'écoulement de base, séparation qui, on l'a vu, est une notion conceptuelle dont la réalité physique est contestée. Il existe de multiples méthodes plus ou moins sophistiquées (Fritsch, 1987) ; mais, ne souhaitant pas faire d'hypothèses *a priori* sur les mécanismes formateurs des crues, nous avons choisi la technique la plus courante qui consiste à étudier en coordonnées semi- logarithmiques les ruptures de pente en décrue, matérialisant un changement de cinétique de vidange du réservoir que constitue l'ensemble surface-souterrain du bassin versant. Les techniques automatiques facilitent le travail, mais font toujours intervenir le jugement de l'opérateur.

Tous les épisodes pluvieux ne donnent pas lieu à un écoulement rapide, mais tous contribuent à une recharge des stocks internes (zone non saturée et nappes). Et, là aussi, il est parfois difficile de distinguer un véritable écoulement de crue d'un gonflement de la nappe alluviale. De plus, la difficulté croît avec la superficie du bassin versant, qui, d'une part, est soumis à une plus grande hétérogénéité de précipitation et, d'autre part, a une faculté d'intégration et de nivellement des phénomènes beaucoup plus grande.

Les crues des trois bassins versants ont été dégagées en faisant le plus possible intervenir l'expérience personnelle et la connaissance pratique du terrain. Un seuil de 0,1 mm de lame ruisselée a été fixé, en deçà duquel la crue n'est pas considérée comme significative. Les tableaux des crues du bassin versant principal avec leurs principales caractéristiques sont en annexe.

Les cumuls mensuels des lames d'écoulement rapide de crue (lames dites *ruisselées*) sont donnés dans les tableaux 2.901 à 2.903, ce qui permet de les comparer aux écoulements totaux, et les figures n°2.904 à 2.906 schématisent les résultats de ces tableaux.

Le tableau n°2.904 récapitule la part annuelle respective de l'écoulement rapide de crue dans l'écoulement total aux trois stations :

Tableau n°2.904

Part de l'écoulement rapide de crue dans l'écoulement annuel (%)

Année	1984-85	1985-86	1986-87	1987-88	Moyenne
Principal	16,2%	15,9%	19,9%	30,1%	20,5%
Amont		20,3%	21,2%	14,5%	18,7%
Séné		16,9%	19,7%	21,6%	19,4%

FIG 2.904

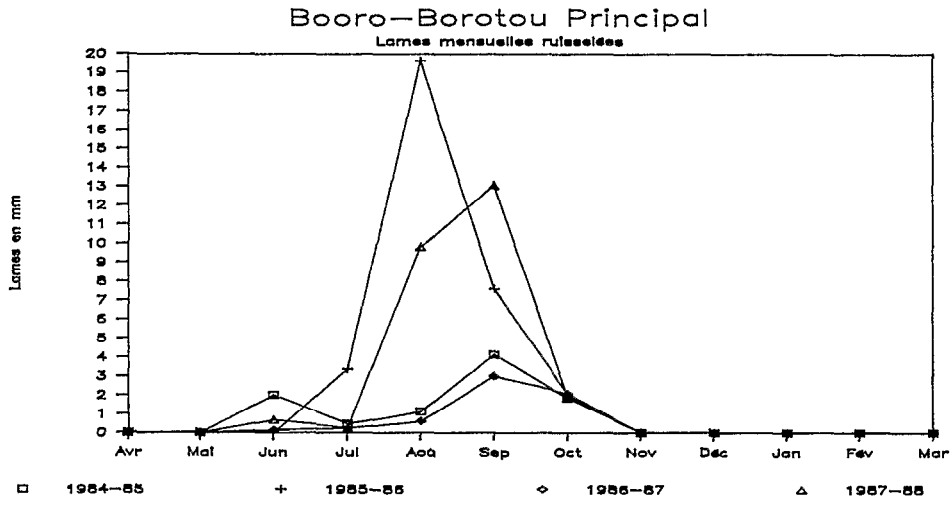


FIG 2.905

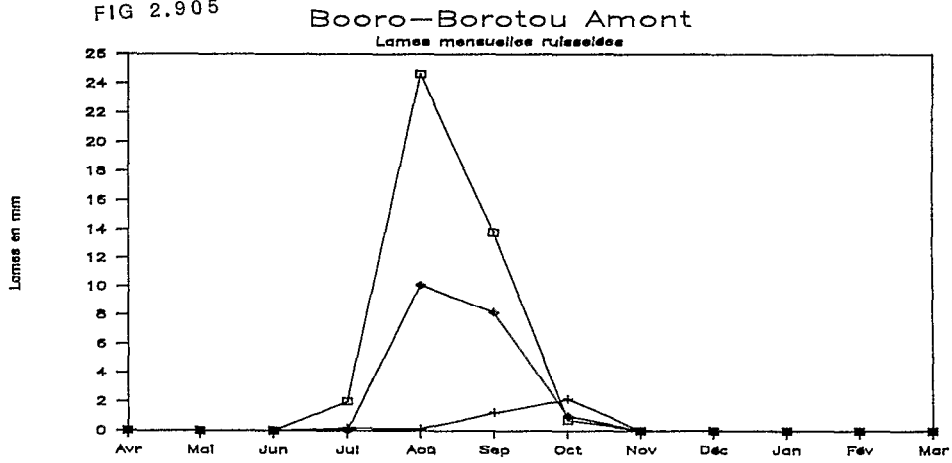
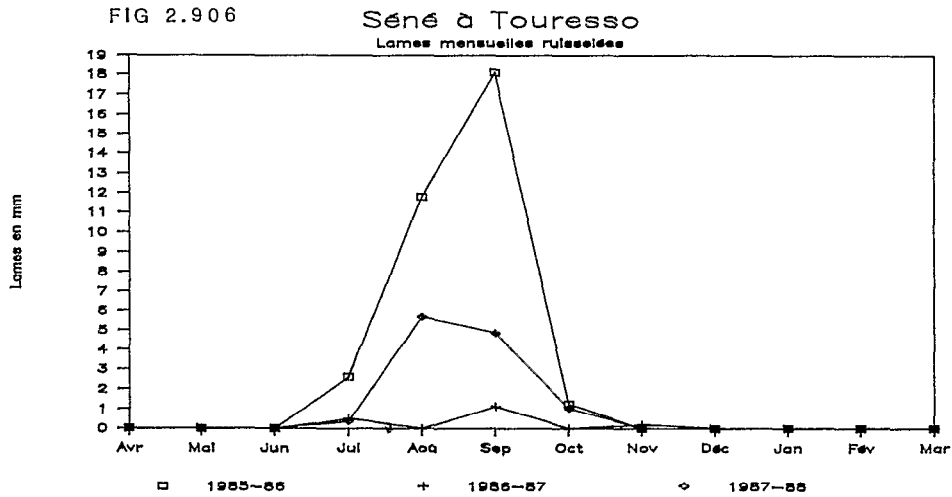


FIG 2.906



TROISIEME PARTIE :
EXPERIMENTATIONS

3.1. SIMULATION DE PLUIES

3.1.1. *Le principe*

Le principe de la simulation de pluies appliquée à la recherche du comportement hydrodynamique des sols de petits bassins versants a déjà été largement exposé par Casenave (1982, 1985), Chevallier (1982), Albergel (1987), Thébé (1987) pour ne citer que les principales publications des hydrologues de l'ORSTOM sur ce sujet. Il n'est pas dans notre propos de décrire encore une fois de façon détaillée le dispositif expérimental, mais nous en rappelons ici les éléments essentiels.

Il s'agit d'un appareil mis au point par l'ORSTOM et expérimenté depuis 1977 (Asseline et Valentin, 1978). Le dispositif permet de reproduire des averses sur une parcelle de sol de 1 m délimitée par un cadre métallique, en respectant les conditions naturelles de *dimension* et d'*énergie cinétique* des gouttes de pluies. Les intensités sont parfaitement reproductibles par paliers constants compris entre 30 et 150 mm/h, réglables sans interruption de l'arrosage. L'enregistrement en continu par un limnigraphe de grande précision (en temps comme en hauteur) du volume ruisselé sur la parcelle permet d'obtenir les principaux paramètres du comportement hydrodynamique de la parcelle. La figure n° 3.101 présente le schéma de fonctionnement général.

Deux analyses préliminaires sont essentielles pour la mise en oeuvre d'une expérimentation sous pluies simulées sur un bassin versant. Ce sont, d'une part, la recherche des sites d'implantation des parcelles et, d'autre part, l'élaboration d'un protocole de mesure permettant d'obtenir les paramètres caractéristiques souhaités.

A la suite des travaux de Collinet et de Valentin (1979) poursuivis et synthétisés par Collinet (1988), le principal critère de choix des sites de mesure est l'*état de surface du sol*, du moins en ce qui concerne les régions de savane africaine. Les sites de mesures doivent être représentatifs sur le bassin versant des grandes zones considérées comme homogènes au sens des états de surface. Il est en général admis que des répétitions de parcelles sont souhaitables sur un même site (correspondant à un même état de surface). Mais sur un hectare (sols rouges à proximité des pluviographes P11/P51) considéré comme homogène (au sens des caractéristiques pédologiques) Iris (1988) montre qu'un suréchantillonnage n'est pas nécessaire ; le passage de 35 à 5 points de mesure n'affecte pas sensiblement les résultats sur le ruissellement.

Les parcelles choisies doivent être parfaitement décrites selon une méthode qui a été récemment codifiée (Valentin, 1985 et Janeau, 1986), de façon à pouvoir les comparer entre elles par des critères objectifs.

L'élaboration d'un protocole de mesure consiste à définir le (ou les) hyétogrammes des averses simulées et à établir le calendrier de succession de ces averses. L'expérience acquise depuis 1977 a permis de définir un protocole type qui calque le hyétogramme de l'averse simulée sur celui d'une averse de projet de récurrence annuelle ou décennale pour la région d'étude. Ces averses sont reproduites entre cinq et sept fois de façon à tester la parcelle pour différents états d'humectation. Casenave (1982) donne des explications détaillées accompagnées d'exemples de la méthode proposée.

3.1.2. *Mise en oeuvre sur le bassin de Booro-Borotou*

3.1.2.1. *Les sites de mesures*

17 parcelles ont été testées sur le bassin de Booro-Borotou. Ces parcelles intéressent 8 types d'états de surface sur les 10 qui ont été cartographiés (chapitre 2.3). Le tableau n° 3.101 en dresse l'inventaire.

Tableau n° 3.101

Localisation des parcelles de simulation de pluies

n° parc.	Zone d'état de surface
1	forêt galerie
2	savane arbustive claire
3	flanc de cuirasse
4	" "
5	jachère
6	savane arbustive dense
7	jachère
8	"
9	savane arbustive dense
10	champs
11	"
12	indices de ruissellement
13	" "
14	savane arborée dense
15	" " "
16	savane arbustive claire
17	" " "

Avec les états de surface un second critère essentiel a présidé au choix précis de l'emplacement de chacune des parcelles : l'accessibilité. L'expérimentation au simulateur de pluie nécessite en effet de pouvoir accéder facilement près des parcelles en véhicule (notamment pour l'approvisionnement en eau). Toutes les parcelles sont donc voisines de l'un des chemins de communication du bassin.

Les parcelles 1, 2, 5, 6 et 9 sont isolées ; toutes les autres sont associées par deux, installées sur le même site.

La figure n° 3.102 place précisément les parcelles sur la carte du bassin versant. Il faut cependant noter que, pour des raisons de facilité d'accès, la parcelle n° 1 n'est pas située sur le bassin versant lui-même, mais à proximité immédiate, dans des conditions identiques à celles trouvées sur le bassin.

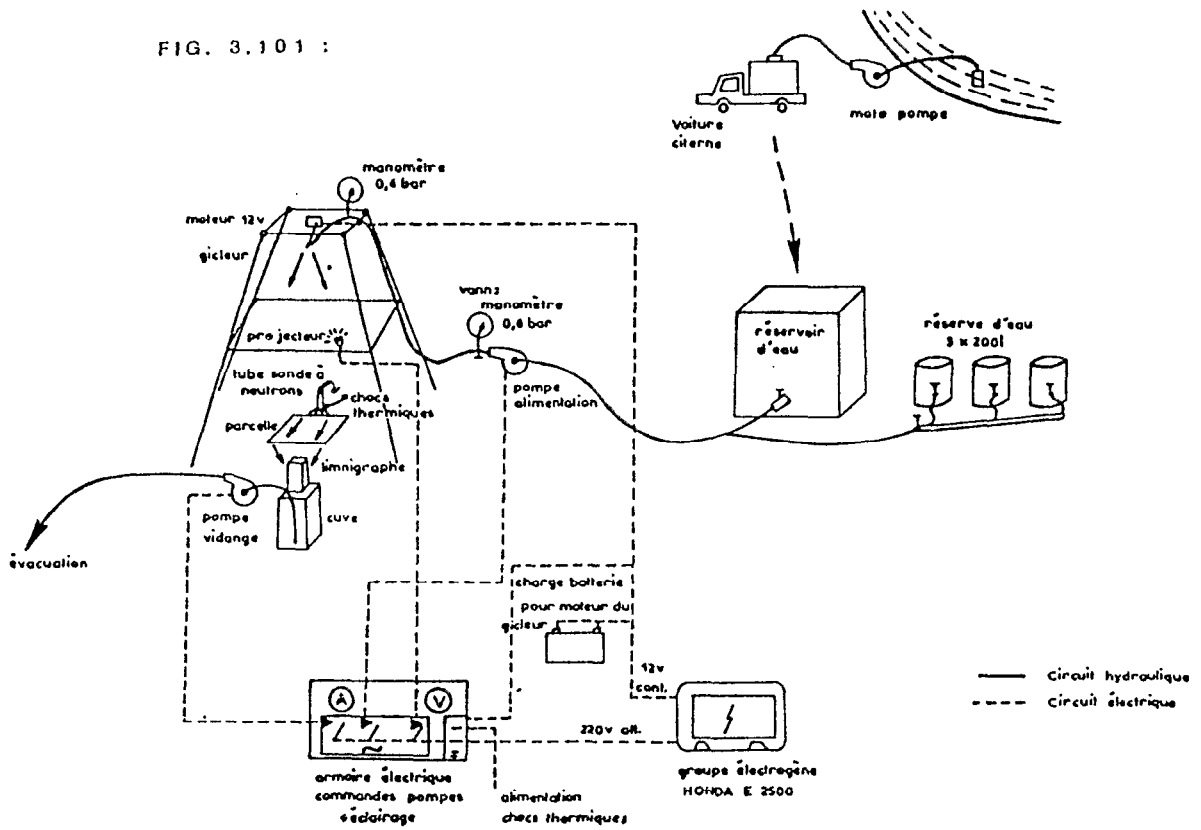
La figure n° 3.103 schématise la position de chacune des parcelles sur une toposéquence type et permet de visualiser la structure pédologique correspondante (chapitre 2.3).

3.1.2.2. Description codifiée des parcelles

Cette description est faite pour chacune des parcelles au début de chacune des campagnes de mesure. Elle correspond à une standardisation proposée par Valentin (1985), utilisée de façon systématique pour la première fois par Janeau (1986) sur le bassin versant de Varalé et généralisée pour la mise au point du catalogue des états de surface de la zone sahélienne (Casenave et Valentin, 1988). On en trouvera le détail complet en annexe.

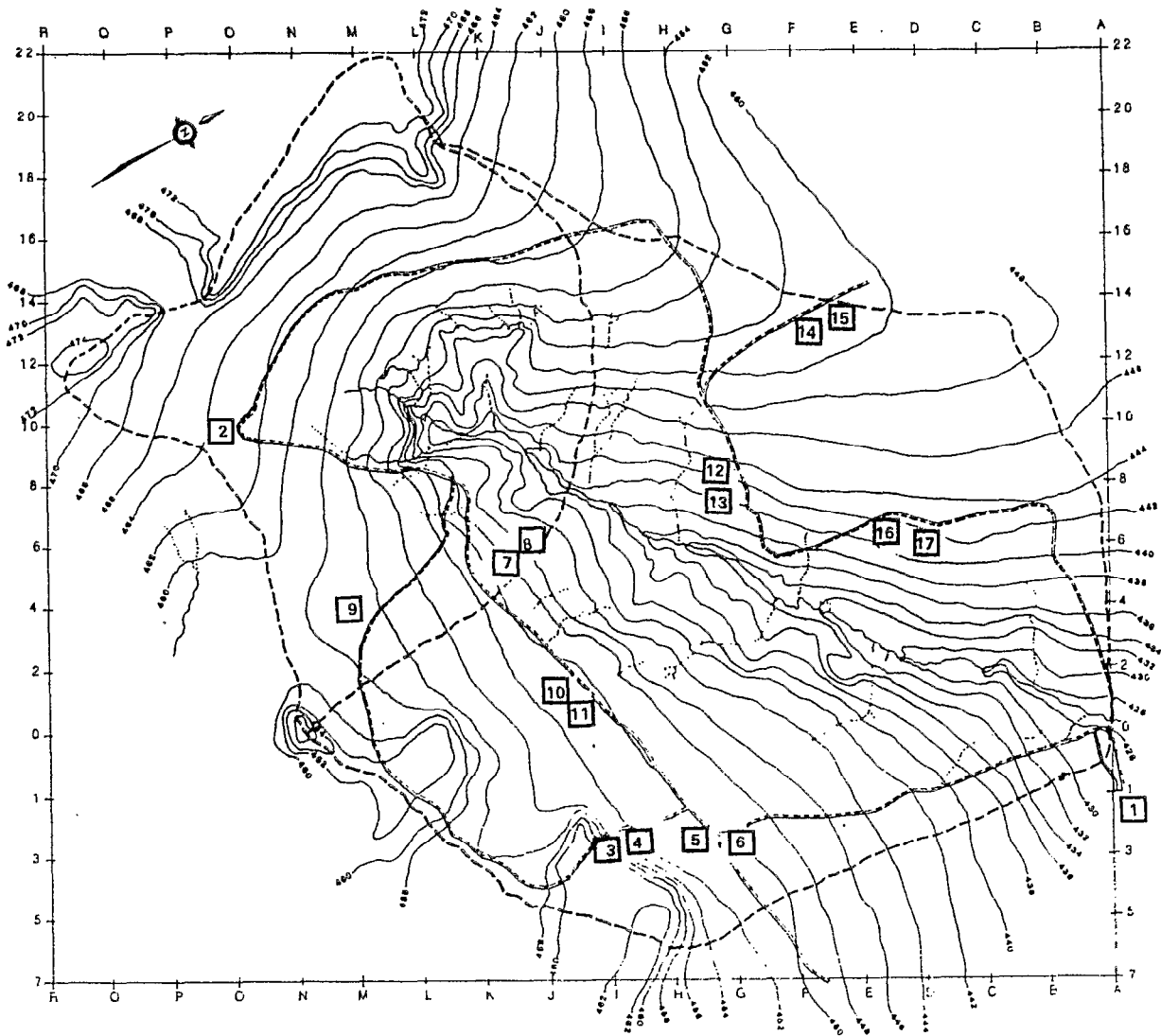
Les descriptions (réalisées par Valentin) des parcelles de Booro-Borotou selon cette norme sont également données en annexe.

FIG. 3.101 :



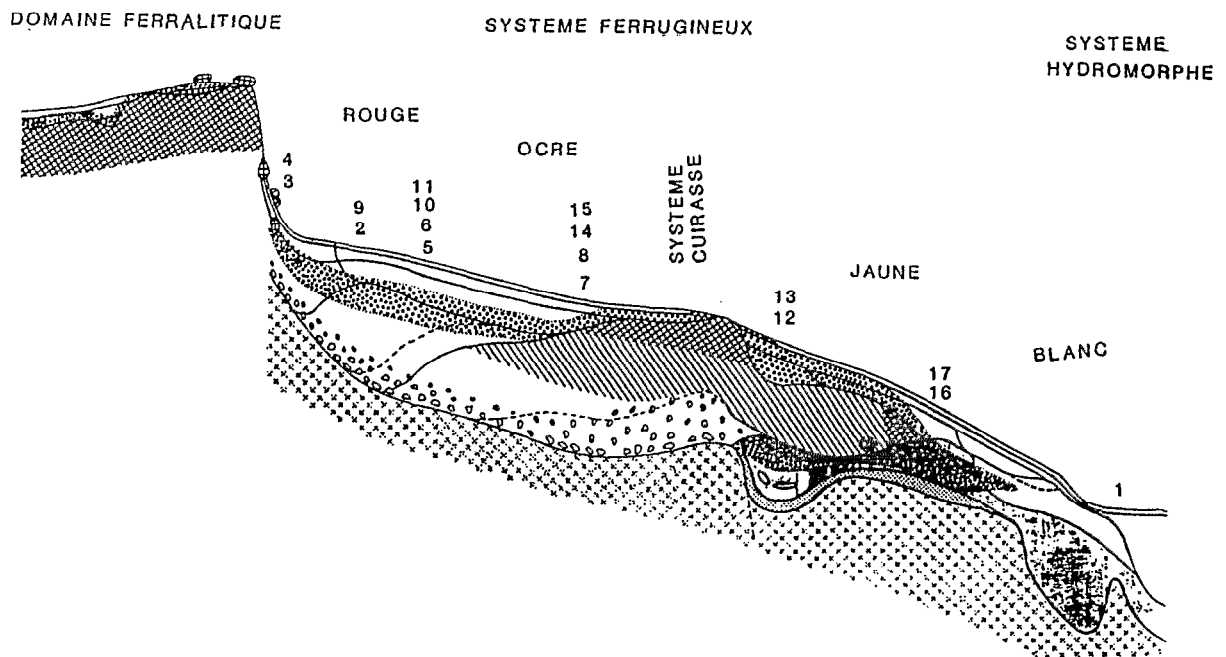
SCHEMA DE FONCTIONNEMENT DU SIMULATEUR DE PLUIES

FIG. 3.102



EMPLACEMENTS DES PARCELLES DE SIMULATION DE PLUIES

FIG. 3. 103



ESSAI DE POSITIONNEMENT DES PARCELLES SUR UNE TOPOSEQUENCE TYPE (3D)

3.1.2.3. Protocole d'averse

Les hyétogrammes d'averses simulées adoptés pour les expérimentations en savane sont calqués sur les pluies de projet de récurrences annuelle et décennale évaluées pour la région d'étude.

Les hyétogrammes qui ont été choisis pour Booro-Borotou sont identiques à ceux qui avaient été utilisés à Korhogo et Worossantiakaha (Gioda et al. - 1985a et 1985b).

Ils sont décrits dans le tableau n° 3.102 :

Tableau n° 3.102

Hyétogrammes-type d'averse simulée

Averse annuelle		Averse décennale	
durée (mn)	intensité (mm/h)	durée (mn)	intensité (mm/h)
10	40	30	40
10	60	10	60
10	120	10	140
10	90	10	105
10	75	10	90
10	40	10	75
		15	40

Avec un tel protocole, la hauteur totale de l'averse annuelle simulée est de 70,8 mm et celle de l'averse décennale de 108,3 mm. Rappelons que pour le poste de Touba l'averse interannuelle de période de retour annuelle est de 74,4 mm ; celle de période de retour décennale est de 126 mm. L'averse simulée *décennale* (évaluée pour la région de Korhogo) correspond en réalité à d'une averse de période de retour 5 ans à Touba (109 mm), mais il a été jugé préférable de conserver un protocole identique pour toutes les simulations de la zone de savane humide de Côte d'Ivoire afin de faciliter les intercomparaisons.

Pour tester une gamme complète d'états d'humectation du sol, compatible avec le comportement naturel, on intervient sur les temps d'arrêt entre averses simulées. Mais il est nécessaire pour cela de définir une grandeur susceptible d'évaluer cet état d'humectation. Les diverses études sous pluies simulées ont conduit les auteurs à utiliser systématiquement un *indice des précipitations* antérieures (Casenave, 1982 ; Chevallier, 1983 ; Séguis, 1986). Cet indice a de nombreux défauts, sur lesquels nous reviendrons, mais il a un avantage indéniable : sa facilité de calcul uniquement à partir de données pluviographiques (à la rigueur pluviométriques) toujours disponibles à proximité du site d'étude.

Il se formule selon :

$$API_n = (API_{n-1} + P_{n-1}) e^{-\alpha t} \quad (3.1.1)$$

où :

API_n , indice des précipitations antérieures au début de l'averse n (en mm);

P_n , hauteur de l'averse n (en mm);

α , coefficient pris égal à 0,5

t, durée (en jours avec une précision de 5 mn) séparant la fin de l'averse n-1 du début de l'averse n.

Si on appelle *campagne*, une succession d'averses correspondant à un état descriptif donné du sol, il a été entrepris sur chacune des parcelles de Booro-Borotou de une à trois campagnes de mesures appelées A, B et C :

- La campagne A est réalisée en saison sèche, après une longue période sans averse naturelle (API = 0). Cette campagne est semblable à toutes celles qui ont été effectuées avec le simulateur de pluie sur les nombreux bassins testés depuis 1977. Elle possède l'avantage d'une meilleure disponibilité des moyens humains qu'en saison humide, d'une part, et de la quasi absence d'événement pluvieux naturel venant perturber l'expérience, d'autre part.

- La campagne B est réalisée en pleine saison des pluies et cela soulève plusieurs difficultés. La première est d'intervenir sur des sols dont on essaye de contrôler l'état préalable d'humectation. Pour cela les parcelles doivent être protégées des averses naturelles pendant une période, la plus brève possible, précédant la campagne, et pendant toute la durée de la campagne.

- La campagne C ne concerne que les parcelles installées dans les champs et est réalisée également en saison des pluies. Elle est identique à B, mais intervient sur un autre type de culture. Il est en effet fréquent que les paysans fassent deux récoltes différentes sur un même champ au cours de la même période d'hivernage. En l'occurrence il s'agissait à Booro-Borotou d'une succession arachide (B) - niébé (C) (variété locale de haricot).

On notera que les descriptions du paragraphe précédent correspondent pour chacune des parcelles à chacune de ces trois campagnes. Pour des raisons de temps et de disponibilité de l'appareillage, toutes les parcelles n'ont pas été soumises à la succession des campagnes A, B et *a fortiori* C.

Le tableau n° 3.103 donne la succession des averses théoriques, le type de ces averses et l'indice de précipitation antérieur correspondant pour les campagnes A et B (C est identique à B).

Tableau n° 3.103

Succession type des averses aux cours des trois campagnes

campagne A				campagnes B et C			
n°av.	jour	API	type	n°av.	jour	API	type
1		0	déc	7	j	5	an.
2	j+4	14,6	an	8	j+2	27,9	an
3	j+6	31,4	an	9	j+3	59,9	an
4	j+7	62,1	an				
5	j+9	48,9	an	10	j	5	an
6	j+10	72,7	déc	11	j+2	27,9	an
				12	j+3	59,9	an

Le tableau n° 3.104 donne le calendrier de ces différentes campagnes qui ont été réalisées sur deux années consécutives.

Tableau n° 3.104
Calendrier des différentes campagnes

n° parc.	Campagne A	Campagne B	Campagne C
1	mars 85	août 85	
2	février 85		
3	février 85		
4	février 85		
5	fév/mar 85	août 85	
6	fév/mar 85	août 85	
7	fév/mar 85		
8	fév/mar 85	août 85	
9	février 85	août 85	
10	janvier 86	août 86	octobre 86
11	janvier 86	août 86	octobre 86
12	jan/fév 86	août 86	
13	jan/fév 86	août 86	
14	février 86	août 86	
15	février 86	août 86	
16	février 86	août 86	
17	février 86	août 86	

3.1.3. Le modèle simulateur

3.1.3.1. Le principe

Le simulateur de pluie est utilisé, parmi d'autres applications, depuis quelques années par les hydrologues de l'ORSTOM à des fins d'évaluation du volume des *crues d'étude* sur petits bassins versants représentatifs. Le principe de cette approche a été proposé d'abord sur les bassins versants de la Mare d'Oursi (Chevallier, 1982), puis développé et affiné sur de nombreux bassins de la zone sahélienne et de savane (Casenave, 1985 ; Albergel, 1987).

Cette méthode, à laquelle a été donné (de façon peut-être inappropriée) le nom de *modèle simulateur*, se décompose en plusieurs étapes :

a) l'évaluation pour chacune des parcelles testées en *saison sèche* d'une *fonction de production* du type :

$$LR = AA.P + AB.API + AC.P.API + AD \quad (3.1.2)$$

où :

- AA, AB, AC, AD, constantes caractéristiques de la parcelle
- P, hauteur de l'averse simulée
- API, indice des précipitations antérieures (= 0,5)
- LR, lame ruisselée

b) l'établissement d'une carte des différents états de surface du bassin versant et la mise en correspondance d'une ou de plusieurs parcelles de simulation avec chacune des zones cartographiées.

c) le calcul d'une *fonction de production* moyenne pour le bassin versant ; elle donne la lame ruisselée comme la moyenne des fonctions de production obtenues sur les parcelles pondérée par la surface de la zone dont elles sont représentatives :

$$LRC = \sum_i (S_i/S) LR_i \quad (3.1.3)$$

où :

LRC, lame ruisselée calculée sur le bassin versant
 LR_i, fonction de production de la parcelle i
 S_i, surface contributive de la parcelle i
 S, surface du bassin versant

d) l'introduction dans la formule (v.1.3) des résultats de l'observation pendant une ou plusieurs saisons des pluies des crues naturelles observées, LRO, de pluie utile P, pour un indice de précipitations antérieures API.

e) la comparaison sous forme de régression linéaire, passant en général par l'origine des couples LRO, LRC qui donne un coefficient de calage K (improprement et fréquemment appelé *facteur d'échelle*) :

$$LRC = K \cdot LRO \quad (3.1.4)$$

f) l'évaluation enfin de la lame ruisselée d'une *crue d'étude*, en calculant LRO à partir de la pluie de récurrence décennale et d'un indice de précipitation antérieure moyen.

Les résultats obtenus sont tout à fait honorables jusqu'à présent en zone sahélienne et en zone de savane sèche avec ce *modèle simulateur*, en comparant les résultats à ceux obtenus plus traditionnellement par le modèle dit *global* (évaluation classique par des méthodes du type *hydrogramme unitaire*).

Il était donc intéressant d'appliquer cette approche *sans en modifier le principe* au bassin de Booro-Borotou et d'en vérifier la validité dans des conditions d'application différentes.

Il se pose cependant un problème de terminologie. A l'échelle de la parcelle de simulation de pluie, l'écoulement mesuré est un véritable ruissellement de surface hortonien. Le résultat du modèle simulateur qui compose le fonctionnement des parcelles admet par conséquent implicitement que le fonctionnement global du bassin est hortonien. Le terme *lame ruisselée calculée* a donc une véritable signification. Mais la lame d'écoulement rapide de crue LRO ne correspond pas forcément à un fonctionnement hortonien et le qualificatif de *lame ruisselée observée* est abusif. Cependant, par analogie avec les travaux antérieurs et par souci provisoire de simplification, nous le conserverons temporairement.

3.1.3.2. Evaluation des fonctions de production LR (P, API) pour les parcelles de Booro-Borotou

La méthode habituellement utilisée pour trouver les coefficients de l'équation (3.1.2) est une méthode graphique dont le principe est celui d'une double régression linéaire (Casenave, 1982). Cette méthode, si on l'exécute arithmétiquement, est lourde et longue ; mais elle est relativement rapide graphiquement. Cependant plusieurs expériences ont montré que, selon les opérateurs, on obtient une assez grande dispersion des résultats.

Il nous paraît à la fois plus rapide et plus objectif de procéder directement à une régression multiple sur les variables P, API et P.API prises pour chaque pas de temps de 5 minutes. Certes cette approche n'est pas parfaitement rigoureuse puisque la variable API ne varie pas continûment avec les autres. Ce n'est cependant pas une condition restrictive d'application des régressions multiples entre

triplets et c'est mathématiquement la moins mauvaise solution : la comparaison des résultats obtenus par les diverses méthodes sur un exemple (campagne A, parcelle 3) l'illustre aisément :

Les trois méthodes d'évaluation de la fonction de production ont été testées et il ne fait aucun doute que la dernière approche est parfaitement comparable au dépouillement arithmétique par double régression simple (approche qui est en principe la plus rigoureuse), tout en étant d'une facilité de calcul beaucoup plus grande.

Les résultats obtenus pour les parcelles de Booro-Borotou sont consignés dans le tableau n° 3.105.

Nous y avons ajouté ceux obtenus pour les campagnes B et C qui ne sont pas utilisés pour le modèle simulateur, mais dont nous aurons besoin par la suite.

3.1.3.3. Fonction de production globale

Le modèle simulateur prend en compte des zones de production calquées sur la carte des états de surface du bassin versant. A Booro-Borotou, 11 zones ont été cartographiées (carte hors-texte, d'après Valentin, 1986):

1. Jachère (9,0% de la superficie du bassin versant)
2. Forêt galerie (7,1%)
3. Savane arborée dense (7,1%)
4. Savane arborée claire (15,2%)
5. Flancs de cuirasse (2,9%)
6. Champs (7,7%)
7. Savane boisée (1,7%)
8. Savane arbustive dense (28,1%)
9. Savane herbeuse (1,3%)
10. Zones à indice de fort ruissellement (17,1%)
11. Plateau (4,9%)

Pour l'évaluation de la fonction de production résultante du bassin versant, il manque les parcelles caractéristiques de deux zones de production (au sens des états de surface) sur lesquelles il n'y a pas eu de sites de simulation :

- la savane boisée sera rattachée à la forêt galerie, d'une part;
- la savane herbeuse à la savane arbustive claire, d'autre part.

On peut en effet estimer que la distinction entre ces zones est suffisamment subtile pour que le regroupement n'affecte pas le résultat final, d'autant plus que les surfaces concernées sont marginales.

Lorsque, sur une même zone de production, plusieurs parcelles ont été testées la fonction de production attribuée à la zone est calculée en attribuant à l'équation (3.1.2) des coefficients qui sont les moyennes arithmétiques des coefficients des fonctions de production de chaque parcelle.

La fonction de production moyenne du bassin versant est évaluée de la même manière avec des coefficients qui sont les moyennes pondérées par les aires respectives des coefficients des fonctions de production de chacune des zones ; elle s'écrit finalement :

$$LR = 0,12 P - 0,03 API + 0,0042 P.API - 2,1 \quad (3.1.5)$$

Tableau n° 3.105

Evaluation des valeurs des paramètres de la formule (3.1.2)

n°parc	AA	AB	AC	AD	coeff.régr.
<i>Campagne A</i>					
1	0,00	0,00	0,0000	0,0	0,89
2	0,17	-0,07	0,0068	-0,4	0,96
3	0,22	-0,07	0,0058	-2,1	0,92
4	0,53	0,01	0,0029	-6,2	0,97
5	0,14	0,00	0,0023	-1,8	0,91
6	0,02	-0,04	0,0029	-0,2	0,98
7	0,27	-0,04	0,0062	-3,4	0,98
8	0,43	0,01	0,0040	-4,3	0,99
9	0,01	-0,01	0,0007	-0,1	0,95
10	0,17	-0,07	0,0063	-2,3	0,98
11	0,21	-0,06	0,0075	-2,6	0,99
12	0,26	-0,01	0,0066	-3,7	0,98
13	0,17	-0,06	0,0071	-3,6	0,96
14	0,43	0,06	0,0070	-8,5	0,93
15	0,38	0,02	0,0066	-6,4	0,95
16	0,04	-0,05	0,0054	-0,5	0,99
17	0,00	-0,03	0,0021	-0,3	0,73
<i>Campagne B</i>					
1	0,00	0,00	0,0000	-0,1	0,43
5	0,37	-0,01	0,0038	-4,1	0,98
6	0,10	-0,03	0,0032	-0,7	0,98
8	0,71	0,01	0,0031	-5,1	0,89
9	0,04	-0,02	0,0016	-0,3	0,95
10	-0,05	-0,15	0,0130	0,5	0,97
11	0,30	-0,05	0,0060	-3,1	0,98
12	0,43	0,01	0,0057	-4,6	0,99
13	0,32	-0,05	0,0080	-3,6	0,97
14	0,74	-0,04	0,0029	-3,2	0,90
15	0,76	0,01	0,0015	-7,7	0,99
16	-0,01	-0,03	0,0023	0,1	0,94
17	0,10	-0,05	0,0063	-0,9	0,98
<i>Campagne C</i>					
10	0,20	-0,06	0,0049	-1,8	0,91
11	0,28	-0,05	0,0042	-1,6	0,99

3.1.3.4. Lame ruisselée de la crue d'étude

En appliquant cette formule aux 88 crues observées sur le bassin versant principal entre 1984 et 1987, on obtient les lames ruisselées LRC du tableau n° 3.106.

Tableau n° 3.106

Comparaison lame ruisselée observée / lame ruisselée calculée

n° crue	LRO (mm)	P (mm)	API (mm)	LRC (mm)	n° crue	LRO (mm)	P (mm)	API (mm)	LRC (mm)
8401	0,29	39,6	2,9	3,0	8526	3,16	71,3	12,2	9,7
8402	1,56	56,4	5,2	5,7	8527	0,41	12,5	57,7	0,7
8403	0,15	22,8	12,4	1,5	8528	0,31	16,6	43,0	1,6
8404	0,12	16,3	9,3	0,2	8529	0,30	17,3	6,6	0,3
8405	0,17	23,1	10,1	1,3	8530	0,34	17,3	1,4	0,0
8406	0,20	21,2	15,7	1,4	8531	0,23	11,5	15,5	0,0
8407	0,19	12,2	18,6	0,0	8532	0,41	23,1	0,4	0,7
8408	0,27	25,0	7,1	1,4	8533	1,09	28,3	6,7	1,9
8409	0,13	11,9	15,4	0,0	8601	0,13	43,9	0,2	3,2
8410	0,17	15,3	4,8	0,0	8602	0,24	39,8	9,6	4,0
8411	1,13	41,8	8,5	4,2	8603	0,14	15,8	14,8	0,3
8412	0,80	29,3	15,9	2,9	8604	0,12	19,3	4,6	0,5
8413	0,12	10,1	12,5	0,0	8605	0,36	36,6	4,8	2,9
8414	1,73	57,0	10,5	6,9	8606	0,42	32,3	9,1	2,7
8415	0,13	9,2	5,7	0,0	8607	0,50	19,6	10,2	0,8
8416	0,12	9,4	13,2	0,0	8608	1,30	40,0	15,3	4,8
8417	0,76	34,8	0,3	2,1	8609	0,13	19,6	1,4	0,3
8418	0,11	11,8	6,4	0,0	8610	0,66	29,4	9,3	2,3
8419	0,82	39,7	2,0	2,9	8611	2,07	69,4	7,3	8,1
8501	0,25	43,9	9,7	4,7	8701	0,60	70,1	2,8	7,1
8502	0,34	20,9	31,3	2,2	8702	0,09	26,1	7,5	1,6
8503	1,04	33,7	31,4	5,4	8703	0,10	28,3	0,5	1,3
8504	0,18	19,4	23,0	1,4	8704	0,14	37,8	3,7	2,9
8505	0,31	29,2	7,3	2,1	8705	0,13	27,5	5,4	1,7
8506	1,25	54,4	3,3	5,1	8706	1,00	52,5	5,9	5,3
8507	0,46	23,7	7,7	1,3	8707	0,52	24,2	23,0	2,5
8508	1,89	54,8	14,0	7,3	8708	4,03	55,0	16,3	7,8
8509	1,58	43,4	23,0	6,6	8709	0,22	10,6	24,0	0,0
8510	0,42	17,2	52,0	2,2	8710	2,71	56,2	21,9	9,2
8511	0,35	15,6	58,7	1,9	8711	1,20	31,2	10,4	2,7
8512	0,85	32,1	9,5	2,7	8712	0,79	20,4	11,8	1,0
8513	0,13	8,2	28,5	0,0	8713	0,51	14,4	24,5	0,4
8514	0,27	18,0	35,8	1,7	8714	0,24	17,3	4,7	0,2
8515	0,15	7,9	19,9	0,0	8715	0,15	7,1	15,6	0,0
8516	11,10	82,7	16,7	13,1	8716	0,22	11,5	3,3	0,0
8517	0,40	11,8	62,0	0,5	8717	0,37	15,5	10,3	0,1
8518	0,16	10,7	5,3	0,0	8718	0,95	31,9	10,2	2,8

Tableau n° 3.106 (suite et fin)

Comparaison lame ruisselée observée / lame ruisselée calculée

n° crue	LRO (mm)	P (mm)	API (mm)	LRC (mm)	n° crue	LRO (mm)	P (mm)	API (mm)	LRC (mm)
8519	1,78	45,6	1,7	3,6	8719	0,11	6,7	7,2	0,0
8520	0,23	8,2	11,3	0,0	8720	1,28	17,1	6,2	0,2
8521	0,92	35,6	16,2	4,1	8721	2,60	42,4	10,8	4,6
8522	0,64	18,0	37,3	1,8	8722	0,84	19,9	28,7	1,8
8523	0,62	16,7	58,0	2,2	8723	0,46	12,3	8,4	0,0
8524	0,14	5,6	9,8	0,0	8724	0,69	18,9	4,2	0,4
8525	0,88	24,8	6,7	1,4	8725	0,79	22,5	4,9	0,9

Il faut ensuite comparer ces lames calculées aux lames ruisselées observées LRO.

Une régression linéaire sur l'échantillon complet des couples (LRO, LRC) donne :

$$\text{LRO} = 0,38 \text{ LRC} - 0,1 \quad (3.1.6)$$

avec $R = 0,76$

Les figures n° 3.104 et n° 3.105 représentent cette régression. La dispersion des points est assez grande, ce qui explique le médiocre coefficient de corrélation.

Cependant le point représentatif de la plus forte crue (celle du 18 août 1985) se retrouve très éloigné de la droite et, en le supprimant, la régression linéaire donne un résultat bien meilleur (au sens mathématique) :

$$\text{LRO} = 0,24 \text{ LRC} + 0,1 \quad (3.1.7)$$

avec $R = 0,79$

On peut noter que la valeur d'interception 0,1 n'est pas significativement différente de 0 pour un intervalle de confiance à 95% et nous adopterons donc un coefficient K de 0,24 dans la relation :

$$\text{LRO} = K \cdot \text{LRC} \quad (3.1.8)$$

Par contre, le coefficient $K = \text{LRO} / \text{LRC}$ est de 0,85 pour la seule averse du 18 août 1985.

Pour une averse journalière de période de fréquence décennale de 126 mm (on suppose que cette averse est un événement unique en 24 heures) et pour un indice de précipitations antérieures de 15 (correspondant à une valeur moyenne), on obtient :

$$\text{LRC} = 20,8 \text{ mm et LRO} = 5,0 \text{ mm}$$

3.1.3.5. Commentaires

Une lame écoulee de 5,0 mm pour la *crue d'étude* ne paraît pas compatible avec les observations naturelles. Rappelons à ce propos que la crue d'étude est définie comme la crue de projet produite par une averse de période de retour décennale, toutes les autres conditions étant moyennes par ailleurs.

La crue du 18 août 1985 (lame ruisselée de 11,1 mm) passe dans un ordre de grandeur qui n'a plus rien à voir avec le résultat précédent : cette crue est sans doute exceptionnelle, mais elle ne nous

paraît tout de même pas si extraordinaire que cela. A propos de cette crue, il faut noter que, si elle a été rejetée de la régression comme non compatible avec un ajustement linéaire, elle a bien été enregistrée et contrôlée. Il n'est donc pas question de mettre en doute sa validité. Pour que le *modèle simulateur* soit respecté avec une averse de 82,7 mm, il faudrait que l'indice API soit de 125, cas qu'il n'est guère possible d'envisager.

Force est donc de constater que le *modèle simulateur* appliqué au bassin de Booro-Borotou dans les mêmes conditions qu'aux bassins de savane plus sèche ne s'applique plus avec le même succès.

Il est important d'essayer de comprendre pourquoi et plusieurs explications peuvent être proposées :

1. Le bassin versant de Booro-Borotou se trouve dans un contexte de savane humide où la végétation et l'activité mésofaunique n'ont rien de comparable avec les bassins de savane plus sèche (et *a fortiori* sahéliens) étudiés par Albergel (1987) dans sa thèse ou par d'autres. Déjà Bader (1986) et Gioda (1985) avaient eu des difficultés sur les bassins versants plus humides de la N'daye à D'zobégan, de Waraniéné-Korhogo ou de Worossantiakaha. Par contre les résultats avaient été pratiquement parfaits sur le bassin de la Comba (Casenave et al., 1984).

2. Valentin (1985) constate que l'importance des *états de surface* diminue avec les climats humides dans les processus hydrodynamiques et la méthode du *modèle simulateur* est basée sur la prédominance de ces états de surface dans le comportement sous l'averse.

3. Ces résultats amènent à une autre "différence" de Booro Borotou qui, contrairement aux bassins évoqués, ne ruisselle pratiquement pas, sauf dans des conditions tout à fait exceptionnelles. Nous avons vu qu'en moyenne le volume ruisselé annuel ne représentait que moins de 20% de l'écoulement total. Nous constatons que le coefficient de ruissellement est, sauf pour la crue du 18 août 85, toujours inférieur à 5%. Les résultats obtenus sur parcelles de simulation de pluies confirment cette constatation.

4. Au regard de la faible superficie du bassin versant de Booro Borotou, on aurait pu s'attendre à ce que le coefficient K entre lames ruisselées calculées et observées du *modèle simulateur* soit relativement proche de 1. Et, ce coefficient est l'un des plus faibles jamais établi ! Cela est probablement dû, d'une part, à l'organisation de la perméabilité le long des versants et, d'autre part, au fait de la non prise en compte des transferts de surface dans le modèle (on admet dans le modèle simulateur que la lame ruisselée sur une parcelle est intégralement restituée à l'exutoire du bassin versant). Nous mettons ici le doigt sur la principale critique faite au *modèle simulateur* : la signification et la validité de ce coefficient K, dont Dubreuil résume la fonction en le définissant comme une fonction de transfert non formulée (comm. pers., 1988).

5. Toutes ces explications conduisent à penser que le schéma de fonctionnement hortonien du *modèle simulateur* ne convient plus dans cet environnement. Le fonctionnement réel du bassin fait intervenir des processus plus complexes qui sont sans doute différents selon les crues et les conditions initiales. En notant que pour la crue exceptionnelle le coefficient K est beaucoup plus près de 1, Girard (comm. orale, déc. 1987) suggère que K pourrait assez bien représenter le pourcentage de la superficie du bassin qui ruisselle véritablement (dans une représentation du type : *aires contributives variables*).

FIG 3.104

Modèle simulateur
Echantillon complet (1984-1987)

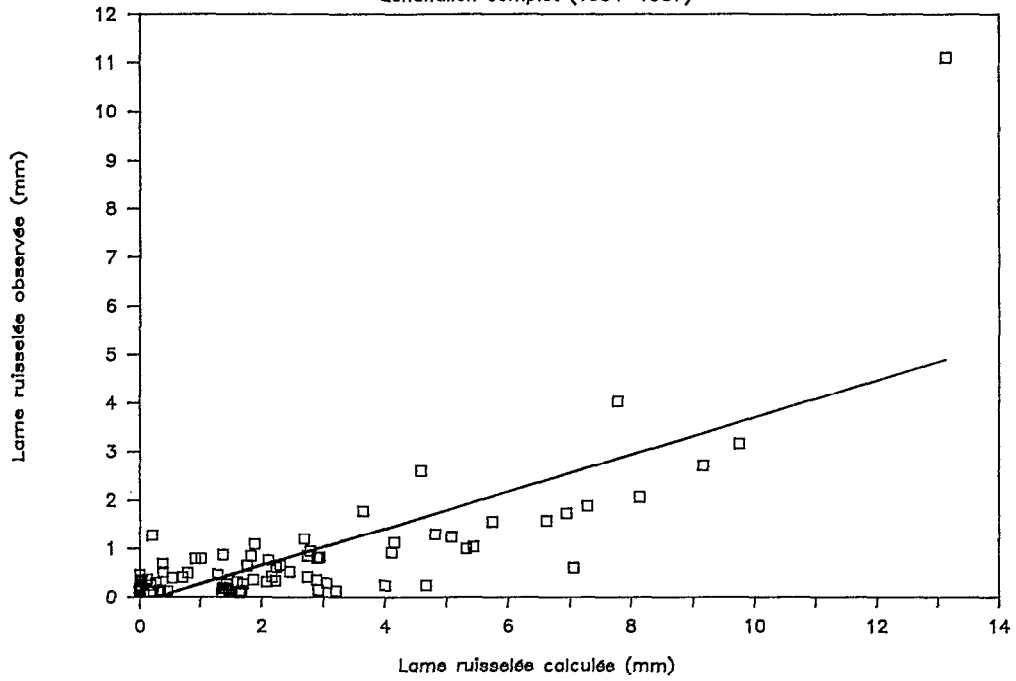
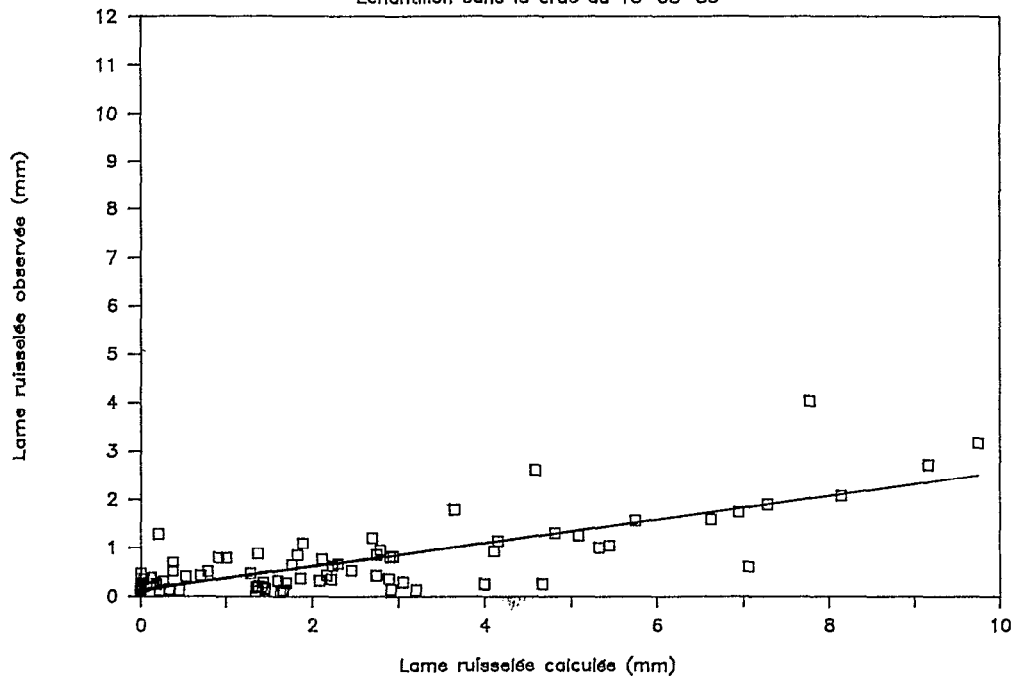


FIG 3.105

Modèle simulateur
Echantillon sans la crue du 18-08-85



3.1.4. Les lois de l'infiltration

Albergel (1987) a tenté de confronter les observations sous pluies simulées avec les lois théoriques de l'infiltration. S'inspirant assez largement des travaux de Morel-Seytoux (1973), il propose un calage des résultats obtenus pour chacune des parcelles sur un modèle d'infiltration.

3.1.4.1. Le modèle de Green et Ampt (1911)

Nous nous proposons ici de faire une approche similaire en utilisant un vieux modèle proposé par Green et Ampt dès 1911 et qui reste l'un des plus connus et des plus utilisés (Morel- Seytoux, 1973 ; Hillel, 1974).

L'infiltration est classiquement décrite par trois paramètres (Albergel, 1987) :

- l'intensité d'infiltration ;
- la capacité d'infiltration, qui tend vers la conductivité hydraulique à saturation ;
- la lame infiltrée.

Nous ne revenons pas ici sur la signification de ces paramètres largement explicitée dans de nombreux ouvrages (très bien exposée en particulier par Hillel, 1974).

Le modèle de Green et Ampt est établi sur les hypothèses suivantes :

- le front d'humectation est bien net et le potentiel de succion matricielle reste constant dans le temps ;
- derrière ce front d'humectation, le sol est uniformément humide et de conductivité constante.

Il s'exprime par la formule suivante :

$$F(t) = K_s (h + Li(t)) / Li(t) \quad (3.1.9)$$

où

- $F(t)$, intensité d'infiltration ;
- K_s , conductivité hydraulique ;
- h , déficit de pression capillaire entre la surface et le front d'humectation ;
- $Li(t)$, lame infiltrée.

C'est naturellement la signification de h qui est contestée par les physiciens du sol.

Pour respecter un minimum des hypothèses du modèle, nous nous placerons dans le cas le plus favorable qui correspond aux averses intervenant sur des sols bien humectés.

Le calage du modèle est donc réalisé à partir des observations faites en saison sèche sur l'averse 6 (API moyen de 73) et en saison des pluies sur l'averse 9 (API moyen de 60).

La figure n° 3.106 représente un exemple des résultats observés sur une parcelle (n° 14) pour ces deux averses. Les ordonnées expriment soit des lames en mm, soit des intensités en mm/h. Pour un découpage au pas de temps de 5 minutes, on trouve :

- $Pu(t)$, la hauteur cumulée de précipitation (mm) ;
- $Li(t)$, la hauteur cumulée de l'infiltration (mm) ;
- $I(t)$, l'intensité de précipitation (dPu/dt) (mm/h) ;
- $F(t)$, l'intensité d'infiltration (dLi/dt) (mm/h).

La recherche des paramètres h et K_s est faite directement à l'aide du logiciel STATGRAPHICS (STSC Inc., 1986). L'algorithme utilisé est celui de Marquardt (1963) pour l'estimation de paramètres non linéaires.

Le tableau n° 3.107 rassemble les résultats obtenus pour K_s et pour h . Une erreur standard définie par l'algorithme utilisé y est associée ; elle correspond à un écart-type. Certaines valeurs de K_s sont entre parenthèses : on verra qu'elles sont non significatives.

3.1.4.2. Intensité limite de ruissellement

Dans la dernière colonne du tableau n° 3.107 se trouve l'intensité limite de ruissellement (II) telle qu'elle est définie par Lafforgue (1977). C'est l'abscisse à l'origine de la droite $R(t) = I(t) - F(t) = f(I)$, lorsque le régime permanent a été atteint à chaque séquence à intensité constante.

Dans notre travail sur la Mare d'Oursi (Chevallier, 1982), nous avons défini deux valeurs limites. L'une correspondait à l'intensité d'averse en dessous de laquelle la parcelle ne ruisselait jamais ; l'autre était l'intensité au dessus de laquelle la parcelle ruisselait toujours. La valeur donnée ici est la seconde puisqu'elle est calculée pour une humectation considérée comme maximale.

La figure n° 3.107 illustre ce calcul pour la parcelle n°14 et les averses 6 (saison sèche) et 9 (saison des pluies).

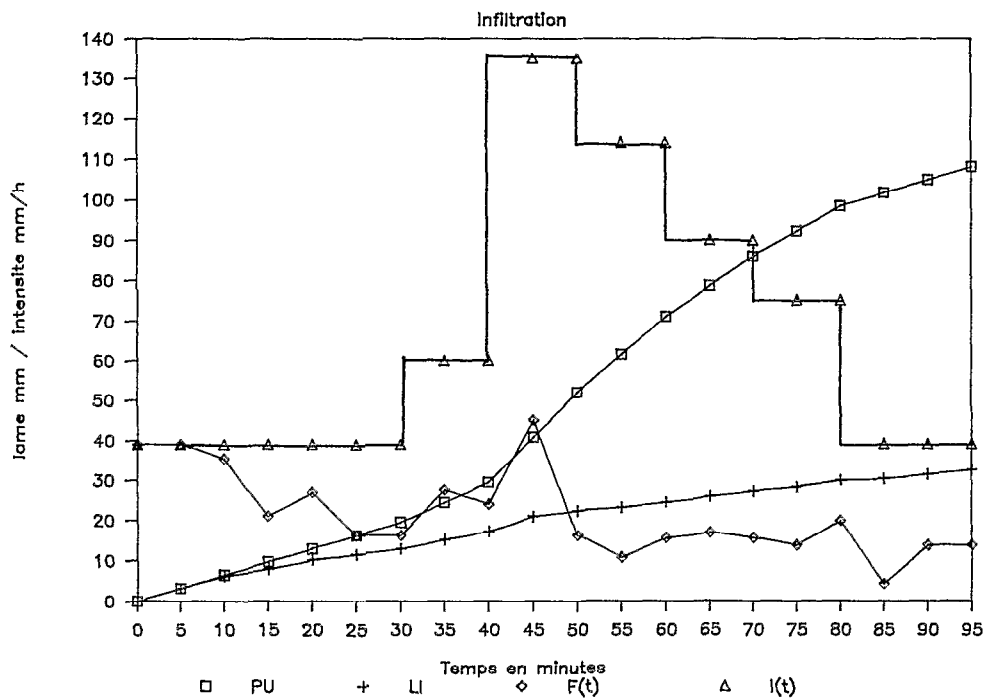
3.1.4.3. Classement des parcelles selon leur aptitude au ruissellement ou à l'infiltration

Pour mieux appréhender ces paramètres d'infiltration, un classement des parcelles est réalisé en reprenant les résultats du modèle simulateur. A partir de l'équation caractéristique, $Lr = f(Pu, API)$, on calcule un coefficient d'infiltration $Ki(Pu, API)$ qui est le rapport de la lame infiltrée sur la pluie utile :

$$Ki(Pu, API) = (Lr(Pu, API) - Pu) / Pu \quad (3.1.10)$$

FIG 3.106

Parcelle 14 : averse 6



Parcelle 14 : averse 9

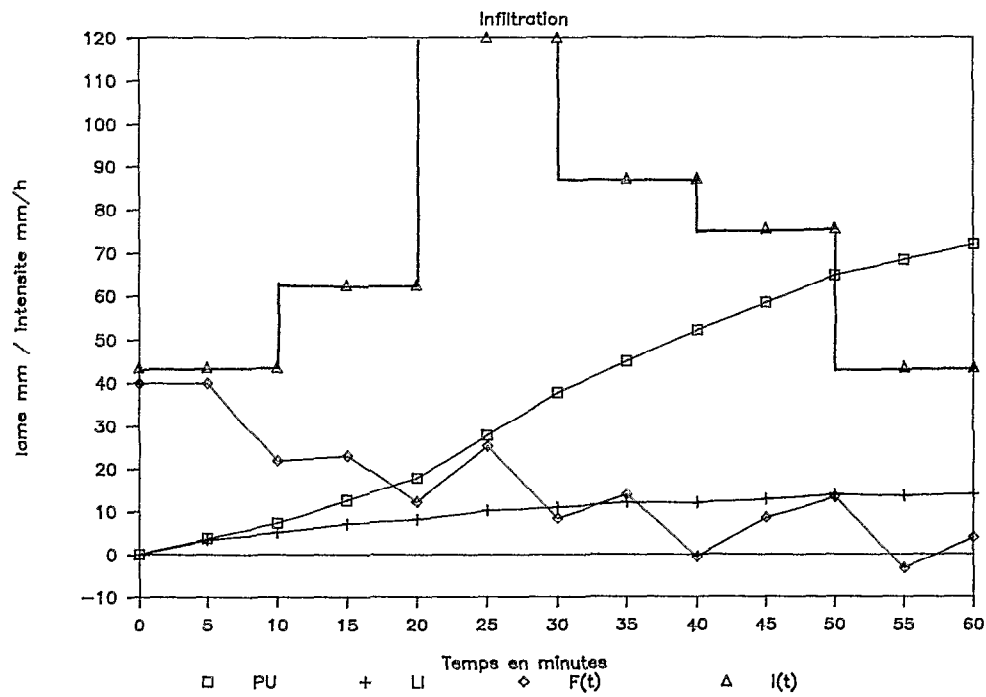


FIG. 3.107

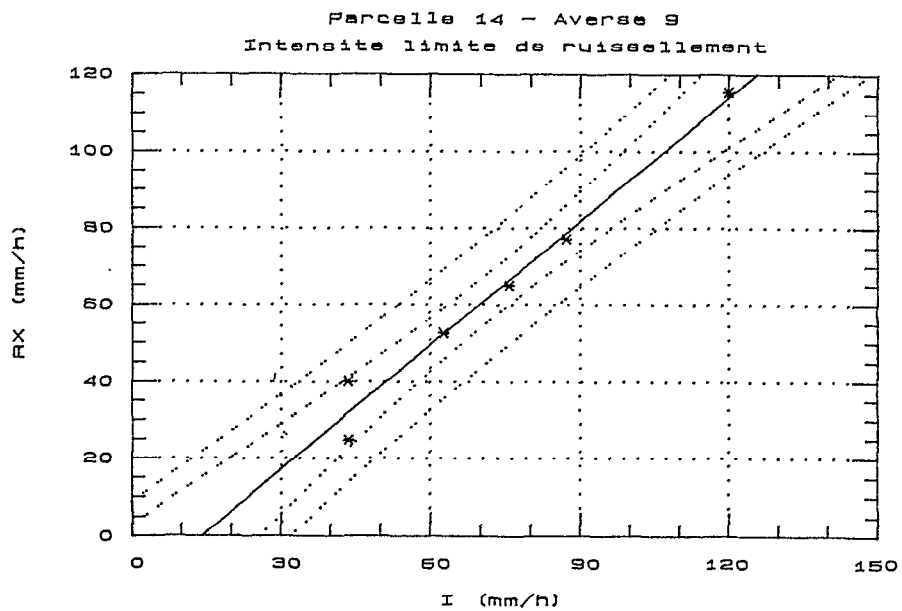
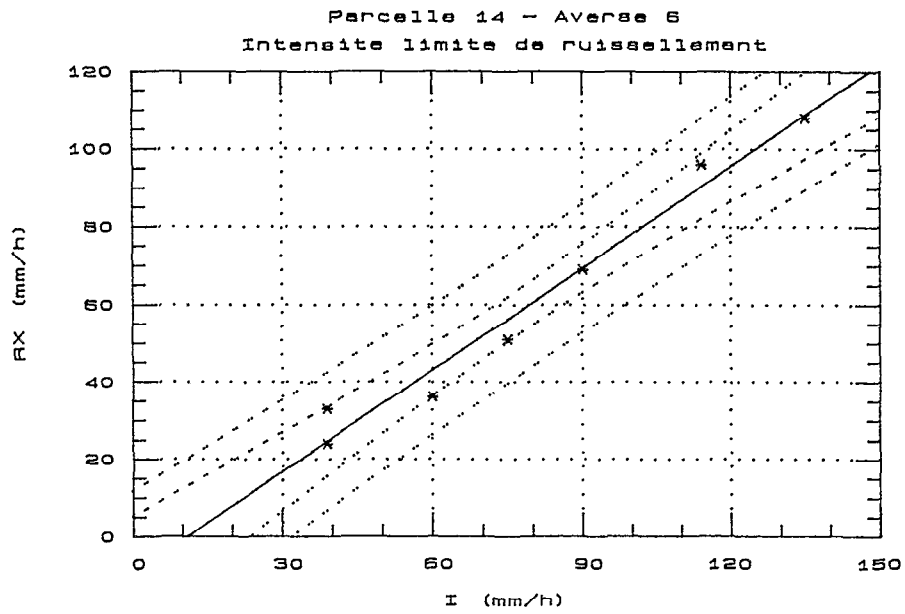


Tableau n° 3.107

Calcul des paramètres du modèle de Green et Ampt

n° parc	n° av.	Ks (mm/h)	err. std.	h (mm)	err. std.	II (mm/h)
1	6	(80.4)	9.00	-2.51	1.28	(sans signif.)
	9	(82.1)	8.70	-1.96	1.01	
2	6	20.0	2.31	4.33	1.64	24.2
3	6	20.4	2.64	4.86	1.96	23.4
4	6	11.2	3.03	10.8	5.47	8.2
5	6	(52.3)	4.28	-1.28	0.90	32.5
	9	32.6	3.57	1.74	1.22	30.1
6	6	(58.4)	5.69	-1.60	1.03	28.4
	9	(58.0)	4.88	-0.85	0.83	38.2
7	6	11.6	1.58	10.3	2.69	22.1
8	6	16.9	1.30	2.51	0.82	20.6
	9	39.9	5.79	0.61	1.52	25.4
9	6	(72.9)	7.84	-2.29	1.09	44.3
	9	(69.5)	8.09	-1.55	1.02	44.5
10	6	26.6	3.00	1.79	1.30	25.8
	9	44.7	7.10	0.03	1.52	30.9
11	6	11.8	4.08	9.60	6.46	20.1
	9	23.3	4.77	3.12	2.31	16.2
12	6	15.8	2.54	3.23	1.89	16.5
	9	13.3	3.12	5.24	2.82	23.2
13	6	17.7	2.63	4.26	1.98	27.5
	9	9.78	4.57	13.7	10.0	25.3
14	6	13.9	2.90	6.63	3.30	10.8
	9	2.06	4.66	53.4	129.	14.0
15	6	8.08	3.95	15.1	11.5	13.4
	9	2.68	6.38	56.2	146.	1.8
16	6	(50.1)	3.53	-0.66	0.85	43.2
	9	(70.5)	8.32	-1.44	1.14	40.0
17	6	(68.5)	7.63	-1.96	1.27	46.6
	9	41.4	5.18	0.13	1.17	31.5

Le calcul est effectué pour une précipitation standard de 74,4 mm (averse de récurrence annuelle à Touba) et un indice API moyen de 15.

Ce résultat est complété par le coefficient moyen d'infiltration mesuré au cours des différentes campagnes de simulation de pluies, KLI. Ce coefficient est le rapport du cumul des lames infiltrées sur le cumul des hauteurs précipitées.

Ces valeurs sont rassemblées dans le tableau n°3.108 avec la valeur calculée du paramètre Ks.

Il est intéressant d'établir à partir de ces valeurs une régression entre $K_i(74.4,15)$ et Ks. Le modèle exponentiel donne un résultat assez bon (figure 3.108) :

$$K_s = 0,23 e^{4,01 K_i(74.4,15)} \quad (3.1.11)$$

avec $R = 0,86$

FIG.3.108

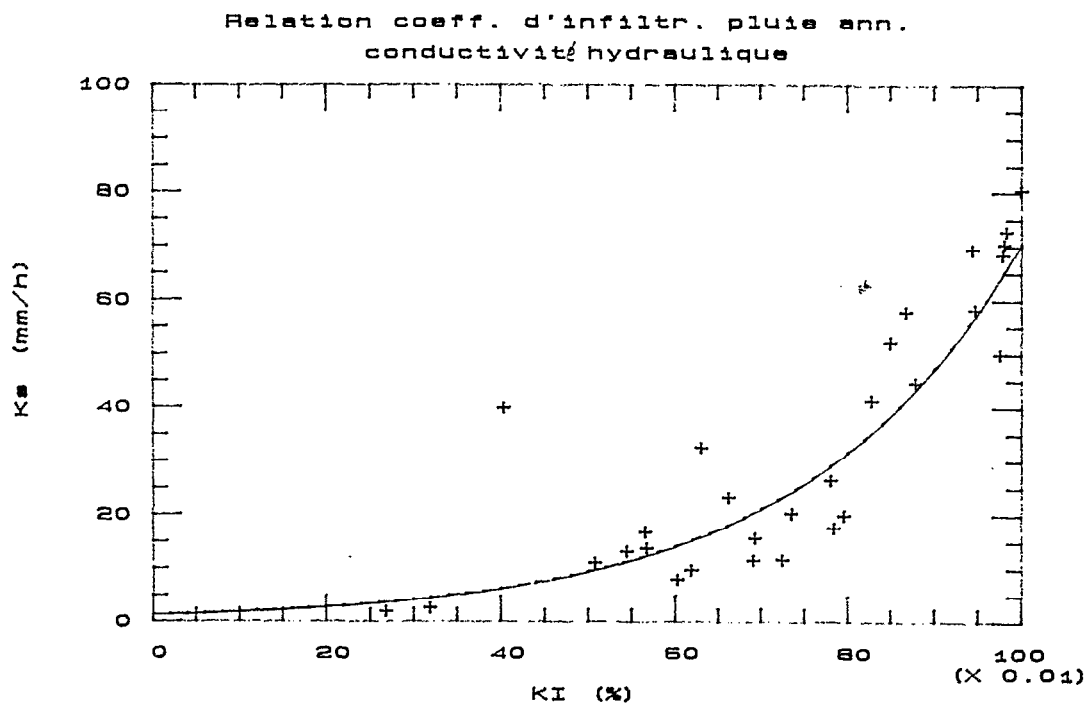


Tableau n° 3.108

Paramètres d'évaluation de l'aptitude à l'infiltration

n° parc	Saison sèche			Saison des pluies			
	Ki(74.4, 15) (%)	KLI (%)	Ks (mm/h)	n° parc	Ki(74.4, 15) (%)	KLI (%)	Ks (mm/h)
	av. 1/6	av. 6		av. 7/9	av. 9		
4	51	38	11.2	14	27	34	2.1
8	57	46	16.9	15	32	28	2.7
14	57	41	13.9	8	40	44	39.9
15	60	41	8.1	12	54	45	13.3
7	69	53	11.6	13	62	49	9.8
12	69	53	15.8	5	63	58	32.6
11	72	56	11.8	11	66	58/63	(*)23.3
3	74	53	20.4	17	83	76	41.4
10	78	65	26.6	6	87	84	58.0
13	78	63	17.7	10	88	84/70	(*)44.7
2	80	66	20.0	9	94	93	69.5
5	85	78	52.3	16	98	95	70.5
6	95	88	58.4	1	100	100	82.1
16	98	89	50.4				
17	98	94	68.5				
9	98	97	72.9				
1	100	100	82.1				

(* le deuxième chiffre de
KLI est celui de l'averse n°12

3.1.4.4. Commentaires

Cette tentative assez sommaire de validation de l'approche théorique des observations faites sous pluies simulées amène un certain nombre de commentaires :

1. On constate tout d'abord que le paramètre h du modèle de Green et Ampt prend parfois des valeurs négatives. Cela est surprenant, mais correspond toujours à des Ks particulièrement élevés (> 50 mm/h), d'une part, et aux parcelles perméables (Ki(74.4,15) > 80 %) d'autre part. En réalité, il est fort probable que lors des averses simulées qui ont servi au calcul, le régime permanent n'a pas été (ou alors partiellement) atteint. Le modèle perd alors toute signification puisque les hypothèses de départ ne sont plus respectées. Ce sont les cas où les valeurs de Ks ont été mises entre parenthèses dans le tableau n° 3.107.

2. Comme dans l'étude d'Albergel, on retrouve des valeurs de Ks et de Il très voisines pour les parcelles à surface homogène (n°2, 3, 14, 15, par exemple en saison sèche). Pour les parcelles à surface hétérogène (saison des pluies en général ; n°13, 7 en saison sèche) on ne retrouve par contre pas la valeur supérieure de Ks sur Il de façon systématique telle qu'elle a été notée par Albergel. Cela peut même être très nettement l'inverse (n°12, 13, 14, en saison des pluies). Faut-il y voir une influence plus importante de la végétation ou de la relative discrétion des pellicules de surface ?

3. Il est rassurant de constater que le classement des parcelles selon une *perméabilité théorique* (ici représentée par Ks) n'est pas différent de celui obtenu à l'échelle de la parcelle avec le *modèle simulateur* proposé par les hydrologues de l'ORSTOM (classement selon Ki(74.4,15) ou KLI). Avec le souhait de partitionner l'échantillon, on peut définir quatre classes d'aptitude à l'infiltration à Booro-Borotou :

- Une classe où l'infiltration est quasiment totale ($K_s > 50$ mm/h et $K_i(74.4,15) > 90$ %, représentée par les parcelles n°1, 5, 6, 9, 16 et 17 en saison sèche, n°1,9 et 16 en saison des pluies.
- Une classe à infiltration élevée (K_s compris entre 15 et 60 mm/h et $K_i(74.4,15)$ compris entre 70 et 90 %, représentée par les parcelles n°2, 3, 10, 11 et 13 en saison sèche, n°6 et 17 en saison des pluies.
- Une classe à infiltration moyenne (K_s compris entre 10 et 20 mm/h et $K_i(74.4,15)$ compris entre 50 et 70 %, représentée par les parcelles n°4, 7, 8, 12, 14 et 15 en saison sèche, n°5 et 11 en saison des pluies.
- Une classe à infiltration plutôt faible (K_s inférieur à 15 mm/h et $K_i(74.4,15)$ inférieur à 50%, représentée par les parcelles n°8, 12, 13, 14 et 15 en saison des pluies.

Notons que ce découpage est tout à fait qualitatif et fait intervenir un certain jugement subjectif dans les cas peu évidents (parcelles n°8 et 13, par exemple).

3.1.5. Humidité volumique et lame infiltrée

Les expérimentations de simulation ont été complétées par une évaluation de l'évolution des profils hydriques en cours de protocole sur les parcelles.

3.1.5.1. Mesure

Le mode opératoire adopté a été choisi le plus simple possible :

- a) Des échantillons de sol sont prélevés à la tarière sur le pourtour immédiat de la parcelle quelques minutes avant le début de chacune des averses simulées à des profondeurs de 5, 10, 15, 20, 30, 40, 50, 60, 70 et 80 cm. Trois répétitions sont effectuées à chaque fois.
- b) Les échantillons humides sont pesés sur le terrain, puis ils sont séchés à l'étuve en laboratoire (24 heures à 105°C) et pesés. L'humidité pondérale est calculée comme le rapport de la différence entre le poids de l'échantillon humide et celui de l'échantillon sec sur le poids de l'échantillon sec. C'est la valeur médiane des trois échantillons qui est adoptée comme base de travail.
- c) En fin de protocole, la mesure de la densité apparente en place est faite à l'aide de cylindres calibrés ou, dans les cas difficiles, au densitomètre à membrane (qui est plus fastidieux à mettre en oeuvre, mais tient mieux compte des sols à hétérogénéité ponctuelle du type gravillon, par exemple). Là encore trois répétitions ont été effectuées aux mêmes profondeurs.
- d) L'humidité volumique est calculée comme étant le produit de l'humidité pondérale par la densité apparente à la profondeur du prélèvement. Le profil hydrique est la variation de cette humidité volumique selon la profondeur. Le stock hydrique pour une tranche horizontale de sol est l'intégrale de cette courbe entre les profondeurs choisies pour la tranche

Les figures n° 3.109 et 3.110 illustrent les résultats obtenus d'une part pour la densité apparente et d'autre part pour les profils hydriques avant chacune des averses sur la parcelle 14.

3.1.5.2. Résultats

A partir de ces profils hydriques, les stocks hydriques du sol avant chacune des averses ont été calculés pour toutes les parcelles et pour deux tranches de sol : 0/20 cm et 0/50 cm.

Les résultats sont représentés sur les figures n° 3.111 à 3.114. Les stocks hydriques ont été pointés dans l'ordre croissant des valeurs théoriques moyennes d'API (cf. tableau n° 3.103).

Il serait inutile de donner ici la totalité des valeurs calculées, mais il est démonstratif de présenter dans le tableau n° 3.109 les stocks hydriques obtenus pour les sols en principe les plus humectés en saison sèche (averse n° 6) et en saison des pluies (averse n° 9).

Tableau n° 3.109
Stock hydrique en mm

n° parcelle	tranche 0/20 cm		tranche 0/50 cm	
	av. 6	av. 9	av. 6	av. 9
1	33.9	53.5	92.5	121.3
2	45.7			114.6
3	68.1			
4	56.9			140.0
5	48.1	61.5	120.1	154.0
6	51.4	54.6	132.3	135.1
7	42.1		95.6	
8	44.5	47.0	103.5	103.8
9	70.4	49.0	149.2	119.1
10	44.6	(*)39.5	112.8	(*)107.1
11	45.1	53.2	121.2	136.8
		(*)46.1		(*)126.0
12	39.9	48.2	111.2	122.4
13	49.7	54.8	118.0	126.9
14	52.7	51.6	139.5	135.0
15	50.7	54.2	129.1	133.8
16	58.1	59.2	137.2	142.2
17	44.6	51.2	112.9	127.2

(*) averse n° 12

3.1.5.3. Commentaires

A une exception près (parcelle n°9), on s'aperçoit sur les figures qu'en saison sèche comme en saison des pluies et sur la tranche 0/20 cm comme sur la tranche 0/50 cm, le stock hydrique varie sensiblement après la première averse du protocole, mais reste à peu près stable pour les averses suivantes.

Cette observation est particulièrement intéressante. Elle indique en effet que le sol se comporte ici *grosso modo* comme une éponge. Il s'humidifie à la première averse et restitue son trop plein soit vers le haut par évapotranspiration immédiate, soit vers le bas pour alimenter un système poreux plus profond.

Cette capacité de stockage par tranche est plus élevée en saison des pluies. Une explication vraisemblable (et simple) est qu'en saison sèche, l'humectation n'intéresse que la parcelle et ses alentours immédiats ; il existe donc un potentiel latéral vers des sols restés secs qui fournit une troisième porte de sortie.

Tout cela met singulièrement en défaut, dans le cas des bassins de savane humide, d'une part l'approche qui veut que ruissellement et infiltration soit réglés par l'*état de surface* (à 50 cm on est tout de même assez loin de la surface !) et d'autre part la validité d'un indice comme API pour représenter efficacement l'humectation initiale du sol.

Dans le même sens, on constate qu'à API théoriques égaux, les stocks hydriques des tranches étudiées sont nettement plus élevés en saison des pluies qu'en saison sèche.

Ces remarques paraissent triviales, mais elles mettent en évidence la difficulté de représenter de façon simple les phénomènes étudiés. Une forme d'approche (API, état de surface) qui convient parfaitement à un milieu dont la sensibilité a fait que l'on s'y est intéressé prioritairement, devient simpliste, voire inadaptée, dans un autre contexte.

FIG 3.109

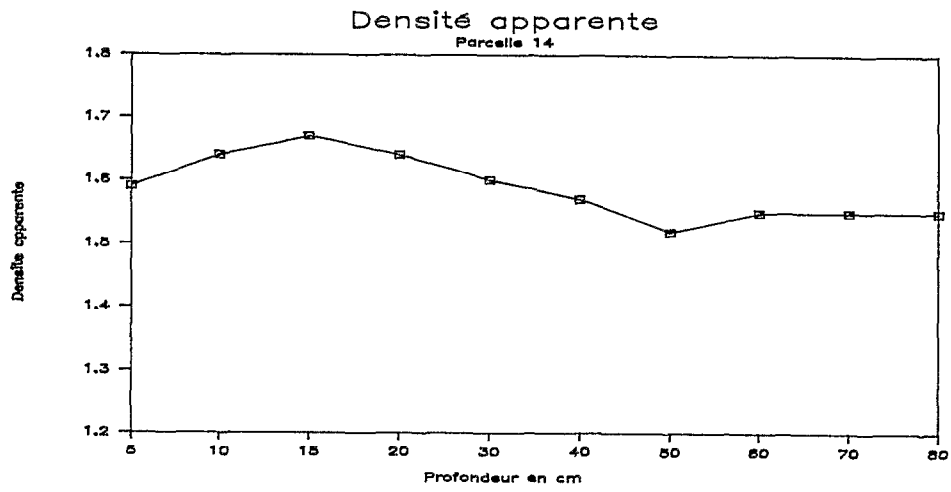


FIG 3.110A

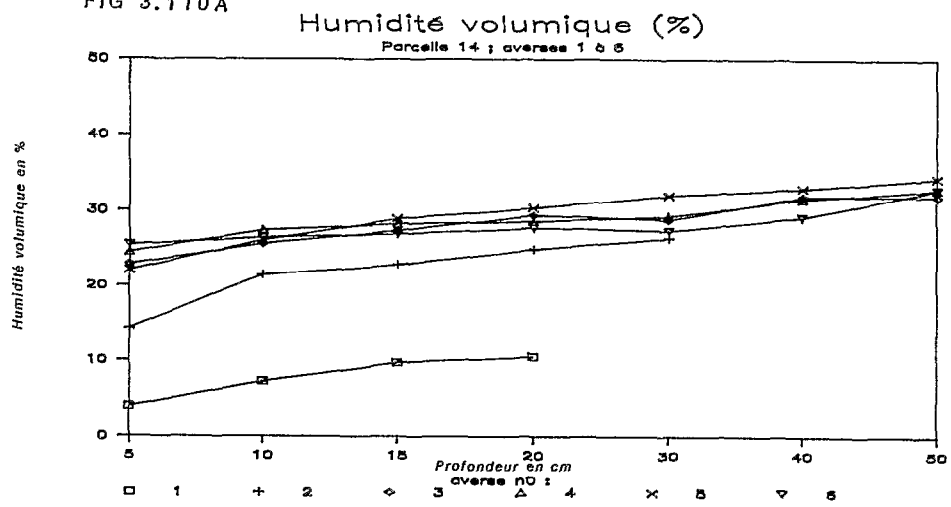


FIG 3.110B

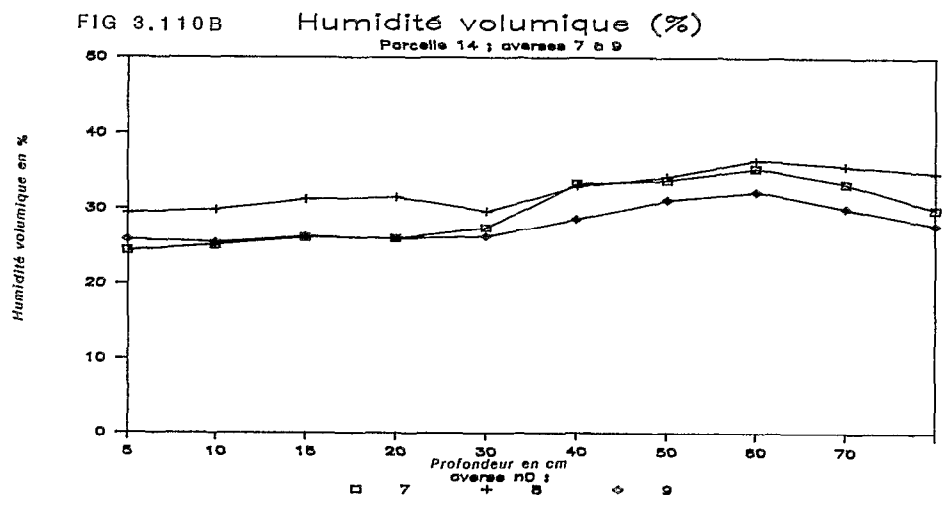


FIG 3.111A

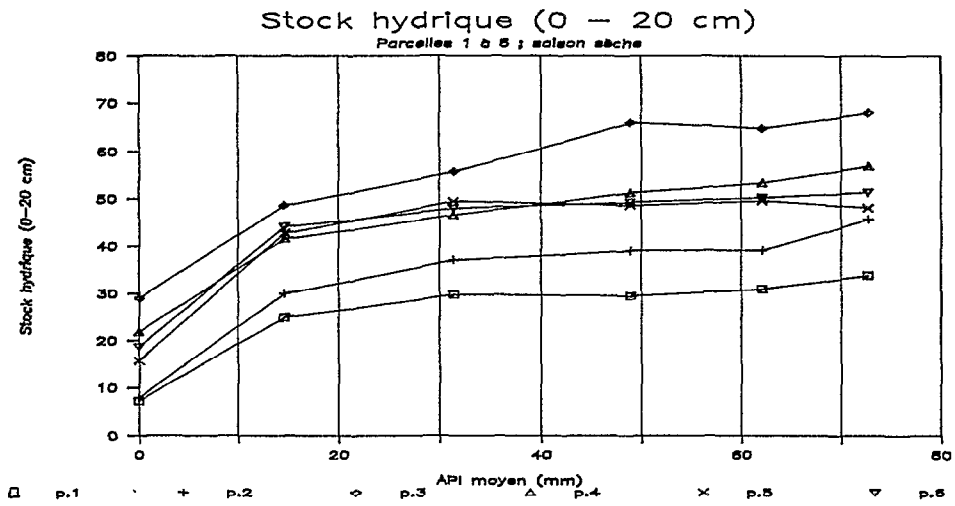


FIG 3.112A

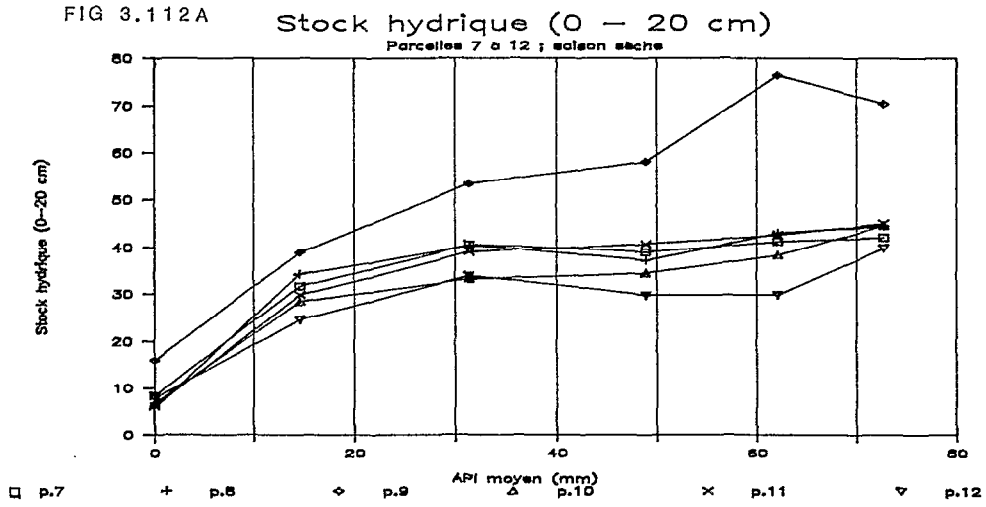


FIG 3.113A

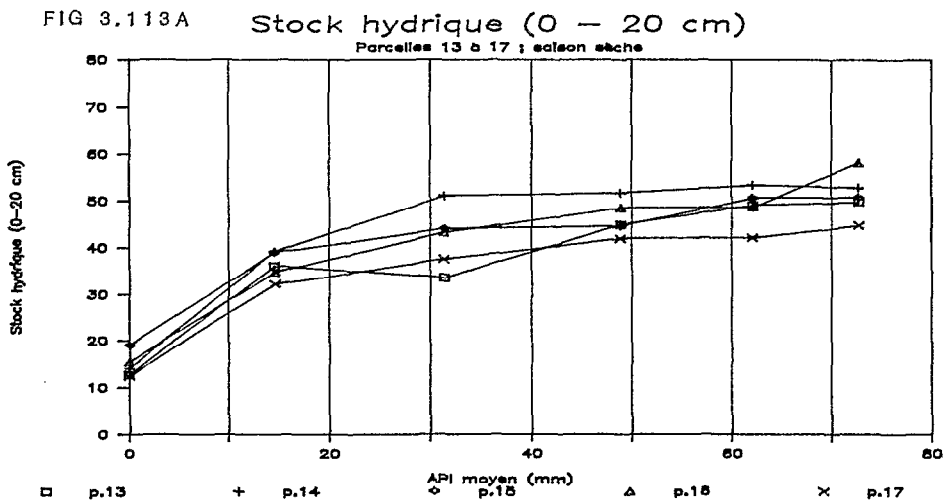


FIG 3.111B

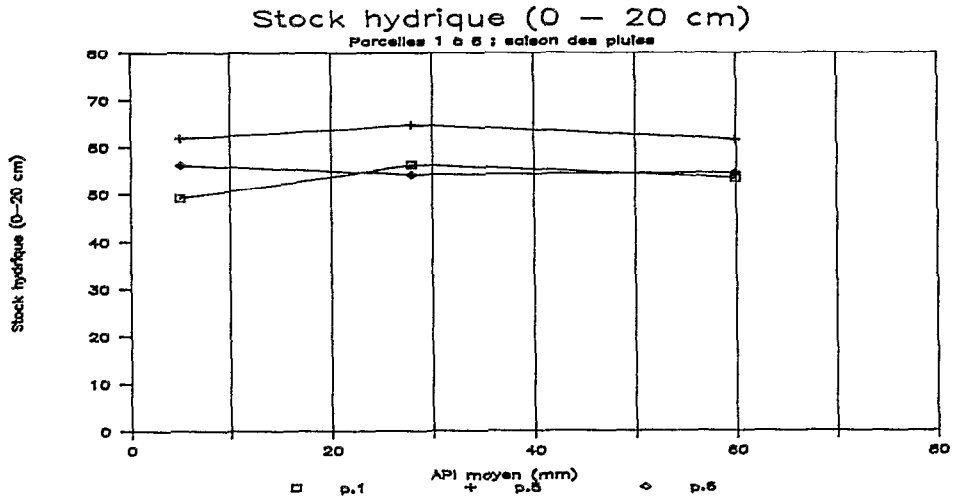


FIG 3.112B

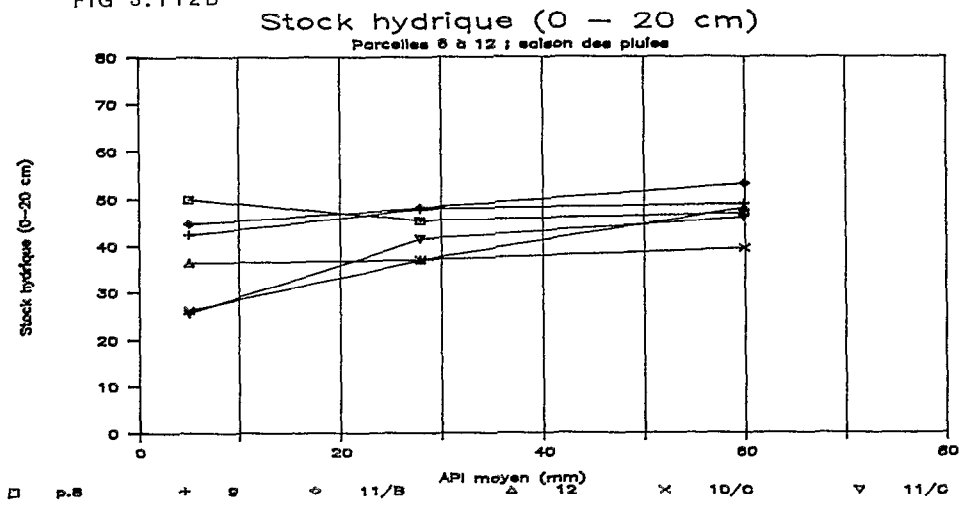


FIG 3.113B

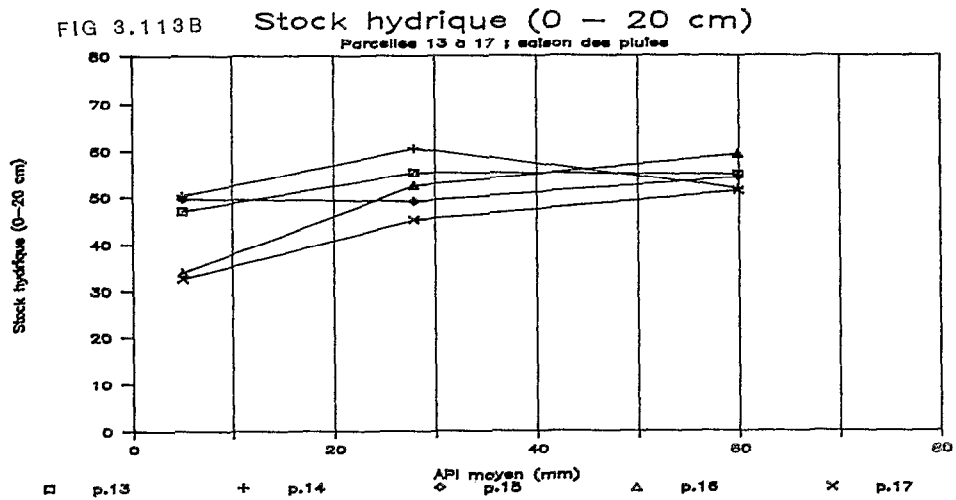
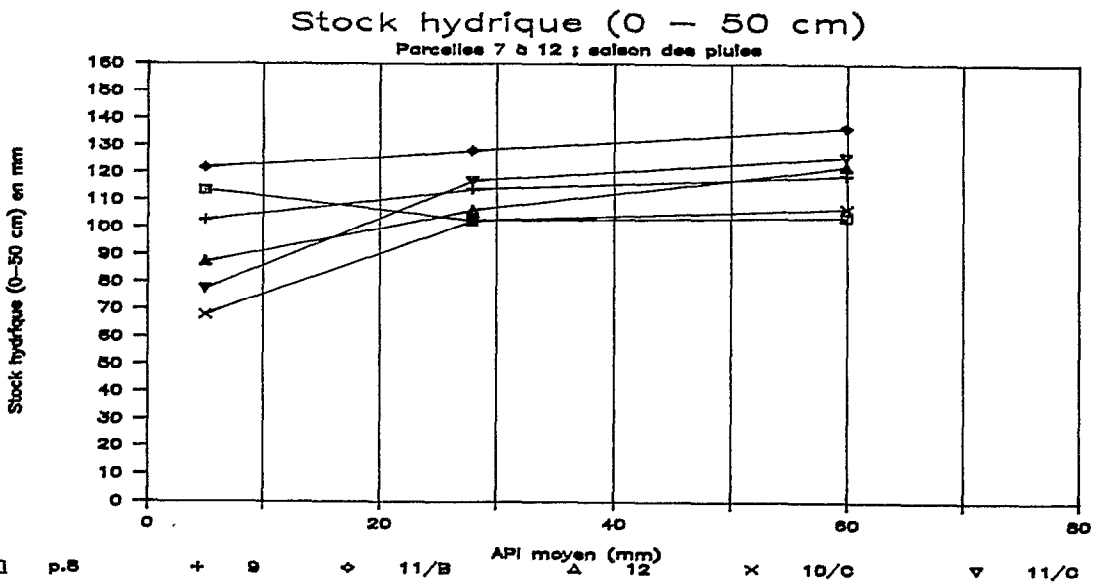
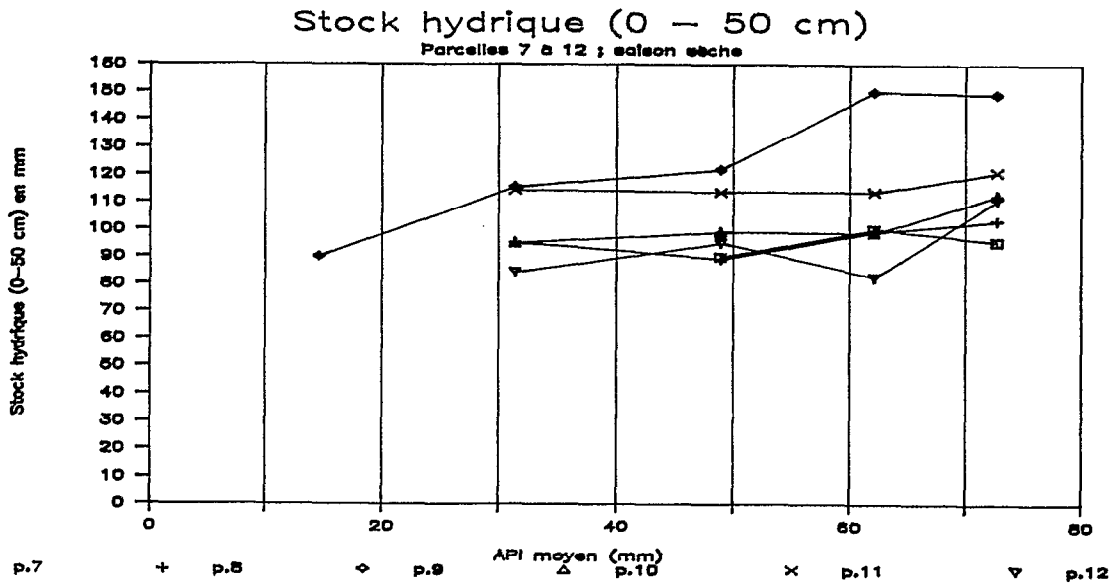


FIG 3.114



3.1.6. Confrontation saison sèche - saison des pluies

Dans tout ce qui précède, les résultats ont été présentés en différenciant systématiquement la campagne de saison sèche (A) de celles de saison des pluies (B et C). C'est important, car toutes les opérations de simulation de pluies réalisées jusqu'à maintenant l'ont été en saison sèche, alors que les phénomènes que l'on cherche à représenter par ce type d'expérimentation se produisent (en tout cas dans leur très grande majorité) en saison des pluies.

