Dynamique de l'interface lithosphère-atmosphère au Burkina Faso. L'érosion en zone de savane

Michel Mietton

▶ **To cite this version:**

Michel Mietton. Dynamique de l'interface lithosphère-atmosphère au Burkina Faso. L'érosion en zone de savane. Editec, 1988, 2-86878-040-7. hal-01166073

HAL Id: hal-01166073

https://univ-lyon3.hal.science/hal-01166073

Submitted on 22 Jun 2015

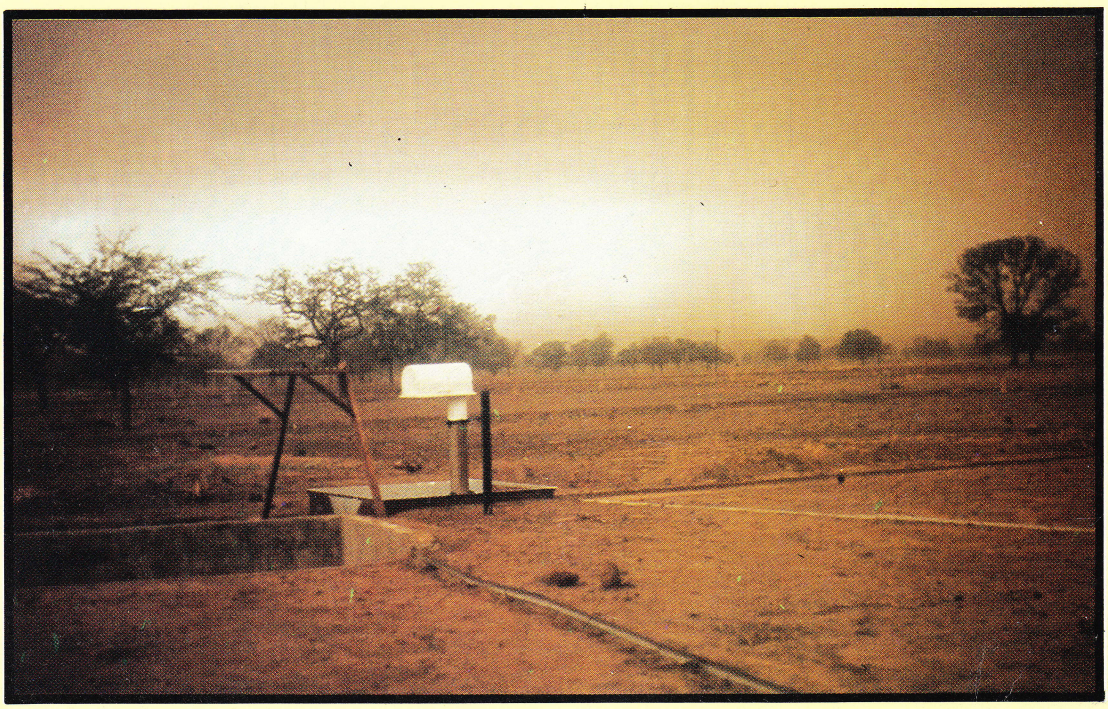
HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Distributed under a Creative Commons Attribution - NonCommercial - NoDerivatives 4.0 International License

DYNAMIQUE DE L'INTERFACE LITHOSPHÈRE-ATMOSPHÈRE
au
BURKINA FASO

L'ÉROSION EN ZONE DE SAVANE



Michel MIETTON

M i c h e l M I E T T O N
Agrégé de l'Université

DYNAMIQUE DE L'INTERFACE LITHOSPHERE-ATMOSPHERE AU BURKINA FASO.

L'EROSION EN ZONE DE SAVANE

Université de Grenoble I
- 1988 -

Cet ouvrage reprend pour l'essentiel une thèse d'Etat de Géographie soutenue le 18 Mars 1988 à l'Université J. Fourier - Grenoble 1 devant un jury composé de M. Y. Bravard, Professeur à l'Université de Grenoble I (Rapporteur), M. M. Chardon, Professeur à l'Université de Grenoble I (président), M. C. Baldy, Directeur de Recherches en Bioclimatologie à l'INRA d'Avignon, M. P. Michel, Professeur à l'Université L. Pasteur de Strasbourg I, M. A. Morel, Professeur à l'Université de Grenoble I, M. R. Neboît, Professeur à l'Université de Clermont-Ferrand II, M. E. Roose, Directeur de Recherches en Pédologie à l'ORSTOM de Montpellier.

Tous droits de traduction, de reproduction et d'adaptation réservés pour tous pays.

© 1988, Michel Mietton, Bassens

ISBN 2-86878-040-7

"L'eau fécondante ... ne ruisselait pas en vain comme aujourd'hui ..."

PLATON, Critias, 111c.

AVANT-PROPOS

Cette thèse est l'aboutissement de huit années de recherches au Burkina Faso (Haute-Volta). Huit années captivantes mais difficiles, durant lesquelles j'ai également assuré mon enseignement à l'Université de Ouagadougou puis à celle de Chambéry. A mon retour en France, j'ai consacré trois années à mettre en forme les données de terrain, l'information statistique et bibliographique, les résultats cartographiques. Certaines de mes analyses ont été facilitées par l'aide de personnes ou d'organismes que j'ai plaisir à remercier.

En premier lieu, c'est à Monsieur le Professeur Y. Bravard que va ma reconnaissance. Dès le début de ma recherche, il m'a accordé sa confiance, meilleur soutien dans les moments les plus pénibles. Sa vision globale de la géographie, déjà exprimée à travers ses enseignements à l'Institut de Géographie Alpine de Grenoble, puis sur notre terrain m'a été largement profitable. Ses conseils et ses encouragements lors de nos rencontres en France puis ses critiques à la lecture du manuscrit ont été très précieux.

C'est à Ouagadougou que j'ai rencontré Monsieur C. Baldy, Directeur de Recherches en Bioclimatologie à l'INRA. Il a porté immédiatement de l'intérêt à mes travaux et m'a fait part de toute son expérience de spécialiste des zones chaudes. Une amitié fidèle est née au cours de nos entretiens fructueux. J'ai bénéficié des corrections minutieuses qu'il a pris le temps d'apporter à plusieurs de mes chapitres. A travers lui, je remercie aussi le Centre INRA de Montfavet qui nous a apporté un soutien matériel.

Ma reconnaissance va ensuite aux autres personnes qui ont bien voulu accepter de faire partie du jury : MM. M. Chardon, P. Michel, A. Morel, R. Neboît, E. Roose.

M. Chardon connaît mon terrain depuis la première reconnaissance, effectuée ensemble, sur le bassin versant d'Imiga. Il n'a pas ménagé son temps depuis lors pour m'écouter, critiquer de façon stimulante mes résultats et obtenir, au niveau de l'Université Scientifique Technique et Médicale de Grenoble I, les crédits nécessaires à de nombreuses analyses.