L'expérimentation en saison des pluies soulève plusieurs problèmes techniques imparfaitement résolus et en particulier :

- l'occurrence fréquente et imprévisible d'averses naturelles en cours de protocole pouvant modifier les données d'humectation préalable et rendant impossible toute expérience programmée de façon cohérente. Le problème a été résolu en recouvrant les parcelles entre les simulations avec une bâche inclinée placée au dessus de la parcelle de façon à permettre un échange entre sol et atmosphère. Mais il est certain que cette bâche a une influence sur les processus d'évaporation et de transpiration.

- la présence d'une végétation haute à l'intérieur et à proximité de la parcelle empêchant la mise en place de la plaque pluviométrique qui permet d'étalonner l'appareil. Deux solutions ont été envisagées. L'une consiste à effectuer l'étalonnage de l'appareil juste à côté de la parcelle de travail sur une zone dégagée et de le déplacer ensuite. Mais l'expérience a montré que le déplacement de l'appareil pouvait faire varier le réglage des intensités d'averses de près de 20% ; cela peut être moyennement gênant sur des parcelles à fort ruissellement, mais devient très difficile à interpréter sur des sols perméables. L'autre solution consiste à couper la végétation haute de façon à pouvoir tout de même placer la plaque pluviométrique de contrôle. Cette solution a l'énorme inconvénient d'être destructrice d'une partie de l'ensemble végétal susceptible d'intercepter l'averse avant son contact avec le sol. C'est pourtant cette dernière qui a été adoptée en raison de la faible aptitude moyenne au ruissellement (décelée dès la saison sèche) des parcelles de Booro-Borotou, l'influence de l'interception ne nous apparaissant pas comme prépondérante dans de telles conditions. Mais il ne faut pas cacher que cette option est éminemment contestable et contestée (par les *surfaçologues* en particulier).

Ces difficultés expliquent que seulement trois averses aient été réalisées dans ces conditions et que toutes les parcelles n'aient pas été testées. C'est donc avec prudence qu'il faut prendre l'analyse des différences observées telle qu'elle est présentée dans la suite.

Dans le tableau n° 3.110, nous avons tenté de récapituler les variations entre saison sèche et saison des pluies des principaux résultats exposés dans ce chapitre, pour pouvoir les comparer et en particulier voir si les variations de comportements sont liées aux variations des états de surface.

Ce tableau appelle quelques remarques :

1. Concernant les états de surface.

Les variations entre saison sèche et saison des pluies ne sont pas aussi flagrantes qu'on aurait pu le penser, étant entendu que la proportion de couvert végétal et de résidus ne correspond pas vraiment à une situation naturelle. Le relief ne varie que dans un sens d'accroissement tant pour la hauteur que pour l'obstruction. La présence d'algues ou de mousses, la densité de fentes ou la continuité des pellicules ne varient pratiquement pas. Les autres paramètres descriptifs varient dans des sens qui ne sont pas systématiquement les mêmes selon les parcelles. Il est en particulier intéressant de noter que la variation d'activité de la mésofaune ne semble pas une hypothèse à retenir pour une explication d'évolution saisonnière systématique.

2. Concernant le stock hydrique maximal des horizons superficiels.

Ce stock est sur toutes les parcelles (sauf la n°9) plus important (ou peu différent) en saison des pluies qu'en saison sèche. Cela tend à confirmer que, sur les parcelles où la différence est importante le protocole de saison sèche n'arrive pas à saturer ces horizons (parcelles 1, 5, 13, 16 et 17 qui sont effectivement les parcelles très perméables).

3. Concernant l'infiltration.

On assiste à une diminution générale de la capacité d'infiltration des sols entre saisons sèches et pluvieuses sauf sur les parcelles à infiltration quasi totale (1 et 16 qui restent stables) et cela quelle que soit la variable descriptive de cette infiltration ($K_i(74.4,15)$, KLI, ou K_s). Cela correspond, semble-t-il, au stock hydrique plus important dans les couches superficielles du sol. A indice de précipitations antérieures égal, l'infiltration est sensiblement diminuée et on trouve ici une des justifications aux réserves que nous émettions sur l'utilisation de cet indice (paragraphe 3.1.2).

4. Cas particulier des champs.

Dans les observations précédentes les parcelles 10 et 11 ont été mises de côté. En effet, ces parcelles ont fait l'objet d'un travail du sol qui a modifié dans des conditions non naturelles, voire contradictoires, les états de surface (augmentation importante du relief, de la porosité faunique, diminution de la pellicule, variation alternée des indices d'érosion). De plus, des problèmes techniques dans l'expérimentation n'ont pas permis d'avoir les résultats complets d'infiltration et de stock ; mais on s'aperçoit d'une variabilité importante plus due au travail du sol (variation contradictoire entre les deux campagnes de saison des pluies où la mise en valeur était différente) qu'au changement d'état dû à la saison proprement dite.

Tableau n° 3.110

Comparaison codée saison sèche / saison des pluies

Pour schématiser la variation des états de surface les conventions d'écriture suivantes ont été nécessaires (elles correspondent à la codification du paragraphe 3.1.2) :

blanc : pas de variation

> : saut positif d'une classe ou augmentation de la surface concernée inférieure à 20%

>> : saut positif de plusieurs classes ou augmentation de la surface concernée supérieure à 20%

< : saut négatif d'une classe ou diminution de la surface concernée inférieure à 20%

>> : saut négatif de plusieurs classes ou diminution de la surface concernée supérieure à 20%

Les autres variations sont exprimées en différences absolues dans l'unité de la variable étudiée.

Parcelle :	1	5	6	8	9	10B-10C	11B-11C	12	13	14	15	16	17
Couv. vég.	>>		<<	>>		>><	>><<	<	<	<	<	<	<
Résidus	<	<<	<<	>>	<	<<>	<<>	>>	>	>	>		>
Relief :													
haut.						>>>	>>-	<	>	>	>	>>	
obstr.						->>	->>						
Algues/ mousses				>		-	-			>			
Mésosofaune :													
couv.			<				->	-	>	<	<	<<	<
poros.			>			>->	>->	>>	>	<	<		<
Fentes		<				-	-		<	<			
Sables					>>	>-	>-		<	<		>	
Vésicules						><	>-		<				
Pellicules :													
contín.			<			->	-		<	<		>	<
épais.			<	<		<<<	<<>	>	>			>	
érosion			>			<<<>	<<<>>	<<	<	>		>>	>
Ki (%)	0	-22	-8	-17	-4	+10/	-8/	-15	-16	-30	-28	0	-15
KLI (%)	0	-21	-5	-2	-4	+19/-14	+2/+5	-7	-14	-7	-14	+6	-19
Ks (mm)	(*)	(*)	(*)	+23	(*)	+18/	+11/	-4	-8	-12	-5	(*)	(*)
Stock hydrique maximal :													
0-20 (mm)	+10	+13	+3	+3	-21		+8/-7	+8	+5	-1	+4	+1	+6
0-50 (mm)	+29	+34	+3	0	-30		+15/-11	+11	+9	-5	+4	+5	+14

(*): conductivité hydraulique non significative

3.1.7. Discussion générale sur la simulation de pluies

Différents aspects de ce que l'on peut obtenir à partir d'expérimentation sur parcelles au simulateur de pluies ont été présentés successivement et de façon relativement indépendante. Il est souhaitable de voir maintenant en guise de conclusion de ce chapitre l'éventuelle interaction de ces analyses. Trois aspects peuvent être dégagés : d'une part, à l'échelle de la parcelle, la liaison entre les caractéristiques descriptives du milieu avec soit l'infiltration soit les coefficients du *modèle simulateur* (équation 3.1.2) et, d'autre part, à l'échelle du versant, l'organisation générale de l'aptitude à l'infiltration ; c'est-à-dire les caractéristiques statiques et dynamiques du modèle.

3.1.7.1. La parcelle et l'infiltration

Albergel (1987) propose pour confronter les caractéristiques des parcelles aux lois d'infiltration d'utiliser des méthodes de statistique descriptive sur des échantillons d'individus (les parcelles) décrits par un ensemble de variables.

Nous proposons une approche identique utilisant l'*analyse factorielle des correspondances*. Cette méthode permet de ramener les variables descriptives plus ou moins corrélées entre elles à un nombre restreint de facteurs principaux indépendants susceptibles de décrire l'échantillon des individus. Cette analyse est faite à l'aide du logiciel NDMS (Noirot et al., version 1987).

Les individus sont les 17 parcelles pour les campagnes A et B ; en tenant compte du fait que toutes les parcelles n'ont pas subi la campagne B, l'effectif de l'échantillon se monte à 30 individus.

Dans l'application du logiciel NDMS, les variables peuvent être *actives* (elles participent chacune activement à l'analyse statistique) ou *supplémentaires* (elles peuvent être à l'issue de l'analyse replacées dans le système d'axes des facteurs principaux obtenus).

Toutes les variables descriptives du milieu ont été prises comme *actives*; celles qui décrivent directement l'infiltration sont *supplémentaires*.

L'échantillon est donc décrit par les variables suivantes :

- variables actives :

- CD, classe de drainage
- CR, couverture de résidus
- CV, couverture de la végétation
- ER, indice d'érosion
- GE, couverture de gravillons enchassés
- GL, couverture de gravillons libres
- MC, couverture de l'activité mésofaunique
- MH, amplitude du microrelief
- MP, porosité mésofaunique
- PC, continuité de la pellicule
- PE, épaisseur de la pellicule plasmique
- PO, porosité du sol (premier horizon)
- PR, profondeur d'apparition d'un horizon de drainage limité
- SB, cohésion des sables pris en masse
- TX, texture du sol (premier horizon)
- VS, porosité vésiculaire

- variables supplémentaires :

- KI, coeff. d'infiltr. théorique d'une averse de projet
- KL, coeff. d'infiltr. moyen de la campagne de pluies simulées
- KS, conductivité hydraulique à saturation théorique
- SH20, stock hydrique des 20 premiers cm du sol à saturation

Il est nécessaire que ces variables soient homogènes et présentées sous forme de modalités qualitatives exclusives. Pour cela les variables CR, CV, GL, KI, KLI, KS et SH20 ont été recodées automatiquement en 4 classes chacune.

Le résultat de l'analyse propose une description à partir de quatre facteurs principaux dont les vecteurs propres expliquent près de 90 % de l'inertie totale de l'échantillon (tableau n° 3.111). Les figures n° 3.115 à 3.117 représentent les variables actives et supplémentaires dans les nouveaux systèmes d'axes (1/2, 1/3 et 1/4).

Tableau n° 3.111

Histogramme des facteurs d'inertie de l'ACP

Fact.Inertie		In.cum. Histogramme
1	0.579561	0.57956 *****
2	0.190386	0.76995 *****
3	0.062763	0.83268 ****
4	0.053286	0.88597 ***
5	0.032679	0.91865 **
6	0.029077	0.94773 **
7	0.020509	0.96824 *
8	0.011042	0.97928
9	0.007455	0.98673

L'axe 1 décrit la *structure horizontale* de l'état de surface en opposant la rugosité (GL, GE, MH) à la porosité et aux éléments favorables à l'infiltration (CR, MC, MP).

L'axe 2 oppose les variables descriptives de l'hétérogénéité ponctuelle (CR, GL, MC, MH) aux variables de continuité (VS, SB, TX). C'est l'axe de l'*homogénéité spatiale*.

L'axe 3 décrit plutôt la *structure verticale* opposant les indices d'érosion, les gravillons (GE, VS, TX, ER) à l'activité faunique, la végétation, le drainage (MP, CV, PR, CD).

Enfin l'axe 4 pourrait être celui de la *description pédologique* opposant les éléments superficiels (microrelief, continuité des sables ou de la pellicule) aux éléments internes (profondeur du sol, porosité, classe de drainage).

Quelques commentaires à propos de cette analyse :

1. Sur les trois représentations on retrouve des variables toujours très proches. Il s'agit, d'une part, de variables qui décrivent strictement la même chose, la classe de drainage (CD) et la porosité interne du sol (PO). D'autre part, on trouve une association plus intéressante entre l'indice d'érosion (ER) et l'épaisseur de la pellicule (PE) ; cela signifie qu'à Booro Borotou, une pellicule épaisse est toujours liée à une érosion bien marquée (et réciproquement).

2. Les variables *supplémentaires* descriptives de l'infiltration sont toujours groupées et les paramètres qui semblent le plus liés à l'aptitude à l'infiltration (les plus proches dans les différentes représentations) sont, d'abord le couvert végétal, ensuite la hauteur du microrelief, la couverture de l'activité mésofaunique, le drainage et la porosité interne. Cela confirme ainsi la proposition selon laquelle à Booro Borotou, les *états de surface* ne suffisent pas pour expliquer le fonctionnement hydrodynamique.

3. On peut confronter ces résultats à ceux d'Albergel dont les 4 premiers facteurs n'expliquent que 50 % de l'inertie totale, le premier axe caractérisant l'aptitude du sol à l'infiltration, le second l'occupation du sol (végétation, cultures), le troisième les pellicules et le quatrième les sols. Cette description correspond *grosso modo* à la nôtre (les termes ne sont pas les mêmes, mais recouvrent des domaines comparables).

FIG 3.115

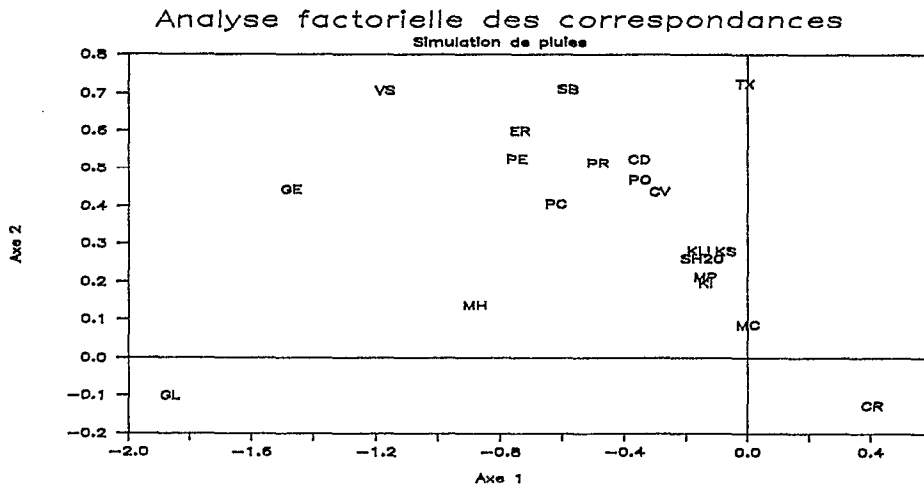


FIG 3.116

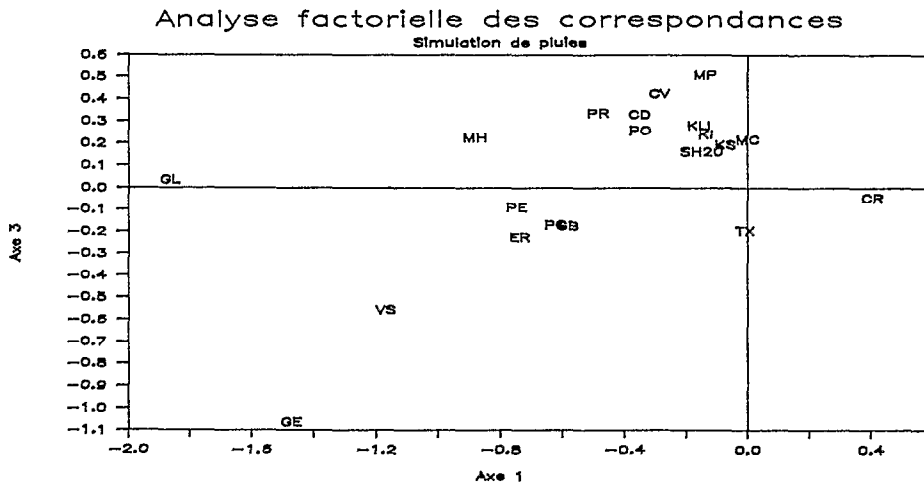
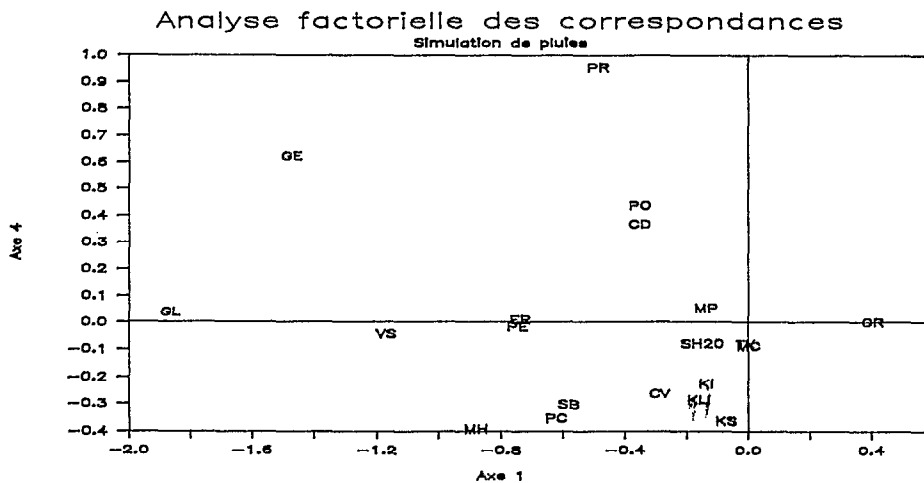


FIG 3.117



3.1.7.2. La parcelle et le modèle simulateur

Le modèle simulateur est caractérisé par l'équation :

$$LR = AA.P + AB.API + AC.P.API + AD \quad (3.1.2)$$

Les paramètres AA, AB, AC et AD, caractéristiques du modèle, sont obtenus par le calcul à partir du résultat des observations sous pluies simulées. Il est intéressant d'essayer de voir si ces paramètres peuvent être liés aux mêmes paramètres descriptifs que ceux qui viennent d'être utilisés pour l'infiltration.

La méthode retenue est celle de la régression multiple à exclusion itérative des paramètres non-significatifs (méthode du *stepwise*) pour un seuil donné (pris ici pour un intervalle de confiance à 95%).

Le calcul est fait avec le logiciel STATGRAPHICS et donne les résultats suivants sur les 30 individus de l'échantillon précédent :

$$AA = 0,282 PO - 0,059 CV + 0,084$$

avec $R^2 = 0,61$

$$AB = 0,027 PR + 0,017 VS - 0,017 CV + 0,026 MC - 0,079$$

avec $R^2 = 0,49$

$$AC = 0,00034 GL + 0,00161 TX - 0,00008 CR - 0,00185 VS - 0,00087GE + 0,0056$$

avec $R^2 = 0,64$

$$AD = -2,99 PO - 0,05$$

avec $R^2 = 0,58$

Indépendamment de la qualité de ces régressions, ce qui est intéressant, c'est de voir avec quels paramètres descriptifs de la parcelle s'associent les paramètres du modèle simulateur :

AA se retrouve avec PO et CV, l'ouverture de la porosité en surface et le couvert végétal, qui sont bien les paramètres les plus simples pour décrire l'aptitude à l'infiltration.

AB semble associé à un pannel plus complexe (et au regard du coefficient de la régression) avec moins de succès : PR et VS, caractéristiques de la zone de subsurface (de l'aptitude au stockage hydrique superficiel ?) ; MC et CV caractéristique de l'activité de surface (végétation et mésofaune).

AC est décrit par les caractéristiques de rugosité de surface (GE, GL, CR) et par la nature de l'horizon de surface (TX, VS)

AD enfin ne serait fonction que de la porosité. Cette association est tout à fait compatible avec l'idée que ce paramètre est, en quelque sorte, la *fuite* constante du modèle de ruissellement.

Ces résultats sommaires montrent que ces paramètres du modèle ne sont tout de même pas dus au hasard et correspondent effectivement à la réalité du terrain. Cependant une extrême prudence est de mise avec une qualité de régression aussi faible. Il s'agit de *tendances* que nous considérons comme intéressantes, mais en aucun cas de démonstrations. Les méthodes de régression sont toujours à manipuler avec précaution (Tomassone et al., 1983).

3.1.7.3. Le versant et l'infiltration

Mais il est temps de revenir à une analyse plus proche du milieu naturel. Il est courant de schématiser le comportement hydrodynamique le long du versant (toposéquence) pour avoir une bonne représentation dans l'espace. Au début de ce chapitre, la figure n° 3.103 tentait de situer le long d'une toposéquence type l'emplacement des parcelles de simulation de pluie. Dans le tableau n° 3.112 les parcelles sont rangées de l'amont vers l'aval et on a placé en regard la classe d'aptitude à l'infiltration correspondante (de 1 à 4, dans le sens d'une perméabilité croissante). Cette classe est un compromis entre les classes obtenues lors du recodage de KI, KLI et KS pour l'analyse factorielle des correspondances.

Tableau n° 3.112

parcelle	campagne A	campagne B
3	3	
4	1	
2	3	
9	4	4
5	3	3
6	4	4
10	3	3
11	3	3
7	2	
8	2	2
14	2	1
15	2	1
12	2	2
13	2	2
16	4	4
17	4	3
1	4	4

Ce tableau montre que le long du versant, l'aptitude à l'infiltration décroît depuis le piémont de la butte cuirassée jusqu'à l'induration de mi-versant où le ruissellement est maximal. Elle recroît ensuite pour atteindre une infiltration totale assez rapidement dès le milieu de la zone convexe du bas de versant. Ce comportement n'est pas nettement modifié par la campagne de mesure réalisée en saison des pluies.

On note le comportement hétérogène des deux parcelles 3 et 4 installées sur les éboulis de cuirasse, sans doute due à la très forte hétérogénéité locale des sols. Mais la représentativité de ces parcelles est négligeable au regard du bassin versant.

Ce schéma de fonctionnement directement et qualitativement déduit des mesures sous pluies simulées correspond exactement à l'analyse faite à partir des observations qualitatives hydrologiques et pédologiques et en confirme donc la validité.

3.2. PROFILS HYDRIQUES

Ce chapitre est rédigé à partir des observations d'Emmanuel Fritsch.

3.2.1. Dispositif et observations

Au chapitre 2.8, le dispositif de mesure des stocks hydriques souterrains a été rapidement décrit. Les données d'observation sur l'ensemble de ce réseau de mesure n'étant pas encore tout à fait mises en forme, il a paru tout de même intéressant de présenter des résultats, même partiels, sur deux sites caractéristiques et d'en faire une analyse la plus complète possible.

C'est d'abord le site tensio-neutronique n°8 qui est retenu, associé au piézomètre n°19. Le tube neutronique permet des relevés d'humidité dans le sol jusqu'à une profondeur de 3,55 m. Ce site est situé à peu près au milieu du transect aval et intègre tous les phénomènes qui peuvent se produire dans cette zone.

Le second site choisi est le site n°4 qui comporte le même dispositif de mesure que le premier à l'exception du piézomètre. Il permet des relevés jusqu'à une profondeur de 1,95 m. Il se trouve au milieu du transect amont.

Des observations régulières ont été effectuées sur ces tubes à partir du mois d'avril 1985. Aux incidents matériels près, l'évolution des profils hydriques est donc bien connue.

Cependant à la date de rédaction de ce mémoire, certains étalonnages de ces tubes n'étaient pas considérés comme tout à fait satisfaisants. Des mesures de contrôle ont été programmées pour l'été 1988. Les résultats définitifs sont donc susceptibles de petites différences avec ceux que nous utilisons ici. Ces différences seront très vraisemblablement minimales.

3.2.2. Analyse des profils

Pour comprendre les mécanismes d'humectation du sol, nous avons choisi d'opérer sur un cycle annuel complet portant sur la période 1985-1986 qui a l'avantage d'être une année de pluviométrie abondante et bien répartie et qui constitue donc un bon échantillon de travail.

Parmi les nombreux relevés effectués, 12 dates ont été retenues pour chacun des deux tubes. Elles ont été choisies de façon à caractériser le *remplissage* et la *vidange* du profil entre avril 1985 et avril 1986.

Le mécanisme n'étant pas strictement le même pour les deux tubes les observations et les commentaires sont présentés séparément.

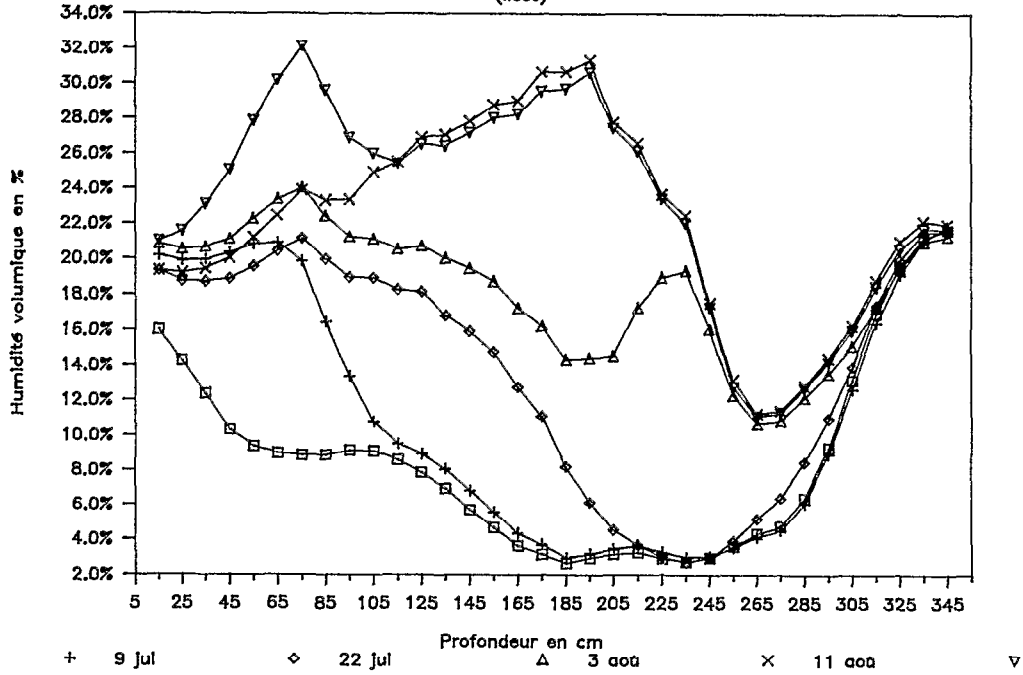
3.2.2.1. Tube neutronique n°8

Le tableau 3.201 et la figure 3.201 représente les profils pour les dates sélectionnées. Pour des raisons de clarté le graphique présente d'une part le *remplissage* entre le 28 avril et le 25 août et d'autre part la *vidange* entre le 26 septembre et le 22 avril. Enfin, pour les mêmes raisons de clarté, un lissage minimum (moyenne mobile sur trois points) a été réalisé sur les graphiques.

FIG 3.201

Tube n°8 : Humidité volumique

(lissé)



Tube n°8 : Humidité volumique

(lissé)

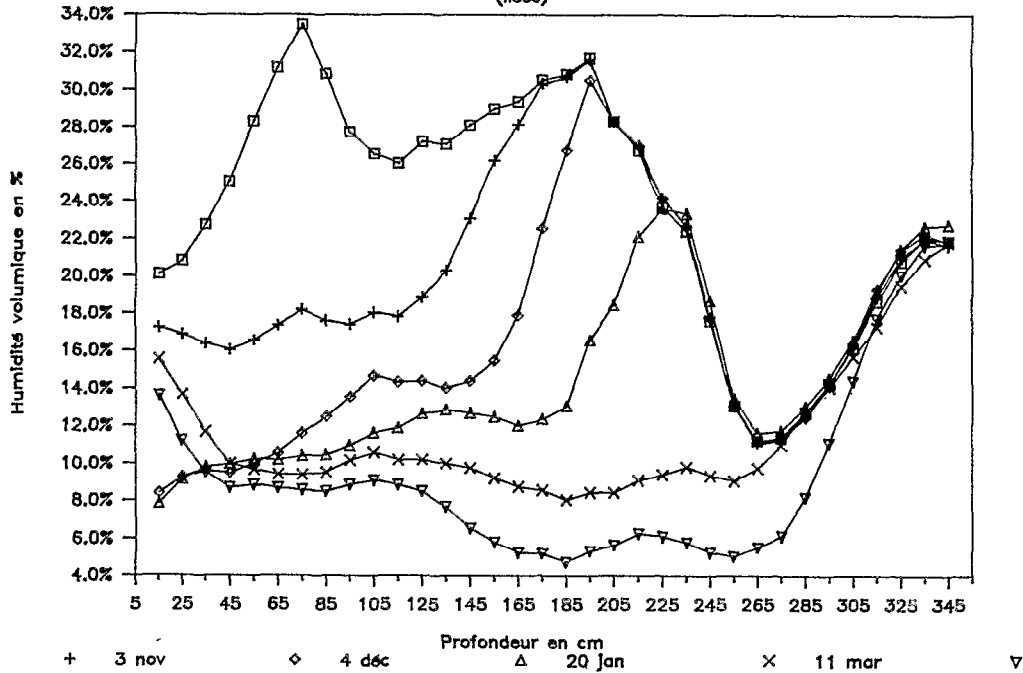


Tableau n°3.201

Tube neutronique n°8 : humidité volumique ou teneur en eau (en %)

Prof.	28avr	9jul	22jul	3aoû	11aoû	25aoû	26sep	3nov	4déc	20jan	11mar	22avr
5	17,5%	21,9%	21,2%	22,6%	20,8%	22,9%	21,8%	18,1%	7,0%	6,0%	16,6%	16,0%
15	15,5%	19,5%	18,6%	19,9%	18,6%	19,9%	18,7%	17,0%	8,5%	8,0%	15,7%	14,0%
25	15,0%	19,1%	18,1%	19,9%	18,6%	20,2%	19,8%	16,6%	9,7%	9,5%	14,3%	10,8%
35	12,2%	21,1%	19,5%	21,7%	20,4%	24,6%	23,9%	17,0%	9,5%	9,9%	11,1%	8,8%
45	9,9%	19,7%	18,5%	20,4%	19,3%	24,5%	24,6%	15,5%	9,6%	10,0%	9,7%	8,9%
55	8,8%	20,2%	18,6%	21,2%	20,3%	26,0%	26,7%	15,6%	9,3%	9,9%	9,2%	8,4%
65	9,4%	22,6%	21,6%	25,2%	23,9%	33,0%	33,7%	18,6%	11,1%	10,7%	10,0%	9,3%
75	8,6%	19,8%	21,1%	23,7%	23,0%	31,5%	33,2%	17,9%	11,2%	9,9%	9,0%	8,3%
85	8,5%	17,1%	20,7%	23,2%	24,7%	31,8%	33,5%	18,1%	12,4%	10,5%	9,1%	8,1%
95	9,4%	12,5%	18,1%	20,4%	22,1%	25,5%	25,9%	16,9%	13,8%	10,9%	10,4%	9,1%
105	9,4%	10,5%	18,0%	20,1%	23,1%	23,3%	23,8%	17,3%	14,4%	11,3%	11,0%	9,4%
115	8,4%	9,3%	20,6%	22,8%	29,5%	29,2%	30,0%	20,0%	15,8%	12,5%	10,4%	8,8%
125	7,9%	8,6%	16,2%	18,7%	23,9%	23,7%	24,3%	16,2%	12,8%	11,7%	9,2%	8,3%
135	7,3%	8,8%	17,6%	20,6%	27,3%	26,6%	27,3%	20,4%	14,6%	13,6%	11,1%	8,3%
145	5,6%	6,8%	16,6%	20,8%	30,0%	28,9%	29,6%	24,3%	14,6%	13,2%	9,7%	6,3%
155	4,2%	4,8%	13,5%	16,9%	26,1%	26,0%	27,5%	24,5%	14,0%	11,2%	8,5%	5,0%
165	4,2%	5,1%	14,1%	18,4%	30,1%	29,1%	29,9%	29,8%	17,8%	13,0%	9,4%	6,1%
175	2,5%	3,1%	10,6%	16,3%	30,6%	29,5%	30,8%	30,2%	22,0%	11,8%	8,3%	4,6%
185	2,8%	2,9%	8,4%	13,9%	31,2%	30,0%	30,9%	31,0%	27,9%	12,2%	7,9%	4,9%
195	2,7%	2,9%	5,5%	12,7%	30,2%	29,6%	30,9%	30,9%	30,4%	15,1%	8,0%	4,6%
205	3,4%	3,8%	4,5%	16,6%	32,6%	32,4%	33,4%	32,9%	33,3%	22,4%	9,5%	6,5%
215	3,5%	3,8%	3,7%	14,3%	20,5%	20,3%	20,7%	21,1%	21,3%	17,9%	7,8%	5,8%
225	2,9%	3,3%	2,9%	21,0%	26,6%	25,7%	26,1%	26,8%	26,5%	26,1%	9,9%	6,5%
235	2,4%	2,7%	2,4%	21,5%	23,9%	24,2%	24,3%	24,7%	24,8%	26,8%	10,4%	6,1%
245	2,9%	2,9%	2,8%	15,4%	16,9%	16,1%	16,8%	16,7%	16,8%	17,1%	9,1%	4,8%
255	3,6%	3,5%	3,8%	11,2%	11,9%	11,6%	11,8%	12,0%	11,7%	12,3%	8,5%	4,9%
265	4,3%	4,1%	5,1%	10,1%	10,8%	10,6%	10,7%	10,4%	10,7%	11,1%	9,6%	5,4%
275	5,0%	4,8%	6,6%	10,6%	11,0%	11,0%	11,2%	11,0%	11,0%	11,6%	11,2%	6,4%
285	4,8%	4,5%	7,4%	11,7%	12,4%	12,2%	12,2%	12,2%	12,0%	12,5%	12,2%	6,7%
295	9,3%	8,8%	11,3%	14,0%	15,0%	14,8%	14,9%	14,7%	14,4%	15,0%	14,6%	11,5%
305	13,8%	13,5%	14,1%	14,8%	15,8%	15,6%	15,8%	15,8%	16,0%	16,2%	15,3%	15,0%
315	16,4%	15,6%	16,2%	16,5%	17,9%	17,5%	17,7%	18,2%	18,5%	18,5%	17,0%	16,6%
325	20,7%	20,0%	21,8%	20,6%	22,6%	22,2%	22,4%	22,9%	23,5%	23,0%	19,5%	21,6%
335	21,7%	21,7%	21,7%	21,4%	22,4%	21,9%	22,3%	21,9%	22,3%	22,9%	21,9%	22,0%
345	21,2%	21,5%	20,9%	20,8%	21,4%	21,1%	21,4%	21,2%	21,0%	22,1%	21,4%	21,3%

Une représentation inhabituelle en trois dimensions a été tentée sur la figure n°3.202. Elle permet d'imaginer en *volume* l'évolution annuelle de la teneur en eau dans le sol.

Enfin le tableau n°3.202 donne la profondeur du niveau piézométrique au piézomètre PZ19 pour les dates les plus proches des dates choisies.

Schématiquement on peut déduire une évolution annuelle en trois étapes :

FIG 3.202

TUBE No 8 : EVOLUTION ANNUELLE DU PROFIL HYDRIQUE

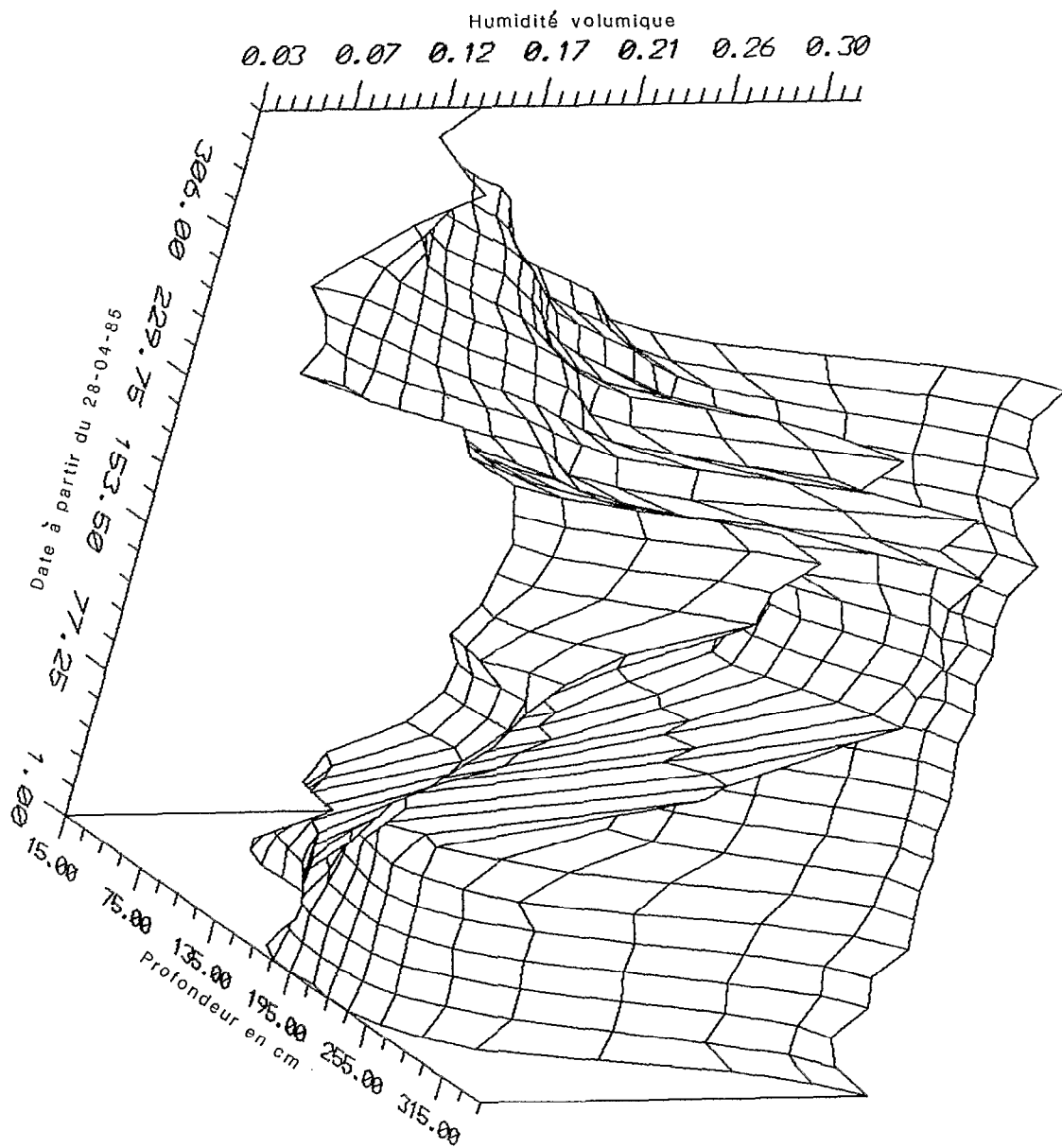


Tableau n°3.202

Piézomètre PZ19 : profondeur du niveau piézométrique en cm

Date.	28avr	10jul	20jul	5aoû	10aoû	25aoû	25sep	5nov	5déc	20jan	10mar	20avr
Prof.		371	359	199	124	71	74	179	222	253	286	332

- Première étape : du 28 avril au 22 juillet. L'humectation se fait à partir de la surface et le front d'humectation descend régulièrement. La teneur en eau maximale est voisine de 20 %. L'ensemble du profil appartient à la zone non saturée. C'est le potentiel de succion capillaire du sol qui commande l'infiltration.

- Deuxième étape : à partir du 23 juillet et jusqu'au 25 août. La nappe remonte le long du versant très rapidement et l'alimentation du profil se fait par le fond. De non-saturé, le profil se sature en moins d'un mois et le niveau piézométrique ne se trouve plus qu'à 70 cm de la surface. La teneur en eau peut dépasser 30%. Le potentiel gravitaire prend le pas sur le potentiel capillaire.

- Troisième étape : de fin septembre à avril. Le profil se vidange avec la nappe pour revenir à son état initial. Les teneurs en eau dans la zone non-saturée se stabilisent autour de 10 %.

Ce comportement est caractéristique des sols dont la texture prédominante est sableuse.

3.2.2.2. Tube neutronique n°4

Comme pour le tube précédent on trouvera pour les mêmes dates le tableau, les profils hydriques et la représentation en trois dimensions de l'évolution annuel sur ce tube.

Il n'a pas été nécessaire dans ce cas de lisser les courbes pour la représentation graphique.

Le comportement annuel est complètement différent du tube précédent et on ne distingue plus que deux phases de remplissage et de vidange. Le profil observé entre 0 et 2 mètres de profondeur n'est jamais saturé.

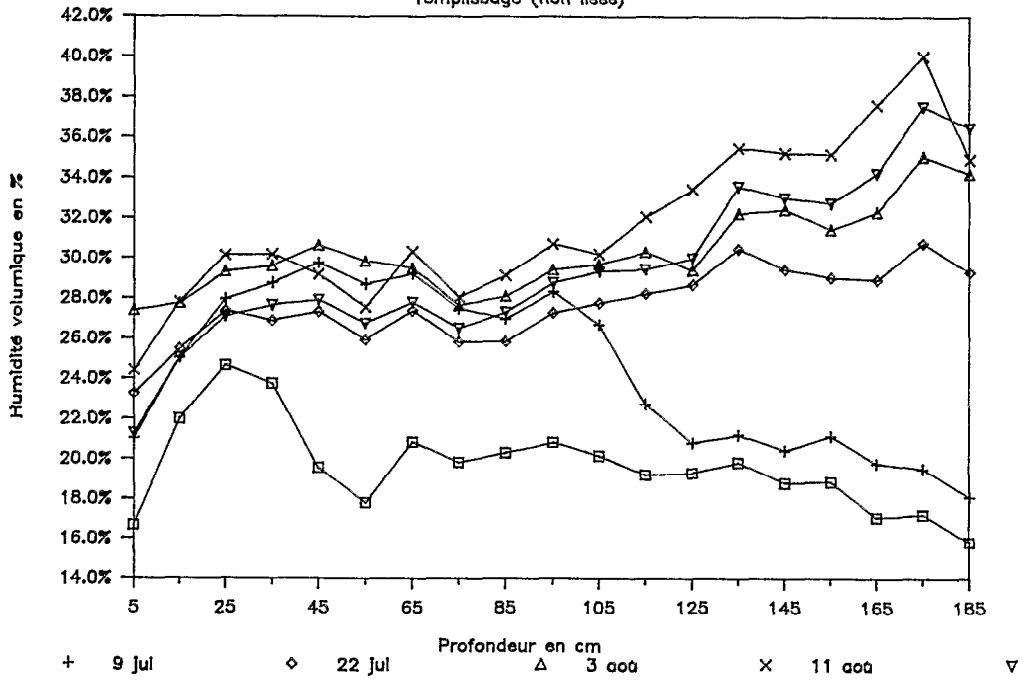
Le remplissage s'effectue à partir de la surface par une humectation gravitaire qui tend à se stabiliser vers une teneur en eau moyenne sur tout le profil qui se situe vers 30%. Dès la fin juillet on peut considérer que le stade ultime est atteint. L'assèchement commence vers la mi-septembre et se produit de façon uniforme sur toute la hauteur du profil observé.

Notons toutefois des assèchements plus rapides sur les 25 ou 30 premiers centimètres directement affectés par l'évapotranspiration.

Ce comportement correspond à une évolution classique des profils hydriques dans le sol à dominante argileuse.

FIG 3.203

Tube n°4 : Humidité volumique
remplissage (non lissé)



Tube n°4 : Humidité volumique
vidange (non lissé)

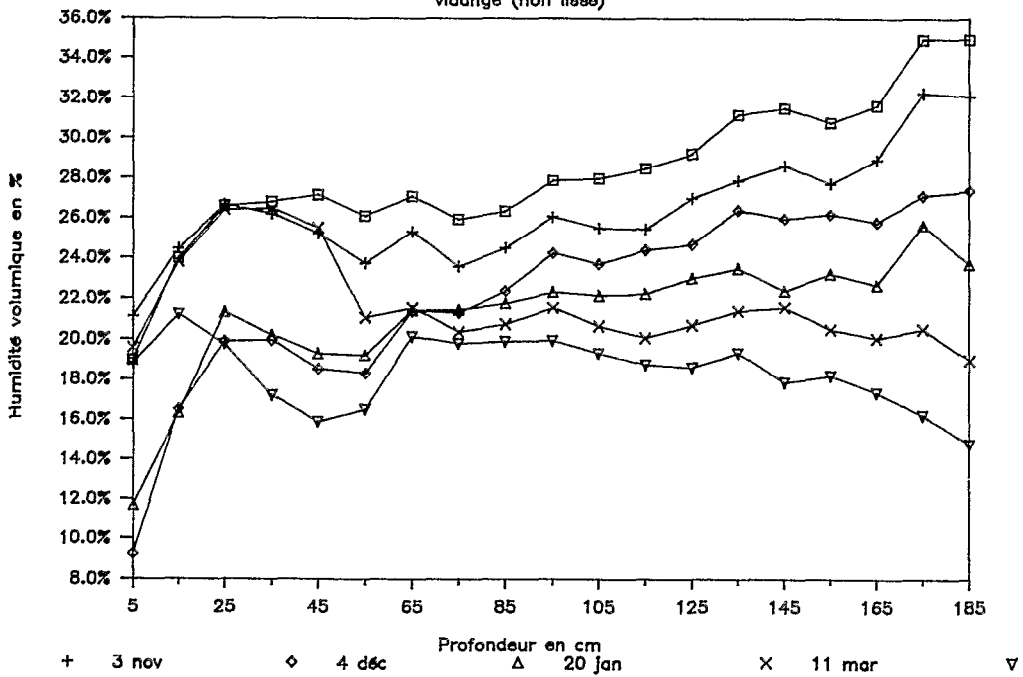


FIG. 3.204

TUBE No 4 : EVOLUTION ANNUELLE DU PROFIL HYDRIQUE

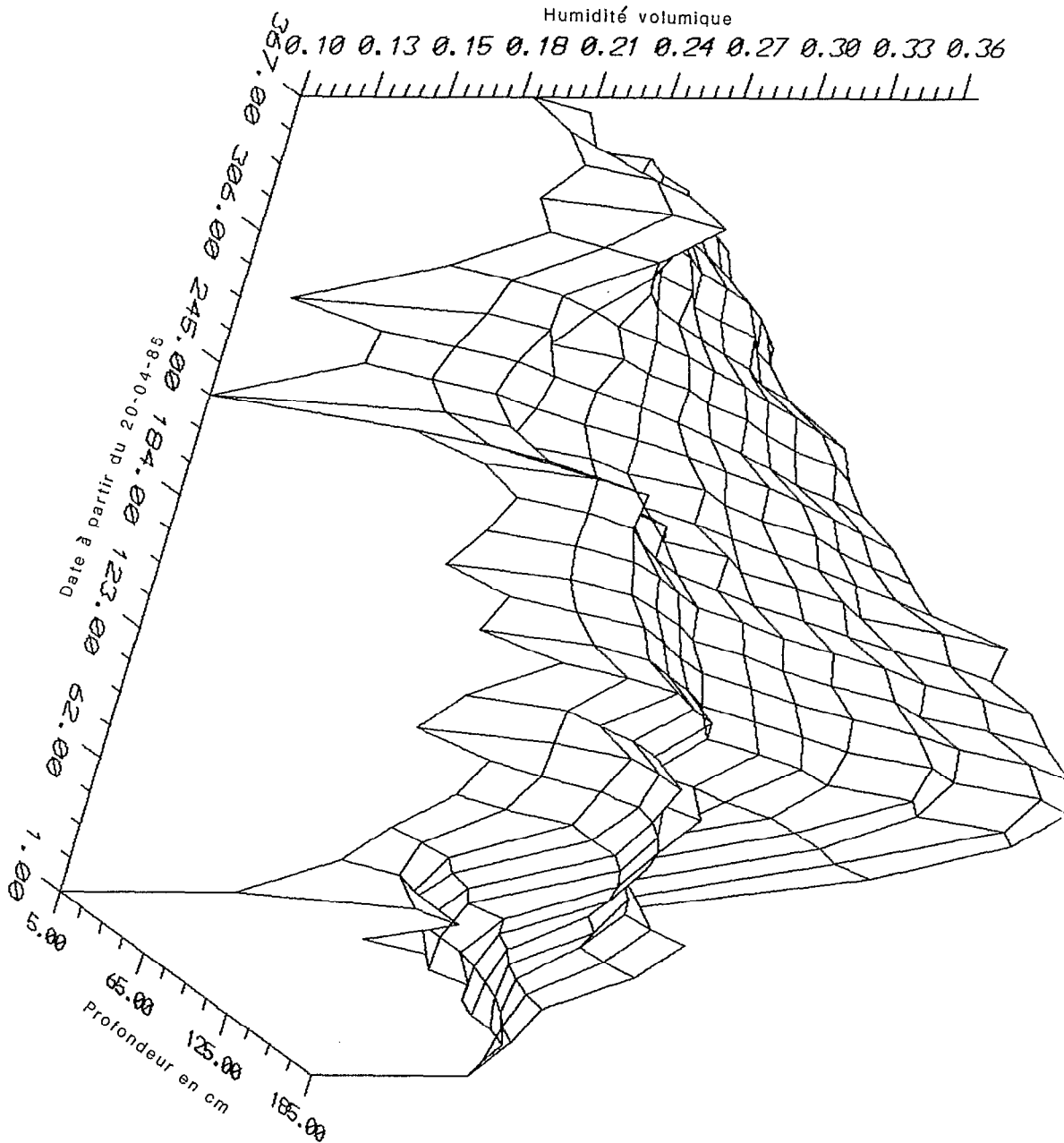


Tableau n°3.203

Tube neutronique n° 4 : Humidité volumique ou teneur en eau (en %)

Prof.	28avr	9jul	22jul	3août	11août	25août	26sep	3nov	4déc	20jan	11mar	22avr
5	16,7%	21,0%	23,3%	27,4%	24,4%	21,3%	19,0%	21,1%	9,2%	11,7%	19,6%	18,8%
15	22,0%	25,0%	25,5%	27,8%	27,8%	25,0%	24,0%	24,5%	16,5%	16,3%	23,8%	21,2%
25	24,7%	27,9%	27,4%	29,3%	30,1%	27,1%	26,6%	26,7%	19,9%	21,3%	26,4%	19,8%
35	23,7%	28,8%	26,9%	29,6%	30,2%	27,6%	26,8%	26,2%	19,9%	20,2%	26,5%	17,2%
45	19,6%	29,8%	27,3%	30,6%	29,2%	27,9%	27,1%	25,2%	18,5%	19,3%	25,5%	15,9%
55	17,8%	28,7%	25,9%	29,8%	27,6%	26,8%	26,1%	23,7%	18,3%	19,2%	21,1%	16,5%
65	20,8%	29,2%	27,4%	29,5%	30,3%	27,8%	27,1%	25,3%	21,4%	21,4%	21,5%	20,1%
75	19,8%	27,5%	25,8%	27,6%	28,1%	26,5%	25,9%	23,6%	21,3%	21,5%	20,4%	19,8%
85	20,3%	27,0%	25,9%	28,1%	29,1%	27,3%	26,3%	24,5%	22,4%	21,8%	20,7%	19,9%
95	20,8%	28,3%	27,3%	29,4%	30,7%	28,8%	27,9%	26,1%	24,3%	22,3%	21,5%	19,9%
105	20,1%	26,7%	27,8%	29,7%	30,2%	29,3%	28,0%	25,5%	23,7%	22,1%	20,6%	19,3%
115	19,2%	22,7%	28,2%	30,3%	32,1%	29,4%	28,5%	25,4%	24,4%	22,2%	20,1%	18,7%
125	19,3%	20,8%	28,7%	29,4%	33,4%	30,0%	29,2%	27,0%	24,7%	23,0%	20,7%	18,6%
135	19,8%	21,2%	30,5%	32,2%	35,5%	33,6%	31,2%	27,9%	26,4%	23,5%	21,4%	19,3%
145	18,8%	20,4%	29,4%	32,4%	35,2%	33,0%	31,5%	28,6%	26,0%	22,4%	21,6%	17,9%
155	18,8%	21,1%	29,0%	31,4%	35,2%	32,7%	30,8%	27,7%	26,2%	23,2%	20,5%	18,2%
165	17,1%	19,8%	28,9%	32,3%	37,6%	34,2%	31,7%	28,9%	25,8%	22,7%	20,1%	17,3%
175	17,2%	19,5%	30,8%	35,1%	40,0%	37,6%	34,9%	32,3%	27,1%	25,6%	20,5%	16,2%
185	15,8%	18,1%	29,3%	34,2%	34,9%	36,5%	34,9%	32,1%	27,4%	23,7%	19,0%	14,8%

3.2.3. Stocks hydriques et bilan hydrologique

En admettant que le choix de ces deux tubes pour représenter l'évolution des profils hydriques dans le domaine amont toujours non saturé et dans le domaine aval directement influencé par la nappe, est bon, il est intéressant de suivre la variation du stock hydrique dans ces profils, toujours sur la même période test d'avril 1985 à avril 1986.

Les figures n°3.205 et n°3.206 représentent cette variation de stock en fonction du temps. Elle est calculée comme étant la différence entre la teneur en eau initiale et la teneur en eau de la date choisie, toutes deux intégrées sur toute la hauteur du profil connu.

Le calcul pratique a été effectué sur environ 25 profils mesurés et bien répartis dans le temps. Les valeurs initiales sont :

- Tube n°4, le 20 avril 1985, stock initial = 355 mm
- Tube n°8, le 28 avril 1985, stock initial = 328 mm

Ces valeurs initiales n'ont évidemment pas la même signification puisque le tube n°8 atteint la nappe et boucle le bilan, ce qui n'est pas le cas du tube n°4. Elles ne sont pas comparables entre elles, mais servent de conditions initiales pour l'évaluation des variations de stock.

Sur les mêmes graphiques on a représenté les hauteurs de précipitations cumulées aux pluviographes P11 pour le tube 4 et P12 pour le tube 8 (ce sont les postes les plus proches des tubes).

FIG 3.305

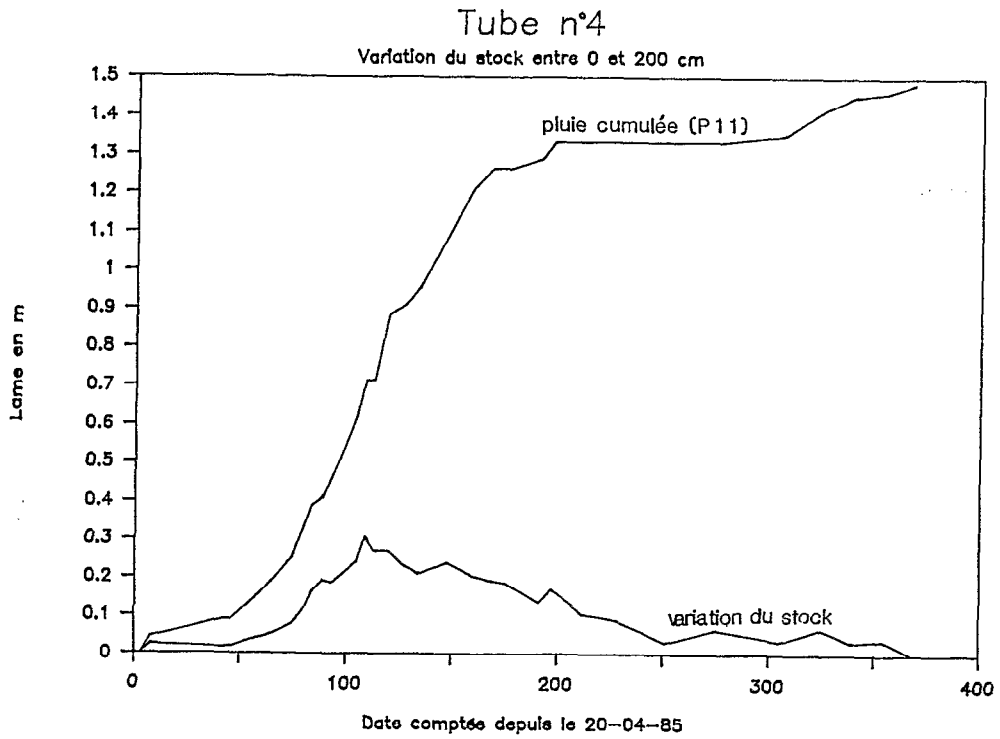
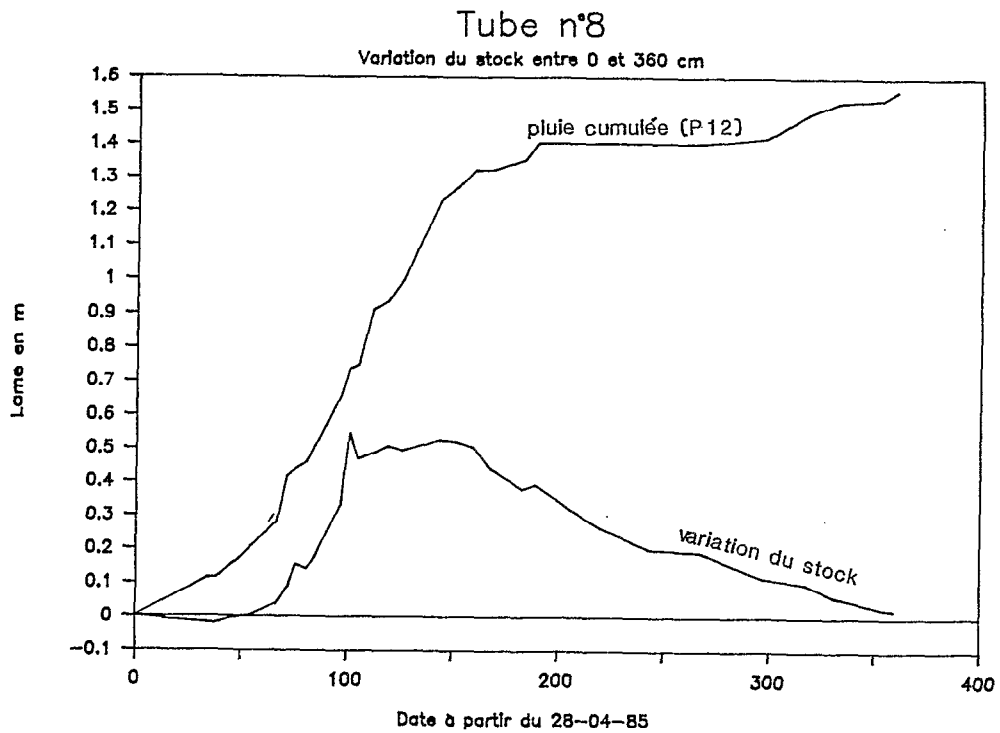


FIG 3.306



L'allure de la courbe de variation de stock est identique pour les deux profils. D'abord le stock reste constant jusqu'à la mi-juin, puis on observe une croissance régulière présentant un déficit quasi constant avec la courbe de pluie cumulée. Cette croissance s'arrête net à la fin du mois de juillet et l'on observe un palier (stable pour le tube 8, légèrement décroissant pour le tube 4) d'environ deux mois jusqu'à fin septembre. Le cumul pluviométrique continue de croître avec sensiblement la même pente pendant toute cette période et il croît toujours, alors que le stock a nettement commencé à diminuer jusqu'à mi-novembre. Le stock continue de décroître pour retrouver son niveau minimum en avril.

L'amplitude maximale atteint 300 mm en valeur relative, 650 mm en valeur absolue sur le tube n°4 ; elle atteint 500 mm en valeur relative, 830 mm en valeur absolue sur le tube n°8. Cette différence s'explique aisément : d'une part sur le tube n°4 la profondeur où l'on peut considérer le régime comme permanent n'est pas atteinte par les mesures ; d'autre part la nature des sols est différente et le mode de stockage de l'eau n'est pas le même saisonnièrement.

Ces observations appellent quelques commentaires :

- Il apparaît que dans les deux cas un régime maximal est atteint fin juillet/début août. Ce régime pourrait correspondre à la capacité maximale de rétention en eau du sol que l'on peut situer dans une fourchette moyenne de 600 à 900 mm. Des fluctuations sur les horizons superficiels sont naturellement imputables à l'évapotranspiration. On note que ces valeurs sont élevées par rapport à celles que l'on trouve habituellement dans la littérature.

- Ce régime maximal est atteint dès la fin du mois de juillet, alors que le cumul pluviométrique ne cesse de croître. Si l'on adopte l'hypothèse très simplifiée d'une intensité minimale d'infiltration infinie, cela signifie en terme de bilan que l'équilibre entre la pluie d'une part, l'évapotranspiration et l'infiltration d'autre part est rompu et que le système *fuit*. Ces fuites se produisent sous forme d'interception (et de reprise évaporatoire) d'écoulement rapide de crue ou d'écoulement de base.

- Dans le cas du tube n°8, on note que la pente de la courbe de variation du stock est supérieure à la pente de la courbe de la pluie cumulée fin juillet/début août. Cela signifie que la variation du stock n'est pas uniquement dû à l'apport ponctuel ; les autres apports viennent, soit d'une alimentation rapide de la nappe à un autre endroit et à une circulation latérale, soit d'apports ponctuels fournis par la réinfiltration d'un écoulement de surface.

3.3. TRAÇAGE DES ECOULEMENTS

Ce chapitre est rédigé à partir d'une expérimentation conçue en commun avec Olivier Planchon à la fin de la dernière campagne de mesure, sur des hypothèses suggérées par les résultats accumulés. Ces mesures ont été mises en place rapidement et sans réflexion approfondie sur les principes de la mesure ou sur son mode opératoire.

3.3.1. Objectif

Pour mieux se rendre compte qualitativement de la genèse des crues dans les ravines et à l'exutoire du bassin versant, il a paru intéressant de suivre quelques crues naturelles en utilisant un traceur. En effet, si l'origine de l'eau écoulée à l'exutoire lors des crues pouvait être déterminée de façon précise, l'explication du fonctionnement du bassin versant serait grandement facilitée (chapitre 1.2).

Trois injections ont pu être réalisées et observées par Planchon lors de crues du mois d'août 1987.

Le traceur utilisé est de la Rhodamine WT. C'est un colorant rouge foncé employé ici sous sa forme liquide à la concentration maximale. Ce produit n'a pas d'influence notable sur l'environnement et il n'est réduit chimiquement par le milieu naturel que très lentement.

Le suivi a été essentiellement visuel. Aucune mesure quantitative n'a été faite lors de ces injections.

3.3.2. Expériences

Les trois injections ont été réalisées lors des crues des 18, 25 et 27 septembre 1987. Le tableau 3.301 donne les principales caractéristiques de ces crues aux stations principale et amont.

Les descriptions des injections extraites du carnet de notes de Planchon (comm. pers., 1988) sont reproduites ci-dessous.

3.3.2.1. 1ère injection, le 18 septembre 1987

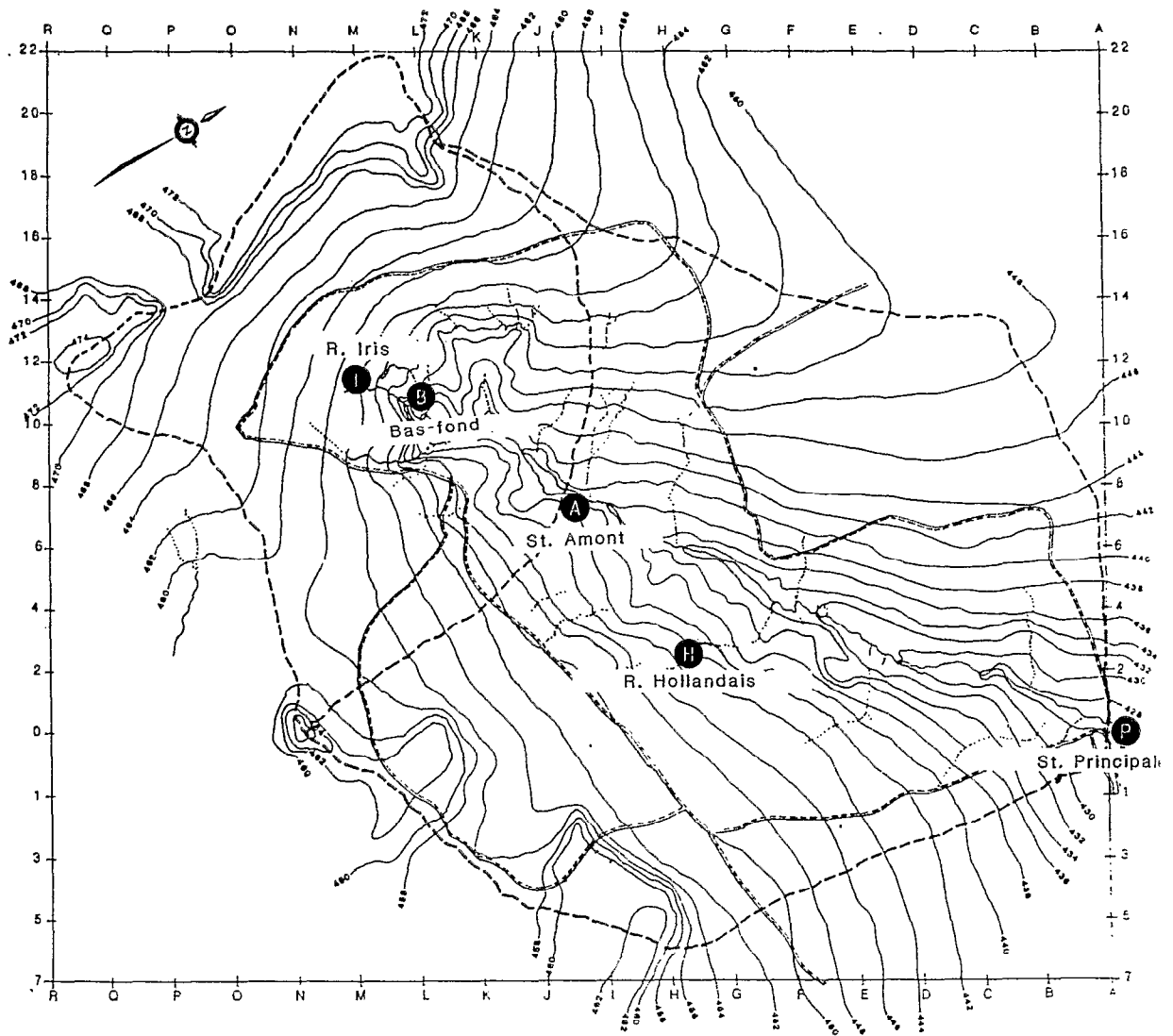
Injection à 20h10 dans le seuil de la ravine des Hollandais (figure n° 3.301, point H), une minute environ après la pointe de crue. Le nuage coloré arrive franchement et bien concentré à l'exutoire principal (point P) 1h25 après l'injection, le maximum de concentration en colorant passe 2 minutes plus tard (confirmé par l'analyse des prélèvements au laboratoire) et la coloration disparaît complètement après 30 minutes.

3.3.2.2. 2ème injection, le 25 septembre 1987

Injection à 4h12 dans la ravine Iris (point I), environ une minute après la pointe de crue (un bon litre de Rhodamine concentrée).

Des prélèvements sont effectués à la station amont (point A) (entre 16 et 80 minutes après l'injection) et à la station principale (entre 90 et 150 minutes après l'injection).

FIG. 3.301



TRAÇAGE DES ECOULEMENTS : POINTS D'INJECTION ET DE CONTRÔLE

Tableau 3.301

Caractéristiques des averses et des crues tracées.

Date	1ère inj. 18-09-87	2ème inj. 25-09-87	3ème inj. 27-09-87
<i>Averse</i>			
Pluie moyenne (mm)	31,9	17,1	42,4
Durée moyenne averse (min)	150	46	276
Intensité max en 1 min (mm/h)	110,8	108,2	109,5
5 min	70,7	83,6	92,8
15 min	54,4	51,5	77,9
Indice précip. ant. (mm)	10,2	6,2	10,8
<i>Station principale</i>			
N° crue	8718	8720	8721
Heure début crue	19:58	03:46	21:31
Débit de base (l/s)	6,92	7,31	9,11
Débit maximal (l/s)	217,0	69,8	1050,0
Temps de montée (min.)	92	106	85
Temps de base (min.)	305	1390	189
Lame écoulée (mm)	1,38	2,05	3,10
Lame ruisselée (mm)	0,95	1,28	2,60
Coeff. ruissellement	3,0%	7,5%	6,1%
<i>Station amont</i>			
N° crue	8708	8709	8711
Heure début crue	19:51	03:55	21:26
Débit de base (l/s)	5,63	5,63	5,63
Débit maximal (l/s)	91,40	42,00	968,00
Temps de montée (min.)	28	23	42
Temps de base (min.)	435	197	107
Lame écoulée (mm)	1,83	0,55	5,37
Lame ruisselée (mm)	1,31	0,32	4,76
Coeff. ruissellement	3,4%	1,9%	11,2%

Rien n'est observé aux deux stations. L'observation des échantillons donne une légère coloration rouge à la station amont 49 minutes après l'injection. On ne note rien à la station principale.

3.3.2.3. 3ème injection, le 27 septembre 1987

21h45 :

- t = 0 ; injection d'un litre de rhodamine dans le bas-fond à l'aval de la ravine Iris. Il n'y a à cet endroit plus d'incision ravinatoire (point B) ;
- t = 10 min. ; le nuage s'est déplacé d'au plus 20 mètres, traversant un taillis très touffu. Le débit est faible. La nappe d'eau commence à s'élargir. Le marigot n'est pas loin et se présente sous forme d'un affleurement de la nappe progressif et linéaire. L'écoulement est faible et n'est constitué que d'eau de la nappe.

- t= 20 min. ; le nuage arrive au marigot. Il est très dilué, se distingue mal. Je le "recharge" avec un nouveau 1/2 litre de Rhodamine et laisse le bidon sur place comme repère pour atteindre rapidement la station amont. Là, le bas-fond est complètement inondé, avec de l'eau entre le genou et la mi-mollet.

- t= 35 min. ; suspicion de nuage rouge à la station amont, mais rien de net. La traîne du nuage serait alors très longue.

3.3.3. Commentaires

Une représentation générale de ces trois injections est tentée sur les figures 3.302 à 3.304. Elles présentent d'une part le hyétogramme des averses aux pluviographes P51 et P52 et d'autre part les hydrogrammes superposés des crues aux stations principales et amont, à la ravine Iris et à la ravine des Hollandais. Aucun écoulement notable n'a eu lieu pour ces trois événements à la ravine des Amoureux.

Il faut noter que l'indice des précipitations antérieures est dans les trois cas assez moyen et du même ordre de grandeur et que les injections ont lieu dans une période bien concentrée de la deuxième moitié de la saison des pluies. Cela permet de supposer que l'état d'humectation des sols n'est pas très différent pour les trois événements.

De même les intensités maximales enregistrées pour les averses sont sensiblement comparables, peut être un peu plus appuyées dans le dernier cas. Pour les trois crues on ne note pas de déséquilibre important de la répartition spatiale de l'averse en comparant les hyétogrammes de P51 et de P52.

Et, malgré toutes ces similitudes, il semblerait que l'on observe trois phénomènes différents. En réalité il est plus probable que l'on réalise trois observations différentes. En effet les trois injections ont été réalisées à chaque fois en autre endroit. La chance a voulu que les autres paramètres restent comparables (excepté les hauteurs d'averses et donc les volumes de crues). Il faut donc bâtir notre interprétation à partir de ces points d'injection.

3.3.3.1. Crue du 18 septembre 1987

L'injection est réalisée au sommet de la crue dans la ravine des Hollandais et le nuage semble passer sans dégradation notable au sommet de la crue à la station amont.

On peut donc admettre que l'eau qui a été tracée a eu un cheminement rigoureusement superficiel, d'abord dans la ravine ensuite dans le cours d'eau principal.

3.3.3.2. Crue du 25 septembre 1987

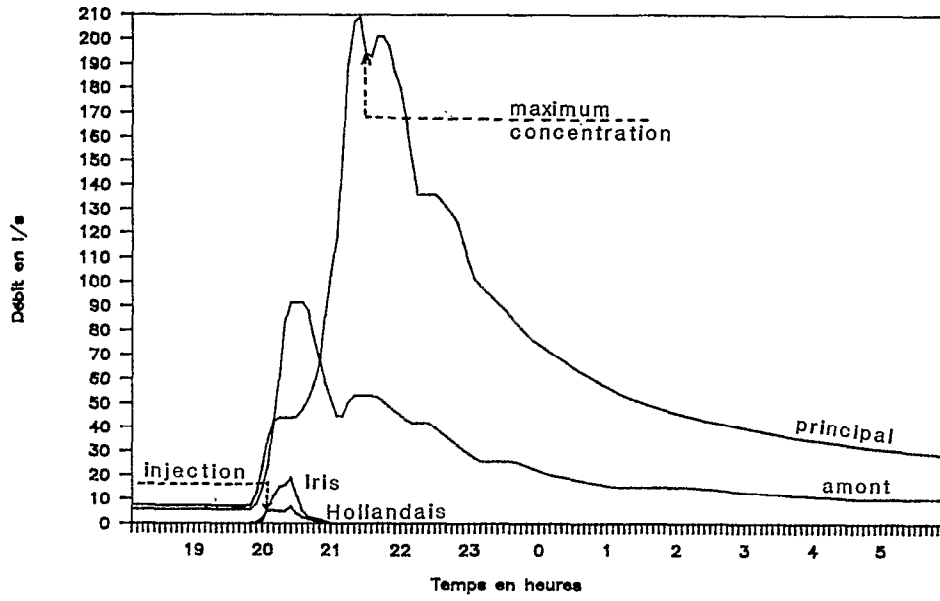
La durée de l'averse est plus courte. Mais l'intensité est forte et le ruissellement bien enregistré aux quatre stations.

L'injection est réalisée tout à l'amont dans la ravine Iris au maximum de la crue. Un soupçon de colorant semble passer à la station amont alors que la décrue est nettement amorcée. Rien n'est observé à la station principale.

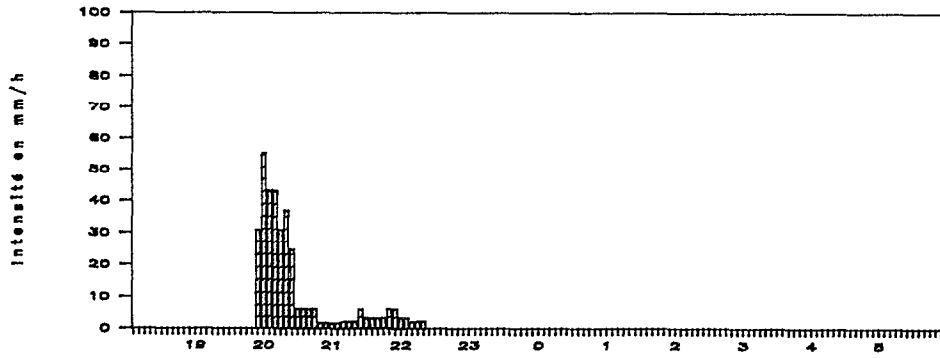
Nous formulons donc l'hypothèse d'une infiltration quasi complète de l'eau tracée dans la ravine, les débits mis en jeu étant trop faibles pour saturer le lit de la ravine. Cette hypothèse est confirmée par les observations sur les pièges et les échelles à maximum installées par Planchon (1988) dans la ravine elle-même. Entre la station de contrôle (point d'injection) et le confluent avec le cours d'eau principal le débit ne fait que diminuer.

FIG 3.302

Crue du 18 septembre 1987



Pluviographe Oedipe P51



Pluviographe Oedipe P52

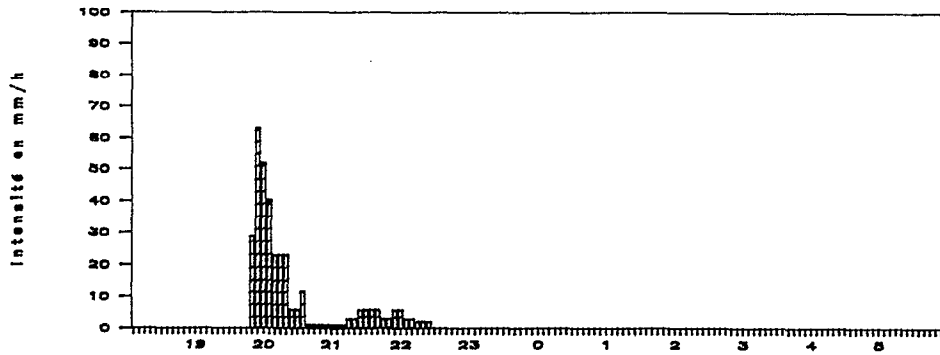
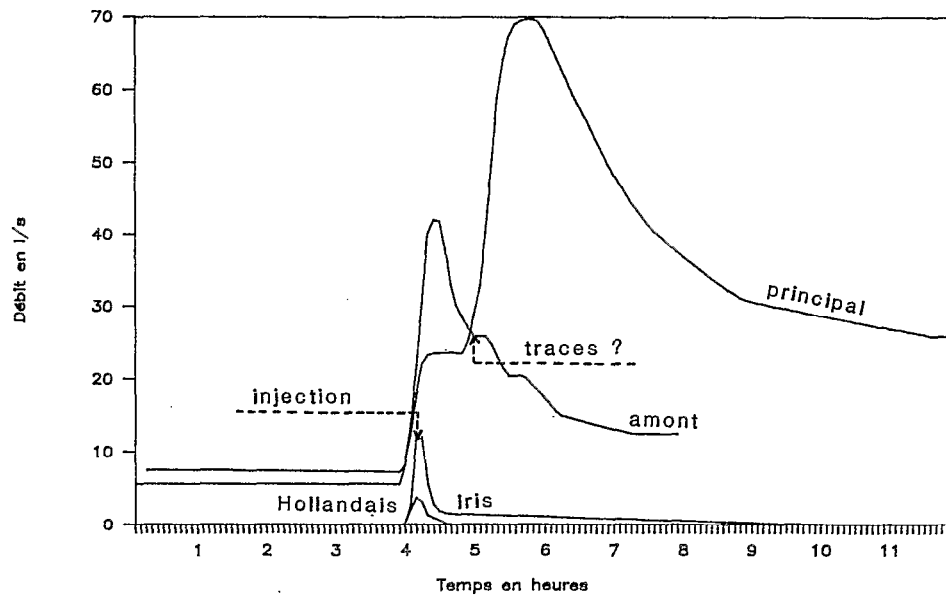
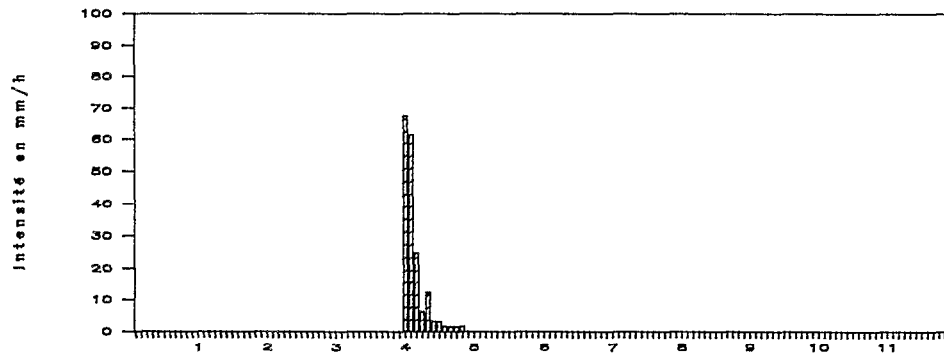


FIG 3.303

Crue du 25 septembre 1987



Pluviographe Oedipe P51



Pluviographe Oedipe P52

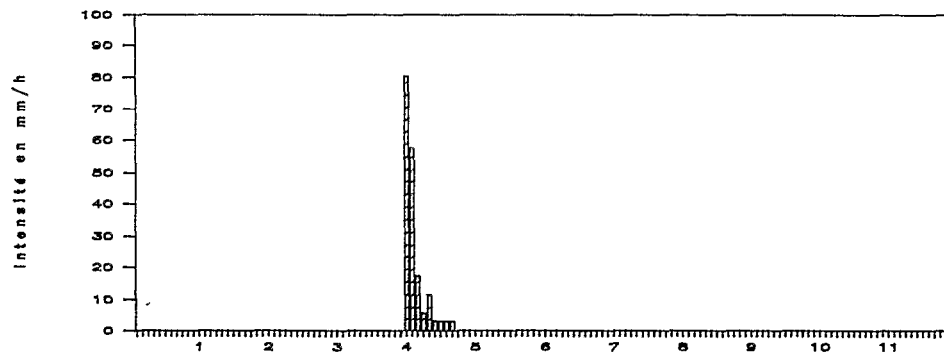
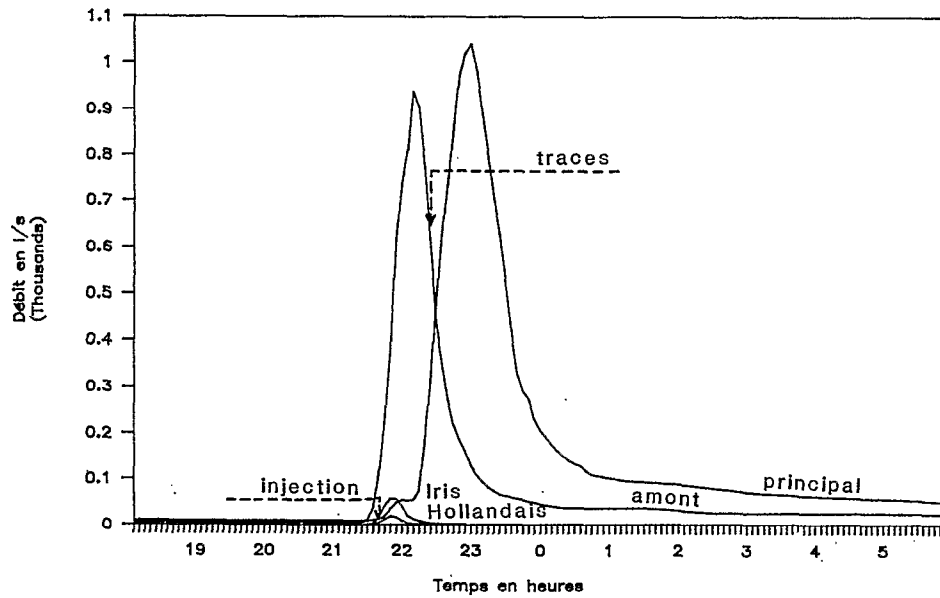
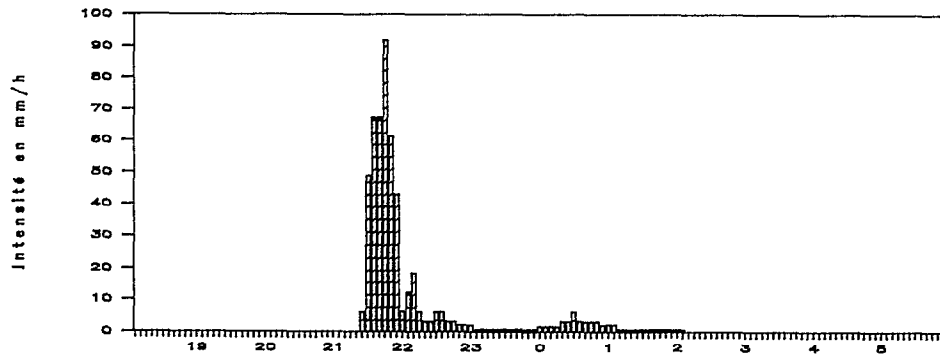


FIG 3.304

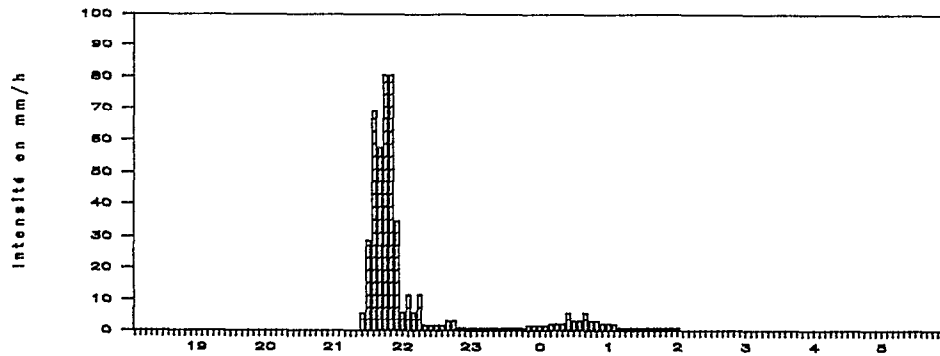
Crue du 27 septembre 1987



Pluviographe Oedipe P51



Pluviographe Oedipe P52



3.3.3.3. Crue du 27 septembre 1987

L'injection est faite directement dans le bas-fond à un endroit où l'incision ravinatoire n'existe plus et où aucun drain privilégié n'est soupçonnable en surface. C'est exactement le lieu des *bandes d'arrêt* décrites dans le paragraphe concernant les états de surface du chapitre de description de la pédologie.

A l'instant où l'injection est faite, la crue est en train de passer dans la ravine et la phase montante est en cours à la station amont. L'observateur ne note pourtant pas de vitesse d'écoulement importante. En se rapprochant de la station amont, il observe cependant un débordement de plus en plus important. Lorsque des traces de colorants parviennent à la station amont, la décrue est déjà bien entamée.

Il est donc probable que le bas-fond a presque totalement infiltré l'eau marquée ; cette eau ne semble pas réapparaître à la station amont pourtant assez peu éloignée. Notons que l'observateur inscrit sur son carnet que l'eau de débordement qui passe à la station amont (et qui - on peut le supposer - constitue la crue) proviendrait de la nappe.

3.3.4. Conclusion

Il est peut être un peu présomptueux de vouloir déduire des conclusions définitives ces trois expériences.

En effet elles ne répondent pas vraiment aux objectifs qui les ont suscitées. Les injections ont été réalisées pour les deux premières dans des drains où l'écoulement était déjà bien concentré, et pour la dernière dans le bas-fond à proximité immédiate du cours d'eau principal.

Si l'opération était à refaire en disposant de plus de temps et d'une meilleure préparation, il serait plus démonstratif de faire une injection répartie sur une ligne de niveau par exemple en haut de versant et surtout d'effectuer de nombreuses répétitions. L'expérimentation décrite par Thébé (1987) sur le petit bassin de Mouda dans le Nord Cameroun nous paraît une excellente réalisation de ce type.

Cependant l'observation continue des ravines et des drains de premier ordre sur le bassin pendant deux saisons des pluies complètes par Planchon, l'amène à considérer que le comportement de ces ravines et drains de versant est identique au comportement général du versant (1988).

Par voie de conséquence il paraît possible d'extraire des tendances intéressantes :

- L'eau qui passe au débit maximum au cours d'une crue moyennement importante en volume dans un collecteur de versant se retrouve, au maximum de la crue, à l'exutoire du bassin versant. Ce comportement *normal* correspond à une hypothèse *hortonienne* de fonctionnement.
- Si la crue est plus faible sur la partie amont du bassin, le débit est susceptible de s'infiltrer totalement, soit dans le drain, soit dans le bas-fond. L'écoulement rapide de crue, peu important, provient alors probablement d'un effet *piston*, puisqu'il n'y a pas de débordement notoire de la zone saturée dans le bas-fond.
- Enfin dans une situation équivalente mais avec une averse beaucoup plus importante en volume, on assiste à un débordement de la nappe dans le bas-fond et l'écoulement rapide de crue peut être constitué d'une combinaison des trois éléments : ruissellement *hortonien*, effet *piston* et ruissellement direct sur la zone de d'affleurement de la zone saturée.

QUATRIEME PARTIE :
INTERPRETATION

4.1. BILAN HYDROLOGIQUE

Avant d'entrer dans le détail de l'interprétation d'une foule de résultats et d'observations, il est important de dresser un bilan des différents termes du cycle hydrologique que Roche (1986) définit comme le *décompte des entrées et des sorties d'un système d'eau dans un intervalle de temps donné* et de faire le point sur des notions simples.

Le choix du pas de temps est très important ; mais pour diverses raisons pratiques, il ne peut être aussi précis que souhaitable. D'abord il faut s'intéresser au cycle saisonnier complet et le pas de temps sera annuel ; ensuite l'analyse essaie d'être un peu plus détaillée avec un pas de temps mensuel.

Dans ce chapitre comme dans toute cette partie, il sera constamment fait référence aux résultats obtenus sur les bassins versants de Korhogo (Camus et al., 1976) et de Sakassou Est et Ouest (Lafforgue, 1982). Ces bassins se trouvent en effet dans la même grande région et comportent un certain nombre de similitudes avec le bassin de Booro-Borotou. Nous renvoyons aux synthèses réalisées sur ces bassins pour leur description et leurs principales caractéristiques. Rappelons seulement que ces trois bassins sont installés sur des substratum granitiques et que leurs superficies sont respectivement 3,63, 0,553 et 0,631 km .

4.1.1. Bilan annuel

L'évaluation des termes du bilan hydrologique se doit d'être faite en années hydrologiques. D'après Roche (1986) :

L'année hydrologique correspond au cycle annuel de variation des débits ; elle est 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.

Roche ajoute :

Le concept d'année hydrologique est indispensable quand on veut évaluer le bilan hydrologique annuel d'un bassin, car il permet de minimiser, jusqu'à parfois la rendre négligeable, la partie du bilan concernant la variation des réserves (difficile ou impossible à estimer).

Cette période pour la région de Booro-Borotou est difficile à définir au sens de Roche. On a vu en effet dans la partie 2 que les réserves souterraines sont minimales vers la fin du mois de juin. Cependant la saison des pluies a déjà commencé depuis trois mois et le cycle végétatif est déjà bien amorcé. Il paraît donc logique de faire débiter l'année hydrologique au début du mois d'avril, avec les premières pluies régulières qu'il serait absurde d'affecter au cycle précédent. On peut noter qu'à ce moment, si les niveaux piézométriques ne sont pas au plus bas, les débits de base sont soit annulés, soit sur le point de l'être (année 1986). L'année hydrologique à Booro-Borotou commence donc le 1er avril et se termine le 31 mars.

Une partie des tableaux synthétiques de la partie 2 sont déjà présentés en années hydrologiques. Le tableau n°4.101 récapitule les résultats concernant les principaux termes du bilan hydrique déjà donnés et éparés dans la partie 2 :

Tableau n°4.101

Bilan hydrologique annuel sur le bassin versant de Booro-Borotou (en mm)

Années	Précipitation	Ecoulement	Ruissellement	ETP Penman	Déficit écoulement
1984-85	1161	59	10	1620	1102
1985-86	1528	205	33	1602	1323
1986-87	1073	31	6	1604	1042
1987-88	1244	86	26	1590	1158

Le tableau n°4.102 présente les mêmes résultats sur les bassins de Korhogo et de Sakassou Est et Ouest pour une même année hydrologique.

Tableau n°4.102

Bilan hydrologique annuel sur les bassins versants de Korhogo et de Sakassou (en mm)

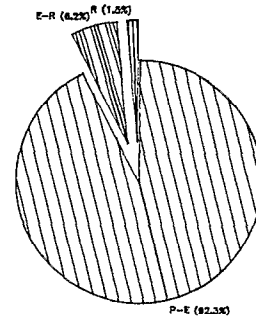
Années	Précipitation	Ecoulement	Ruissellement	ETP Penman	Déficit écoulement
Korhogo					
1962-63	1481	508	88		973
1963-64	1463	556	81		907
1964-65	1625	674	85		951
1965-66	1252	561	53		691
1966-67	1616	584	150		1032
1967-68	1385	520	65		865
1968-69	1026	315	18		711
1969-70	1561	712	108		849
1970-71	1270	433	37		837
1971-72	1138	399	50		739
Sakassou-Est					
1972-73	1073	148	53		925
1973-74	1279	121	41		1158
1974-75	1161	133	35		1028
1975-76	1331	281	115		1050
Sakassou-Ouest					
1972-73	1100	59	21		1041
1973-74	1235	29	15		1206
1974-75	1242	60	25		1182
1975-76	1316	96	41		1220

Notons que l'évapotranspiration potentielle n'est pas donnée dans les synthèses pour les bassins versants de Korhogo et de Sakassou.

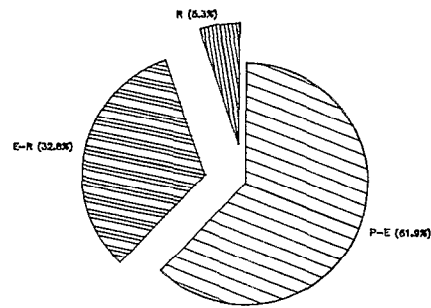
La figure n°4.101 présente sous forme de *camembert* le bilan hydrique sur ces quatre bassins pour la période d'étude. Le *camembert* complet représente l'apport pluviométrique (P). On y a découpé deux parts qui constituent ensemble le volume écoulé (E), l'une représentant le volume des crues (R), l'autre l'écoulement de base(E-R).

FIG. 4.101

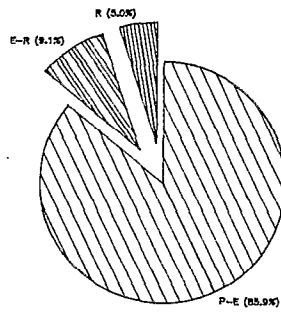
Bilan hydrologique à Booro-Borotou



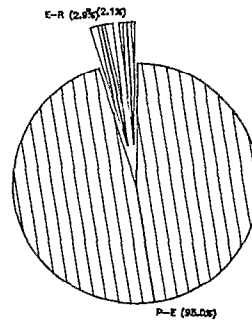
Bilan hydrologique à Korhogo



Bilan hydrologique à Sakassou-Est



Bilan hydrologique à Sakassou-Ouest



A Booro-Borotou ce bilan fait apparaître clairement la faible part de l'écoulement au regard des apports par précipitation et la part encore plus faible des écoulements rapides de crue. Si l'on assimile en moyenne le déficit d'écoulement (ce qui revient à adopter l'hypothèse que le système hydrologique étudié ne fuit pas) à l'évapotranspiration réelle, on constate un déficit évapotranspiratoire d'environ 400 mm par an.

A Sakassou (surtout pour le bassin versant Ouest), le bilan est assez semblable, tandis qu'à Korhogo, la part de l'écoulement de base et de l'écoulement de crue est beaucoup plus importante.

Malgré le faible échantillon disponible à Booro-Borotou, une régression linéaire a été tentée entre la pluviométrie annuelle (P) et, d'une part, l'écoulement annuel (E), d'autre part, l'écoulement de crue cumulé annuel (R) (figure n°4.102). Cela donne (en mm) :

$$E = 0,387 P - 390 \text{ avec } r^2 = 0,996$$

et

$$R = 0,0597 P - 55,9 \text{ avec } r^2 = 0,838$$

On voit que le résultat semble bon. Pour confirmer ce type de relation, nous avons tenté la même opération sur les dix années d'observation de Korhogo avec un succès moindre, mais néanmoins comparable (figure n°4.103) :

$$E = 0,517 P - 188 \text{ avec } r^2 = 0,768$$

et

$$R = 0,162 P - 150 \text{ avec } r^2 = 0,767$$

4.1.2. Bilan hydrologique mensuel

Toutes les valeurs mensuelles du bilan hydrologique sont données en mm dans le tableau n°4.103 pour les quatre années d'observation à Booro-Borotou, où :

P, pluie moyenne sur le bassin versant ;

ETP, évapotranspiration calculée par la formule de Penman ;

E, écoulement total à l'exutoire ;

R, écoulements de crues cumulés.

4.1.2.1. Pluviométrie - Evapotranspiration potentielle

L'analyse en données mensuelles permet de bien comprendre les évolutions saisonnières. Sur le diagramme de la figure n°4.104, on a cherché à représenter de façon conjointe les évolutions saisonnières de l'évapotranspiration potentielle et de la pluviométrie. On y vérifie que l'évapotranspiration potentielle est relativement stable pendant les mois de pluies abondantes (juin à octobre) et qu'au contraire, elle est remarquablement variable pendant les mois de saison sèche (décembre à mars). Cela suit de très près le cycle végétatif dont l'évolution est parallèle à ce schéma : régulière en période humide, éminemment variable en période sèche (assèchement, feu, redéveloppement).

FIG 4.102

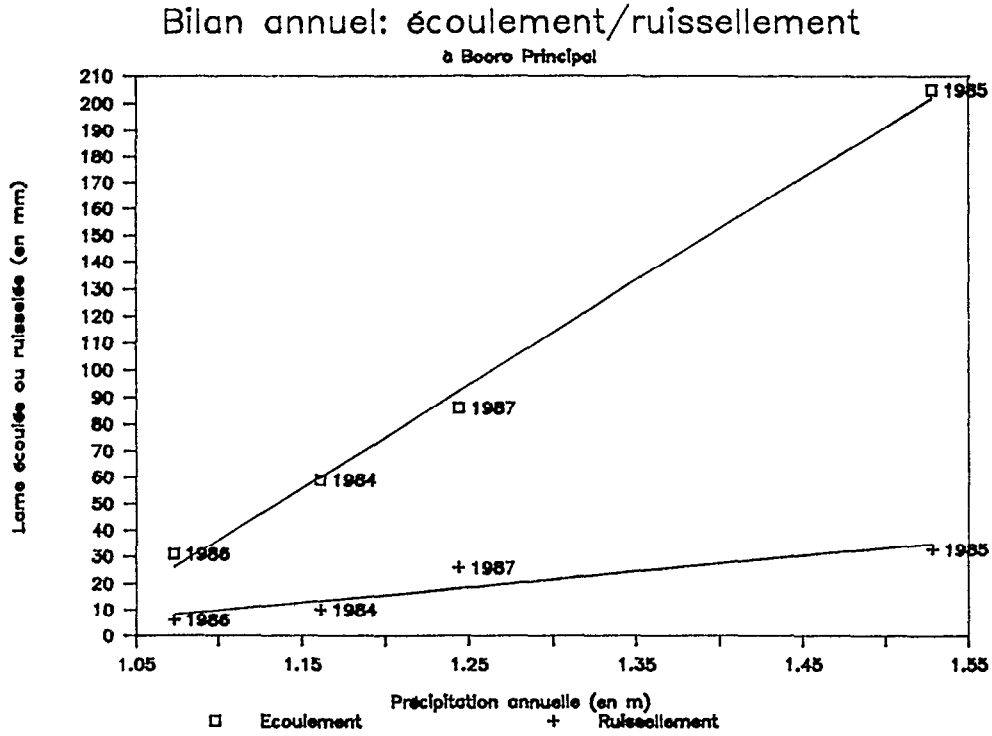


FIG 4.103

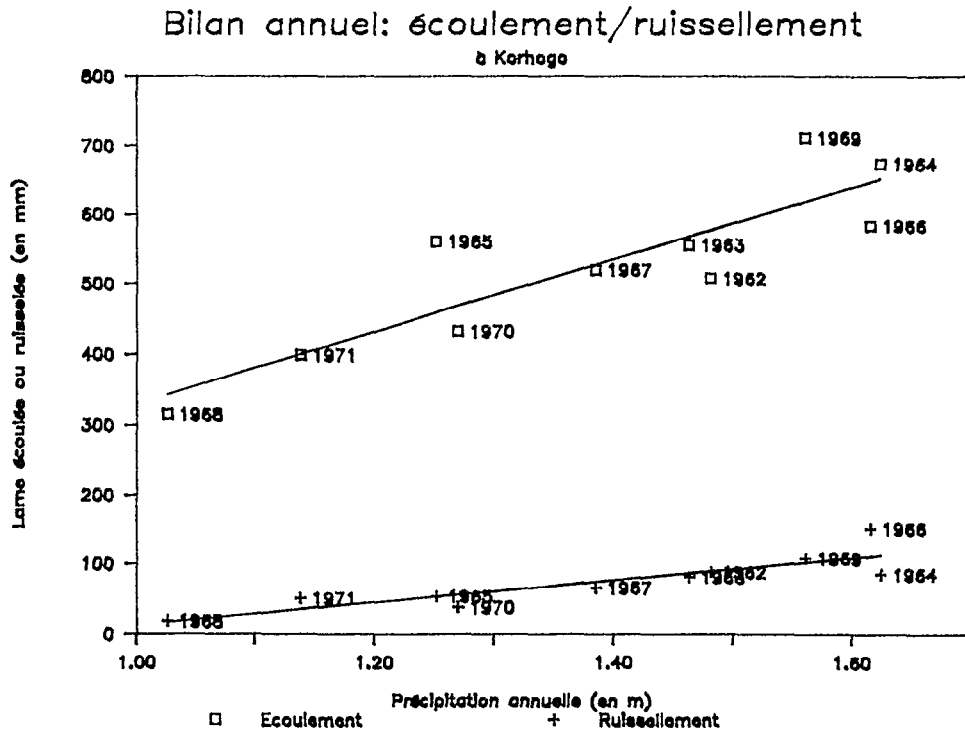


FIG 4.104

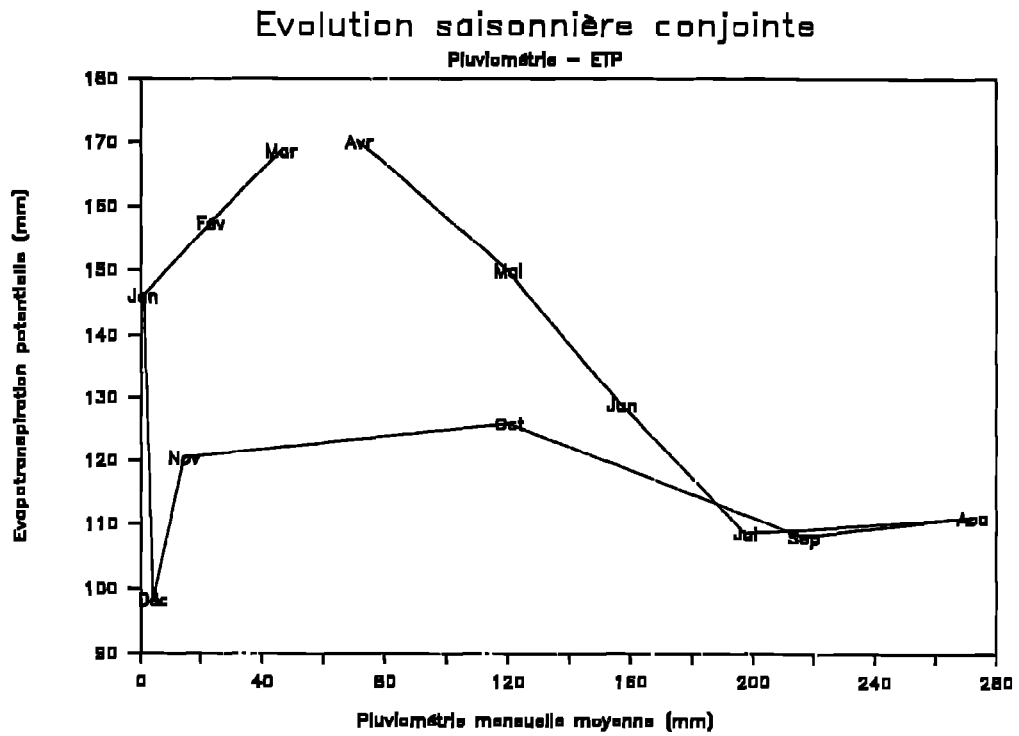


FIG 4.105

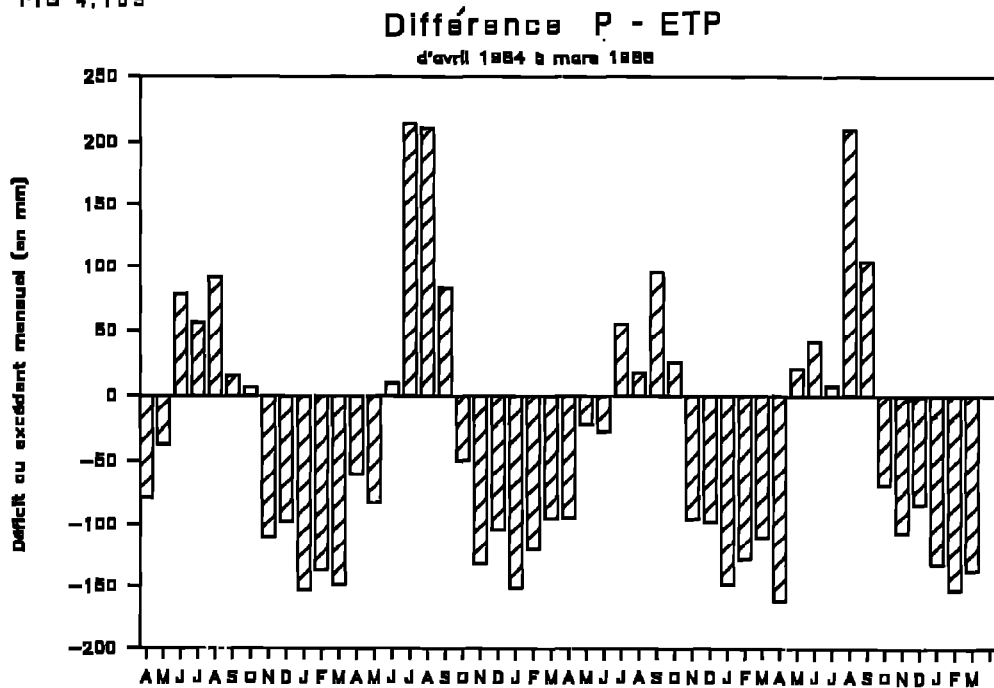


Tableau n°4.103

Récapitulatif des valeurs mensuelles des termes du bilan hydrologique à Booro-Borotou.

	Avr	Mai	Jun	Jul	Aoû	Sep	Oct	Nov	Déc	Jan	Fév	Mar
1984-85												
P	96,4	113,0	218,1	165,8	225,5	151,7	147,5	14,2	0,0	1,7	11,0	16,5
ETP	175,5	149,6	133,0	104,4	124,6	115,3	129,3	121,7	96,5	154,2	147,8	165,1
E	0,1	0,7	6,2	5,2	9,5	21,3	11,9	2,8	1,0	0,4	0,0	0,0
R	0,0	0,0	2,0	0,5	1,1	4,1	1,8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1985-86												
P	101,7	67,6	131,7	331,8	398,5	265,5	107,7	2,2	0,0	0,0	46,4	74,4
ETP	161,6	150,4	121,5	103,8	107,8	111,7	130,1	126,1	101,2	149,6	165,7	168,3
E	0,0	0,0	0,1	13,5	80,1	70,3	27,0	8,2	2,9	1,3	0,8	1,2
R	0,0	0,0	0,0	3,4	19,6	7,6	2,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1986-87												
P	66,0	128,0	112,8	157,1	129,1	207,3	152,3	24,8	0,0	1,1	35,4	58,7
ETP	159,3	148,4	137,8	99,8	108,7	103,5	120,7	115,4	97,0	149,0	163,6	169,3
E	1,3	1,9	2,8	1,9	2,9	8,0	5,8	4,6	1,0	0,4	0,0	0,0
R	0,0	0,0	0,1	0,2	0,6	3,0	2,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1987-88												
P	23,0	172,3	166,4	135,1	334,5	242,4	74,8	15,6	15,8	0,0	0,2	34,9
ETP	184,1	151,5	123,3	126,1	103,5	101,4	123,6	118,7	98,4	132,0	152,7	171,9
E	0,0	0,0	1,5	1,2	21,7	36,4	20,1	3,2	1,4	0,2	0,0	0,0
R	0,0	0,0	0,7	0,2	9,8	13,1	1,9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

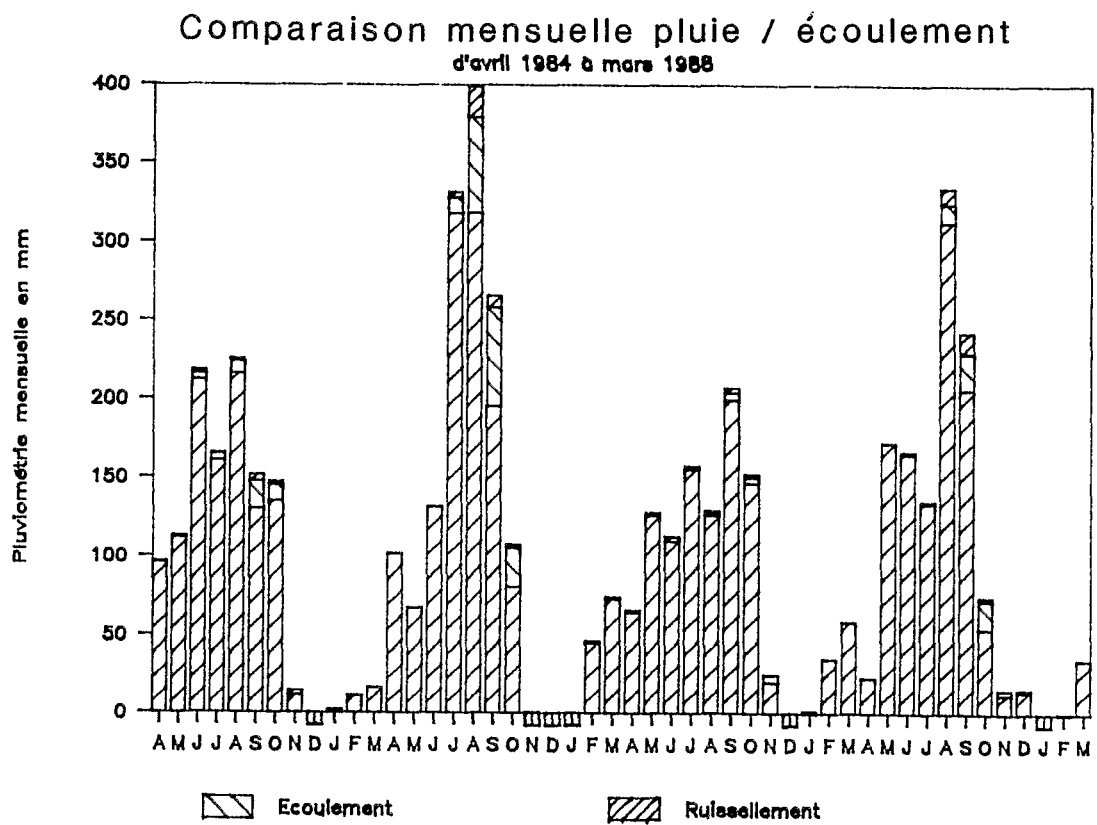
On peut présenter d'une autre façon la même approche, en raisonnant sur l'évapotranspiration. En admettant que le bassin versant de Booro-Borotou constitue un système fermé, on peut assimiler le déficit d'écoulement à l'évapotranspiration réelle. La figure n°4.105 présente sous forme d'histogramme la différence entre la pluviométrie mensuelle et l'évapotranspiration potentielle.

On constate que seuls les mois de juin, juillet, août et septembre sont nettement excédentaires. Un rapprochement intéressant peut être fait avec les courbes de variation de stock présentées au chapitre 3.2. pour les tubes neutroniques 4 et 8. Ces quatre mois correspondent à la période où la variation de stock est continuellement croissante. On vérifie ainsi que ce n'est que pendant cette période d'excédent pluviométrique que le stockage est possible, d'abord dans la zone non saturée et ensuite dans la nappe. En dehors de cette période, il s'établit un régime d'équilibre entre les stockages dans la zone non-saturée, les écoulements de surface et de base et les reprises par évapotranspiration réelle.

4.1.2.2. Pluviométrie - Ecoulement

Sur la figure n°4.106 la comparaison mensuelle des pluies aux écoulements est présentée sous forme d'histogrammes *empilés*. En valeur absolue on observe que c'est seulement lorsque le total pluviométrique mensuel excède 200 mm que l'écoulement du même mois, ou du mois suivant, a une importance notable. On note également que le bilan hydrologique mensuel peut être négatif (les écoulements sont supérieurs à la pluviométrie) entre les mois de novembre et de janvier ; mais ce n'est pas une règle absolue.

FIG 4.106



Comme pour le bilan annuel, nous avons tenté une régression entre pluie et écoulement mensuel du même mois et cumulé avec les un ou deux mois suivants (figure n°4.107). Le résultat est bien décevant. Il n'est pas question de formuler une relation ayant une quelconque fiabilité. On met en évidence qu'en dessous d'une pluviométrie mensuelle de 200 mm, il y a peu de chance d'observer un écoulement notable, et en dessous de 70 mm, un écoulement tout court, sauf si les mois précédents ont été pluvieux.

Une autre tentative pour relier par une régression multilinéaire l'écoulement à la pluviométrie du mois et des deux mois précédents est tout aussi décevante.

Cela montre qu'au pas de temps annuel, le bassin versant présente une certaine mémoire qui intègre les éléments du bilan, en retenant les termes significatifs et en oubliant les effets pervers. Au pas de temps mensuel, les *bruits* sont trop importants pour déceler une quelconque relation stable.

Pour les écoulements de crue enfin (figure n°4.108), le problème est le même ; les points sont peut être un peu moins dispersés, mais il n'est pas raisonnable d'établir une relation qui pourrait avoir une tendance vers une fonction puissance.

FIG 4.107

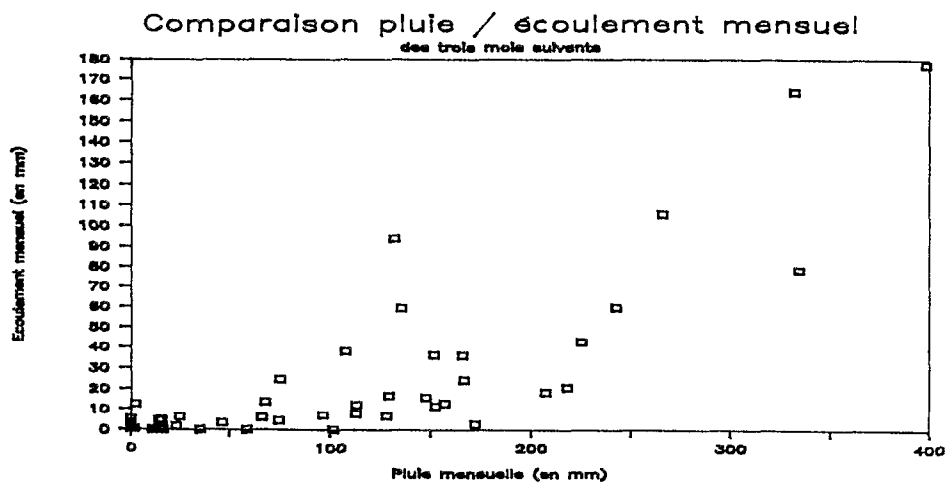
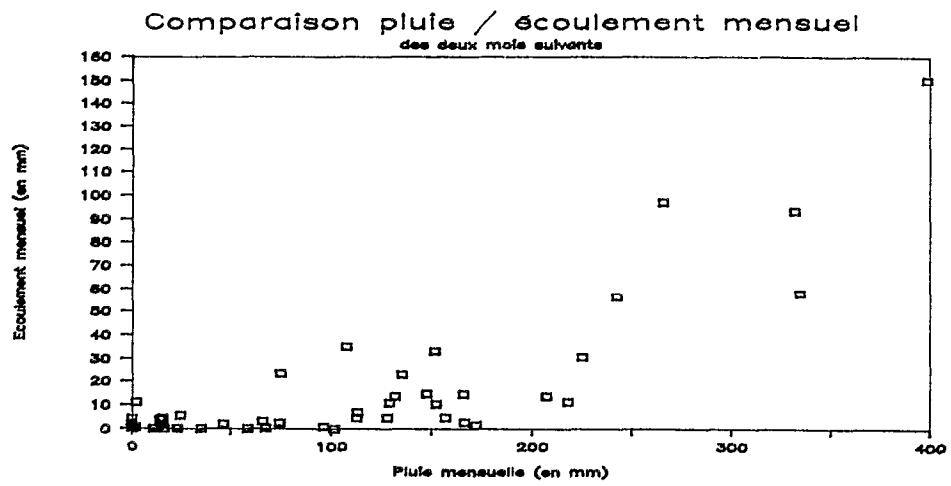
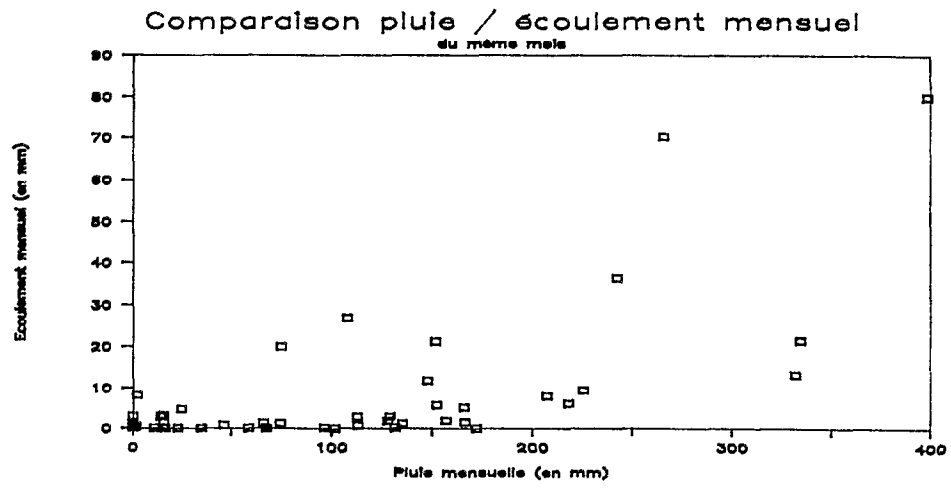
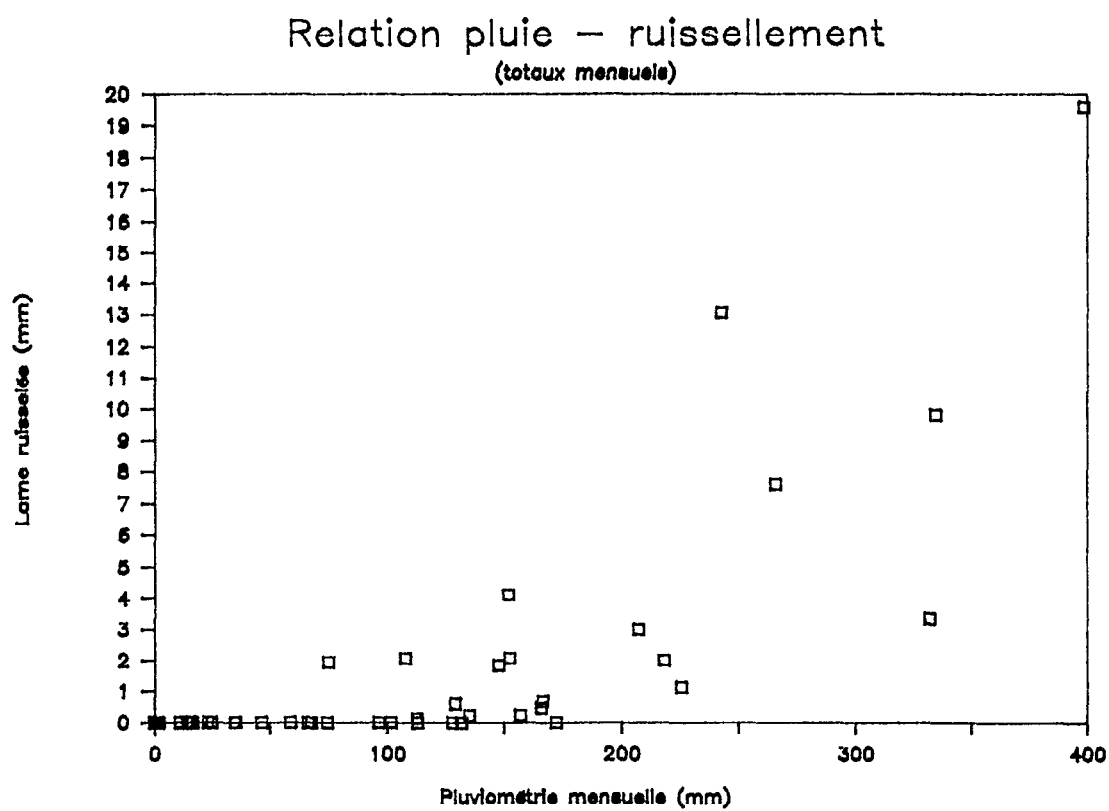


FIG 4.108



4.2. LES CRUES

La *crue* est, par définition, la *réponse d'un bassin à une averse ou à un épisode pluvieux* (Roche, 1986). Dans la première partie de ce mémoire nous avons présenté les différents chemins (chapitre 1.2) que pouvait suivre l'eau à la suite d'un tel événement et cela nous conduit à préciser cette définition (voir chapitre 3.1 sur la simulation de pluies). Dans tout ce chapitre nous considérerons qu'une crue est une *augmentation significative du débit à l'exutoire du bassin versant consécutive à une averse ou à un train d'averses*.

Une crue étant nécessairement associée à un épisode pluvieux, son étude est liée à des grandeurs qui, d'une part, décrivent la variation du débit, d'autre part, caractérisent l'événement pluvieux qui en est la cause et qui, enfin, décrivent l'état momentané du milieu où elle se produit.

4.2.1. Grandeurs descriptives

On trouvera en annexe les tableaux donnant toutes les valeurs prises par les grandeurs caractéristiques des 87 crues retenues (lame ruisselée supérieure à 0,1 mm) à la station principale de Booro-Borotou.

4.2.1.1. Le débit

Les grandeurs qui sont inventoriées ci-dessous sont toutes directement déduites de l'hydrogramme de crue et la figure n° 4.201 schématise ce qu'elles représentent.

* *QBD* (en l/s) : Le débit initial correspond à la valeur du débit à l'instant *Tdeb* où celui-ci commence à croître brusquement.

* *QBF* (en l/s) : C'est la valeur du débit qui correspond à la reprise de l'écoulement de base ou à la fin de l'écoulement rapide de crue à l'instant *Tfin*. Elle est évaluée de la manière traditionnelle comme correspondant à une cassure de la courbe de décroissance de crue représentée en coordonnées semi-logarithmiques.

* *QMXE* (en l/s) : C'est le débit maximal absolu observé entre *QBD* et *QBF* (ou débit maximal écoulé) à l'instant *Tmx*.

* *QMXR* (en l/s) : Le débit maximal d'écoulement de crue correspond à l'écart maximal entre le débit écoulé à l'exutoire et le débit qui aurait dû couler en l'absence d'événement pluvieux.

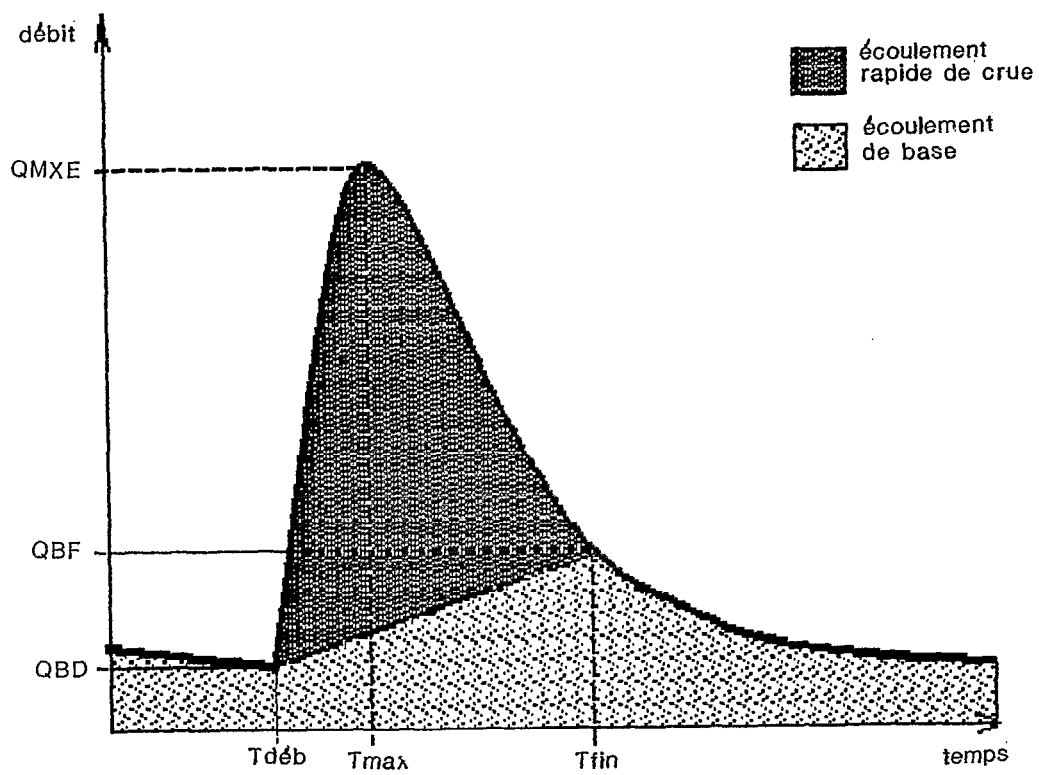
* *TM* (en min) : Le temps de montée est le temps qui sépare l'instant où est pris le débit *Qdeb* de l'instant où est pris le débit *QMXE* ou *QMXR*.

$$TM = T_{max} - T_{deb}$$

* *TB* (en min) : Le temps de base est le temps qui sépare l'instant où est pris le débit *Qdeb* de l'instant où est pris le débit *Qfin*.

$$TB = T_{fin} - T_{deb}$$

FIG 4.201 : SCHEMA D'UNE CRUE TYPE



* *VE* et *LE* (en m³ et en mm) : Le volume écoulé est le volume total d'eau qui est passé par l'exutoire entre *T_{deb}* et *T_{fin}*, y compris de l'écoulement de base. La lame écoulée est la lame équivalente à ce volume, répartie uniformément sur toute la superficie *S* du bassin versant.

$$LE = VE / S$$

* *VR* et *LR* (en m³ et en mm) : C'est le volume (et la lame) écoulé(e) de crue qui correspond(ent) à l'écoulement supplémentaire occasionné par l'événement pluvieux. On a :

$$LR = VR / S$$

et

$$VR < VE \text{ et } LR < LE$$

On admet que *LR* est le paramètre essentiel de description de la crue ; c'est en effet celui qu'il est le plus facile de mettre en regard du paramètre essentiel de l'événement provocateur, la pluie moyenne. Il est le paramètre qui a servi de critère pour la sélection des crues à analyser : les événements dont la lame de crue était inférieure à 0,1 mm ont été rejetés. Notons que cette valeur de 0,1 mm correspond à la précision optimale que l'on peut obtenir pour l'évaluation de la pluie moyenne.

* *TY* : cette variable alphanumérique désigne le type d'averse et ne peut prendre que deux modalités : *S*, comme *simple*, si la crue présente une seule pointe de crue ; *C*, comme *complexe*, si elle en présente plusieurs.

* *QSPE* (en l/s/km) : Le débit spécifique de crue correspond au débit moyen d'écoulement de crue rapporté à la superficie du bassin versant. Il permet de comparer les résultats obtenus sur des bassins de superficies variables. On l'évalue par :

$$QSPE = VR / (TB * S)$$

4.2.1.2. L' événement pluvieux

Les crues sont toujours initiées phénoménologiquement par une averse et une seule. Il est bien sûr possible qu'une averse immédiatement précédente, n'ayant pas donné lieu à une crue, ait mis le terrain en condition pour que la crue se produise. Il ne sera pas tenu compte d'un tel événement préliminaire comme provocateur *stricto sensu* de l'événement crue. Par contre, si au cours de la crue l'averse s'interrompt et reprend avant que l'on puisse considérer que l'écoulement de crue induit par la première averse soit terminé, cette nouvelle averse sera considérée comme contributive à l'événement analysé.

On a noté dans le chapitre 2 qu'il était exceptionnel d'avoir plus de deux averses par jour. Dans notre échantillon de crues, le cas de trois averses pour la même crue ne se produit qu'une seule fois. On note à ce propos que les averses sont séparées sur le critère minimum d'une intensité inférieure à 0,5 mm/h pendant une heure (Kouamé, 1987).

* *PM* (en mm) : La pluie moyenne sur le bassin versant est calculée pour l'ensemble de l'événement pluvieux à partir de la valeur de pluie moyenne journalière établie pour le jour de l'événement, corrigée le cas échéant par les observations pluviographiques lorsqu'il s'est produit plusieurs averses qui ne sont pas toutes initiatrices de la crue étudiée.

Les autres grandeurs qui caractérisent l'événement pluvieux sont évaluées à partir des observations pluviographiques. Nous avons vu que le bassin était équipé de deux sites de mesure pluviographique, sur chacun desquels deux appareils (traditionnels, 11 ou 12, et à acquisition automatique, 51 ou 52) fonctionnaient simultanément à partir de 1986. Malgré quelques petites différences observées par Kouamé (1987) entre ces deux sites, on peut admettre une relative homogénéité spatiale des événements pluvieux sur le bassin versant de Booro-Borotou. Les caractéristiques pour la description des crues sont donc prises sur un seul poste (avec vérification des écarts avec l'autre poste le cas échéant). Pour tenir compte des lacunes de fonctionnement (minimes, mais qu'il ne faut pas cacher), priorité a été donnée au poste P51 (pluviographe Oedipe du site amont),

remplacé le cas échéant et dans l'ordre par P52, P11 ou P12. Avant 1986, c'est le poste P11 qui est pris prioritairement à P12.

Dans le cas d'un événement pluvieux à plusieurs averses, d'une part les durées d'averses et les hauteurs de précipitations sont cumulées ; d'autre part, les intensités prises en compte sont les intensités maximales de toutes les averses.

* *TA* (en min) : C'est la durée complète de l'événement pluvieux (de pluie effective).

* *IM_{xx}* (en mm/h) : L'intensité maximale de la pluie est évaluée pour plusieurs durées *xx* de 1 minute à 60 minutes. *IM00* correspond à l'intensité maximale absolue mesurée entre deux basculements consécutifs des augets du pluviographe (0,5 mm).

* *HM_{xx}* (en mm) : C'est la hauteur totale de précipitation tombée avec une intensité supérieure au seuil *xx* ; ce seuil est variable entre 5 et 50 mm/h.

Une grandeur supplémentaire est donnée dans les tableaux, elle résulte de la combinaison de caractéristiques de pluie et de caractéristique de crues.

* *KR* (en %) est le coefficient d'écoulement de crue dans sa définition classique :

$$KR = LR / PM$$

4.2.1.3. L'état du milieu

Quelques paramètres supplémentaires sont utilisés ici pour évaluer l'état du milieu à l'instant où intervient l'événement pluvieux qui va provoquer la crue. Ces paramètres soit sont directement liés à l'observation, soit correspondent à des indices évalués à partir des mesures.

* *RES_x* (en jour) est la période précédant l'avènement pluvieux sans pluie supérieure à *x* mm (*x* est pris égal à 0 ou à 5 mm).

* *CUAN* (en mm) est le total pluviométrique cumulé depuis le début de l'année calendaire.

* *IP_{xx}* (en mm) est l'indice des précipitations antérieures déjà décrit au chapitre 3.1. calculé pour une valeur de l'exposant égale à 0,xx. 5 valeurs différentes de sont prises : 0,01 ; 0,05 ; 0,1 ; 0,5 (qui est la valeur classiquement adoptée dans les études récentes de l'ORSTOM) et 0,8. Notons au passage que pour un infiniment petit on retrouve une valeur de pluie cumulée depuis un temps infini. Les valeurs initiales de ces paramètres ont été établies après un calcul itératif sur plusieurs années fictives (calquées sur les observations, bien sûr).

A ces grandeurs évaluées pour les 87 crues retenues, il faut ajouter des observations de terrain dont le caractère est discontinu ou qui ne sont pas disponibles sur l'ensemble de la période d'étude. Il s'agit surtout de l'état du cycle végétatif et des niveaux piézométriques. Le cas échéant, ces grandeurs, qu'il n'est pas possible d'intégrer dans les tableaux complets des caractéristiques, seront retenues et détaillées.

4.2.2. Echantillon d'analyse

Il n'est guère possible d'analyser la totalité de ces 87 crues recensées. Certaines d'entre elles en effet résultent de la combinaison de plusieurs épisodes pluvieux ou d'épisodes pluvieux complexes et présentent plusieurs pointes de crue.

De plus un grand nombre des crues recensées présentent une très faible lame de crue et il paraît difficile de bâtir une analyse sur des valeurs qui sont du même ordre de grandeur que la précision de mesure.

Nous retenons par conséquent comme échantillon final d'analyse les crues simples de lame de crue (*LR*) supérieure à 0,5 mm. Elles sont présentées dans le tableau n° 4.201, classées par ordre décroissant et un numéro d'ordre de 1 à 30 leur a été attribué.

Tableau n°4.201

Echantillon classé des crues simples utilisées pour l'analyse

	N°	Date	LR mm		N°	Date	LR mm
1	8516	18-Août-85	11,10	16	8521	03-Sep-85	0,92
2	8708	21-Août-87	4,03	17	8525	12-Sep-85	0,88
3	8721	27-Sep-87	2,60	18	8512	13-Août-85	0,85
4	8508	03-Août-85	1,89	19	8722	29-Sep-87	0,84
5	8519	30-Août-85	1,78	20	8419	17-Oct-84	0,82
6	8414	14-Sep-84	1,73	21	8725	12-Oct-87	0,79
7	8509	05-Août-85	1,58	22	8712	02-Sep-87	0,79
8	8402	16-Jun-84	1,56	23	8417	02-Oct-84	0,76
9	8608	13-Sep-86	1,30	24	8724	08-Oct-87	0,69
10	8506	27-Jul-85	1,25	25	8610	30-Sep-86	0,66
11	8711	31-Août-87	1,20	26	8523	04-Sep-85	0,62
12	8411	01-Sep-84	1,13	27	8701	20-Jun-87	0,60
13	8533	31-Oct-85	1,09	28	8707	17-Août-87	0,52
14	8503	11-Jul-85	1,04	29	8713	03-Sep-87	0,51
15	8706	15-Août-87	1,00	30	8607	12-Sep-86	0,50

4.2.3. Forme des crues

4.2.3.1. Hydrogrammes réduits

L'analyse de la forme des crues se fait habituellement par comparaison des hydrogrammes des principales crues observées, réduits à un hydrogramme de volume constant. L'échelle des débits est multipliée par un facteur permettant de ramener la lame écoulée de crue à une valeur constante, en général égale à 1 mm. L'échelle des temps est conservée, mais le zéro est fixé à l'instant où la crue est maximale.

Pour uniformiser l'échantillon, on a calculé par interpolation les débits instantanés par pas de temps régulier de 5 minutes sur les 30 crues sélectionnées. Les résultats obtenus sont représentés sur les figures n°4.202 à 4.206, avec d'une part la représentation en valeur absolue et d'autre part la représentation standardisée.

L'originalité de l'analyse présentée ici réside dans le fait que les crues ne sont pas sélectionnées *a priori*, comme dans les études de Korhogo ou Sakassou où seules quelques crues (les plus importantes, les crues dites *unitaires*, celles qui correspondent à des critères précis de volume ou de temps de montée) étaient retenues. Dans notre cas nous avons traité *toutes* les crues simples dont la lame ruisselée est supérieure à 0,5 mm. Cela se justifie par le fait que le bassin est compact, que la variabilité spatiale des averses à l'échelle du bassin est très faible et qu'enfin on peut considérer les *temps de concentration* comme supérieurs à la durée moyenne des corps d'averse (en admettant la terminologie et les critères traditionnels de sélection).

4.2.3.2. Types de crues et hydrogrammes médians

On note à l'examen des hydrogrammes réduits qu'il y a plusieurs formes de crues nettement différenciées. On peut en retenir trois :

Type 1 : le maximum est de l'ordre de 250 à 300 l/s pour un temps de montée inférieur à deux heures et un temps de base de l'ordre de six heures. Ce type correspond aux crues 1, 2, 3, 7, 8, 10, 14, 26 et 27.

Type 2 : le maximum est très faible entre 40 et 70 l/s pour des temps de montée et de base très longs (respectivement environ 5 heures et 18 heures ou plus). Il concerne les crues 6, 11, 12, 13, 15, 16, 18, 21, 22, 24, 25, 28, 29 et 30.

Type 3 : c'est un type intermédiaire entre les deux précédents qui est affecté aux crues 4, 5, 9, 17, 19, 20 et 23.

Il est possible de construire pour chacun de ces types un *hydrogramme médian*, en attribuant à chaque pas de temps de cinq minutes le débit moyen, calculé sur la base des débits du pas de temps correspondant des crues d'une même classe.

On obtient les hydrogrammes-types de la figure n°4.207 dont les caractéristiques sont données dans le tableau 4.202.

Tableau n°4.202

Caractéristiques des hydrogrammes médians des trois types de crues

Type	LE (mm)	TM (min)	TB (min)	QMXE (l/s)
1	1,0	115	385	282
2	1,0	325	1325	51,5
3	1,0	155	630	134

En admettant l'existence de ces grands types de crues, essentiellement le type 1 et le type 2 (le type 3 constituant visiblement une étape intermédiaire), nous devons proposer une analyse du mécanisme de formation des crues les différenciant. La méthode utilisée consiste à explorer le problème à l'aide de techniques statistiques simples, puis à vérifier que cette propriété concerne le fonctionnement du bassin versant en analysant de la même façon les crues enregistrées à la station amont.

FIG 4.202

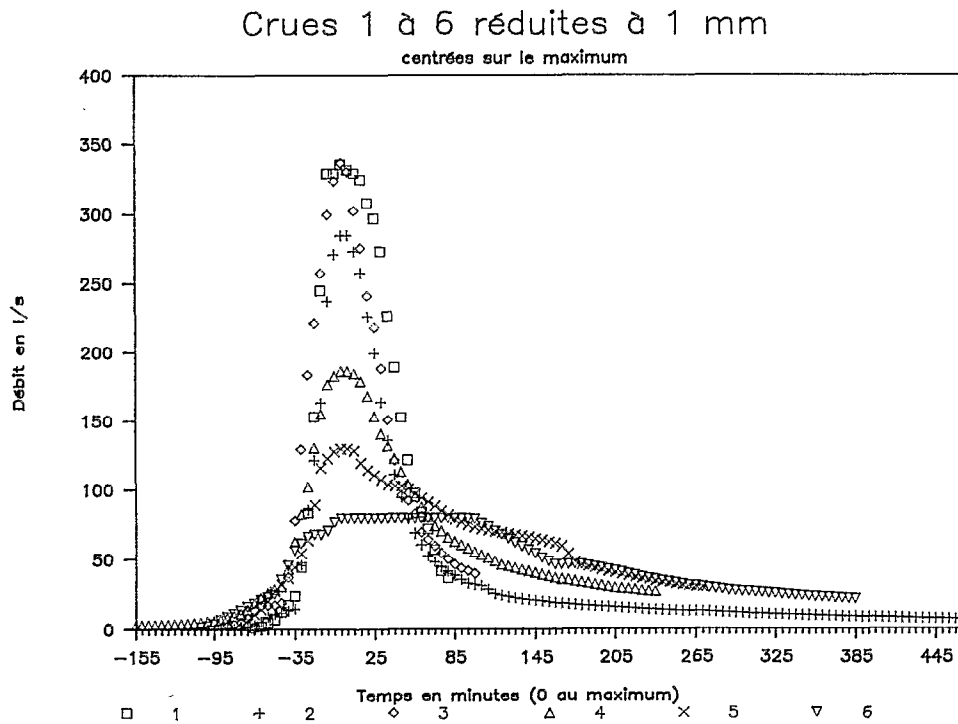
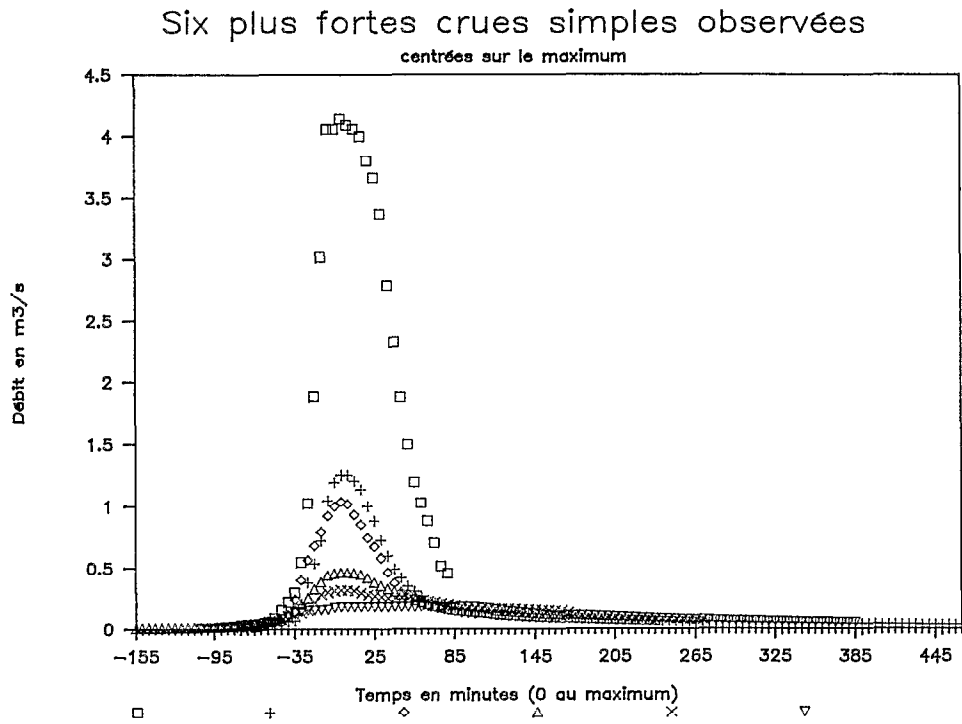


FIG 4.203

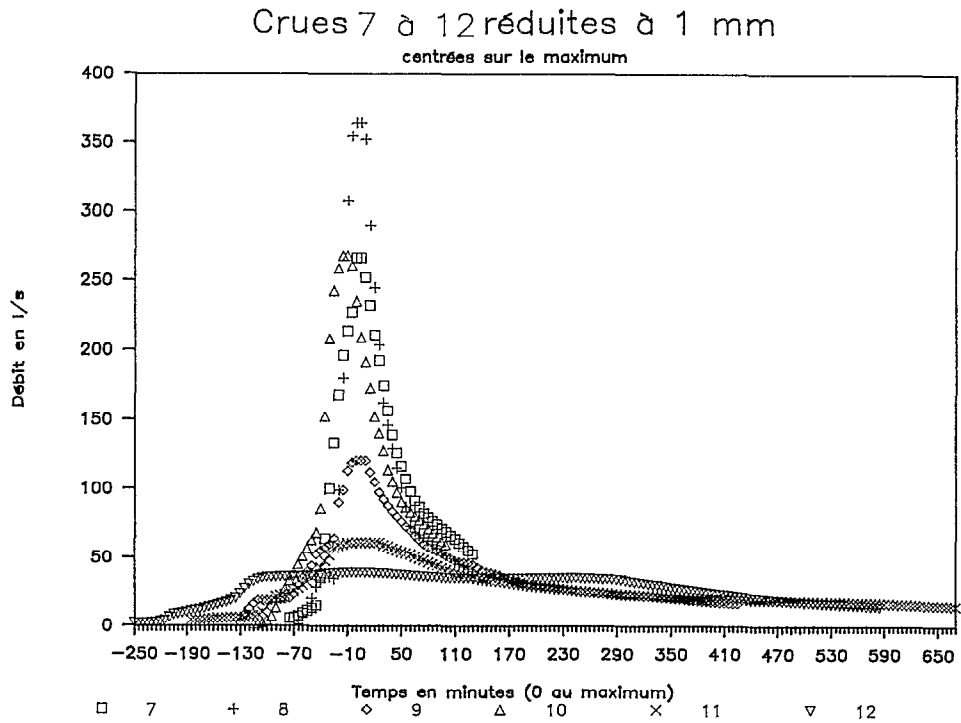
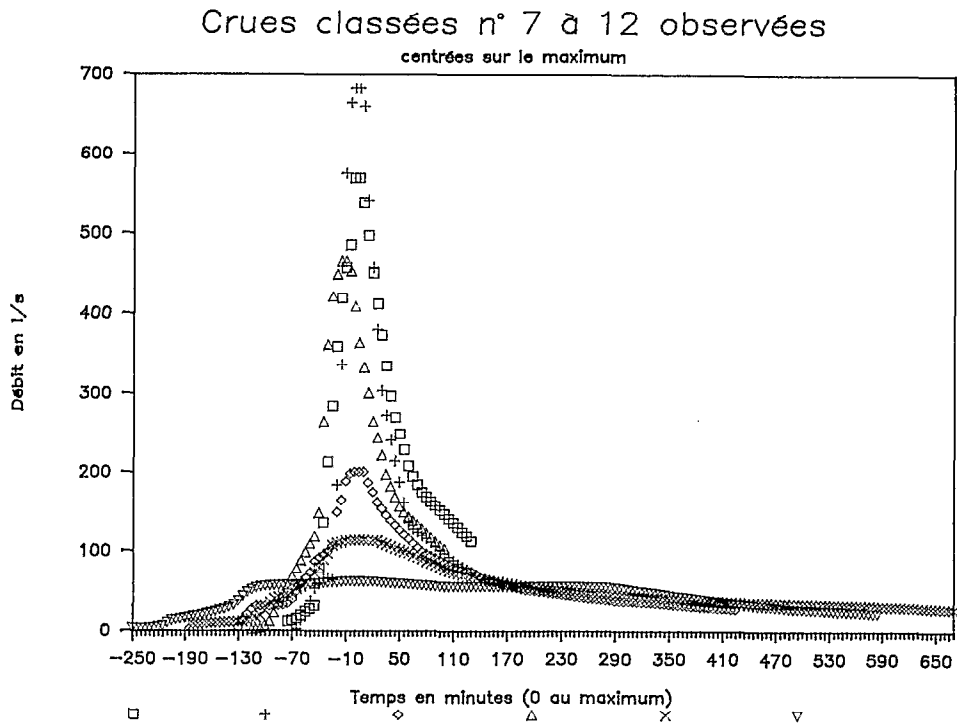


FIG 4.204

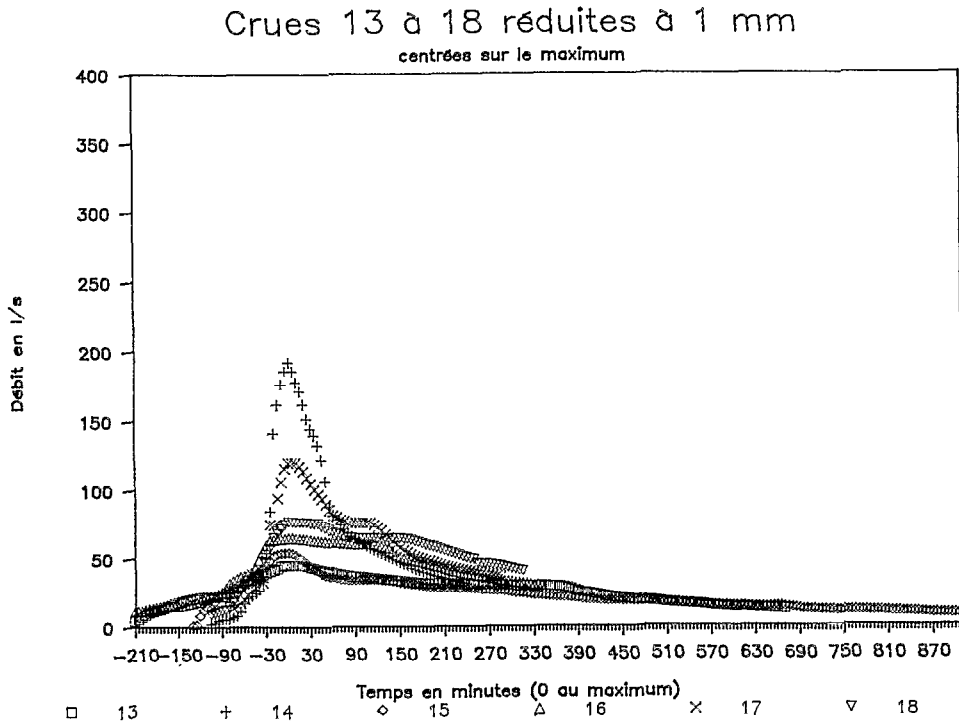
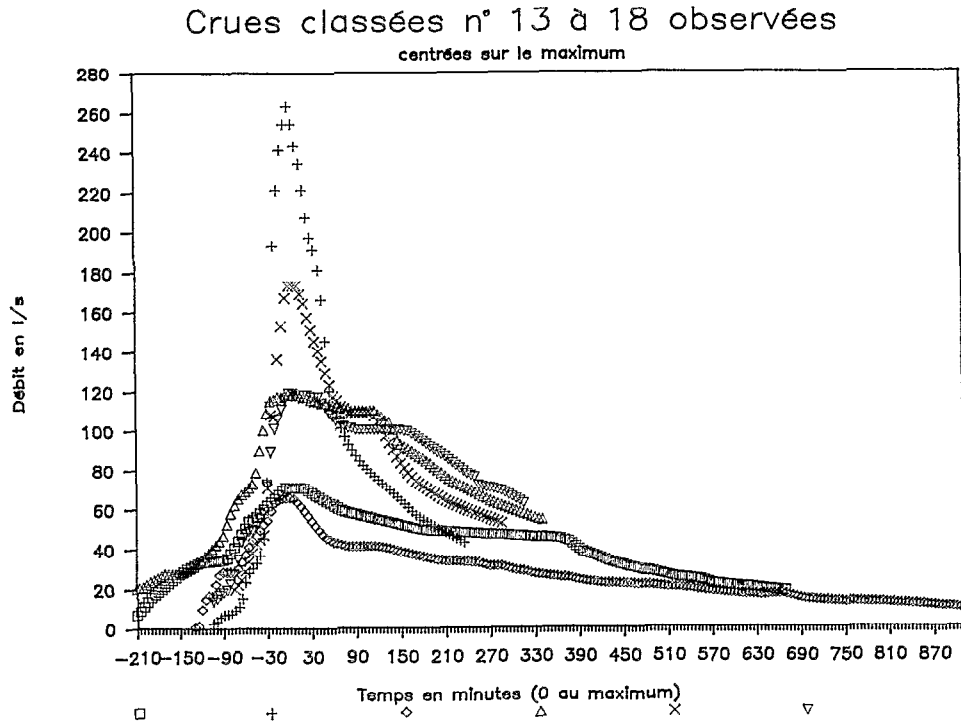
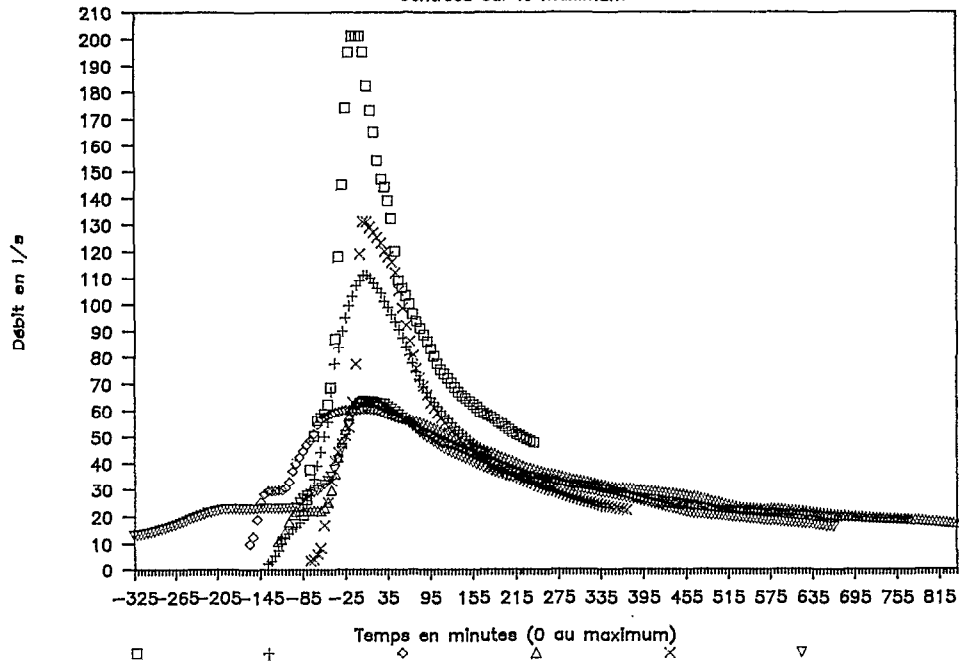


FIG 4.205

Crues classées n° 19 à 24 observées centrées sur le maximum



Crues 19 à 24 réduites à 1mm centrées sur le maximum

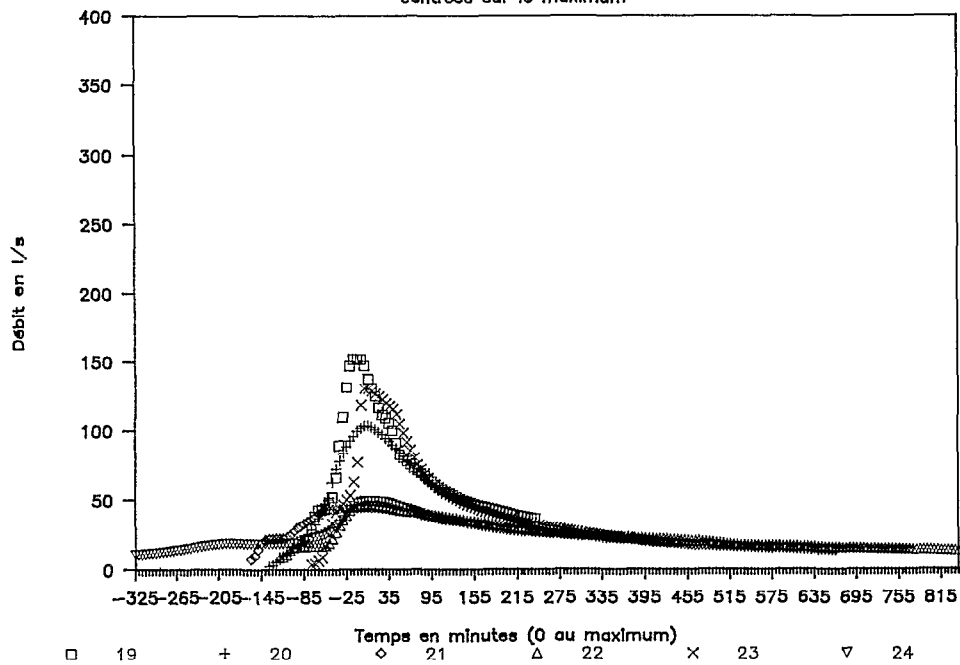


FIG 4.206

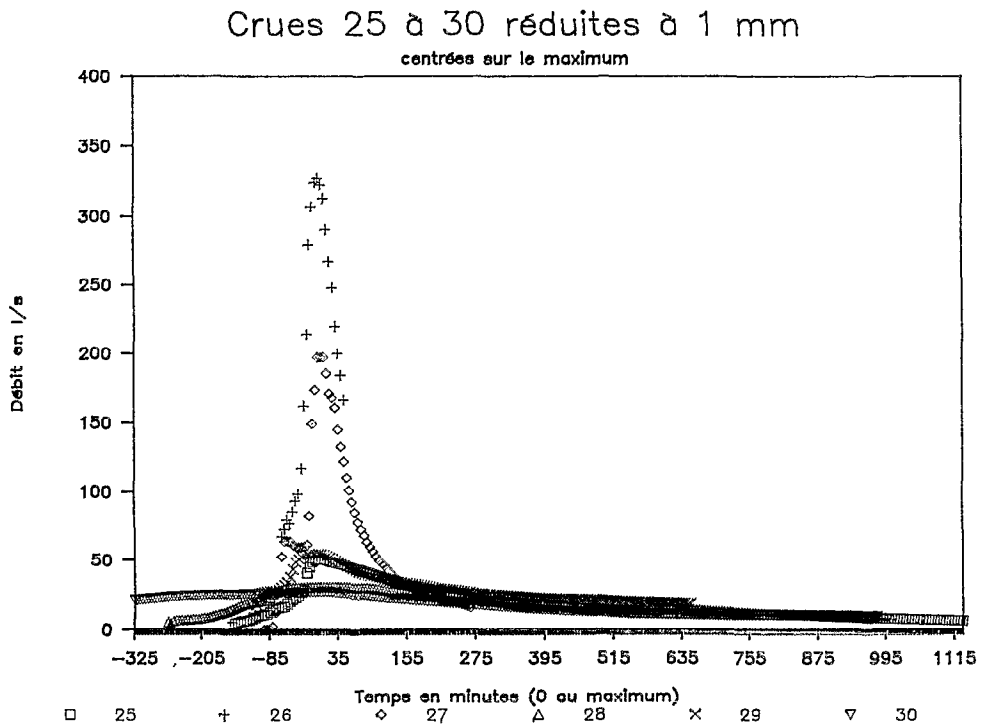
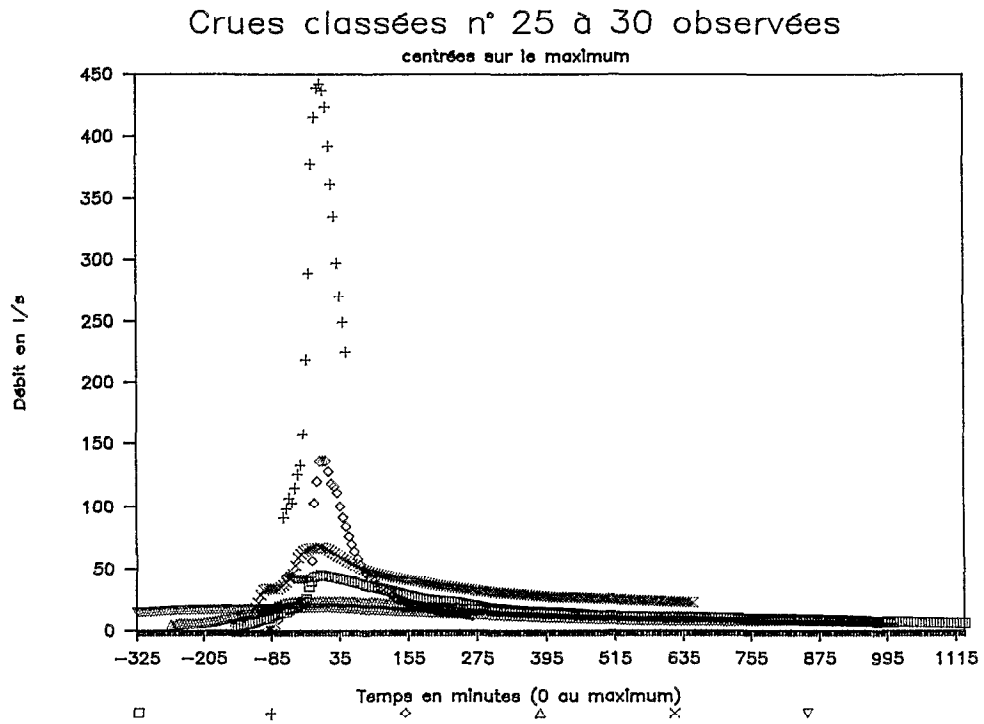
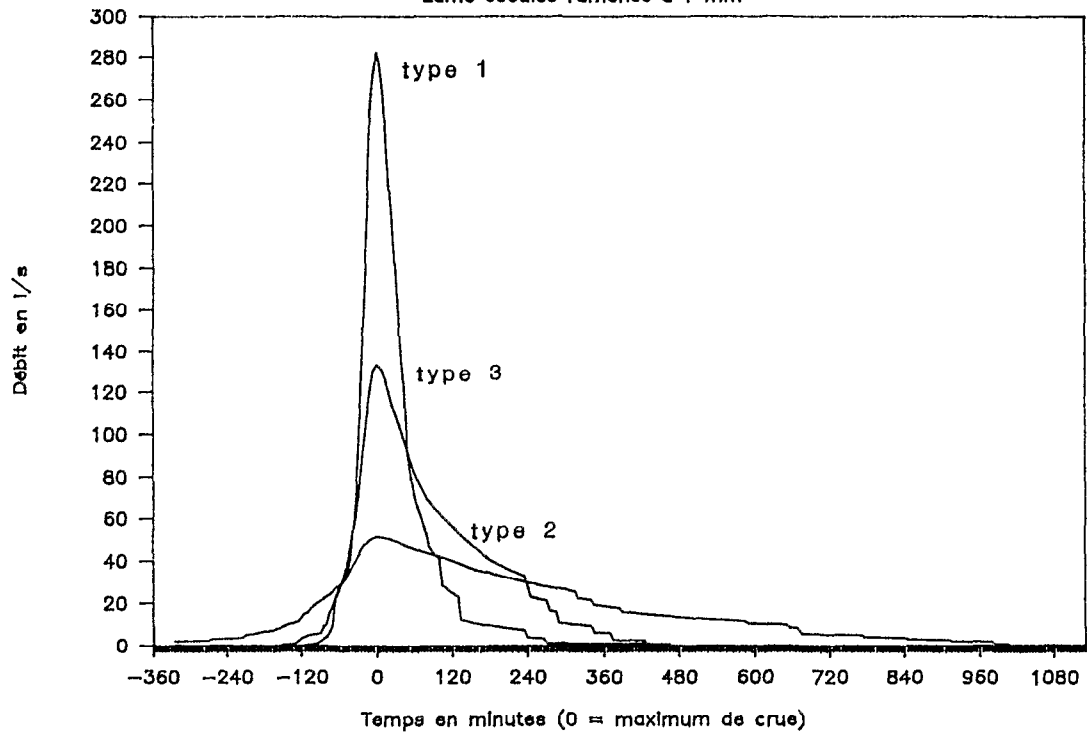


FIG 4.207

Les trois types de crues

Lame écoulee ramenée à 1 mm



4.2.4. Approche statistique

Les résultats des paragraphes suivants sont élaborés à l'aide du logiciel NDMS (Noirot et al., 1987).

4.2.4.1. Tableau de contingence généralisé

Etablir un tableau de contingence sur deux variables consiste d'abord à recoder ces variables en plusieurs classes disjonctives ; puis à établir un tableau présentant en ligne les classes de l'une des variables et en colonne les classes de l'autre. Le tableau est rempli par le nombre de couples appartenant simultanément aux deux classes intéressées. Par exemple, un échantillon de 30 individus est décrit par deux variables x et y . On définit 3 classes sur x (x_1 , x_2 , et x_3) de 10 éléments chacune et 3 classes sur y (y_1 , y_2 , y_3) de 10 éléments également. On peut obtenir un tableau du type :

Tableau n°4.203

Exemple de tableau de contingence

	x1	x2	x3	total
y1	8	2	0	10
y2	2	5	3	10
y3	0	3	7	10
total	10	10	10	30

Ce tableau signifie essentiellement que 80 % des individus de la classe y_1 appartiennent également à la classe x_1 ou que 70 % des individus de la classe y_3 appartiennent également à la classe x_3 . Il n'y a par contre aucun individu qui puisse appartenir simultanément aux classes y_1, x_3 ou x_1, y_3 . On en déduit une association privilégiée entre les classes x_1, y_1 et x_3, y_3 .

Ce type d'approche très simple permet de dégrossir un problème en cherchant quelles sont ces associations privilégiées, ou au contraire l'absence de relation significative, en généralisant ce type de tableau et en formant un tableau de contingence généralisée (ou tableau de Burt).

Nous avons choisi parmi les variables descriptives des crues un certain nombre d'entre elles, en éliminant celles qui paraissent par trop redondantes ou inutiles. Toutes ces variables ont été recodées d'une façon très simple en trois classes, de telle sorte que chacune des classes contient le même nombre d'individus (en l'occurrence les 30 crues de l'échantillon d'analyse qui donnent des classes de 10 individus, voir notre exemple ci-dessus).

Le tableau n° 4.204 donne les intervalles de ces classes pour les variables sélectionnées. La classe 1 comprend les individus dont la valeur est dans l'intervalle v_{inf}, b_1 ; la classe 2 dans l'intervalle b_1, b_2 ; la classe 3 dans l'intervalle b_2, v_{sup} .

Tableau n°4.204

Intervalles de définitions des classes de contingence

	QBD l/s	QMXR l/s	TM min	TB min	LR mm	PM mm	NJ	TA min	RES0 jour	RES5 jour	CUAN mm	IP01 mm
vinf	0,0	15	60	114	0,5	14,4	15 jun	10	0,0	0,1	246	232
b1	2,4	64	93	363	0,79	28,3	16 aoû	179	0,4	1,5	717	442
b2	10,7	192	134	766	1,2	42,4	10 sep	256	1,7	3,2	915	581
vsup	91,0	3980	543	1513	11,1	82,7	16 oct	489	11,4	11,4	1282	694

	IP05 mm	IP50 mm	IM05 mm/h	IM10 mm/h	IM30 mm/h	IM60 mm/h	HM10 mm	HM20 mm	HM30 mm	HM40 mm	HM50 mm
vinf	64,1	0,1	11,0	0,0	4,3	3,6	0,5	0,0	0,0	0,0	0,0
b1	129,6	5,8	47,2	40,0	25,6	15,3	13,2	10,8	8,5	6,5	1,0
b2	187,7	12,6	76,4	62,3	43,0	27,9	34,0	23,9	22,6	16,8	12,7
vsup	243,0	53,9	189,7	167,1	95,7	59,3	67,1	67,1	56,8	47,8	47,5

NJ correspond au numéro dans l'année du jour d'occurrence de la crue ; pour plus de clarté, la date littérale est rétablie dans le tableau. Ces classes auxquelles ont été rajoutées les 3 classes de type de crue (TYCR) conduisent à la construction d'un tableau de Burt.

Un tel tableau est difficile à présenter tel quel dans un exposé. Aussi avons-nous choisi de présenter un tableau synthétisant déjà un certain nombre de résultats. C'est-à-dire seules sont mentionnées les *cases* du tableau présentant un nombre d'individus largement significatif. Le terme *largement significatif* est fixé ici à au moins deux tiers des individus.

C'est le tableau n°4.205, où n'est représenté que la partie supérieure de la diagonale puisque le tableau est symétrique. Une case blanche représente une association entre deux variables non significatives. Les cases non blanches sont codées 1Y,2Y,3Y. Cela veut dire que la relation entre la classe 1, 2 ou 3 de la variable de colonne est significativement associée avec la classe Y de la variable de ligne. "x" signale que un ou deux des termes de cette association ne sont pas significatifs.

4.2.4.2. Interprétation du tableau de contingence

Pour faciliter l'analyse de ce tableau, la description est abordée par ensemble de variables. La première classe sera qualifiée de *faible* ou *courte*, la seconde de *moyenne* et la troisième de *forte* ou *longue*.

Tableau n°4.205

Tableau de contingence interprété

	QBD	QMXR	TM	TB	LR	PM	NJ
TYCR		12,23,31	11,x,32	11,x,32	x,x,31	x,x,31	11,x,x
QBD							
QMXR			x,x,31	x,x,31	x,x,33	11,x,33	
TM				11,x,33			
TB							
LR						11,x,33	

Tableau n°4.205 (suite et fin)
Tableau de contingence interprété

	QBD	QMXR	TM	TB	LR	PM	NJ	
PM							13,x,x	
	TA	RES0	RES5	CUAN	IP05	IP10	IP50	IM05
TYCR				11,x,x				
QBD				11,x,x	x,x,33	11,x,33	x,22,x	
QMXR								
TM								
TB								
LR								
PM				13,x,x				
NJ				11,x,x	11,x,x			
TA								
RES0							13,x,x	
RES5							13,x,x	
CUAN					11,22,33			
IP05						x,x,11		
	IM10	IM30	IM60	HM10	HM20	HM30	HM40	HM50
TYCR	12,23,x	12,23,31	12,23,31	12,23,31	12,23,31	12,23,31	12,x,31	12,x,31
QBD								
QMXR			11,22,33	11,x,33	x,x,33	11,22,33	11,x,x	
TM		13,x,x	13,x,x	13,x,x	13,x,x	13,x,x	13,x,x	
TB		13,x,x	13,x,x	13,x,x		13,x,x	13,x,x	
LR			11,x,33	x,x,33	x,x,33	x,x,33		12,x,x
PM		11,x,33	11,22,33	11,x,33	x,x,33	11,x,33	x,x,33	
NJ			x,x,31		x,x,31	x,x,31		
TA					x,21,x	x,21,x		
RES0								
RES5								
CUAN			x,x,31		x,x,31	x,x,31		
IP05								
IP10								
IP50								
IM05	11,22,33	11,x,33	11,x,x	11,x,x	11,x,x	11,x,x	11,x,33	11,22,33
IM10		11,x,33	11,x,x	11,x,x	11,x,x	11,x,x	11,x,x	11,22,33
IM30			11,x,x	11,x,x	11,x,33	11,22,33	11,22,33	11,x,33
IM60				11,22,33	11,22,33	11,x,33	11,x,33	11,x,33
HM10					11,22,33	11,22,33	11,x,x	11,x,x
HM20						11,22,33	11,x,33	11,x,33
HM30							11,x,33	11,x,33
HM40								11,x,33

- *Type de crue*

Les crues du 1er type correspondent surtout à des débits de pointe fort, à des temps de montée et des temps de base courts, à des lames ruisselées élevées et à des averses fortes se produisant dans le premier tiers de la saison des pluies (NJ et CUAN) avec des fortes intensités en 30 ou 60 minutes et des hauteurs élevées tombées avec des intensités supérieures à 10, 20, 30, 40 ou 60 mm/h.

Les crues du 2ème type sont liées à des débits de pointe faibles, à des temps de montée ou de base longs et à des averses dont les intensités en 10, 30 et 60 minutes sont faibles et dont les hauteurs tombées avec des intensités supérieures à 10, 20, 30, 40 et 50 mm/h sont faibles.

Les crues du troisième type donnent des pointes de crue moyennes pour des intensités moyennes d'averse en 10,30 et 60 minutes et des hauteurs moyennes tombées avec des intensités supérieures à 10, 20 et 30 mm/h.

On note également que ni le débit de base, ni la durée de l'averse, ni les durées de ressuyage, ni les indices de précipitations antérieures, ni l'intensité maximale en 5 minutes ne constituent des critères fiables pour discriminer les classes de crues.

- *Autres variables*

Parmi les autres renseignements apportés par ce tableau certains n'ont que peu d'intérêt (les correspondances entre intensités maximales ou hauteurs d'averses supérieures à des seuils d'intensité), d'autres peuvent marquer des points intéressants :

* les averses abondantes et d'intensité forte soutenue (PM, IM60, HM20, HM30) donnant lieu à des crues se produisent plutôt en début de saison des pluies (NJ et CUAN).

* il existe une bonne correspondance des forts débits de base avec les forts API(=0,01 et =0,05), des débits de base moyens avec les API(0,5) moyens et des débits de base faibles avec les API(0,10) faibles.

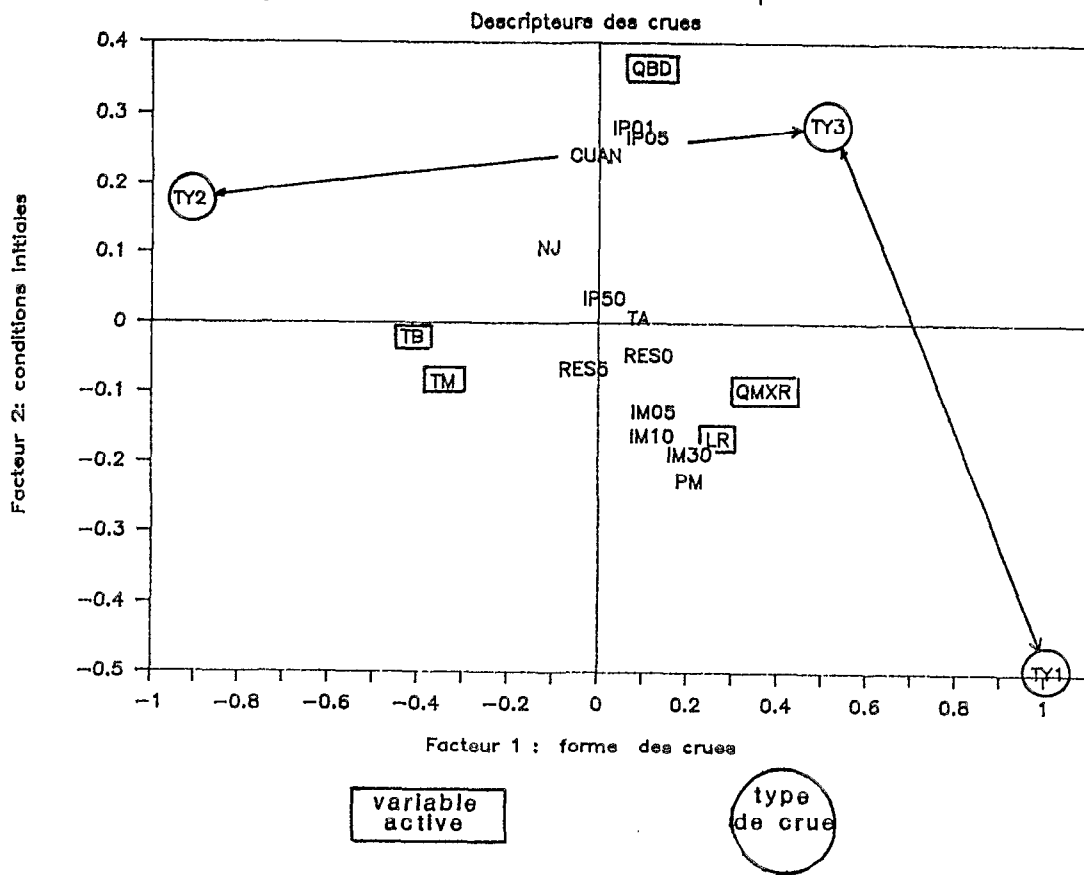
4.2.4.3. *Analyse factorielle des correspondances (AFC)*

Le principe de cette analyse a déjà été explicité au paragraphe 3.1.7.1.. Les variables sont toujours recodées en trois classes disjonctives comme pour l'établissement du tableau de Burt.

Le problème posé est de trouver quelles sont les variables qui sont les meilleurs descripteurs des crues. Ce sont donc les variables définissant les crues (QBD, TM, TB, LR et QMXR) qui sont prises comme variables actives de notre AFC, toutes les autres venant en variables supplémentaires. Le type de crue intervient comme une variable disjonctive (ou de Bernoulli, qui prend la valeur 1 si elle appartient à la classe, 0 si elle n'y appartient pas).

Le résultat est présenté sur la figure n° 4.208. L'histogramme des valeurs propres accorde 66,8 % d'explication au facteur 1 et 90,2 % d'explication pour le plan des facteurs 1 et 2.

Analyse factorielle de correspondances



Les contributions relatives des variables actives aux deux facteurs sont données dans le tableau n°4.206.

Tableau n°4.206

Contributions relatives des variables aux facteurs principaux (en %)

Variable	Axe 1	Axe 2
QBD	9,1	90,4
QMXR	80,9	5,4
TM	84,8	5,1
TB	93,1	0,2
LR	57,9	22,2

On en déduit que le facteur 1 représente essentiellement la forme de la crue (QMXR, TM, TB) et que le facteur 2 décrit les conditions initiales (QBD).

4.2.4.4. Commentaires sur l'AFC

Cette AFC appelle plusieurs commentaires :

1. L'hypothèse implicitement formulée *a priori* que le principal descripteur des crues est d'abord leur forme et ensuite les conditions initiales, est confirmée. On pourrait d'ailleurs ramener la description de forme à l'étude de la nouvelle variable QMXR/TM qui représente la *vitesse de montée* de l'hydrogramme ; en effet TM et TB sont assez étroitement corrélés et il vaut mieux choisir TM dont la détermination est plus fiable.
2. Les crues de type 1 appartiennent bien à une forme pointue et ont tendance à se produire dans des conditions initiales minimales. Contrairement aux crues de type 2. Il est intéressant de noter que le passage du type 2 au type 3, ne fait pas intervenir les conditions initiales (l'évolution se fait quasi parallèlement à l'axe 1) alors que le passage du type 1 au type 2 nécessite une évolution selon les deux facteurs principaux.
3. On retrouve sur l'axe 2, les variables supplémentaires d'indice des précipitations antérieures ($= 0,01$ et $= 0,05$) et de cumul annuel. Elles sont très proches de QBD et jouent sensiblement le même rôle.
4. Comme cela avait déjà été pressenti sur le tableau de Burt les variables de durée d'averse, d'indice de précipitation antérieure ($= 0,5$) ou de ressuyage n'interviennent pas dans l'analyse des crues.
5. La pluie moyenne, les intensités maximales en 30 minutes et plus et les hauteurs d'averses tombées avec une intensité supérieure à 30 mm/h et plus se retrouvent dans un groupe commun (là encore confirmation des résultats du tableau de Burt). Ces variables semblent assez bien liées avec la lame ruisselée d'une part et avec le débit maximal d'autre part.

Une autre AFC portant sur un échantillon réduit à 25 individus après avoir enlevé les crues de 1984 a été tentée en rajoutant aux variables supplémentaires les cotes piézométriques. Le résultat obtenu est à peu de chose près le même que celui qui est décrit. Les variables piézométriques se concentrent toutes sur l'axe 2 entre la position de QBD et de IP50.

4.2.4.5. Conclusion sur cette approche statistique

Tout d'abord il est nécessaire d'émettre quelques réserves sur ces résultats. Notre échantillon de 30 crues n'est en effet pas totalement représentatif de la population des crues. En particulier parce qu'il ne tient pas compte des crues complexes qui se produisent plutôt en milieu de saison des pluies.

Un biais est donc susceptible d'exister sur les conditions initiales. Mais il n'est pas possible d'en tenir compte avec notre méthode d'approche.

L'analyse statistique confirme le résultat fondamental de la différenciation des crues selon leur forme. Cette forme est évidemment liée au mode de fonctionnement du bassin pour la genèse de la crue, que nous tâcherons de débrouiller dans un prochain chapitre. Mais il ne semble pas possible de lier cette *forme* à une relation mathématique simple entre les variables habituelles de description des crues.

Une autre conséquence de ces résultats est la démonstration flagrante, si cela est encore nécessaire, de la non-validité dans notre milieu des descriptions du type *hydrogramme unitaire*. Elle soulève aussi l'ambiguïté de la définition statistique d'une crue d'étude qui peut, dans ces conditions, n'être qu'une pure représentation explicative sans aucune réalité physique. On retrouve ici les difficultés rencontrées dans l'analyse des résultats de simulation de pluies pour le calage du *modèle simulateur*.

4.2.5. Les crues de la station amont

Jusqu'à présent nous n'avons envisagé que les crues de la station principale. Des données complémentaires sont disponibles à la station amont qui draine la partie supérieure de notre bassin, ce qui correspond à une superficie sensiblement trois fois plus petite.

L'échantillon des crues de la station amont est établi à partir de notre échantillon d'étude de 30 crues de la station principale. Nous avons sélectionné les crues correspondantes de la station amont. Mais notre échantillon se réduit pour deux raisons :

- la station amont ne fonctionnait pas en 1984 (5 crues) ;
- il arrive fréquemment qu'une crue enregistrée à la station principale ne puisse pas être considérée comme telle à l'amont sur les critères que nous avons définis ; cela concerne les crues du 11 juillet 1985, du 12 septembre 1986, du 20 juin, du 17 août et du 29 septembre 1987.

L'analyse des crues de la station amont est réalisée finalement sur un échantillon de 20 individus.