P. Michel, Professeur à l'Université L. Pasteur de Strasbourg, s'est toujours préoccupé de l'avancement de ma recherche. Son expérience de terrain et son soutien moral, apporté avec beaucoup de gentillesse, ont été une aide permanente.

E. Roose, Directeur de Recherches en Pédologie à l'ORSTOM, m'a fait l'honneur de s'intéresser à mes études. Il a relu une grande partie de cette thèse, me communiquant ses remarques avec beaucoup de bienveillance. Comme à bien d'autres chercheurs tropicalistes, E. Roose m'a montré, par ses travaux, l'une des voies à suivre : celle de l'expérimentation. J'espère que cette recherche sera digne de la confiance qu'il m'a accordée.

A R. Neboît, Professeur à l'Université de Clermont-Ferrand, qui a accepté de juger mon travail, et à mon ami A. Morel, Professeur à l'Institut de Géographie Alpine, j'adresse mes sincères remerciements.

Ce travail est aussi l'aboutissement de collaborations avec de multiples organismes tant en France qu'au Burkina Faso.

A Ouagadougou, j'ai bénéficié d'une aide matérielle importante de la part du Fonds de Développement Rural puis du Fonds de l'Eau et de l'Equipement Rural. Je tiens à remercier ici :

- les directeurs successifs de cet office, en particulier M. J. Traoré qui s'est intéressé à partir de 1980 aux résultats obtenus sur mes parcelles expérimentales de Pô ;

- l'ensemble du personnel participant au programme de lutte antiérosive, notamment M. J. Reeb et M. I. Nignan, partenaires efficaces et amis ; M. A. Nombre, coordonnateur. En 1982, cette collaboration s'est poursuivie grâce à la volonté de M. A. Ouedraogo qui a retenu mon projet de protocole expérimental à Imiga dans les programmes de recherches de l'office. Sans cet appui financier essentiel, les campagnes de mesures hydrologiques auraient été limitées.

La collecte des données a été rendue possible grâce aux concours de :

- l'H.E.R. (Hydraulique et Equipement Rural), spécialement son Département d'Hydrologie, dirigé par M. K. Sawadogo, et celui des Puits et Forages où j'ai bénéficié de l'aide de M. A. Poisson ;
- le C.T.F.T. (Centre Technique Forestier Tropical) où j'ai trouvé les premiers soutiens matériel et scientifique ; M. J. Piot, son directeur, n'ayant pas cessé de me prodiguer depuis lors des informations ou des avis bien utiles ;
- le C.I.E.H. (Comité Interafricain des Etudes Hydrauliques) où j'ai pu réaliser, grâce à l'amitié de J.P. Lahaye et C. Puech, les premiers traitements statistiques ;
- l'Université de Ouagadougou et son Département de Géographie avec mes collègues J.M. Avenard, J. Bougère, J.C. Clanet et mes anciens étudiants D. Sanou et E.C. Da devenus assistants.
- la Météorologie Nationale du Burkina Faso et les centres ASECNA de Ouagadougou et de Dakar. Nous remercions particulièrement M. J.P. Ouedraogo et ses collaborateurs du Service agrométéorologique.

D'autres personnes m'ont aidé sur le terrain : M. J. Somé, topographe et cartographe à l'ORSTOM puis à l'Institut de Géographie ainsi que M. R. Toé ; M. J. Van de Steen, directeur du Projet géologique et minier Boromo-Houndé ; M. J. Claude, directeur du Centre ORSTOM de Ouagadougou, qui nous a prêté du matériel. A tous, j'adresse mes profonds remerciements.

En France, le C.E.G.E.T. (Centre d'Etudes de Géographie Tropicale) m'a apporté son appui. Je tiens à en remercier les directeurs : M. G. Lasserre, M. P. Vennetier, M. P. Usselmann. Bon nombre d'analyses ont été faites grâce à l'obligeance de :

- Mme Uselle au Laboratoire de Chimie de l'Institut Dolomieu à Grenoble ;
- MM. A. Combeau et P. Pelloux au Centre ORSTOM de Bondy ;
- M. A. Orand au Centre I.N.R.A. de Thonon les Bains ;
- M. A. Thomas et M. J.P. Dedieu à l'Institut de Géographie Alpine.

Que tous trouvent ici l'expression de ma gratitude.

J'ai trouvé une grande disponibilité auprès de collègues chambériens, en particulier M. M. Ayel du Laboratoire d'Informatique Appliquée qui a établi les programmes de traitement des données pluviométriques et thermiques, M. D. Fontvieille du Département de Biologie, M. J. Loup au Département de Géographie. Mme M.C. Machetto, Melle N. Reveyaz, MM. G. Camus et O. Floret, mes anciens étudiants, m'ont aidé à réaliser l'illustration graphique de cette thèse. Je remercie tout particulièrement Mme S. Ginet, secrétaire du Département de Géologie qui a su, dans son délicat travail de dactylographie, allier à sa compétence habituelle beaucoup de compréhension.

A mon épouse Noëlle et à mes trois fils Nicolas, Ivan et Pierre-Edouard qui ont accepté mes longues absences, j'adresse mes affectueux remerciements.

Que tous ceux qui m'ont aidé et que je n'ai pu citer ici soient assurés de ma reconnaissance. Je pense en particulier aux gens de la "brousse", aux habitants de la région de Pô et du village d'Imiga, auprès de qui j'ai trouvé le réconfort après de dures journées de travail et à qui je dédie ce livre en témoignage d'amitié.

INTRODUCTION GENERALE

Arrivé à la fin de l'année 1976 comme assistant de géographie à l'Université de Ouagadougou, nous avons été très vite confronté aux problèmes aigus d'économie de l'eau et de conservation des sols dans des savanes souvent peuplées et frappées alors de plein fouet par une sécheresse persistante. Probablement est-ce ce contexte qui a déterminé l'orientation de nos travaux vers une géomorphologie dynamique et applicable, apportant sa contribution à la compréhension des phénomènes d'érosion.

Ces problèmes d'érosion, au sens le plus large, ou de dynamique actuelle à l'interface lithosphère-atmosphère, ne préoccupent pas que les seuls géographes. Les chercheurs de nombreuses autres disciplines : pédologues, agronomes, bioclimatologues, botanistes, géologues nous procurent, sur le sujet, des données nombreuses et précises. Le géomorphologue n'a généralement ni la compétence, ni les moyens pour aborder ces recherches très spécialisées. En revanche, à l'heure de la multidisciplinarité, le géographe physicien, ce "spécialiste des analyses complexes", si l'on en croit la jolie formule du physicien J. Labeyrie, est l'un des mieux placés pour tenter d'élaborer une synthèse de ces approches spécifiques. Cet effort de prise en compte des autres matières a guidé assurément notre travail.