4.2.5.1. Comparaison station amont et station principale

En première approche, il peut être intéressant de comparer les grandeurs de même type pour les mêmes crues aux deux stations. Les figures n°4.209 à 4.212 présentent ces comparaisons pour les temps de montée et les temps de base, pour la lame ruisselée et pour le débit maximal. Sur chacune de ces figures on a matérialisé sur les figures la première bissectrice et les points sont notés sous la forme du numéro de type de crue à la station principale. On constate :

FIG 4.209

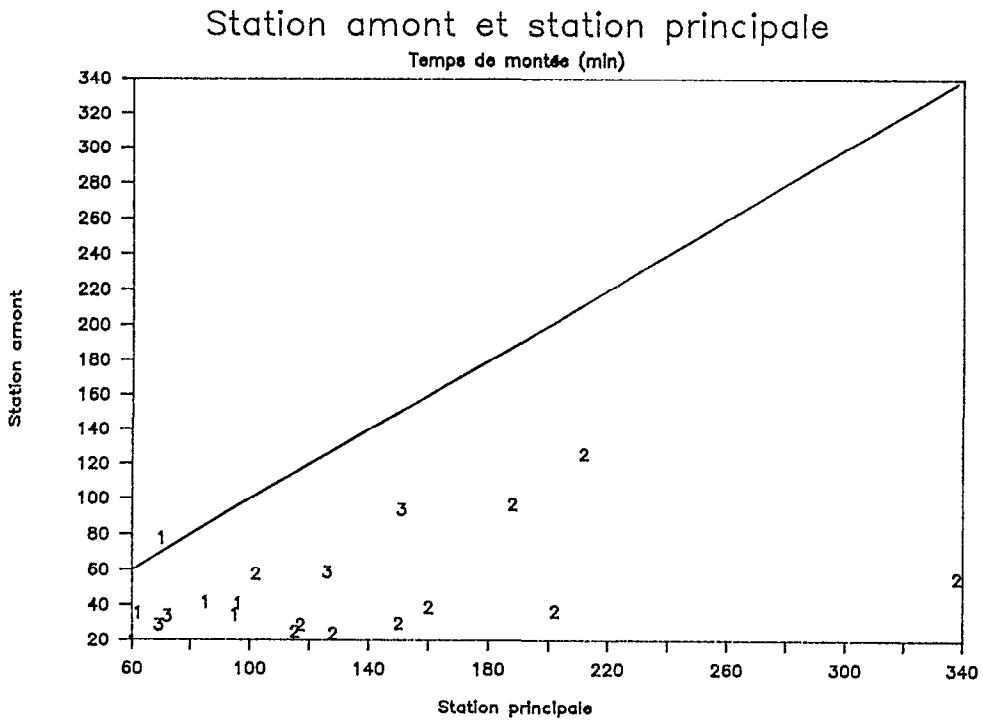


FIG 4.210

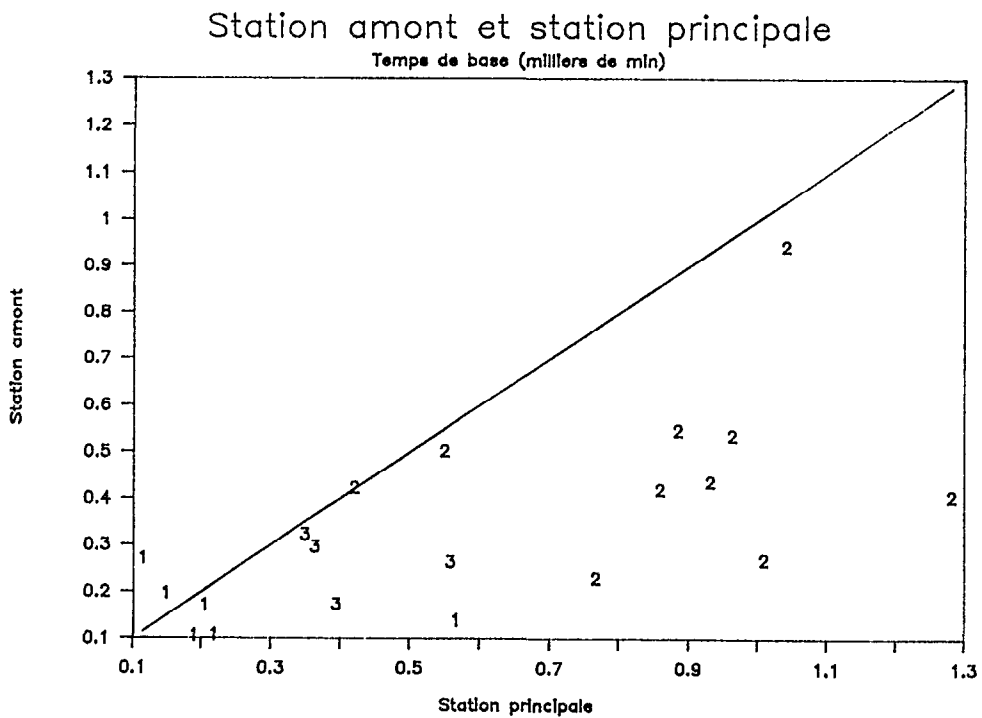


FIG 4.211

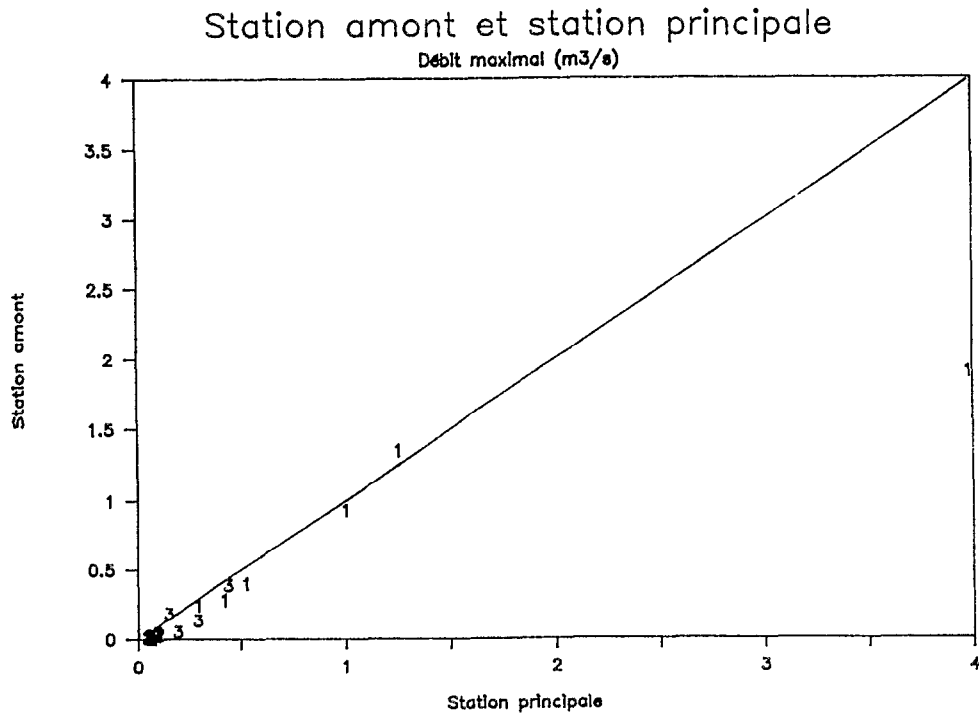
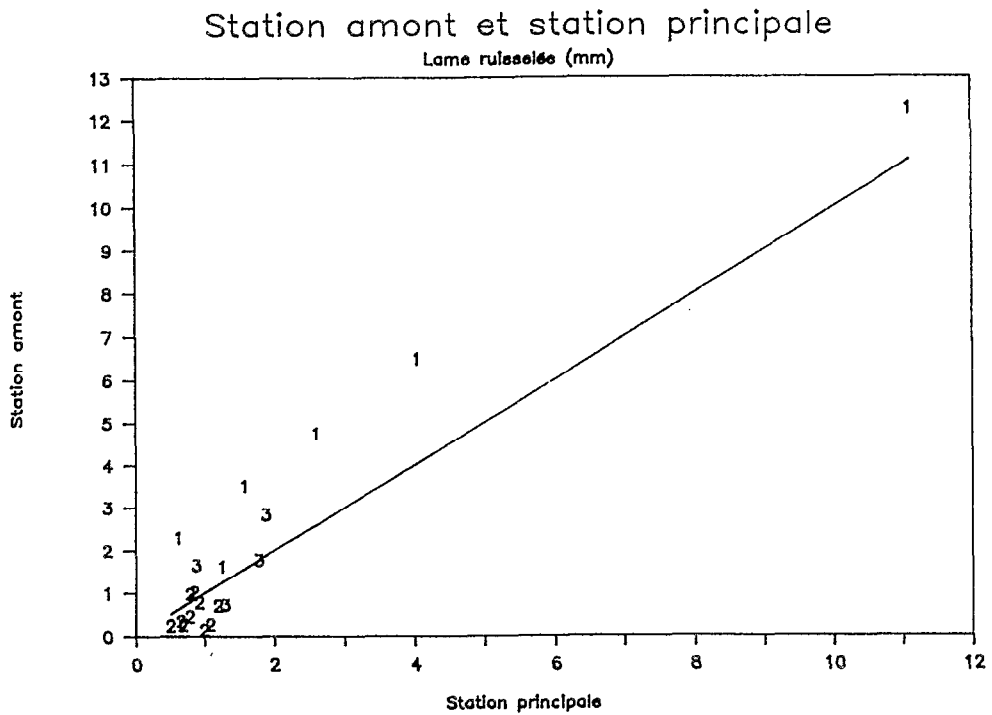


FIG 4.212



- *Temps de montée et temps de base :*

Les points sont dispersés, mais en général en dessous de la première bissectrice. Cela signifie que les temps de montée et de base sont presque toujours plus longs à la station principale. Mais la dispersion est telle qu'on ne peut tirer de relation particulière.

- *Débit maximal :*

Si on élimine le point correspondant à la crue du 18 août 1985, les couples de points s'ajustent remarquablement bien sur la première bissectrice ou quasiment :

$$Q_{MXR\text{ amont}} = 0,944 Q_{MXR\text{ principal}} \quad \text{avec } R = 0,953$$

Il est difficile de dire si ce résultat curieux correspond à une propriété particulière du bassin ou si cela est tout à fait fortuit. On peut cependant noter que la différence très nette observée pour la forte crue est sans doute due à un apport important de débit venant de la partie aval du bassin. On peut supposer que ce supplément de débit provient du système ravinatoire de rive droite ; malheureusement celui-ci n'était pas encore contrôlé au moment de cette crue exceptionnelle.

- *Lame d'écoulement rapide de crue :*

On note une assez grande dispersion des points pour les lames inférieures à 2 mm de part et d'autre de la bissectrice. Mais les points correspondant aux crues de type 1 à la station principale s'alignent remarquablement bien sur une parallèle à la première bissectrice :

$$LR_{\text{ amont}} = 0,980 LR_{\text{ principal}} + 1,7 \quad \text{avec } R = 0,981$$

Ce résultat (là aussi curieux et sans explication immédiate) signifie que pour les crues de ce type, la lame écoulée à la station amont est systématiquement supérieure d'un facteur constant à celle écoulée à la station principale.

4.2.5.2. *Forme des crues*

La procédure d'analyse est la même que pour les crues de la station principale après élimination des crues dont la lame ruisselée est inférieure à 0,5 mm, ce qui ramène notre échantillon à 14 individus.

On en trouvera le résultat sur les figures n° 4.213 à 4.215.

Comme pour la station principale on s'aperçoit que l'on peut discerner trois types de crues sur les hydrogrammes réduits à une lame écoulée de 1 mm :

- le type 1, avec un débit de pointe de l'ordre de 150 l/s et un temps de base d'environ 150 minutes ;
- le type 2, avec un débit de pointe de l'ordre de 30 l/s et un temps de base de 500 à 600 minutes ;
- le type 3, enfin, intermédiaire entre les deux.

On a représenté sur la figure 4.216 les hydrogrammes médians de chacun de ces trois types.

FIG 4.213

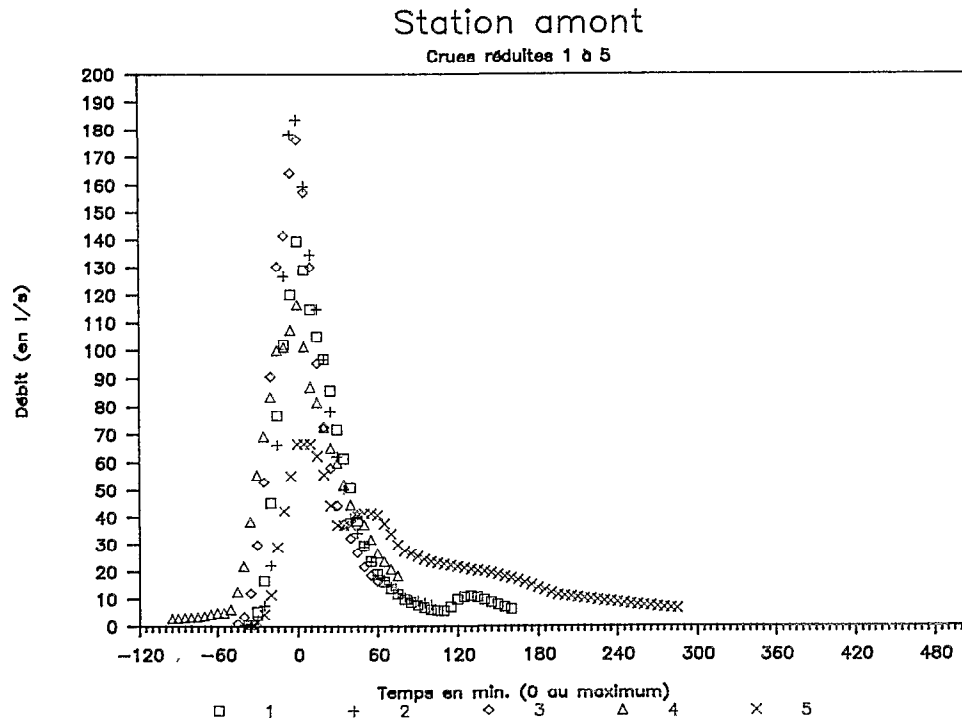
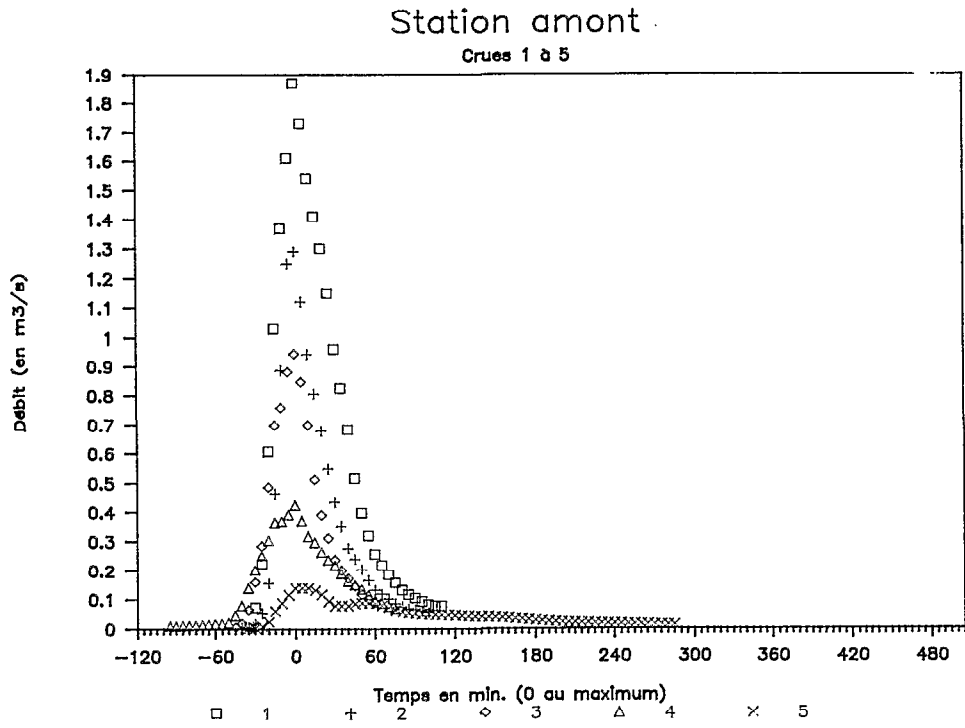


FIG 4.214

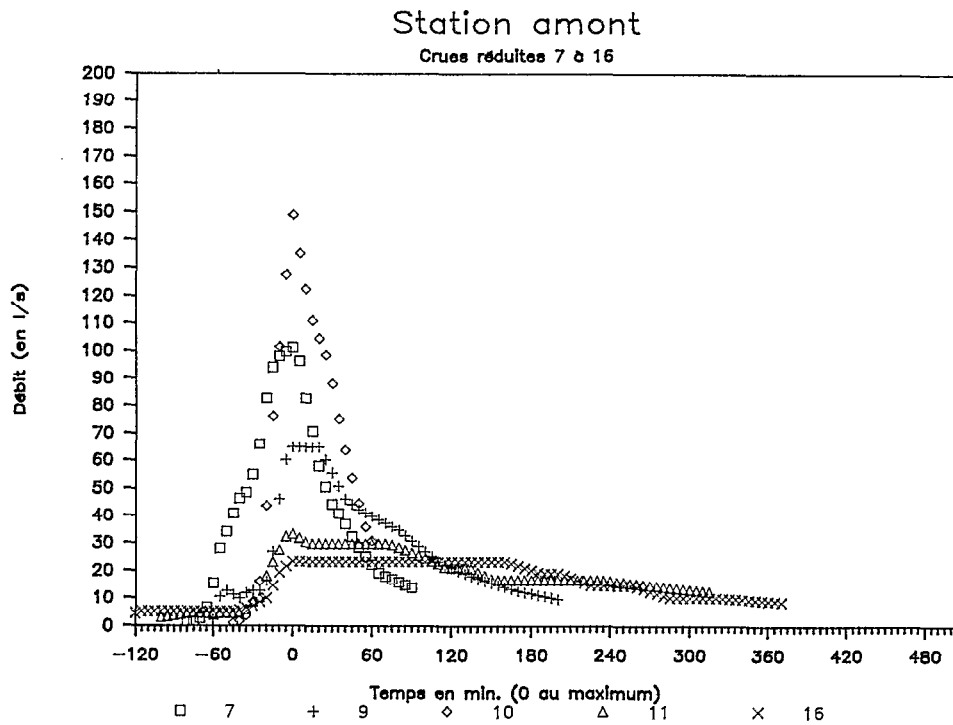
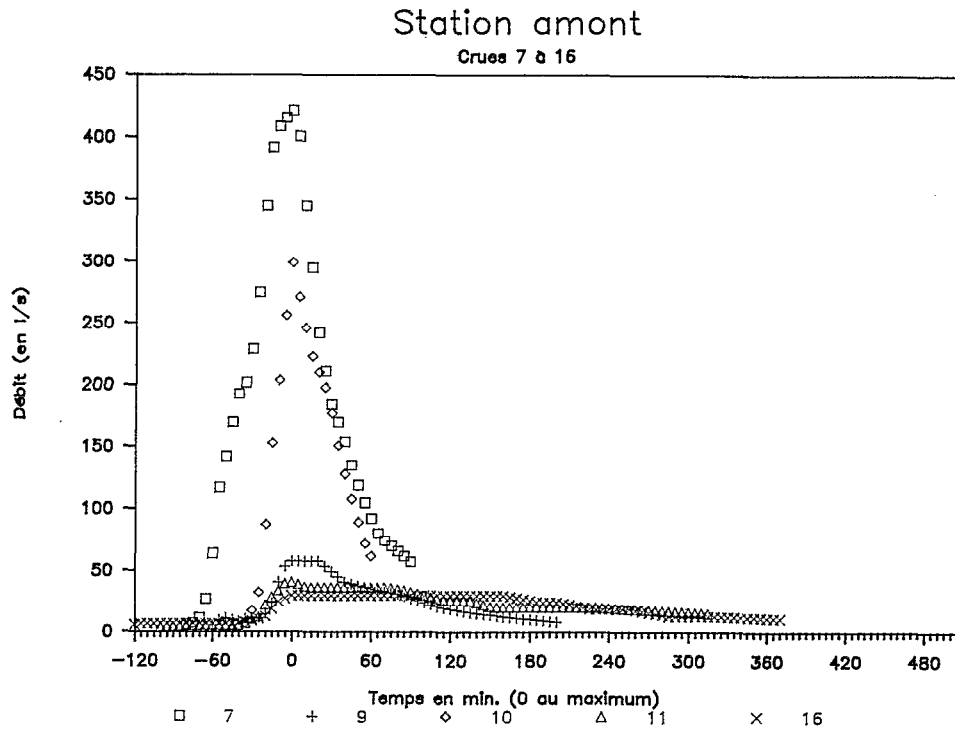
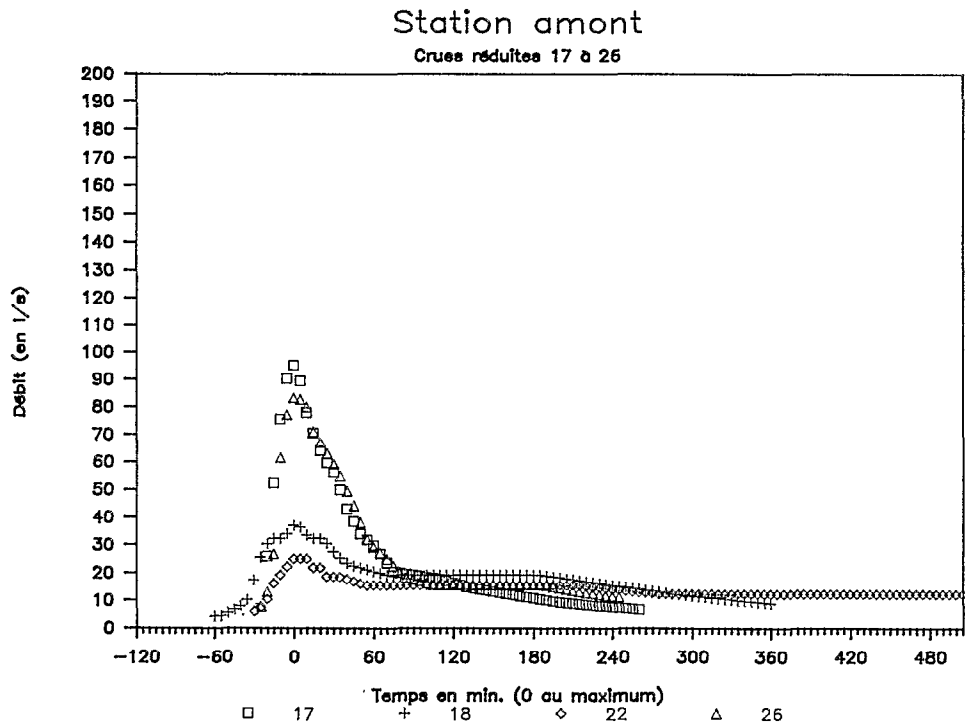
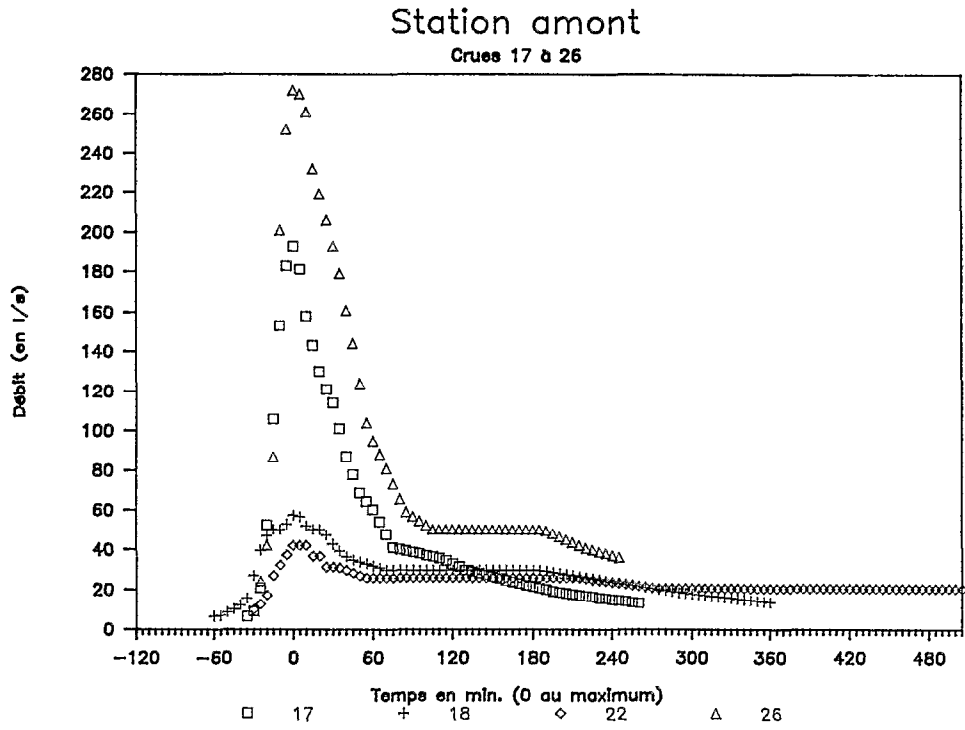


FIG 4.215



4.2.5.3. Comparaison des types de crues

Le tableau n°4.207 donne pour l'échantillon commun les affectations de types pour les crues enregistrées à la station principale et à la station amont.

Tableau n°4.207

Types des crues aux station principales et amont

numéro crue	date	type st. pr.	type st. am.
8506	27-Jul-85	1	1
8508	03-Août-85	3	1
8509	05-Août-85	1	1
8512	13-Août-85	2	2
8516	18-Août-85	1	1
8519	30-Août-85	3	3
8521	03-Sep-85	2	2
8523	04-Sep-85	1	3
8525	12-Sep-85	3	3
8608	13-Sep-86	3	3
8708	21-Août-87	1	1
8711	31-Août-87	2	2
8712	02-Sep-87	2	2
8721	27-Sep-87	1	1

Comme cela était prévisible il n'y a pas de contradiction entre le type de crue observée à la station amont et le type de crue observée à l'aval. Une petite interversion entre le type 1 et le type 3 existe, mais elle n'est due qu'à un écart d'appréciation (rappelons que la séparation en type de crue est uniquement dépendante du jugement du chercheur !); les classes 1 et 2 recouvrent bien les mêmes sous-ensembles disjoints de l'échantillon de crues.

Cette constatation constitue une pierre de plus à notre édifice qui tend à montrer que le comportement du bassin n'offre pas d'anomalie spatiale particulière et que son fonctionnement est le même dès que l'ensemble géomorphologique complet est pris en compte (ensemble des versants et du cours d'eau).

Pour terminer avec cette comparaison, les figures n°4.217 et 4.218 représentent la comparaison des hydrogrammes médians obtenus à la station principale et à la station amont pour les deux types extrêmes de crues. Pour que les formes soient comparables les débits ont été divisés par la superficie du bassin versant et sont présentés en *débits spécifiques instantanés*.

Aux artefacts de calcul près (ces hydrogrammes sont calculés à partir de moyennes de débits pour des pas de temps fixes et pour des hydrogrammes réels dont la durée n'est pas constante, ce qui explique certains décalages brusques sur les courbes) on observe un certain *étalement* de l'hydrogramme entre l'amont et l'aval; c'est le schéma habituel de la propagation de crue qui se produit selon le même schéma pour les deux types de crues. On peut noter enfin que pour les crues de type 1 le temps de passage entre maxima est compris entre 25 et 50 minutes, alors que pour les crues de type 2, ce temps se situent entre 60 et 100 minutes.

FIG 4.216

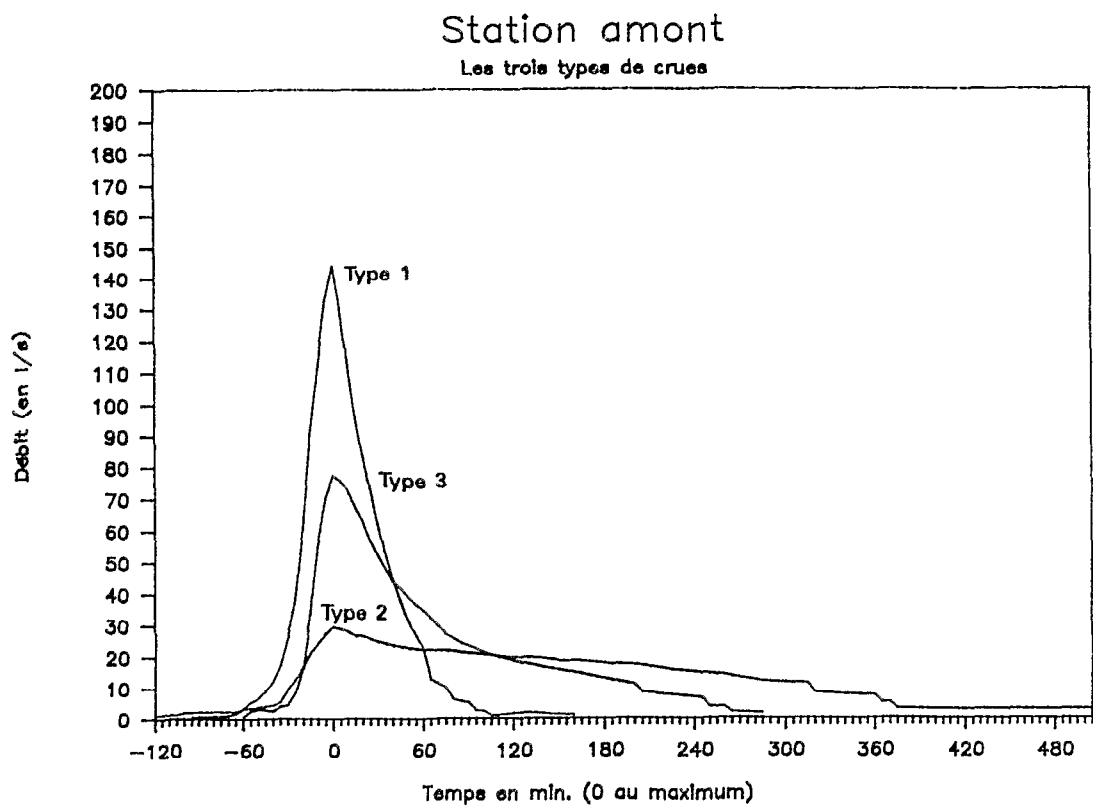


FIG 4.217

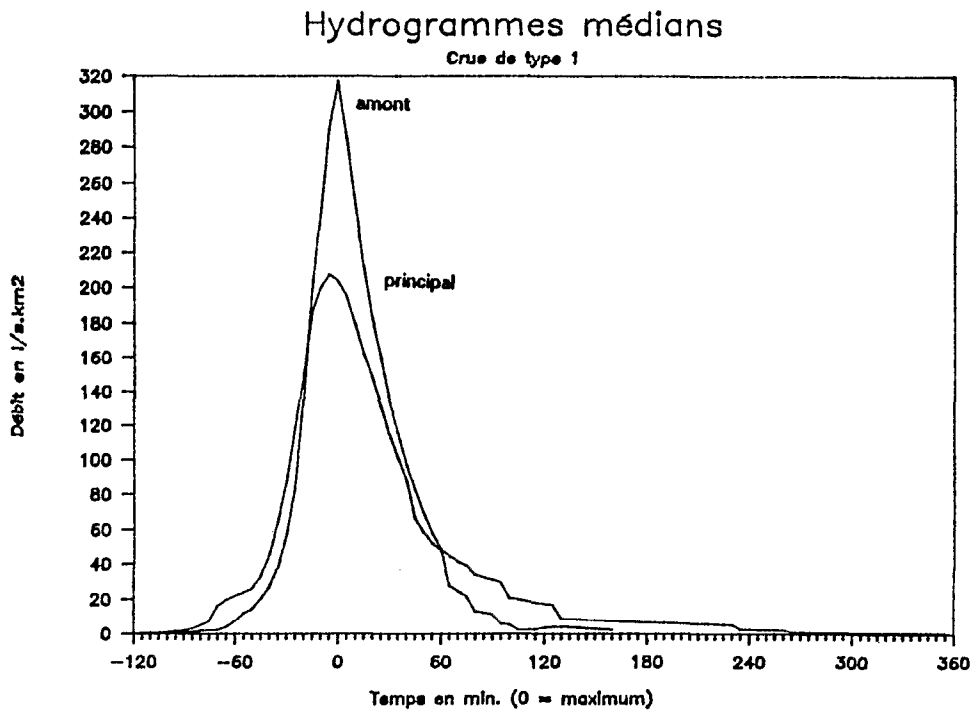
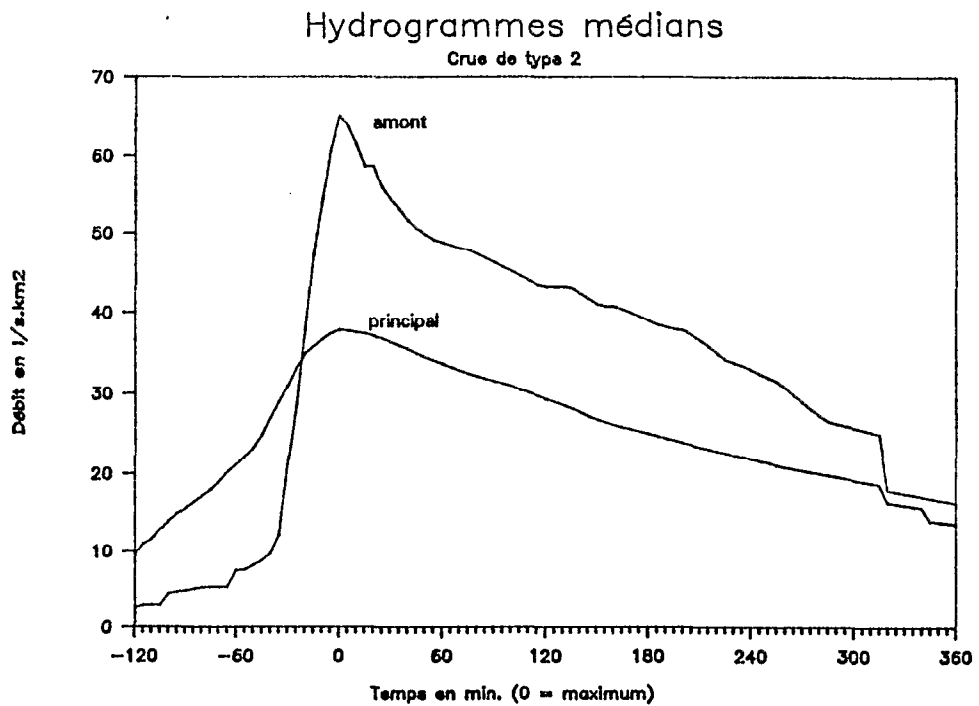


FIG 4.218



4.2.6. Analyse schématique

Notre propos dans ce mémoire est surtout d'essayer de comprendre le fonctionnement hydrologique du bassin et nous cherchons à développer une approche explicative, plutôt qu'une approche descriptive qui fait intervenir des variables externes au système étudié sans faire intervenir de données sur sa nature physique (Ambroise, 1978).

Cependant la réalité complexe de la formation des crues n'exclut pas une représentation schématique. Et il est toujours possible de trouver une relation simple entre la pluie moyenne sur le bassin versant et la lame d'écoulement rapide de crue. Traditionnellement, dans les travaux hydrologiques de l'ORSTOM cet aspect est largement développé (Dubreuil et al, 1972 ; Dubreuil, 1985) et des techniques diverses ont été utilisées. C'est à partir d'une telle représentation que l'on évalue les volumes et les débits de crues d'étude.

Cette relation entre pluie moyenne et lame de crue est assez souvent établie sur une fonction du type *puissance* dont l'expérience montre qu'elle peut être une bonne représentation (Chevallier et al., 1985). Un de ses principaux avantages est qu'on peut la faire passer par l'origine, la fonction étant réglée par deux paramètres faciles à ajuster. Fréquemment on essaie d'expliquer les écarts à cette courbe par d'autres variables comme, par exemple, les indices de précipitations antérieures.

A Booro-Borotou nous avons choisi de chercher à matérialiser cette relation averse-crue par une fonction puissance dont l'ajustement soit dicté par le *bon sens* plutôt que par une application brutale de méthodes systématiques, dont la justification n'a pas cessé d'être mise en cause dans les paragraphes qui précèdent. Il est clair que, dans ce type de relation, ce ne sont que les événements extrêmes qui sont intéressants. La fonction choisie s'appuie donc sur les points *supérieurs* de l'échantillon et constitue une *courbe enveloppe*. C'est l'esprit de la méthode qui avait été adoptée pour Korhogo et Sakassou ; mais dans les deux cas une correction était ensuite effectuée pour réduire les écarts à cette courbe en tenant compte d'indices d'humectation.

Le résultat est présenté sur la figure n°4.219. La courbe ajustée répond à l'équation :

$$LR = 0,000132 PM^{2.57}$$

Il n'est pas nécessaire de développer plus cette relation qui représente une image d'un comportement vraisemblable du bassin, soumis à des conditions initiales donnant lieu à des crues de type 1.

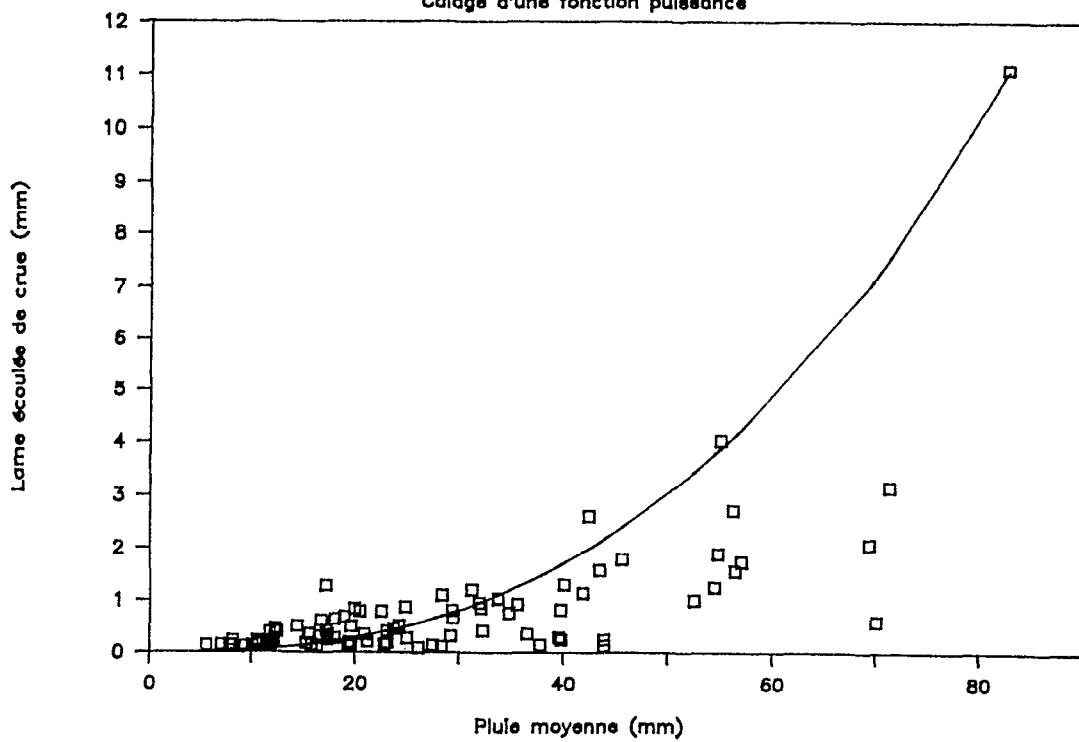
A partir de cette relation de comportement *vraisemblable* on peut chiffrer les crues d'étude.

A l'ORSTOM la caractérisation de ces crues d'étude a été un but en soi depuis fort longtemps (chapitre 1.1). Ce concept de *crue d'étude* est généralement associé à une période de retour statistique (le plus souvent décennale pour les petits ouvrages hydrauliques et les petits bassins versants inférieurs à 1000 km). On admet (ou plutôt, on définit) que la crue d'étude est la représentation d'une crue susceptible d'être engendrée par une averse type dont la fréquence de retour est fixée, *toutes les autres conditions étant moyennes par ailleurs*. C'est ce que l'on a appelé la méthode du *modèle global*.

FIG 4.219

Relation pluie moyenne – lame ruisselée

Calage d'une fonction puissance



L'évaluation de cette *crue d'étude* est nécessaire pour tous les aménagements et relève même souvent de la loi et des règles administratives. Il ne faut pas perdre de vue qu'elle ne reflète que rarement la réalité, mais surtout qu'elle n'est que le résultat d'une analyse du type explicatif (souvent exclusivement statistique) ne faisant pas intervenir le fonctionnement réel du système hydrologique.

On déduit de la relation $LR = f(PM)$ et de la forme de l'hydrogramme médian des crues de type 1, les caractéristiques de ces crues d'études (tableau n°4.208) obtenues pour diverses périodes de retour d'averses calculées au poste de Touba (chapitre 2.4). On a implicitement admis que l'homogénéité des averses et la faible superficie du bassin versant conduisent à un coefficient d'abattement de 1.

Tableau n°4.208

Caractéristiques des crues d'étude de différentes périodes de retour

Période de retour années	Pluie moyenne mm	Lame de crue mm	Coeff. de crue	Débit maximal m3/s
1	74,4	8,4	11,3 %	2,4
5	109	22,5	20,6 %	6,3
10	126	32,6	25,9 %	9,2
20	144	46,0	31,9 %	13,0
50	170	70,4	41,4 %	19,8
100	191	94,9	49,7 %	26,8

Les valeurs calculées pour des périodes de retour supérieures à 10 ans n'ont évidemment pas grand sens. Le jugement personnel du chercheur ne peut qu'apprécier la vraisemblance de ces résultats. On retiendra l'ordre de grandeur du coefficient de crue pour la crue d'étude correspondant à une averse décennale, environ 26 %, pour un débit spécifique maximal de 6,8 m3/s.km .

A Sakassou, Lafforgue donne 30 % et 6,3 m3/s.km pour le bassin est, 10 % et 0,7 m3/s.km pour le bassin ouest. A Korhogo, ces valeurs sont nuancées par la mise en culture progressive du bassin au cours de la période d'observation. Dans la phase de végétation naturelle dominante on trouve 32 % et 7,9 m3/s.km ; avec la mise en culture ces valeurs passent à 28 % et 6,7 m3/s.km . On note la remarquable similitude entre ces résultats et ceux obtenus à Booro-Borotou. Cette similitude va encore plus loin puisque, pour la crue d'étude correspondant à une averse centennale, on trouve pour la période à végétation naturelle de Korhogo un coefficient d'écoulement de crue de 48,8 % contre 49,7 % à Booro-Borotou !

4.3. LE TARISSEMENT

Le débit de base représente environ 80 % de l'écoulement total à l'exutoire du bassin versant de Booro-Borotou. Ce débit de base est fourni par le système hydrogéologique dès que les nappes sont suffisamment remontées pour alimenter le réseau hydrographique (essentiellement le cours d'eau principal). En saison des pluies il n'est guère possible d'étudier ce débit de base autrement qu'avec une approche globale annuelle ou mensuelle, telle qu'elle est proposée dans le chapitre 4.1. On aborde donc l'analyse de ces débits de base par l'étude du tarissement, dès que l'intervalle séparant deux averses est devenu suffisamment long pour que l'on observe la vidange dans le réseau hydrographique des réserves souterraines.

Mais cette vidange des réserves n'est pas uniquement due à un simple mécanisme de gravité et de drainage de nappe dans le souterrain ; elle est également fortement liée à l'évaporation, dans les zones où le niveau piézométrique est très proche de la surface (quelques centimètres) (Dosseur, 1964 ; Ambroise, 1988) et à la transpiration de la végétation qui puise dans cette nappe, si la profondeur du système racinaire le permet. On peut noter à ce propos qu'en région tempérée l'étude du tarissement est souvent abordée en faisant abstraction de cette évapotranspiration, ce qui est possible en choisissant des périodes d'études adéquates (l'hiver par exemple) où l'évapotranspiration peut être négligée (Coutagne, 1948 ; Dacharry, 1974).

4.3.1. Oscillations journalières des débits

La principale manifestation de cette évapotranspiration est la formation d'oscillations journalières des débits (notées pour la première fois en 1888 par King qui les attribuait aux variations de température, et analysées par Troxell dès 1936 ; d'après Callède, 1977).

Les figures 4.301 et 4.302 présentent deux périodes de 10 jours observées à Booro-Borotou, l'une portant sur les premiers jours du tarissement, l'autre sur la période qui précède immédiatement l'arrêt de l'écoulement.

Le minimum est observé entre 22 h et 0 h ; on note même dans le deuxième cas une interruption de l'écoulement pouvant durer plusieurs heures et ne reprendre que vers 6 h, juste avant le tarissement complet. Cette période d'écoulement alternatif, observée au cours des quatre années d'étude n'a jamais dépassé une semaine à 10 jours.

Le maximum se produit aux environs de 14 h.

Callède propose une analyse harmonique pour montrer que ces heures de maximum et de minimum dépendent de la longueur du cours d'eau affecté par le phénomène. Sur le bassin Est de Sakassou, plus petit que le bassin versant de Booro-Borotou, les minima se produisaient entre 18 h et 20 h et les maxima entre 8 h et 11 h (Lafforgue, 1982). Pour Korhogo (dont le bassin versant est plus grand qu'à Booro-Borotou) Callède note que le minimum se produit à 6h et le maximum à 22h.

L'amplitude est variable selon les jours, liée aux paramètres climatiques intervenant sur l'évapotranspiration. Sur nos deux exemples, on note que cette amplitude atteint près de 20 % du débit moyen au début du tarissement et jusqu'à 200 % du débit moyen avant que l'écoulement devienne alternatif. Dans sa revue, la valeur extrême donnée par Callède est de 32 % pour un petit bassin de Madagascar sans préciser s'il s'agit d'une valeur extrême ou d'une valeur moyenne (Ankaboka à Ambodiroka, 1,64 km). A Korhogo il note une différence relative de 5 % toujours sans préciser les conditions et, pour Sakassou Est, Lafforgue propose une figure d'où l'on peut déduire un résultat analogue à celui de Booro-Borotou lorsque l'écoulement est inférieur à 0,1 l/s (différence relative de l'ordre de 200 %). Il semble donc que les oscillations observées à Booro-Borotou ou à Sakassou soient particulièrement importantes, en tout cas d'un ordre de grandeur largement supérieur aux valeurs recensées par Callède.

FIG 4.301

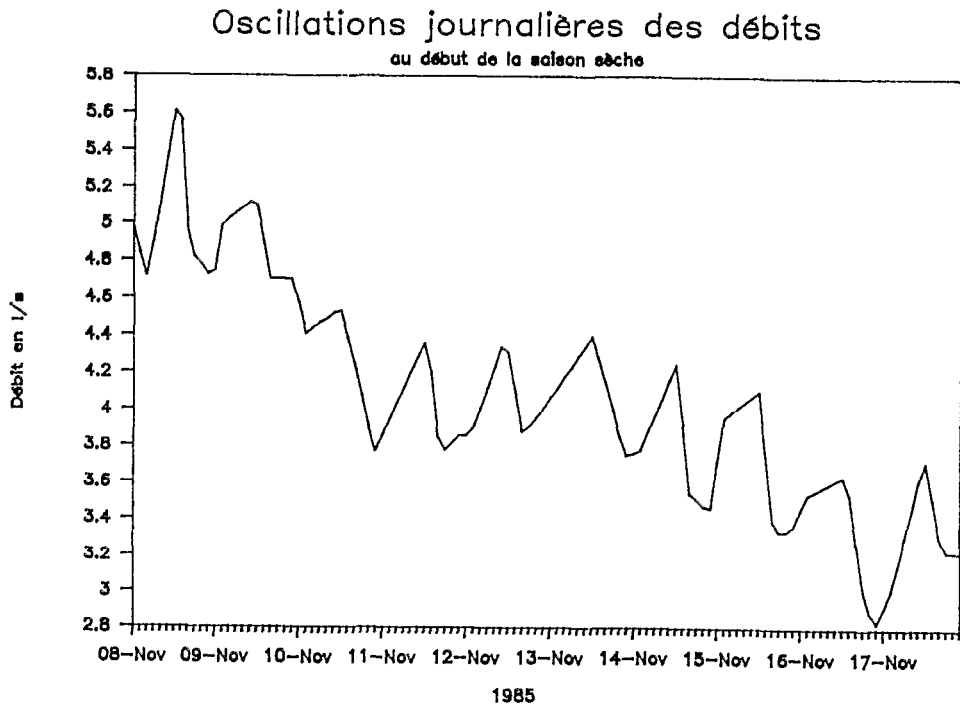
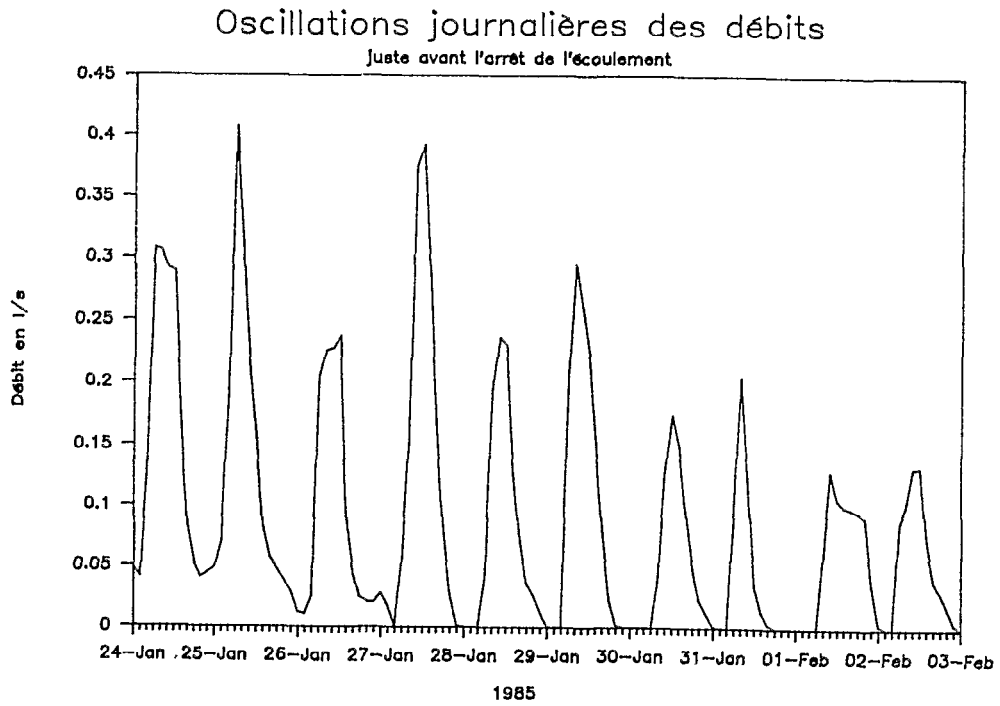


FIG 4.302



Ces oscillations affectent la totalité des écoulements en période de tarissement. La figure n°4.303 présente les débits en coordonnées normales et en coordonnées semi-logarithmique calculés avec un pas de temps constant de 2 heures. On s'aperçoit de la permanence de ces oscillations.

Parmi différentes solutions proposées pour évaluer les volumes évapotranspirés concernés par ces oscillations (voir Callède, 1977), celle de Dosseur mise au point dans le cadre de l'étude du bassin versant d'Alrance dans l'Aveyron (1964) est assez séduisante. Il évalue sur l'hydrogramme la part évapotranspirée au volume compris entre l'hydrogramme réel et l'hydrogramme théorique du tarissement en l'absence d'évapotranspiration.

En restant dans des ordres de grandeurs assez vagues et en assimilant les oscillations à des *dents de scie* symétriques de période 24 heures avec une amplitude moyenne de 15 % du débit moyen, on peut évaluer pour la période de notre graphique, du 1er novembre 1984 au 30 janvier 1985, que le volume évapotranspiré correspondrait à environ 7,5 % du volume écoulé, soit 0,3 mm, volume peu important en soi, mais équivalent à nombre de petites crues intervenant sur le bassin.

4.3.2. Le tarissement

Il existe plusieurs formulations pour évaluer le tarissement des cours d'eau. Elles se ramènent le plus souvent à deux lois (Roche, 1964 ; Castany, 1968), toutes deux réglées par un seul paramètre :

- la loi de Maillet :

$$Q = Q_0 e^{-a t}$$

- la loi de Tison (1960) :

$$Q = Q_0 / (1 + a t)^2$$

où :

Q_0 , est le débit au début de la période de tarissement

t est le temps en jours séparant Q_0 de l'instant où l'on évalue le débit Q .

L'approche utilisée par Ambroise sur le bassin versant du Ringelbach dans les Vosges (1988) combine ces deux lois et nous a paru intéressante à appliquer à Booro-Borotou.

4.3.2.1. Périodes sans précipitations

Sur les quatre années d'étude à Booro-Borotou, nous avons recherché en phase de tarissement (à partir du 1er septembre et jusqu'à l'arrêt des écoulements) toutes les périodes de plus de 5 jours sans précipitation. Lorsque ces périodes sont particulièrement longues elles ont été découpées en sous-périodes de 20 jours au plus, pour tenir compte d'éventuelles modifications du milieu naturel. Cet échantillonnage conduit au tableau n°4.301.

FIG4.303

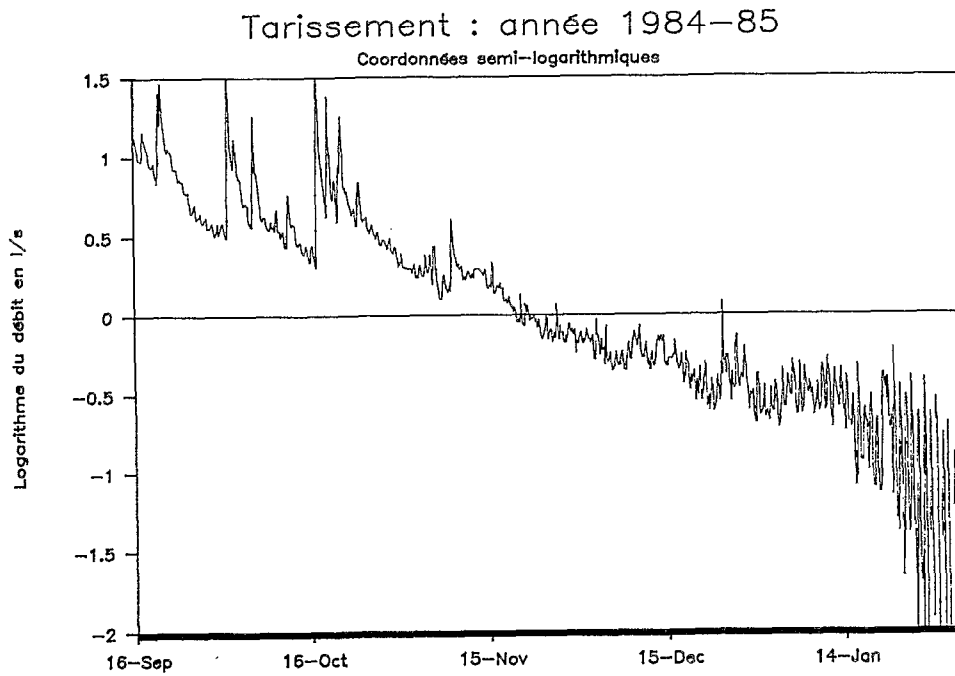
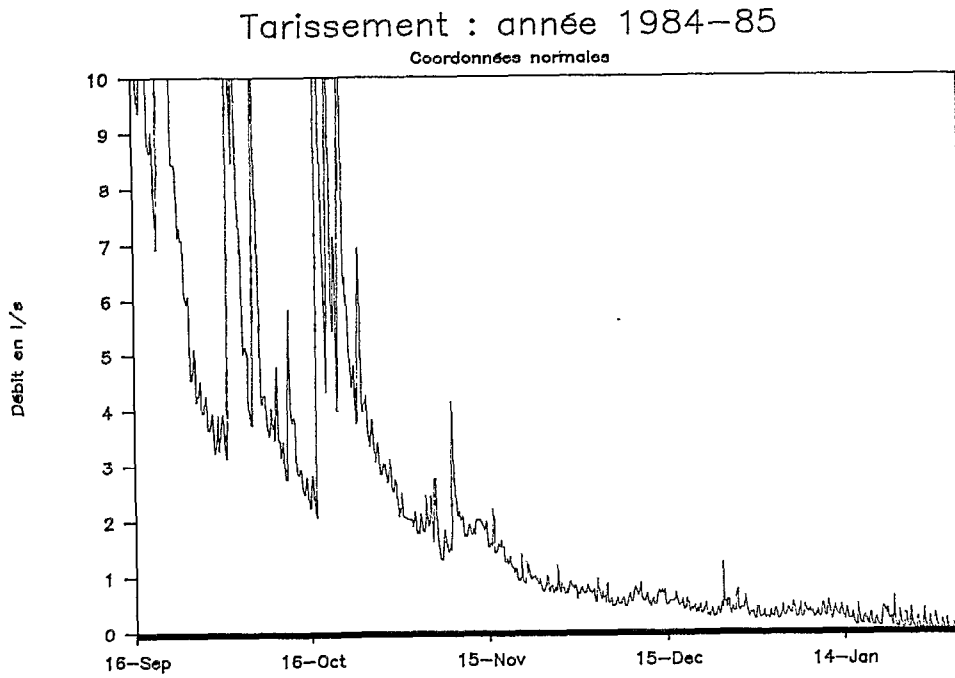


Tableau n°4.301

Inventaire des périodes sans précipitation entre 5 et 20 jours consécutifs.

Période	nbre jours sans pluie	Q déb l/s	Q fin l/s	α 1/j	remarque
24/10/84 - 07/11/84	14	5,4	1,55	0,089	
13/11/84 - 03/12/84	20	1,96	0,72	0,050	
03/12/84 - 23/12/84	20	0,72	0,325	0,040	
23/12/84 - 12/01/85	20	0,325	0,345	-0,003	feu
12/01/85 - 01/02/85	20	0,345	0,061	0,087	arrêt
06/10/85 - 12/10/85	6	29	10,7	0,166	
17/10/85 - 27/10/85	10	14,7	5,4	0,100	
02/11/85 - 16/11/85	14	10,2	3,36	0,079	
19/11/85 - 10/12/85	20	3,65	1,55	0,043	
10/12/85 - 30/12/85	20	1,55	1,2	0,013	feu
30/12/85 - 19/01/87	20	1,2	0,513	0,042	
19/01/85 - 01/02/85	13	0,513	0,351	0,029	
07/02/86 - 16/02/86	10	0,593	0,273	0,078	
20/02/86 - 25/02/86	5	0,653	0,353	0,123	
02/03/86 - 07/03/86	5	0,512	0,397	0,051	
10/03/86 - 15/03/86	5	2,7	0,491	0,341	
19/03/86 - 30/03/86	11	1,06	0,281	0,121	
01/04/86 - 14/04/86	12	0,252	0,05	0,135	arrêt
15/10/86 - 20/10/86	5	1,09	0,74	0,077	
08/11/86 - 28/11/86	20	3,64	0,754	0,079	
28/11/86 - 18/12/86	20	0,754	0,433	0,028	
18/12/86 - 01/01/87	20	0,754	0,254	0,054	
07/01/87 - 16/01/87	9	0,254	0,251	0,001	feu
18/01/87 - 25/01/87	7	0,432	0,024	0,413	arrêt
20/10/87 - 26/10/87	6	7,6	3,8	0,116	
29/10/87 - 09/11/87	12	3,35	1,57	0,063	
17/11/87 - 03/12/87	17	2,02	0,874	0,049	
07/12/87 - 27/12/87	20	1,25	0,358	0,063	
27/12/87 - 16/01/88	20	0,358	0,15	0,043	feu
16/01/88 - 30/01/88	14	0,15	0,026	0,125	arrêt

Pour l'évaluation des débits nous avons adopté les débits moyens journaliers de façon à nous affranchir des oscillations journalières. Pour être parfaitement rigoureux et suivre les analyses exposées par Callède, il aurait fallu travailler avec les débits maximaux observés chaque jour. Il s'est cependant posé un problème d'homogénéité dans la qualité de l'acquisition des débits de basses eaux qui n'est pas uniforme sur la période d'étude. C'est la raison qui nous a fait abandonner l'idée de travailler sur les maxima journaliers instantanés qui n'étaient pas toujours disponibles. On peut penser que le raisonnement et les valeurs numériques ne sont guère différents avec les débits moyens journaliers.

Dans le tableau n°4.301, pour chacune des périodes sélectionnées sont données les débits de début et de fin de la période et le coefficient de la loi de Maillet ajustée sur la période.

Les figures n°4.304 à 4.307 présentent les courbes de tarissement (des débits moyens journaliers) en coordonnées semilogarithmiques, associées aux courbes de variation des niveaux

piézométriques sur trois tubes du bas fond répartis de l'amont vers l'aval du bassin versant (PZ 4, PZ 11 et PZ16) et à un diagramme des précipitations journalières.

4.3.2.2. Formulation du tarissement

Sur le tableau n°4.301 on note tout de suite que les coefficients de Maillet offrent une assez grande dispersion. On peut admettre que les causes de variations de ces coefficients sont de deux ordres :

- une variation liée à la loi de vidange du réservoir ; c'est à dire une composante de type horizontal fixée par la géométrie du bassin.
- une variation liée à la dynamique saisonnière et même quotidienne du milieu naturel qui se manifeste par une importance plus ou moins grande de l'évapotranspiration (composante verticale).

Comme il n'est pas possible, dans le contexte climatique de Booro-Borotou, de faire abstraction de la composante verticale, la construction graphique d'une courbe de tarissement *optimale* a été entreprise avec la méthode suivante :

1. Rangement de l'échantillon par ordre décroissant de débit initial.
2. Tracé du premier segment de droite de Maillet en coordonnées semi-logarithmiques.
3. Tracé du segment suivant en prenant appui sur le segment précédent pour caler le point d'origine.
4. Et ainsi de suite, en reprenant toujours le point d'origine du nouveau segment sur le segment déjà tracé qui permet de trouver la durée de tarissement la plus longue ou, autrement dit, qui possède le coefficient de Maillet le plus faible.
5. Dans cette construction on ne tient pas compte de segments particuliers qui sont, d'une part, ceux correspondants à des périodes de feux de brousse sur le bassin versant et, d'autre part, les segments se terminant par l'arrêt complet de l'écoulement le jour suivant.

Cette méthode conduit à la figure n°4.308. La courbe enveloppe obtenue se cale en faisant également abstraction des segments particuliers (feu et arrêt de l'écoulement) sur une loi de tarissement de Tison d'équation :

$$Q = Q_0 / (1 + 0,095 t)^2 \text{ en l/s}$$

FIG 4.304

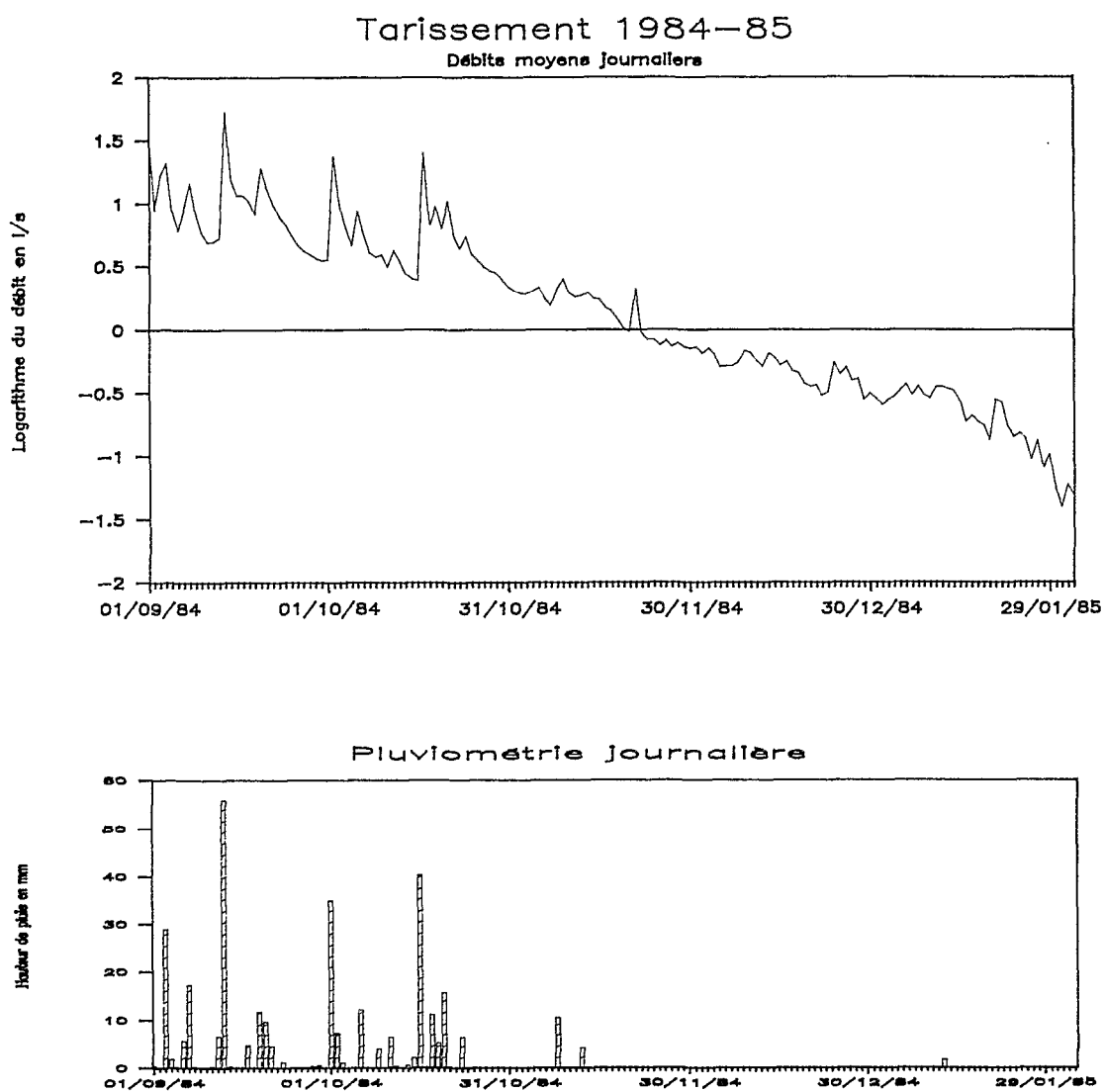


FIG 4.305

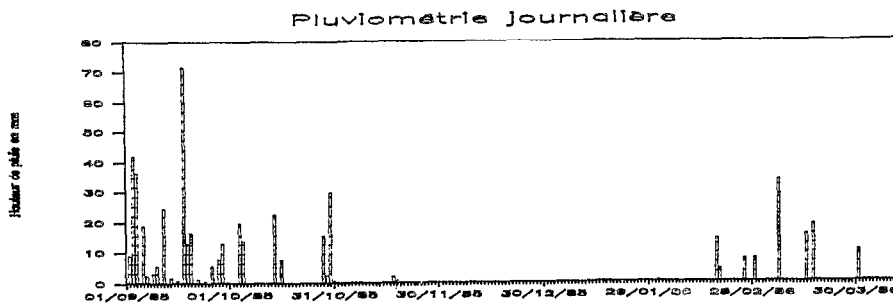
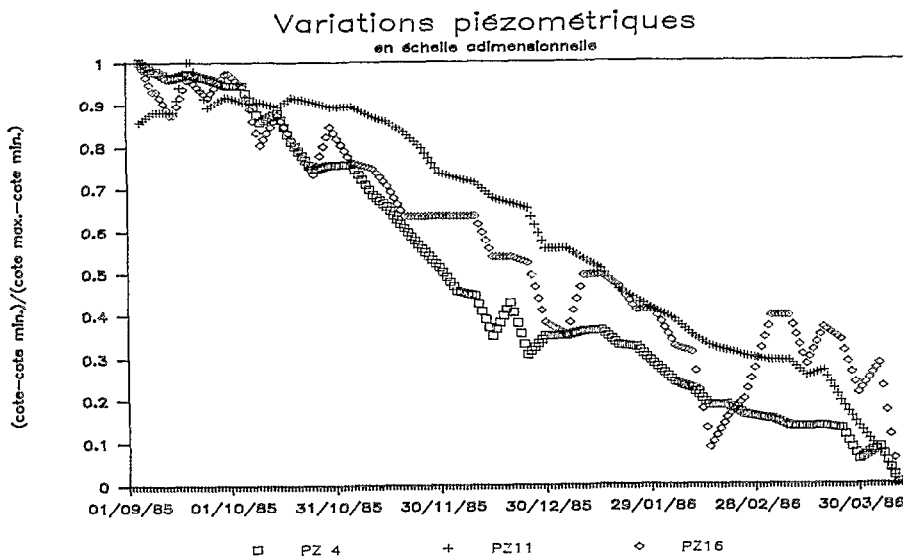
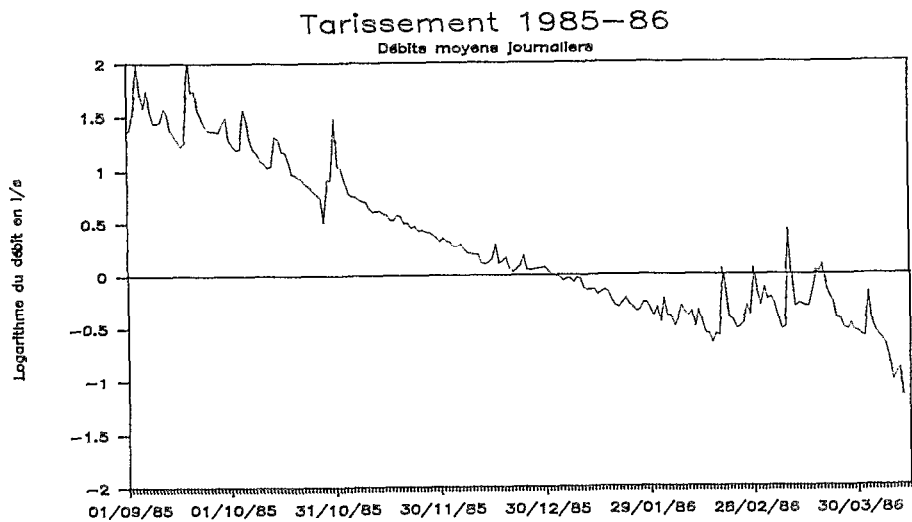


FIG 4.306

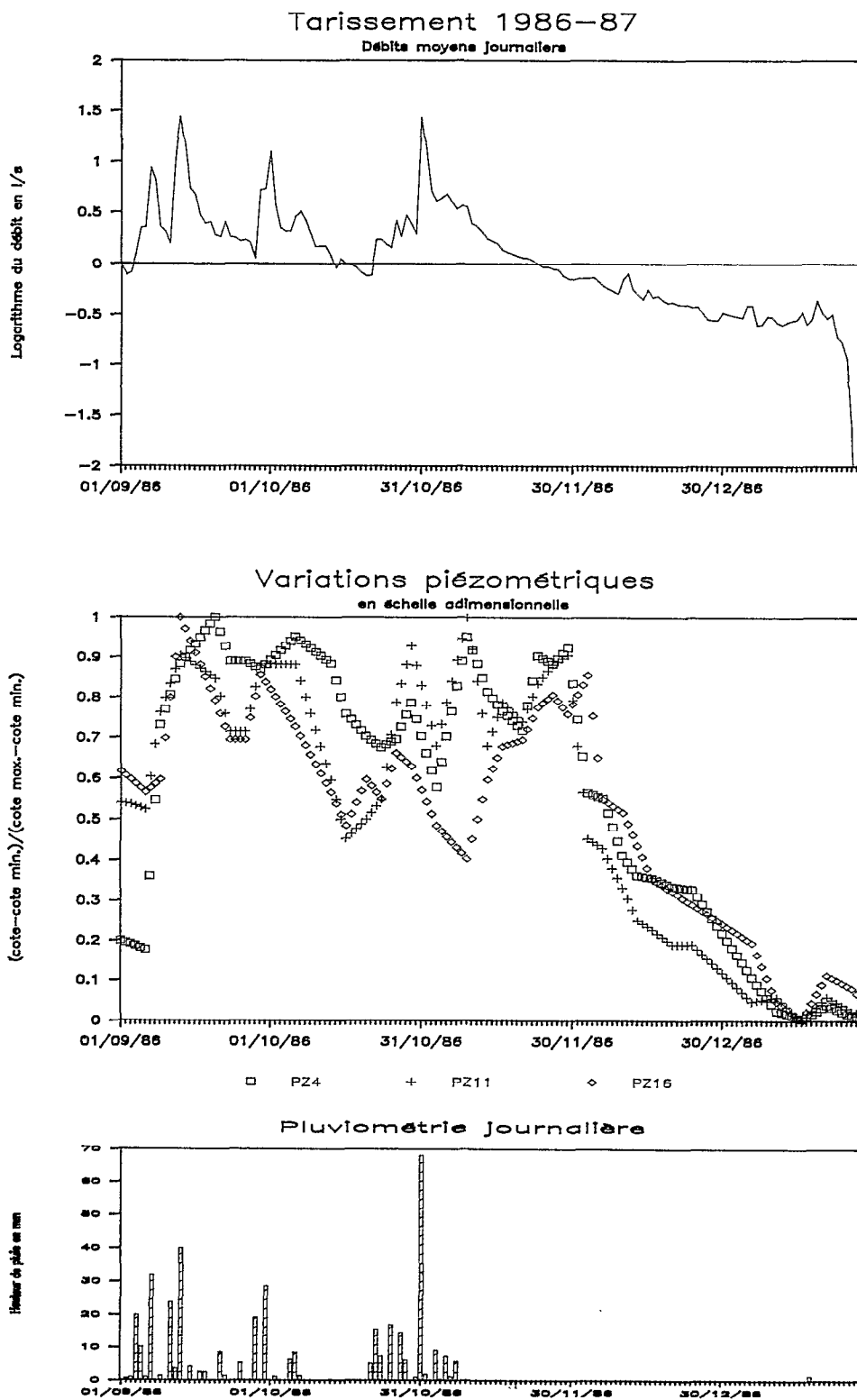


FIG 4.307

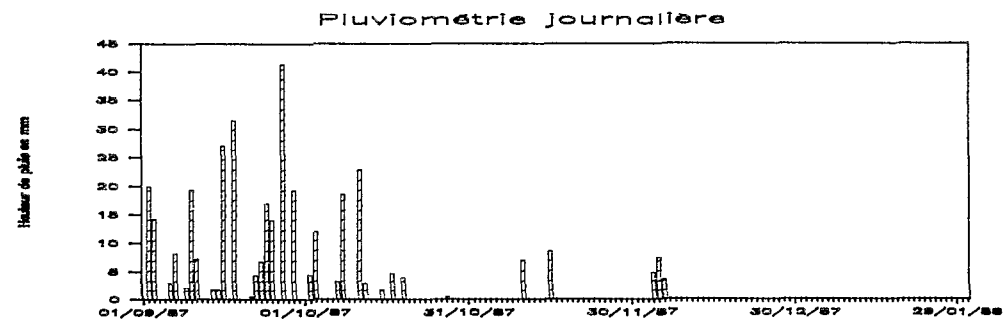
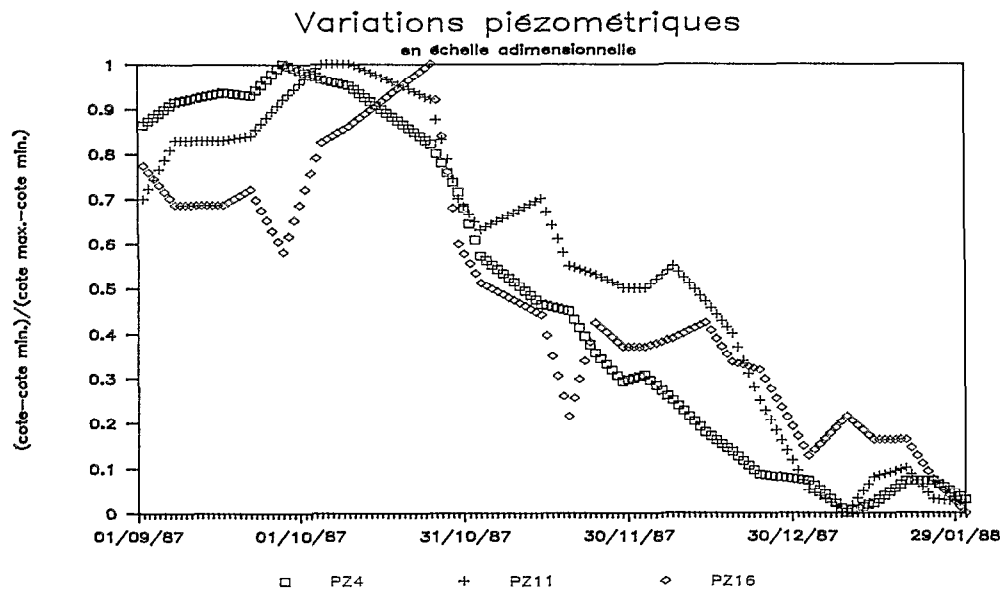
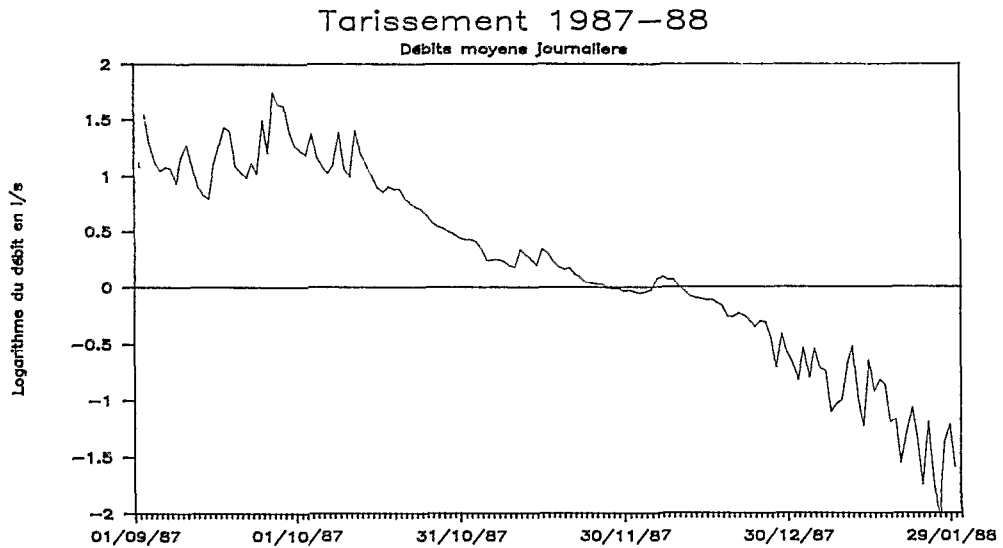
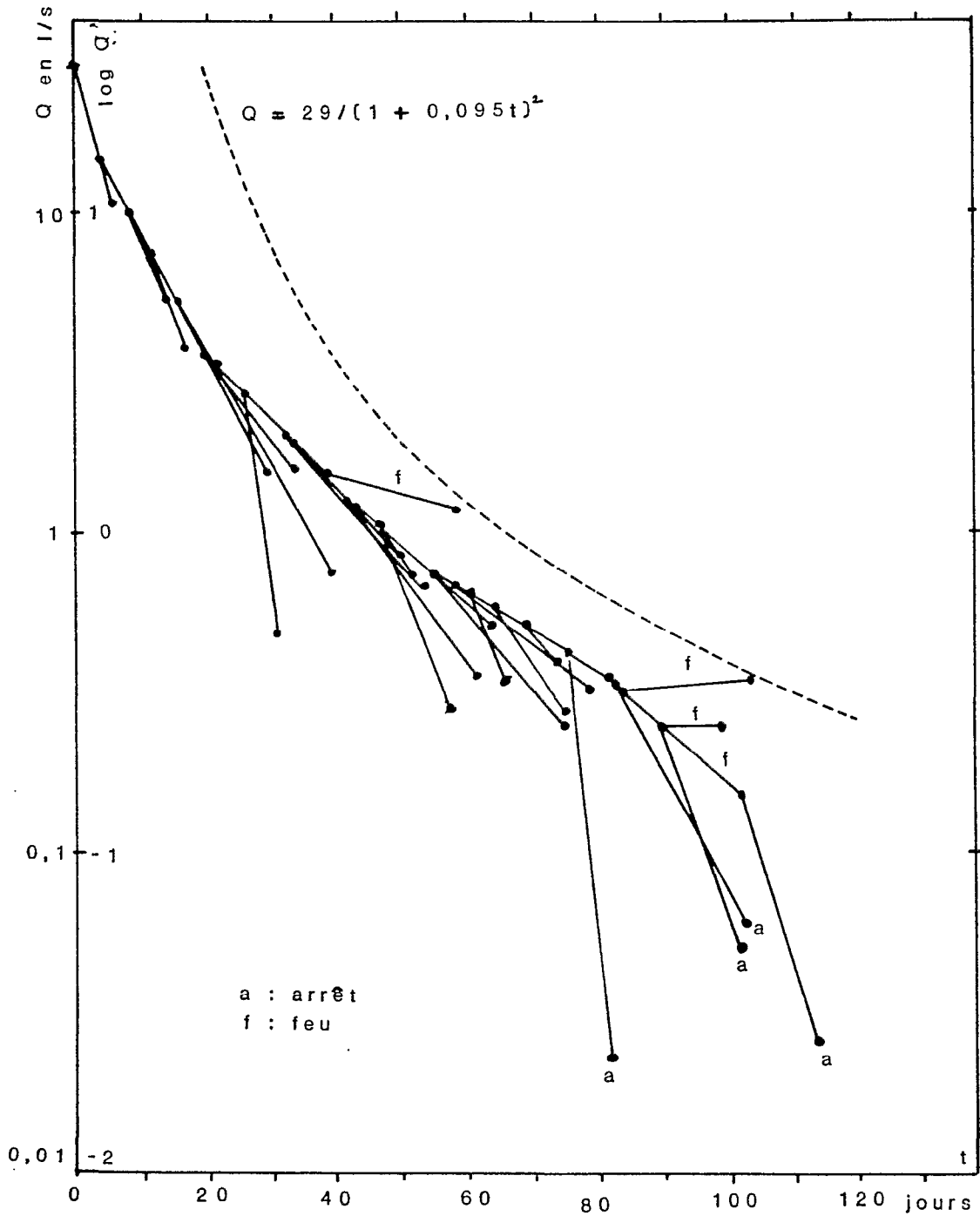


FIG 4.308

TARISSEMENTS OBSERVES



La technique utilisée pour construire cette courbe fait que le résultat obtenu correspond à un tarissement idéal en se mettant dans les conditions minimales d'intervention de la composante verticale. C'est-à-dire que sans pouvoir supprimer l'effet de l'évapotranspiration cette représentation le minimise. La conséquence immédiate est qu'une courbe de tarissement réelle suivra un cheminement inférieur (ou égal) et donc plus rapide.

Par intégration de cette courbe (Castany, 1968) on peut évaluer les réserves emmagasinées susceptibles de s'écouler :

$$V = (86,4 Q_0 / 0,095) / (1 + 0,095 t) \text{ en m}^3/\text{s}$$

Pour le débit initial Q_0 de 29 l/s qui a servi à la construction de la courbe, le volume initial V_0 est de 26300 m³ et il représente donc une lame de 19,3 mm susceptible de s'écouler en l'absence de nouveaux apports.

Le débit de base maximal atteint en saison des pluies est, d'après les hydrogrammes observés, proche de 60 l/s en 1985, ce qui représenterait, en extrapolant la loi de Tison, une lame de 40 mm.

4.3.2.3. L'effet des feux de brousse

Sur certains des segments sélectionnés on s'aperçoit que la vitesse de tarissement devient très faible et même parfois s'inverse et on peut noter une augmentation du débit en l'absence de précipitation. Sur ces mêmes périodes on peut noter (voir figures n°4.305 à 4.307) une stabilité, voire une remontée du niveau piézométrique dans le bas-fond.

Ces périodes correspondent très précisément aux feux de brousse allumés par les villageois qui couvrent la quasi totalité de la superficie du bassin versant en étapes successives et se produisent sur une durée d'à peu près 3 semaines (d'où notre découpage de l'échantillon en période de 20 jours au plus).

Sans avoir fait de mesure particulière pour étayer nos hypothèses on peut penser que l'effet du feu est double :

- Il modifie de façon presque instantanée l'albédo de surface du sol ce qui a pour conséquence une augmentation rapide de l'évapotranspiration potentielle.
- Il détruit toute la végétation herbacée et partiellement la végétation ligneuse du bas-fond dont le système racinaire puise directement dans la partie de la nappe qui fournit le débit de base immédiat.

On peut pour expliquer le changement de régime de tarissement faire un raisonnement analogique en comparant notre système à une pompe dont le régime est bien établi imposant un rabattement à la nappe dans laquelle elle intervient. A un instant donné et pratiquement simultanément, on augmente le régime de la pompe et le tube d'aspiration se brise. Le résultat est instantané : le moteur s'emballé et le système se désamorçé. La nappe perd le régime permanent de rabattement et trouve un équilibre piézométrique à un niveau supérieur.

Sans pouvoir argumenter plus avant pour défendre notre thèse (suggérée par une discussion personnelle avec Ambroise, 1988, et étayée par une autre discussion avec Cornet), nous ne voyons pas d'autre explication à ces phénomènes non périodiques de remontée de niveau piézométrique dans les bas-fonds et à ces augmentations du débit de base en l'absence totale de précipitation.

4.3.2.4. Tarissement rapide

Sous l'effet de l'évapotranspiration, des tarissements beaucoup plus rapides que celui décrit par notre représentation idéale se produisent. Il y en a de deux sortes : ceux qui se produisent au cours de la période de tarissement et ceux qui conduisent à l'arrêt de l'écoulement.

Les premiers sont évidemment dus à des conditions climatiques particulièrement favorables à l'évapotranspiration. On note les décroissances extrêmement rapides observées en février et mars 1986. Elles correspondent à un double concours de circonstances : d'une part, c'est la période où la

demande évapotranspiratoire est la plus intense ; d'autre part, des pluies précoces ont favorisé un redémarrage de la végétation après les feux, végétation verte en phase de croissance que l'on ne trouve pas dans les phases traditionnelles de tarissement, forte consommatrice d'ETR.

Lors des périodes précédant immédiatement les crues, le tarissement s'accélère. C'est le moment des écoulements alternatifs où les phénomènes d'évapotranspiration prennent une importance prépondérante sur l'écoulement gravitaire. Ce déséquilibre entraîne une modification fondamentale dans les processus d'écoulement. En termes de contrainte il devient plus facile à l'eau de sortir du réservoir sol par évapotranspiration que par écoulement gravitaire. Il est logique que dans ces conditions le tarissement soit beaucoup plus rapide.

4.3.2.5. Sakassou et Korhogo

Pour la comparaison il est intéressant de mentionner les méthodes et les résultats des deux études qui nous ont servi de référence jusqu'à présent sur les bassins de Korhogo et de Sakassou.

* *Korhogo* (Camus et al., 1976)

L'étude du tarissement est effectuée sur les lames mensuelles de l'écoulement de base, sur lesquelles on applique une représentation du type Maillet :

$$H_b = H_{b_0} e^{-k t} \text{ en mm}$$

H_{b_0} est la lame écoulée du mois de novembre et le coefficient k médian est de 0,0095.

Ces résultats ne sont pas du même ordre de précision et ne peuvent pas être comparés avec ceux de Booro-Borotou.

* *Sakassou* (Lafforgue, 1982)

La méthode a consisté comme à Booro-Borotou à sélectionner un certain nombre de périodes *succédant immédiatement à la toute dernière des averses de la saison des pluies* et à calculer pour ces périodes les coefficients des segments de Maillet correspondants. Pour des périodes de 11 à 25 jours les coefficients de Maillet sont compris entre 0,117 et 0,335 (médiane = 0,191) sur le bassin versant Est. Pour des périodes de 5 à 17 jours ils sont compris entre 0,259 et 0,538 (médiane = 0,329) sur le bassin versant Ouest.

Les valeurs observées sur le bassin Est sont légèrement supérieures, mais restent comparables à celles observées à Booro-Borotou.

4.4. LE FONCTIONNEMENT

Il faut maintenant rassembler toutes les informations, tous les résultats et toutes les analyses exposées jusque là dans ce mémoire pour essayer de comprendre le *fonctionnement hydrologique* de notre bassin. Par fonctionnement hydrologique nous entendons la recherche des différents chemins que suit l'eau pour parvenir à l'exutoire du bassin versant. Nous nous proposons d'aborder ce problème sur le bassin de Booro-Borotou en l'introduisant à partir de l'analyse de Lenoir (1977) et de Lafforgue (1982) sur les bassins versants de Sakassou. Une analyse des processus d'écoulement à Booro-Borotou sera ensuite tentée sur un versant type et étendue à l'ensemble du bassin versant

4.4.1. Les bassins versants de Sakassou

Les bassins versants de Sakassou présentent, nous l'avons vu, de nombreux points communs avec le bassin versant de Booro- Borotou. Nous reprenons dans ce paragraphe les conclusions des travaux de Lenoir (1977) repris par Lafforgue (1982) en les citant largement.

Rappelons que ces bassins situés dans le centre de la Côte d'Ivoire sont situés l'un sur des orthogneiss (Bassin Est) et l'autre sur des migmatites (Bassin Ouest). La figure n°4.401 présente une coupe schématique de ces bassins et le lecteur se reportera au rapport de Lenoir pour une description détaillée de ces séquences-types.

4.4.1.1. Fonctionnement des nappes et influence sur le régime hydrologique

La connaissance du régime des nappes est un des points préalables à traiter et nous avons tenté de montrer comment se faisaient les mécanismes sur un cycle hydrologique. Deux grandes unités ont été distinguées, elles se rapportent à nos deux bassins Est et Ouest. Dans les deux cas, l'alimentation débute toujours dans les parties basses de la topographie, près des talwegs ou le long des bas de versant.(...)

Aux premières averses de l'année, la remontée de la nappe intervient assez vite dans ces portions de bassin mais les effets sont circonscrits à un faible périmètre. Dès que les averses deviennent plus importantes et surtout plus rapprochées, le périmètre influencé par la remontée s'élargit très vite de part et d'autre de l'axe de drainage superficiel.(...)

Les années à pluviosité déficitaire la recharge ne peut être complète et sous les sommets d'interfluve du bassin Est les effets visibles sur la piézométrie sont provoqués par la seule alimentation latérale circulant au sein des altérites à structures conservées. C'est là un type de fonctionnement qui n'est certainement pas particulier au terroir de Sakassou. (...)

D'après la configuration que prend le socle au niveau du front d'altération suivant le type de végétation forestière (bassin Ouest) ou savane (bassin Est), nous avons encore deux cas possibles. Le débit de base au marigot est entretenu par la partie de la nappe située au dessus de l'horizon où les feldspaths sont conservés ; si la surface piézométrique est en dessous, la nappe est consommée par évapotranspiration.(...)

Pendant la saison pluvieuse, la nappe met un certain temps à se mettre en équilibre pour atteindre son profil idéal. Dès que le niveau remonte dans les puits de versant, l'alimentation du marigot est assurée mais la cote atteinte dans les puits est élevée par rapport aux faibles débits du marigot. Ce phénomène tient à ce qu'une partie de la nappe seulement influence le débit dans le réseau hydrographique, l'autre sert à la saturation des altérites sous les interfluves.(...)

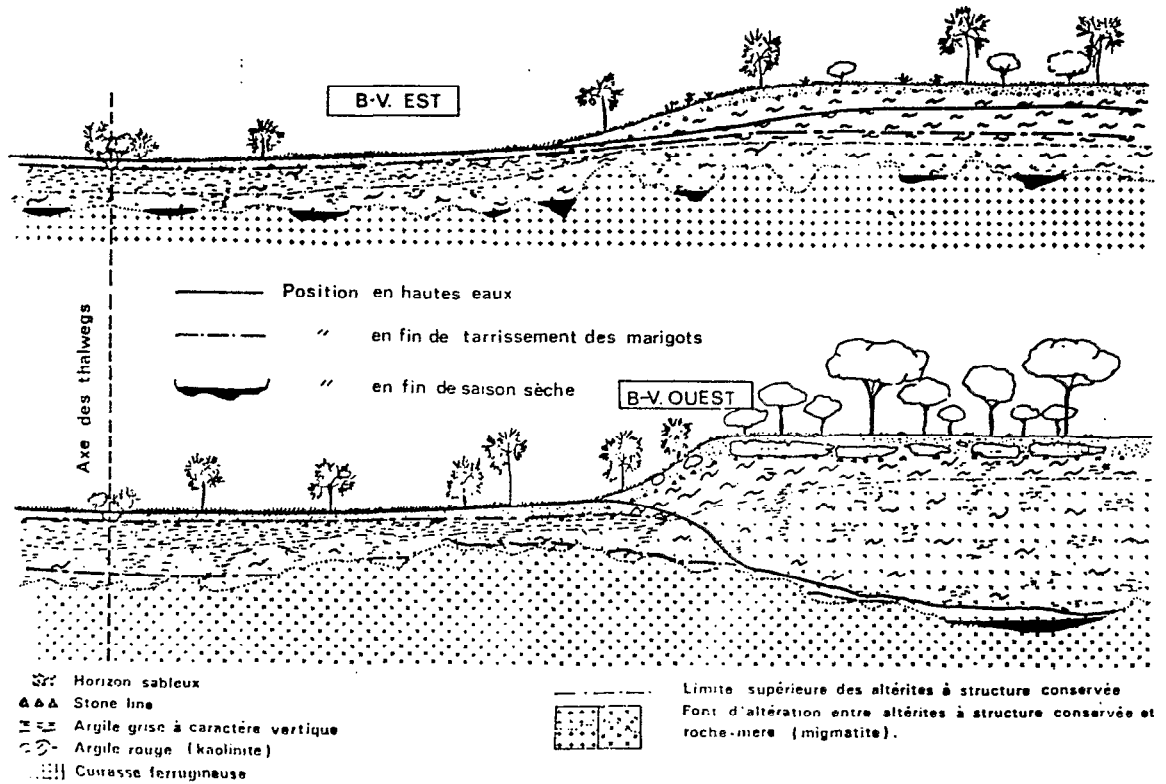


FIG. 4.401 : BASSINS VERSANTS DE SAKASSOU
 POSITION DE LA NAPPE SUR LES VERSANTS
 D'APRES LENOIR, 1978
 (Extrait de Lafforgue, 1982)

Dans le cas du bassin de savane cet entretien peut se prolonger car l'extension latérale du périmètre d'alimentation s'étend à toute la surface du bassin dans les meilleurs cas avec la nappe affleurant au sol dans les zones déclives et pratiquement dans tous les bas de versant recouverts par les sables clairs.

Pour le bassin forestier l'entretien du débit de base par la nappe est réduit puisque l'extension latérale du périmètre d'alimentation se restreint à la portion basse du bassin, la surface piézométrique de la nappe marquant une inflexion vers le bas sous les plateaux cuirassés. Donc pour une même pluviosité et une infiltration quasi identique les résultats sur les deux bassins sont nécessairement très différents ; le bassin forestier n'a pas une alimentation soutenue de son débit de base, la nappe ayant en permanence deux possibilités offertes : vers le marigot et vers un endoréisme profond.

L'humidité n'étant pas entretenue dans les sols de bas-fond du bassin forestier, l'assèchement est rapide et les conditions pour le ruissellement sont donc très défavorables. A chaque averse une bonne partie de la précipitation est consommée pour la saturation des sables clairs avant de voir débiter le ruissellement. Seules quelques pluies assez exceptionnelles vont donc pouvoir ruisseler en partie. Sur le bassin de savane la saturation des bas de versant est assurée par la nappe en charge depuis l'amont topographique qui entretient des conditions favorables au ruissellement.(...)

4.4.1.2. *Commentaire*

On constate à la lecture de ce texte de nombreuses similitudes avec les situations décrites sur le bassin versant de Booro-Borotou et en particulier :

1. Les fluctuations de nappe sont rapides et procèdent d'alimentations verticale et latérale.
2. L'influence de la nappe sur l'écoulement se manifeste essentiellement dans les bas de versants qui, d'une part, alimentent le cours d'eau et d'autre part entretiennent des *conditions favorables au ruissellement*.
3. La nappe est susceptible d'être largement reprise par évapotranspiration. Une faible part influence le débit de base, l'autre allant saturer les altérites.