Pour autant, nous n'avons pas renoncé à une démarche analytique, détaillée et personnelle, aussi bien au niveau du terrain, où nous avons conduit huit années d'expérimentation, que lors du traitement des informations. Ce dernier a bénéficié des outils modernes, tels que le calcul informatique et statistique ou la télédétection, utilisés non par souci d'un quelconque modernisme, mais parce qu'ils enrichissent notre connaissance du terrain, permettent une meilleure interprétation des résultats de mesures, donnent à notre lecture du paysage une optique résolument explicative et quantifiée.

Cette thèse concrétise une recherche entreprise dès notre arrivée au Burkina Faso et débouchant en 1980 sur un doctorat de troisième cycle, relatif à des problèmes de géomorphologie dynamique dans un contexte régional. L'expérimentation ponctuelle, sur quatre parcelles d'érosion situées près de Pô, présentée à cette occasion, a été poursuivie depuis cette date. Trois campagnes de mesures supplémentaires (1980 à 1982) sont venues heureusement compléter les données antérieures.

La connaissance peu à peu approfondie de ce milieu tropical et de ses problèmes d'aménagement nous a déterminé, dès 1982, à entreprendre une seconde expérimentation, à l'échelle de petits bassins versants : le nouvel objectif était de comparer dans un intervalle de six années, sur une même unité hydrologique, le ruissellement et l'érosion, avant et après un aménagement de banquettes antiérosives. Nous avons alors personnellement choisi le bassin versant d'Imiga, équipé avec l'aide financière du Fonds de Développement Rural, puis analysé ses différentes caractéristiques et suivi attentivement, durant la majeure partie des trois premières campagnes (1982 à 1984), les mesures de débits effectuées par un hydrologue de l'HER (Hydraulique et Equipement rural).

A ce stade, il nous est apparu que cet objectif, jugé original et essentiel pour nous, ne pourrait être atteint pour deux raisons, l'une administrative (réforme des thèses) ; l'autre personnelle : notre prise de fonction à l'Université de Savoie rendant progressivement plus difficile le suivi de cette opération. L'acquisition des données de terrain sur ce site s'arrête donc en 1985.

Notre temps de recherche est ainsi partagé en deux phases distinctes. La première prend fin en décembre 1984 après huit années, passionnantes mais difficiles, de reconnaissances centrées sur le domaine des savanes ; le domaine sahélien n'étant abordé que dans un souci de comparaison. La seconde phase s'identifie principalement aux traitements statistiques des données collectées et à la rédaction. Le plan de cette thèse traduit d'ailleurs ces deux perspectives de travail.

Le livre I est logiquement consacré aux moteurs de la dynamique actuelle, les agents d'érosion, actifs et principalement atmosphériques, ou indirects, étroitement dépendants du climat et de l'homme. Deux termes peuvent résumer notre parti pris dans l'analyse des agents

climatiques : agressivité et fréquence. Les caractéristiques climatiques moyennes sont en effet bien connues mais trop peu significatives. Ce sont donc les extrêmes qui ont retenu notre attention. L'appréciation de l'agressivité climatique ne suffit cependant pas. La fréquence ou durée de retour de ces phénomènes extrêmes doit être aussi définie pour mieux cerner la vitesse d'évolution des modelés. Cette notion de fréquence apparaît ainsi comme une constante au long de cette première partie du livre I, dans laquelle les thèmes d'étude les plus novateurs (récurrences de précipitations maximales, vents efficaces, amplitudes thermiques) sont abordés.

Dans la deuxième partie, les facteurs d'érosion difficilement quantifiables - les couvertures végétale et pédologique - sont examinés tour à tour. Les exemples précis, pris aux différentes échelles et latitudes, permettent d'appréhender l'importance des interactions.

Le livre II privilégie la notion d'échelle. C'est en effet à différentes échelles : ponctuelle, de la parcelle expérimentale, des petits puis des grands bassins versants que sont présentées les mesures de ruissellement et d'érosion, ainsi que les processus et les formes correspondantes. Nous nous sommes efforcé d'exposer non seulement nos résultats personnels mais de regrouper, pour comparaison, les nombreuses données acquises par d'autres équipes de chercheurs. Enfin, cette étude s'achève sur une tentative de bilan de la lutte antiérosive conduite au Burkina Faso ces vingt dernières années et sur les perspectives d'avenir pour ce type d'aménagement.

Le sommaire [1] est donc le suivant :

- Livre I : Les agents d'érosion.
  1ère Partie : Les agents directs de l'érosion.
  Chapitre I : Les précipitations.
  Chapitre II : Le vent.
  Chapitre III : Les facteurs microclimatiques.

  2ème Partie : Les facteurs indirects de l'érosion.
  Chapitre IV : La végétation.
  Chapitre V : Les sols de savane.

(1) *La table des matières est placée à la fin du Livre II (p. 505).*

- Livre II : Les mesures, les processus et les formes d'érosion aux différentes échelles spatiales.

  Chapitre VI : La météorisation à l'échelle ponctuelle et l'érosion sur parcelles expérimentales ou sur versant.
  Chapitre VII : L'écoulement et l'érosion sur les bassins versants aux différentes échelles.
  Chapitre VIII : Les tentatives de lutte antiérosive.

Parallèlement à ces deux livres réunis en un volume, les annexes sont regroupées en un deuxième volume afin de ne pas alourdir le texte.

Ces figures et tableaux, sélectionnés dans des séries, ne sont pas pour autant moins importants que le mémoire proprement dit. D'une part, ils témoignent des différentes méthodes de recherche utilisées et, d'autre part, ils peuvent constituer en eux-mêmes des résultats géographiques dans des domaines non encore étudiés.

LIVRE I

LES AGENTS D'EROSION

INTRODUCTION

LES GRANDS TRAITS GEOGRAPHIQUES DU PAYS

La présentation du cadre géographique du Burkina Faso ne fait pas ici l'objet de longs développements. Ces caractères sont présentés de manière beaucoup plus étoffée dans l'ouvrage général de G. Pallier (1978) ou dans celui de M. Marchal (1983), dont le contenu très riche ne s'adresse pas au seul spécialiste de géographie rurale, comme le titre pourrait le laisser croire.

Notre description des grandes lignes du relief, l'évocation du contexte climatique régional traduisent une expérience du terrain, qui ne prétend pas à une connaissance générale du pays mais s'appuie sur de nombreux itinéraires de reconnaissance et sur quelques sites où nous avons longuement travaillé (Fig. I1).