Ce schéma s'applique *grosso modo* à Booro-Borotou et nous allons essayer de le détailler à partir des éléments que nous avons.

4.4.2. *Fonctionnement d'un versant type*

L'apport de l'étude de Sakassou est primordial. En effet, à Booro-Borotou les données géologiques sont très incomplètes sur deux des éléments essentiels : la position sur les versants du toit du substratum et l'épaisseur des altérites. Les quelques observations décrites (chapitre 2.2) vont dans un sens qui permet d'admettre une similitude avec Sakassou : ondulations sans doute importantes du socle et épaisseurs d'altérites pouvant atteindre des dizaines de mètres. Dans notre approche nous allons faire abstraction de ces éléments, mais il faut garder en mémoire une représentation du type Sakassou.

Pour des raisons de clarté la description des fonctionnements est abordée selon une toposéquence type depuis le haut jusqu'en bas du versant. Mais si les mécanismes peuvent différer, l'écoulement sur le versant est lié à l'ensemble des différentes parties du versant. La synthèse de ces fonctionnements sur le versant est schématisée par les figures 4.402 et 4.403. La première, selon le principe de la figure 1.201 représente schématiquement pour une position moyenne de la nappe les chemins de l'eau ; la longueur de la flèche est significative de l'importance relative des volumes concernés. La seconde situe les niveaux extrêmes de la nappe observés pour les maxima en 1985 (année excédentaire) et en 1986 (année déficitaire) et pour le minimum en 1987 (faisant suite à la saison déficitaire de 1986).

FIG. 4.402 : REPRESENTATION SCHEMATIQUE DES CHEMINS DE L'EAU
SUR UN VERSANT TYPE DE BOORO-BOROTOU

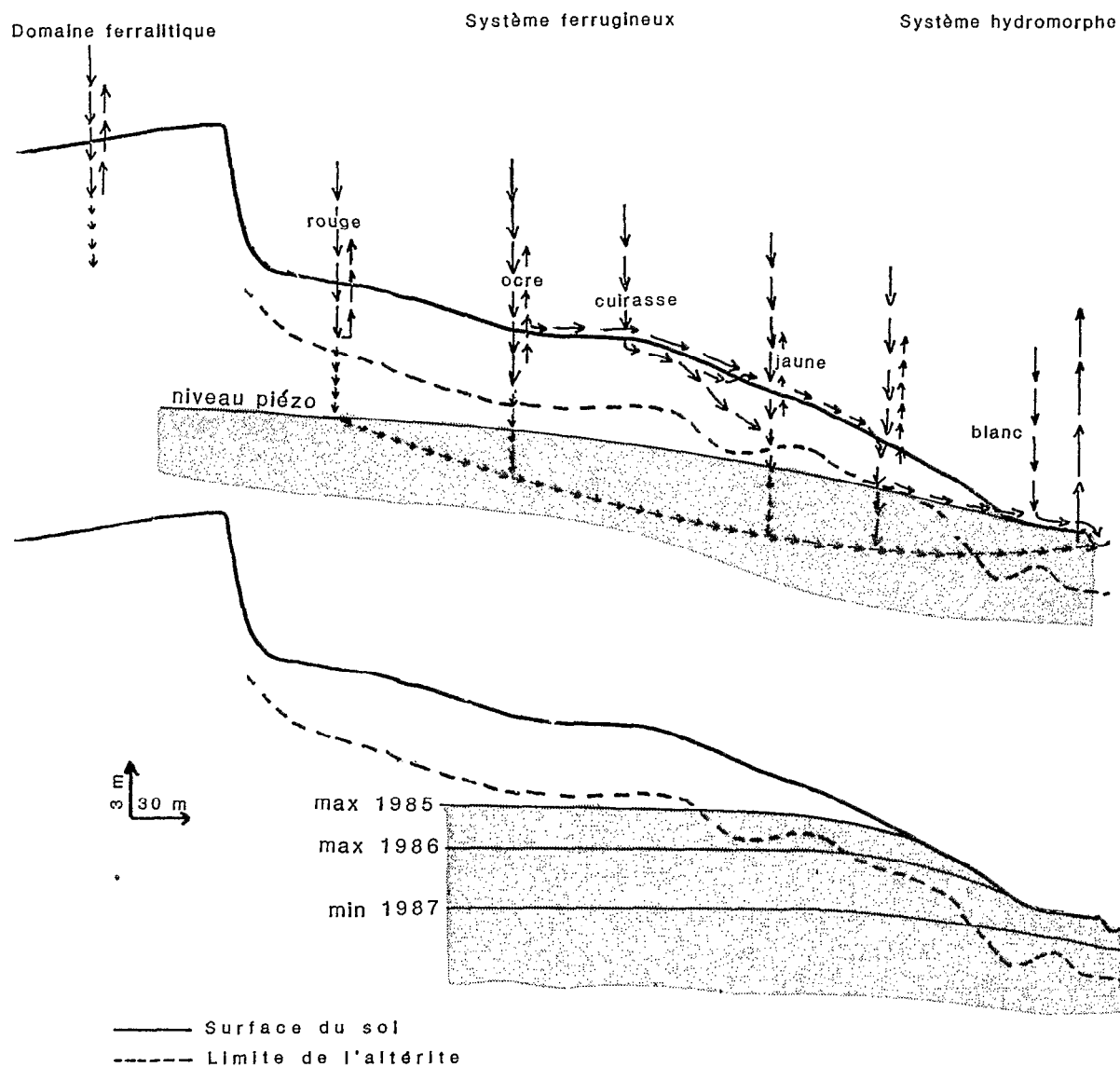


FIG.4.403 : NIVEAUX EXTREMES DE LA NAPPE SUR
UN VERSANT TYPE DE BOORO-BOROTOU

4.4.2.1. Haut du versant

Par haut du versant nous entendons le domaine ferralitique et les sols rouges, soit environ 50 % de la superficie totale du bassin versant (cf. carte des sols hors-texte).

Les buttes cuirassées et piémonts de cuirasse ont un comportement hydrodynamique très hétérogène, la structure chaotique du sol autorisant en certains endroits une infiltration totale et en d'autres endroits une imperméabilisation parfaite. Sur le sommet des buttes apparaissent même en saison des pluies de petites mares significatives d'un endoréisme local. On admettra ce comportement endoréique globalement sur la partie haute des buttes confirmé par les analyses des structures pédologiques (Fritsch, com. orale, 1988).

La part de l'eau qui s'infiltré profondément et n'est pas reprise par évaporation est sans doute faible et va alimenter les altérites sous-jacentes.

La simulation de pluie a montré que la perméabilité de ces sols rouges était très grande, ce que l'analyse pédologique permettait déjà de prévoir. Qualifiés de pseudo-sables ils ont une structure homogène et sont particulièrement bien drainants. L'observation des fosses pédologiques ne permet pas de déceler de traces d'hydromorphie au-dessus et dans la partie supérieure des altérites (Fritsch, comm. orale, 1988).

Selon la configuration du toit du substratum, on peut penser que le niveau piézométrique de base, soit est inexistant (cas d'un substratum *haut* dans l'altérite), soit se situe assez loin de la surface (plus de 10 m) et toujours dans l'altérite. Il n'est pas interdit d'envisager des poches d'eau liées aux ondulations du substratum comme à Sakassou. Mais, dans la région, les villages sont en général proches des interfluves (à proximité des voies de communication qui emploient les crêtes pour limiter les ouvrages d'art) et donc sur ces sols rouges ; ils sont tous équipés de forages qui fournissent de l'eau toute l'année en trouvant la nappe à des profondeurs comprises entre 15 et 30 m. Ce qui nous permet de penser que l'extension des nappes est large.

L'infiltration sur la majorité de ces sols est totale dans les conditions de précipitation naturelle. Le fonctionnement se fait verticalement dans la zone non saturée qui est bien drainante et où la plus grande part de l'eau est stockée temporairement puis reprise par évaporation.

Valentin (carte des états de surface, hors-texte) remarque cependant que sur des jachères récentes installées sur ces sols rouges, le remaniement des horizons superficiels a induit des organisations pelliculaires susceptibles d'initier du ruissellement de surface. Avec le temps (de l'ordre de la dizaine d'années) leur influence semble disparaître.

Le bilan d'évapotranspiration (figure n°4.107) montre que le déficit porte sur huit mois de l'année (novembre à juin) et la variation de stock du tube neutronique n°4 (figure n°3.203) confirme une stabilité ou une décroissance du stock dans la zone non saturée sur cette période. Pendant les mois où les précipitations sont excédentaires, le stockage dans la zone non saturée et éventuellement l'alimentation de la zone saturée sont nécessaires. Le volume de précipitation maximal excédentaire observé en 1985 était de 500 mm environ, ce qui avec une teneur en eau moyenne de 20 % (valeur minimale observée sur le tube n°4) est susceptible d'affecter une profondeur de sol de 2,5 mètres. L'ordre de grandeur de cette profondeur est parfaitement compatible avec les profondeurs d'extraction racinaire. Cela permet de conclure que théoriquement la totalité de l'excédent pluviométrique de la saison des pluies peut être stocké dans la zone non saturée et repris pendant les mois de bilan évapotranspiratoire déficitaire qui suivent. On note à ce propos sur les profils neutroniques que l'assèchement relatif du profil n'intervient que sur les 25 premiers centimètres du profil, la teneur en eau se maintenant au minimum à 20% en dessous.

Il est cependant probable qu'une faible part de cet excédent parvient à travers l'altérite à la nappe, soit directement, soit par une dynamique latérale, le fonctionnement vertical étant bloqué par le socle.

4.4.2.2. Mi-versant

La zone de mi-versant couvre (toujours selon la nomenclature de la carte des sols) les sols ocres, les indurations de mi-versants et les sols jaunes, soit environ 42 % de la superficie totale du bassin.

Le fonctionnement hydrodynamique se complique. En effet les sols ocres et jaunes sont nettement moins bien drainants que les sols rouges, et entre eux s'intercale une zone d'induration carapacée qui s'est développée sur l'altérite.

La simulation de pluie a montré des capacités d'infiltration qui diminuent d'abord des sols ocres vers l'induration de mi-versant, puis augmentent à nouveau sur les sols jaunes pour arriver comme en haut de versant à une perméabilité totale. La cartographie des états de surface (Valentin, cf carte hors-texte et paragraphe 2.4.6) permet de noter sur l'ensemble de cette zone des surfaces à fort microrelief où les touffes de graminées sont surélevées. Cette surface est limitée à l'aval par une *bande d'arrêt* (selon la terminologie proposée par Valentin). La surface à fort microrelief est le témoin d'un ruissellement en nappe tout à fait semblable à celui que l'on peut observer dans les régions sahéliennes, ruissellement favorisé par l'extension dans cette même zone des surfaces dénudées par l'activité faunique (Janeau et Valentin, 1987).

Dans toute cette zone de la mi-versant, on ne note pas d'intervention directe de la nappe sur les mécanismes de l'écoulement ; mais sa remontée dans les sols jaunes est susceptible de les influencer.

Sur les sols ocres le mécanisme est comparable à celui des sols rouges avec en plus un ruissellement de surface qui se produit dès que les conditions d'humectation sont suffisantes. Ce ruissellement d'abord en nappe se concentre localement à l'occasion d'irrégularités topographiques locales pour créer des *protogriffes*, préluant à l'apparition de ravines (Planchon, à paraître). Dans ce cas également la reprise évaporatoire sur la zone non saturée reste importante et l'apport à la nappe sans doute faible.

Sur l'induration de mi-versant le ruissellement atteint sa valeur maximale et le drainage profond est bloqué. Selon la profondeur d'apparition de l'induration un stockage dans la zone non saturée est possible. Vraisemblablement la carapace induit une dynamique latérale et conduit à des écoulements latéraux internes, susceptibles de réapparaître à la surface juste en dessous de la rupture de pente, mais surtout alimentant la zone non saturée des sols jaunes ou la nappe. La reprise évapotranspiratoire est probablement moins importante, les potentialités de stockage proches de la surface étant plus limitées. On note d'ailleurs que ces indurations correspondent à la plus grande *pauvreté* végétale sur le bassin versant (Mitja, carte de la végétation, hors-texte).

Immédiatement à l'aval de l'induration de mi-versant, dont la *trace géomorphologique* est constituée par une rupture de pente caractéristique, les sols jaunes ont d'abord un fonctionnement semblable à celui des sols ocres puis en se dégradant deviennent bouillants et extrêmement bien drainants. Le ruissellement issu de l'amont s'infiltré progressivement pour disparaître totalement. Cette eau va pour une grande part alimenter la nappe qui, en remontant, se rapproche de la surface. La zone non saturée ne suffit pas en effet à stocker l'excédent évapotranspiratoire et les nouveaux apports dus à l'infiltration des ruissellements amonts. Il va de soi que l'évapotranspiration affecte en permanence cette zone. Il est probable également que ces sols jaunes sont le lieu d'écoulements rapides internes, peut-être dans les macropores biologiques (mais sur des distances limitées), plus sûrement, avec la remontée de la nappe, du type *écoulements de retour*.

Le comportement dans ces sols jaunes est bien confirmé par l'analyse des observations réalisées sur le tube neutronique n°8. L'humectation se fait d'abord par la zone non saturée et un équilibre s'établit entre l'apport et l'évapotranspiration. Les apports se faisant brusquement plus importants (dus à la pluviométrie et au ruissellement qui se réinfiltré) cet équilibre se rompt ; très rapidement la zone non saturée atteint sa capacité au champ et la nappe remonte.

4.4.2.3. Bas du versant

Le bas du versant est constitué par les sols blancs et tout le système hydromorphe. Il couvre environ 8% de la superficie du bassin.

Tout le bas du versant est directement influencé par les fluctuations de la nappe. Son niveau de base minimum se situe légèrement en dessous du fond du lit de la rivière, mais à une profondeur telle qu'elle reste soumise à l'évapotranspiration très importante de la végétation dense (forêt galerie) qui s'y trouve installée et dont le système racinaire exploite directement les réserves. Cette facilité d'extraction évapotranspiratoire est attestée par les oscillations journalières de la nappe qui précèdent le tarissement et par l'influence des feux de brousse (chapitre 4.3).

Les premières pluies de la saison ne font pas remonter tout de suite le niveau de la nappe. Alimentant d'abord toute la zone non saturée, ces apports restent jusqu'à la fin du mois de juillet en équilibre avec la reprise évapotranspiratoire. Dès que cet équilibre est rompu, la nappe remonte assez rapidement pour atteindre un nouvel équilibre, variable selon les conditions climatiques.

Dès la remontée de la nappe le cours d'eau débite, d'abord par percolation au travers du fond sableux du lit mineur, ensuite par les apports de petites sources situées à la limite de la zone hydromorphe et des sols blancs.

L'état d'équilibre se maintient tant que la pluviométrie s'équilibre avec l'évaporation, mais avec la diminution des précipitations le niveau redescend.

La zone de subaffleurement de la nappe est variable. Elle couvre l'ensemble du bas-fond et peut remonter jusqu'à la limite des sols jaunes. Sur les versants il est rare que la zone saturée atteigne véritablement la surface du sol et les *mouillères* ne sont observées qu'en quelques endroits. Une couverture argileuse superficielle recouvre les sables et permet une mise en charge partielle de la nappe qui explique le comportement *artésien* des piézomètres 9 et 12 pendant une partie de l'année.

Les précipitations qui tombent sur le bas de versant se répartissent selon des chemins différents suivant le niveau de la nappe.

- lorsque la nappe n'est pas proche de la surface, l'infiltration est totale comme sur le bas des sols jaunes.

- lorsque la nappe est affleurante dans le bas-fond et subaffleurante dans les sols blancs, le comportement est typique de la théorie des aires contributives variables (chapitre 1.2) : ruissellement sur les surfaces saturées du bas-fond, écoulement de retour sur les bas de versants à la limite de l'affleurement de nappe. Ces écoulements de retour sont alimentés par toute la partie située à l'aval de l'induration de mi-versant ; ils peuvent être le siège d'un effet piston et ils n'excluent pas des phénomènes d'intumescence de nappe (chapitre 1.2). Ces aires contributives variables varient entre la superficie du bas-fond *stricto sensu* soit un peu moins de 2% de la superficie du bassin versant et la superficie couverte par la zone de subaffleurement maximale de la nappe matérialisée par la limite d'extension des sols blancs (soit environ 8% de la superficie du bassin).

4.4.2.4. Commentaires

Cette analyse sur le versant des processus de fonctionnement n'est que partiellement étayée par nos observations, et par la connaissance incomplète de la morphologie interne. Fritsch (travaux en cours) pense pouvoir confirmer ces mécanismes par une analyse des évolutions physico-chimiques des matériaux internes.

Avec Beven et al.(1988), il faut admettre en effet que la morphologie du bassin versant et les processus hydrologiques sont liés par leur évolution conjointe dans le temps. Cependant les durées de mise en place des éléments pédologiques (et à plus forte raison géologiques) sont dans un ordre de grandeur nettement plus long que l'échelle des changements climatiques. La morphologie en place d'un versant est donc plutôt l'image d'une histoire de l'évolution climatique ancienne. Beven et al.

considèrent cependant que c'est la structure actuelle du bassin versant qui contrôle les mécanismes de l'écoulement et qu'elle doit donc être prise en compte comme une information essentielle pour valider la réponse hydrologique actuelle.

4.4.3. Le bassin versant complet

La connaissance des chemins de l'écoulement sur un versant type ne donne cependant pas la réponse du bassin versant à une sollicitation pluviométrique. En effet ce versant type avec ce fonctionnement idéalisé n'existe pas dans la réalité. L'hétérogénéité locale est telle que chaque cas est un cas particulier.

En croisant (Planchon, à paraître) les cartes dressées pour le bassin versant principal des sols, de la végétation, des états de surface et des historiques de culture (champs et jachères) on trouve plus de 1400 zones élémentaires dont la plus grande (constituée par des champs cultivés en 1987 sur sol rouge) couvre un peu plus de trois hectares et près de 300 de ces zones élémentaires ont une superficie supérieure à 1000 m², surface dont on ne peut négliger l'impact sur les fonctionnements hydrologiques.

La description des mécanismes sur le versant est surtout axée sur l'organisation des sols. Mais on peut facilement constater sur la carte des sols que l'organisation idéale proposée ne se retrouve qu'exceptionnellement dans la réalité : on trouve par exemple en rive gauche une organisation avec des sols jaunes et ocres sur l'interfluve et il est évident que notre représentation typique n'expliquera pas de façon satisfaisante les processus de l'écoulement sur un tel versant.

De plus nous avons montré (et l'étude de Sakassou avant la nôtre) l'importance essentielle de l'extension de la zone saturée sur le fonctionnement ; mais nous n'avons pas de connaissances précises de la forme du socle et des épaisseurs du manteau d'altération. A partir des observations géologiques et géophysiques on peut supposer que la forme est ondulée avec une orientation qui serait dans le sens de la pente en rive droite et proche de la perpendiculaire en rive gauche. Les amplitudes des ondulations sont vraisemblablement importantes (plusieurs mètres). On comprend immédiatement que le comportement de la nappe et en particulier ses directions d'écoulement pourront influencer considérablement le fonctionnement type, avec en rive droite un apport direct au cours d'eau et en rive gauche un certain nombre d'obstacles à cet apport. On note à ce propos la présence en rive droite d'un nombre important de systèmes ravinaires qui sont pratiquement inexistantes ou non fonctionnelles en rive gauche (la ravine des Amoureux contrôlée en 1986 et 1987 n'a coulé qu'exceptionnellement).

Toutefois l'étude des crues observées et de leur forme montrent que le comportement à la station amont et à la station aval est sensiblement le même. Cela signifie que, dès la station amont, tous les éléments de fonctionnement sont en place et que le bassin versant de la station amont intègre l'ensemble des mécanismes de crue sur le bassin versant complet. Le reste n'est plus qu'une question de transfert avec les phénomènes habituels de retard et d'écroulement (fig 4.217 et 4.218).

Différentes formes de crues ont été mises en évidence correspondant certainement à des types de comportements différents ; mais il n'a pas été possible, à l'aide des variables classiques de description des événements pluvieux ou de l'état du milieu, de trouver un ou plusieurs paramètres significatifs des conditions initiales favorisant un type de forme particulier. Cette forme résulte de la composition des apports sur les versants, d'une part, et des écoulements concentrés dans les systèmes ravinaires, d'autre part.

Le bon sens conduit à penser que les crues de type 1, dont les temps de montée et de base sont courts, correspondent à des fonctionnements donnant la priorité aux écoulements en surface et donc, d'après notre représentation, à des écoulements du type *aires contributives*. Cette hypothèse est consolidée par les deux schémas présentés dans la première partie (figures n°1.202 et 1.203). Les coefficients d'écoulement de crue qui sont compris entre 2 et 7,5% correspondent au pourcentage d'extension possible des zones saturées en surface. Seule fait exception la crue du 18 août 1985 dont le coefficient d'écoulement est supérieur à 13 %. Cela suppose que dans certaines conditions des

apports de l'amont sont possibles avec un fonctionnement de *type hortonien*. On peut penser que ces apports transitent par le système ravinatoire comme dans l'expérience de traçage réalisé lors de la crue du 18 septembre 1987. Le traçage du 27 septembre 1987 tend de son côté à étayer l'hypothèse des aires contributives avec un effet du type *écoulement de retour* ; l'observateur n'a en effet pas noté d'écoulement spectaculaire, mais a constaté une inondation rapide du bas-fond par débordement. Le traceur n'étant pas retrouvé à l'exutoire, un *effet piston* est probable.

Inversement il nous faut considérer les crues de type 2 comme des crues dont le mécanisme principal est un écoulement interne. Le débit maximum et les temps de montée et de base rapportées aux schémas de la première partie le confirmeraient. L'expérience de traçage réalisée le 25 septembre 1987 renforce une telle hypothèse. Mais il n'y a guère d'élément pouvant permettre de discerner le mécanisme précis. Intuitivement nous pensons qu'un phénomène du type *intumescence de nappe* est vraisemblable.

Evidemment les crues de type 3 correspondent à une composition des processus et constituent un état intermédiaire entre les situations extrêmes.

Un point est cependant troublant : l'échec rencontré pour lier ces types de crues à une grandeur descriptive classique soit de l'événement pluvieux, soit de l'état du milieu. La seule explication est que les variables choisies ne sont pas les bonnes.

On peut comprendre que les intensités ou la forme de l'averse n'aient guère d'influence lorsque les écoulements sont essentiellement internes ; mais on devrait les retrouver avec les écoulements sur les aires contributives. En réalité il y a encore un aspect qui n'a pas été pris en compte : l'interception par la végétation. La couverture végétale, comme nous l'avons vu au chapitre 2.4, peut aller de 20 à 100% ; elle varie dans le temps, dans l'espace horizontal et dans la direction verticale. Dans les zones qui nous intéressent, celles du bas-fond, elle est (pour cause !) particulièrement importante, dépassant 90% dans la forêt galerie. Avec de telles conditions, les intensités ou les paramètres de corps d'averses mesurés à un pluviographe dans une clairière dégagée n'ont sans doute pas grand chose à voir avec la précipitation qui parvient au sol dans notre zone hydromorphe. Cette observation atteint son paroxysme sous la forêt galerie, mais elle se retrouve sur toute la superficie du bassin versant, sauf peut-être dans les zones très dégagées (champs, savane herbeuse) lors des toutes premières crues (ce qui peut éventuellement justifier la tendance des crues de type 1 à se produire plutôt dans la première moitié de l'hivernage).

Quant aux variables descriptives de l'état du milieu à l'instant où intervient l'événement pluvieux, aucune n'est vraiment représentative ni de l'état de la nappe, ni de l'état végétatif. Les indices de précipitations antérieures, le cumul pluviométrique, le niveau piézométrique en un point ou le débit de base ne sont pas des paramètres assez sensibles pour décrire ces conditions initiales. Il est permis de penser qu'un meilleur résultat aurait été obtenu avec des grandeurs comme l'extension de la zone de subaffleurement de la nappe, la surface d'interception par la végétation ou les paramètres de description de la précipitation sous le couvert végétal, grandeurs qu'il ne semble guère possible d'évaluer facilement sur le terrain avec une périodicité assez courte (de l'ordre de la décennie).

CINQUIEME PARTIE :
MODELISATION

5.1. MODELES GLOBAUX

Ce chapitre a été rédigé à partir des modélisations réalisées avec la collaboration active d'Alain Dezetter pour CREC 5 et MODGLO et de l'application des données de Booro-Borotou à son modèle par Daniel Ibiza.

5.1.1. Généralités

L'application de modèles aux observations et aux expérimentations hydrologiques sur de petits bassins versants est le complément logique et nécessaire à l'interprétation de leur fonctionnement. Nous avons déjà réfléchi sur l'opportunité de telles applications dans la première partie de ce travail et pour illustrer ces réflexions, nous nous proposons de présenter les résultats obtenus dans l'application au bassin versant principal de Booro-Borotou, d'une part, de trois modèles globaux conceptuels déterministes et, d'autre part, d'un modèle distribué conceptuel déterministe.

Rappelons qu'un modèle est :

- *déterministe*, (par opposition à *stochastique*) lorsque les variables employées ne sont pas aléatoires.
- *conceptuel*, (par opposition à *empirique*) si les algorithmes qui constituent le modèle s'essayeront à représenter de façon plus ou moins précises les phénomènes physiques que l'on cherche à décrire.
- *global*, si la modélisation concerne l'entité géographique complète étudiée, sans modulation selon les particularités locales.
- *distribué*, par opposition à *global*, si le modèle résulte de la composition de fonctions ponctuelles ou locales pour l'obtention d'un résultat concernant l'entité géographique totale.

Nous empruntons à O'Donnell(1986) le schéma général de la *stratégie* d'utilisation d'un modèle déterministe. Il est représenté sur la figure n° 5.101. On note deux points importants :

- l'ajustement du modèle peut intervenir sur les paramètres et éventuellement sur la structure ;
- la validation du modèle sur des données qui n'ont pas servi pour le calage est une opération indispensable pour un bon *test* du modèle.

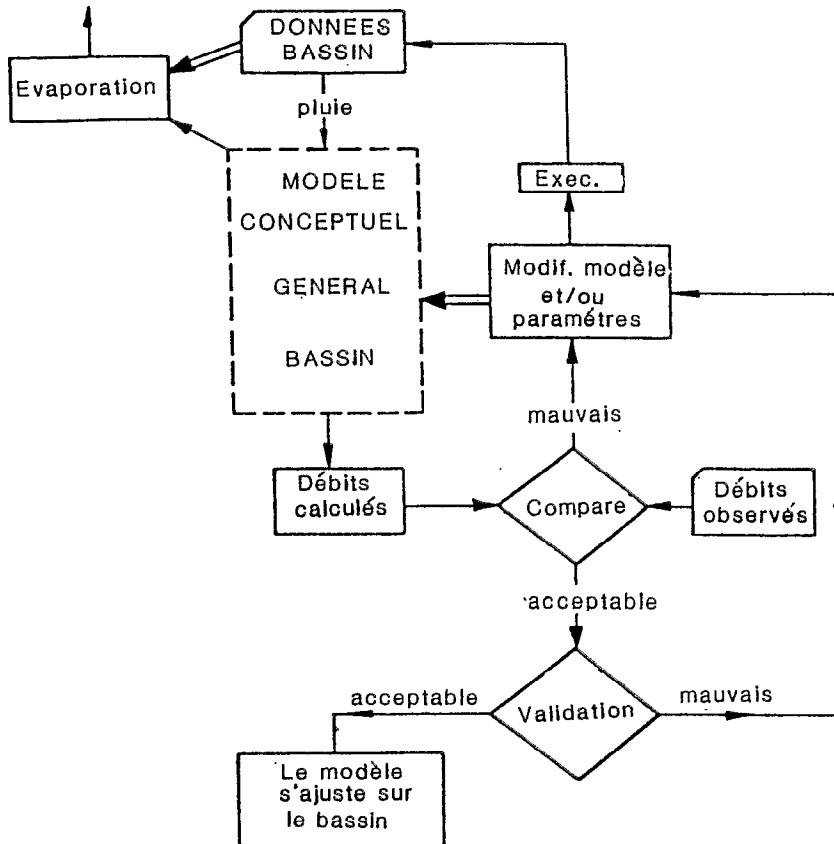
Les trois modèles globaux que nous nous proposons d'ajuster à la situation de Booro-Borotou sont conçus pour répondre à cette stratégie.

L'objectif recherché est celui de l'évaluation de la ressource en eau sur le bassin de 1,36 km². Le pas de temps de calcul est journalier ; mais une bonne reproduction des lames mensuelles sera considérée comme satisfaisante.

Les trois modèles, Crec 5, Modglo et Modibi, ont été récemment reformulés pour fonctionner sur micro-ordinateur (Servat, 1986 ; Dezetter, 1986, Ibiza,1988). Sous cette forme, ils ont un certain nombre de choses en commun :

- identité des formats de fichiers d'entrée et de sortie ;
- écriture en FORTRAN 77 (transferts faciles macro/mini/micro/informatique) ;
- paramétrage facilement accessible par écran conversationnel ;
- module d'optimisation des paramètres par la méthode de Rosenbrock.

FIG 5.101 : STRATEGIE D'UTILISATION D'UN MODELE DETERMINISTE
(D'APRES O'DONNEL, 1986)



5.1.2. Présentation des modèles CREC 5 et MODGLO

5.1.2.1. Le modèle CREC 5

Ce modèle a été mis au point dans les années 70 (Cormary et Guilbot, 1971) et a été l'objet d'un assez grand nombre de versions destinées à des applications très variées. La version utilisée ici est celle à 5 paramètres (Combes, 1985).

Il sépare de façon classique deux phases dans la transformation pluie-débit, phases décrites chacune par une fonction propre :

- la *production* prend en compte l'humidité du sol, et fournit d'une part l'évapotranspiration et d'autre part la fraction de l'eau devant participer à l'écoulement.

- la *transfert* compose cette fraction en écoulement rapide et en écoulement lent.

Les cinq paramètres du modèle correspondent à des réglages de fonctions liées à une représentation du type à *réservoir*. Un seul de ces paramètres peut être assimilé à une grandeur physique mesurable directement. C'est le coefficient X4, voisin d'une *réserve maximale*.

Un facteur K, défini comme un paramètre régional (et non considéré comme paramètre du modèle), a du être adapté aux conditions tropicales (où la saison des pluies a été assimilée à la saison d'hiver en zone tempérée).

La figure 5.102 représente le schéma de fonctionnement du modèle CREC 5. La signification des différentes variables est la suivante :

P_j pluie moyenne du jour j ;

ETP_j évapotranspiration potentielle Penman du jour j ;

S_j stock du réservoir d'évaporation au jour j ;

ETR_j évapotranspiration réelle du jour j ;

H_j stock du réservoir de surface au jour j ;

G_j stock du réservoir profond au jour j ;

K paramètre climatique régional ;

X1 paramètre de vidange du réservoir de surface ;

X2 paramètre de vidange du réservoir profond ;

X3 paramètre de partage entre évaporation et écoulement ;

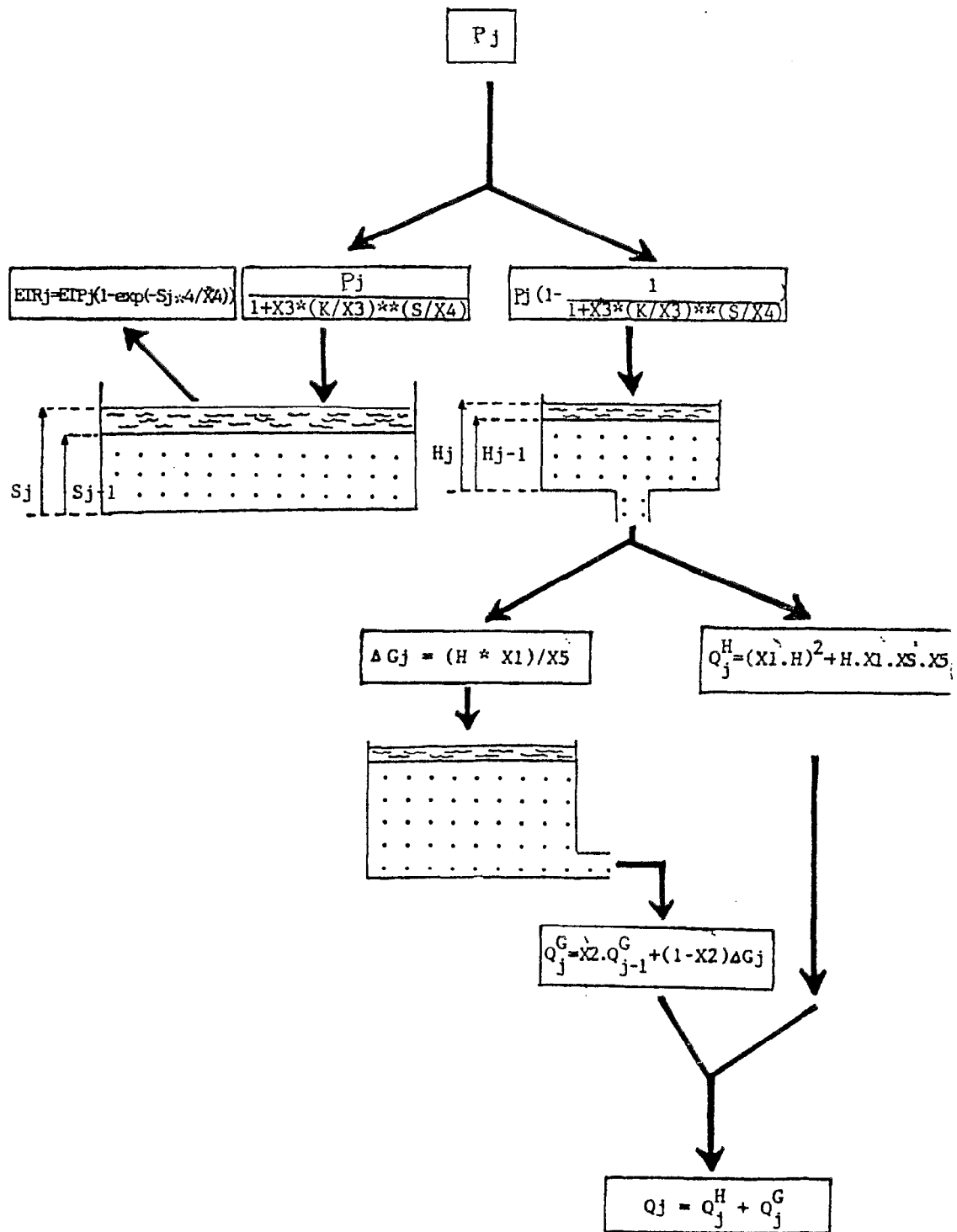
X4 stock maximal du réservoir sol (évaporation + surface) ;

X5 paramètre de partage entre écoulement rapide et retardé ;

XS paramètre d'étalement

La détermination des cinq paramètres se fait en considérant que le modèle est une *boîte noire* par la méthode d'optimisation de Rosenbrock. Le paramètre supplémentaire XS est ajusté par approximations successives à partir de la valeur nulle, une fois les autres optimisées.

FIG. 5.102 : SCHEMA DE FONCTIONNEMENT DU MODELE CREC 5
(D'APRES SERVAT, 1986)



5.1.2.2. Le modèle MODGLO

Ce modèle est également un modèle relativement ancien puisqu'initié par Girard dès le début des années 70. Il présente la particularité d'avoir été conçu à la même période que les débuts du modèle MODCOU distribué que nous utiliserons plus loin. Et l'approche est parfois similaire.

Comme dans le modèle CREC 5, production et transfert sont franchement dissociés. Mais contrairement à CREC 5, le modèle MODGLO se veut plus près des observations de base et la plupart de ses paramètres correspondent à des notions physiques non subjectives. La séparation des écoulements correspond mieux aux notions habituelles de l'hydrologie de bassins versants représentatifs et les différents termes du bilan hydrique sont nettement identifiés.

Les paramètres de MODGLO sont plus nombreux que dans CREC 5, mais ils n'ont pas tous la même importance et ne sont pas toujours indépendants les uns des autres. Un travail très récent (Dezetter, 1987) a étudié la sensibilité de ces paramètres et adapté une méthode d'optimisation (type Rosenbrock).

Le schéma général de fonctionnement de ce modèle à 20 paramètres est donné sur la figure 5.103. Une notice d'utilisation rédigée par Servat (1986) facilite la mise en oeuvre. La signification des variables est la suivante :

PJOURN pluie observée ;
CPJ facteur de correction de la pluie ;
ETRR évapotranspiration réelle ;
EAUG eau *gravifique* (part de la pluie qui s'écoule)
CRT capacité de rétention en eau du sol ;
DCRT facteur d'hétérogénéité ;
SH stock du réservoir sol ;
CQn coefficient de répartition d'EAUG dans le réservoir d'écoulement n
SHn stock du réservoir n
COEFQn coefficient de vidange du réservoir n ;
ETn reprise par évaporation dans le réservoir n
RS ruissellement
RB écoulement de base

5.1.2.3. Techniques d'optimisation et critères d'évaluation

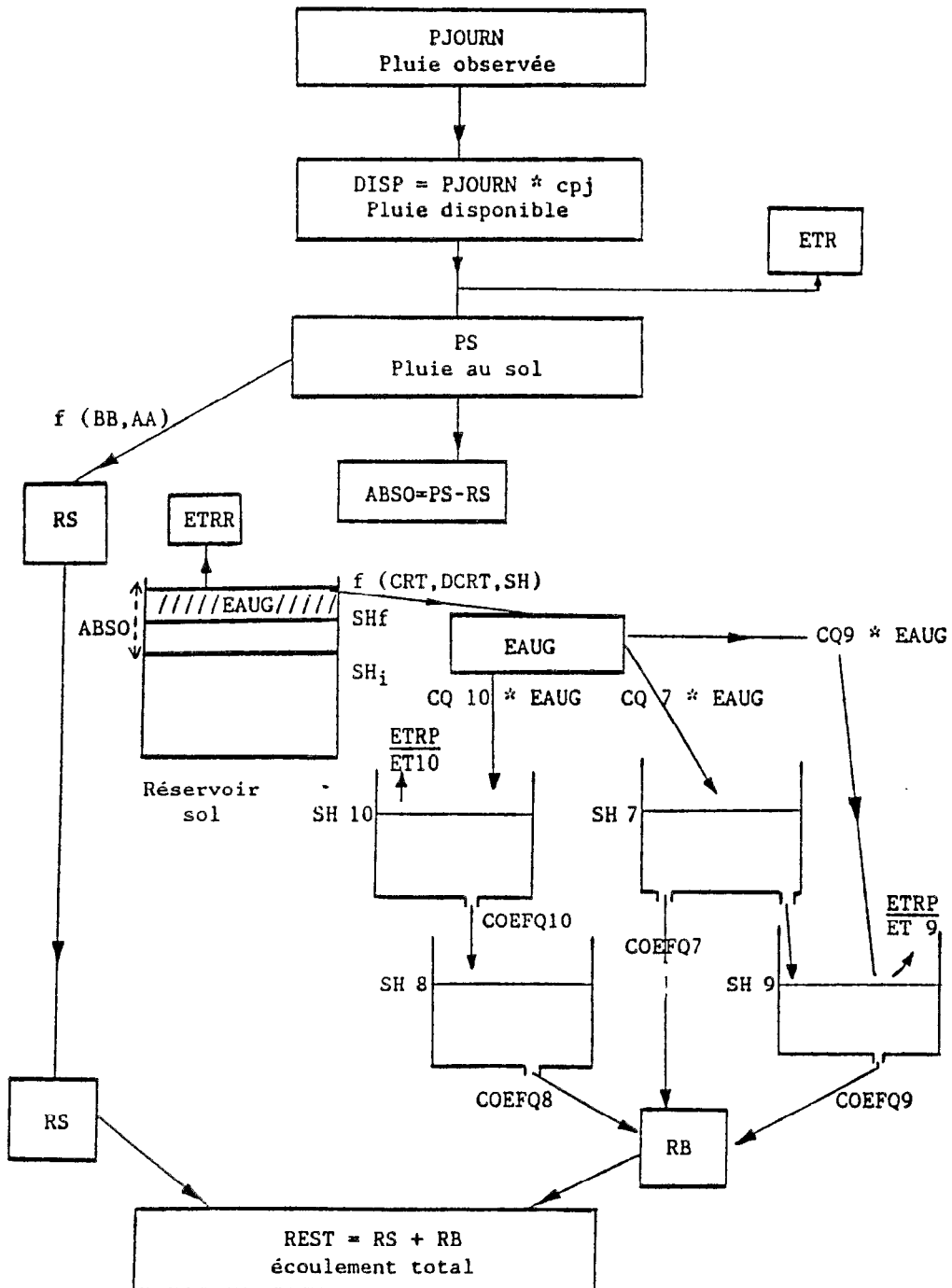
Les deux modèles présentés font appel à une *méthode d'optimisation* pour l'évaluation des paramètres de calage. Ces méthodes ont pour objet de trouver les paramètres de fonctions non linéaires qui donnent la meilleure adéquation entre valeurs calculées et observées de ces mêmes fonctions. Cette adéquation est chiffrée par le calcul d'une *fonction critère*.

Pickup (1977) a montré que les méthodes les plus efficaces pour l'optimisation des modèles pluie-débit semblaient être celles de Powell (1965), Rosenbrock (1960) et la méthode du simplexe (Nelder et Mead, 1965).

C'est la méthode de Rosenbrock qui a été adoptée pour le modèle CREC par ses auteurs. Cette méthode qui consiste à minimiser une fonction critère, fait appel à une recherche itérative sur l'ensemble des paramètres en fixant un pas, une direction et un intervalle de recherche. La fonction critère est calculée à chaque itération et le paramètre affecté est modifié en cas de succès.

Il est évident que le choix de la fonction critère est essentiel pour une bonne utilisation de la méthode.

FIG. 5.103 : SCHEMA DE FONCTIONNEMENT DU MODELE MODGLO
(D'APRES DEZETTER, 1986)



Fortin et al. (1971) ont testé différents critères et ont montré que le critère suivant était bien adapté pour l'optimisation de séquences de débits aussi bien en crues qu'en étiages :

$$C_5 = 1 - \frac{1}{N} \sum \left| \left(\frac{Q_c - Q_o}{Q_o} \right) \left(\frac{\bar{Q}_o + |Q_o - \bar{Q}_o|}{\bar{Q}_o} \right) \right| \quad (5.1)$$

Le critère adopté par Combes (1985) pour l'optimisation par la méthode de Rosenbrock est légèrement différent :

$$C_8 = \frac{1}{N} \sum \left| \left(1 - \frac{Q_c}{Q_o} \right) \right| \left| \left(1 - \frac{Q_o}{\bar{Q}_o} \right) \right| \quad (5.2)$$

En effet :

$$C_5 = 1 - \frac{1}{N} \sum \left(\frac{|Q_o - Q_c|}{\bar{Q}_o} \right) - C_8 \quad (5.3)$$

Nous retenons enfin le critère le plus communément employé (Nash, 1969) :

$$C_1 = 1 - \frac{\sum (Q_o - Q_c)^2}{\sum (Q_o - \bar{Q}_o)^2} \quad (5.4)$$

Pour l'optimisation, c'est le critère C_8 qui a été utilisé ; mais les deux autres critères servent à comparer les résultats et sont calculés systématiquement.

5.1.3. Le modèle MODIBI

Le modèle MODIBI (ou MODQJ) est un modèle développé ces dernières années par Ibiza (1983, 1985, 1988). Il a été décrit de façon détaillée par Dosseur (1986) et adapté pour micro-ordinateur par Dezetter (1986), Servat (1986) et Ibiza (1988). Marwell et Lanna (1987) l'ont modifié pour l'utiliser dans les régions semi-arides du Brésil.

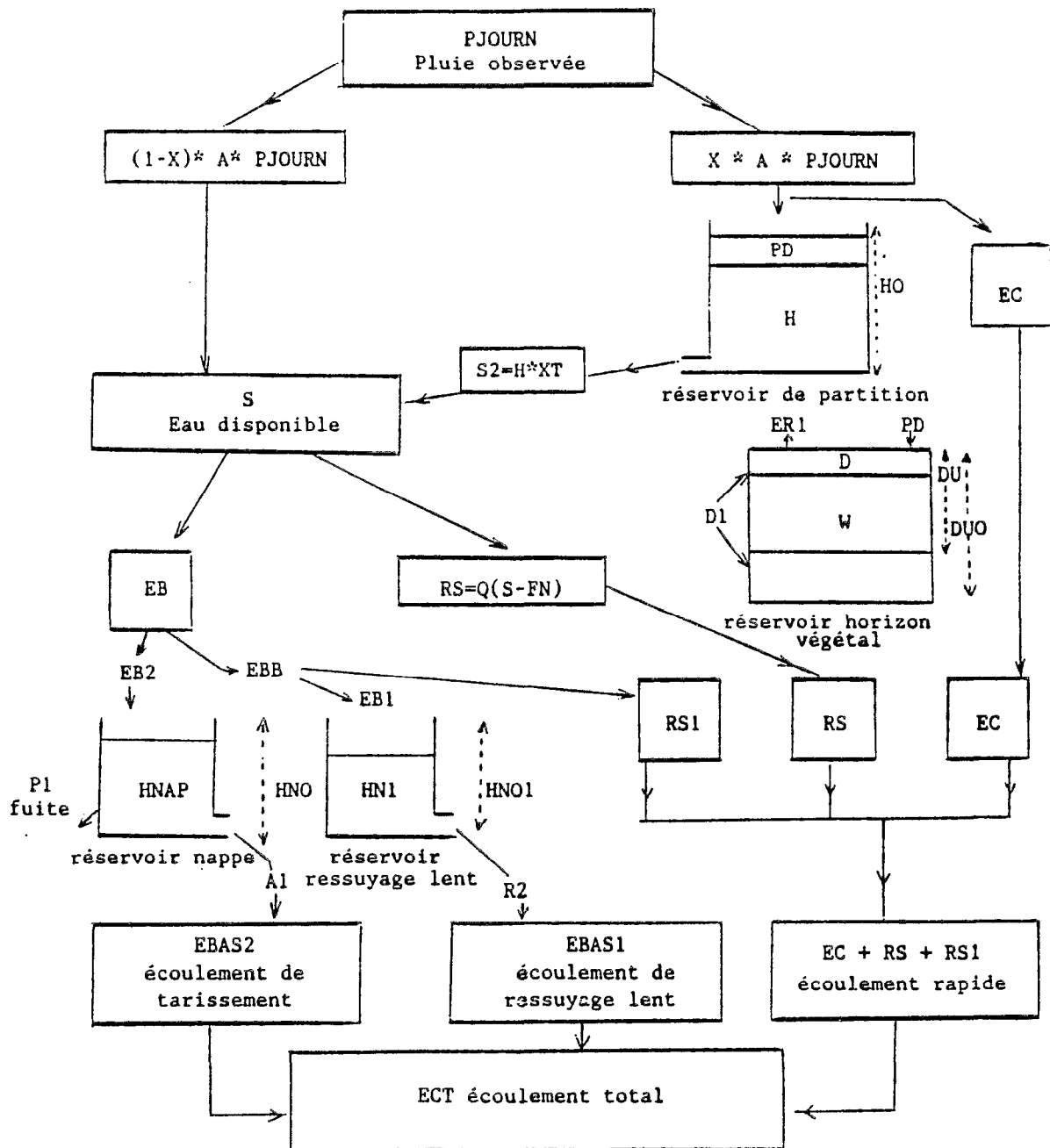
Ce modèle global est destiné à des régions plutôt humides (pluviométrie annuelle supérieure à 1300 mm en climat tropical et à 850 mm en climat tempéré).

La fonction de production, relativement complexe, représente l'équation du bilan hydrique à travers un système à *réservoirs*. Le transfert consiste en un retard à l'écoulement introduit lui aussi à travers des réservoirs en parallèle.

Le schéma général de fonctionnement est présenté sur la figure n°5.104. La signification des différentes variables est la suivante :

- PJOURN pluie observée ;
- A facteur de correction de la pluie ;
- X coefficient d'hétérogénéité du couvert végétal ;
- HO dimension du réservoir de partition
- PD eau destinée à l'évaporation ;

FIG 5.104 : SCHEMA DE FONCTIONNEMENT DU MODELE MODIBI
(D'APRES SERVAT, 1986)



XT coefficient de vidange du réservoir de partition ;
EC ruissellement par débordement du réservoir de partition ;
S eau disponible ;
EB écoulement de base ;
RS ruissellement ;
HNAP stock réservoir nappe ;
HNO dimension du réservoir nappe ;
HN1 stock du réservoir de ressuyage lent ;
HNO1 dimension du réservoir de ressuyage lent ;
FN coefficient limite d'infiltration.

Une particularité importante de ce modèle est qu'il prend explicitement en compte le fonctionnement des nappes souterraines dont le niveau peut influencer l'aptitude à l'infiltration.

Une autre originalité est l'interdépendance étroite dans la fonction de production entre l'évapotranspiration, le couvert végétal et l'horizon racinaire (représentés par un réservoir *horizon végétal*) et enfin l'aptitude à la percolation (et donc à l'alimentation de la zone saturée).

16 paramètres permettent le réglage du modèle. Mais, parmi eux, certains sont considérés comme secondaires et pouvant être fixés *a priori*. D'autres sont directement déduits de l'étude de la série des débits observés. On peut considérer que le calage réel ne se fait que sur 4 ou 5 paramètres sensibles. Ce réglage est pour le moment manuel. Une approche par optimisation automatique est en cours.

5.1.4. Application au bassin versant de Booro-Borotou

5.1.4.1. Modèle CREC 5

Le calage des cinq paramètres du modèle est réalisé pour les trois années d'observation 1984, 1985 et 1986 sur le bassin versant principal de Booro-Borotou par optimisation au pas de temps journalier. Pour initialiser ce calage, l'année 1984 est répétée deux fois (considérée comme non bissextile la première fois) et les valeurs non observées du début de cette année 1984 ont été artificiellement complétées par les valeurs du début de l'année 1985, de façon à avoir un fichier sans lacune. Il est évident que cette *mise en forme* ne sert qu'à faciliter la mise en oeuvre du modèle et n'a pas d'incidence sur les valeurs importantes de l'écoulement calculé.

Le calcul est effectué automatiquement. Les paramètres donnant la meilleure adéquation entre débits moyens journaliers observés et calculés sont les suivants :

$$\begin{aligned} X1 &= 0.1070 & X2 &= 0.5968 & X3 &= 0.0003 \\ X4 &= 752.1 & X5 &= 19.25 \end{aligned}$$

Le paramètre supplémentaire XS (qui est de fait un sixième paramètre du modèle) est alors calculé de façon à minimiser la fonction critère. On trouve :

$$XS = 0.054$$

La figure n° 5.105 présente les résultats obtenus pour les débits calculés et observés lors des périodes de saison des pluies sur les trois années. Le tableau n° 5.101 propose un récapitulatif mensuel et annuel sur le bassin versant principal de Booro-Borotou.

Tableau n° 5.101

Modèle CREC 5. Comparaison des lames mensuelles observées et calculées

	Pluie 1984	Lames obs.	Lames calc.	Pluie 1985	Lames obs.	Lames calc.	Pluie 1986	Lames obs.	Lames calc.
Jan	(1.7)	(0.0)	(0.0)	1.7	0.5	0.0	0.3	1.4	0.0
Fév	(11.0)	(0.0)	(0.0)	11.0	0.0	0.0	46.1	0.8	0.3
Mar	(16.5)	(0.0)	(0.1)	16.5	0.0	0.1	84.3	1.2	0.8
Avr	122.1	0.2	0.1	101.7	0.0	0.1	56.1	0.5	0.3
Mai	87.3	0.7	0.3	85.1	0.0	0.1	128.0	1.2	0.6
Jun	229.4	6.3	0.7	124.9	0.2	0.3	112.8	1.2	0.6
Jul	168.2	5.3	1.8	321.1	12.7	2.8	173.4	2.1	1.2
Aoû	212.4	11.2	5.6	398.5	80.9	47.2	112.8	2.7	2.0
Sep	186.4	19.7	15.0	265.5	70.1	107.4	207.3	8.7	6.2
Oct	112.2	11.8	19.7	107.8	26.5	45.1	154.3	5.8	7.1
Nov	14.2	2.7	2.9	2.1	7.6	7.4	22.8	3.8	6.6
Déc	0.0	0.9	0.1	0.0	2.8	0.2	0.0	0.9	0.1
Ann	1132.2	58.8	46.3	1435.9	201.3	210.7	1098.2	30.3	25.8

Les valeurs des critères calculés sur les débits journaliers pour la période totale des trois années sont :

$$C_1 = 0.243 \quad C_5 = -0.476 \quad C_8 = 0.844$$

Le coefficient de corrélation de la régression entre les lames mensuelles observées et calculées est :

$$R^2 = 0.781$$

5.1.4.2. Modèle MODGLO

Le calage de MODGLO affecte une vingtaine de paramètres qui, d'une part, ne sont pas tous indépendants les uns des autres et, d'autre part, sont souvent la représentation de grandeurs susceptibles d'être mesurées.

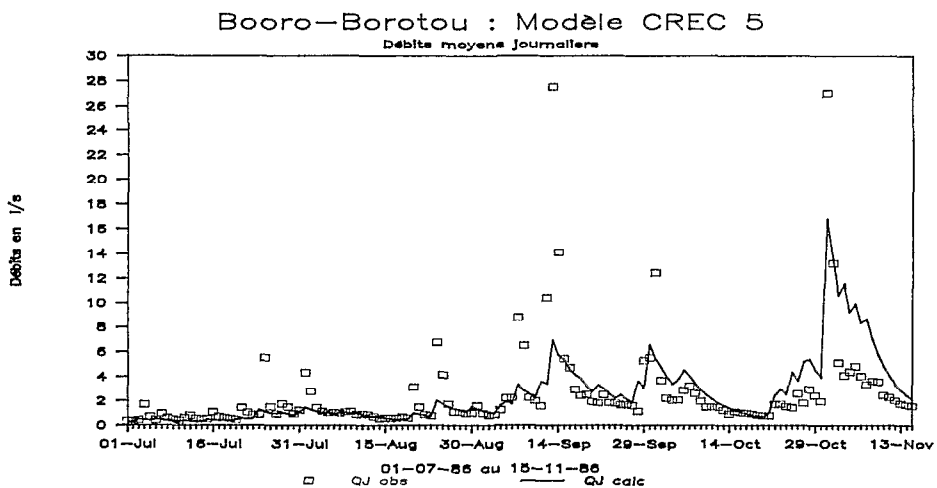
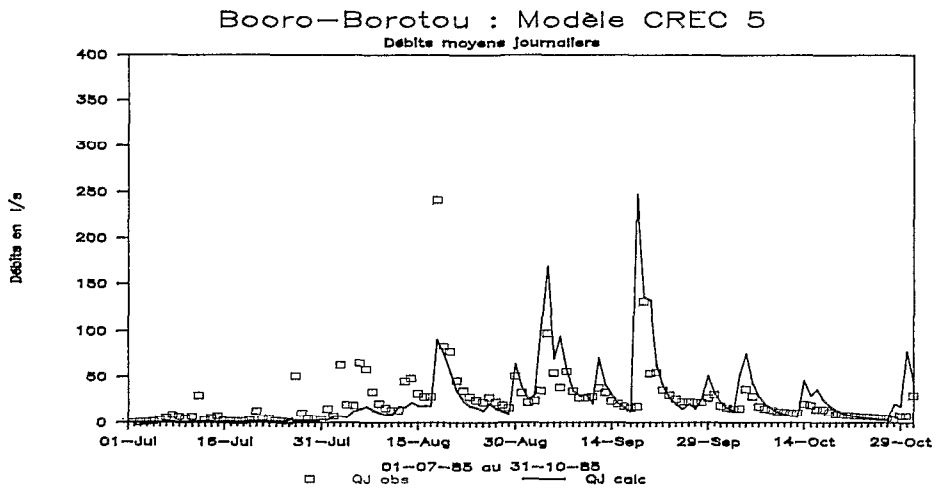
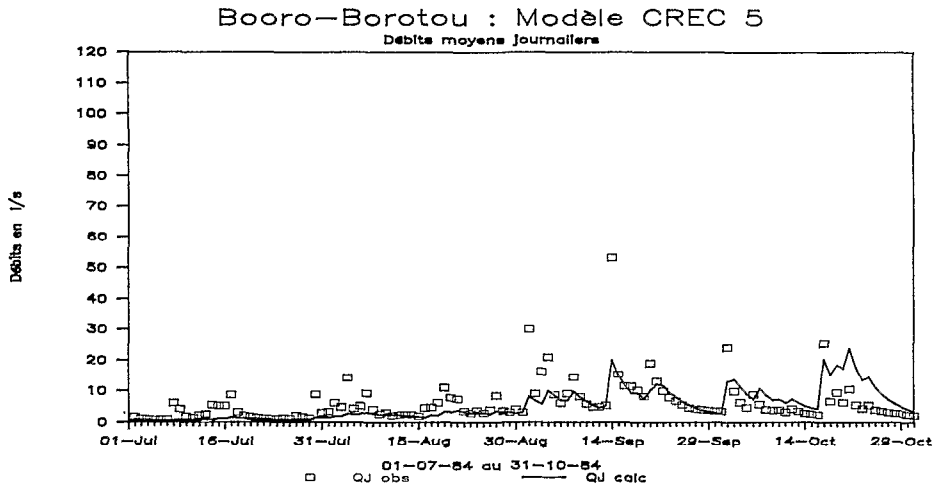
Par connaissance du terrain et par tâtonnements, la première opération a consisté en l'ajustement des paramètres de la fonction de production réglant le volume des lames ruisselées.

Les réservoirs de transfert ont été arbitrairement mis à zéro en début de modélisation, qui correspond heureusement à la saison sèche. La répartition entre les trois réservoirs de transfert 7, 9 et 10 a été fixée à 40%, 20% et 40%, valeurs qui nous semblaient les plus conformes à la réalité. Des essais ultérieurs ont montré qu'en modifiant cette partition les résultats obtenus étaient toujours plus mauvais.

Ensuite, les autres paramètres ont été ajustés en associant optimisation mathématique et connaissance du terrain par une série d'opérations alternativement automatiques et manuelles.

Des essais d'optimisation, sans *a priori* sur le comportement naturel, ont conduit à des absurdités dans les valeurs des paramètres comme dans les résultats concernant les grandeurs intermédiaires (ruissellement, stocks internes) et finalement, les résultats n'étaient pas meilleurs qu'avec l'approche semi-automatique que nous avons choisie.

FIG 5.105



Finalement les valeurs suivantes ont été adoptées :

CPJ	= 1	CQ7	= 0.4	SH	= 50
BB	= 1	CQ9	= 0.2	SH7	= 0
CET	= 1	CQ10	= 0.4	SH8	= 0
AA	= 0.8	COEFQ7	= 0.118	SH9	= 0
XIN	= 45	COEFQ8	= 0.335	SH10	= 0
AXIN	= -0.7	COEFQ9	= 0.040		
CRT	=896.3	COEFQ10	= 0.342		
DCRT	=113.9				

Comme pour le modèle CREC 5, la figure n° 5.106 présente les résultats obtenus pour les débits calculés et observés lors des périodes de saison des pluies sur les trois années. Le tableau n° 5.102 propose un récapitulatif mensuel et annuel sur le bassin versant principal de Booro-Borotou.

Tableau n°5.102

Modèle MODGLO. Comparaison des lames mensuelles observées et calculées

	Pluie 1984	Lames obs.	Lames calc.	Pluie 1985	Lames obs.	Lames calc.	Pluie 1986	Lames obs.	Lames calc.
Jan	(1.7)	(0.0)	(0.4)	1.7	0.5	0.4	0.3	1.4	0.0
Fév	(11.0)	(0.0)	(0.1)	11.0	0.0	0.0	46.1	0.8	0.3
Mar	(16.5)	(0.0)	(0.0)	16.5	0.0	0.1	84.3	1.2	0.8
Avr	122.1	0.2	2.7	101.7	0.0	0.1	56.1	0.5	0.3
Mai	87.3	0.7	0.0	85.1	0.0	0.1	128.0	1.2	0.6
Jun	229.4	6.3	0.5	124.9	0.2	0.3	112.8	1.2	0.6
Jul	168.2	5.3	4.1	321.1	12.7	2.8	173.4	2.1	1.2
Aoû	212.4	11.2	11.6	398.5	80.9	47.2	112.8	2.7	2.0
Sep	186.4	19.7	25.1	265.5	70.1	107.4	207.3	8.7	6.2
Oct	112.2	11.8	25.0	107.8	26.5	45.1	154.3	5.8	7.1
Nov	14.2	2.7	5.3	2.1	7.6	7.4	22.8	3.8	6.6
Déc	0.0	0.9	1.3	0.0	2.8	0.2	0.0	0.9	0.1
Ann	1132.2	58.8	76.1	1435.9	201.3	210.7	1098.2	30.3	25.8

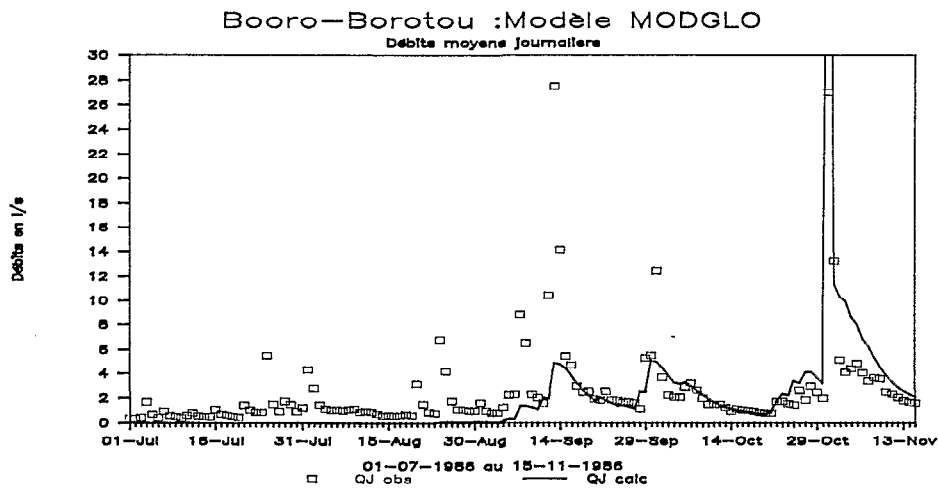
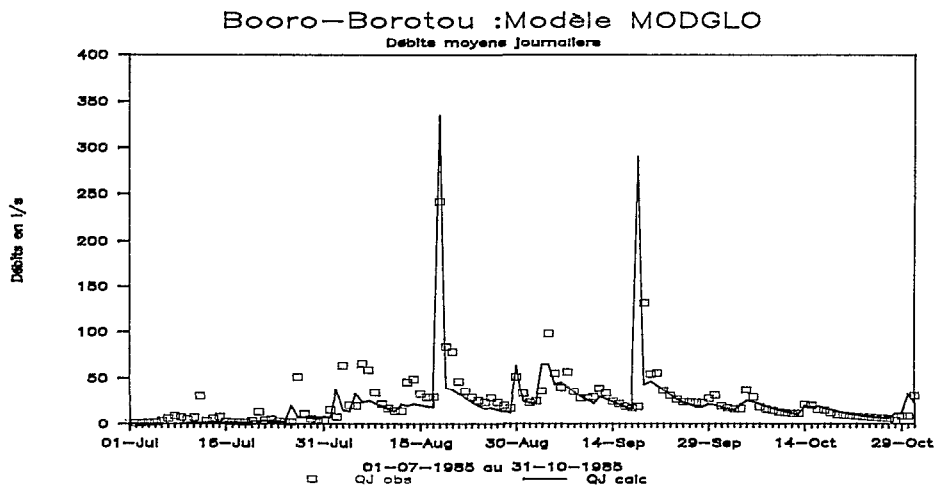
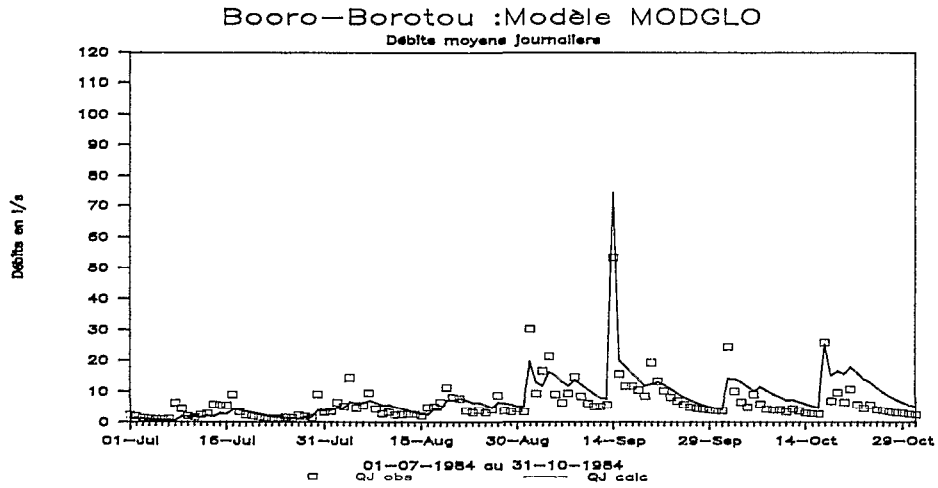
On peut compléter ces résultats par le tableau 5.103 donnant les valeurs des lames ruisselées observées et calculées à la fin de chacune des trois années utilisées pour le calage :

Tableau 5.103

Modèle MODGLO. Comparaison entre lames ruisselées observées et calculées

Année	Lame ruiss. obs.	Lame ruiss. calc.
	mm	mm
1984	9.78	7.31
1985	32.6	44.3
1986	6.07	4.26

FIG 5.106



Les valeurs des critères calculés sur les débits journaliers pour la période totale des trois années sont :

$$C_1 = 0.293 \quad C_5 = -0.713 \quad C_8 = 0.918$$

Le coefficient de corrélation de la régression entre les lames mensuelles observées et calculées est :

$$R^2 = 0.949$$

5.1.4.3. Modèle MODIBI

Nous empruntons à Ibiza (1988) les résultats qu'il a obtenus avec son modèle sur le bassin versant principal de Booro-Borotou à la suite d'un traitement effectué à notre demande.

Au départ les paramètres ont été calqués sur ceux obtenus à l'occasion du calage de ce modèle sur le bassin de Waraniéné-Korhogo (Ibiza, 1985). Les résultats semblant aberrants, une hypothèse dite de *fuite* a dû être formulée. Elle consiste à ne prendre en compte les effets de nappe que sur la superficie du bassin versant réellement affecté par cette nappe ; c'est-à-dire la partie où l'on peut considérer que les apports de la surface à la nappe sont significatifs (cette superficie est fixée *a priori* à 25% de la surface totale du bassin versant ; cela correspond à peu près à toute la surface qui se trouve à l'aval de l'induration de mi-versant). Sur le restant on admet que les apports et le réservoir végétal sont entièrement consommés par évapotranspiration.

Finalement les valeurs suivantes des paramètres ont été adoptées :

HNAPO	= 0 mm	DEFDEB	= 190 mm	DEFKO	= 190 mm
X	= 0,8	HO	= 190 mm	A	= 1
COEF	= 1	HNO1	= 15 mm	R2	= 0,018
HNO	= 160 mm	AL	= 0,02	Q	= 0,15
XT	= 1	FN	= 3,2 mm	P2	= 1
P1	= 0,75				

Comme pour le modèle CREC 5 et le modèle MODIBI, la figure n° 5.107 présente les résultats obtenus pour les débits calculés et observés lors des périodes de saison des pluies sur les trois années. Le tableau n° 5.104 propose un récapitulatif mensuel et annuel sur le bassin versant principal de Booro-Borotou.

Les trois régressions sur les lames mensuelles du calage de CREC 5, de MODGLO et de MODIBI sont représentées sur la figure 5.108.

FIG 5.107

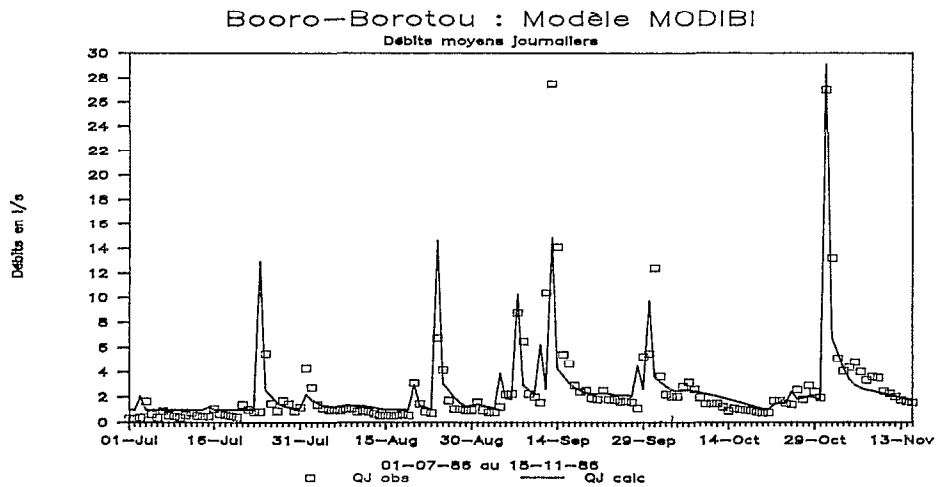
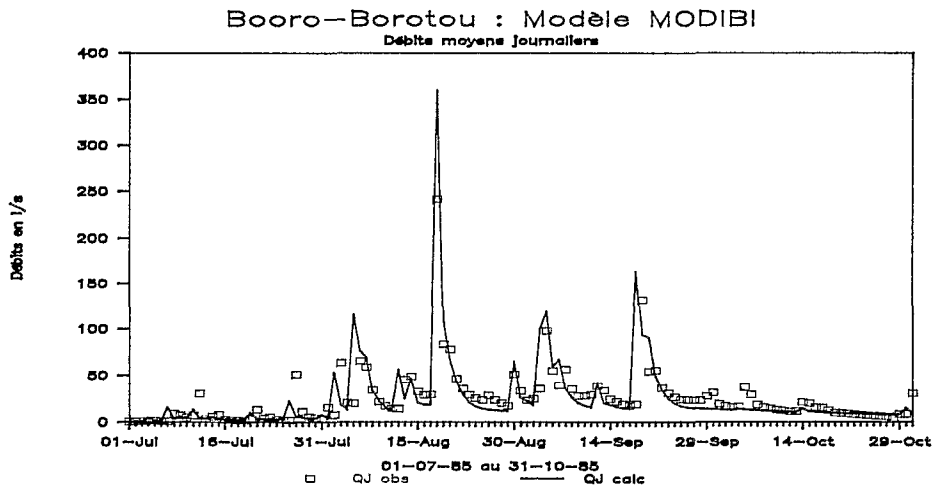
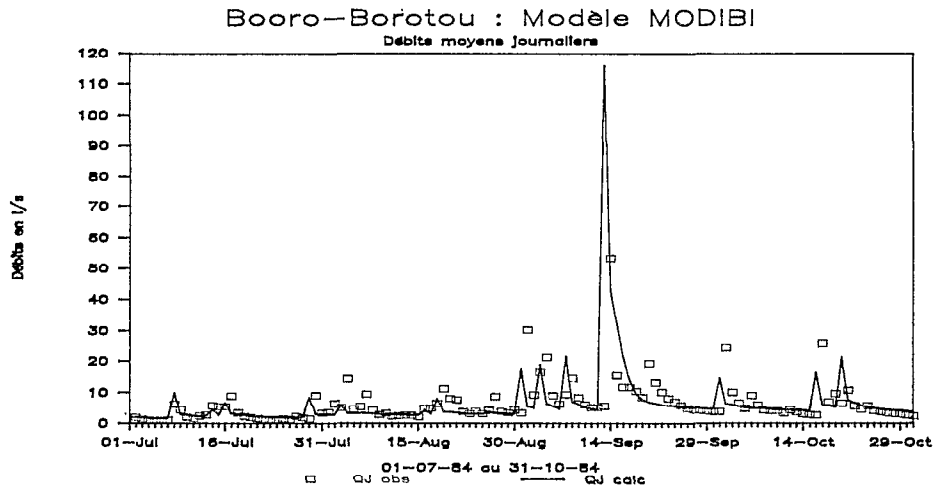


FIG 5.108

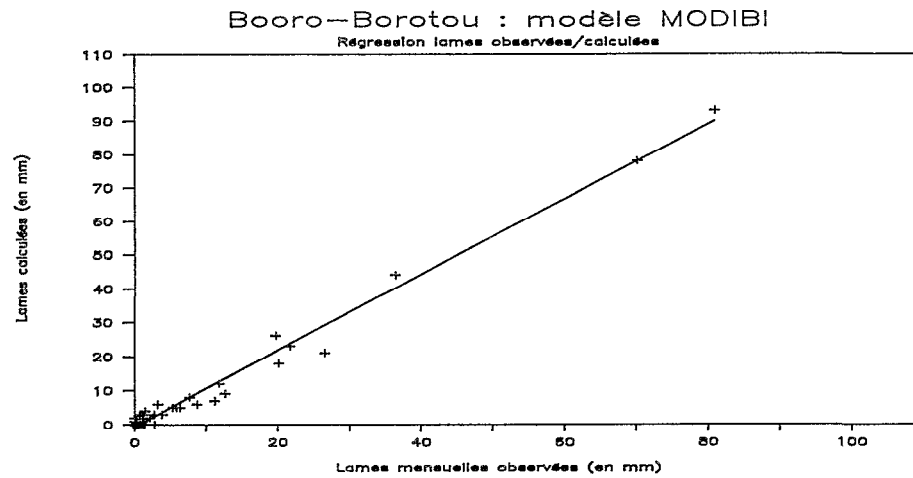
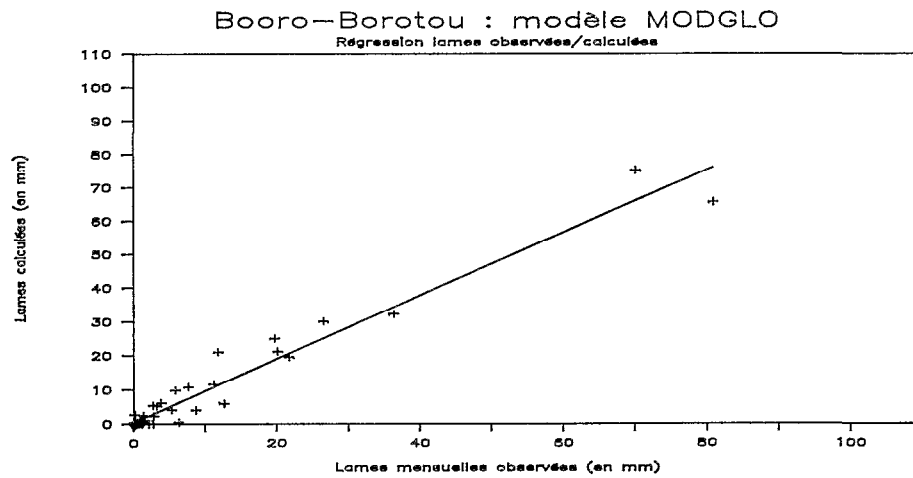
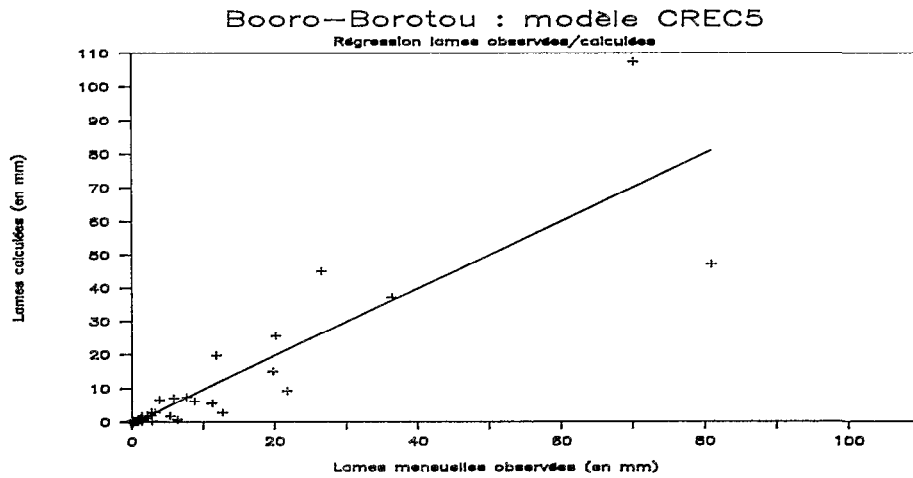


Tableau n°5.104

Modèle MODIBI. Comparaison des lames mensuelles observées et calculées

	Pluie 1984	Lames obs.	Lames calc.	Pluie 1985	Lames obs.	Lames calc.	Pluie 1986	Lames obs.	Lames calc.
Jan				1.7	0.5	0.0	0.3	1.4	0.0
Fév				11.0	0.0	0.0	46.1	0.8	0.0
Mar				16.5	0.0	0.0	84.3	1.2	1.0
Avr	122.1	0.2	2.0	101.7	0.0	1.0	56.1	0.5	0.0
Mai	87.3	0.7	3.0	85.1	0.0	0.0	128.0	1.2	0.0
Jun	229.4	6.3	5.0	124.9	0.2	0.1	112.8	1.2	2.0
Jul	168.2	5.3	5.0	321.1	12.7	9.0	173.4	2.1	2.0
Août	212.4	11.2	7.0	398.5	80.9	93.0	112.8	2.7	3.0
Sep	186.4	19.7	26.0	265.5	70.1	78.0	207.3	8.7	6.0
Oct	112.2	11.8	12.0	107.8	26.5	21.0	154.3	5.8	5.0
Nov	14.2	2.7	3.0	2.1	7.6	8.0	22.8	3.8	3.0
Déc	0.0	0.9	0.0	0.0	2.8	0.0	0.0	0.9	0.0
Ann	1132.2	58.8	63.0	1435.9	201.3	210.1	1098.2	30.3	22.0

Le coefficient de corrélation de la régression entre les lames mensuelles observées et calculées est :
 $R^2 = 0.986$

5.1.4.4. Validation

Les trois modèles ont été validés sur les observations de l'année 1987, sans aucune modification des paramètres. Le tableau 5.105 donne les valeurs mensuelles obtenues pour les trois modèles en 1987.

Tableau 5.105

Année 1987 : comparaison des lames observées et calculées

1987	Pluie	Lame obs.	Lame CREC 5	Lame MODGLO	Lame MODIBI
Jan	1.1	0.4	0.0	0.3	0.0
Fév	35.4	0.0	0.1	0.0	0.0
Mar	58.7	0.0	0.2	0.0	0.0
Avr	23.0	0.0	0.1	0.0	0.0
Mai	172.3	0.0	0.2	0.0	2.0
Jun	166.4	1.5	0.6	1.0	4.0
Jul	135.1	1.2	1.1	0.8	3.0
Août	334.5	21.7	9.3	19.6	23.0
Sep	242.4	36.4	37.2	32.4	44.0
Oct	74.8	20.1	25.5	21.2	18.0
Nov	15.6	3.2	2.9	5.1	6.0
Déc	15.8	1.4	1.8	2.4	0.0
Année	1275.1	85.9	79.0	82.8	100.0

La figure 5.109 présente les lames mensuelles observées et calculées de 1984 à 1987 pour les trois modèles.

Pour la période de validation, les coefficients de corrélation de la régression entre lames observées et calculées sont :

$$R^2(\text{CREC}) = 0.893 \quad R^2(\text{MODGLO}) = 0.990 \quad R^2(\text{MODIBI}) = 0.974$$

La figure 5.110 compare enfin les résultats observés et calculés avec les trois modèles pour les débits moyens journaliers de la période de saison des pluies 1987.

5.1.5. Commentaires

Ces résultats appellent plusieurs constatations immédiates:

1. Les trois modèles confondus, les résultats sont plutôt bons pour les lames écoulées mensuelles et annuelles. La validation est particulièrement bien réussie. Par contre la confrontation entre débits journaliers observés et calculés reste assez décevante (sauf pour le modèle MODIBI qui se comporte plutôt bien).
2. Avec les modèles CREC et MODGLO, l'adéquation entre valeurs observées et calculées s'améliore au cours de l'année avec le remplissage des réservoirs de transfert interne simulant le fonctionnement de l'écoulement de base. Cette adéquation est acceptable d'emblée avec MODIBI.
3. Les résultats du modèle CREC, bien que tout à fait acceptables, sont plutôt moins bons que ceux de MODGLO ou de MODIBI, tant pour les débits moyens journaliers que pour les lames mensuelles en phase de calage comme en phase de validation. Notons que le terme qualitatif *moins bon* s'applique à l'appréciation visuelle et aux coefficients de régression, mais pas aux valeurs des critères d'optimisation qui sont tout à fait comparables (ou du moins non démonstratives) et cela quel que soit le critère.
4. Le calage s'améliore avec le temps, même devant un échantillon d'observation difficile puisque faisant se succéder une année normale (1984), une année nettement excédentaire (1985), une année largement déficitaire (1986) et de nouveau une année normale (1987). MODGLO et MODIBI s'adaptent assez bien dès 1984, mais CREC ne devient satisfaisant qu'en 1985.
5. On peut enfin noter que les paramètres X4 (défini comme *réserve maximale*) de CREC et CRT (défini comme *capacité de rétention en eau du sol*) de MODGLO ont un ordre de grandeur tout à fait comparable :

$$X4 = 752.1 \text{ mm} \quad CRT = 896.3 \text{ mm}$$

6. Dans le cas de MODIBI, le volume initialement très élevé (l'ordre de grandeur de 800 mm correspondait aux valeurs de X4 et CRT) du réservoir de l'horizon végétal a été réduit avec l'hypothèse (Ibiza, 1988) qu'il n'y avait que le quart du bassin qui contribuait efficacement à l'écoulement de base.

Ces constatations entraînent des commentaires :

1. Il apparaît que les trois modèles appliqués au bassin versant principal de Booro-Borotou sont tout à fait adaptés pour une modélisation de la ressource en eau si l'on s'en tient à un pas de temps mensuel. L'objectif initial est donc atteint dans les trois cas. Et l'introduction d'une longue série d'observations pluviométriques permettrait par simulation d'étudier sans grand risque le potentiel de ressource en eau du bassin.

FIG 5.109

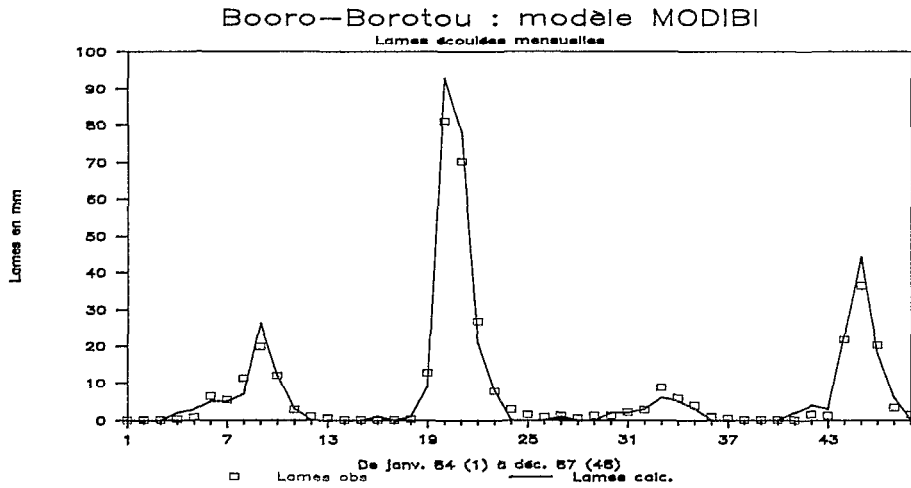
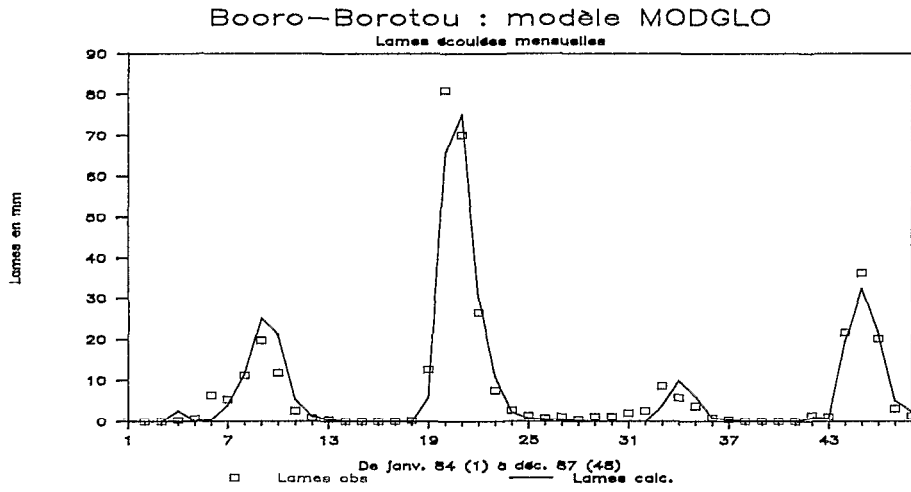
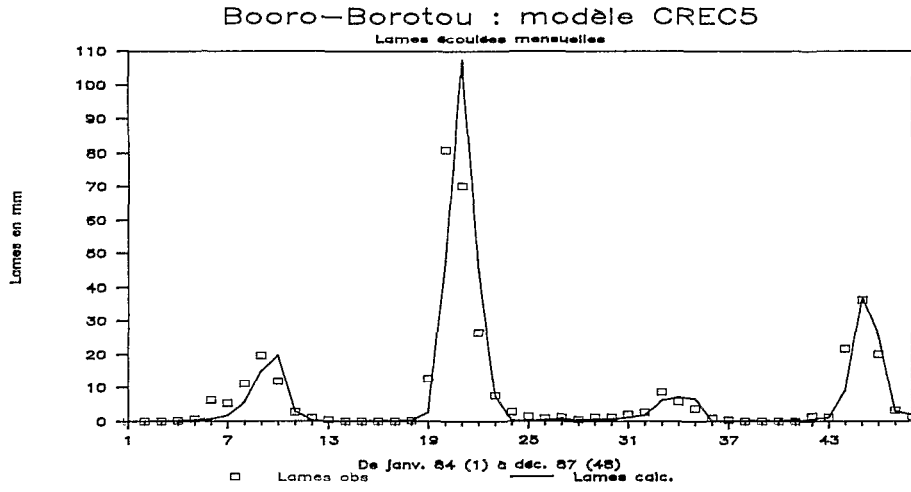
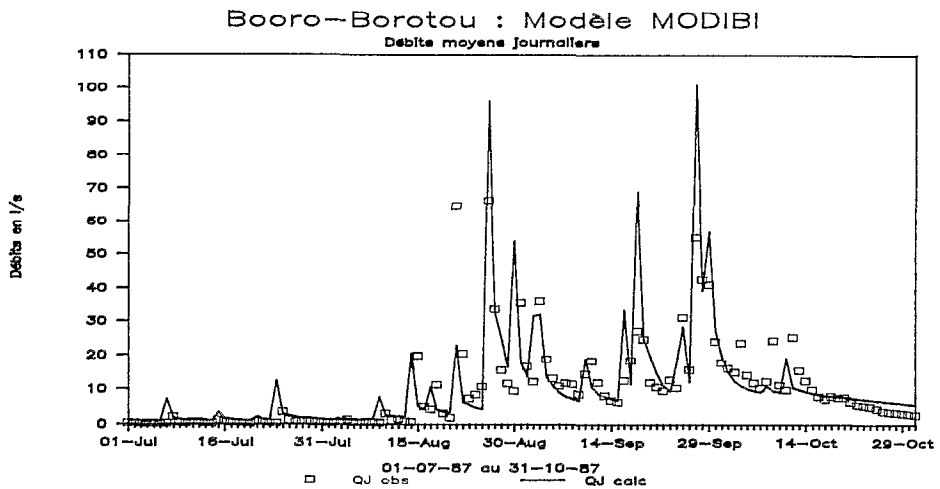
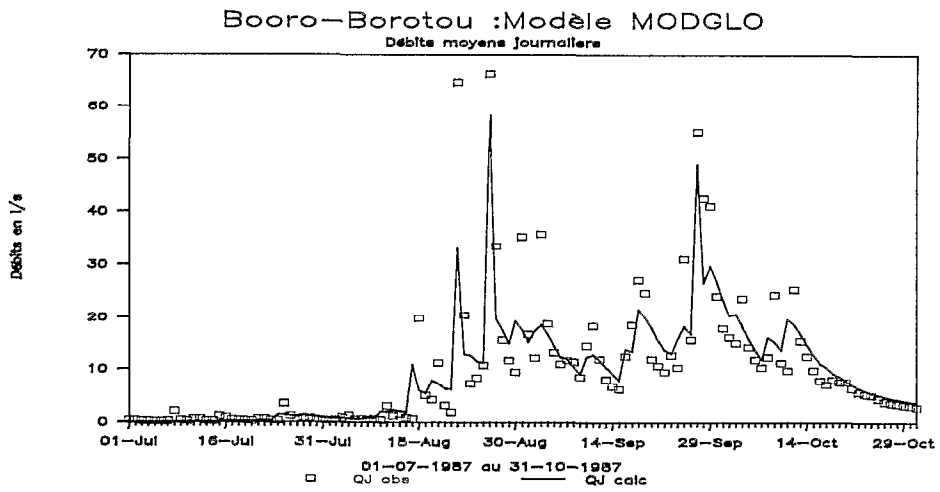
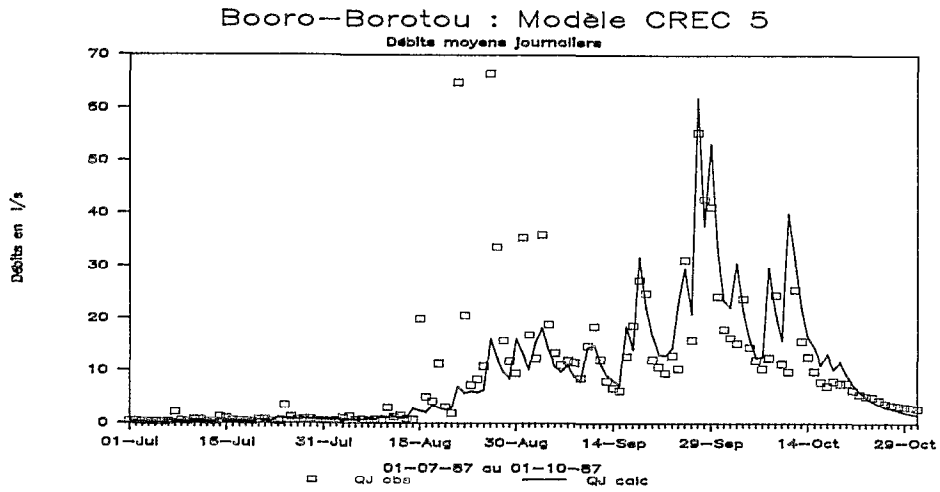


FIG 5.110



2. La deuxième constatation est essentielle, car elle confirme, si besoin est, l'influence primordiale des stockages et des transferts dans le fonctionnement de Booro-Borotou. L'hypothèse selon laquelle la production et surtout le transfert des grandeurs du bilan hydrique sont évolutifs dans l'année, liés au remplissage des niveaux de stockages, se voit ainsi confortée. Le modèle MODIBI qui intègre cette hypothèse a un bon comportement dès le début de la simulation.

3. La comparaison des résultats obtenus avec CREC et MODGLO semble donner un avantage subjectif à MODGLO. La raison dirait que cela est fortuit, ou simplement lié à une meilleure capacité d'adaptation de MODGLO à des surfaces de bassin versant très faibles pour lesquelles ces modèles n'ont pas été conçus. Mais on pourrait également penser que le fait d'ajuster en *aveugle*, comme dans CREC, est moins efficace qu'un ajustement qui fait intervenir (au moins dans une faible mesure) la bonne connaissance du terrain et la qualité des observations qui y ont été réalisées, comme dans MODGLO. Enfin MODIBI est assez nettement meilleur, mais ce modèle a fait l'objet d'un calage manuel beaucoup plus délicat et nécessitant l'expérience de son auteur.

4. La faculté d'adaptation de ces trois modèles à une succession de situations différentes est remarquable. Nous doutions de la possibilité de simuler correctement l'enchaînement 1985-1986 et pensions initialement caler les modèles sur les deux premières années seulement. Les résultats (bien sûr imparfaits) de 1986 nous ont donné tort.

5 et 6. Enfin, il est remarquable que les paramètres X4 et CRT qui représentent un concept similaire, mais sont utilisés de façons fondamentalement différentes dans CREC et dans MODGLO, prennent des valeurs comparables en phase de calage. Il est probable que la valeur réelle de la grandeur assez théorique qu'est la *capacité de rétention en eau du sol* ne soit pas très différente de X4 et de CRT. Cette énorme capacité de stockage a également été décelée par le modèle MODIBI et la solution adoptée pour la réduire correspond à l'hypothèse que nous avons formulée sur le fonctionnement général du bilan hydrique à Booro-Borotou. On peut comparer ce résultat aux chiffres de variation de stock mesurés sur les tubes neutroniques 4 et 8, dont l'amplitude dépasse 500 mm.

5.2. LE MODELE COUPLÉ

Le travail présenté dans ce chapitre a été possible grâce d'abord à un échange permanent avec Georges Girard, ensuite à l'assistance de Thierry Lebel pour de nombreuses difficultés informatiques, enfin à un accueil périodique au Centre d'Informatique Géologique de l'École des Mines de Paris.

5.2.1. Présentation du modèle couplé

Le modèle couplé, MODCOU, (Ledoux, 1980 ; Girard et al., 1981) est un modèle hydrologique pluie-débit que l'on peut qualifier de modèle conceptuel déterministe distribué. Il est constitué par le mariage entre un modèle hydrologique superficiel, CEQUEAU, développé dans le cadre d'une coopération entre l'ORSTOM et l'Institut National de la Recherche Scientifique du Québec (Girard et al., 1972) et un modèle hydrogéologique multicouche, NEWSAM, élaboré par le Centre d'Informatique Géologique de l'École des Mines de Paris (Ledoux, 1978, 1980 et 1986 ; Marsily et al., 1978).

Ce modèle a fait l'objet de nombreuses applications dans des régions diverses. On peut en particulier citer les thèses de Gille (1985) et Boukerma (1987). Des applications particulières, comme l'étude de la pollution par les nitrates en milieu agricole, ont été développées récemment (Geng, 1988).

5.2.1.1. Le principe :

Le modèle couplé a été réalisé avec le souci d'une représentation aussi phénoménologique que possible d'un système hydrologique. L'espace du système étudié est divisé en deux ensembles : le domaine de surface et le domaine souterrain entre lesquels tous les échanges sont possibles. Spatialement chacun de ces domaines est représenté par une "couche" (éventuellement plusieurs pour le souterrain), elle-même découpée en mailles carrées élémentaires régulières (chacune des mailles pouvant être redivisées en 4, 16 ou 64) dont la taille est fonction de l'échelle du système, de la connaissance du milieu étudié et de la variabilité des paramètres actifs dans le fonctionnement hydrologique local.

On superpose sur ce maillage régulier d'une part les "zones météo", d'apports pluviométriques et d'aptitude à l'évapotranspiration homogène, et d'autre part les "zones de production", de comportement hydrodynamique local homogène.

Le modèle distingue, pour représenter le cycle de l'eau, cinq fonctions interconnectées :

- la fonction d'entrée ; c'est l'apport pluviométrique avec un découpage selon un pas de temps (pas de temps météo) élémentaire compatible avec le problème posé.
- la fonction de production ; elle répartit à chaque pas de temps et pour chaque zone de production la donnée d'entrée entre l'évapotranspiration, le ruissellement de surface, l'infiltration vers les couches souterraines et une réserve qui vient compléter la donnée d'entrée au pas de temps suivant.
- la fonction de transfert de surface ; elle définit les temps de parcours de l'eau dans le réseau hydrographique.
- la fonction de transfert souterrain ; elle définit les temps de parcours dans la zone non saturée comme dans les nappes et contrôle les niveaux piézométriques.
- la fonction d'échange surface-souterrain ; elle redistribue le stock souterrain en fonction de contraintes naturelles de drainage ou de potentiel, mais aussi d'interventions extérieures (par exemple des pompages).

5.2.1.2. L'organisation générale :

Le modèle est un programme écrit en FORTRAN qui nécessite des moyens de calcul relativement puissants ; mais, avec les développements techniques récents, une adaptation est en cours sur micro-ordinateur. Il offre une présentation modulaire assez souple permettant la résolution de problèmes spécifiques. Sa mise en oeuvre nécessite cependant un minimum de connaissances informatiques, en particulier sur la manipulation et la mise en forme de fichiers de données et de travail qui peuvent atteindre des volumes de plusieurs méga-octets. Il est divisé en cinq étapes qui s'effectuent séquentiellement (pour une présentation très détaillée, consulter Girard et al., 1981) :

Etape GEOCOU :

Cette étape se charge de la définition des caractéristiques géométriques et physiographiques du domaine étudié. Elle met en place la structure maillée sur les couches du domaine de surface et du domaine souterrain. Elle définit sur cette structure la physiographie du milieu naturel (altitude, superficie et répartition des zones de production) et la configuration du réseau de drainage avec les arbres d'écoulement. Un grand nombre de vérifications sont effectuées pour contrôler l'absolue compatibilité de toutes les caractéristiques des mailles entre elles sur la surface et dans le souterrain.

Etape MODSUR :

Elle est centrée sur la modélisation des phénomènes superficiels et assure essentiellement les fonctions d'entrée, de production et de transfert de surface.

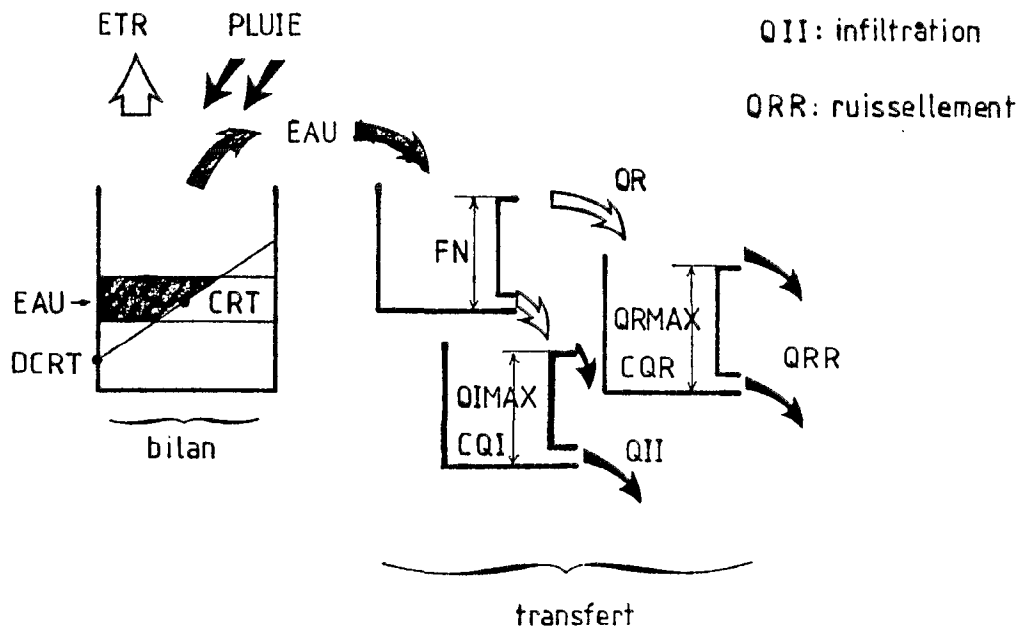
Les *entrées* sont constituées par les précipitations, les évapotranspirations, les temps de concentration des bassins, les paramètres des fonctions de production pour chacune des zones de production et la définition des *zones météorologiques* sur la structure maillée de surface.

Le bilan hydrologique est évalué à partir des entrées et de la fonction de production qui répartit ces entrées entre lame infiltrée, lame ruisselée, évaporation et stockage dans le sol à chaque pas de temps par zone *météo*, type de production et sous-bassin de calcul.

Le modèle propose une fonction de production *standard* schématisée par la figure 5.201. Cette fonction a deux paramètres de bilan (CRT et DCRT) et cinq paramètres de réglage de l'écoulement (FN, CQR, QRMAX, CQI et QIMAX). On peut noter que cette fonction est une forme évoluée de la fonction de production du modèle MODGLO. D'autres fonctions de production sont possibles comme celle proposée pour l'étude de la Mare d'Oursi (Chevallier, 1985 ; Chevallier et al., 1985 ; Chevallier et al., 1986) utilisant directement les résultats de mesures sur parcelles à l'aide du simulateur de pluies.

Les sorties de ce module donnent pour chaque pas de temps de simulation les infiltrations sur les mailles de surface, le ruissellement sur les sous-bassins de calcul et aux exutoires.

FIG 5.201 : SCHEMA DE PRINCIPE DE LA FONCTION DE PRODUCTION STANDARD
 Extrait de Girard et al., 1981



$$\begin{aligned}
 RMAX &= 2 (CRT - DCRT) + DCRT \\
 RBA &= \max (DCRT, R) - DCRT \\
 RHA &= \min (R + P, RMAX) - DCRT \\
 DR &= \max (0, RHA - RBA) \\
 EAU &= \max (RP - RMAX, 0) + DR (2 RBA + DR) + 4 (CRT - DCRT) \\
 QI &= \min (EAU, FN)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 QR &= \max (0, EAU - QI) \\
 ETR &= \min (R + P - EAU, ETP) \\
 R &= R + P - EAU - ETR
 \end{aligned}$$

Etape NONSAT :

Elle assure le transfert de l'infiltration calculée par MODSUR à travers la zone non saturée pour l'alimentation de la nappe.

Etape MODCOU :

Elle simule finalement le devenir de l'eau disponible, simultanément à travers le domaine de surface et le domaine souterrain, en tenant compte des interactions respectives.

Les données d'entrée sont les paramètres du domaine souterrain (transmissivité, emmagasinement, coefficients de drainage) et les sorties de l'étape MODSUR.

Les conditions initiales sont définies par un premier calcul qui propose une solution en régime *permanent* défini par le comportement moyen obtenu à partir de MODSUR.

A partir de ce régime permanent, le régime *transitoire* est évalué pour chaque pas de temps de calcul et fournit en sortie les niveaux piézométriques pour l'ensemble des mailles du domaine souterrain et le débit en n'importe quel point du réseau de drainage.

Etape COMPAR :

Elle permet à la fin des étapes MODSUR ou MODCOU de confronter graphiquement les résultats du calcul avec les données d'observation de débits en un point quelconque du réseau hydrographique ou avec les données d'observation de piézométrie en un point quelconque du domaine souterrain étudié.

5.2.2. Application du modèle couplé au bassin versant de Booro-Borotou

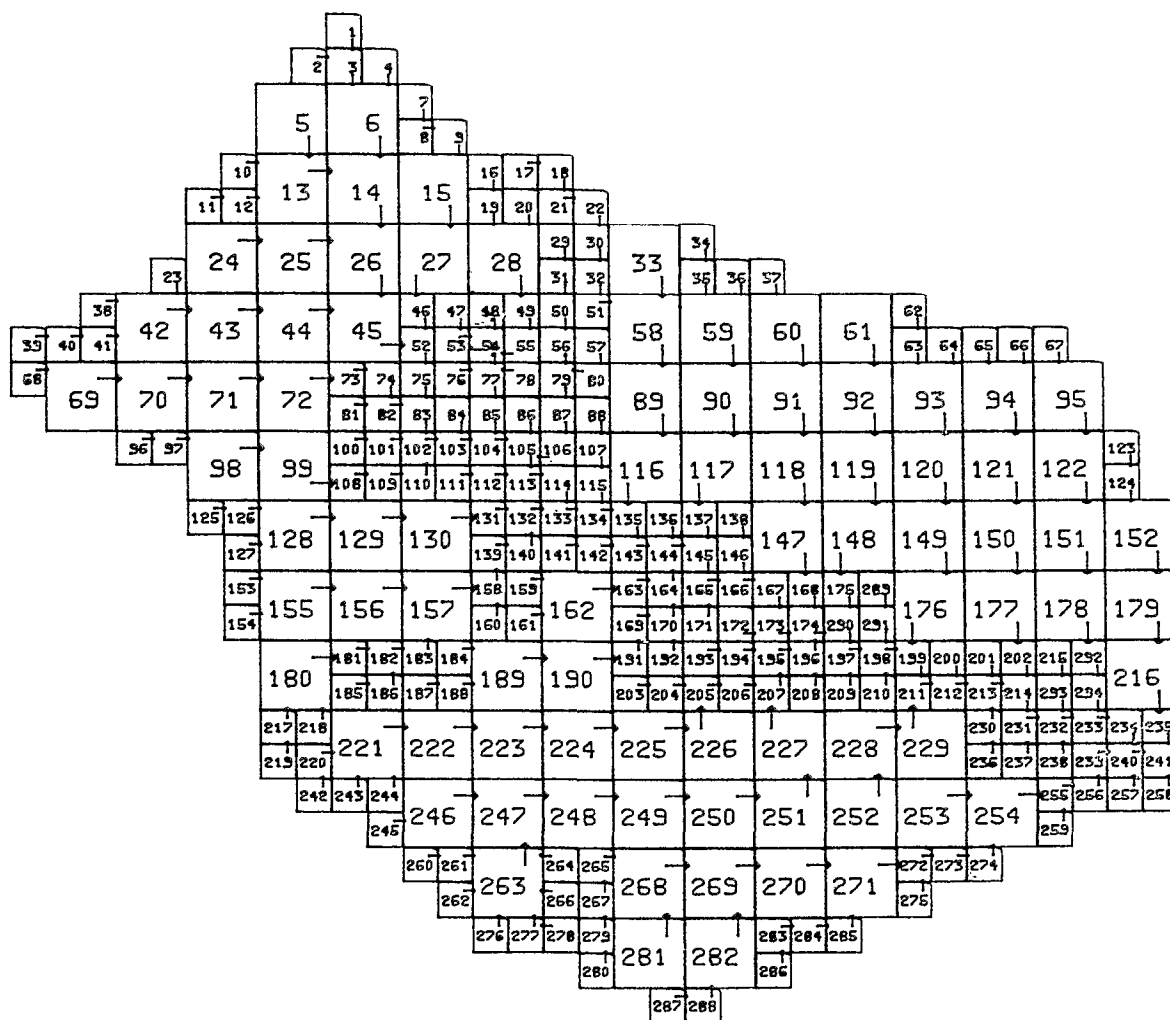
L'application du modèle couplé au bassin versant de Booro-Borotou soulève de nombreux problèmes pour la plupart liés au fonctionnement hydrologique assez bien connu avec une échelle fine de description, fonctionnement dont il n'est pas toujours facile de simplifier les mécanismes.

5.2.2.1. La représentation géographique

La géométrie du bassin versant est représentée par une couche de surface (figure 5.202) et une seule couche souterraine (figure 5.205). La maille élémentaire a 100 m de côté. Elle est divisée le cas échéant en moyennes mailles de 50 m de côté et, sur la couche souterraine dans le bas-fond en petites mailles de 25 m de côté. Cela fait un total de 294 mailles de surface et de 474 mailles de souterrain.

Le modèle couplé ne permet de transfert dans les deux sens entre la surface et le souterrain que dans des mailles appartenant au réseau hydrographique. C'est la raison pour laquelle l'ensemble des mailles du bas-fond sont considérées dans l'application à Booro-Borotou comme "mailles rivières" (figure 5.203), même si la rivière n'y passe pas vraiment, de façon à simuler la réalité de l'infiltration d'un ruissellement de surface avant de parvenir au marigot ou de l'apparition en période très humide de lignes de sourcins sur les bas de versants.

FIG 5.202 : MAILLAGE DE LA SURFACE AVEC LES DIRECTIONS D'ECOULEMENT



5.2.2.2. La production et le transfert de surface

Le pas de temps élémentaire choisi pour le calcul est celui de la journée. La totalité des informations pluviométriques disponibles sur le bassin est prise en compte avec un découpage en 12 "zones météo" (figure 5.204), correspondant aux 12 postes pluviométriques répartis sur le bassin. Pour l'évapotranspiration, les valeurs adoptées sont les moyennes mensuelles interannuelles calculées par la formule de Penman.

7 zones homogènes de production de surface sont cartographiées. Plusieurs critères de détermination de ces zones sont possibles. A Oursi (Chevallier et al., 1985) ou Gagara (Albergel et al., 1987) priorité avait été donnée aux états de surface. A Booro-Borotou à la lumière des observations et du comportement hydrologique du bassin, il a semblé plus conforme à la réalité d'adopter des critères morphopédologiques :

- les buttes et plateaux,
- les sols rouges,
- les sols ocres,
- les sols jaunes,
- l'induration de mi-versant et sa zone d'affleurement gravillonnaire,
- le bas-fond représentant le système hydromorphe,
- les champs cultivés.

Le problème des temps de transfert de surface est inexistant, puisque le temps de concentration du bassin est largement inférieur au pas de temps élémentaire de la journée.

5.2.2.3. Les transferts dans le souterrain

Dans le cas de Booro-Borotou, il n'est pas fait de modélisation particulière pour les transferts dans la zone non saturée.

Le niveau piézométrique est réglé essentiellement par deux jeux de paramètres : les transmissivités qui représentent les vitesses des flux d'écoulement dans la zone saturée et les emmagasineurs qui chiffrent les possibilités de stockage du souterrain.

Dans une optique simplificatrice, ces transmissivités et ces emmagasineurs qui peuvent être définis pour chacune des mailles de la couche souterraine sont considérés comme homogènes dans trois grandes zones (figure 5.207) :

- d'une part, tout ce qui se trouve à l'amont de l'induration de mi-versant ;
- d'autre part, les pentes à l'aval de l'induration ;
- enfin, le bas-fond hydromorphe.

Les données d'observation pour contrôler ces paramètres se limitent au suivi de 19 piézomètres situés tous à l'aval de l'induration et de deux stations hydrométriques (figure 5.206).

FIG 5.203 :

COUCHE DE SURFACE
MAILLES RIVIERES

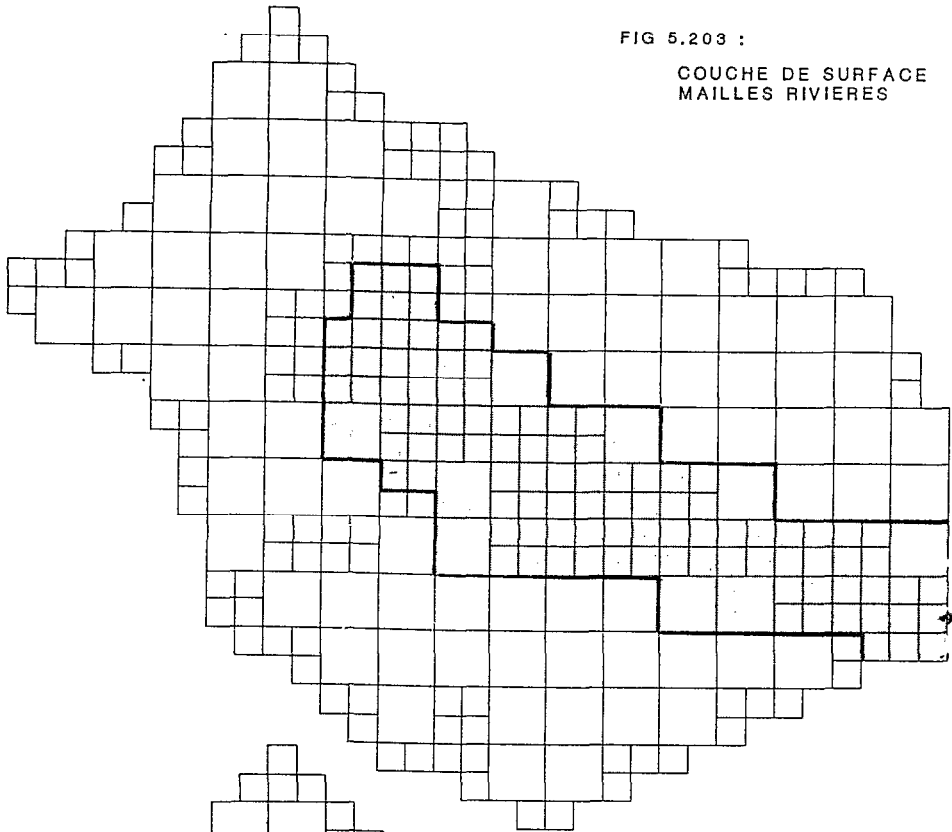


FIG 5:204 :

COUCHE DE SURFACE
ZONES METEOROLOGIQUES

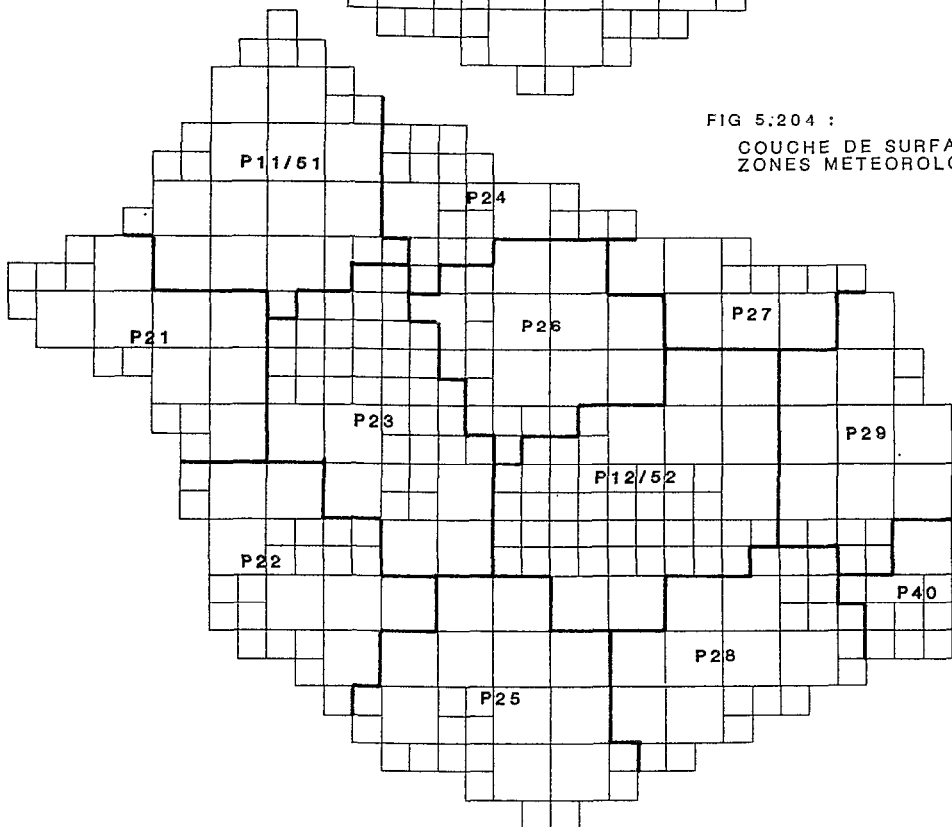


FIG 5.205 : MAILLAGE DE LA COUCHE SOUTERRAINE

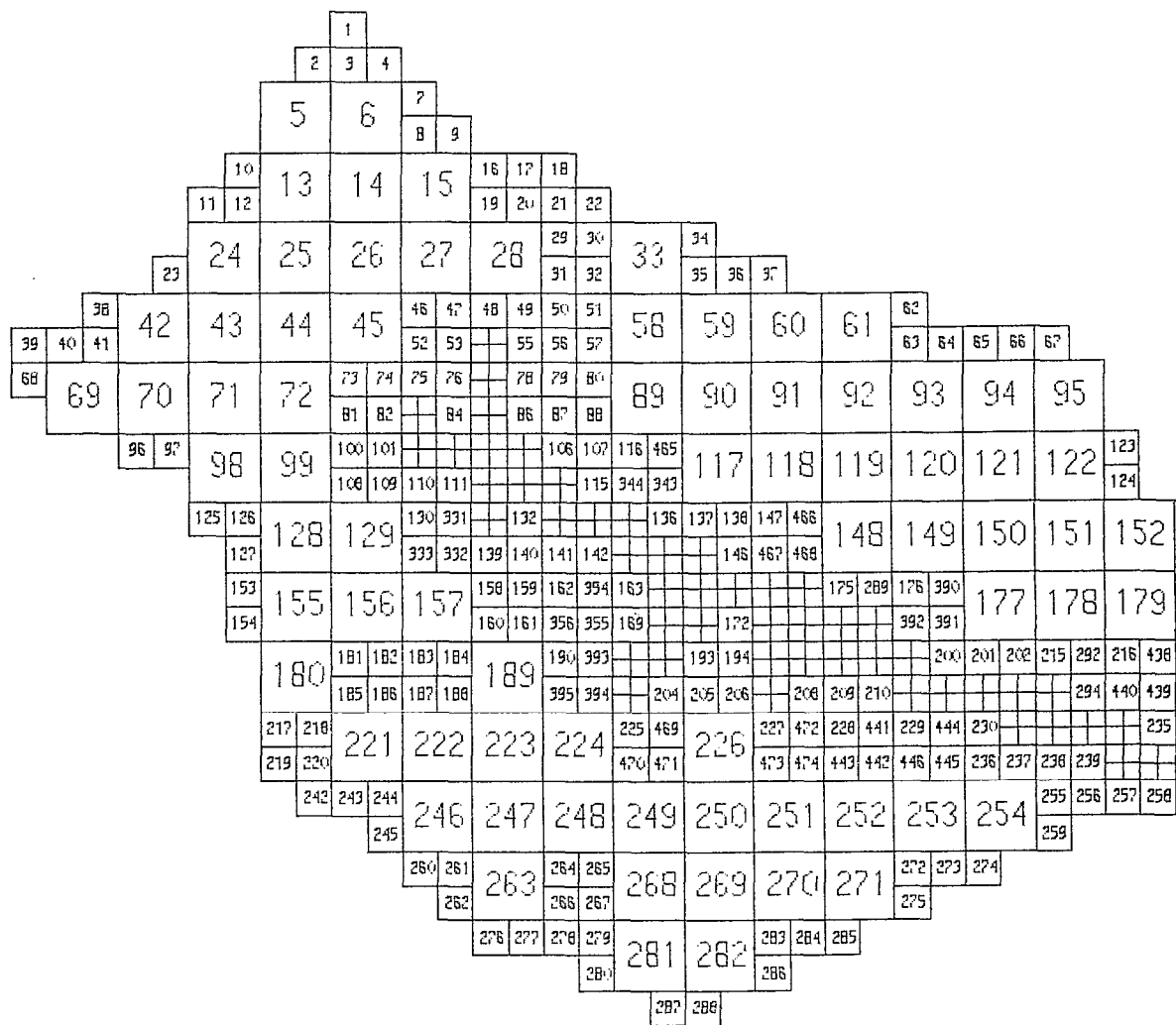


FIG 5. 206 : COUCHE SOUTERRAINE
POINTS DE CONTROLE

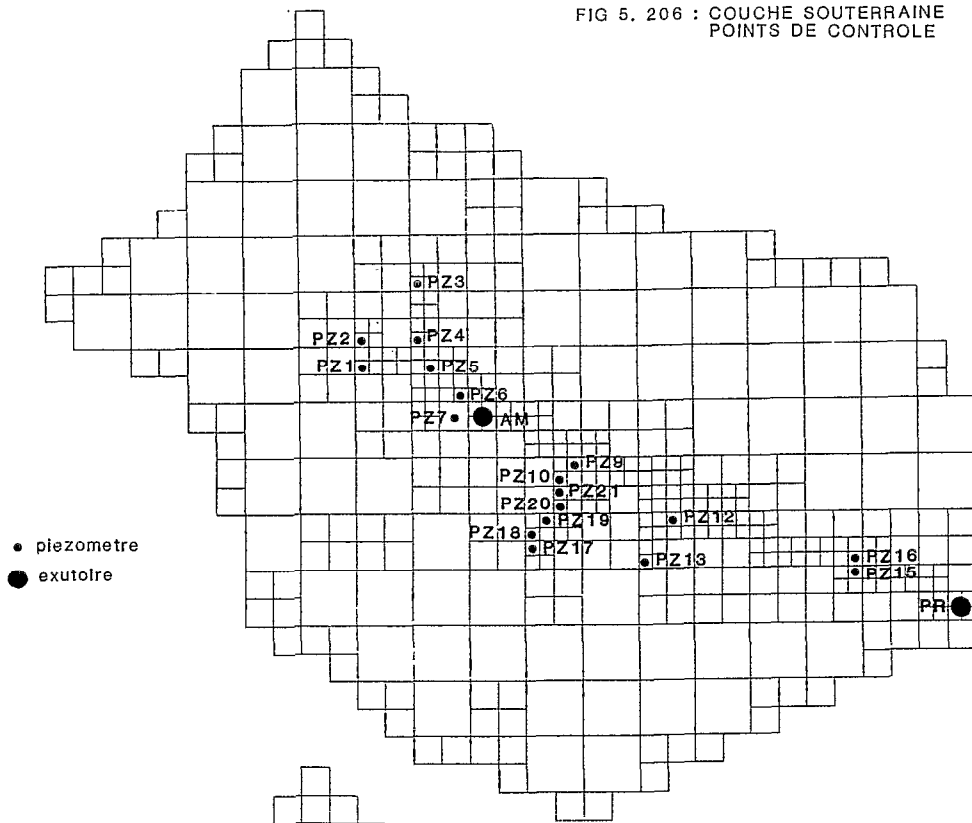
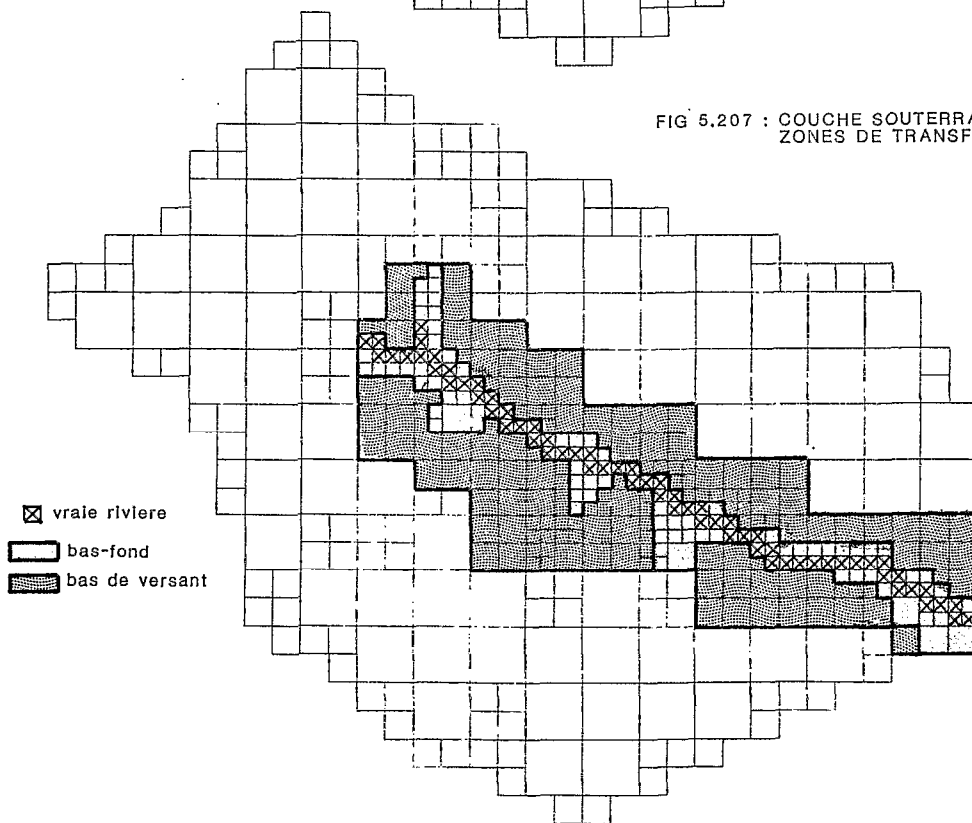


FIG 5.207 : COUCHE SOUTERRAINE
ZONES DE TRANSFERT



5.2.2.4. Résultats

Le calcul est effectué en *années hydrologiques* et, comme pour les modèles, globaux deux années fictives précèdent les années d'observation de façon que le modèle soit parfaitement initialisé. La méthode est la même qu'avec les autres modèles, le calage se faisant sur la période mars 1984 à avril 1987 et la validation sur l'année 1987-88.

De très nombreux passages ont été nécessaires pour arriver à un résultat assez décevant. Les figures n° 5.208 à 5.211 constituent l'une des meilleures adéquation pour les débits moyens journaliers, mais la simulation des niveaux piézométriques n'est pas bonne. Nous reviendrons dans le paragraphe suivant sur les causes de ce résultat, somme toute assez mauvais.

Pour ce qui concerne la simulation des lames mensuelles (figure n°5.212), on constate que le résultat est très acceptable ; mais le coefficient de corrélation (calculé sur 48 valeurs mensuelles d'avril 1984 à mars 1988) est comparable à ceux obtenus avec les modèles globaux, sans être vraiment meilleur :

$$R^2 = 0,983$$

Le calcul des critères sur les débits journaliers des quatre années donne des résultats nettement moins bons qu'avec les modèles globaux :

$$C1 = -0.538 \quad C5 = -2.57 \quad C8 = 2.81$$

A titre indicatif nous donnons dans le tableau 5.201 les valeurs des principaux paramètres de la fonction de production qui ont conduit à ce résultat. Les valeurs des transmissivités et des coefficients d'emmagasinement utilisées sont trop approximatives pour être données de façon péremptoire. Leurs ordres de grandeur sont respectivement $10^{-4}/10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ et 10^{-2} .

Tableau n° 5.201

Principales valeurs des paramètres adoptées dans l'application du Modèle Couplé à Booro-Borotou

zone de production	CRT	DCRT	FN
buttes	500	70	40
champs	300	70	8
bas-fond	300	50	10
mi-versant	350	50	4
sols jaunes	300	50	8
sols ocres	300	70	6
sols rouges	450	70	12

5.2.2.5. Commentaires

Au regard du travail considérable de mise en oeuvre et à une tentative d'intégration de tous les éléments disponibles sur le fonctionnement du bassin on conçoit que le résultat est extrêmement décevant. Naïvement nous pensions arriver à un résultat quasi parfait sur les débits moyens journaliers pour nous intéresser à des pas de temps plus courts, voire à reconstituer des crues comme sur les bassins versants de Polaka (Chevallier et al., 1985) ou de Gagara (Albergel et al., 1987). Or on s'aperçoit que la mise en oeuvre du Modèle Couplé n'apporte pas d'éléments spectaculairement meilleurs que les modèles globaux.

FIG 5.208

Modèle couplé

Juin 1984-novembre 1984

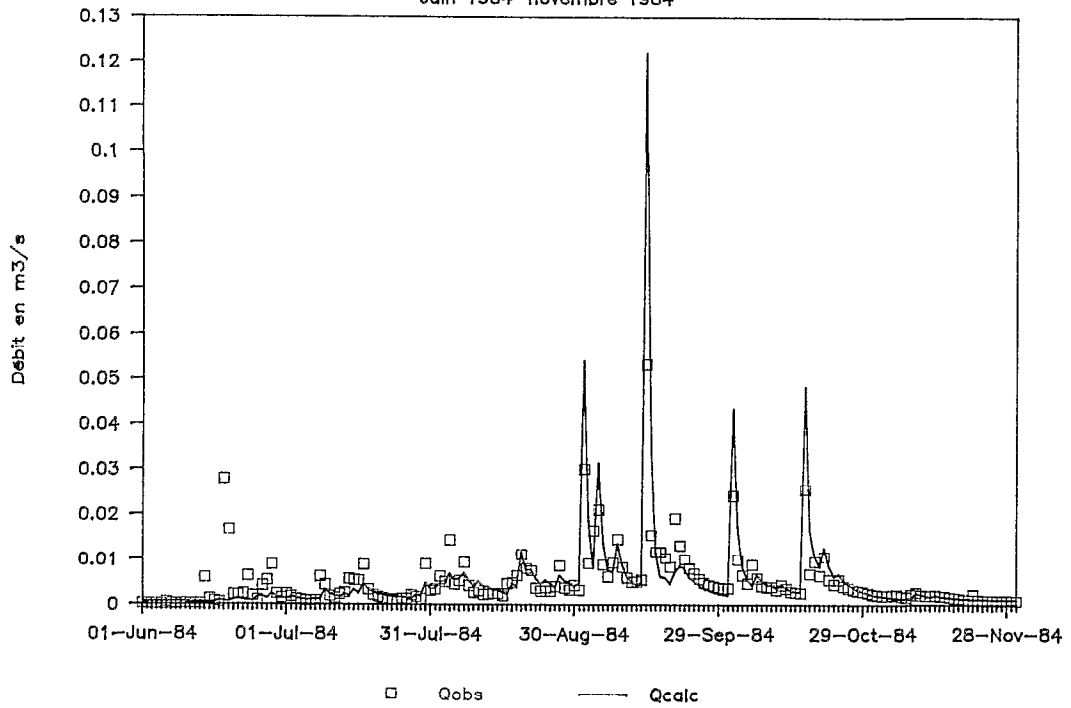


FIG 5.209

Modèle couplé

Juin 1985-novembre 1985

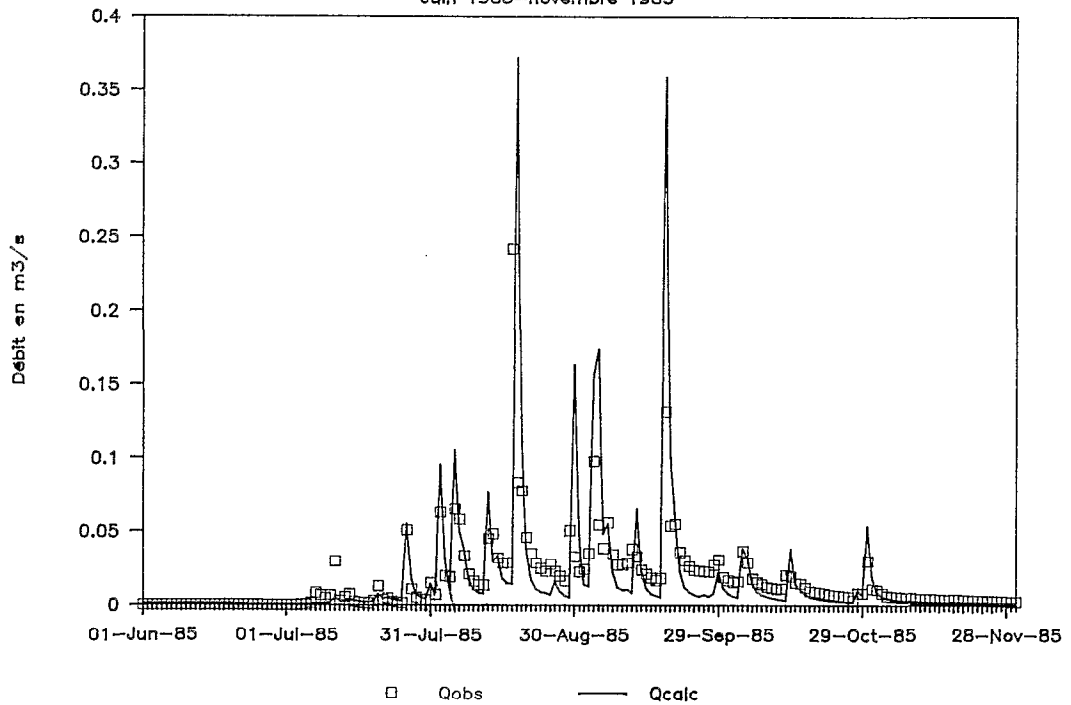


FIG 5.210

Modèle couplé

Juin 1986—novembre 1986

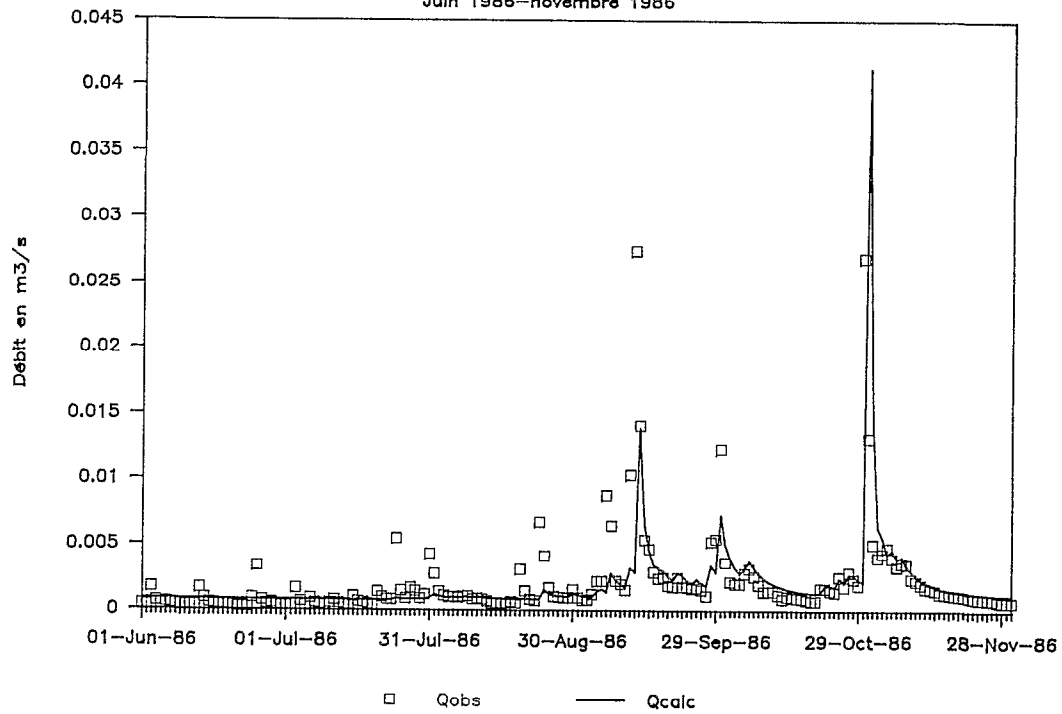


FIG 5.211

Modèle couplé

Juin 1987—novembre 1987

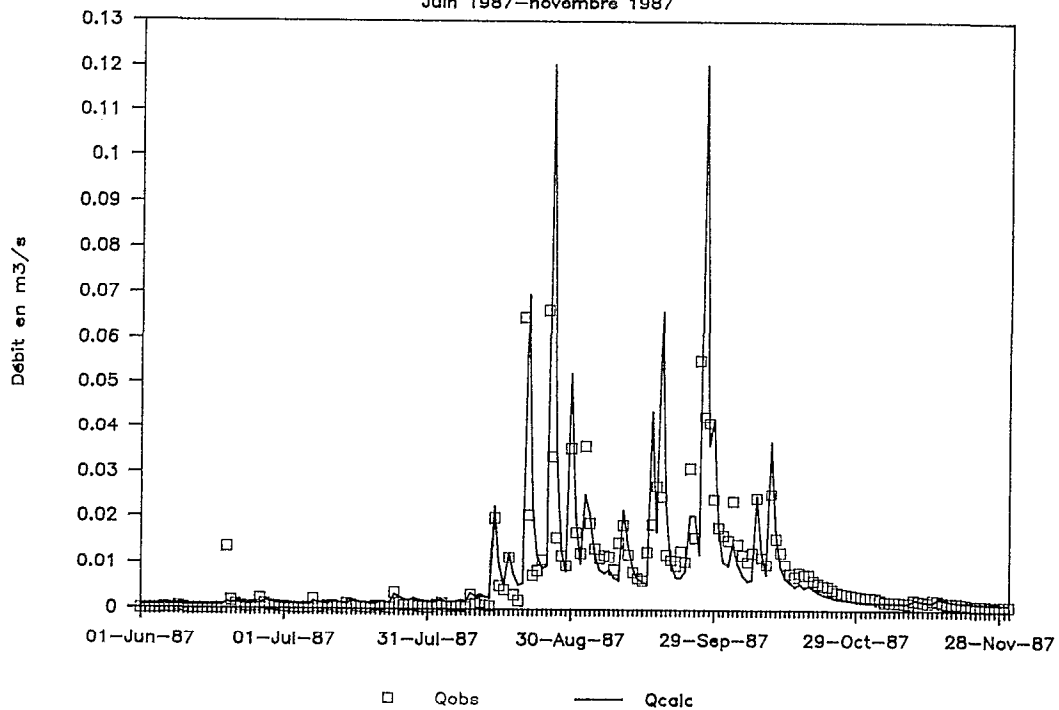
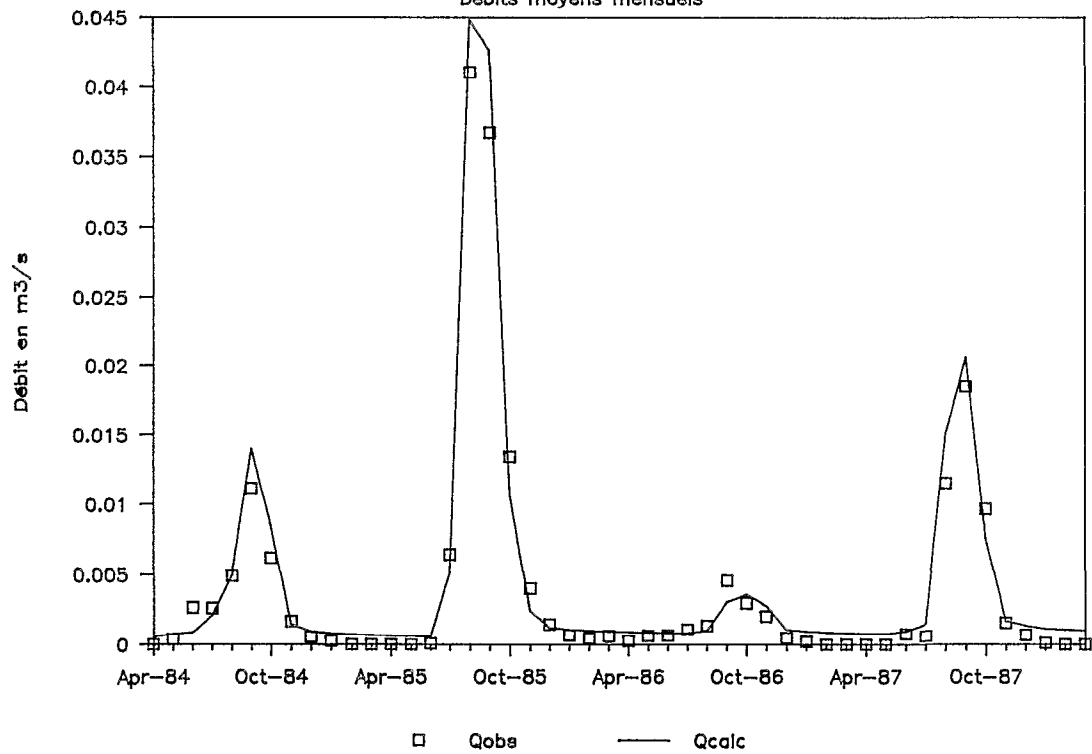


FIG 5.212

Modèle couplé

Débits moyens mensuels



Les raisons sont à chercher dans deux directions : la production et le transfert.

Production :

La fonction de production du modèle couplé est essentiellement une fonction de bilan hydrique qui fournit à partir des données d'entrée du modèle :

- le ruissellement au sens hortonien ;
- l'infiltration susceptible de parvenir à la nappe après le prélèvement de l'évapotranspiration.

Le modèle est conçu de sorte que le ruissellement est intégralement restitué à l'exutoire de chaque sous bassin de calcul. Les échanges entre le volume ruisselé et la nappe ne sont possibles que sur les mailles *rivières*. Pour s'affranchir de cette difficulté, il a fallu recourir à un artifice qui a consisté à déclarer comme *rivières* les mailles où le ruissellement est susceptible de s'infiltrer.

De plus, on conçoit que, dans un fonctionnement comme celui décrit au chapitre 4.4, il y a une interaction permanente entre transfert et production (c'est d'ailleurs le principe de la théorie des *aires contributives variables*) que la fonction de production séparée du transfert dans le modèle couplé ne peut reproduire que très imparfaitement. Ce problème, dont il n'est pas possible de s'affranchir à cause de la structure-même du Modèle Couplé (qui sépare de façon stricte production et transfert), se traduit sur les hydrogrammes soit par la surestimation assez large des pointes de débits en milieu ou en fin de saison des pluies, soit par l'*oubli* de certaines crues en début de saison des pluies ou en année sèche.

Transfert :

Plus importantes sont sans doute les difficultés de simulation des transferts, essentiellement souterrains.

En surface, en supposant les questions posées par la production résolues, il n'y a pas de problème, l'ordre de grandeur des temps transfert étant inférieur au pas de temps de calcul.

Les échanges entre la surface et le souterrain sont réalisés dans les mailles *rivières*. On a supposé qu'ils se produisaient préférentiellement dans le lit de la rivière et non sur les versants hydromorphes (d'où la distinction des *vraies rivières* dans la zone du bas-fond). Ils sont, dans le modèle, réglés par une filtration directement associée au niveau piézométrique. Or nous avons vu, dans le chapitre sur le fonctionnement, que les mécanismes étaient plus complexes et que l'origine des écoulements était multiple dans le lit comme sur les versants.

Surtout, l'essentiel des difficultés est dû à la représentation des transferts dans la zone saturée souterraine. La connaissance de cette zone est malheureusement très succincte. Nous avons, dans notre représentation modéliste, travaillé avec une nappe dont l'extension est générale, sans tenir compte des ondulations du plancher ou de phénomènes de seuils. Nous ne disposons de données de contrôle que dans le bas-fond et sur quelques points à l'aval de l'induration de mi-versant. Or il est très vraisemblable que la morphologie interne est beaucoup plus complexe que la représentation simpliste adoptée (découpage en trois zones : bas-fond, bas de versant et le reste) faute d'informations suffisantes. Il faut cependant noter que cette schématisation pouvait être compliquée sur des hypothèses plus complexes ; mais c'est volontairement que nous n'avons pas cherché à le faire. En effet, si une représentation simpliste ne donne pas satisfaction dans un milieu connu, elle le sera d'autant moins en cas de transposition du problème dans un milieu peu ou mal connu...

On peut remarquer enfin les grandes difficultés rencontrées pour établir le régime piézométrique *permanent* du bassin versant. Le fonctionnement du modèle est en effet étroitement lié à l'établissement de ce niveau de régime permanent qui constitue la condition initiale du système de calcul pour chaque pas de temps des niveaux piézométriques dans chaque maille avec une méthode mathématique classique de résolution par les *éléments finis*. L'instabilité de la résolution est très grande dans notre application. Et la solution adoptée, correspondant à un niveau de saison sèche très bas, n'est pas satisfaisante. On peut penser que le mode de fonctionnement des nappes souterraines dans un petit bassin versant comme Booro-Borotou avec des variations de niveau qui peuvent être très rapides (le système se remplit en

quelques semaines) n'est pas vraiment compatible avec le principe du modèle où les variations de la nappe sont calculées à partir du régime permanent considéré comme un niveau d'équilibre. A Booro-Borotou l'équilibre (au sens d'une certaine stabilité piézométrique) n'existe probablement pas.

Ce problème d'inadéquation dans la représentation des transferts apparaît sur nos figures dans la très mauvaise simulation des débits de base trop faibles en saison des pluies et trop forts en saison sèche (dans la modélisation, le bassin ne tarit jamais). C'est tout simplement dû à une trop grande inertie de la nappe qui ne suit pas les fluctuations rapides qui se produisent dans la réalité : trop basse en saison des pluies, trop haute en saison sèche.

5.3. PERSPECTIVES

L'extraordinaire prolifération de modèles de tous types (Todini, 1988) conduit à réfléchir sur leur intérêt, sur la façon dont on doit les appliquer et sur les conséquences qu'ils entraînent pour les études de terrain.

5.3.1. Modèles physiques distribués

Les modèles physiques distribués sont de plus en plus nombreux (Beven et Kirkby, 1979 ; Beven et Wood, 1983 ; Hansen et Dyhr-Nielsen, 1983 ; Rogers et al., 1985 ; Correia et Morel-Seytoux, 1985 ; Danish Hydraulic Institute, 1985 ; Morel-Seytoux et Alhassoun, 1988 ; ...) et le Modèle Couplé peut être classé parmi eux. La prise en compte de la complexité spatiale et temporelle des fonctionnements hydrodynamiques superficiels et internes rend ces outils sans doute très intéressants pour le modélisateur, mais d'une très grande lourdeur pour l'utilisateur. La quantité de données et de paramètres nécessaires pour alimenter ces modèles est considérable et croît avec la précision dans la description des mécanismes.

Par exemple, dans l'application du Modèle Couplé à Booro-Borotou, il est possible de critiquer la capacité du modèle à réaliser tel ou tel processus ; mais, comme une bonne partie de la connaissance des caractéristiques des stockages internes manque, on n'a aucun moyen de confirmer cette mise en défaut du modèle. Il est *normal* que les résultats obtenus soient si décevants, et les causes peuvent être doubles (les deux branches de l'alternative ne s'excluant pas forcément l'une l'autre) :

- une meilleure connaissance du milieu interne entraînant des mesures et des suivis supplémentaires est nécessaire : piézométrie systématique sur l'ensemble du bassin, approche géophysique plus complète permettant une bonne représentation du toit du substratum et de l'extension des altérites (notons que ces mesures avaient été envisagées et même chiffrées, mais n'ont pu être réalisées pour des raisons budgétaires). Cependant il n'est pas impossible que, même avec ces observations, la nécessité de la connaissance d'une autre grandeur serait apparue, ce qui risque de conduire à une cascade de besoins et à la question de savoir si la fin justifie les moyens. En effet, si *tout* doit être mesuré, analysé, décortiqué et remis dans son contexte, le modèle conserve-t-il un intérêt ?

- le modèle n'est pas adapté au problème posé parce que sa conceptualisation des mécanismes de l'écoulement ne correspond véritablement pas aux mécanismes naturels. Il est alors toujours possible de *bricoler*, d'adapter un module ou de fixer des conditions artificielles qui font en sorte que cela fonctionne quand même. Mais alors on peut également se poser la question de l'intérêt d'un modèle *physique* dont on a détourné le *physique*.

Il est tout à fait probable qu'un autre modèle physique distribué que le Modèle Couplé aurait conduit à des conclusions équivalentes.

Dans tous les cas le résultat final n'est pas utilisable pour une transposition dans l'espace, le niveau de connaissance exigée étant incompatible avec l'objectif même de la transposition.

Une solution pour pallier cet inconvénient pourrait être la mise au point de modèles dérivés des modèles physiques complexes (par exemple tentative de Bond et al., 1979, citée par Ambroise et al., 1982). L'idée serait de reprendre dans les modèles complexes les grands concepts qui y sont validés sur un terrain connu et de les injecter dans des modèles beaucoup plus simples où la complexité des concepts est ramenée à leur description à travers des *éléments intégrateurs* simples.

L'application réalisée avec le module Modsur du Modèle Couplé à Oursi (Chevallier et al., 1985) et à Gagara (Albergel et al., 1987) est par exemple un embryon de solution sur cette voie, dans le sens qu'elle est entièrement construite sur la constatation qu'en région sahélienne, c'est l'état de surface qui règle le comportement hydrodynamique. Les lois d'aptitude au ruissellement de ces états de surface étant connues, la combinaison de ces lois au travers d'une structure donnée (dans ce cas, Modsur) donne un résultat acceptable y compris dans la transposition géographique : à partir du moment où le mécanisme

élémentaire était décrit (dans ce cas, par une première représentation modéliste à travers le *modèle simulateur*) sur l'élément intégrateur connu (les états de surface du petit bassin versant de Polaka), une extension simple et sans calage particulier était possible.

Avec Beven (1987), nous pensons qu'une bonne voie de recherche va dans le sens de la mise au point d'outils de modélisation qui devraient se retrouver à une limite assez floue entre le modèle déterministe et le modèle stochastique. L'approche déterministe devrait permettre de valider les hypothèses faites sur les fonctionnements (même à une échelle fine) et l'approche stochastique de généraliser dans l'espace et dans le temps à partir d'*éléments intégrateurs* des fonctionnements les solutions obtenues. On conçoit que la *représentativité* prendrait là une signification extrêmement précise et délicate à manipuler.

5.3.2. Géomorphologie

Ces *éléments intégrateurs* (cette terminologie est toute personnelle) peuvent être multiples (par exemple les états de surface pour la zone sahélienne ou l'organisation des sols). Il semble cependant que la *géomorphologie* du bassin versant puisse être privilégiée. Les tentatives existent et on peut en relever quelques unes :

- * Casenave et al. (1982) utilisent pour l'étude des crues décennales sur les petits bassins versants forestiers des notions de topographie (haut de versant, mi-versant, bas de versant) qui sont à l'image de la répartition des sols et de leur comportement hydrodynamique.

- * Moniod (1983) propose deux paramètres pour caractériser le réseau hydrographique évalués à partir de données morphologiques et les lie à de notions de forme de crue, donc à un certain mode de fonctionnement.

- * Plus récemment Zecharias et Brutsaert (1985) insistent sur l'importance de la pente de la surface et proposent le calcul d'un indice présenté comme un *paramètre d'échelle du bassin*.

- * Beven et al. (1988) analysent l'hétérogénéité hydrologique en terme de morphologie et de réponse du bassin versant (paragraphe 4.4.2.4).

Dans notre interprétation du fonctionnement de Booro-Borotou on s'aperçoit que l'organisation des mécanismes de l'écoulement se fait également selon un schéma intimement lié à la morphologie du bassin versant. On peut rappeler la schématisation sur le versant des aptitudes à l'infiltration sous pluies simulées confirmée par Valentin et Janeau (1988) dans un travail reliant avec succès la position par rapport à l'induration de mi-versant et l'intensité d'infiltration sous pluies simulées.

Pour préciser ces impressions un Modèle Numérique de Terrain (Evans, 1981) a été réalisé par Planchon et Depraetere avec un logiciel développé par Depraetere (1988) à partir de la carte hypsométrique (hors-texte) réalisée sur le bassin versant de Booro-Borotou. Le MNT résultant est constitué par un fichier qui donne l'altitude pour une maille de description de 8 mètres sur la zone cartographiée. Une utilisation immédiate d'un tel fichier est simplement la représentation graphique en trois dimensions de la surface du sol vue sous des angles significatifs (figures 5.301 et 5.302).

On décèle très vite l'intérêt de cette vision du bassin versant qui n'est pas perceptible sur le terrain (on peut rappeler que la différence totale d'altitude est d'un peu moins de 50 mètres, alors que la hauteur des grands arbres particulièrement concentrés dans le bas-fond dépasse la trentaine de mètres). On note par exemple très clairement les grands ensembles géomorphologiques qui nous ont servi pour la description du fonctionnement :

- * le haut de versant avec les talus et plateaux ainsi que les pentes concaves sur sols rouges ;

- * la zone de mi-versant avec sa structure concave et la rupture de pente très nette, marquant l'induration et la zone d'aptitude à l'infiltration minimale.

- * le bas de versant convexe, étroit, caractéristique de la zone hydromorphe, dont on perçoit bien la faible extension spatiale.

On remarque de plus la différence très nette entre les versants de rive gauche très réguliers et ceux de rive droite où des ondulations perpendiculaires au talweg principal sont le siège privilégié du développement ravinatoire. Cette géomorphologie de la surface peut être reliée aux grandes directions structurales géologiques et géophysiques.

L'application d'un tel outil pour la modélisation nous semble porteuse d'espoir et tout particulièrement pour la transposition. L'établissement d'un MNT demande certes une certaine technique ; mais l'utilisation de la photointerprétation ou, mieux, de la télédétection (le satellite SPOT permet maintenant la réalisation de vues stéréoscopiques avec une résolution de 10 mètres en panchromatique) devait permettre l'établissement de documents d'une qualité tout à fait honorable pour la modélisation.

Un travail sur cette question est actuellement en cours (Moussa, comm. or.) tentant de combiner la technique des Modèles Numériques de Terrain et le modèle physique Swatch (Morel-Seytoux et Alhassoun, 1987).

FIG 5.301 : LE BASSIN VERSANT DE BOORO-BOROTOU VU DU NORD-EST

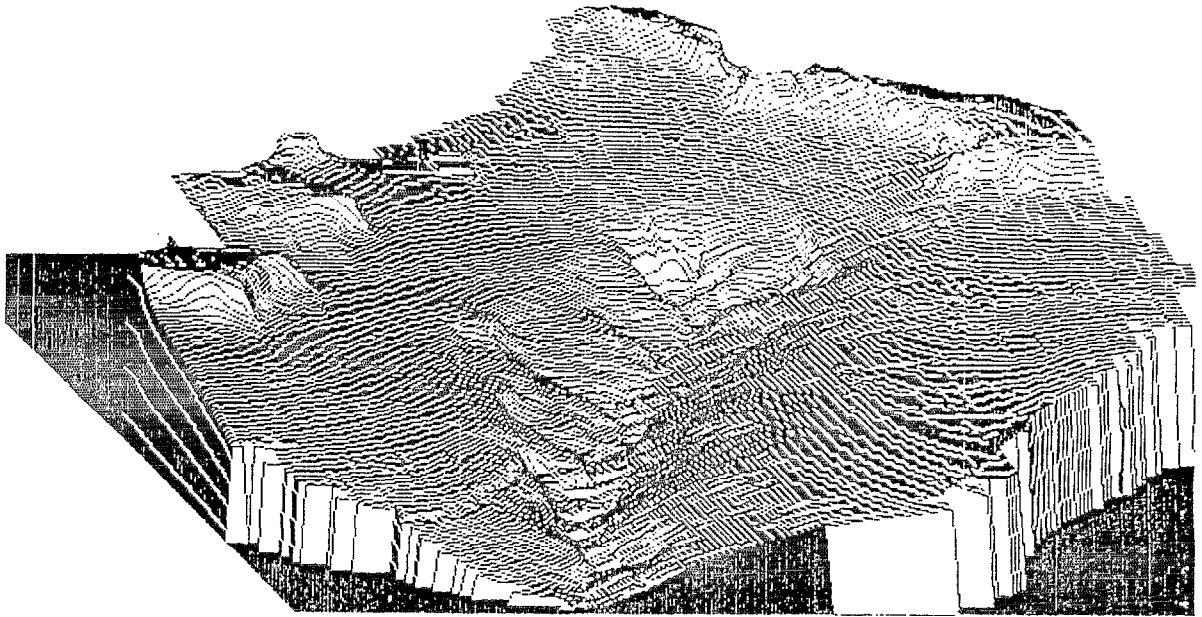
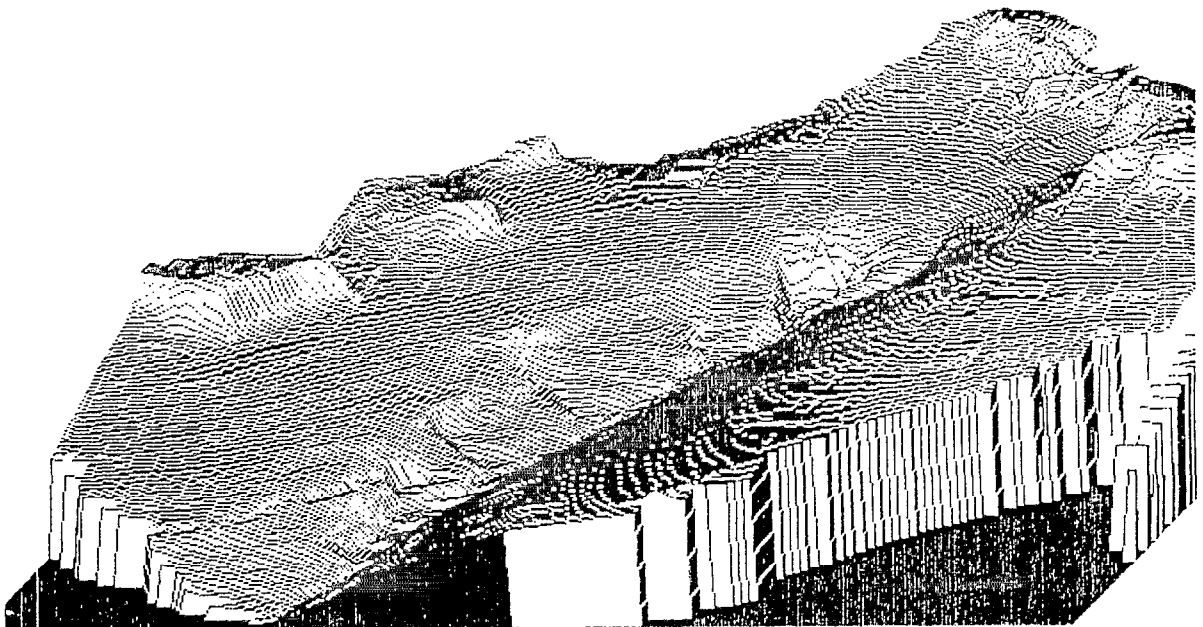


FIG 5.302 : LE BASSIN VERSANT DE BOORO-BOROTOU VU DU NORD-OUEST



CONCLUSIONS

Il est difficile de tirer des conclusions d'un travail qui doit s'insérer dans un ensemble inachevé pour le moment. Le véritable bilan d'un programme multidisciplinaire tel qu'Hyperbav ne peut être dressé qu'avec la totalité des apports de chaque équipe. Cela rend nécessaire la mise en oeuvre d'un ouvrage de synthèse.

En effet certaines des analyses exposées dans ce mémoire à partir des mesures hydrologiques se verront peut-être mises en doute ou modifiées par l'apport de nouveaux éléments venant des autres volets du programme. D'autres (on espère la plupart) seront étayées, confirmées, validées.

On peut cependant dégager de ce travail les points qui nous semblent les plus saillants et proposer une réponse aux deux questions posées à la fin de la première partie.

La simulation de pluies :

L'enseignement essentiel de la simulation de pluies à Booro-Borotou est que le *modèle simulateur* proposé pour la région sahélienne n'est pas valable en savane humide.

Mais l'utilisation du simulateur de pluies permet une approche très performante pour évaluer l'aptitude à l'infiltration (ou au ruissellement) sur parcelles. Il permet même de valider des hypothèses faites sur le fonctionnement hydrodynamique du versant.

Les crues :

L'évaluation des *crues de projet* du bassin versant de Booro-Borotou donne des valeurs de débits de pointe et de volume très proches de celles observées sur des formations semblables dans des conditions climatiques comparables à Korhogo et Sakassou.

Les formes de ces crues apparaissent comme liées aux mécanismes de production de l'écoulement. Mais il n'est pas possible de dégager de facteurs explicatifs de ces formes de crues parmi les variables classiques de description de l'événement pluvieux ou de l'état initial du milieu naturel.

Le tarissement :

L'étude du tarissement fait apparaître l'extrême sensibilité de la zone de bas-fond aux phénomènes évapotranspiratoires, que ce soit à travers les oscillations journalières des débits ou à cause des feux de brousse dont l'effet peut retarder de 10 à 15 jours le tarissement complet de l'écoulement.

Le fonctionnement :

La description du fonctionnement hydrologique sur le versant montre le rôle essentiel des stockages souterrains dans la zone saturée comme dans la zone non saturée.

Toutes les hypothèses formulées récemment sur les chemins de l'eau interviennent de manière variable dans le temps et dans l'espace avec l'évolution saisonnière du milieu naturel et avec l'hétérogénéité spatiale des facteurs influençant le comportement hydrodynamique.

La modélisation :

On constate que les quatre modèles assurent une bonne reproduction des lames écoulées mensuelles.

Les résultats obtenus avec le Modèle Couplé sont décevants pour deux raisons essentielles :

- le modèle n'est pas conçu pour prendre en compte les mécanismes variables de la production de l'écoulement ;
- les données de base sur le domaine souterrain sont trop sommaires.

Les interrogations :

Nous posons en introduction à l'étude menée sur le bassin versant de Booro-Borotou deux questions qui se complètent. Tentons de proposer des réponses à l'une et à l'autre interrogations au moment d'achever ce mémoire.

1. Qu'amène cette étude de plus ou de différent des autres études de bassins versants menées à l'ORSTOM ?

Ce n'est pas la notion de *crue d'étude* qui a constitué le fil directeur de notre recherche, mais plutôt une tentative d'analyse des fonctionnements et des processus complexes de la circulation de l'eau sur un petit bassin versant, en insistant sur la contribution essentielle de paramètres liés à la géomorphologie, à la végétation, à la structure des sols ou à la configuration du substratum.

De plus, nous avons tenté de mettre en évidence l'importance des hétérogénéités spatiales et la difficulté de leur prise en compte et de leur description. Cela relativise quelque peu la notion de *représentativité* telle qu'elle avait pu être systématisée dans les *catalogues* de bassins versants de l'ORSTOM.

2. Faut-il remettre en cause les voies proposées par l'hydrologie classique pour décrire les phénomènes, les concepts adoptés pour construire les modèles, les variables mesurées pour appréhender les mécanismes ?

Il paraît nécessaire de suivre avec la même attention les grandeurs descriptives de l'*hydrologie interne* (considérée comme une extension de l'*hydrologie de surface*, chère aux hydrologues de l'ORSTOM). C'est grâce à elles que l'on pourra préciser ces fameux *chemins de l'eau*.

Il est indispensable pour mieux comprendre les mécanismes hydrologiques d'admettre l'importance d'une très large ouverture sur les disciplines connexes dont la méconnaissance peut conduire à une conceptualisation insuffisante, parfois mauvaise, des processus de l'écoulement.

Il paraît important de réfléchir sur le développement effréné de la modélisation déterministe, sur ses objectifs, sur son avenir et sur ses relations avec les mécanismes réels de l'écoulement s'il est possible de les identifier.

POSTFACE

J.A. Rodier

Plusieurs thèses importantes, dont le présent ouvrage, ont mis en cause la politique de recherches sur bassins représentatifs telle qu'elle a été menée par le Service Hydrologique de l'ORSTOM, à partir d'éléments d'informations assez incomplets, de sorte que nos approches scientifiques sont présentées parfois de façon un peu caricaturale et même erronée dans certains cas. C'est pourquoi il peut être utile, alors que les anciens ont encore présent à l'esprit la stratégie de cette recherche, de présenter ici une mise au point qui corrigera certains détails du chapitre 1 et de la conclusion de cette thèse. Nous saisisons cette occasion pour en dire tout le bien que nous en pensons et nous ajouterons un mot très bref sur les conséquences pratiques des résultats de ces travaux.

Pierre Chevallier a exploité au maximum ce qu'ont écrit les représentants de ce qu'il appelle la mémoire de ce Service Hydrologique ; mais ceux-ci n'ont présenté que très peu de choses dans de véritables publications ; elles concernent surtout les résultats.

On pourrait reconstituer la véritable approche à partir des rapports de campagne multigraphiés, mais ceci nécessiterait un long travail d'exégèse que personne ne fera jamais, et cela n'en vaut d'ailleurs pas la peine.

Nous présenterons donc un historique court dont un bon nombre d'éléments ne figurent nulle part.

Tout d'abord, pourquoi ce terme de bassin "représentatif" ?

Pendant quelques années on a employé à l'ORSTOM le terme de bassin expérimental, mais cet adjectif était peu approprié car il évoquait, à priori, soit une véritable expérimentation avec modification du bassin (déforestation ou reforestation, par exemple) qui ne correspondait pas à la majeure partie de nos bassins "expérimentaux", soit sur le terrain une technologie très complexe qui était exclue à cette époque ; beaucoup de temps et d'argent auraient été gaspillés sans faire avancer la recherche. Il ne faut pas confondre moyens sophistiqués et conduite efficace des opérations de terrain ; ceci d'autant plus qu'en 1949 c'était un succès de réussir à faire fonctionner correctement un limnigraphe en Afrique et que c'était déjà une entreprise pour arriver à obtenir un moulinet (les premiers nous avaient été donnés par le laboratoire d'Hydraulique de Chatou).

Lors de la préparation du premier document de base de la Décennie Hydrologique Internationale de l'Unesco, nous avons trouvé dans les propositions américaines le terme "bassin représentatif" (sans aucune définition d'ailleurs) et nous l'avons adopté en donnant au mot représentatif le sens courant que l'on peut illustrer par la phrase : "ce bassin est assez représentatif des bassins sur les grès ordoviciens du Mali".

Nous ne pensions pas alors aux polémiques qui allaient suivre beaucoup plus tard sur la représentativité.

Les bassins représentatifs ont été prévus très tôt dans les projets de Service Hydrologique. L'ORSTOM (plus exactement l'ORSC) a demandé en 1950 par contrat à Electricité de France de mettre à sa disposition le personnel pour créer et diriger un véritable Service Hydrologique ; dans le programme était déjà prévu l'aménagement de bassins représentatifs dès 1949.

En effet peu de temps auparavant une prospection hydroélectrique d'EDF en Guinée forestière avait bien mis en évidence le fait que pour les petits cours d'eau on ne disposait que de la série de débits du Niger à Koulikoro (superficie du bassin 125000 km²) qui n'apportait rien à la connaissance du régime, sauf qu'il y avait une saison sèche et une saison des pluies. En outre, deux traversées successives à cinq minutes d'intervalle d'un ruisseau en crue nous avaient persuadés de la violence des crues et des surprises que nous réservaient ces petits bassins versants.

Plus tard, les destructions spectaculaires des barrages de Mauritanie et d'ailleurs et de nombreux ouvrages routiers avaient plus que converti les Services Techniques (Travaux Publics et Génie Rural) qu'il fallait faire quelque chose.

Seuls, les bassins représentatifs pouvaient permettre d'arriver rapidement à des connaissances suffisantes sur l'hydrologie de ces petits bassins.

Se sont posés alors les problèmes et la stratégie de la recherche et de son caractère.

Au début des années 1950 la commission d'hydrologie de l'ORSTOM était en faveur de l'aménagement d'un seul bassin représentatif, mais très bien étudié. C'était oublier :

1°) la dispersion géographique des hydrologues de l'ORSTOM dont la conséquence était qu'un bassin représentatif à Bangui ne nuisait en rien à des études du même genre au Nord Cameroun.

2°) le fait qu'en hydrologie, on voit bien mieux le caractère des divers régimes par comparaison.

3°) les demandes pressantes du développement (à l'ORSTOM la recherche est faite pour le développement) dans des milieux géographiques tropicaux très variés. Des recherches très approfondies au Sahel apportent très peu de choses à la connaissance des processus en forêt tropicale humide.

En conclusion, dès le début plusieurs bassins représentatifs ont été aménagés et on avait envisagé une stratégie extensive limitée en pensant bien que les recherches seraient poussées beaucoup plus à fond sur un ou plusieurs des premiers bassins suivant les possibilités matérielles et aussi le goût et les aptitudes de l'hydrologue responsable.

On s'est efforcé dans chaque projet d'étude hydrologique réalisé sur convention d'intégrer dans le programme un ou deux bassins représentatifs qui amélioreraient d'ailleurs singulièrement la qualité et sûreté de l'information demandée ; mais ils étaient étudiés de telle façon qu'ils pouvaient incorporer dans l'échantillon des bassins représentatifs étudiés par l'ORSTOM. Cela a été fait par exemple pour l'étude du projet du grand barrage de Sounda au Congo. Il serait inexact de dire que ces bassins nous ont été imposés par convention.

Le nombre de ceux qui nous ont été réellement imposés est extrêmement faible.

Mais, cependant la pression du développement nous a conduit à étudier à la fois beaucoup plus de bassins que nous ne l'aurions souhaité. Par exemple, en 1955, sur la forte insistance de Claude Auvray et du Secrétaire Général de l'ORSTOM, nous avons dû accepter d'étudier par contrat dix ensembles de bassins représentatifs de notre choix pour élucider les problèmes de crues sur les petits cours d'eau d'AOF. Nos réticences n'étaient pas vaines : la réalisation de ces études a présenté de sérieuses difficultés ; c'était une charge très lourde pour nos effectifs techniques et scientifiques. Mais les faits ont prouvé que sur le plan de la recherche il fallait le faire et à ce moment-là.

C'est ainsi que le nombre des bassins représentatifs a atteint près de 300, en définitive.

Cette prolifération de bassins ne résultait pas du désir de battre un record, elle était à peine suffisante pour couvrir vaguement le champ de variations des facteurs physiogéographiques et pour fournir un certain nombre de répétitions qui se sont avérées bien utiles et qui le sont toujours.

Mais ce serait une grave erreur de mettre tous ces bassins sur le même plan comme un trop rapide examen du recueil de Dubreuil (1972) pourrait le faire croire. Un certain nombre de ces bassins ont été observés pour apporter un complément d'information ou pour fournir des éléments presque d'ordre qualitatif. On en trouvera ci-après deux exemples.

Lors des études des bassins urbains de Niamey drainés par le Gounti-Yena, on a voulu savoir si la partie non urbanisée du bassin de ce petit cours d'eau fournissait des apports significatifs, d'où l'aménagement sommaire de deux bassins dont l'un a fourni beaucoup plus tard des données précieuses sur l'écoulement dans ces bassins presque entièrement sableux ; mais il ne faut pas chercher trop de détail sur l'analyse des phénomènes.

Dans le Ouadaï (Tchad) A. Bouchardeau a voulu avoir une idée du comportement de bassins de divers types. Par chance, un des bassins, sur reg, a reçu une série de pluies tout à fait exceptionnelles et a été suivi par un hydrologue très minutieux et efficace ; il donne des renseignements très importants et

précis sur le ruissellement sur reg, mais les deux autres bassins fournissent simplement ce qu'on leur demandait : une simple impression sur la violence des crues.

A côté de ces bassins d'autres ont été étudiés dès le début de façon très approfondie.

Nos recherches étaient orientées vers le développement, il y avait donc des objectifs pratiques bien définis, mais pour les atteindre il fallait résoudre un bon nombre de problèmes qui relevaient eux, de la recherche fondamentale. Ces objectifs pratiques très nets et bien mis en évidence dans les quelques publications de synthèse destinées souvent à la vulgarisation masquent souvent la partie recherche.

Pour l'aménagement des ressources en eau on peut retenir 4 caractéristiques hydrologiques : le débit moyen annuel et sa distribution temporelle, les fortes crues, le débit minimum quand il y en a un et les transports solides susceptibles de combler un réservoir. Les caractéristiques les plus difficiles à bien estimer sont celles concernant les fortes crues et pour diverses raisons on avait caractérisé ces crues par le débit dont la fréquence au dépassement aurait été de 0,1 dans une longue série temporelle de débits maximaux annuels. C'est le débit de crue décennal, de même que pour les modules on ne considérait le module décennal sec. Mais ce n'est pas parce que le débit de crue décennal est présenté à la fin des rapports qu'on doit considérer que dans pratiquement tous les cas l'objectif final est l'hydrogramme de crue décennale. On avait recommandé dans tous les cas de procéder à une estimation du débit de crue décennal, même si ce n'était pas l'objectif principal de l'étude ; ce n'est pas la même chose.

Il est exact que l'objectif principal, dans certains cas, était la connaissance des fortes crues ; c'est vrai pour les dix ensembles de bassins de l'ex AOF, pour des études concernant des projets de routes ou de voies ferrées ; mais dans un bon nombre de cas, d'autres éléments étaient tout aussi importants, quelques exemples suivent :

Débit moyen annuel : Il a été évalué systématiquement par Y. Brunet Moret pour tous ses bassins de Mauritanie. Pour une série de bassins au Burkina l'objectif principal était le module annuel; pouvait-on ou non remplir les réservoirs ?

Dans la majorité des cas, toutes précautions étaient prises pour qu'on puisse évaluer le débit moyen annuel avec une précision suffisante et, effectivement, en 1975 nous n'avons pas rencontré de difficultés sérieuses pour la synthèse de l'écoulement annuel en régions Sahéliennes. Mais ce n'est qu'à cette époque que, grâce au modèle réduit de Girard, on a pu étudier correctement la distribution des débits moyens annuels.

Débit moyen mensuel : Il ne fait pas partie des objectifs principaux, étant donné le caractère relativement régulier de la distribution temporelle des pluies en régions tropicales sèches et sahéliennes et on pouvait les obtenir grâce aux résultats des réseaux hydrométriques. Mais il constitue un intermédiaire indispensable pour l'évaluation par les modèles des débits moyens annuels successifs.

Les valeurs minimales annuelles en régions Sahéliennes et tropicales sèches sont généralement nulles ; quant par extraordinaire, elles ne le sont pas, on y installe un bassin représentatif pour les étudier comme à Abou Goulem (Tchad).

En région tropicale humide l'intérêt pour ces valeurs minimales est variable, certains bassins comme la Dumbea (Nouvelle Calédonie) ou ceux de Pointe Noire avaient comme objectif principal les basses eaux qui pour les premiers bassins ont été étudiées sur toute leur étendue pendant plusieurs campagnes.

A Korhogo (Côte d'Ivoire) elles avaient été étudiées de très près sur le terrain. Ailleurs, des consignes étaient données pour qu'elles soient suivies régulièrement, mais les mesures n'ont pas toujours été faites avec la rigueur et la continuité voulue, on en a parfois sous-estimé la difficulté.

Le bilan hydrologique nous intéressait peu, car l'étude de l'évapotranspiration réelle posait de très gros problèmes. A la limite Nord du Sahel on trouve $P = E$, à peu de choses près. En région tropicale humide, il faut que le bassin ait une superficie suffisante pour que le débit de base soit récupéré à partir des nappes et que l'on ait des chances de trouver des résultats cohérents avec ceux des plus grands bassins. Cependant sans être un objectif, on établissait ce bilan dans les rapports.

L'érosion était un des deux objectifs principaux du Mayo-Kereng (Cameroun) en 1955 et de Kountkouzout (au Niger). Elle a été étudiée sur d'autres bassins.

Enfin la connaissance générale des phénomènes d'écoulement en zone désertique (Point n°1 du Guide de Toebe et Ouryvaev 1970 qui a largement bénéficié de la collaboration de P. Dubreuil) était l'objectif principal de chaque bassin représentatif. Il faisait partie de notre programme type de recherches en zones désertiques qui a été décrit un bon nombre de fois.

Caractère de l'approche scientifique :

Pourquoi lui avoir attribué le qualificatif de *statistique* ? Si c'est au sens strict, pour qu'il y ait statistique, il faut une population suffisante donc suffisamment de couples pluies débits ce qui n'était pas le cas. Pour la fonction de production, il a fallu attendre que Roche ose employer la méthode des résidus, et encore nous le trouvions bien hardi.

Il existait bien dans les manuels américains la méthode coaxiale, méthode graphique qui y correspond, mais nous ne pensions pas avoir un échantillon suffisant pour l'utiliser ce qui était souvent vrai.

Peut-être a-t-on cherché à classer nos recherches dans cette catégorie statistique parce que nous avons dû définir de façon assez stricte sur le plan statistique certains paramètres hydrologiques des régimes tels que : la moyenne des débits moyens annuels (médiane au Sahel), le débit moyen annuel décennal sec et la valeur décennale du débit maximal annuel, ou débit de crue décennal, paramètre qui a été choisi pour caractériser les fortes crues que ce soit dans le cadre de bassins représentatifs ou d'études de synthèse sur réseau. Dans plusieurs notes de synthèse sur les zones arides et dans une communication au colloque AISH de Hambourg concernant les zones tropicales humides, nous avons systématiquement donné des séries d'estimation de cette valeur décennale ; cela n'a pas de rapport direct avec un projet d'aménagement quelconque, c'est une des caractéristiques qui définissent un régime. Mais ce n'est pas pour cela que nous avons des complexes quand on parle de crue décennale.

Nous n'avons pas choisi la fréquence centennale car son estimation est beaucoup plus discutable. Bien que tout ceci évoque la statistique, ce qui précède immédiatement correspondrait mieux à de l'hydrologie dite géographique.

Il n'en reste pas moins que l'étude des crues était privilégiée ; sauf sur bassins perméables, elles représentent la quasi-totalité de l'écoulement annuel.

Nous qualifierions plutôt ces recherches sur bassins de recherches déterministes, analytiques et empiriques ; qu'on en juge par ce qui suit.

Pour la fonction de production on considérait le tableau général des crues et de leurs facteurs conditionnels qui, pour Booro Borotou est largement représenté en annexe, soit pour toutes les pluies (au Sahel) soit pour les plus fortes. Parmi les facteurs conditionnels on considérait la pluie utile P_u (limitée aux intensités supérieures à 12 - 18 mm/h qui correspond ici à Hm15 ou Hm20) qui a été reprise par A. Casenave et le temps t_a depuis la dernière averse significative correspondant à peu près ici à Res.5mm.

De 1950 à 1960, on a presque toujours eu la chance d'observer de fortes pluies peu différentes de la pluie décennale ; on vérifiait si, par rapport aux conditions les plus fréquentes (correspondant à $\frac{P_u}{P_m}$ et t_a), les pluies observées avaient été favorisées ou défavorisées, on retouchait en conséquence les coefficients de ruissellement ou la capacité moyenne d'absorption (Cam en mm h-1 qui correspond à infiltration + interception) et, en extrapolant légèrement, on en déduisait les valeurs de K_r ou de Cam pour la pluie décennale sur laquelle nous reviendrons plus loin. Pour les modules on procédait un peu de la même façon en considérant la répartition des pluies et l'importance des averses individuelles pour corriger le module observé et le ramener à la valeur moyenne.

Il n'y a pas de vraie statistique ici. Tout ceci faisait largement appel au jugement et à l'expérience de l'hydrologue : Cela ne nous choque pas. Assez vite on a essayé de tracer une courbe moyenne de la lame ruisselée ou écoulée ou du coefficient de ruissellement en fonction de la hauteur de pluie P_m ou mieux de P_u ce qui éliminait déjà une partie de l'influence du diagramme de variation des intensités.

On marquait les points représentatifs de façon spéciale suivant les valeurs de t_a ou de $\frac{P_u}{P_m}$. Ceci a été repris dans le rapport de la Mare d'Oursi ; mais malheureusement on s'est attaché surtout à I_{max} au lieu de $\frac{P_u}{P_m}$ qui a une influence plus forte ; en particulier, on élimine avec P_u les traînes d'averses qui ne donnent pas de ruissellement.

Lorsque l'on utilisait la capacité d'absorption on procédait à des recoupements avec la méthode d'infiltration Muntz. Plus tard, on a remplacé t_a par un indice de Kohler, puis nous avons employé la méthode des résidus avec une confiance limitée car certains phénomènes (imperméabilité de sols pulvérulents en début de saison des pluies) perturbaient sérieusement cette analyse.

De façon générale on cherchait à *voir* (faute de mieux) et à comprendre ce qui se passait sur le terrain où l'hydrologue responsable devait passer une partie de la saison des pluies.

C'est ainsi que le ruissellement superficiel (ou hortonien) a été *vu* et parfois photographié.

Pour la fonction de transfert, nous partions de la méthode de l'hydrogramme unitaire qui s'applique très bien dans le cas d'orages convectifs tropicaux et de bassins peu perméables ; mais cette méthode n'a jamais été qu'un simple outil de travail et on a dû vérifier auparavant qu'elle donnait des résultats valables ; ce qui était le cas à condition de ne pas prendre le même hydrogramme pour des lames d'eau ruisselées de 0,5 mm et de 50 mm ; il fallait ne considérer que des crues assez fortes ou fortes. En outre, elle ne peut s'appliquer, en toute rigueur qu'à du ruissellement superficiel que l'on puisse retrouver à peu près sur tout le bassin, même s'il y a un bon nombre de parcelles sans ruissellement. Mais il faut que le ruissellement soit collecté par le chevelu hydrographique. L'interprétation se faisait averse par averse en considérant pour chaque averse notable l'hydrogramme, la carte d'isohyètes, les hyétogrammes, les averses antérieures, et en cherchant à comprendre pourquoi telle ou telle averse avait bien ou mal ruisselé, quelle partie du bassin avait ruisselé (on dirait maintenant quelles étaient les zones contributives), si le bassin était hétérogène (exemple de l'Ouadi Kaoun au Tchad). Ceci était mis en rapport parfois avec les essais Muntz. On recherchait pourquoi l'hydrogramme présentait telle ou telle bosse, y avait-il des pointes secondaires systématiques, quelle était l'influence de telle ou telle pointe d'intensité sur l'hydrogramme ; cela n'a rien à voir avec une approche de type boîte noire, ni avec une série d'opérations qu'on déclencherait en poussant sur un bouton, (ceci au stade de l'analyse car pour les consignes données dans des notes de vulgarisation, c'est tout autre chose). Nous reconnaissons que cela n'a pas toujours été fait ainsi, et il y a eu quelques rapports où l'interprétation a été beaucoup plus légère. On déduisait de cette analyse le temps de montée de l'hydrogramme unitaire et sa forme y compris le débit maximum correspondant à une lame ruisselée donnée (10 mm par exemple). Cela correspondait à ce qu'ont repris Moniod et Ibiza beaucoup plus tard avec la notion de temps caractéristique. Vers 1955 on a considéré le temps de base et un peu après le coefficient de pointe $\frac{Q_{max}}{Q_r}$ chiffre sans dimension, ce qui nous paraissait un avantage sur la définition du débit maximum pour $L_r = 10$ mm. En outre, les études de 1965 ont montré qu'on pouvait évaluer sans trop de risque le temps de base en fonction de l'indice de pente et de la superficie du bassin et le coefficient de pointe à partir de la superficie.

En 1985 et 1986 nous avons repris sensiblement la même méthodologie pour les petits bassins du Sahel avec nettement plus de rigueur dans la détermination des temps de base, le choix des averses unitaires étant beaucoup plus strict ; nous avons éliminé l'emploi systématique de la médiane des temps de base correspondant souvent aux averses à deux pointes ou à longue traîne. Le manque de cartes isohyètes averse par averse pour les bassins récents nous a quelque peu gêné, mais en définitive nous avons obtenu des résultats beaucoup plus cohérents qu'en 1965.

Tout ceci suppose une approche globale. En 1956 avec les bassins de la Maggia (Niger), on a compris toute l'influence de l'hétérogénéité des sols qui a conduit à conserver dans ce cas particulier la méthode globale, mais à appliquer seulement à la partie imperméable à l'aval. En 1958 - 1959 A. Bouchardeau s'est trouvé avec les bassins de l'Ouadi Kaoun et Abou Goulem devant des problèmes d'hétérogénéité beaucoup plus difficiles qui l'ont conduit à une démarche comparable à celle qui est à la base des modèles distribués actuels. Il utilisait pour la fonction de production la capacité d'infiltration qu'on retranchait des intensités de précipitation. Cette capacité d'infiltration diminuait rapidement depuis le début de l'averse ; ceci étant étudié sur les hyétogrammes, notamment par l'utilisation des valeurs des volumes de ruissellement correspondante, de pointes successives quand il y en avait. Cette capacité d'infiltration était comparée aux données d'infiltration de la méthode Muntz pour chaque type de sol. Le bassin était réparti en un certain nombre d'unités suivant la carte pédologique et la moyenne des résultats Muntz pour chaque unité. De son côté M. Roche considérait les premiers éléments d'un modèle matriciel, ancêtre lointain d'un modèle distribué.

Mais pour pousser plus avant dans cette voie, il fallait réunir trois conditions : bonnes mesures d'infiltration qui n'ont été obtenues qu'avec le mini-simulateur, bonne carte des états de surface, que, pour le moment, on n'obtient guère qu'avec la télédétection, et usage de l'ordinateur dont nous ne disposions pas en 1959.

En attendant, et pour éviter que l'interprétation ait le caractère d'un exercice de voltige risquant de conduire à de graves erreurs et pouvant faire illusion sur la validité des conclusions, on est revenu à une approche globale (avec palliatifs lorsqu'il y a de graves problèmes d'hétérogénéité) avec détermination de la valeur moyenne du coefficient de ruissellement K_r et on ne s'est plus soucié de déterminer sur les hyétogrammes la capacité d'infiltration moyenne et ses variations au cours de l'averse et c'est ce stade là que beaucoup d'hydrologues ont présent à l'esprit, sans connaître les cheminements qui nous ont conduit à cette position de repli. On voit donc que les caractères de notre démarche n'étaient pas si simplistes.

L'immense complexité du bassin, nous l'avions bien en tête, et nous étions très satisfaits en régions tropicales sèches et Sahéliennes d'avoir affaire surtout à du ruissellement superficiel, donc de pouvoir employer l'hydrogramme unitaire avec pour facteur prédominant de ce ruissellement la hauteur de précipitation. Ceci permettait de partir de la pluie décennale sans complexe pour arriver à la crue décennale sans beaucoup de risques d'erreurs. Tous ces éléments simplifient considérablement l'analyse ; mais pour éviter justement que la complexité du bassin ne conduise à de graves erreurs, on tenait à savoir ce qui se passait sur le terrain et nous n'avons pas hésité à installer des stations secondaires lorsque le comportement d'une partie du bassin semblait singulier (exemple du bassin de la Lhota au Bénin où une station a été aménagée pour contrôler l'écoulement d'un massif rocheux).

Mais quand on arrive aux régions tropicales humides, surtout sur les terrains perméables, les problèmes se compliquent comme on peut le voir dans ce présent ouvrage. Dans certains cas le ruissellement superficiel est évident et bien visible, dans beaucoup d'autres cas c'est moins évident surtout en savane. En 1959, sur le Flakoho, en Côte d'Ivoire, par exemple, on avait trouvé une forme d'écoulement pas très rapide à laquelle on appliquait l'hydrogramme unitaire sans beaucoup de conviction.