Les données de la structure sont également présentées dans ce chapitre introductif. Elles constituent un résumé qui peut être fait à la lecture des notices des cartes géologiques (Hottin et Ouedraogo, 1975 ; Marcelin, 1971). Enfin, quelques données de géographie humaine rappellent le poids du facteur anthropique dans la dynamique de ces paysages.

1. LES GRANDS TRAITS DE LA STRUCTURE ET DU RELIEF.

1.1 : Le cadre structural.

Le Burkina Faso ne représente qu'un élément du vaste cra-

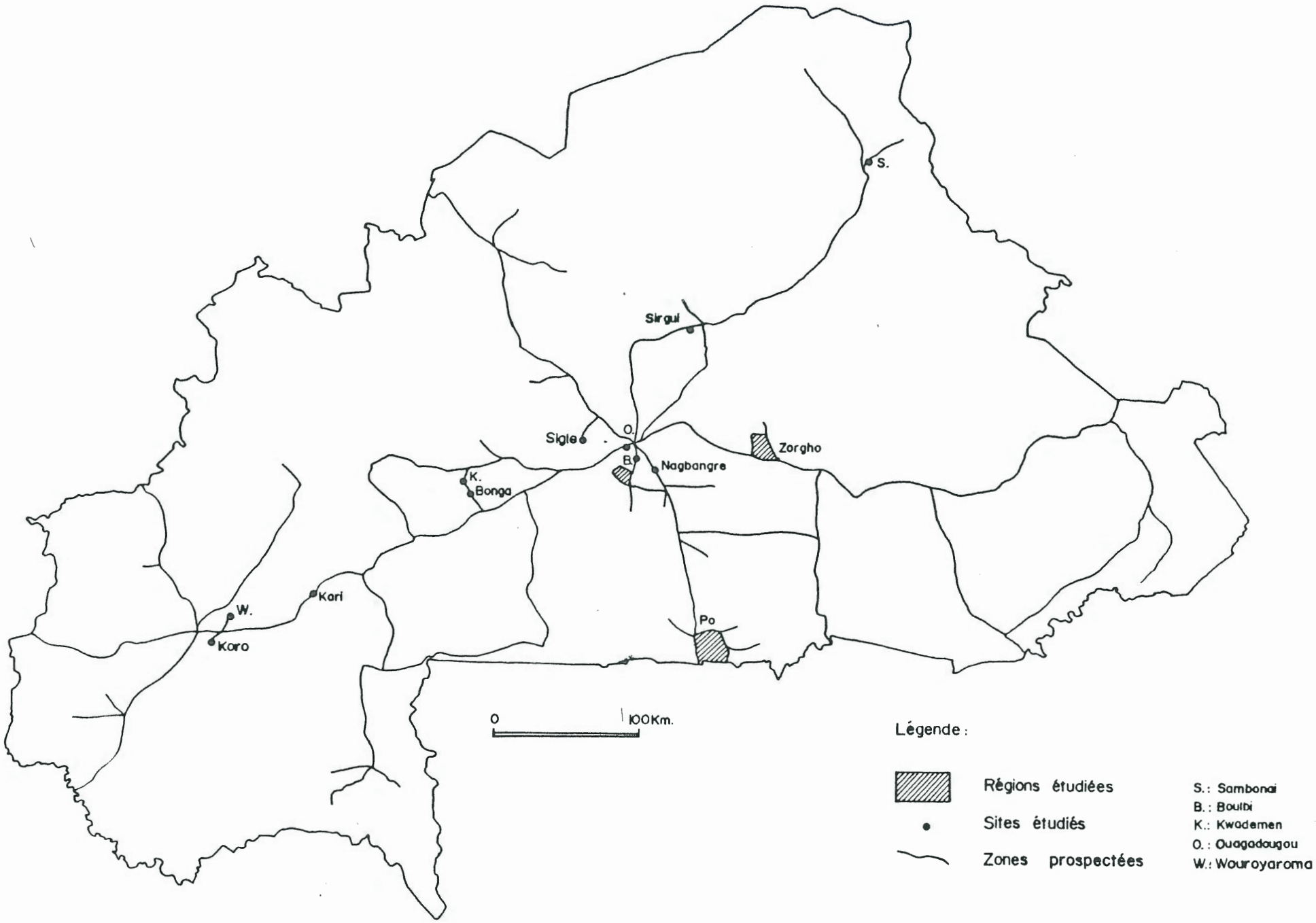


Fig. I.1 : Itinéraires et sites de recherches

ton précambrien ouest-africain. Cette plate-forme est très ancienne puisque son histoire débute, pense-t-on, vers 3000-2700 M.A. Deux phases principales peuvent être schématiquement distinguées au long d'une évolution complexe.

- La première phase correspond à la mise en place progressive du socle. Vers 2400 M.A., le fond régional granito-gneissique antébirrimien (Précambien D) est déformé, morcelé par failles, donnant naissance à des bassins ou sillons envahis par la mer mais également par les émissions volcaniques et plutoniques. La tectonique et le métamorphisme birrimiens (Précambien C) surviennent vers 2100 M.A. et s'exercent sur le matériel des sillons ainsi que sur l'ancien bâti granito-gneissique. Au même moment débute la granitisation éburnéenne qui se traduit par l'intrusion de massifs granodioritiques circonscrits. Cette activité prend fin vers 1600 M.A.

- Après une longue période de calme, durant laquelle peut commencer à se modeler une éventuelle surface d'aplanissement (Beaudet et Coque, 1986), la mer protérozoïque s'installe aux environs de 1300 M.A. et recouvre, sous une faible épaisseur, les marges ouest, nord et sud-est du territoire actuel. Une couverture sédimentaire, dans laquelle dominent des grès de faciès variés, se met en place. Dès lors, exception faite des contrecoups de l'orogenèse gourmaïenne, l'évolution tectonique semble se figer. Les témoins d'une histoire éventuellement plus compliquée sont en tout cas effacés par de longues phases d'altération et d'érosion.

Cette structure géologique peut être caractérisée au total par trois mots-clés : *ancienneté*, *stabilité*, *homogénéité lithologique*. On conçoit que ces termes soient synonymes d'*uniformité morphologique*. La dualité structurale rappelée ci-dessus est à l'origine cependant de l'opposition entre deux catégories de reliefs.

1.2 : Le cadre géomorphologique.

Sur 85% du territoire, le socle de roches cristallines et métamorphiques sous-tend une plaine impressionnante d'uniformité, dont la monotonie n'est rompue que de manière très ponctuelle par de rares inselberge, quelques buttes cuirassées ou, de façon plus linéaire, par les collines de roches basiques des sillons birrimiens.

Sur les marges de ce bouclier, les séries sédimentaires déterminent des plateaux dominant majestueusement la plaine le long de "falaises" ou pseudo-cuestas, dont la plus connue est celle de Banfora (Daveau, 1960). Mais ce contraste n'est perceptible que sur cette ligne de contact.