Mais il y a plus grave, dans la fonction de production, la hauteur de précipitation ne joue pas a priori un rôle prédominant. Le rôle des précipitations antérieures devient très important sans qu'il soit facile de définir l'indice d'humidité le mieux adapté, exactement comme pour le bassin de Booro Borotou. A Guéssigué, en Côte d'Ivoire, (1960) le coefficient de ruissellement pour une averse de 80 - 100 mm peut varier de 10 % ou moins à plus de 60 % suivant l'époque de l'averse par rapport à la saison des pluies. Le concept de la pluie décennale engendrant la crue décennale, si toutes les autres conditions restent voisines des plus fréquentes, (presque toujours valables plus au Nord) devient très délicat à utiliser. Enfin, devant la grande importance des jachères, on avait négligé autrefois l'influence de l'utilisation des sols. L'approche ancienne était trop simpliste dans ce cas et des recherches fines

telles que celles présentées ici s'imposent absolument sans que l'acquis ancien soit perdu de vue, mais sans se laisser perturber par lui.

Eléments du bilan hydrologique étudié sur les bassins

Le programme *minimum* d'observations sur les bassins représentatifs comportait essentiellement l'observation et la mesure des pluies et des débits, mais bien d'autres éléments ont été étudiés sur les bassins dont les observations n'étaient pas limitées à ce programme minimum. Cependant, ce sont ces deux éléments sur lesquels ont porté les plus gros efforts.

Tout n'est pas parfait dans les données hydrométriques : deux stations sont franchement mauvaises malgré tous les efforts des hydrologues ; pour l'une d'elle, en Guadeloupe, il n'était pas pensable d'y réaliser une station artificielle à l'épreuve des crues cycloniques. Un petit nombre de stations ont un lit instable, donc de nombreuses courbes d'étalonnage pour la station et des valeurs de débit médiocres. Pour une dizaine de stations les petites digues barrant la petite plaine d'inondation ont cédé une ou deux fois d'où des débits maximaux pas très précis.

Les autres débits sont connus avec précision y compris les très faibles débits. Enfin, pour trois bassins, il y a eu des fautes professionnelles que l'on a pu rattraper dans un cas.

A l'opposé, pour une année de mesures en Côte d'Ivoire, les valeurs maximales des débits ont été mesurées pour six ensembles de bassins sur sept. Et on peut dire que pour l'ensemble, la qualité des données hydrométriques est bonne, mis à part les problèmes de troncature de la saison des pluies dont on parlera plus loin.

Pour les pluies, il y a un très petit nombre de lacunes (pluviomètres volés ou même qui ont débordé, pluviographes bouchés) mais la surveillance à très court intervalle de temps des appareils, le contrôle des intensités des pluviographes qui ne se faisait guère que sur les bassins représentatifs, concluent à un très fort pourcentage de données utilisables et elles sont de bonne qualité.

Cependant, pour la pluie se pose le problème de la représentativité de ce que l'on mesure dans un pluviomètre, en particulier un pluviomètre Association. Dans le *cas général* il est exact, comme l'écrit P. Chevallier que l'on ne sait pas "mesurer objectivement la pluie" ; mais en considérant de plus près les cas de nos régions tropicales, cette affirmation est pour le moins abusive : Passons en revue les principaux problèmes qui s'opposeraient à une mesure objective. La micro-hétérogénéité spatiale ne joue que pour ce qu'on appelle de petites averses sous les tropiques (moins de 10 mm) ou pour de très courts pas de temps. Les très forts gradients pluviométriques jouent en Norvège, par exemple, où combinés avec la neige ils rendent extrêmement difficile l'établissement de bilan hydrologique, ce qui explique que ces pays aient été très déçus par les bassins représentatifs.

Sur nos bassins, ils ne peuvent produire un effet significatif que sur la Dumbea en Nouvelle Calédonie, ou aux Antilles. La grande variabilité spatiale en pays montagneux, déjà évoquée par Ibiza à Madagascar, il y a longtemps, n'est pas très fréquente pour la plupart des bassins représentatifs d'Afrique de l'Ouest ou Centrale, généralement en pays peu accidentés.

La densité des appareils pourrait être jugée insuffisante ; dans la majorité des cas, elle suffit pour donner une bonne estimation de la moyenne spatiale et indiquer les parties du bassin les plus affectées par l'averse. Pour les bassins de "1000 km²" malgré 40 pluviomètres, elle n'est pas tout à fait suffisante, il y a des orages qui "passent à travers" les pluviomètres. Enfin, dans les zones à couverture végétale pas assez dense (Sahel) l'écart entre pluie au sol et pluie dans le pluviomètre Association devient tout à fait significatif et comme il peut varier sensiblement d'une averse à l'autre, ceci peut expliquer une partie, une partie seulement, des bizarreries que l'on a rencontré dans les relations pluies/débits.

Dans les années 1950 M. Roche avait installé des pluviomètres dans des fosses bourrées de branchages qui devaient être aussi efficaces que les pluviomètres préconisés par J. Rodda, mais pratiquement, ils étaient en zones Guinéennes et Soudaniennes où la pluie au sol est à peu près la même

que dans nos pluviomètres. Plus tard, lors de l'installation des grandes stations climatologiques, celle de Ndjamena (au Sahel) très bien observée présentait le même inconvénient, il y avait trop d'abris et de petits bâtiments dans la ville de sorte qu'à l'ORSTOM on ne croyait pas à une différence significative.

Ce n'est qu'après l'installation de la station de Saint-Paul près du lac de Bam (Burkina), station bien exposée aux vents que B. Pouyaud a trouvé en 1973 une différence très significative entre pluie au sol et pluie dans nos pluviomètres : sur l'année elle dépasse 10 %, nettement plus si le pluviomètre est sur une ligne de crête (fortement déconseillée par tous les climatologues), nettement moins dans une dépression bien abritée.

Ceci joue surtout au Sahel, en zone tropicale humide il faudrait une végétation basse, peut-être des plantations d'ananas pour retrouver des différences de ce genre. La conclusion a été donnée par M. Roche il y a quinze ans à peu près :

La hauteur de pluie dans les pluviomètres doit être considérée dans le cas général comme un indicateur, elle peut être utilisée dans les régressions mais pour un bilan hydrologique au Sahel, il faudrait beaucoup de circonspection.

C'est là le seul point à propos duquel on peut parler du manque d'objectivité des mesures.

En pratique, nous pensions que le coefficient de ruissellement d'une averse ne pouvait pas dépasser 100 % ; mais au Sahel, avec des pluies au sol nettement supérieures à celles de nos pluviomètres, on croyait que dans certains cas le coefficient de ruissellement d'une averse de 80 mm pouvait atteindre et dépasser 100 %. En fait les révisions que nous avons faites en 1986 n'ont pas conduit à majorer les chiffres anciens. Cependant, à la mare d'Oursi, pour les fonctions de production les mieux adaptées et les bassins les plus imperméables, il est clair que les tranches de la fin des averses de 60 à 70 mm présentent des valeurs de K_r partiel supérieures à 100 % ; de même pour notre révision de 1986 nous arrivons à la même conclusion : on peut admettre 110 % soit 90 % par rapport à la pluie au sol. C'est là la seule différence notable qu'a apporté cette prise en compte de la pluie au sol.

Reste le problème de la troncature de la saison des pluies :

Dans les régions sèches et particulièrement au Sahel, les campagnes d'observations et de mesures commençaient et finissaient après et avant des périodes où, sans être observées tous les ans, des pluies notables ou fortes pouvaient se produire. Il n'y a pas pendant ces périodes de dégradation des observations, il y a une absence voulue de mesures. Ceci ne peut étonner que ceux qui, ayant peu fait d'études de terrain, ne réalisent pas que dans le désert du Gourma, dans l'Ennedi, ou en Mauritanie par exemple, à un endroit que par dérision on avait appelé "Dionaba les flots", on ne pouvait pas laisser un hydrologue ou un hydrométriste seul ou même par équipe de deux pendant neuf mois sur douze à ne rien faire pendant 95 % de leur temps et à souffrir de conditions de vie extrêmement difficiles. Cela aurait été impossible au Sahel et même inutile : les enquêtes faites en début de campagne ont souvent prouvé qu'il n'y avait eu aucun écoulement avant l'arrivée des hydrologues et on pouvait reconstituer la saison des pluies. En 1975, pour nos études sur l'écoulement annuel au Sahel nous n'avons été gênés que pour un petit nombre d'années, surtout pour les pluies tardives. Evidemment, l'étude des précipitations mensuelles d'Octobre, Juin et surtout Mai, est très difficile parfois impossible, mais la distribution est tellement irrégulière qu'il faudrait des échantillons très importants pour des études correctes.

Pour les régions tropicales humides c'est autre chose. Pour un bassin tout à fait secondaire on ne faisait rien : sinon on conservait un programme réduit et dans ce cas la qualité des observations était parfois en-dessous de ce qui avait été prévu. Ce n'est pas le cas pour les vrais bassins de recherche.

Là aussi, on ne peut pas mettre tous les bassins sur le même niveau. L'ensemble de ces données pluie et débits peuvent donc être utilisés pour de nombreuses recherches surtout si on se donne la peine de combler les quelques lacunes par des programmes appropriés, mais certaines opérations non prévues avant 1970 sont impossibles, par exemple dans la plupart des cas, l'utilisation des données dans un modèle distribué (et c'est probablement ceci qu'a voulu exprimer P. Chevallier).

Mais dans de nombreux cas bien d'autres éléments du cycle hydrologique étaient observés. Dès 1955 on a vu que l'on employait assez largement l'infiltromètre Muntz qui a été abandonné après plusieurs années d'utilisation par suite des défauts que tout le monde connaît pour les recherches sur bassins. M. Roche dans l'Ennedi a passé bien des heures à observer et étudier les processus d'infiltration directe et indirecte dans le grès. P. Dubreuil savait que sur son bassin du Bouloré (Nord Cameroun) il y avait quelques réserves souterraines fournissant un léger débit retardé.

Dans les années 1950 on installait systématiquement des bacs Colorado enterrés avec protocole de mesure standard (M. Roche) pour avoir un indicateur de l'évaporation. Les recherches complètes sur cet élément du bilan hydrologique étaient faites près des grandes villes dans des stations spéciales. La première en brousse, au lac de Bam, a exigé beaucoup d'efforts, surtout pour la maintenance, et il était hors de question de procéder à des études complètes d'évaporation sur nos bassins représentatifs comme cela se fait dans certains pays développés. On vérifie donc qu'il n'y avait pas que les résultats qui comptaient. On trouve une bonne partie de ce qui précède dans les rapports de campagne, mais pas dans le recueil de P. Dubreuil (1972) qui n'était pas fait pour cela car il fallait une présentation normalisée. C'est déjà bien beau que l'auteur en ait pris l'initiative et ait eu la ténacité de poursuivre cet ouvrage jusqu'au bout ; mais, bien sûr, il présente surtout des résultats ayant été prévus pour cet objectif.

Rapports et Transpositions :

Ceci nous amène à dire un mot des rapports mis en cause dans cet ouvrage.

Il est certain que dans la partie descriptive, ce qui concerne les sols a toujours été insuffisant, cela n'est pas fini et nous n'y pouvons rien, il y a tout de même un très gros progrès depuis A. Casenave et C. Valentin. Pour le reste il faut préciser qu'on pouvait distinguer deux parties : les observations et mesures, et l'interprétation. Dans la première partie il est difficile de retoucher quoique ce soit maintenant et ce sont des éléments dont on était sûr.

Cette première partie n'est pas non plus une mise en avant du savoir technique. Sans mesures bien faites et bien dépouillées on ne peut rien faire. Nous avons assez souffert de 1942 à 1949 à faire des études hydrologiques presque sans mesures et nous ne tenions pas à continuer après.

Les détails ne sont pas un luxe, ils sont bien utiles quand on y revient 20 ou 30 ans après (ce que nous avons fait en 1986) et c'est pour cela qu'ils ont été précisés dans les rapports. L'interprétation était faite en fonction des connaissances du moment et du temps disponible. On considérait qu'elle serait et parfois devait être remise en cause.

En ce qui concerne la représentativité, Toebes et Ouryvaev parlent de régions hydrologiques parce que P. Dubreuil leur avait auparavant parlé de "régions homogènes" et nous nous excusons vis à vis de l'AWRC mais à l'ORSTOM on avait déjà systématisé cette notion.

Il est inexact que la représentativité était étroitement liée à "l'objectif prioritaire de la crue d'étude". Ce n'était pas dans l'esprit de P. Dubreuil quand dans le Nordeste du Brésil, il avait défini les régions homogènes avec dans l'esprit les ressources en eau en général y compris les apports de basses eaux des zones gréseuses de ce pays ; ce n'était pas dans le nôtre quand nous avons utilisé la notion de bassin-type étroitement lié à la représentativité puisqu'il s'agissait de la synthèse de l'écoulement annuel et de sa distribution temporelle au Sahel, mais nous le répétons :

Dans le Sahel et les régions tropicales sèches l'écoulement annuel n'est qu'une série de crues. Même si on passe à l'autre extrême, les plateaux Batéké au Congo avec des débits de base énormes, cette région est caractérisée par des débits de crues extrêmement faibles et donc pour la crue décennale aussi il faut en faire une région à part. Notons que dans cette notion de bassin-type nous avons en tête le paysage et que nous avons été très à l'aise en lisant la thèse d'Albergel.

Enfin pour les transpositions nous sommes restés dans notre article cité sur le plan des applications. Pour la recherche qui est à la base de ces applications, nous sommes bien d'accord ; il faut une démarche rigoureuse et nous ne pensons pas que l'on puisse nous accuser de ne pas avoir été assez

exigeants sur la précision des observations et mesures, ce que laisse entendre le texte. Mais dans cette note sur la transposition rédigée à la suite de vives discussions avec des hydrologues étrangers, c'est que si certaines transpositions étaient très difficiles, parfois impossibles par exemple pour certains débits de basses eaux ; dans d'autres cas avec des données valables, mais en nombre peut-être insuffisant, on arrivait à donner sur le plan pratique une réponse avec une incertitude acceptable.

Par exemple remplira-t-on le réservoir tous les ans ? Ou peut-on estimer un débit de crue de période de retour 10 ans à 50 % ou même moins ? et ceci est ce qui intéresse l'utilisateur.

Il est certain que les quelques articles et ouvrages qui ont été largement publiés sur les bassins représentatifs de l'ORSTOM ne donnent qu'une idée très sommaire de ce qui précède.

C'est la raison pour laquelle nous n'avons pas voulu laisser se répandre sans y apporter quelques retouches une représentation même pas trop déformée de tout ce travail sur les bassins représentatifs auquel un bon nombre d'entre nous ont consacré une bonne part de leur énergie et auquel ils tiennent encore beaucoup.

Ce qui précède ne concerne que le chapitre 1,1 : "Réflexions sur les bassins représentatifs de l'ORSTOM" et une petite partie des conclusions ; cela ne doit absolument pas faire perdre de vue le très grand mérite de cet ouvrage.

D'abord, le choix du thème et du type de bassin à étudier.

On voit très bien d'après ce qui précède que les bassins versants perméables en zone tropicale humide correspondent à un des domaines les plus mal connus des petits bassins tout simplement parce que les phénomènes d'infiltration y jouent un rôle très important et il s'agit de l'infiltration dans la totalité de ses aspects. En outre, les responsables de ce bassin ont choisi un bassin hétérogène et en plus, il est plus perméable au bas du versant qu'à la partie supérieure ; c'est-à-dire que l'utilisation du mini-simulateur n'apporte pas de solution simple pour la fonction de production. La complexité du bassin est intéressante ; elle l'est même nettement plus que ne le pensait l'auteur à l'origine puisque sur trois années d'observations il dispose d'une année sèche, une année très sèche et une autre humide. L'étude en devient plus intéressante, les résultats plus sûrs, mais les difficultés sont plus grandes.

On le voit bien avec l'utilisation des modèles. Ce choix est donc excellent pour améliorer nos connaissances de façon significative et en plus, il est méritoire. On ne retrouve pas toujours des choix courageux de ce genre dans toutes les thèses. Le programme de recherches était particulièrement complet. Il prévoyait l'analyse de tous les éléments pouvant intervenir dans les cheminements de l'eau dans un esprit tout à fait pluridisciplinaire et devait mettre en jeu les techniques les plus diverses.

C'est effectivement très bien de faire un bon choix de sujet avec un très beau programme. Il reste encore à passer à l'action, mais là le lecteur n'est pas déçu. A très peu de chose près tout ce qui avait été prévu a été réalisé, et bien ; et chaque fois que l'auteur a manqué de moyens il a tiré le meilleur parti de ce qui existait : la profondeur du socle est mal connue ; il utilise ce qu'on a appris à Sakassou ; le marquage des eaux ne peut être réalisé qu'avec de faibles moyens, il sait en tirer deux faits très importants : une notable partie du ruissellement sur le versant n'atteint pas le bas-fond donc le chevelu hydrographique, ceci même pour les fortes crues et par contre certaines zones ruisselant bien sont reliées à ce chevelu.

L'interprétation est excellente. On voit que P. Chevallier a une solide expérience du terrain en milieux divers ; parmi des observations et des analyses de toutes sortes les arbres risquaient de lui cacher la forêt, au contraire son expérience du terrain lui a permis d'écrire un très bon chapitre sur le fonctionnement et de rédiger sur les modèles un paragraphe très positif dans le chapitre "Perspective".

Cela rejoint ce que nous avons observé ces dernières années dans l'ensemble des publications de l'AISH : beaucoup de modèles sont mis au point avec une connaissance de terrain insuffisante, parfois même très insuffisante d'où des résultats pas brillants alors que les tests généralement utilisés ne mettent pas assez en évidence l'inadaptation. Là, il est heureux que l'auteur ait été à l'école de Georges Girard. Il ne risquait pas de s'égarer.

Effectivement, cette thèse apporte des éléments capitaux sur la genèse de l'écoulement sur bassins perméables ou assez perméables de la zone tropicale humide, mais ces constatations dépassent largement le domaine hydrologique et le type de bassin étudié. L'auteur n'avait pas mis en avant l'étude des très fortes crues, voulant éviter de se laisser entraîner malgré lui dans une approche trop classique qui très probablement risquait d'occulter une bonne partie des processus d'écoulement non superficiels qui font tout l'intérêt de cette thèse. Il a abordé cependant cette question de façon très correcte sans trop insister. Si, au contraire, on insiste un peu plus, on peut, dans une toute autre optique, tirer un excellent parti de ces études.

Si on considère, par exemple, une pluie journalière de 100 mm survenant en pleine saison des pluies, avec une valeur de IPA 0,5 de l'ordre de 150 mm, il est clair d'après le chapitre sur le fonctionnement que le volume qui intervient dans l'hydrogramme de crue est en partie du ruissellement superficiel (chemin n°1) qui pour les surfaces les plus favorisées, rejoint la forêt galerie de la dépression et surtout l'écoulement sur surface saturée (chemin n°4) dans la forêt galerie et ses abords qui a à peu près les mêmes caractéristiques. En se montrant moins généreux que P. Chevallier dans la partie haute de la relation pluie moyenne/lame ruisselée et en tenant compte du fait qu'une pluie journalière de 100 mm correspond à une averse isolée de l'ordre de 90 mm, on arriverait à une lame écoulée de crue de l'ordre de 10 mm soit un coefficient de ruissellement de 10 % au grand maximum.

Si on détermine également le temps de base dans l'optique de l'étude des fortes crues c'est-à-dire en éliminant les averses à doubles pointes et à longue traîne et en tenant compte surtout des plus fortes crues, nous arrivons à un temps de base de 150 minutes seulement, un peu plus que pour la crue n°1 (8516) la plus forte et à un temps de montée de l'ordre de 65 minutes. La présente étude prouve très nettement que ces deux chiffres ne correspondent qu'à un ruissellement partiel ne couvrant au maximum que les surfaces à nappes affleurantes ou subaffleurantes et les quelques sols imperméables reliés en surface à la dépression principale, soit au total peut-être 15 % de la superficie du bassin qui constituent ainsi l'aire contributrice.

Si par ailleurs on considère dans la synthèse que nous avons faite en 1965 les temps de base et de montée d'un bassin de même surface et de même pente qui ruissellerait sur 75 % environ de son étendue on trouve $T_b = 180$ mm et $T_m = 45$ mm, du même ordre de grandeur, ce qui s'explique par le fait que ce qui intervient dans ces chiffres ce n'est pas tant la surface que le chemin parcouru sur la petite partie des versants intéressés et dans la dépression. Dans celle-ci, en outre, la forêt galerie exerce un certain freinage. Plus le bassin serait grand plus la proportion de chemin parcouru dans le chevelu hydrographique serait forte et plus il serait logique que les temps caractéristiques T_m et T_b soient les mêmes puisque l'importance relative des versants diminue. Or une étude récente sur des bassins représentatifs perméables sableux au Sahel en zones tropicales sèches et humides a mis en évidence trois caractères bien nets de l'écoulement en forte crue que l'on retrouve à Booro Borotou. Pour une pluie journalière de 100 mm :

1°) Coefficient de ruissellement rapporté à la surface totale très faible de l'ordre de 1 à 4 % rapporté au Sahel, de l'ordre de 6 à 9 % en zone tropicale humide ou IPA 0,5 est plus élevé.

2°) Une influence très forte d'un indice d'humidité genre IPA 0,5 ou pluie totale cumulée, en rapport très probablement avec l'affleurement temporaire d'une nappe dans les dépressions.

3°) Des valeurs de T_b et T_m correspondant à celles observées sur bassins imperméables.

L'étude de Sakassou et surtout celle de Booro Borotou avec des observations et une interprétation beaucoup plus complexes nous autorisent à dire que dans ces cas de bassins perméables le ruissellement superficiel mis en évidence (chemins 1 et 4) ne concerne qu'une petite partie du bassin surtout la zone

des dépressions collectrices et ses abords avec nappes au moins subaffleurate et non pas la majeure partie du bassin, ceci a déjà été indiqué dans certains rapports anciens, sans mesures directes.

Les temps de montée et de base restant du même ordre de grandeur on peut, à la limite appliquer dans les calculs pratiques la méthodologie de l'hydrogramme unitaire, mais sans perdre de vue qu'en fait le ruissellement n'intéresse qu'une très faible partie du bassin et ne peut se produire qu'après une assez forte série de précipitations. Il reste encore à résoudre correctement le problème de la crue décennale ou d'autre fréquence avec, par exemple, des pluies de 90 mm qui produisent 0,10 mm en début de saison des pluies et 100 fois plus après une bonne saison des pluies, en considérant "les valeurs les plus fréquentes de l'indice d'humidité (lequel) ?". Il est redoutable et c'est là où l'usage des méthodes classiques anciennes prend le plus de risques quoique si on reste au voisinage de la période de retour 10 ans on peut faire des erreurs de 50 à 80 % mais sur des crues relativement faibles.

Cet exemple montre à notre avis la très grande importance de cette étude sur des applications pratiques assez éloignées en première approximation des préoccupations de son auteur et on ne saurait trop le féliciter d'avoir mené cette étude à bien.

J. Rodier.

BIBLIOGRAPHIE

Albergel J. - 1987. *Genèse et prédétermination des crues au Burkina Faso. Du m² au km², étude des paramètres hydrologiques et de leur évolution.* Thèse Université Paris 6, 336p.

Albergel J., Chevallier P., Lortic B. - 1987. *D'Oursi à Gagara : transposition d'un modèle de ruissellement dans le Sahel (Burkina Faso).* Hydrol. Continent. 2(2): 77-86

Ambroise B. - 1978. *Modèles mathématiques dynamiques en géographie physique.* Revue Géographique de l'Est, 1978, 3.

Ambroise B. - 1986. *Rôle hydrologique des surfaces saturées en eau dans le bassin du Ringelbach à Soultzeren (Hautes-Vosges, France).* Universités du Rhin Supérieur, Colloque sur l'Environnement, Strasbourg, 27 et 28 juin 1986 : 620-630

Ambroise B. - 1988. *Interactions eaux souterraines - eaux de surface dans le bassin du Ringelbach à Soultzeren (Hautes Vosges, France) : rôle hydrologique des surfaces saturées.* Symposium International "Interaction entre eaux souterraines et eaux de surface", Association Internationale de Recherche Hydrauliques, Ystad (Suède), 30 mai au 3 juin 1988 : 231-238.

Ambroise B., Gounot M., Mercier J.L. - 1982. *Réflexions sur la modélisation mathématique du cycle hydrologique à l'échelle d'un bassin versant.* Recherches Géographiques à Strasbourg., n°19-21 : 5-24.

Asseline J., Valentin C. - 1978. *Construction et mise au point d'un infiltromètre à aspersion.* Cah. ORSTOM, sér. Hydrol., vol. XV, n°4 : 321-350

Avenard J.M. - 1971. *Aspects de la géomorphologie. In Le milieu Naturel de la Côte d'Ivoire.* Mémoire ORSTOM n°50, Paris : 7-72.

AWRC - 1969. *The representative basin concept in Australia.* Australian Water Resources Council Hydrological Series n°2, 24 p.

Bader J.-C. - 1986. *Etude du ruissellement sous pluie simulée sur les bassins versants du Lac Elia et de la N'daye à D'zobégan (Togo).* ORSTOM, Lomé, multigr., 56 p.

Berndtsson R., Niemczynowicz J. - 1988. *Spatial and temporal scales in rainfall analysis - Some aspects and future perspectives.* J. Hydrol., 100 : 293-313

Bessole B. - 1977. *Géologie de l'Afrique : le craton ouest-africain.* Mémoires du BRGM n°88, 402 p.

Beven K.J. - 1987. *Towards a new paradigm in hydrology.* Proceedings of the Rome Symposium. "Water for the future : hydrology in perspective". AISH publ. n° 164.

Beven K.J. - 1988. *Interflow.* Séminaire NATO sur les écoulements dans la zone non saturée. Arles (France). Juin 1988. multigr., 25 p. + fig.

Beven K.J., Clarke R.T. - 1986. *On the variation of infiltration into a homogeneous soil matrix containing a population of macropores.* Water Resour. Res., 22, 3 : 383-388.

Beven K.J., German P. - 1982. *Macropores and water flow in soils.* Water Resour. Res., 18, 5, 1311-1325.

Beven K.J., Kirkby M.J. - 1979. *A physically based, variable contributing area model of basin hydrology*. Hydr. Sc. Bull., 24, 1 : 43-69.

Beven K.J., 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 : 139-158

Beven K.J., Wood E.F., Sipavalan M. - 1988. *On hydrological heterogeneity - catchment morphology and catchment response*. J. Hydrol., 100 : 353-375.

Boa D., Fritsch E. - 1987. *Cartes de profondeur d'apparition du gravillonnement et de l'induration sur le bassin versant de Booro-Borotou*. ORSTOM Adiopodoumé, 2 cartes au 1/2500.

Bond F.W., Chery D.L., Simpson E.S. - 1979. *A parametric model calibrated with a physically-based model for runoff prediction from ungaged streams*. Water Resour. Bull., 15 (6) : 1640-1652.

Bonhomme M. - 1962. *Contribution à l'étude géochronologique de la plateforme de l'Ouest africain*. Thèse Un. Clermont Ferrand. Ann. Fac. Sci. Univ. Clermont Ferrand, n°5, Géol. Minéral. n°5, 62 p.

Boukerma B. - 1987. *Modélisation des écoulements superficiels et souterrains dans le Sud-Ouest de la France : approche du bilan hydrique*. Thèse Ecole des Mines de Paris, 177 p. + ann.

Brunel J.P. - 1986. *Comparaison instrumentale de la mesure des précipitations en climat méditerranéen semi-aride*. Hydrol. Continent., 1(2) : 87-94.

Brunet-Moret Y. - 1967. *Etude générale des averses exceptionnelles en Afrique Occidentale : République de Côte d'Ivoire*. ORSTOM - CIEH, multigr., 20 p. + 11 fig.

Brunet-Moret Y. - 1969. *Etude de quelques lois statistiques utilisées en hydrologie*. Cah. ORSTOM, sér. Hydrol., vol. VI, n°3

Brunet-Moret Y. - 1974. *Etablissement d'un fichier pluviométrique opérationnel et étude des averses exceptionnelles : application à la Côte d'Ivoire*.

Brunet-Moret Y. - 1978. *Recherche d'un test d'ajustement*. Cah. ORSTOM, sér. Hydrol., vol XV, n°3

Brutsaert W. - 1984. *Evaporation into the atmosphere. Theory, history and applications*. D. Reidel Publishing Company. 299 p..

Callède J. - 1977. *Oscillations journalières du débit des rivières en l'absence de précipitations*. Cah. ORSTOM, sér. Hydrol., vol. XIV, n°3 : 219-280.

Camus H., Chaperon P., Girard G., Molinier M. - 1976. *Analyse et modélisation de l'écoulement superficiel d'un bassin tropical. Influence de la mise en culture. Côte d'Ivoire, Korhogo, 1962-1972*. Travaux et Documents de l'ORSTOM n°52., 81 p. + fig. + ann.

Casenave A. - 1982. *Le mini-simulateur de pluies. Condition d'utilisation et principes de l'interprétation des mesures*. Cah. ORSTOM, sér. Hydrol., vol. XIX, n°4 : 229-252

Casenave A. - 1985. *Programme d'analyse du ruissellement, de l'infiltration et de l'érosion à l'aide des techniques de simulation de pluie*. Journées hydrologiques de l'ORSTOM (Montpellier, 17, 18 septembre 1985), ORSTOM, Coll. et sémin. : 10-17

Casenave A., Guiguen N., Simon J.M. - 1982. *Etudes des crues décennales des petits bassins versants forestiers en Afrique Tropicale*. Cah. ORSTOM, Sér. Hydrol. XIX (4) : 229-252.

Casenave A., Kong J., Thiébaux J.-P. - 1985. *Etude du ruissellement sous pluie simulée sur un bassin versant de la Comba (Congo)*. ORSTOM, Adiopodoumé, multigr., 30 p.

Casenave A., Valentin C. - 1988. *Les états de surface de la zone sahélienne. Influence sur l'infiltration*. CEE/ORSTOM, Paris, multigr. 202 p.

Castany G. - 1968. *Prospection et exploitation des eaux souterraines*. Dunod, Paris, 717 p.

Chauvel A., Bocquier G., Pedro G. -1977a. *Géochimie de la surface et formes du relief. III. Les mécanismes de la disjonction des constituants des couvertures ferrallitiques et l'origine de la zonalité des couvertures sableuses dans les régions intertropicales de l'Afrique de l'Ouest*. Sci. Géol. Bull., 30,4 pp 255-263, Strasbourg.

Chauvel A., Bocquier G., Pedro G. -1977b. *La stabilité et la transformation des sols rouges ferrallitiques de Casamance (Sénégal). Analyses microscopiques et données expérimentales*. Vth. Intern. Meet. Soil Micromorph.. Grenade.

Chevallier P. - 1982. *Simulation de pluies sur deux bassins versants sahéliens (Mare d'Oursi - Haute-Volta)*. Cah. ORSTOM, sér. Hydrol., vol. XIX, n°4 : 253-297

Chevallier P. - 1983. *L'indice des précipitations antérieures. Evaluation de l'humectation des sols des bassins versants représentatifs*. Cah. ORSTOM, sér. Hydrol., vol. XX, n°3-4 : 179-190

Chevallier P. - 1985. *Analyse et modélisation du ruissellement en région sahélienne (Mare d'Oursi, Burkina Faso)*. La Houille Blanche n°6/7 : 573-580.

Chevallier P., Berthelot M., Etienne J., Lapetite J.M. - 1986. *Bassin versant de Booro-Borotou (Côte d'Ivoire). Données de base hydropluviométriques. Années 1984 et 1985*. ORSTOM Adiopodoumé, multigr., 65 p., 11 fig..

Chevallier P., Berthelot M., Etienne J., Lapetite J.M. - 1987a. *Bassin versant de Booro-Borotou (Côte d'Ivoire). Données de base hydropluviométriques. Année 1986*. ORSTOM Adiopodoumé, multigr., 75 p., 30 fig.

Chevallier P., Berthelot M., Etienne J., Lapetite J.M. - 1987b. *Observations climatologiques à la station de Booro-Borotou (Côte d'Ivoire). Année 1986*. ORSTOM Adiopodoumé, multigr., 46 p.

Chevallier P., Berthelot M., Lapetite J.M., Planchon O. - 1988a. *Bassin versant de Booro-Borotou (Côte d'Ivoire). Données de base hydropluviométriques. Janvier 1987-mars 1988*. ORSTOM Montpellier, multigr.

Chevallier P., Berthelot M., Lapetite J.M. - 1988b. *Observations climatologiques à la station de Booro-Borotou (Côte d'Ivoire). Janvier 1987-mars 1988*. ORSTOM Montpellier, multigr.

Chevallier P., Claude J., Pouyaud B., Bernard A. - 1985. *Pluies et crues au Sahel. Hydrologie de la Mare d'Oursi (Burkina Faso). 1976-1981*. Travaux et Documents de l'ORSTOM n°190. 256 p.

Chevallier P., Etienne J., Janeau J.L., Lapetite J.M., Mahieux A. - 1985. *Bassin versant représentatif de Booro-Borotou : caractéristiques physiques et équipement hydropluviométrique*. ORSTOM Adiopodoumé, multigr., 22 p., 7 fig., 1 carte h.t.

Chevallier P., Etienne J., Lapetite J.M. - 1986. *Observations climatologiques à la station de Booro-Borotou (Côte d'Ivoire). Année 1985.* ORSTOM Adiopodoumé, multigr., 42 p.

Chevallier P., Lapetite J.M. - 1986. *Note sur les écarts de mesure observés entre les pluviomètres standards et les pluviomètres au sol en Afrique de l'Ouest.* Hydrologie Continentale, vol. 1(2), 1986 : 111-119.

Chevallier P., Lapetite J.M., Mahieux A. - 1985. *Observations climatologiques à la station de Booro-Borotou (Côte d'Ivoire). Année 1984.* ORSTOM Adiopodoumé, multigr., 36 p.

Chevallier P., Lointier M., Lortic B. - 1986. *Water levels of a sahelian lake (Mare d'Oursi - Burkina Faso).* Hydrologic Applications of Space Technology (Proceedings of the Cocoa Beach Workshop, Florida). IAHS Publ. n° 160 : 99-107.

Chorley R.J. - 1978. *The hillslope hydrological cycle.* In : M.J. Kirkby (editor) *Hillslope hydrology.* John Wiley & Sons : 1-41.

Collinet J. - 1988. *Comportements hydrodynamiques et érosifs de sols de l'Afrique de l'Ouest. Evolution des matériaux et des organisations sous simulation de pluies.* Thèse ULP, Strasbourg. 513 p. + ann.

Collinet J., Valentin C. - 1979. *Analyse des différents facteurs intervenants sur l'hydrodynamique superficielle. Nouvelles perspectives. Applications agronomiques.* Cah. ORSTOM, sér. Pédol., vol. XVII, n°4 : 283-328

Combes V. - 1985. *Paramétrisation de modèles conceptuels d'un bassin versant. Contribution à l'élaboration d'un système de mesure des caractéristiques hydrologiques d'un bassin versant. Application au modèle CREC.* Thèse Docteur Ingénieur, USTL, Montpellier.

Correia F.N., Morel-Seytoux H.J. - 1985. *OMEGA : another physically-based rainfall model ?* Hydrology Days and 14th Annual Rocky Mountain Groundwater Conference (april 16-20, 1985). Fort Collins, Colorado. 157-168.

Cormary Y., Guilbot A. - 1971. *Ajustement et réglage des modèles déterministes. Méthodes de calage des paramètres.* La Houille Blanche 2/1971 : 131-140.

Cosandey C. - 1986. *De l'origine de l'écoulement rapide de crue dans un petit bassin versant forestier breton.* Z. Geomorph. N.F., Suppl.-Bd. 60 : 177-186.

Coutagne A. - 1948. *Etude générale des variations de débit en fonction des facteurs qui les conditionnent. II. Les variations de débit en période non influencée par les précipitations.* La Houille Blanche : 416-436.

Couture R. - 1951. *Côte d'Ivoire, Guinée. In Rapport annuel 1950 du Service Géographique de l'A.O.F.* Dir. Mines de l'A.O.F., Dakar.

Couture R. - 1968. *Carte géologique à 1/500 000. Feuille Odienné.* Dir. Mines Géol. Côte d'Ivoire, Abidjan.

Dacharry M. - 1974. *Hydrologie de la Loire à l'amont de Gien (précipitations, écoulements).* Nouvelles Editions Latines, Paris, 2 vol., 640 p.

Dalton J. - 1802. *Experimental essays on the constitution of mixed gases ; on the force of the stream or vapor from water and other liquids in different temperatures, both in a Toricellian vacuum and in air ; on evaporation and on the expansion of gases by heat.* Mem. Manchester Lit. and Phil. Soc. 5 : 535-602.

Danish Hydraulic Institute, - 1984. *Introduction to the SHE, Système Hydrologique Européen, European Hydrologic System.* 43 p.

Davies J.A. - 1965. *Estimation of insolation for West Afrika.* Quart. J. Roy. Meteorol. Soc. 91 : 359-363.

Davoine J.L. - 1988. *Analyse des données pluviographiques du poste d'Odienné (Côte d'Ivoire).* Rapport de stage à l'ORSTOM, multigr. 22 p. + ann.

Depraetere C. - 1988. *Logiciel LAMONT.* Version 1.0.

Dezetter A. - 1986. *Contribution à l'étude et à la refonte de deux modèles hydropluviométriques au pas de temps journalier. Modèle Girard, Modèle Ibiza.* Rapport de stage effectué à l'ORSTOM, juillet-août 1986. Multigr. ORSTOM, Montpellier.

Dezetter A. - 1987. *Modèle global "ORSTOM 74". Analyse des structures et de fonctionnement en vue d'une reformulation.* DEA USTL Montpellier. Multigr. 117p. + ann.

Dosseur H. - 1964. *Contribution à la définition de caractéristiques d'état du bassin expérimental d'Alrance (Aveyron) pour la prévision hydrologique.* Thèse 3ème cycle Fac. des Sciences de Montpellier, EDF CREC, Chatou. 178 p. + vol. de tableaux + fig. et cartes.

Dosseur H. - 1986. *Description et utilisation de la version 1 du modèle hydro-pluviométrique MODQJ.* ORSTOM, Paris, multigr., 13 p. + ann.

Dubreuil P. - 1974. *Initiation à l'analyse hydrologique.* Masson, ORSTOM, Paris, 216 p.

Dubreuil P.L. - 1985. *Review of field observations of runoff generation in the tropics.* J. Hydrol., 80 : 237-264.

Dubreuil P.L. - 1986a. *Review of relationships between geophysical factors and hydrological characteristics in the tropics.* J. Hydrol., 87 : 201-22.

Dubreuil P.L. - 1986b. *L'évaluation et l'utilisation des ressources en eau des régions semi-arides et intertropicales.* in *Sols et eaux. Aquis et perspectives de la recherche agronomique française en zone intertropicale.* Actes du séminaire tenu à la Banque Mondiale les 15 et 16 mai 1986. ORSTOM, Banque Mondiale, Paris, Washington : 93-153.

Dubreuil P., Chaperon P., Guiscafne J., Herbaud J. - 1972. *Recueil des données de base des bassins versants représentatifs et expérimentaux de l'ORSTOM. Années 1951-1969.* ORSTOM, Paris, 916 p.

Dunne T. - 1978. *Field studies of hillslope flow processes.* In J. Kirkby (editor) *Hillslope hydrology.* John Wiley & Sons : 227-293

Dunne T. - 1983. *Relation of field studies and modeling in the prediction of storm runoff.* In : I. Rodriguez-Iturbe and V.K. Gupta (guest-editors), *Scale problems in hydrology.* J. Hydrol., 65 : 25-48

- Eldin M. - 1971. *Le climat*. In *Le milieu Naturel de la Côte d'Ivoire*. Mémoire ORSTOM n°50, Paris : 73-108.
- Evans I.S. - 1981. *General geomorphometry*. Chapter 2.3 in *Geomorphological techniques* edited by A. Goudie et al., George Allen & Unwin, London : 31-37.
- Fortin J.P., Charbonneau R., Lefèvre J., Girard G. - 1971. *Proposition et analyse de quelques critères adimensionnels d'optimisation*. AISH Publ. n°101, vol. 2, Actes du Colloque de Varsovie : 548-557.
- Freeze R.A. - 1972. *Role of subsurface flow in generating surface runoff. 2. Upstream source areas*. Water Resour. Res., 8, 5 : 1272-1283
- Fritsch E., Planchon O., Valentin C. - 1986. *Les transformations d'un paysage cuirassé au nord-ouest de la Côte d'Ivoire sur formations gneisso-migmatitiques*. In *Land development - management of acid soils*. IBSRAM Proceedings n°4.
- Fritsch J.M. - 1987. *Petite histoire de la recherche hydrologique en milieu forestier*. Inédit, comm. pers., ORSTOM, Montpellier.
- Geng Q.Z. - 1988. *Modélisation des cycles de l'eau et transfert des nitrates*. Thèse Ecole des Mines de Paris, 180 p.
- Gille E. - 1985. *Contribution à l'étude hydrologique des bassins de la Meuse et de la Moselle : problématique de l'utilisation d'un modèle couplé à discrétisation spatiale*. Thèse 3ème cycle, Ecole des Mines de Paris, Univ. Pierre et Marie Curie. 213 p. + ann.
- Gillon Y. - 1983. *La Cendre et la Vie*. Film long métrage 16 mm. ORSTOM/CNRS, Programme Ecotrop.
- Gioda A., Lapetite J.-M. - 1985. *Etude du rapport pluie-débit sur un petit bassin de savane à l'aide d'un infiltromètre à aspersion (Worossantiakaha, Côte d'Ivoire, 1984)*. ORSTOM, Adiopodoumé, multigr., 54 p.
- Gioda A., Simon J.-M., Etienne J. - 1985. *Comparaison entre les relations précipitations-débits déduites de la simulation de pluies sur parcelles (1983) et celles observées à l'échelle du bassin (1968/71 et 83/84)*. Waraniéne-Korhogo (Côte d'Ivoire). ORSTOM, Adiopodoumé, multigr., 68 p.
- Girard G., Chaperon P. - 1971. *Traitement automatique de l'information pluviographique*. Cah. ORSTOM, sér. Hydrol., vol. VIII, n°3.
- Girard G., Ledoux E., Villeneuve J.P. - 1981. *Le modèle couplé. Simulation conjointe des écoulements de surface et des écoulements souterrains sur un système hydrologique*. Cah. ORSTOM, sér. Hydrol., vol XVIII, n°4.
- Girard G., Morin G., Charbonneau R. - 1972. *Modèle précipitations-débits à discrétisation spatiale*. Cah. ORSTOM, sér. Hydrol., vol. IX, n°4.
- Girard G., Sircoulon J., Toucheboeuf P. - 1971. *Aperçu sur les régimes hydrologiques*. In *Le milieu Naturel de la Côte d'Ivoire*. Mémoire ORSTOM n°50, Paris : 109-155.
- Glover J., Mc Culloch J.S.G. - 1958. *The empirical relation between solar radiation and hours of sunshine*. Quart. J. Roy. Meteorol. Soc. 84 : 172-175.

- Green W. H., Ampt C. A. - 1911. *Studies on soil physics : I. Flow of air and water through soils*. J. Agr. Sci., vol. 4 : 1-24
- Guillaumet J.L., Adjanooun E. - 1971. *La végétation de la Côte d'Ivoire*. In *Le milieu Naturel de la Côte d'Ivoire*. Mémoire ORSTOM n°50, Paris :157-264.
- Guiscafré J., Klein J.C., Moniod F. - 1976. *Les ressources en eau de la Martinique*. Monographie Hydrologique ORSTOM n°4. 212 p.
- Hansen E., Dyhr-Nielsen M - 1983. *Le projet du Susa : construction de modèles pour la gestion des ressources en eau*. Nature et Ressources, XIX, 3 : 10-18
- Hewlett J.D. - 1974. *Comments on letters to 'Role of subsurface flow in generating surface runoff, 2, Upstream source areas' by R. Allan Freeze*. Water Resour. Res., 10 : 605-607
- Hewlett J.D., Hibbert A.R. - 1967. *Factors affecting the response of small watersheds to precipitation in humid areas*. In *Forest Hydrology*, Sopper W.E. and Hull H.W. Ed., Pergamon Press : 275-290.
- Hillel D. - 1974. *L'eau et le sol. Principes et processus physiques*. Vander, Louvain, 288 p.
- Horton R.E. - 1933. *The role of infiltration in the hydrological cycle*. Trans. Am. Geophys. Union, 14 : 446-460
- Ibiza D. - 1983. *Un modèle simplifié de calcul des écoulements mensuels par bilan hydrique. Application : variation de quelques paramètres hydrologiques d'après l'aspect des bassins*. Cah. ORSTOM, sér. Hydrol., vol. XX, n°1 : 3-46
- Ibiza D. - 1984-1985a. *Etude de l'infiltration au pas de temps journalier sur des petits bassins versants. Refus à l'infiltration par saturation des réserves souterraines*. Cah. ORSTOM, sér. Hydrol., vol. XXI, n°3 : 17-50.
- Ibiza D. - 1984-1985b. *Une fonction de production aux petits pas de temps*. Cah. ORSTOM, sér. Hydrol., vol. XXI, n°3 : 51-98
- Ibiza D. - 1988. *Note complémentaire pour l'utilisation du modèle MODQJ (MODIBI)*. ORSTOM Montpellier, multigr., 5 p.
- IGN - 1954-55. *Couverture photographique verticale aérienne au 1/50 000*. Zone NC-29V.
- IGN - 1961. *Touba*. Carte de l'Afrique de l'Ouest au 1/200 000. République de Côte d'Ivoire, feuille NC-29V.
- Iris J.M. - 1987. *Analyse et interprétation de la variabilité spatiale de la densité apparente dans trois matériaux ferrallitiques*. Bulletin de l'AFES.
- Iris J.M. - 1986. *Analyse et interprétation de la variabilité spatiale de la densité apparente dans trois matériaux ferrallitiques*. Science du sol, 24 : 245-256.
- Iris J.M. - 1988. *Effet de la variabilité spatiale du ruissellement sur l'estimation des crues*. Proceedings of the Third International Geostatistics Congress (Avignon, 5/9 sept. 1988). A paraître chez Reidel&Co. 12 p., 8 fig., 17 réf.

Janeau J.L. - 1986. *Le bassin versant de Varalé (Côte d'Ivoire). Esquisse au 1/50 000 des états de surface.* ORSTOM, Adiopodoumé, multigr., 28 p.

Janeau J.L., Valentin C. - 1987. *Relations entre les termitières Trinervitermes s.p. et la surface du sol : réorganisation, ruissellement et érosion.* Rev. Ecol. Biol. Sol, 24 (4) : 637-647.

Kirkby M. - 1978. Editor of *Hillslope hydrology.* John Wiley & Sons, 389 p.

Kirkby M. - 1988. *Hillslope runoff processes and models.* J. Hydrol., 100 :315-339.

Klemes V. - 1983. *Conceptualization and scale in hydrology.* In : I. Rodriguez-Iturbe and V.K. Gupta (guest-editor), *Scale Problems in Hydrology.* J. Hydrol., 65 : 1-23

Klemes V. - 1986. *Dilettantism in hydrology : transition or destiny ?* Water Resour. Res., 22, 9 : 1775-1885.

Klemes V. - 1988. *A hydrological perspective.* J. Hydrol., 100 : 3-28.

Kouamé B. - 1986. *Analyse et traitement des observations des postes pluviométriques de Touba et Bouna.* Rapport de stage intégré. ENSTP - ENIT, Yamoussoukro, 28 p. + ann.

Kouamé B. - 1987. *Forme des averses, variabilité spatiale et temporelle au nord-ouest de la Côte d'Ivoire.* Mémoire DEA, USTL Montpellier, 110 p. + ann.

Lafforgue A. - 1977. *Inventaire et examen des processus élémentaires de ruissellement et d'infiltration sur parcelles. Application à une exploitation méthodique des données obtenues sous pluies simulées.* Cah. ORSTOM, sér. Hydrol., vol. XIV, n°4 : 299-344

Lafforgue A. - 1982. *Etude hydrologique des bassins versants de Sakassou. Côte d'Ivoire, 1972-1977.* Travaux et Documents de l'ORSTOM n°149, 342 p..

Lebel T., Boyer J.F. - 1987. *Notice utilisateur du logiciel DIXLOI. Un ensemble de programmes FORTRAN 77 pour l'ajustement de lois statistiques et leur représentation graphique.* ORSTOM Montpellier, multigr., 45 p.

Leblond P. - 1988. *Etude géophysique du bassin versant de Booro-Borotou.* ENSTP Yamoussoukro, multigr., 6 p. + fig, 3 cartes h.t.

Ledoux E. - 1978. *Programme NEWSAM. Principe et notice d'emploi.* Rapport Ecole des Mines. LHM/R75/11.

Ledoux E. - 1980. *Modélisation intégrée des écoulements de surface et des écoulements souterrains sur un bassin hydrologique.* Thèse de Docteur Ingénieur, Ecole des Mines de Paris, Université Pierre et Marie Curie.

Ledoux E. - 1986. *Modèles mathématiques en hydrogéologie.* Ecole des Mines de Paris, rapport LHM/RD/86/12, 120 p.

Lenoir F. - 1977. *Le régime des nappes dans les formations d'altération. Un exemple en Côte d'Ivoire (Sakassou - Toumodi).* ORSTOM Adiopodoumé, multigr., 48 p.

Leprun J.C. - 1977. *Géochimie de la surface et forme de relief. IV. La dégradation des cuirasses ferrugineuses. Etude et importance du phénomène pédologique en Afrique de l'Ouest.* Sci. Géol. Bull., 30,4 pp 265-273, Strasbourg.

Loague K.M., Freeze R.A. - 1985. *A comparison of rainfall-runoff modeling techniques on small upland catchments*. Water Resour. Res., 21, 2 : 229-248.

Marquardt D. W. - 1963. *An algorithm for least squares estimation of nonlinear parameters*. J. of Soc. of Industrial and Applied Mathematics, n°2 : 431-441

Marsily G. de - 1981. *Hydrogéologie quantitative*. Masson, 215 p.

Marsily G. de, Ledoux E., Levassor A., Poitrinal D., Salem A. - 1978. *Modelling of large multilayered aquifer system : theory and applications*. Journal of Hydrology, 36.

Marwell P., Lanna A.E. - 1987. *MOHTSAR, un modèle hydrologique pour le Tropique semi-aride*.

Mérot P. - à paraître. *Les zones de sources à surface variable et la question de leur localisation*. Hydrologie Continentale.

Mitja D. - à paraître. Thèse sur la végétation et les jachères du bassin versant de Booro-Borotou (Côte d'Ivoire). Université Paris VI.

Molinier M. - 1981. *Etude hydrologique des bassins de la Comba. République Populaire du Congo*. ORSTOM, sér. Hydrol., XVIII, 2-3 : 75-190.

Moniod F. - 1983. *Deux paramètres pour caractériser le réseau hydrographique*. Cah. ORSTOM, sér. Hydrol., XX, 3/4 : 191-203.

Moniod F. - 1987. *Vers une nouvelle conception de l'hydrologie*. Traduction libre de l'article de Beven K., *Towards a new paradigm in hydrology*. ORSTOM, Montpellier, multigr., 8 p. + réf.

Monteny B.A. - 1983. *Estimation des besoins en eau d'une culture de canne à sucre durant sa période de croissance*. Document de travail, ORSTOM Adiopodoumé, Laboratoire de Bioclimatologie, So-Su-HV., 15 p.

Monteny B.A., Humbert J., Lhomme J.P., Kalms J.M. - 1981. *Le rayonnement net et l'estimation de l'évapotranspiration en Côte d'Ivoire*. Agricultural Meteorology, 23 : 45-59.

Morel B. - 1987. *Notice géologique de la région de Booro-Borotou. Note inédite + 3 cartes*. ENSTP, Yamoussoukro.

Morel-Seytoux H.J. - 1973. *Pour une théorie modifiée de l'infiltration. 2eme partie : comment ?*. Cah. ORSTOM, sér. Hydrol., vol. X, n°3 : 199-209

Morel-Seytoux H.J., Alhassoun S.A. - 1988. *A Multi-Process Watershed Model for Simulation of Surface and Subsurface Flows in a Soil-Aquifer-Stream Hydrologic System*. Multigr., Colorado State University, Fort Collins. 296 p.

Muller J.P. - 1974. *Introduction à l'étude de trois toposéquences situées entre Goyoum et Deng*. ORSTOM Yaoundé, multigr., 18 p.

Nahon D., Millot G. - 1977. *Géochimie de la surface et formes du relief. V. Enfoncement géochimique des cuirasses ferrugineuses par épigénie du manteau d'altération des roches mères gréseuses. Influence sur le paysage*. Sci. Géol. Bull. 30,4, pp 275-282, Strasbourg.

Nash J.E. - 1969. *A course of lectures on parametric or analytical hydrology*. Great Lakes Institute. Un. of Toronto Pr 38, Lect. n°12.

Nash J.E. - 1988. *Foreword*. J. Hydrol., 100 : v-viii.

Neff E.L. - 1977. *How much rain does a rain gage gage ?*. J. Hydrol., 35 : 213-220

Nelder J.A., Mead R. - 1965. *A simplex method for function minimisation*. The Computer J. 7, pp 308-313.

Noirot M., Mullon, Desjardin, Savy L. - 1987. *Logiciel d'analyse statistique NDMS. Version 1987*. ORSTOM, Montpellier.

O'Donnel T. - 1986. *Deterministic catchment modelling*. In D.A. Kraijenhoff and J.R. Moll (eds.), *River flow modelling and forecasting* :11-37, D. Reidel Publishing Company.

Pearce A.J., Stewart M.K., Sklash M.G. - 1986. *Storm runoff generation in humid headwater catchments. 1. Where does the water come from*. Water Resources Research, 22(8) : 1263-1272.

Penman H.L. - 1948. *Natural evaporation from open water, bare soil and grass*. Proc. Roy. Soc. London, A193 : 120-146

Penman H.L. - 1956. *Evaporation from Lake Volta*. Volta River Project : Appendix III.

Perrin de Bichambaut C. - 1963. *Rayonnement solaire et échanges radiatifs naturels*. Gauthier-Villars, Paris.

Pickup G. - 1977. *Testing the efficiency of algorithms and strategies for automatic calibration of rainfall-runoff models..* Hydr. Scienc. Bull., XXII, 2, 6/1977, pp 257-274.

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

Planchon O. - 1988. *La production de sédiments sur les versants et leur transport à l'échelle du km² en savane humide, Côte d'Ivoire*. Présenté pour communication au Symposium IAHS de Porto Alegre sur *Sediment budgets*, décembre 1988, 10 p., 4 fig.

Planchon O. - (à paraître). *Genèse et fonctionnement des ravines du bassin versant de Booro-Borotou (Côte d'Ivoire)*. Thèse en préparation. USTL, Laboratoire d'Hydrologie Mathématique, Montpellier.

Pouyaud B. - 1985. *Contribution à l'évaluation de l'évaporation de nappes d'eau libre en climat tropical sec. Exemples du Lac de Bam et de la Mare d'Oursi (Burkina Faso), du Lac Tchad et d'açudes du Nordeste brésilien*. Thèse Université Paris Sud. 254 p.

Powell M.J.D. - 1965. *A method for minimising the sum of squares of non-linear fonctions without calculating derivatives*. The Computer J. 7 : 155-162

Ragan R.M. - 1968. *An experimental investigation of partial area contributions*. Proceedings of the Berne Symposium. IAHS Publ. n°76 : 241-249.

Ribstein P. - 1983. *Loi des fuites*. Cah. ORSTOM, sér. Hydrol., vol. 20, n°2.

- Riou C. - 1975. *La détermination pratique de l'évaporation. Application à l'Afrique Centrale*. Mémoires ORSTOM n°80.
- Roche M. - 1963. *Hydrologie de surface*. Gauthier-Villars, ORSTOM, Paris. 430 p.
- Roche M. - 1983. *L'apport de l'ORSTOM dans l'hydrologie de l'Afrique de l'Ouest*. Cah. ORSTOM, sér. Hydrol., XX, 3/4 : 205-211
- Roche M.F. - 1986. *Dictionnaire français d'hydrologie de surface*. Masson, Paris, 288 p.
- Rodda J.C. - 1968. *The rainfall measurement problem*. IAHS publ. n° 78. Ass. Gén. de Berne : 215-231.
- Rodda J.C. - 1976. *Facets of hydrology. Chapter 10 : basin studies*. John Wiley & Sons, Londres : 257-297.
- Rodier J. - 1964. *Régimes hydrologiques de l'Afrique Noire à l'Ouest du Congo*. Thèse de Docteur-Ingénieur, Faculté des Sciences de Toulouse.
- Rodier J. - 1975. *Evaluation de l'écoulement annuel dans le Sahel tropical africain*. Travaux et Documents de l'ORSTOM n° 46, Paris, 121 p.
- Rodier J. - 1982. *La transposition des résultats des bassins versants représentatifs et ses problèmes*. Cah. ORSTOM, sér. Hydrol., vol. XIX, n°2 : 115-127
- Rodier J. - 1984-1985. *Caractéristiques des crues des petits bassins versants représentatifs au Sahel*. Cah. ORSTOM, sér. Hydrol., vol. XXI, n°2, 1984-85
- Rogers C.C.M., Beven K.J., Morris E.M., Anderson M.G. - 1985. *Sensitivity analysis, calibration and predictive uncertainty of the Institute of Hydrology Distributed Model*. J. Hydrol., 81 : 179-191.
- Rosenbrock H.H. - 1960. *An automatic method for finding the greatest or least value of a fonction*. The Computer J. 3, pp 175-184.
- Seguis L. - 1986. *Recherche pour le Sahel d'une fonction de production journalière (lame précipitée, lame écoulée)*. Thèse Université des Sciences et Techniques du Languedoc, Montpellier, 326 p.
- Servat E. - 1986a. *Présentation de trois modèles globaux conceptuels déterministes : CREC 5, MODGLO, MODIBI*. Multigr. 58 p.. ORSTOM, Montpellier.
- Servat E. - 1986b. *Notice d'utilisation du modèle MODGLO*. Multigr. 6 p. + ann., ORSTOM, Montpellier.
- Sherman L.K. - 1932. *Streamflow from rainfall by the unit graph method*. Engin. News. Rec, 108 : 501-505
- Sherman L.K. - 1941. *The unit hydrograph and its applications*. Bull. Ass. State Eng. Soc., vol. 17, pp 4-22.
- 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 : 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 : 75-86.
- Sklash M.G., Farvolden R.N. - 1979. *The role of groundwater in storm runoff*. J. Hydrol., 43 : 45-65
- Sklash M.G., Stewart M.K., Pearce A.J. - 1986. *Storm runoff generation in humid headwater catchments. 2. A case study of hillslope and low-order stream response*. Water Resour. Res., 22, 8 : 1273-1282
- STSC Inc. - 1986. *STATGRAPHICS. Statistical Graphics System. User's guide*. A Plus*Ware Product.
- Thébé B. - 1987. *Hydrodynamique de quelques sols du Nord-Cameroun. Bassins versants de Mouda. Contribution à l'étude des transferts d'échelles*. Thèse Université des Sciences et Techniques du Languedoc, Montpellier, 306 p.
- Thornthwaite C.W., Holzmann B. - 1939. *The determination of evaporation from land and water surface*. Monthly Weath. Rev. 67 : 4-11.
- Tison G. - 1960. *Fluctuation des nappes aquifères sous l'action de divers facteurs (pluies, rivières, etc...)*. La Houille Blanche : 189-196
- Todini E. - 1988. *Rainfall-runoff modeling - past, present and future*. J. Hydrol., 100 : 341-352.
- Toebes C., Ouryvaev V. - 1970. *Les bassins représentatifs et expérimentaux.. Guide international des pratiques en matière de recherche*. UNESCO, Etudes et rapports d'hydrologie n°4, 380 p.
- Tomassone R., Lesquoy E., Millier C. - 1983. *La régression. Nouveaux regards sur une ancienne méthode statistique*. Masson, Paris, Actualités scientifiques et agronomiques de l'INRA n°13, 180 p.
- Troxell H.C. - 1936. *The diurnal fluctuation in the groundwater and flow of the Santa Ana River and its meaning*. Transactions American Geophysical Union, vol. 17 : 496-504.
- Turc L. - 1954-55. *Le bilan d'eau des sols : relations entre les précipitations, l'évaporation et l'écoulement*. Ann. Agron. 5, pp. 491-509 ; 6 : 5-131
- Valentin C. - 1985. *Différentier les milieux selon leur aptitude au ruissellement : une cartographie adaptée aux besoins hydrologiques*. Journées hydrologiques de l'ORSTOM (Montpellier, 17-18 septembre 1985), ORSTOM, Coll. et sémin., 50-74.
- Valentin C. - 1986. *Esquisse des états de surface du bassin versant de Booro-Borotou*. Carte au 1/2500.
- Valentin C., Fritsch E., Planchon O. - 1986. *Sols, surfaces et formes d'érosion linéaire en milieu ferrallitique de savane : l'exemple d'un bassin versant du Nord-Ouest de la Côte d'Ivoire*. In *Land development-management of acid soils*. IBSRAM Proceedings n°4, pp 67-80.
- Valentin C., Janeau J.L. - 1988. *Influence de la position topographique et de la durée de la jachère sur la stabilité structurale et l'infiltrabilité (Booro-Borotou, Côte d'Ivoire)*. Note interne équipe Hyperbav., multigr., 9 p. + fig.

Wischmeier W.H., Smith D.D. - 1978. *Predicting rainfall erosion losses. A guide to conservation planning*. U.S.D.A., Agriculture Handbook n°537.

Woolhiser D.A., Brakensiek D.L. - 1982. *Hydrologic system synthesis*. In *Hydrologic modeling of small watersheds*, edited by C.T. Haan, H.P. Johnson and D.L. Brakensiek. ASEAE Monograph n°5 : 3-16.

Zacharias Y.B., Brutsaert W. - 1985. *Ground surface slope as a basin scale parameter*. *Water Resour. Res.*, 21, 12 : 1895-1902.

TABLE DES MATIERES

Avertissement	4
Résumé / Mots clés	5
Abstract / Keywords	6
Plan	7
Avant-Propos	8
Introduction	11
Le programme Hyperbav	11
L'étude hydrologique	11
1. Réflexions	13
1.1. Bassins versants représentatifs à l'ORSTOM	15
1.1.1. Le bassin versant	16
1.1.1.1. Approche statistique	17
1.1.1.2. Approche conceptuelle	18
1.1.2. La représentativité	18
1.1.3. L'étude de Booro-Borotou	20
1.2. Les chemins de l'eau	21
1.2.1. L'écoulement de surface (Horton overland flow, chemin n°1)	23
1.2.2. L'écoulement rapide interne (throughflow, subsurface flow, chemin n°3)	23
1.2.2.1. L'effet piston (translatory flow)	24
1.2.2.2. L'écoulement dans la macroporosité tubulaire (macropores flow)	24
1.2.2.3. L'intumescence de nappe (groundwater ridging)	24
1.2.2.4. L'écoulement de retour (return flow)	24
1.2.3. L'écoulement sur surface saturée (saturation overland flow, chemin n°4)	25
1.2.4. Synthèse	25
1.3. Les interrogations récentes	28
1.3.1. Vers une nouvelle conception de l'hydrologie (Beven, 1987)	28
1.3.2. Dilettantisme ou perspectives en hydrologie ? (Klemes, 1986 et 1988)	29
1.3.3. Conclusion en forme d'introduction à l'étude de Booro-Borotou	30
2. Observations	31
2.1. Contexte géographique	33
2.1.1. Généralités	33
2.1.2. Le milieu régional	36
2.1.3. Les bassins versants	36
2.2. Géologie	38
2.2.1. Situation géologique	38
2.2.2. Formations géologiques	38
2.2.2.1. Les formations gneissiques	38
2.2.2.2. Les formations lenticulaires	39
2.2.2.3. Les formations filoniennes	39
2.2.3. Relations entre les formations géologiques	40
2.2.3.1. Relation des formations gneissiques entre elles	40
2.2.3.2. Relations des formations lenticulaires entre elles	40
2.2.3.3. Rel. formations gneissiques / formations lenticulaires	40
2.2.4. Relations formations géologiques / cuirasses latéritiques	40
2.2.5. Etude structurale	41
2.2.5.1. Les déformations cassantes	41
2.2.5.2. Les déformations souples	41

2.2.6. Approche géophysique	41
2.2.6.1. Objectifs et méthodes	41
2.2.6.2. Résultats	42
2.2.6.3. Conclusions	42
2.3. Pédologie	45
2.3.1. Présentation générale	45
2.3.2. Le domaine ferrallitique	45
2.3.2.1. Pédogenèse	45
2.3.2.2. Géomorphologie	47
2.3.3. Le système ferrugineux	47
2.3.3.1. Pédogenèse	47
2.3.3.2. Extension et évolution	47
2.3.3.3. Géomorphologie	51
2.3.4. Le système cuirassé	51
2.3.4.1. Pédogenèse	51
2.3.4.2. Extension	54
2.3.4.3. Géomorphologie	54
2.3.5. Le système hydromorphe	54
2.3.5.1. Pédogenèse	54
2.3.5.2. Extension et développement, géomorphologie associée	57
2.3.6. Les états de surface	57
2.4. Végétation	60
2.4.1. Cartographie des grandes zones végétales	60
2.4.1.1. Méthode	60
2.4.1.2. Description sommaire des zones de végétation	60
2.4.1.3. Cartographie selon les herbacées	62
2.4.2. Evolution saisonnière et biomasse	62
2.4.3. Couverture	63
2.5. Climat	65
2.5.1. Généralités	65
2.5.2. Températures	65
2.5.3. Humidités relatives	67
2.5.4. Vent	69
2.5.5. Durée d'insolation et rayonnement global	71
2.6. Précipitations	74
2.6.1. Le contexte régional	74
2.6.1.1. Généralités	74
2.6.1.2. Statistiques régionales	74
2.6.2. La pluie à Booro-Borotou	77
2.6.2.1. Le dispositif de mesure	77
2.6.2.2. Les observations	77
2.6.2.3. Variabilité spatiale et temporelle	81
2.7. Evaporation	86
2.7.1. Evapotranspiration potentielle	86
2.7.1.1. Evaluation du rayonnement net RN	86
2.7.1.2. Evaluation du pouvoir évaporant EA	87
2.7.1.3. Evaluation de l'albédo	87
2.7.1.4. Résultats	88
2.7.2. Evaporation sur bac Colorado	90
2.8. Stockages souterrains	91
2.8.1. La zone non-saturée	91
2.8.2. La zone saturée	91
2.9. Ecoulements	96
2.9.1. Description sommaire des stations hydrométriques	96

2.9.1.1. Station de Booro-Borotou Principal	96
2.9.1.2. Station de Booro-Borotou Amont	96
2.9.1.3. Station de la Séné à Touresso	97
2.9.2. Ecoulements	97
2.9.3. Ecoulements rapides de crue	100
3. Expérimentations	103
3.1. Simulation de pluies	105
3.1.1. Le principe	105
3.1.2. Mise en ouvre sur le bassin de Booro-Borotou	105
3.1.2.1. Les sites de mesure	105
3.1.2.2. Description codifiée des parcelles	106
3.1.2.3. Protocole d'averse	110
3.1.3. Le modèle simulateur	112
3.1.3.1. Le principe	112
3.1.3.2. Evaluation des fonctions de production LR(P,API) pour les parcelles de Booro-Borotou	113
3.1.3.3. Fonction de production globale	114
3.1.3.4. Lame ruisselée de la crue d'étude	116
3.1.3.5. Commentaires	117
3.1.4. Les lois de l'infiltration	120
3.1.4.1. Le modèle de Green et Ampt	120
3.1.4.2. Intensité limite de ruissellement	121
3.1.4.3. Classement des parcelles selon leur aptitude au ruissellement ou à l'infiltration	121
3.1.4.4. Commentaires	126
3.1.5. Humidité volumique et lame infiltrée	127
3.1.5.1. Mesure	127
3.1.5.2. Résultats	127
3.1.5.3. Commentaires	128
3.1.6. Confrontation saison sèche - saison des pluies	134
3.1.7. Discussion générale sur la simulation de pluies	137
3.1.7.1. La parcelle et l'infiltration	137
3.1.7.2. La parcelle et le modèle simulateur	140
3.1.7.3. Le versant et l'infiltration	141
3.2. Profils hydriques	143
3.2.1. Dispositifs et observations	143
3.2.2. Analyse des profils	143
3.2.2.1. Tube neutronique n°8	143
3.2.2.2. Tube neutronique n°4	147
3.2.3. Stock hydrique et bilan hydrologique	150
3.3. Traçage des écoulements	153
3.3.1. Objectif	153
3.3.2. Expériences	153
3.3.2.1. 1ère injection, le 18 septembre 1987	153
3.3.2.2. 2ème injection, le 25 septembre 1987	153
3.3.2.3. 3ème injection, le 27 septembre 1987	155
3.3.3. Commentaires	156
3.3.3.1. Crue du 18 septembre 1987	156
3.3.3.2. Crue du 25 septembre 1987	156
3.3.3.3. Crue du 27 septembre 1987	160
3.3.4. Conclusion	160

4. Interprétation	161
4.1. Bilan hydrologique	163
4.1.1. Bilan annuel	163
4.1.2. Bilan hydrologique mensuel	166
4.1.2.1. Pluviométrie - évapotranspiration potentielle	166
4.1.2.2. Pluviométrie - écoulement	169
4.2. Les crues	174
4.2.1. Grandeurs descriptives	174
4.2.1.1. Le débit	174
4.2.1.2. L'évènement pluvieux	176
4.2.1.3. L'état du milieu	177
4.2.2. Echantillon d'analyse	177
4.2.3. Forme des crues	178
4.2.3.1. Hydrogrammes réduits	178
4.2.3.2. Types de crues et hydrogrammes médians	179
4.2.4. Approche statistique	186
4.2.4.1. Tableau de contingence généralisé	186
4.2.4.2. Interprétation du tableau de contingence	187
4.2.4.3. Analyse factorielle des correspondances	189
4.2.4.4. Commentaires sur l'AFC	191
4.2.4.5. Conclusion sur cette approche statistique	191
4.2.5. Les crues de la station amont	192
4.2.5.1. Comparaison station amont et station principale	192
4.2.5.2. Forme des crues	195
4.2.5.3. Comparaison des types de crues	199
4.2.6. Analyse schématique	202
4.3. Le tarissement	205
4.3.1. Oscillations journalières des débits	205
4.3.2. Le tarissement	207
4.3.2.1. Périodes sans précipitations	207
4.3.2.2. Formulation du tarissement	210
4.3.2.3. L'effet des feux de brousse	216
4.3.2.4. Tarissement rapide	216
4.3.2.5. Sakassou et Korhogo	217
4.4. Le fonctionnement	218
4.4.1. Les bassins versants de Sakassou	218
4.4.1.1. Fonctionnement des nappes et influence sur le régime hydrologique	218
4.4.1.2. Commentaire	220
4.4.2. Fonctionnement d'un versant type	220
4.4.2.1. Haut du versant	222
4.4.2.2. Mi-versant	223
4.4.2.3. Bas du versant	224
4.4.2.4. Commentaires	224
4.4.3. Le bassin versant complet	225
5. Modélisation	227
5.1. Modèles globaux	229
5.1.1. Généralités	229
5.1.2. Présentation des modèles Crec 5 et Modglo	231
5.1.2.1. Le modèle Crec 5	231
5.1.2.2. Le modèle Modglo	233
5.1.2.3. Techniques d'optimisation et critères d'évaluation	233
5.1.3. Le modèle Modibi	235

5.1.4. Application au bassin versant de Booro-Borotou	237
5.1.4.1. Modèle Crec 5	237
5.1.4.2. Modèle Modglo	238
5.1.4.3. Modèle Modibi	242
5.1.4.4. Validation	245
5.1.5. Commentaires	246
5.2. Le modèle couplé	250
5.2.1. Présentation du modèle couplé	250
5.2.1.1. Le principe	250
5.2.1.2. L'organisation générale	251
5.2.2. Application du modèle couplé au bassin versant de Booro-Borotou	253
5.2.2.1. La représentation géographique	253
5.2.2.2. La production et le transfert de surface	255
5.2.2.3. Les transferts dans le souterrain	255
5.2.2.4. Résultats	259
5.2.2.5. Commentaires	259
5.3. Perspectives	265
5.3.1. Modèles physiques distribués	265
5.3.2. Géomorphologie	266
Conclusions	269
Postface	271
Bibliographie	283
Table des matières	297
Nomenclature des cartes, figures et tableaux	303
Annexes	309
Pluviométrie moyenne journalière (Booro-Borotou Principal)	311
Débits moyens journaliers (Booro-Borotou Principal)	315
Caractéristiques des crues (Booro-Borotou Principal)	319
Description codifiée des parcelles de simulation de pluie	329
Description codée des parcelles de simulation de pluies	331
Cartes hors-texte	333

NOMENCLATURE DES FIGURES ET TABLEAUX

Cartes hors-texte

- Equipement et sites de mesures
- Géologie
- Sols
- Etats de surface
- Végétation
- Hypsométrie (calque)

Figures

1.201 Les chemins de l'écoulement sur le versant	22
1.202 Représentation des différents processus d'écoulement en relation avec le milieu naturel (d'après Dunne, 1983)	26
1.203 Réponse schématisée du bassin versant selon le processus d'écoulement (d'après Kirkby, 1988)	27
2.101 Carte de situation. République de Côte d'Ivoire	34
2.102 Carte de situation. Région de Touba	35
2.201 Carte de résistivité apparente (AB/2 = 40 m)	43
2.202 Carte de résistivité apparente (AB/2 = 70 m)	44
2.301 Les altérations et les différenciations des sols du domaine ferrallitique (plateau, talus) (d'après Fritsch et al., 1986)	46
2.302 L'extension dans l'espace et dans le temps des différenciations du système transformant supérieur amont dans la formation supergène (d'après Fritsch et al., 1986)	49
2.303 Distribution des valeurs de densité apparente dans les sols rouges et ocres (d'après Iris, 1986)	50
2.304 Les différenciations du système transformant inférieur amont (d'après Fritsch et al., 1986)	52
2.305 L'extension dans l'espace et dans le temps des différenciations du système transformant inférieur amont dans la formation supergène (d'après Fritsch et al., 1986)	53
2.306 L'extension des formations cuirassées et carapacées dans le bassin versant de Booro-Borotou (d'après Fritsch et al., 1986)	55
2.307 L'extension dans l'espace et dans le temps des différenciations du système transformant inférieur aval dans la formation supergène (d'après Fritsch et al., 1986)	56
2.308 Teneur en argile à l'aval de l'induration de mi-versant : extension du réservoir sableux	58
2.501 Températures - moyennes mensuelles	68
2.502 Humidités relatives - moyennes mensuelles	68
2.503 Vitesses du vent - moyennes mensuelles	68
2.504 Direction du vent - moyennes	70
2.505 Durée journalière d'insolation - moyennes mensuelles	72
2.506 Rayonnement global - moyennes mensuelles	72
2.601 Poste de Touba - totaux pluviométriques mensuels	75
2.602 Pluviométrie mensuelle à Booro-Borotou	80
2.603 Pluviométrie mensuelle - comparaison Booro-Borotou / Touba	80
2.604 Pourcentage d'occurrence d'une averse unique par jour de pluie	83
2.605 Circulation privilégiée des averses sur le bassin versant de la Séné	84
2.701 Evapotranspiration potentielle - moyennes mensuelles	89

2.702 Evaporation sur bac ORSTOM - moyennes mensuelles	89
2.801 Niveaux piézométriques - PZ 1	93
2.802 Niveaux piézométriques - PZ 3	93
2.803 Niveaux piézométriques - PZ 9	94
2.804 Niveaux piézométriques - PZ 13	94
2.805 Niveaux piézométriques - PZ 17	95
2.806 Niveaux piézométriques - PZ 21	95
2.901 Booro-Borotou Principal - lames mensuelles écoulées	99
2.902 Booro-Borotou Amont - lames mensuelles écoulées	99
2.903 Séné à Touresso - lames mensuelles écoulées	99
2.904 Booro-Borotou Principal - lames mensuelles ruisselées	101
2.905 Booro-Borotou Amont - lames mensuelles ruisselées	101
2.906 Séné à Touresso - lames mensuelles ruisselées	101
3.101 Schéma de fonctionnement du simulateur de pluies	107
3.102 Emplacement des parcelles de simulation de pluies	108
3.103 Essai de positionnement des parcelles sur une toposéquence type	109
3.104 Modèle simulateur - échantillon complet	119
3.105 Modèle simulateur - échantillon sans la crue du 18-08-85	119
3.106 Parcelle 14 - averses 6 et 9 - histogrammes d'infiltration	122
3.107 Parcelle 14 - averses 6 et 9 - intensité limite de ruissellement	123
3.108 Relation entre coefficient d'infiltration et conductivité hydraulique	125
3.109 Densité apparente - parcelle 14	130
3.110 Humidité volumique - parcelle 14	130
3.111 Stock hydrique (0-20 cm) - parcelles 1 à 6	131/132
3.112 Stock hydrique (0-20 cm) - parcelles 7 à 12	131/132
3.113 Stock hydrique (0-20 cm) - parcelles 13 à 17	131/132
3.114 Stock hydrique (0-50 cm) - parcelles 7 à 12	133
3.115 AFC simulation de pluie - axes 1 et 2	139
3.116 AFC simulation de pluie - axes 1 et 3	139
3.117 AFC simulation de pluie - axes 1 et 4	139
3.201 Humidité volumique - tube n°8	144
3.202 Evolution annuelle du profil hydrique - tube n°8	146
3.203 Humidité volumique - tube n°4	148
3.204 Evolution annuelle du profil hydrique - tube n°4	149
3.205 Tube n°4 - variation du stock entre 0 et 200 cm	151
3.206 Tube n°8 - variation du stock entre 0 et 360 cm	151
3.301 Traçage des écoulement : points d'injection et de contrôle	154
3.302 Crue du 18 septembre 1987	157
3.303 Crue du 25 septembre 1987	158
3.304 Crue du 27 septembre 1987	159
4.101 Bilans hydrologiques à Booro-Borotou, Sakassou et Korhogo	165
4.102 Bilan annuel : écoulement ruissellement à Booro-Borotou	167
4.103 Bilan annuel : écoulement ruissellement à Korhogo	167
4.104 Evolution saisonnière conjointe pluviométrie / ETP	168
4.105 Différence P-ETP	168
4.106 Comparaison mensuelle pluie / écoulement	170
4.107 Comparaison pluie / écoulement mensuel	172
4.108 Relation pluie - ruissellement	173
4.201 Schéma d'une crue type	175
4.202 Booro-Borotou Principal - crues 1 à 6	180
4.203 Booro-Borotou Principal - crues 7 à 12	181
4.204 Booro-Borotou Principal - crues 13 à 18	182

4.205 Booro-Borotou Principal - crues 19 à 24	183
4.206 Booro-Borotou Principal - crues 25 à 30	184
4.207 Booro-Borotou Principal - les trois types de crues	185
4.208 AFC descripteurs des crues	190
4.209 Station amont et station principale - temps de montée	193
4.210 Station amont et station principale - temps de base	193
4.211 Station amont et station principale - débit maximal	194
4.212 Station amont et station principale - lame ruisselée	194
4.213 Station amont - crues 1 à 5	196
4.214 Station amont - crues 7 à 16	197
4.215 Station amont - crues 17 à 26	198
4.216 Station amont - les trois types de crues	200
4.217 Hydrogrammes médians - crue de type 1	201
4.218 Hydrogrammes médians - crue de type 2	201
4.219 Relation pluie moyenne - lame ruisselée	203
4.301 Oscillations journalières des débits au début de la saison sèche	206
4.302 Oscillations journalières des débits juste avant l'arrêt de l'écoulement	206
4.303 Tarpissement : année 1984-85	208
4.304 Tarpissement : année 1984-85	211
4.305 Tarpissement : année 1985-86	212
4.306 Tarpissement : année 1986-87	213
4.307 Tarpissement : année 1987-88	214
4.308 Tarpissements observés	215
4.401 Coupe de séquences types des bassins de Sakassou	219
4.402 Représentation schématique des chemins de l'eau sur un versant type de Booro-Borotou	221
4.403 Niveaux extrêmes de la nappe sur un versant type de Booro Borotou	221
5.101 Stratégie d'utilisation d'un modèle déterministe	230
5.102 Schéma de fonctionnement du modèle Crec 5	232
5.103 Schéma de fonctionnement du modèle Modglo	234
5.104 Schéma de fonctionnement du modèle Modibi	236
5.105 Modèle Crec 5 - débits moyens journaliers	239
5.106 Modèle Modglo - débits moyens journaliers	241
5.107 Modèle Modibi - débits moyens journaliers	243
5.108 Régression lame observée / lame calculée	244
5.109 Lames écoulées mensuelles	247
5.110 Validation : débits moyens journaliers	248
5.201 Représentation schématique de la fonction de production de Modcou	252
5.202 Maillage de la couche de surface et directions de l'écoulement	254
5.203 Couche de surface : mailles rivières	256
5.204 Couche de surface : zones météorologiques	256
5.205 Maillage de la couche souterraine	257
5.206 Couche souterraine : points de contrôle	258
5.207 Couche souterraine : zones de nappe	258
5.208 Modèle couplé : juin 1984 - novembre 1984	260
5.209 Modèle couplé : juin 1985 - novembre 1985	260
5.210 Modèle couplé : juin 1986 - novembre 1986	261
5.211 Modèle couplé : juin 1987 - novembre 1987	261
5.212 Modèle couplé : débits moyens mensuels	262
5.301 Le bassin versant de Booro-Borotou vu du nord-est	268
5.302 Le bassin versant de Booro-Borotou vu du nord-ouest	268

Tableaux

2.101	Caractéristiques des trois bassins étudiés	37
2.301	Principales caractéristiques du sol dans le système ferrugineux	48
2.401	Biomasse verte dressée (tonne/ha) sur parcelles représentatives	63
2.402	Nombre de contacts avec parties vivantes (points quadrats) pour 100 aiguilles	63
2.501	Températures maximales mensuelles, annuelles et interannuelles (en °C)	66
2.502	Températures minimales mensuelles, annuelles et interannuelles (en °C)	66
2.503	Moyennes mensuelles, annuelles et interannuelles des températures maximales journalières (en °C)	66
2.504	Moyennes mensuelles, annuelles et interannuelles des températures minimales journalières (en °C)	67
2.505	Moyennes mensuelles, annuelles et interannuelles des températures moyennes journalières (en °C)	67
2.506	Moyennes mensuelles, annuelles et interannuelles de l'hygrométrie moyenne journalière (en %)	69
2.507	Vitesses du vent (en m/s) : moyennes mensuelles, annuelles et interannuelles	69
2.508	Répartition mensuelle de la direction d'origine du vent suivant 8 directions (en %) : moyenne interannuelle	71
2.509	Moyennes mensuelles, annuelles et interannuelles de la durée journalière d'insolation en heures	71
2.510	Moyennes mensuelles et annuelles de la durée journalière maximale d'insolation. Moyennes mensuelles et annuelles du rayonnement solaire à l'entrée de l'atmosphère.	73
2.511	Moyennes mensuelles, annuelles et interannuelles du rayonnement global	73
2.601	Pluviométrie annuelle et mensuelle à Touba pour différentes récurrences	76
2.602	Pluviométrie journalière à Touba pour différentes récurrences	76
2.603	Relations intensité-durée-réccurrence pour le poste d'Odienné	77
2.604	Cumuls pluviométriques mensuels (représentation en années hydrologiques)	78
2.605	Seuils de troncatures adoptés pour différentes durées d'averse	81
2.606	Pourcentage d'occurrence d'une ou de plusieurs averses en 24 heures	81
2.607	Statistique univariée sur les averses individualisées à Booro-Borotou	85
2.701	Valeurs moyennes de l'albédo pour différentes surfaces naturelles	87
2.702	Valeurs mensuelles de l'albédo à Booro-Borotou	88
2.703	Evapotranspiration potentielle calculée par la formule de Penman	88
2.704	Evaporation moyenne sur bac Colorado ORSTOM	90
2.901	Lames mensuelles écoulées et cumul des écoulements rapides de crue à Booro-Borotou Principal	97
2.902	Lames mensuelles écoulées et cumul des écoulements rapides de crue à Booro-Borotou Amont	98
2.903	Lames mensuelles écoulées et cumul des écoulements rapides de crue de la Séné à Touresso	98
2.904	Part de l'écoulement rapide de crue dans l'écoulement annuel (%)	100
3.101	Localisation des parcelles de simulation de pluies	106
3.102	Hyétogrammes type d'averse simulée	110
3.103	Succession type des averses au cours des trois campagnes	111
3.104	Calendrier des différentes campagnes	112
3.105	Evaluation des valeurs des paramètres de la formule 3.1.2	115
3.106	Comparaison lame ruisselée observée / lame ruisselée calculée	116/117
3.107	Calcul des paramètres du modèle de Green et Ampt	124
3.108	Paramètres d'évaluation de l'aptitude à l'infiltration	126
3.109	Stock hydrique	128

3.110 Comparaison codée saison sèche / saison des pluies	136
3.111 Histogramme des facteurs d'inertie de l'ACP	138
3.112 Classe d'aptitude à l'infiltration le long du versant	141
3.201 Tube neutronique n°8 : humidité volumique	145
3.202 Piézomètre PZ 19 : profondeur du niveau piézométrique en cm	147
3.203 Tube neutronique n°4 : humidité volumique	150
3.301 Caractéristiques des averses et des crues tracées	155
4.101 Bilan hydrologique annuel sur le bassin versant de Booro-Borotou	163
4.102 Bilan hydrologique annuel sur les bassins versants de Korhogo et de Sakassou	164
4.103 Récapitulatif des valeurs mensuelles des termes du bilan hydrologique à Booro-Borotou	169
4.201 Echantillon classé des crues simples utilisées pour l'analyse	178
4.202 Caractéristiques des hydrogrammes médians des trois types de crues	179
4.203 Exemple de tableau de contingence	186
4.204 Intervalle de définition des classes de contingence	187
4.205 Tableau de contingence interprété	187/188
4.206 Contributions relatives des variables aux facteurs principaux (en %)	191
4.207 Types de crues aux stations principales et amont	199
4.208 Caractéristiques des crues d'étude de différentes périodes de retour	204
4.301 Inventaire des périodes sans précipitation entre 5 et 20 jours consécutifs	209
5.101 Modèle Crec 5 : comparaison des lames mensuelles observées et calculées	238
5.102 Modèle Modglo : comparaison des lames mensuelles observées et calculées	240
5.103 Modèle Modglo : comparaison entre lames ruisselées observées et calculées	240
5.104 Modèle Modibi : comparaison des lames mensuelles observées et calculées	245
5.105 Année 1987 : comparaison des lames mensuelles observées et calculées	245
5.201 Principales valeurs des paramètres adoptées dans l'application du Modèle Couplé à Booro-Borotou	259

ANNEXES

PLUVIOMETRIE MOYENNE JOURNALIERE

Année 1984-85

Bassin versant de Booro-Borotou Principal (1,36 km²) - Moyennes de Thiessen

	Avr	Mai	Jun	Jul	Août	Sep	Oct	Nov	Déc	Jan	Fév	Mar
1		25,7	0,0	11,3	13,7	0,6	35,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
2		0,0	0,0	0,0	6,0	0,0	7,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
3		0,0	10,7	0,0	21,4	29,3	1,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
4		0,0	0,0	0,0	1,9	1,9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
5		7,9	1,1	0,0	9,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	3,2
6		0,0	4,2	4,7	13,5	5,7	11,9	0,0	0,0	0,0	0,0	3,7
7		30,4	2,5	1,0	0,0	17,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
8		0,0	0,0	31,8	0,0	0,2	0,0	10,1	0,0	0,0	0,0	0,0
9		0,0	7,5	0,0	9,5	0,0	3,7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
10		0,0	0,0	5,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,2
11		0,0	0,8	0,0	3,9	0,3	6,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
12		0,0	39,6	14,0	0,0	6,5	0,3	4,1	0,0	1,7	0,0	0,0
13		0,0	0,6	0,0	3,1	57,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
14		2,6	0,0	19,1	0,0	0,2	0,6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
15		0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	2,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
16		23,7	56,5	23,1	18,3	0,0	40,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
17	0,0	0,0	0,0	0,2	0,0	4,6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	3,7
18	7,7	0,0	0,0	0,0	25,1	0,0	11,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
19	0,0	1,3	18,4	0,0	4,3	12,3	5,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
20	0,0	11,4	16,9	1,7	11,9	9,4	16,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
21	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	4,6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
22	0,0	2,3	0,0	1,4	0,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
23	0,0	0,0	0,0	0,0	8,7	1,1	6,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
24	0,3	0,0	25,4	3,5	1,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
25	0,0	0,3	11,1	0,7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
26	0,0	1,1	0,0	0,0	16,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
27	0,2	6,3	22,8	12,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	11,0	4,7
28	0,0	0,0	0,0	0,0	5,0	0,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
29	88,2	0,0	0,0	27,9	0,0	0,4	0,0	0,0	0,0	0,0		0,0
30	0,0	0,0	0,0	0,0	7,7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0		0,0
31		0,0		7,8	44,1		0,0		0,0	0,0		1,0
total	96,4	113,0	218,1	165,8	225,5	151,7	147,5	14,2	0,0	1,7	11,0	16,5

total annuel : 1161,4 mm

Année 1985-1986

Bassin versant de Booro-Borotou Principal (1,36 km²) - Moyennes de Thiessen

	Avr	Mai	Jun	Jul	Août	Sep	Oct	Nov	Déc	Jan	Fév	Mar
1	0,0	0,0	17,5	10,7	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0	0,3	0,0
2	0,0	0,0	0,0	0,2	55,4	8,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	7,5
3	0,0	0,0	0,0	16,8	7,5	40,9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
4	0,0	15,9	0,0	22,4	0,0	34,7	17,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
5	10,9	0,8	0,0	4,9	48,5	0,0	11,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
6	0,0	0,0	29,3	0,0	19,5	18,6	1,4	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0
7	0,0	0,0	0,0	43,9	18,2	2,1	1,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
8	2,8	3,9	3,5	0,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
9	0,0	0,0	0,0	20,9	0,2	3,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	32,7
10	0,0	0,0	5,1	16,7	0,1	5,6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
11	0,0	7,4	0,0	36,0	3,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
12	4,9	0,0	0,6	0,0	35,3	24,8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
13	6,8	0,0	0,0	4,9	8,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
14	1,6	0,4	0,0	19,4	18,0	1,6	23,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
15	0,0	0,0	25,1	0,0	3,9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
16	1,5	5,1	0,0	0,0	7,6	0,6	6,7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
17	0,0	0,0	0,0	0,0	8,5	0,0	0,0	1,7	0,0	0,0	0,0	15,3
18	0,0	2,1	0,5	3,2	82,7	71,3	0,0	0,4	0,0	0,0	13,8	0,0
19	0,0	0,0	19,6	4,2	14,1	12,5	0,0	0,0	0,0	0,0	3,9	18,9
20	0,9	0,3	0,0	29,5	7,2	16,6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
21	0,0	0,0	8,7	0,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
22	0,0	1,2	0,0	13,7	0,0	1,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
23	0,0	0,0	0,0	0,0	0,8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
24	41,1	0,0	0,0	0,0	2,3	0,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
25	0,0	0,0	10,0	0,0	0,7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
26	0,0	30,5	1,4	54,4	10,7	5,0	0,0	0,0	0,0	0,0	6,7	0,0
27	3,0	0,0	8,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
28	0,0	0,0	2,4	0,8	0,0	6,8	15,7	0,0	0,0	0,0	21,6	0,0
29	0,0	0,0	0,0	4,7	0,0	11,8	2,2	0,0	0,0	0,0		0,0
30	28,2	0,0	0,0	0,1	45,6	0,0	28,3	0,0	0,0	0,0		0,0
31		0,0		23,7	0,0		0,4		0,0	0,0		0,0
total	101,7	67,6	131,7	331,8	398,5	265,5	107,7	2,2	0,0	0,0	46,4	74,4

total annuel : 1527,5 mm

Année 1986-1987

Bassin versant de Booro-Borotou Principal (1,36 km²) - Moyennes de Thiessen

	Avr	Mai	Jun	Jul	Août	Sep	Oct	Nov	Déc	Jan	Fév	Mar
										0,0	0,0	0,0
1	9,9	0,0	0,0	0,0	16,3	0,0	0,0	2,0	0,0	0,0	0,0	0,0
2	0,0	0,0	6,0	5,2	0,1	0,6	1,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
3	0,0	17,4	0,0	18,5	0,1	0,9	0,0	8,9	0,0	0,0	0,0	0,0
4	0,0	9,9	21,1	0,1	1,5	20,5	0,0	0,2	0,0	0,0	0,0	0,0
5	0,0	0,0	0,0	0,0	4,9	9,9	6,5	6,9	0,0	0,0	0,0	0,0
6	0,0	8,2	0,0	9,4	0,0	0,8	8,3	1,1	0,0	0,0	0,0	0,0
7	0,0	0,0	3,5	0,0	7,2	32,3	1,4	5,7	0,0	0,0	0,0	0,0
8	0,0	0,0	0,0	1,0	5,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
9	0,0	8,1	1,8	0,0	0,6	1,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
10	0,0	0,0	0,0	0,0	4,7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
11	0,0	10,9	4,1	7,7	0,0	23,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	12,0
12	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	3,8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	3,4
13	0,0	0,0	29,0	0,3	0,0	40,0	0,2	0,0	0,0	0,0	0,0	1,4
14	0,0	7,3	0,0	0,3	0,9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
15	0,0	10,3	0,0	17,0	1,2	4,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
16	0,0	4,9	0,0	0,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,1	0,0	0,0
17	0,0	0,0	2,8	0,3	0,0	2,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
18	0,0	0,0	0,0	4,0	2,1	2,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1
19	2,2	12,2	0,0	0,0	4,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	27,0	0,0
20	0,0	0,0	0,0	8,7	19,3	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	36,0
21	23,3	9,0	0,0	12,1	0,0	8,4	5,2	0,0	0,0	0,0	0,0	5,7
22	0,0	0,0	0,0	0,3	1,3	1,4	15,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
23	0,0	4,5	0,0	6,7	0,5	0,0	6,6	0,0	0,0	0,0	8,4	0,0
24	0,0	0,0	0,0	39,8	42,8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
25	10,3	7,4	43,9	0,0	0,0	5,8	16,7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
26	0,0	0,0	0,6	0,0	0,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
27	20,3	0,0	0,0	3,7	0,0	0,0	14,6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
28	0,0	0,0	0,0	7,0	2,0	19,6	5,8	0,0	0,0	0,0		0,0
29	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0		0,0
30	0,0	16,0	0,0	0,0	13,7	29,4	1,0	0,0	0,0	0,0		0,0
31		1,9		14,8	0,0		69,6		0,0			
total	66,0	128,0	112,8	157,1	129,1	207,3	152,3	24,8	0,0	1,1	35,4	58,7

total annuel : 1072,6 mm

Année 1987-1988

Bassin versant de Booro-Borotou Principal (1,36 km²) - Moyennes de Thiessen

	Avr	Mai	Jun	Jul	Août	Sep	Oct	Nov	Déc	Jan	Fév	Mar
1	15,5	9,7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
2	0,8	0,0	0,0	0,0	5,8	20,4	4,4	0,0	0,0	0,0	0,0	1,8
3	0,0	4,3	0,5	2,7	7,3	14,4	12,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
4	0,0	1,5	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	4,8	0,0	0,0	0,0
5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	7,3	0,0	0,0	4,5
6	0,0	16,0	17,4	0,0	7,3	2,9	0,0	0,0	3,7	0,0	0,0	0,0
7	0,0	0,0	0,2	28,3	8,7	8,1	3,2	0,0	0,0	0,0	0,0	5,3
8	0,0	0,0	3,7	0,0	0,0	0,0	18,9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,6
9	0,0	0,0	0,0	0,0	27,5	2,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
10	0,0	1,5	11,0	0,0	0,0	20,4	0,0	7,2	0,0	0,0	0,0	0,0
11	0,0	3,9	0,0	14,1	10,3	7,1	22,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
12	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	2,8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
13	0,0	33,7	0,0	0,0	1,8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
14	4,3	0,0	12,6	3,0	52,5	1,8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
15	0,0	14,8	2,6	19,6	0,0	1,5	1,9	8,4	0,0	0,0	0,0	3,0
16	0,0	0,0	0,0	0,1	0,6	27,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
17	0,0	0,0	2,6	0,0	29,7	0,0	4,8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
18	0,0	0,0	0,0	0,4	0,0	31,9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
19	0,0	0,0	70,9	0,0	0,0	0,0	3,6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
20	0,0	0,0	0,0	0,0	9,9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	4,8
21	0,0	0,0	9,8	17,3	55,0	0,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
22	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	4,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	15,0
23	0,0	42,8	0,0	0,0	10,0	6,7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
24	0,0	3,5	0,1	37,8	5,4	17,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
25	0,0	0,0	7,3	0,0	10,6	13,9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
26	0,0	11,6	1,4	0,0	56,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
27	2,4	14,1	26,1	0,0	0,3	42,4	0,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
28	0,0	0,0	0,0	11,9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
29	0,0	15,1	0,0	0,0	2,5	19,9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,2	0,0
30	0,0	0,0	0,0	0,0	31,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0		0,0
31		0,0		0,0	1,8		0,0		0,0	0,0		0,1
total	23,0	172,3	166,4	135,1	334,5	242,4	74,8	15,6	15,8	0,0	0,2	35,1

total annuel : 1215,2 mm

DEBITS MOYENS JOURNALIERS

Année 1984-85

Bassin versant de Booro-Borotou Principal (1,36 km²) - débit en l/s

	Avr	Mai	Jun	Jul	Aoû	Sep	Oct	Nov	Déc	Jan	Fév	Mar
1	0,000	0,528	0,058	2,23	3,28	30,1	3,58	2,02	0,739	0,256	0,061	0,000
2	0,000	1,48	0,043	1,70	6,17	9,05	24,1	1,93	0,656	0,282	0,050	0,000
3	0,000	0,892	0,017	1,15	4,88	16,4	9,91	1,91	0,720	0,297	0,000	0,000
4	0,000	0,426	0,458	0,916	14,3	21,0	6,32	2,03	0,642	0,338	0,000	0,000
5	0,000	0,232	0,095	0,762	4,40	8,79	4,62	2,18	0,510	0,376	0,000	0,000
6	0,000	0,143	0,099	0,749	5,19	6,06	8,83	1,75	0,515	0,305	0,000	0,000
7	0,000	0,040	0,178	0,78	9,29	9,18	5,67	1,55	0,515	0,365	0,000	0,000
8	0,000	1,42	0,165	6,08	4,08	14,5	4,04	2,14	0,561	0,308	0,000	0,000
9	0,000	0,719	0,121	4,27	2,57	8,16	3,75	2,53	0,696	0,287	0,000	0,000
10	0,000	0,212	0,167	1,78	3,02	5,82	3,89	1,94	0,669	0,355	0,000	0,000
11	0,000	0,069	0,055	1,38	2,12	4,87	3,14	1,81	0,569	0,359	0,000	0,000
12	0,000	0,115	5,83	2,16	2,26	4,93	4,21	1,87	0,510	0,345	0,000	0,000
13	0,000	0,125	1,16	2,57	2,42	5,38	3,46	1,96	0,666	0,332	0,000	0,000
14	0,000	0,151	0,703	5,56	2,35	53,2	2,76	1,76	0,613	0,274	0,000	0,000
15	0,000	0,234	0,416	5,25	1,85	15,4	2,53	1,72	0,524	0,189	0,000	0,000
16	0,000	0,307	27,8	5,22	4,56	11,6	2,46	1,49	0,562	0,212	0,000	0,000
17	0,000	0,649	16,6	8,74	4,76	11,6	25,5	1,39	0,473	0,190	0,000	0,000
18	0,000	0,400	2,14	3,18	6,26	10,3	6,70	1,22	0,455	0,177	0,000	0,000
19	0,000	0,170	2,08	2,00	11,1	8,28	9,52	1,03	0,378	0,133	0,000	0,000
20	0,000	0,244	2,36	1,59	7,86	19,1	6,26	0,963	0,358	0,284	0,000	0,000
21	0,000	0,397	6,20	1,35	7,44	13,1	10,6	1,00	0,366	0,268	0,000	0,000
22	0,000	0,263	1,79	1,07	3,53	10,0	5,44	0,954	0,303	0,172	0,000	0,000
23	0,000	0,253	0,921	1,01	2,89	7,87	4,37	0,834	0,325	0,141	0,000	0,000
24	0,000	0,153	-	1,01	3,67	6,76	5,40	0,838	0,548	0,152	0,000	0,000
25	0,000	0,082	-	1,27	2,9	5,52	3,92	0,759	0,446	0,137	0,000	0,000
26	0,000	-	4,07	1,16	3,96	4,64	3,52	0,834	0,507	0,095	0,000	0,000
27	0,000	-	5,25	1,99	8,53	4,22	3,13	0,746	0,398	0,132	0,000	0,000
28	0,000	0,311	8,78	1,63	3,59	3,95	2,91	0,800	0,412	0,082	0,000	0,000
29	0,311	0,102	2,25	1,19	3,12	3,68	2,79	0,740	0,280	0,103		0,000
30	1,82	0,152	1,37	8,89	4,14	3,50	2,46	0,719	0,319	0,056		0,000
31		0,091		3,03	3,12		2,18		0,264	0,040		0,000
Moy	0,071	0,357	3,26	2,63	4,83	11,2	6,06	1,45	0,500	0,227	0,004	0,000

Moyenne annuelle 2,55 l/s

Année 1985-86

Bassin versant de Booro-Borotou Principal (1,36 km²) - débit en l/s

	Avr	Mai	Jun	Jul	Août	Sep	Oct	Nov	Déc	Jan	Fév	Mar
1	0,000	0,000	0,000	0,496	15,3	22,7	18,9	11,0	2,27	1,01	0,351	0,687
2	0,000	0,000	0,000	0,337	7,29	24,4	16,8	10,2	2,12	0,987	0,593	0,512
3	0,000	0,000	0,000	-	63,4	35,5	15,5	7,81	2,07	0,960	0,399	0,763
4	0,000	0,000	0,000	-	19,9	97,9	16,1	6,00	1,88	0,881	0,395	0,578
5	0,000	0,000	0,000	1,33	19,4	54,9	37,1	5,57	1,87	0,932	0,322	0,603
6	0,000	0,000	0,000	-	65,6	38,9	29,0	5,56	2,00	0,935	0,377	0,518
7	0,000	0,000	0,000	-	58,4	56,3	18,0	5,17	1,77	0,855	0,510	0,397
8	0,000	0,000	0,000	8,46	33,6	34,9	15,5	5,02	1,63	0,947	0,447	0,299
9	0,000	0,000	0,026	6,65	21,1	27,7	14,1	4,90	1,57	0,913	0,399	0,315
10	0,000	0,000	0,000	4,61	16,4	27,6	12,3	4,29	1,55	0,752	0,450	2,70
11	0,000	0,000	0,000	6,75	13,9	29,0	11,6	4,03	1,55	0,715	0,321	0,933
12	0,000	0,000	0,000	30,1	13,8	38,5	10,7	4,06	1,30	0,719	0,458	0,492
13	0,000	0,000	0,000	2,85	45,6	33,2	11,2	4,13	1,26	0,727	0,351	0,530
14	0,000	0,000	0,000	5,31	48,7	24,0	20,7	3,81	1,33	0,649	0,275	0,515
15	0,000	0,000	0,000	7,33	32,1	21,4	19,5	3,75	1,43	0,684	0,272	0,491
16	0,000	0,000	0,543	2,23	28,6	18,7	15,0	3,36	1,97	0,719	0,224	0,501
17	0,000	0,000	0,181	1,67	29,1	16,8	14,7	3,32	1,29	0,680	0,273	0,727
18	0,000	0,000	0,014	1,25	242	18,4	12,0	3,74	1,37	0,576	0,263	1,08
19	0,000	0,000	0,557	1,14	83,5	132	9,34	3,65	1,46	0,513	1,14	1,06
20	0,000	0,000	0,308	2,80	78,0	54,0	9,07	3,12	1,15	0,486	0,653	1,23
21	0,000	0,000	0,087	13,1	46,0	55,2	8,45	3,14	1,06	0,544	0,380	0,725
22	0,000	0,000	0,508	3,63	35,2	36,1	7,93	2,83	1,15	0,605	0,361	0,613
23	0,000	0,000	0,101	4,61	28,8	30,6	7,20	2,93	1,24	0,526	0,302	0,538
24	0,000	0,000	0,010	2,42	25,2	26,3	6,79	2,65	1,53	0,492	0,318	0,379
25	0,000	0,000	0,000	1,69	23,2	23,7	6,18	2,70	1,13	0,453	0,353	0,373
26	0,000	0,000	0,000	1,32	28,0	23,4	5,76	2,61	1,11	0,461	0,509	0,308
27	0,000	0,000	0,000	51,2	23,2	22,9	5,40	2,55	1,14	0,543	0,414	0,296
28	0,000	0,000	0,000	10,8	19,8	22,7	3,25	2,42	1,16	0,546	1,16	0,343
29	0,000	0,000	0,000	5,21	16,7	27,4	8,08	2,31	1,17	0,470		0,288
30	0,000	0,000	0,000	4,14	51,1	31,1	8,10	2,08	1,20	0,401		0,281
31		0,000		3,47	33,1		30,4		1,17	0,491		0,263
Moy	0,000	0,000	0,078	6,85	40,8	36,9	13,7	4,29	1,48	0,683	0,438	0,624

Moyenne annuelle : 8,82 l/s

Année 1986-87

Bassin versant de Booro-Borotou Principal (1,36 km²) - débit en l/s

	Avr	Mai	Jun	Jul	Août	Sep	Oct	Nov	Déc	Jan	Fév	Mar
1	0,252	0,292	0,598	0,331	4,32	0,949	12,4	13,2	0,709	0,308	0,000	0,000
2	0,675	0,334	0,466	0,319	2,77	0,768	3,68	5,10	0,712	0,299	0,000	0,000
3	0,358	0,267	0,344	0,415	1,42	0,811	2,21	4,08	0,719	0,294	0,000	0,000
4	0,288	0,884	1,71	1,68	1,12	1,23	2,04	4,39	0,733	0,388	0,000	0,000
5	0,257	0,905	0,664	0,662	0,979	2,22	2,06	4,82	0,667	0,383	0,000	0,000
6	0,237	0,435	0,436	0,394	1,03	2,25	2,86	4,02	0,598	0,246	0,000	0,000
7	0,211	0,512	0,571	0,915	0,941	8,76	3,21	3,36	0,558	0,254	0,000	0,000
8	0,163	0,353	0,510	0,561	1,06	6,47	2,60	3,64	0,529	0,302	0,000	0,000
9	0,099	0,298	0,425	0,469	1,09	2,24	1,96	3,56	0,500	0,300	0,000	0,000
10	0,115	0,617	0,421	0,370	0,844	2,01	1,45	2,44	0,697	0,262	0,000	0,000
11	0,126	0,328	0,348	0,568	0,912	1,56	1,47	2,27	0,796	0,249	0,000	0,000
12	0,070	1,06	0,407	0,785	0,825	10,4	1,47	2,02	0,548	0,264	0,000	0,000
13	0,002	0,993	0,347	0,528	0,681	27,5	1,20	1,75	0,492	0,275	0,000	0,000
14	0,000	1,15	1,70	0,453	0,523	14,1	0,895	1,64	0,442	0,283	0,000	0,000
15	0,000	0,615	0,910	0,467	0,566	5,42	1,09	1,57	0,554	0,333	0,000	0,000
16	0,000	0,503	0,565	1,07	0,533	4,69	0,986	1,35	0,464	0,251	0,000	0,000
17	0,000	0,576	0,493	0,666	0,560	2,94	0,956	1,28	0,479	0,287	0,000	0,000
18	0,000	0,582	0,492	0,579	0,651	2,42	0,899	1,23	0,433	0,432	0,000	0,000
19	0,000	0,961	0,454	0,487	0,565	2,53	0,800	1,18	0,407	0,330	0,000	0,000
20	0,000	0,759	0,434	0,408	3,13	1,90	0,740	1,14	0,414	0,287	0,000	0,000
21	0,649	0,377	0,325	1,41	1,47	1,80	0,762	1,13	0,394	0,320	0,000	0,000
22	0,660	0,755	0,236	1,01	0,822	2,51	1,71	1,07	0,392	0,187	0,000	0,000
23	0,320	0,541	0,253	0,834	0,736	1,81	1,72	0,978	0,386	0,165	0,000	0,000
24	0,245	0,597	0,234	0,817	6,75	1,78	1,54	0,915	0,371	0,113	0,000	0,000
25	0,183	0,473	0,930	5,49	4,14	1,64	1,42	0,923	0,379	0,024	0,000	0,000
26	0,262	1,08	3,40	1,48	1,73	1,71	2,60	0,877	0,329	0,001	0,000	0,000
27	1,090	0,678	0,757	0,887	1,06	1,58	1,82	0,871	0,284	0,000	0,000	0,000
28	0,500	0,486	0,500	1,73	1,02	1,12	2,95	0,754	0,277	0,000	0,000	0,000
29	0,546	0,357	0,584	1,46	0,926	5,28	2,43	0,705	0,277	0,000		0,000
30	0,285	0,424	0,418	0,890	0,981	5,49	1,95	0,684	0,330	0,000		0,000
31		0,810		1,20	1,60		27,0		0,336	0,000		0,000
Moy	0,253	0,613	0,664	0,946	1,48	4,20	2,93	2,43	0,491	0,221	0,000	0,000

Moyenne annuelle : 1,19 l/s

Année 1987-88

Bassin versant de Booro-Borotou Principal (1,36 km²) - débit en l/s

	Avr	Mai	Jun	Jul	Août	Sep	Oct	Nov	Déc	Jan	Fév	Mar
1	0,000	0,000	0,000	0,362	0,321	16,7	17,9	2,66	0,930	0,150	0,000	0,000
2	0,000	0,000	0,000	0,348	0,430	12,2	16,2	2,66	0,898	0,293	0,000	0,000
3	0,000	0,000	0,000	0,194	0,889	35,9	15,1	2,53	0,874	0,158	0,000	0,000
4	0,000	0,000	0,000	0,191	1,27	18,8	23,7	2,16	0,900	0,287	0,000	0,000
5	0,000	0,000	0,000	0,156	0,525	13,2	14,3	1,73	0,951	0,190	0,000	0,000
6	0,000	0,000	0,000	0,119	0,611	11,0	11,9	1,77	1,19	0,178	0,000	0,000
7	0,000	0,000	0,212	0,185	0,525	11,8	10,4	1,78	1,25	0,078	0,000	0,000
8	0,000	0,000	0,069	2,03	0,647	11,5	12,4	1,70	1,17	0,093	0,000	0,000
9	0,000	0,000	0,056	0,353	0,376	8,53	24,4	1,57	1,18	0,101	0,000	0,000
10	0,000	0,000	0,433	0,183	3,04	14,6	11,3	1,51	1,00	0,202	0,000	0,000
11	0,000	0,000	0,255	0,595	1,13	18,4	9,81	2,16	0,922	0,302	0,000	0,000
12	0,000	0,000	0,000	0,596	1,49	12,0	25,4	1,95	0,826	0,101	0,000	0,000
13	0,000	0,000	0,000	0,245	0,834	8,02	15,5	1,77	0,791	0,058	0,000	0,000
14	0,000	0,000	0,000	0,214	0,631	6,73	12,5	1,58	0,781	0,223	0,000	0,000
15	0,000	0,000	0,000	1,13	19,9	6,22	9,82	2,20	0,760	0,118	0,000	0,000
16	0,000	0,000	0,000	0,863	5,02	12,6	7,84	2,02	0,770	0,150	0,000	0,000
17	0,000	0,000	0,000	0,434	4,19	18,6	7,11	1,70	0,717	0,135	0,000	0,000
18	0,000	0,000	0,000	0,357	11,3	27,2	8,00	1,53	0,678	0,063	0,000	0,000
19	0,000	0,000	0,000	0,314	3,10	24,7	7,55	1,45	0,545	0,067	0,000	0,000
20	0,000	0,000	13,6	0,206	1,86	12,0	7,60	1,50	0,544	0,028	0,000	0,000
21	0,000	0,000	1,69	0,594	64,7	10,7	6,29	1,31	0,586	0,051	0,000	0,000
22	0,000	0,000	0,865	0,616	20,5	9,53	5,64	1,23	0,557	0,086	0,000	0,000
23	0,000	0,000	0,508	0,308	7,27	12,8	5,23	1,11	0,513	0,044	0,000	0,000
24	0,000	0,000	0,388	0,225	8,35	10,4	5,03	1,08	0,444	0,018	0,000	0,000
25	0,000	0,000	0,330	3,48	10,8	31,2	4,41	1,06	0,497	0,063	0,000	0,000
26	0,000	0,000	0,536	1,10	66,3	15,7	3,80	1,06	0,488	0,021	0,000	0,000
27	0,000	0,000	2,20	0,636	33,6	55,2	3,49	0,979	0,358	0,008	0,000	0,000
28	0,000	0,000	0,994	0,800	15,6	42,6	3,35	0,954	0,193	0,043	0,000	0,000
29	0,000	0,000	0,559	0,789	11,7	41,1	3,13	0,970	0,385	0,060	0,000	0,000
30	0,000	0,000	0,580	0,468	9,46	24,1	2,98	0,916	0,265	0,026		0,000
31		0,000		0,382	35,4		2,75		0,239	0,000		0,000
Moy	0,000	0,000	0,776	0,596	11,0	18,5	10,2	1,62	0,716	0,110	0,000	0,000

Moyenne annuelle : 3,62 l/s

CARACTERISTIQUES DES CRUES

Bassin versant de Booro-Borotou Principal (1,36 km²)

N°crue	Date crue	Heure crue	Qdeb l/s	Qfin l/s	Qmxe l/s	Qmxr l/s	Tmont min	Tbase min	Vole m3
8401	12-Jun-84	14:55	0,14	6,10	74,00	72,00	101	317	4,54E+02
8402	16-Jun-84	21:13	0,19	71,20	682,00	660,00	62	201	2,56E+03
8403	27-Jun-84	20:35	1,14	23,40	55,60	42,60	120	225	3,68E+02
8404	14-Jul-84	08:10	1,44	7,31	11,10	5,93	538	847	3,87E+02
8405	16-Jul-84	18:33	1,75	13,50	20,20	11,30	317	518	4,71E+02
8406	03-Aug-84	22:27	3,13	1,80	39,40	26,90	185	369	5,52E+02
8407	07-Aug-84	02:20	3,75	9,79	21,50	16,40	127	552	4,78E+02
8408	18-Aug-84	21:09	2,92	20,80	65,50	56,70	97	296	5,77E+02
8409	20-Aug-84	19:30	3,23	16,30	37,70	29,70	100	274	3,43E+02
8410	27-Aug-84	03:30	1,87	8,21	17,40	13,60	167	546	3,98E+02
8411	01-Sep-84	03:07	2,75	21,80	61,90	53,40	251	836	2,15E+03
8412	03-Sep-84	19:00	4,40	32,40	107,00	98,60	77	544	1,69E+03
8413	07-Sep-84	19:29	6,75	13,50	20,80	12,10	134	459	4,47E+02
8414	14-Sep-84	00:18	4,40	49,30	183,00	170,00	99	492	3,15E+03
8415	20-Sep-84	04:14	8,21	17,40	28,10	16,10	171	410	4,92E+02
8416	20-Sep-84	12:54	14,30	23,40	32,40	13,10	224	408	6,24E+02
8417	02-Oct-84	01:04	3,13	21,80	131,00	125,00	67	445	1,37E+03
8418	06-Oct-84	07:52	4,26	12,40	19,90	12,40	148	371	3,32E+02
8419	17-Oct-84	00:11	2,06	22,70	111,00	103,00	134	479	1,47E+03
8501	08-Jul-85	06:06	0,39	14,60	57,80	52,50	92	265	4,54E+02
8502	09-Jul-85	14:33	1,09	6,10	32,00	30,30	116	905	6,60E+02
8503	11-Jul-85	22:28	2,40	41,90	265,00	251,00	103	343	1,88E+03
8504	14-Jul-85	18:53	1,94	12,10	22,40	16,50	169	431	4,29E+02
8505	20-Jul-85	22:23	3,23	16,60	39,40	32,70	112	427	6,73E+02
8506	27-Jul-85	07:36	1,81	102,00	466,00	420,00	96	218	2,39E+03
8507	01-Aug-85	06:15	3,13	14,30	39,40	32,30	254	712	9,93E+02
8508	03-Aug-85	02:17	6,75	64,50	466,00	437,00	151	394	3,42E+03
8509	05-Aug-85	22:51	12,10	111,00	570,00	524,00	70	205	2,91E+03
8510	07-Aug-85	01:50	26,10	78,50	160,00	115,00	70	198	1,19E+03
8511	07-Aug-85	17:07	41,90	53,80	78,50	30,50	216	421	1,69E+03
8512	13-Aug-85	04:31	13,80	62,30	119,00	93,40	102	420	2,12E+03
8513	14-Aug-85	06:07	23,40	43,60	54,20	23,70	93	264	7,01E+02
8514	14-Aug-85	10:57	43,60	68,80	118,00	64,50	86	218	1,10E+03
8515	17-Aug-85	12:10	22,40	36,50	55,10	27,80	91	264	6,66E+02
8516	18-Aug-85	17:58	20,50	376,00	4150,00	3980,00	62	148	1,68E+04
8517	19-Aug-85	23:40	56,50	103,00	201,00	130,00	48	156	1,29E+03
8518	26-Aug-85	14:09	19,90	43,60	61,90	29,30	93	173	5,42E+02
8519	30-Aug-85	17:27	13,50	71,20	315,00	290,00	69	349	3,31E+03
8520	02-Sep-85	16:24	17,40	29,20	56,00	35,70	94	377	8,36E+02
8521	03-Sep-85	18:19	20,50	54,20	119,00	85,50	212	550	2,49E+03
8522	04-Sep-85	10:10	37,30	92,60	160,00	79,70	316	406	2,45E+03

Bassin versant de Booro-Borotou Principal (1,36 km²)

N°crue	Volr m3	Le mm	Lr mm	Qspe l/s/km2	Typ	Pmoy mm	Coefr	N°aver.	Dur av min
8401	3,95E+02	0,33	0,29	15,27	C	39,6	0,7%	84027	65
8402	2,13E+03	1,88	1,56	129,87	S	56,4	2,8%	84029	200
8403	2,03E+02	0,27	0,15	11,06	C	22,8	0,7%	84038	138
8404	1,65E+02	0,28	0,12	2,39	C	16,3	0,7%	84050	165
8405	2,34E+02	0,35	0,17	5,54	C	23,1	0,7%	84053	231
8406	2,76E+02	0,41	0,20	9,17	S	21,2	1,0%	84071	190
8407	2,54E+02	0,35	0,19	5,64	S	12,2	1,5%	84077	39
8408	3,66E+02	0,42	0,27	15,15	S	25,0	1,1%	84083	106
8409	1,82E+02	0,25	0,13	8,14	C	11,9	1,1%	84086	21
8410	2,33E+02	0,29	0,17	5,23	S	15,3	1,1%	84094	108
8411	1,53E+03	1,58	1,13	22,43	S	41,8	2,7%	84099	489
8412	1,09E+03	1,25	0,80	24,55	C	29,3	2,7%	84100	228
8413	1,68E+02	0,33	0,12	4,49	S	10,1	1,2%	84106	37
8414	2,35E+03	2,31	1,73	58,53	S	57,0	3,0%	84112	254
8415	1,77E+02	0,36	0,13	5,29	S	9,2	1,4%	84115	100
8416	1,62E+02	0,46	0,12	4,87	C	9,4	1,3%	84123	90
8417	1,04E+03	1,01	0,76	28,64	S	34,8	2,2%	84121	279
8418	1,46E+02	0,24	0,11	4,82	C	11,8	0,9%	84127	86
8419	1,12E+03	1,08	0,82	28,65	S	39,7	2,1%	84132	153
8501	3,35E+02	0,33	0,25	15,49	S	43,9	0,6%	85071	387
8502	4,65E+02	0,48	0,34	6,30	C	20,9	1,6%	85073	28
8503	1,42E+03	1,38	1,04	50,73	S	33,7	3,1%	85075	148
8504	2,48E+02	0,32	0,18	7,05	S	19,4	0,9%	85080	72
8505	4,19E+02	0,49	0,31	12,03	S	29,2	1,1%	85089	100
8506	1,71E+03	1,75	1,25	96,13	S	54,4	2,3%	85096	222
8507	6,21E+02	0,73	0,46	10,69	S	23,7	1,9%	85099	176
8508	2,57E+03	2,51	1,89	79,94	S	54,8	3,4%	85100	431
8509	2,15E+03	2,14	1,58	128,53	S	43,4	3,6%	85102	289
8510	5,71E+02	0,88	0,42	35,34	S	17,2	2,4%	85106	49
8511	4,83E+02	1,24	0,35	14,06	S	15,6	2,3%	85110	319
8512	1,16E+03	1,56	0,85	33,85	S	32,1	2,6%	85113	331
8513	1,70E+02	0,52	0,13	7,89	S	8,2	1,5%	85115	118
8514	3,68E+02	0,81	0,27	20,69	S	18,0	1,5%	85116	282
8515	2,00E+02	0,49	0,15	9,28	S	7,9	1,9%	85122	21
8516	1,51E+04	12,40	11,10	1250,33	S	82,7	13,4%	85125	304
8517	5,40E+02	0,95	0,40	42,42	S	11,8	3,4%	85129	43
8518	2,12E+02	0,40	0,16	15,02	C	10,7	1,5%	85138	151
8519	2,43E+03	2,44	1,78	85,33	S	45,6	3,9%	85139	182
8520	3,08E+02	0,61	0,23	10,01	S	8,2	2,8%	85140	45
8521	1,26E+03	1,83	0,92	28,07	S	35,6	2,6%	85144	331
8522	8,70E+02	1,80	0,64	26,26	C	18,0	3,6%	85146	240

Bassin versant de Booro-Borotou Principal (1,36 km²)

N°crue	Pseau mm	Res0 mm	Res5 mm	Cum ann mm	IPA.01 mm	IPA.05 mm	IPA.1 mm	IPA.5 mm	IPA.8 mm
8401	34,1	2,8	2,8	212,1	208,1	45,2	16,4	1,9	0,8
8402	56,6	4,2	4,2	246,2	232,1	64,1	33,1	4,3	1,2
8403	24,2	2	2	373,1	326,8	126,7	75,6	11,4	4,9
8404	15,7	1,6	1,6	462,8	360,6	116,6	57,5	7,3	3,1
8405	22,4	2,2	2,2	478,5	367,8	118	58,3	7,5	3,2
8406	20,1	1,3	1,3	563,5	387,7	110,1	56,9	13,1	6,8
8407	8,8	1,1	1,1	588,7	400,8	116,9	61,6	10,4	4,6
8408	25,7	2,1	2,1	627,4	393,2	94	41,2	6	3
8409	12,3	1,9	1,9	670,1	428	124,7	69,8	19,4	10,5
8410	13,9	3,5	3,5	688,3	419	104,8	47,8	2,4	0,5
8411	42,9	1,7	1,7	716,1	426,2	105,8	49,4	6,4	3
8412	34,4	2,3	2,3	759	458,2	132,3	72,9	15,2	7
8413	7,9	0,6	0,6	798,8	479,8	143,3	78,8	11,5	5,3
8414	49,3	0,1	0,1	826,3	478,4	129,7	63,8	11,5	8,8
8415	11,1	6	6	875,6	497	132,6	62,1	3	0,5
8416	5,9	0,3	0,3	886,7	506,3	141,3	70,7	11,9	8,8
8417	34,1	11,4	11,4	892,6	457,1	83,3	24,5	0,1	0
8418	12,1	3,2	3,2	926,7	471,5	95,8	39,3	4,9	1,6
8419	38,8	4,8	4,8	945,6	441,5	69	22,1	0,7	0,2
8501	45,1	2,4	2,4	335,7	271,2	97,8	57,7	10,2	3,8
8502	26,2	1,2	1,2	380,8	312,6	134,8	91,5	30,9	19,2
8503	30,1	0,7	0,7	426,4	351	163,7	113,5	33,5	19,2
8504	17	2,8	2,8	456,5	370,8	168,9	109	16,1	5,5
8505	28,6	6	6	473,5	365,1	137,5	68,9	1,6	0,2
8506	53,3	4,5	4,5	512,3	379,5	129,6	58,7	2,4	0,5
8507	23,8	4,8	4,8	565,6	412,7	144	69,5	5,1	1,2
8508	68,6	1,7	1,7	589,4	429,3	154,5	79	12,6	6,6
8509	55,9	2,1	2,1	666,8	494,3	204,9	122,2	26,5	11,9
8510	15,2	1	1	722,7	544,9	248,5	161,7	50,8	31,2
8511	15,2	0,5	0,5	737,9	557,2	257,1	168,2	51,3	31
8512	33,3	5,3	5,3	753,1	542,8	208,7	107,7	4,6	0,7
8513	9,3	0,8	0,8	786,4	571,2	231,9	129,5	24,8	17,2
8514	18,6	0,1	0,1	795,7	579,8	239,8	137,2	32,2	24,1
8515	10,3	0,8	0,8	819,7	587	229,4	122,3	15,9	7,2
8516	81,4	1,2	1,2	830	590,1	225,6	117,4	14,3	6,6
8517	13,2	0,9	0,9	911,4	664,5	291,3	179,1	57	38,5
8518	5,4	6	6	931	641,3	225,1	104,2	3,1	0,3
8519	40,2	4,1	4,1	936,4	620,7	187,7	72,7	1,1	0,2
8520	5,7	2,8	2,8	976,6	642,4	197,9	85,1	10	4,2
8521	26,1	0,1	0,1	987,5	646,6	198,4	87	14,3	9,2
8522	24,7	0,4	0,4	1013,6	670,1	220,2	108,8	33,3	25,9

Bassin versant de Booro-Borotou Principal (1,36 km²)

N° crue	IM0 mm/h	IM1 mm/h	IM5 mm/h	IM10 mm/h	IM15 mm/h	IM20 mm/h	IM30 mm/h	IM60 mm/h	HM5 mm
8401	132	132	123,2	115,5	99	84,8	63	33	33
8402	247,4	247,4	189,7	167,1	145,2	122,4	95,7	50,2	50,6
8403	79,2	77,4	77,1	70	62,4	56,1	38,1	21	20,9
8404	25,2	25,2	25,2	24,6	23,9	17	11,5	6,1	12,9
8405	30,5	30,5	30,3	30,2	29,4	27,5	25,8	14,7	15,1
8406	19,1	19,1	19	19	18,3	17,2	15,1	11,7	16
8407	25,7	25,7	25,7	20,6	18,7	16,8	14	8,8	8,2
8408	58,4	58,4	57,8	53	35,5	31,4	27,8	14,6	24,1
8409	148,1	145,7	85,3	56,4	44,9	33,5	24,6	12,3	12,3
8410	32,1	32,1	32,1	28,3	26,3	23,8	19,4	12,7	12,3
8411	24,8	24,8	24,7	24,6	24,4	24,2	21	15,3	28,6
8412	95,4	95,4	95,4	70,2	63,6	58,9	43,8	23,3	28,6
8413	22,4	22,4	22,4	22,4	22,4	16,9	14,6	7,9	6,4
8414	63,6	63,6	63,6	44,5	42,4	38,9	35,1	29,6	45,6
8415	12,7	12,7	12,7	12,7	12,7	12,1	10	7,4	9,5
8416	11,1	11,1	11,1	10,3	9,2	8,6	7,5	4,2	3,5
8417	104,9	104,9	104,9	82,9	70,8	63,1	47,7	26,1	26,2
8418	59	59	59	50,6	36,4	31,5	19,2	10,2	10
8419	47,2	47,2	47,2	47,2	42,8	39,7	33,7	24,8	37,3
8501	87,3	87,3	87,3	82,9	69,8	63,2	55,1	32,5	32
8502	134,3	126,8	110,6	98,9	88,8	74,4	52,4	26,2	25,7
8503	41,6	41,6	41,6	40	38,8	37,5	35	26,7	29,1
8504	54,6	54,6	54,6	48,4	40,2	35,8	25,8	16,5	14,5
8505	72,7	72,7	69,8	61,1	54,3	47,4	34,1	18,8	26,1
8506	62,3	62,3	62,3	62,3	61,4	58,2	55	41,2	46,1
8507	32,3	32,3	32,1	32	26,6	23,9	19,1	13	22,3
8508	58,8	58,8	58,8	55,9	52,9	47,2	41,9	29,8	63,2
8509	55,1	54,3	54	45,7	41,8	39,7	36,3	34,3	49,5
8510	88,2	88,2	88,2	55,1	42	33,9	24,7	15,2	15,2
8511	8,8	8,8	8,8	8,8	8,8	8,8	8,8	5,1	4,4
8512	49	49	49	38,3	31,4	28,7	31,4	20,6	22
8513	24,5	24,5	24,5	17,6	14,2	12,5	11,7	6,6	6,4
8514	29,4	29,4	29,4	21,3	18,2	17	16,9	9,1	14,2
8515	49	49	49	49	36,1	27,9	20,6	10,3	9,8
8516	220,5	220,5	154,3	123,5	106,5	94,6	80,4	59,3	76
8517	55,1	55,1	54,7	44,1	35,9	30,4	22,1	13,2	12,7
8518	7,9	7,9	7,9	7,9	7,9	7,9	6,9	3,7	3,4
8519	76,7	76,7	76,4	62,1	57	54,4	47,2	27,7	36,3
8520	19,6	19,6	19,6	19,6	19,6	13,1	9,1	5,7	5,2
8521	28,5	28,5	28,5	18,8	15,2	14,6	13,3	9,5	15,2
8522	35,6	35,6	35,6	27,9	21,2	17,9	14,6	9,5	19,9

Bassin versant de Booro-Borotou Principal (1,36 km²)

N°crue	HM10 mm	HM15 mm	HM20 mm	HM25 mm	HM30 mm	HM40 mm	HM50 mm
8401	31,3	29,7	29,7	29,7	29,7	29,7	24,7
8402	50	50	47,8	47,8	47,8	47,8	39,6
8403	19,8	19,8	19,8	19,8	19,8	13,7	13,7
8404	11,7	8,7	6,7	3,4	0	0	0
8405	14	12,9	12,9	7,8	5	0	0
8406	13,9	6	0	0	0	0	0
8407	7,2	4,6	4,6	2,6	0	0	0
8408	23,5	23,5	23,5	17,1	17,1	9,6	4,8
8409	12,3	10,2	10,2	10,2	10,2	10,2	4,8
8410	10,2	7	7	3,2	3,2	0	0
8411	13,2	8,5	8,5	0	0	0	0
8412	22,8	21,2	21,2	21,2	21,2	21,2	7,9
8413	6,4	6,4	6,4	0	0	0	0
8414	37,1	30	24,9	21,2	15,9	12,7	5,3
8415	4,8	0	0	0	0	0	0
8416	1,5	0	0	0	0	0	0
8417	22,6	22,6	22,6	22,6	22,6	22,6	15,7
8418	10	10	10	10	7,9	7,9	7,9
8419	34,1	31	22	13,1	13,1	7,9	0
8501	31	28,1	28,1	28,1	28,1	25,2	13,1
8502	25,7	25,7	25,7	25,7	25,7	25,7	20,9
8503	28,1	23	20,4	20,4	17	4,8	0
8504	13,6	13	11,6	7,3	7,3	7,3	7,3
8505	24,2	21,8	21,8	21,8	21,8	9,7	9,7
8506	42,2	38,3	38,3	38,3	38,3	33,9	14,5
8507	8,2	8,2	5,3	5,3	5,3	0	0
8508	49,5	44,1	44,1	40,2	26,5	12,7	12,7
8509	45,6	43	40,7	40,7	26	12,7	5,4
8510	12,2	10,3	10,3	7,3	7,3	7,3	7,3
8511	0	0	0	0	0	0	0
8512	19,6	16	10,8	10,8	10,8	10,8	0
8513	4,4	2,4	2,4	0	0	0	0
8514	12,7	10,3	10,3	4,4	0	0	0
8515	9,8	9,8	9,8	9,8	9,8	9,8	0
8516	67,1	67,1	67,1	61,2	56,8	47,5	47,5
8517	10,3	10	6,4	6,4	6,4	6,4	6,4
8518	0	0	0	0	0	0	0
8519	29,9	26	23	23	23	23	6,4
8520	5,2	5	0	0	0	0	0
8521	9,5	5	3,8	3,8	0	0	0
8522	6,1	4,7	4,7	4,7	4,7	0	0

Bassin versant de Booro-Borotou Principal (1,36 km²)

N°cruce	Date crue	Heure crue	Qdeb l/s	Qfin l/s	Qmxe l/s	Qmxr l/s	Tmont min	Tbase min	Vole m3
8523	04-Sep-85	17:05	91,00	201,00	442,00	293,00	60	114	1,84E+03
8524	10-Sep-85	22:11	25,10	33,70	44,50	18,10	53	356	8,15E+02
8525	12-Sep-85	18:26	19,60	52,00	173,00	147,00	72	363	1,97E+03
8526	19-Sep-85	02:51	55,10	187,00	692,00	541,00	206	282	6,34E+03
8527	19-Sep-85	20:56	48,80	64,10	107,00	52,80	117	334	1,69E+03
8528	20-Sep-85	22:42	39,40	111,00	217,00	140,00	60	115	9,38E+02
8529	29-Sep-85	20:23	20,80	38,10	70,20	43,80	106	326	9,84E+02
8530	04-Oct-85	22:53	14,60	50,60	94,80	66,00	100	253	9,59E+02
8531	05-Oct-85	21:09	21,80	36,90	45,30	14,60	292	493	1,17E+03
8532	14-Oct-85	18:34	10,00	38,50	105,00	86,50	74	248	9,20E+02
8533	31-Oct-85	00:16	7,08	18,00	70,70	61,10	202	884	2,14E+03
8601	25-Jun-86	22:28	0,24	4,85	12,70	11,50	93	472	2,52E+02
8602	25-Jul-86	00:47	0,79	2,49	15,30	14,20	215	1089	4,33E+02
8603	01-Aug-86	12:05	2,06	3,23	8,89	6,63	182	1048	3,61E+02
8604	20-Aug-86	13:27	0,86	2,83	14,80	13,90	25	582	2,26E+02
8605	24-Aug-86	10:38	0,79	5,29	23,00	21,80	104	1110	6,85E+02
8606	07-Sep-86	16:04	1,34	10,90	33,70	29,20	210	632	8,00E+02
8607	12-Sep-86	06:16	1,56	6,59	18,40	15,00	543	1513	1,05E+03
8608	13-Sep-86	16:40	3,44	27,30	201,00	192,00	126	558	2,27E+03
8609	29-Sep-86	03:24	1,34	5,29	8,21	4,24	584	877	3,44E+02
8610	30-Sep-86	20:54	2,00	5,77	44,90	42,50	150	1281	1,20E+03
8611	31-Oct-86	16:16	1,44	7,76	187,00	185,00	145	1461	3,21E+03
8701	20-Jun-87	02:32	0,00	10,50	136,00	133,00	93	363	9,31E+02
8702	27-Jun-87	09:17	0,36	1,75	5,60	4,91	182	777	1,66E+02
8703	08-Jul-87	02:22	0,14	0,94	7,08	6,89	46	754	1,55E+02
8704	25-Jul-87	01:53	0,14	2,15	11,60	11,40	28	982	2,63E+02
8705	10-Aug-87	00:21	0,31	1,56	7,08	6,70	69	1264	2,49E+02
8706	15-Aug-87	04:56	0,45	9,11	65,50	64,00	128	1041	1,66E+03
8707	17-Aug-87	20:00	2,32	6,26	23,70	20,60	264	1273	1,04E+03
8708	21-Aug-87	18:18	2,06	30,80	1260,00	1250,00	95	566	6,03E+03
8709	25-Aug-87	14:58	7,08	10,50	19,30	11,50	193	915	7,83E+02
8710	26-Aug-87	14:49	8,89	76,80	515,00	497,00	66	516	5,02E+03
8711	31-Aug-87	05:46	7,98	27,70	115,00	103,00	188	859	2,56E+03
8712	02-Sep-87	23:11	10,70	17,10	63,70	52,20	117	963	1,87E+03
8713	03-Sep-87	15:20	19,00	22,70	66,90	47,30	115	766	1,65E+03
8714	10-Sep-87	15:43	9,57	20,80	46,60	34,50	101	443	7,29E+02
8715	11-Sep-87	13:51	15,60	16,60	32,90	17,10	119	496	6,78E+02
8716	16-Sep-87	13:33	9,57	16,60	35,70	24,20	111	408	6,14E+02
8717	17-Sep-87	04:21	11,40	16,30	51,10	38,80	108	592	9,92E+02
8718	18-Sep-87	19:47	6,92	57,80	217,00	195,00	92	305	1,88E+03
8720	25-Sep-87	03:45	7,31	18,00	69,80	61,70	106	1390	2,79E+03
8721	27-Sep-87	21:31	9,11	111,00	1050,00	1000,00	85	189	4,22E+03
8722	29-Sep-87	13:16	20,80	47,00	201,00	175,00	66	328	1,81E+03
8723	04-Oct-87	01:24	13,50	19,60	59,60	45,20	106	681	1,30E+03
8724	08-Oct-87	22:00	11,90	15,80	63,70	50,50	338	1009	1,78E+03
8725	12-Oct-87	07:37	10,20	18,70	60,50	48,80	160	931	1,88E+03

Bassin versant de Booro-Borotou Principal (1,36 km²)

N°cruce	Volr m3	Le mm	Lr mm	Qspe l/s/km2	Typ	Pmoy mm	Coefr	N°aver.	Dur av min
8523	8,43E+02	1,35	0,62	90,62	S	16,7	3,7%	85149	207
8524	1,87E+02	0,60	0,14	6,44	S	5,6	2,5%	85155	32
8525	1,19E+03	1,45	0,88	40,17	S	24,8	3,5%	85156	54
8526	4,29E+03	4,66	3,16	186,43	S	71,3	4,4%	85163	347
8527	5,59E+02	1,24	0,41	20,51	S	12,5	3,3%	85164	124
8528	4,19E+02	0,69	0,31	44,65	S	16,6	1,9%	85165	166
8529	4,08E+02	0,72	0,30	15,34	S	17,3	1,7%	85173	117
8530	4,64E+02	0,70	0,34	22,48	S	17,3	2,0%	85174	113
8531	3,06E+02	0,86	0,23	7,61	S	11,5	2,0%	85175	77
8532	5,59E+02	0,68	0,41	27,62	S	23,1	1,8%	85178	60
8533	1,48E+03	1,57	1,09	20,52	S	28,3	3,9%	85179	10
8601	1,80E+02	0,19	0,13	9,34	S	43,9	0,3%	86059	609,3
8602	3,25E+02	0,32	0,24	11,30	S	39,8	0,6%	86088	474
8603	1,95E+02	0,27	0,14	6,54	S	15,8	0,9%	86094	753,1
8604	1,62E+02	0,17	0,12	10,90	S	19,3	0,6%	86120	87,2
8605	4,83E+02	0,50	0,36	16,90	S	36,6	1,0%	86122	131,9
8606	5,68E+02	0,59	0,42	24,80	C	32,3	1,3%	86139	55
8607	6,76E+02	0,77	0,50	13,50	S	19,6	2,6%	86147	149,5
8608	1,76E+03	1,67	1,30	148,00	S	40,0	3,2%	86149	149,9
8609	1,70E+02	0,25	0,13	6,04	S	19,6	0,7%	86163	184,2
8610	9,03E+02	0,88	0,66	33,00	S	29,4	2,2%	86164	171,9
8611	2,81E+03	2,36	2,07	138,00	C	69,4	3,0%	86189	272,6
8701	8,17E+02	0,68	0,60	100,00	S	70,1	0,9%	87065	252,1
8702	4,93E+01	0,12	0,09	4,12	S	26,1	0,3%	87071	169,2
8703	1,30E+02	0,11	0,10	5,21	S	28,3	0,4%	87074	109
8704	1,96E+02	0,19	0,14	8,53	C	37,8	0,4%	87083	386,9
8705	1,78E+02	0,18	0,13	5,21	C	27,5	0,5%	87094	267,4
8706	1,36E+03	1,22	1,00	48,20	S	52,5	1,9%	87098	327,1
8707	7,12E+02	0,76	0,52	17,40	S	24,2	2,1%	87101	256,2
8708	5,48E+03	4,44	4,03	926,00	S	55,0	7,3%	87105	205
8709	3,01E+02	0,58	0,22	14,20	S	10,6	2,1%	87115	120,8
8710	3,69E+03	3,69	2,71	379,00	C	56,2	4,8%	87116	109,7
8711	1,64E+03	1,88	1,20	84,60	S	31,2	3,8%	87121	300,7
8712	1,07E+03	1,38	0,79	46,80	S	20,4	3,9%	87122	179,1
8713	6,93E+02	1,21	0,51	49,20	S	14,4	3,5%	87125	208
8714	3,26E+02	0,54	0,24	34,30	S	17,3	1,4%	87130	38,7
8715	1,99E+02	0,50	0,15	24,20	S	7,1	2,1%	87132	41,7
8716	2,94E+02	0,45	0,22	26,30	C	11,5	1,9%	87136	52,8
8717	5,00E+02	0,73	0,37	37,60	S	15,5	2,4%	87137	127,9
8718	1,29E+03	1,38	0,95	160,00	C	31,9	3,0%	87138	147,9
8720	1,73E+03	2,05	1,28	51,30	C	17,1	7,5%	87145	50,1
8721	3,54E+03	3,10	2,60	772,00	S	42,4	6,1%	87151	275,2
8722	1,14E+03	1,33	0,84	148,00	S	19,9	4,2%	87154	49,8
8723	6,22E+02	0,95	0,46	43,80	S	12,3	3,7%	87157	96,3
8724	9,39E+02	1,31	0,69	46,80	S	18,9	3,7%	87160	161,5
8725	1,07E+03	1,38	0,79	44,50	S	22,5	3,5%	87164	215,5

Bassin versant de Booro-Borotou Principal (1,36 km²)

N°crue	Pseau mm	Res0 mm	Res5 mm	Cum ann mm	IPA.01 mm	IPA.05 mm	IPA.1 mm	IPA.5 mm	IPA.8 mm
8523	19,5	0,1	0,1	1038,3	693,7	243	131,5	53,9	45
8524	7,6	3,9	3,9	1076,8	690,2	210,4	96	6,5	1,4
8525	25,6	1,8	1,8	1084,4	685,5	199,5	86,8	5,8	2,2
8526	71,2	0,1	0,1	1115,2	673,4	170,1	65,5	6,3	5
8527	13,3	0,6	0,6	1186,4	740,2	234,3	128,8	57,6	47,3
8528	16,1	1	1	1199,7	746,1	235,6	128,7	43,2	27,5
8529	10	1,1	1,1	1223,4	706,3	170,3	67,6	5,1	3,2
8530	21,8	5,2	5,2	1233,4	680,3	139,3	46,3	1,1	0,2
8531	6,2	0,7	0,7	1255,2	697	155,3	63,4	16	12,4
8532	20,4	8,8	8,8	1261,4	643,7	103,8	28,7	0,3	0
8533	5,7	1,8	1,8	1281,8	652	113,3	40,9	8,3	4,7
8601	46	7,9	11,5	379,6	276,6	52,6	18	0,1	0
8602	41,4	0	3,5	518,4	329,6	83,6	44,8	10,2	5,8
8603	10,1	0,1	0,4	584,8	371,6	112,4	65,4	16	12,5
8604	13,2	0,5	0,9	640,8	362,2	80,2	33	5,6	4
8605	32,2	0,7	3,8	656,3	363,8	79,6	33,7	4,1	1,7
8606	43,7	1,1	2,8	738,4	393,8	96,2	48,5	8,9	4,4
8607	20,3	0,2	4,7	790,5	427	120,2	66,9	11,3	5,8
8608	32,7	0,3	1,2	811,3	442,5	132,9	78	17,9	10,5
8609	19,8	0,1	7,3	873,1	435,4	97,5	38,3	2,1	1
8610	32,8	1,5	1,5	892,9	448,6	109	50,1	10,5	6,4
8611	66,4	0,3	3,5	1005,5	430	84,3	42,2	7,5	3,3
8701	70	0,4	5,7	317,3	258,4	70,2	31,9	3,4	1,8
8702	24	0,1	5,9	403,8	322,5	113,3	63	7,2	3,7
8703	25	3,7	10,6	430,8	314,7	83,5	32,4	0,6	0,1
8704	36	3,3	3,3	506,3	334,4	81,7	35,1	3,5	1,2
8705	24	0	3,5	587,8	360,4	87,7	40,2	6,1	3,2
8706	46,5	0,9	3	623,8	377,9	98,1	48,7	6,1	2,3
8707	22,5	0,1	2,4	675,8	420,1	134,2	80,9	21,4	12,3
8708	62	0,5	0,5	717,3	446,1	149,6	90,2	21,1	13,7
8709	11	0,1	1,3	795,8	508,2	195,6	125	26,7	13,5
8710	29,5	0,9	0,9	806,8	514,5	197,3	124	23,8	11,7
8711	31,5	0	4,3	860,7	544,7	203,5	117	10,7	3,4
8712	19,4	2,3	2,6	894,1	563,6	208,5	116,5	12,3	4,8
8713	11,8	0,2	0,6	914,5	581,2	223,6	130,7	26	17,5
8714	23,5	0,8	3	939,1	567,1	179,6	82,7	5,1	2,2
8715	1,5	0,2	0,4	963,1	588,8	199,8	102,7	24,1	19,3
8716	6,1	0,7	5,9	972,2	567,1	160,9	67,2	4,7	2,3
8717	13,8	0,6	0,6	978,3	570,1	162,4	69,3	8,2	5,4
8718	30,7	1,6	1,6	992,1	574,7	162,8	70,9	9,9	5,4
8720	16,9	1,5	6,2	1031,5	578,5	151	62,5	4,8	1,8
8721	50,1	1,6	2,4	1061,2	593	159,4	72	10,5	4,8
8722	19,4	0,3	1,5	1112,8	635,8	197	107,7	31,4	19
8723	13,3	1,3	4,5	1138,3	633	179,1	86,8	8	2,6
8724	6,6	0,5	4,8	1153,1	618	153,4	63,9	3,2	1,3
8725	19,9	0,4	3,2	1171,9	616,9	147,1	60,4	4,9	2

Bassin versant de Booro-Borotou Principal (1,36 km²)

N° crue	IM0 mm/h	IM1 mm/h	IM5 mm/h	IM10 mm/h	IM15 mm/h	IM20 mm/h	IM30 mm/h	IM60 mm/h	HM5 mm
8523	77,7	76,4	68,4	50,1	39	31,9	24,4	14,3	14,7
8524	42,7	42,7	42,7	24,2	18	19,2	13,2	7,6	7,1
8525	57	57	57	52,2	50,2	49,4	43	25,6	25,2
8526	65,7	64,4	58,7	49,6	46,2	41,8	41	33,5	64,1
8527	48,8	48,8	48,8	32,9	25,2	22,8	15	9,1	7,1
8528	85,5	85,5	85,5	65	49,4	36,1	25,7	13,2	13,8
8529	22,2	22,2	22,1	20,2	14,2	11,3	11,4	8,1	6,2
8530	71,2	71,2	65,7	56,9	50,6	44,3	33,7	19,2	18,5
8531	19	19	19	19	16,1	13,3	10,4	5,1	3,8
8532	85,4	85,4	85,4	85,4	66,1	54,6	38,1	0	19,9
8533	34,2	34,2	34,2	0	22,8	17,1	11,4	5,7	5,7
8601	61,9	61,9	44,8	29,1	22	18,3	14,4	10,7	23,2
8602	48	45,7	44,2	43,4	42,4	41,4	38,5	30,2	33,4
8603	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	0
8604	63,3	59,9	47,7	39,3	33,2	28,7	23,4	12,1	12,3
8605	63,7	60	56,8	53,2	52,6	50	42,6	27,4	29,5
8606	138,1	121,2	103,8	95,2	90,5	81,3	60,5	43,7	43,7
8607	184,1	165,7	106,2	77	53,1	40,3	27,2	15,2	15,6
8608	110,5	104	80,5	63,9	55	49,4	32,4	16,8	31,3
8609	55,2	50	37,3	34,2	22,1	16,8	16,7	10,6	16,6
8610	132,8	123,3	100,9	82,3	69,1	60,1	46,6	27,9	28,8
8611	132,8	124,6	87,1	81,6	75,2	69,8	62,5	38,3	59,3
8701	128,5	116,2	91,6	85,4	80,4	75,4	73,7	52,8	54,5
8702	81,8	63	46,2	32	30,4	27,5	23,9	16,3	19,5
8703	60	58	45,2	38,3	36,6	36,3	30,5	21,8	22,5
8704	81,8	74,4	55,7	46,2	48,9	43,7	36,9	22,2	25,5
8705	105,9	96	63,7	42,2	34,1	28,4	21,1	13,3	15,5
8706	150	118,2	100,5	82,3	65,9	53,5	52,6	33,7	37
8707	78,3	67,7	51,2	40,1	34,8	32,6	25,6	13,8	14
8708	180	154,6	124,8	114,7	92,4	90,2	80,2	51,5	58
8709	94,7	90	36,3	18,9	13,1	10,2	7,3	5,1	7,5
8710	78,3	77	75,6	72,9	71,6	68,5	48,2	24,4	28,5
8711	62,9	59,2	38,2	30,5	29,9	28,3	21,7	15,4	24,6
8712	54,1	52,8	41,1	33	28,8	25,7	25,4	14,6	14,3
8713	36,1	35,5	28,2	22,1	22,2	20,6	15,9	8,1	7,7
8714	141,5	118,6	76,5	68	58,9	54,6	40,4	23,5	22
8715	1,9	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	0	1,5	0
8716	102,2	86,5	37,4	22,3	15,6	13,7	8,5	6,1	4,6
8717	35,4	34,7	30,3	23,7	21,8	19	14,5	9,4	10,2
8718	87,6	71,6	57,4	56,4	49,6	47,7	43,6	23,3	23,5
8720	102,2	92	74	64,5	48,4	39,9	27,9	16,9	14,3
8721	122,7	106,3	92,8	80,5	77,9	75,1	64	36,1	36,3
8722	122,7	103,5	67,6	52,1	45,7	35,9	28,1	19,4	16,9
8723	47,2	46	40,6	36	32,4	27,3	21,8	12,1	11,8
8724	12	12	11	9,2	6,3	6,2	4,3	3,6	2
8725	47,2	45,6	35,5	31,9	29,6	26,1	19,3	12,6	12,8

Bassin versant de Booro-Borotou Principal (1,36 km²)

N°crue	HM10 mm	HM15 mm	HM20 mm	HM25 mm	HM30 mm	HM40 mm	HM50 mm
8523	11,9	10	8,5	8,5	8,5	8,5	8,5
8524	6,2	6,2	6,2	4,3	4,3	4,3	0
8525	21,8	21,8	21,8	21,8	21,8	21,8	4,7
8526	63,2	59	54,1	54,1	41,8	33,7	9
8527	7,1	5,7	5,7	5,7	5,7	5,7	0
8528	11,9	11,9	11,9	11,9	11,9	11,9	7,1
8529	5,2	3,3	3,3	0	0	0	0
8530	15,7	15,7	15,7	13,3	13,3	9,5	4,7
8531	3,8	3,8	0	0	0	0	0
8532	19	19	19	19	19	14,2	14,2
8533	5,7	5,7	5,7	5,7	5,7	0	0
8601	5,6	5,2	4,7	4,7	4,3	3	1,7
8602	31,7	30,4	26,8	23,3	18,9	9,7	0
8603	0	0	0	0	0	0	0
8604	11,9	8,8	7,9	6,6	5,7	3,5	2,2
8605	25,3	24,9	22,6	20,7	18	15,2	10,1
8606	42,8	41,4	41	40	40	35,9	31,8
8607	13,8	13,8	13,3	13,3	12,9	12	10,1
8608	30,4	26,7	23,9	23	22,1	16,6	13,8
8609	13,8	11,5	9,2	7,4	5,1	2,8	0,5
8610	26,6	24,8	22,1	19,9	18,6	16,8	14,6
8611	56,2	54	50,9	50,5	49,1	46	35,4
8701	54	52,5	50,5	49,5	47	43	34
8702	15	13	8	6,5	5,5	2,5	2
8703	22,5	19,5	18	16	13	5,5	2
8704	22	21,5	19,5	16,5	14,5	11,5	7
8705	11	9,5	8	7	6	5	4
8706	34	31	29,5	28	24,5	20,5	18
8707	12	11,5	10,5	9,5	8,5	6,5	4
8708	55,5	54,5	52,5	51	48	41,5	36,5
8709	4,5	4	4	4	4	3	3
8710	28,5	27	27	27	26	25,5	23
8711	11	8,9	8,4	7,3	4,2	2,6	1
8712	12,8	12,3	11,2	8,7	6,1	2	1
8713	6,6	5,6	4,6	3,1	1,5	0	0
8714	21	19,9	18,9	18,4	16,9	15,3	11,2
8715	0	0	0	0	0	0	0
8716	4,6	4,6	3,6	3,1	3,1	2,6	2
8717	8,2	7,2	4,6	3,1	2,6	0	0
8718	22,5	22,5	22	21	19,9	15,3	9,2
8720	12,8	12,8	12,8	11,8	11,8	10,2	8,7
8721	35,8	35,3	33,7	31,7	30,2	27,6	25
8722	16,9	16,4	15,8	15,8	13,8	9,2	6,1
8723	10,7	8,2	7,7	7,7	5,1	2	0
8724	0,5	0	0	0	0	0	0
8725	9,2	9,2	8,2	7,2	5,1	1,5	0

DESCRIPTION CODIFIEE DES PARCELLES DE SIMULATION DE PLUIES

Trois aspects sont décrits successivement : le recouvrement, les organisations de surface, la nature et la structure superficielle du sol.

- a) le recouvrement (estimé visuellement à l'intérieur du cadre de 1 m²) :
- couvert végétal (CV) en %
 - couvert de résidus de végétation (CR) en %
 - couvert de gravillons libres (GL) en %
- b) les organisations de surface :
- . le microrelief
 - > hauteur (MH) (amplitude moyenne en cm)
 - > obstruction (MO) codée selon :
 - 0, pas d'obstruction
 - 1, faible, l'obstacle est subparallèle
 - 2, moyen, l'obstacle est à près de 45°
 - 3, angle de l'obstacle entre 45° et 90°
 - 4, obstacle perpendiculaire
 - . les algues et mousses
 - > couvert (AM) codé selon :
 - 0, absence
 - 1, traces
 - 2, près de 5%
 - 3, près de 15%
 - 4, plus de 30%
 - . l'activité mésofaunique
 - > couvert (MC) (notation in situ en % de la surface)
 - > porosité (MP) codée selon :
 - 0, absence
 - 1, placage de termites
 - 2, turricule de vers
 - 3, fourmilières
 - . gravillons enchassés (GE)(en % de la surface)
 - . fentes
 - > largeur (FE) codée selon :
 - 0, absence
 - 1, inférieure à 1 mm
 - 2, 1 mm et en réseau
 - . hydromorphie de surface
 - > abondance de taches (HS) codée selon :
 - 0, absence
 - 1, traces
 - 2, peu nombreuses (<5%)
 - 3, nombreuses (>5%)

(Ces taches de rouille se localisent généralement sur la face intérieure de la pellicule plasmique)
 - . prise en masse des sables
 - > cohésion (SB) codée selon :
 - 0, absence
 - 1, sables non pris en masse
 - 2, sables pris en masse couvrants moins de 50%
 - 3, couvrants plus de 50%
 - . porosité vésiculaire
 - > abondance des vésicules (VS) codée selon :
 - 0, absence
 - 1, < 5%
 - 2, entre 5% et 30%
 - 3, plus de 30%
 - . pellicules plasmiques
 - > continuité (PC) codée selon :
 - 0, absence
 - 1, affleurante ou sous les sables sur plus de 50%

- 2, plus de 70%
- 3, plus de 95%
- > épaisseur (PE) codée selon :
 - 0, absence
 - 1, peu individualisée
 - 2, de l'ordre de 0,5 mm
 - 3, de l'ordre de 1 mm

. complexité des micro-organisations pelliculaires superf.

- > polygénèse (PP) codée selon :
 - 0, absence
 - 1, superposition de deux systèmes
 - 2, plus de deux systèmes sur moins d'un cm
 - 3, plus de deux systèmes sur plus d'un cm

. érosion

- > type (ER) codé selon :
 - 0, absence
 - 1, traces d'impacts
 - 2, figures peu marquées
 - 3, figures bien marquées
 - 4, marches d'escalier
 - 5, érosion linéaire

c) le sol :

- . profondeur d'apparition d'un horizon à drainage limité
 - > (PR) codé selon :
 - 0, absence ou profondeur supérieure à 60 cm
 - 1, entre 40 cm et 60 cm
 - 2, entre 20 cm et 40 cm
 - 3, inférieur à 20 cm

- . texture entre 0 et 20 cm
 - > (TX) codé selon :
 - 0, sableux
 - 1, sablo-argileux
 - 2, argileux

- . porosité entre 0 et 20 cm
 - > (PO) codée selon :
 - 0, très poreux
 - 1, assez poreux
 - 2, peu poreux
 - 3, très peu poreux

- . hydromorphie entre 0 et 20 cm
 - > (HY) codée selon :
 - 0, absence
 - 1, traces
 - 2, quelques taches
 - 3, nombreuses taches

- . classe de drainage
 - > (CD) codée selon :
 - 0, très élevée
 - 1, élevée
 - 2, moyenne
 - 3, assez faible
 - 4, très faible
 - 5, nulle à saturation

DESCRIPTION CODEE DES PARCELLES DE SIMULATION DE PLUIES

n° parc	CV	CR	GL	MH	MO	AM	MC	MP	GE	FE	HS	SB	VS	PC	PE	PP	ER	PR	TX	PO	HY	CD
1A	5	90	0	0	0	2	3	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1B	50	70	0	0	0	2	3	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2A	5	45	2	2	0	1	2	1	0	0	0	2	0	1	1	0	1	1	1	1	0	2
3A	1	50	2	4	0	2	1	1	3	0	0	2	0	2	2	0	2	1	3	1	0	1
4A	3	80	0	3	0	0	2	1	0	0	0	1	0	1	1	0	0	1	3	1	0	1
5A	2	55	0	0	0	0	2	1	0	1	0	2	2	2	1	0	2	0	2	1	0	1
5B	3	10	0	0	0	0	2	1	0	0	0	2	2	2	1	0	2	0	2	1	0	1
6A	55	80	0	3	0	1	4	1	0	0	0	1	0	1	1	0	0	0	2	1	0	1
6B	3	30	0	3	0	1	3	2	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	2	1	0	1
7A	2	2	2	4	0	1	1	1	3	0	0	2	1	1	2	0	3	1	2	1	0	2
8A	5	2	2	2	0	0	1	1	3	0	0	3	2	1	2	1	4	1	2	1	0	2
8B	20	30	2	2	0	1	1	1	3	0	0	3	2	1	1	1	4	1	2	1	0	2
9A	5	9	0	1	0	1	4	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	1	
9B	5	85	0	1	0	1	4	3	0	0	0	2	0	0	0	0	0	2	0	0	1	
10A	5	45	5	0	0	0	1	1	0	0	0	1	0	1	2	0	4	1	2	1	0	2
10B	75	7	0	4	0	0	1	2	0	0	0	2	1	1	1	0	2	1	2	1	0	2
10C	55	13	0	5	2	0	2	3	0	0	0	2	0	2	1	0	3	1	2	1	0	2
11A	15	30	0	0	0	0	1	1	0	0	0	1	0	1	2	0	4	1	2	1	0	2
11B	95	7	0	4	0	0	1	2	0	0	0	2	1	1	1	0	0	1	2	1	0	2
11C	25	20	0	4	2	0	1	3	0	0	0	2	1	1	2	0	3	1	2	1	0	2
12A	17	215	4	1	0	1	1	1	3	0	0	1	1	1	2	0	3	2	0	1	0	2
12B	0	715	3	1	0	2	3	3	0	0	1	1	1	1	1	0	1	2	0	1	0	2
13A	20	120	6	0	1	2	1	1	1	0	2	2	2	2	2	0	3	0	0	1	0	1
13B	0	2520	7	0	1	1	2	3	1	0	0	1	1	1	1	0	2	0	0	1	0	1
14A	5	10	0	0	0	2	3	0	1	0	1	1	0	0	1	0	2	2	1	2	0	3
14B	0	30	0	1	0	1	1	2	0	0	0	0	0	1	1	0	1	2	1	2	0	3
15A	10	40	0	0	0	3	3	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	1	2	0	3
15B	0	50	0	1	0	0	1	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	1	2	0	3
16A	3	25	1	0	0	2	2	2	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1
16B	0	25	1	3	0	2	2	2	0	0	0	1	0	1	1	0	3	0	0	0	0	1
17A	3	7	1	2	0	2	3	3	0	0	0	1	0	1	1	0	1	0	0	0	0	1
17B	1	5	1	2	0	0	1	2	0	0	0	1	0	0	1	0	2	0	0	0	0	1

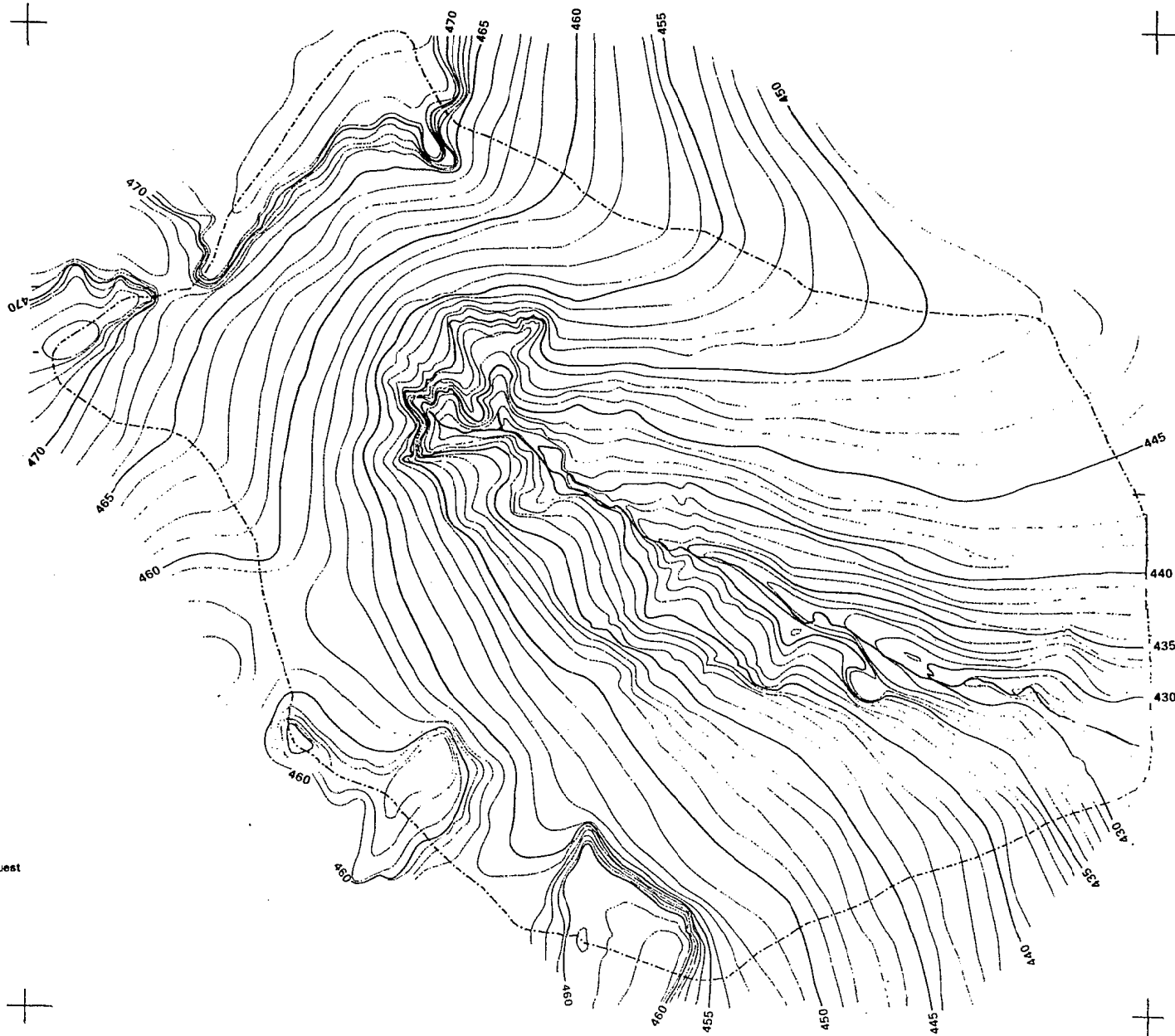
Le numéro de la description correspond pour la première partie au numéro de la parcelle intéressée ; la lettre repère la date où la description été effectuée :

- * A : pour les parcelles 1 à 9, le 21 février 1985 pour les parcelles 10 à 17, le 16 février 1986
- * B : pour les parcelles 1 à 9, le 31 août 1985 pour les parcelles 10 à 17, le 30 août 1986
- * C : pour les parcelles 10 et 11, le 22 octobre 1986

CARTES HORS-TEXTE

BASSIN VERSANT DE BOORO-BOROTOU PRINCIPAL

Fond hypsométrique










Nivellement Général de l'Afrique de l'Ouest
Equidistance des courbes : 1 m

Programme Hyperbav
© ORSTOM 1988

BASSIN VERSANT DE BOORO-BOROTOU PRINCIPAL
 Sites d'observations hydro pluviométriques

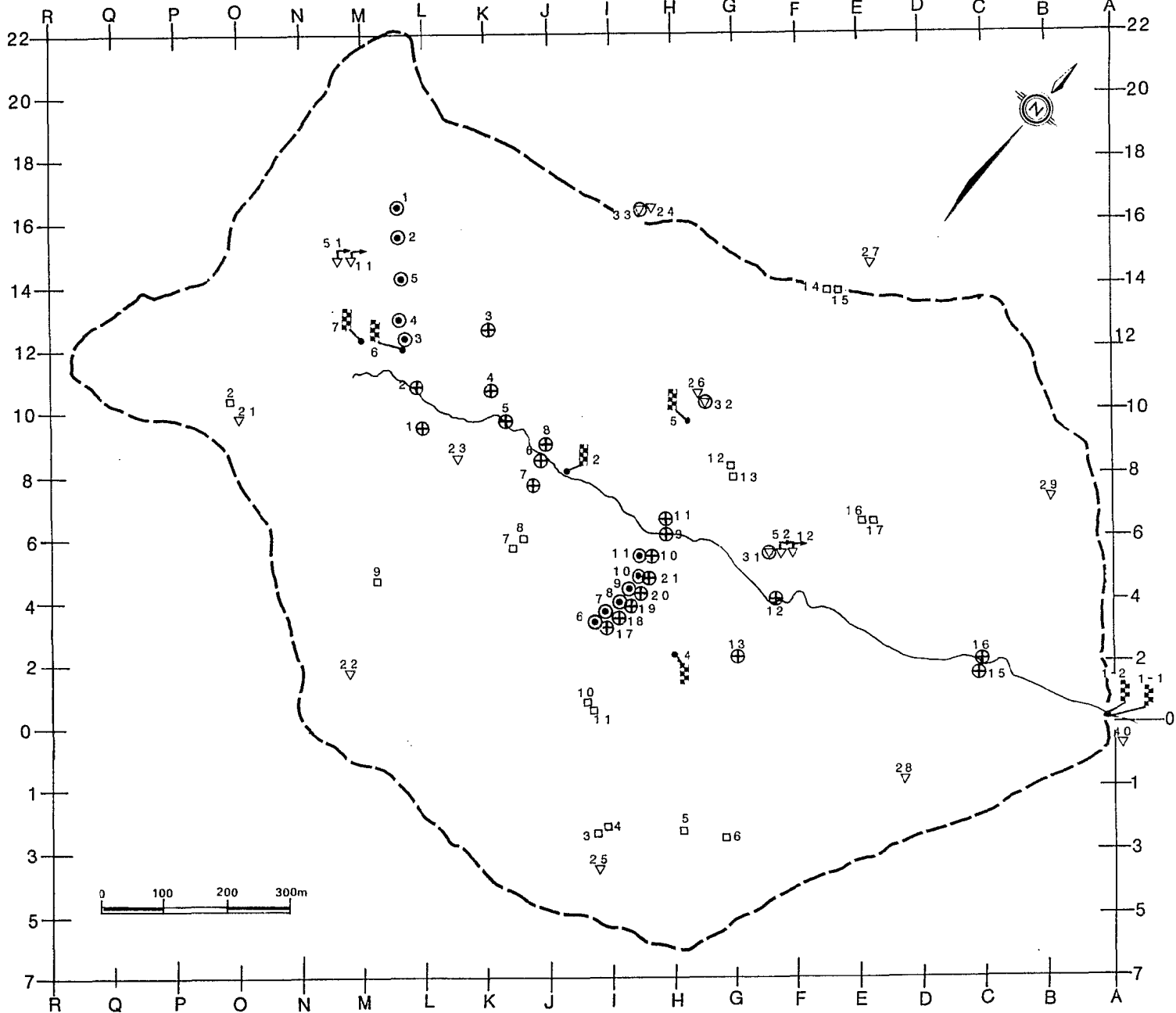
Légende

-  Limnigraphes
-  Pluviographes
-  Pluviomètres
-  Pluviomètres snowdon
-  Parcelles simulation de pluies
-  Piézomètres
-  Sites tensio-neutroniques

Coordonnées du point A0
 8°28'53" Nord
 7°34'43" Ouest

Carte dressée par JP-DEBUICHE
 d'après les travaux de l'équipe
 Hyperbav

Programme Hyperbav
 © ORSTOM-1988





BASSIN VERSANT DE BOORO-BOROTOU PRINCIPAL


Esquisse géologique

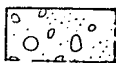
Légende

 Direction de diaclases


 Filon de pegmatite

 Filon de granite à amphibole

 Direction de filonnet

 Gneiss migmatitique à biotite

 Gneiss migmatitique à hypersthène

 Proxeno-amphibolite plagioclasique

Coordonnées du point A0

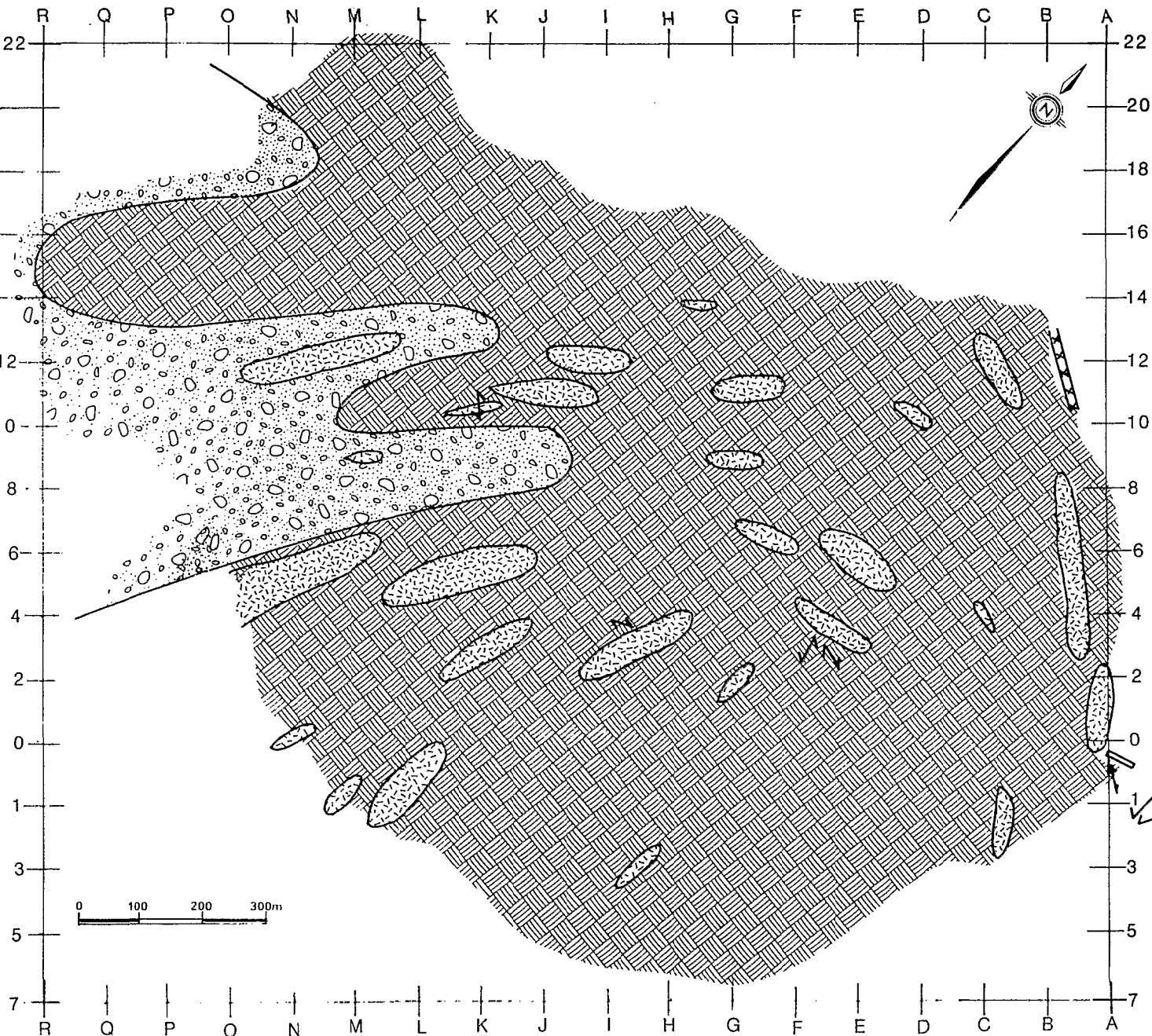
8°28'53" Nord
7°34'43" Ouest

Carte dressé par J.P. DEBUICHE

d'après les travaux de L'ENSTP
Yamoussoukro

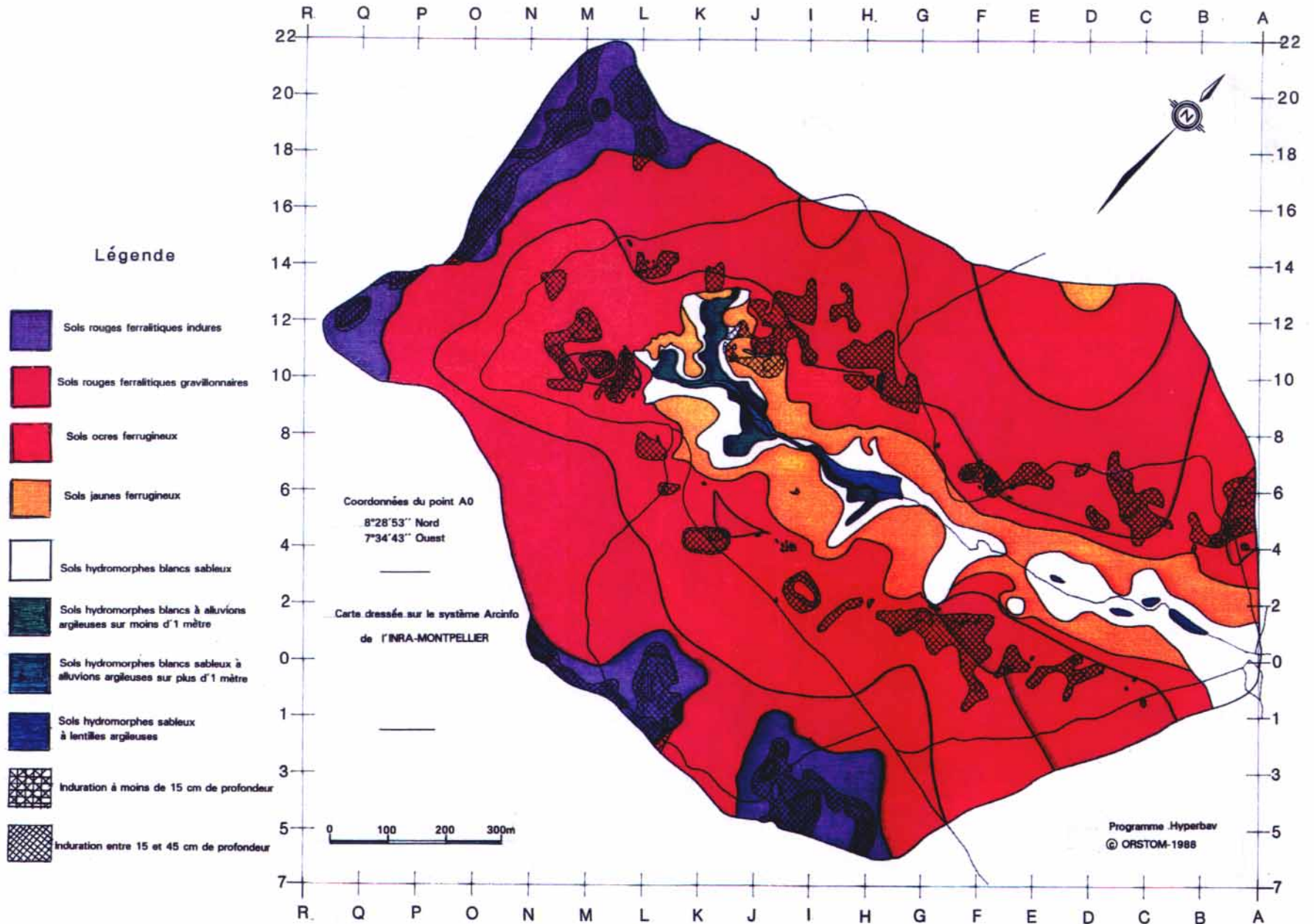
Programme Hyperbav

© ORSTOM 1988



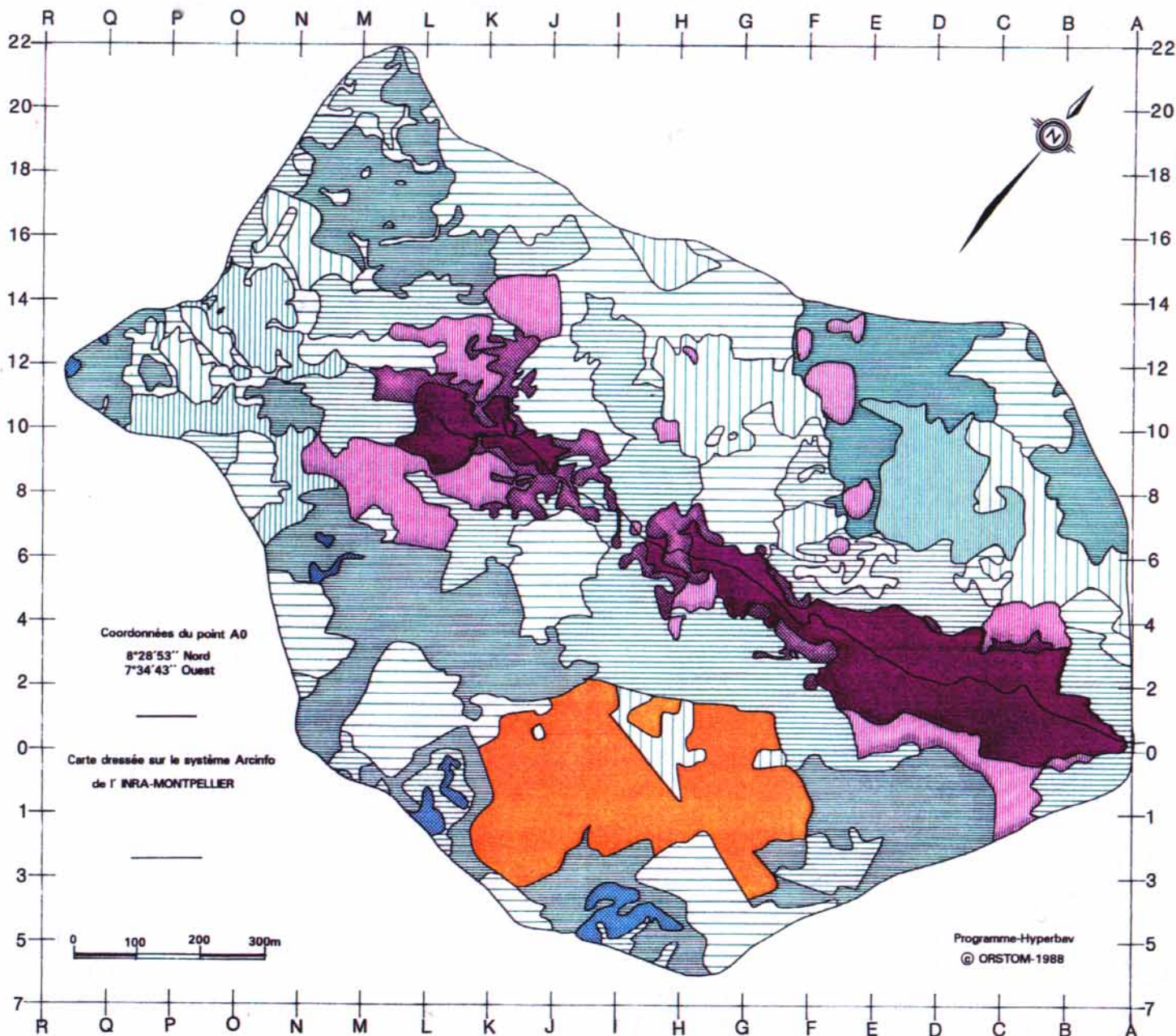
BASSIN VERSANT DE BOORO-BOROTOU PRINCIPAL

Carte des sols










BASSIN VERSANT DE BOORO-BOROTOU PRINCIPAL

Carte de la végétation (août 1987)

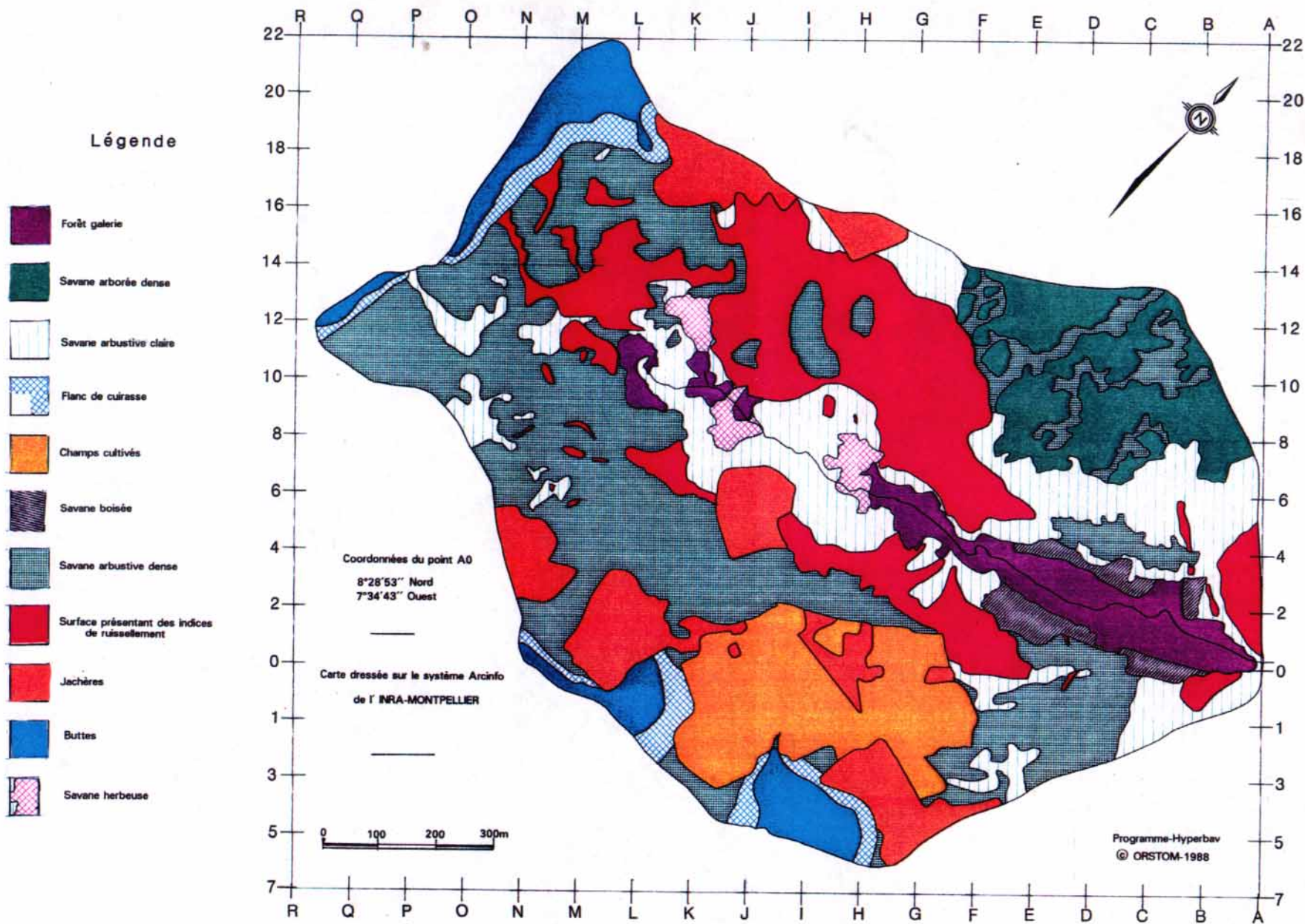


Légende

-  FORET GALERIE
- SAVANE BOISEE**
 -  Haute
 -  Basse
 -  Hygrophile
- SAVANE ARBOREE**
 -  Haute
 -  Basse
- SAVANE ARBUSTIVE**
 -  Dense
 -  Claire
- SAVANE HERBEUSE**
 -  Haute
 -  Basse
-  CHAMPS CULTIVES

BASSIN VERSANT DE BOORO-BOROTOU PRINCIPAL

Carte des états de surface (août 1987)



ORSTOM Editeur
Dépôt légal : mars 1990.
Micro-édition, Impression
ORSTOM BONDY

ISSN : 0767-2888
ISBN : 2-7099-0986-3
Editions de l'ORSTOM
70, route d'Aulnay 93143 BONDY Cedex

ET 2003
130F