Partout ailleurs, du moins dans les bas-pays cristallins, le trait dominant de la morphologie est l'immense développement de surfaces planes ou très largement convexes, presque horizontales, où les pentes sont inférieures à 2%.

Les vallées principales des Voltas elles-mêmes incisent à peine ce modelé et l'on débouche toujours avec surprise sur ces axes alluviaux que rien n'annonce. Sur les interfluves, les versants polygéniques prennent le nom de glacis, faute de mieux. Mais les buttes-témoins, perchées d'une dizaine de mètres, sont rares et les amonts rocheux, largement présents dans les paysages méditerranéens, sont ici l'exception. Leur profil tendu est lié au caractère affleurant ou subaffleurant d'une carapace ferrugineuse, qui ne s'interrompt que sur les bas-versants.

Ce modelé de pédiplaines, d'une grande simplicité dans ses lignes, ne traduit qu'en apparence un état de stabilité. Malgré la faiblesse de la pente, le ruissellement diffus ou aréolaire conserve en effet suffisamment d'énergie pour poursuivre son action de décapage des sols.

Deux facteurs introduisent un peu de diversité dans ces paysages : l'un est d'origine structural, l'autre paléoclimatique.

- Dans le premier cas, il s'agit des reliefs résiduels birrimiens

dont les roches basiques (gabbros, dolérites, amphibolites) constituent des crêtes appalachiennes nues ou couronnées localement par des tables cuirassées. Ces indurations ferrugineuses sont plus largement présentes le long de ces collines, dont elles sont coupées par une dépression périphérique. Les glacis ferrugineux divergents offrent ainsi un front de pseudo-cuesta, entaillé par des percées conséquentes qui ne sont plus guère fonctionnelles aujourd'hui. L'augmentation des pentes modifie-t-elle encore sensiblement, dans le contexte climatique actuel, les modalités de la dynamique d'écoulement ? Nous reviendrons sur cette question.

- Au Sahel, les héritages des périodes arides quaternaires se traduisent par des alignements dunaires orientés est-ouest. Ces ergs, en offrant des barrages naturels aux écoulements, ont ainsi déterminé l'occurrence de mares puis la fixation actuelle des populations, qui bénéficient en outre de bons sols sur ces cordons. Soumis à une forte pression anthropique, ce système dunaire se révèle cependant fragile et suffisamment dégradé pour revenir à l'état de dune vive comme à Oursi. Si le ruissellement est très médiocre sur ces sols sableux (Chevallier *et al.*, 1985), la dynamique éolienne est en effet capable de prendre activement le relais durant la saison sèche.

2. LE CONTEXTE CLIMATIQUE REGIONAL.

L'ensemble du territoire du Burkina Faso est soumis à un violent contraste climatique saisonnier. *Toutes les formes de vie*, anthropique, animale, végétale, l'évolution pédologique, au sens le plus large, *sont rythmées par cette stricte alternance*, typiquement tropicale.

La savane[1], faite durant de longs mois de teintes du jaune paille au gris-cendre des feux de brousse, en passant par le rouge des cuirasses ferrugineuses, piquetée de maigres arbustes desséchés par l'harmattan, devient subitement verdoyante avec les premières pluies et totalement méconnaissable en fin d'hivernage (Photos 13-14-15).

La distribution de ces pluies mais aussi des températures et de l'humidité de l'air est soumise en effet au déplacement annuel de deux

(1) *J. Trochain (Schnell, 1970) définit la savane comme "un tapis graminéen ouvert, tout au moins au niveau du sol, de hauteur variable, parsemé d'arbustes clairsemés".*

masses atmosphériques bien distinctes : l'une constituée d'air boréal, continental, sec, subsident; l'autre d'air maritime et humide, d'origine australe. Toutes deux s'affrontent le long du front inter-tropical (F.I.T.) qui oscille entre le 5ème ou 6ème parallèle en janvier, au sud de la Côte d'Ivoire, et le 22ème parallèle, en août, au nord de la boucle du Niger. Ce balancement est lié, on le sait, au mouvement apparent du soleil et au renforcement successif des centres d'action dans chacun des deux hémisphères. Les moteurs de cette circulation sont à rechercher aux latitudes sub-tropicales. Ce sont durant l'hiver boréal, l'anticyclone des Açores et les cellules anticycloniques sahariennes puis, durant l'hiver austral, l'anticyclone de Sainte-Hélène. Les uns et les autres émettent tour à tour, vers les basses latitudes, des vents plus ou moins réguliers appelés alizés (1).

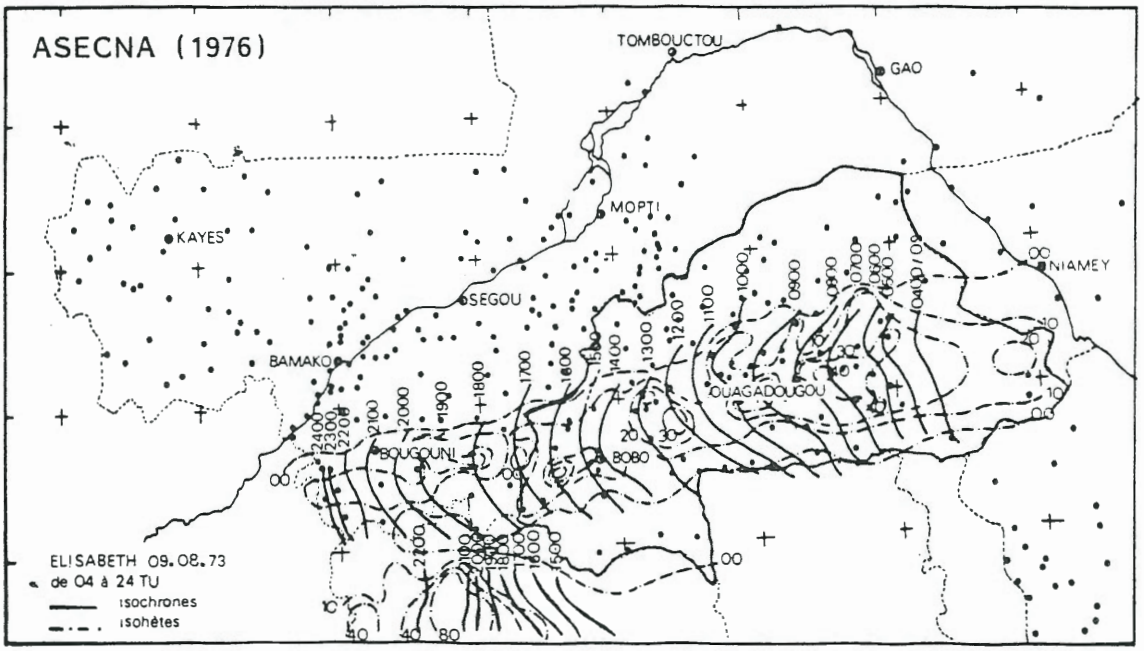
L'alizé du nord-est souffle entre les mois de novembre et d'avril : c'est l'harmattan, générateur de brumes sèches. A partir de mai, il cède la place au flux de sud-ouest que l'on peut qualifier de mousson. Il s'agit en effet d'un alizé austral dévié, soufflant à l'origine vers le nord-ouest jusque vers l'Equateur puis vers le nord-est du fait de la force de Coriolis et des dépressions thermiques sahariennes d'été, qui contribuent à l'aspirer dans cette direction. Dans un pays au relief aussi peu différencié, les pluies sont essentiellement liées à des perturbations d'origine cinématique ou frontale et non pas orographique. Toutefois, le rôle des reliefs, même mineurs comme les pseudo-cuestas gréseuses, n'est pas négligeable comme nous le verrons.

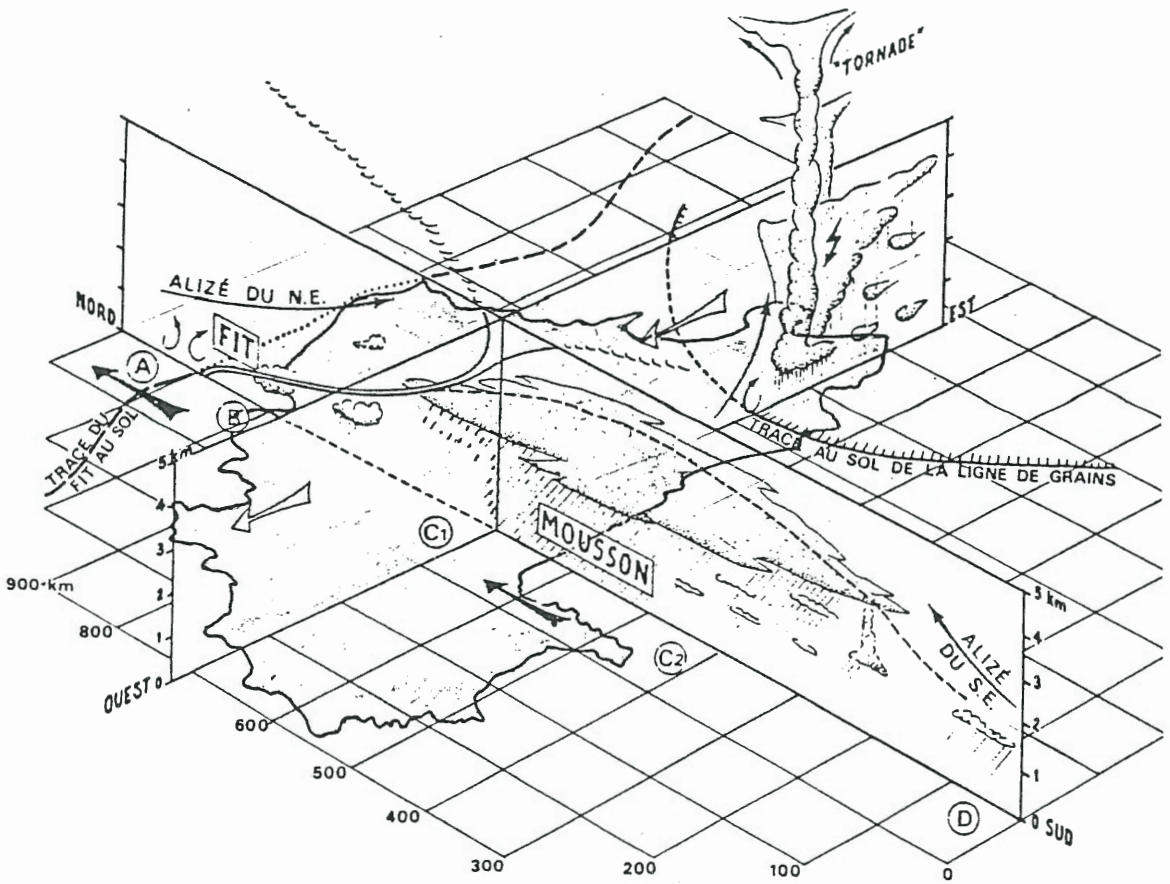
Ces perturbations sont génératrices de *deux types d'averses* principales qui se succèdent dans le temps :

- d'une part, les lignes de grains, associées généralement à des ondes de l'est et se déplaçant à contre-courant du flux de surface normal, se produisent à peu de distance (300 kilomètres environ) au sud du F.I.T. (Fig. I.2). Elles affectent le pays durant la phase d'installation mais aussi de retrait de la mousson. Toutefois, la progression du F.I.T. vers le nord étant deux fois plus lente que son repli, avec de nombreuses pulsations à l'échelle même de la journée, ces lignes de grains, particulièrement violentes, sont les plus fréquentes en début

---

(1) Les mécanismes climatiques strictement atmosphériques ne sont pas étudiés ici. On se reportera notamment aux travaux de M. Leroux (1983).





d'après J. Demangeot (1976)

Fig. I.2 : La mousson au-dessus du Burkina Faso (situation en juin-juillet) et déplacement des lignes de grains.

d'hivernage. C'est là un phénomène morphogénique capital puisque ces tornades s'abattent sur un sol ne bénéficiant pas d'un couvert végétal protecteur ;

- d'autre part, les systèmes orageux ponctuels ou généraux au pays caractérisent le corps même de la mousson (zone C2 des climatologues). Les averses consécutives, occasionnellement abondantes, sont généralement moins intenses mais plus durables et plus fréquentes que les lignes de grains. Ces différences pluvio-génétiques, liées à un dispositif de battement zonal, induisent évidemment des oppositions régionales et latitudinales concernant le total pluviométrique annuel et le nombre de jours de pluies. L'un et l'autre diminuent vers le nord, qui n'est que peu ou pas affecté par le corps de la mousson du fait d'une remontée trop limitée du F.I.T. vers le Sahara. Les variations interannuelles de précipitations sont également plus importantes sur la marge sahélienne. Cependant, c'est l'ensemble du pays qui a subi une sécheresse grave et prolongée depuis la fin des années soixante ; l'année 1984 marquant, espérons-le, la fin de cet épisode néfaste pour la population.

3. LES HOMMES DANS LEUR MILIEU.

Le milieu naturel des savanes nous intéresse pour lui-même, mais aussi et surtout parce qu'il est *le cadre de vie d'une population*. Celle-ci, nombreuse dans certaines régions, toujours très largement rurale, est profondément ancrée dans ses terroirs. Elle conditionne passablement la morphogenèse actuelle en modifiant les recouvrements végétaux et aussi la structure de surface des sols. Quelques exemples permettront dans les chapitres IV et V de souligner l'importance de ces interactions.

Il suffit, au niveau de cette introduction, de rappeler quelques données relatives à la démographie et aux modes de vie, pour mesurer le poids de ce facteur anthropique. La population résidente du Burkina Faso est estimée, en 1985 (INSD, 1986) à 7,9 millions d'habitants, soit une densité moyenne de 28,8 hab./km^2 sur ce territoire de 274 200 km^2.

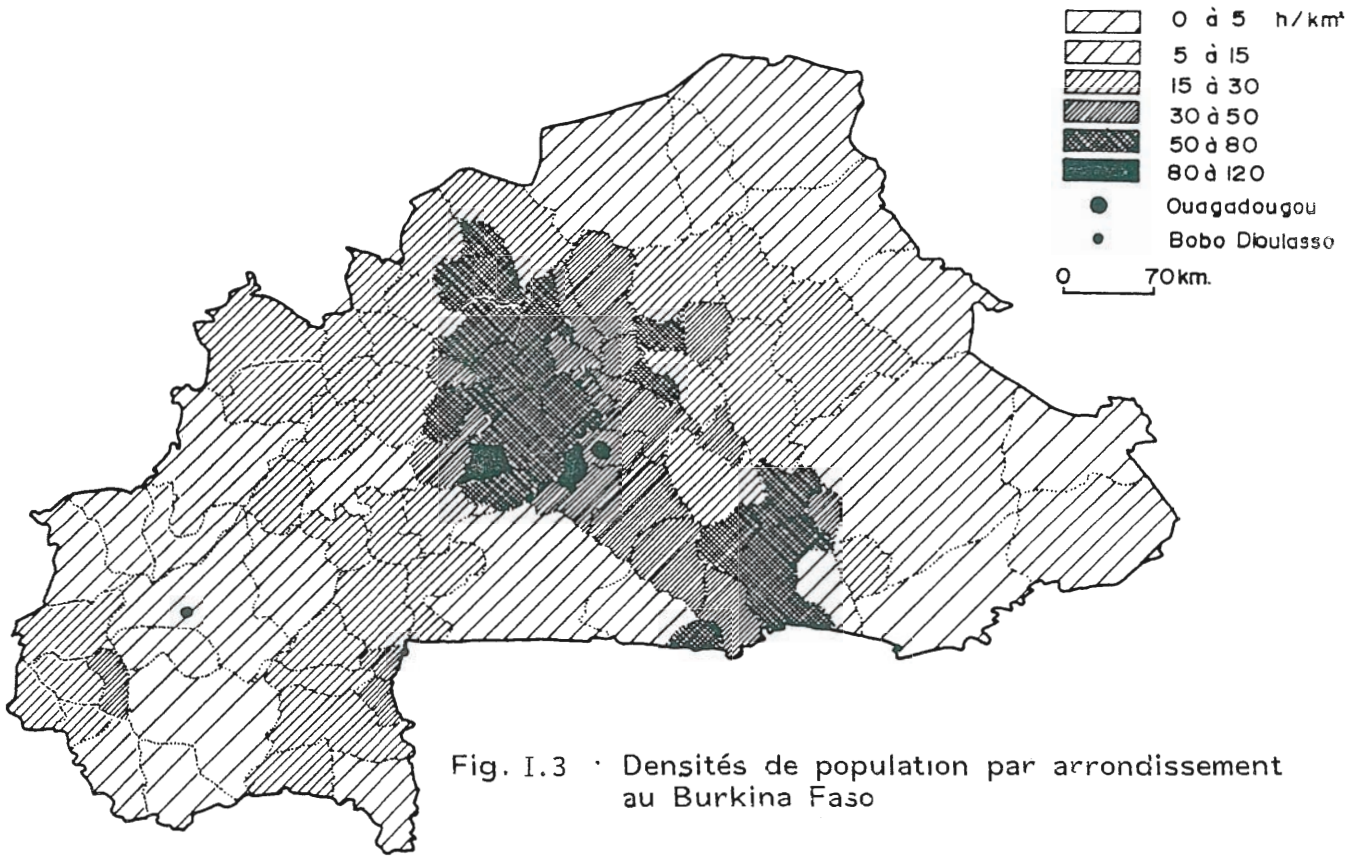


Fig. I.3 · Densités de population par arrondissement au Burkina Faso

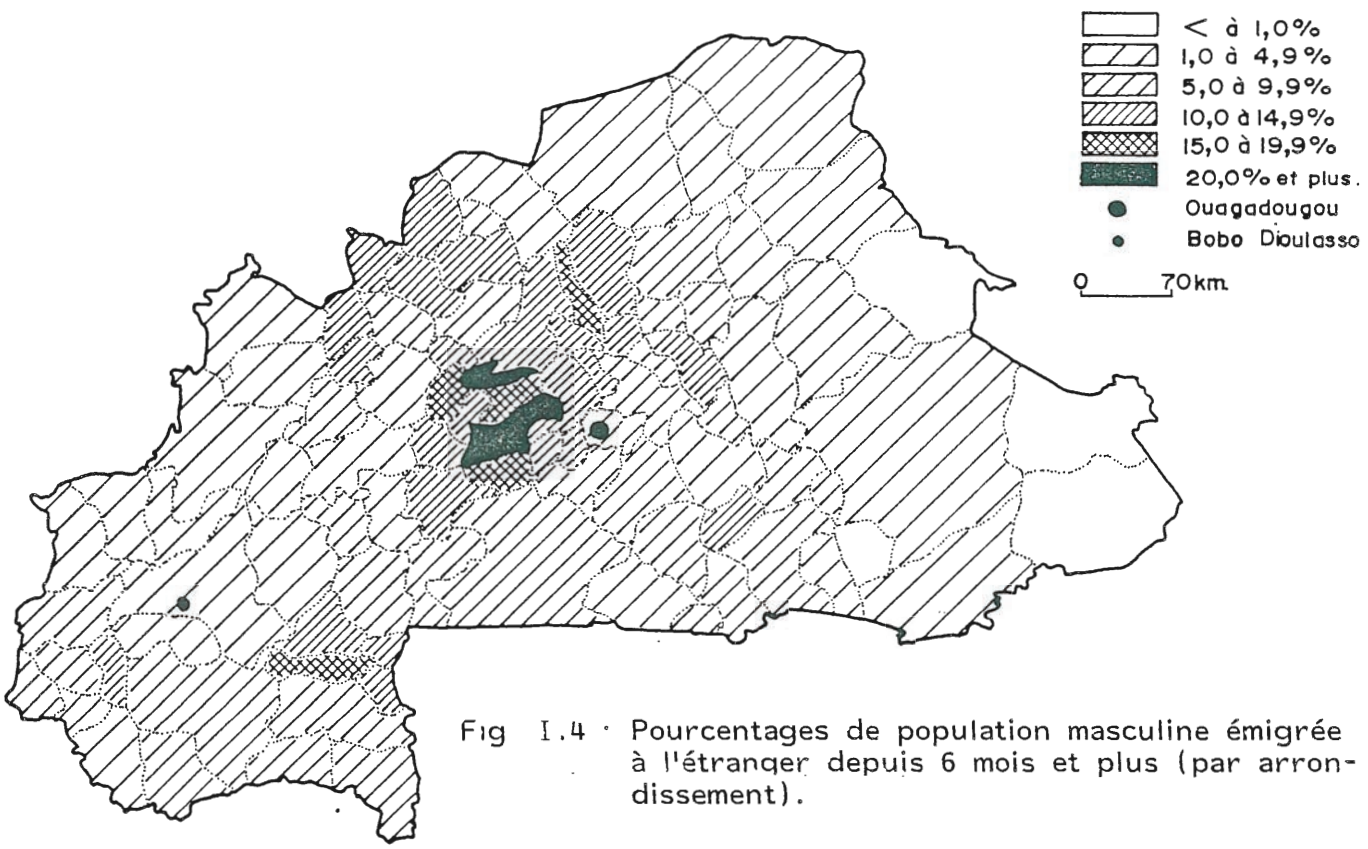


Fig I.4 · Pourcentages de population masculine émigrée à l'étranger depuis 6 mois et plus (par arrondissement).

Sources : Recensement démographique 1975.

Cette valeur, déjà élevée pour un pays soudanien et égale à celle de Côte d'Ivoire (28,5 hab./km²), masque en fait de grandes inégalités régionales (Fig. I.3). Les noyaux de forte densité sont concentrés en pays mossi, au centre du pays, avec des maximums qui peuvent atteindre 120 hab./km² (arrondissements de Sapone et de Koudougou) ou du moins dépasser 50 hab./km² sur l'axe Ouagadougou-Ouahigouya ainsi qu'au sud-est (Tenkodogo) et dans le nord bissa (Garango). Les densités sont d'ailleurs partout soutenues à la périphérie du pays mossi. Elles ne s'abaissent qu'au Sahel, où la pression des hommes est cependant vive compte-tenu des difficultés écologiques, ainsi qu'à l'est du territoire (pays gourmantché) et dans une partie de l'ouest. Le taux d'accroissement de la population est au minimum de 20‰ et l'émigration (Fig. I.4) vers les seules réserves de terres du sud-ouest, ou plus sûrement vers l'étranger(1), constitue une manière de survie. Ces départs qui soulagent les communautés rurales sur les plans alimentaire et financier peuvent représenter toutefois, dans le même temps, un handicap vis-à-vis de certains projets d'aménagement, pour lesquels une force de travail supplémentaire est sollicitée. Quoi qu'il en soit, les ruraux forment encore l'immense majorité de la population : 91% de la population résidente totale au recensement de 1975. Les surfaces cultivées par individu peuvent s'abaisser jusqu'à 30 ares dans le pays mossi (Pallier, 1978). Le système agraire est cependant *un système extensif*, dont la production (mil et sorgho essentiellement) augmente davantage par *extension des superficies et diminution des temps de jachères* que par amélioration des rendements. Le couvert végétal, déjà fragilisé par les années de sécheresse, est profondément dégradé par ces pratiques culturales.

La croissance des villes, qui a suivi le rythme de l'exode rural, prend le relais dans ce processus de dégradation. En effet, les problèmes d'alimentation en eau et surtout en bois(2), seule source d'énergie à faible coût, sont particulièrement cruciaux dans les centres urbains, notamment à Ouagadougou (170.000 habitants recensés en 1975)

---

(1) *La population administrative du Burkina Faso étant estimée, en 1985, à 8,7 millions d'habitants, les émigrés sont au nombre de 800.000 environ.*

(2) *M.M. Ouedraogo (1974) estime la consommation de bois de Ouagadougou à plus de 80 000 tonnes par an pour l'ensemble de la ville, dont 15 000 tonnes pour la seule fabrication du dolo (bière de mil locale).*

et Bobo-Dioulasso (120.000 habitants). La pénurie de bois à la périphérie de ces agglomérations oblige les charretiers (et les camionneurs !) à un ravitaillement de plus en plus lointain, qui affecte ponctuellement les galeries forestières des vallées des Voltas. Dans ces vallées, des aménagements gouvernementaux récents ont conduit également à l'ouverture de "blocs" agricoles, peut-être nécessaires, mais constituant des domaines rendus vulnérables vis-à-vis des différents agents d'érosion.

Au total, les pratiques culturales traditionnelles comme les mouvements récents de population vers les villes ou vers d'autres régions sous-peuplées ou délaissées, concourent à fragiliser un milieu tropical de savane soumis en outre à des dynamiques climatiques agressives.

1ère PARTIE

Les agents directs de l'érosion : extrêmes atmosphériques et variations microclimatiques

CHAPITRE I

LES PRECIPITATIONS

Par delà le schéma de circulation des masses d'air au-dessus du pays expliquant, comme on l'a vu, l'opposition généralisée d'une saison humide et d'une saison sèche, il existe en fait une diversité régionale fondée principalement sur deux caractéristiques des précipitations : le total annuel et la durée de la saison pluvieuse. Trois zones ont été ainsi définies suivant les classifications classiques d'Aubreville ou Richard-Molard (Renard, 1966 ; Pallier, 1978). Ce sont (Fig. 1.1) :

- la zone sud-soudanienne, située au sud de l'isohyète 1000 mm, avec de part et d'autre du 3ème méridien ouest un secteur occidental plus arrosé, caractérisé par des reliefs marqués ("falaise" de Banfora) et un secteur oriental autour de Léo et de Pama ;

- la zone nord-soudanienne comprise entre les isohyètes 1000 et 650 mm ;

- la zone sahélienne au nord de l'isohyète 650mm.

Sans remettre fondamentalement en question ces oppositions régionales, il s'agit pour nous de voir comment elles ont évolué en fonction d'une sécheresse persistante depuis plus de dix ans puis, dans ce contexte, d'apprécier de manière détaillée tous les paramètres pluviométriques ayant une implication sur le plan morphogénique.

1.1 LES HAUTEURS DE PLUIES : TOTAUX ANNUELS ET CLASSES DE PLUIES, LEUR TENDANCE ACTUELLE.

1.1.1 Les totaux annuels :

L'évolution climatique récente peut être mise en évidence de

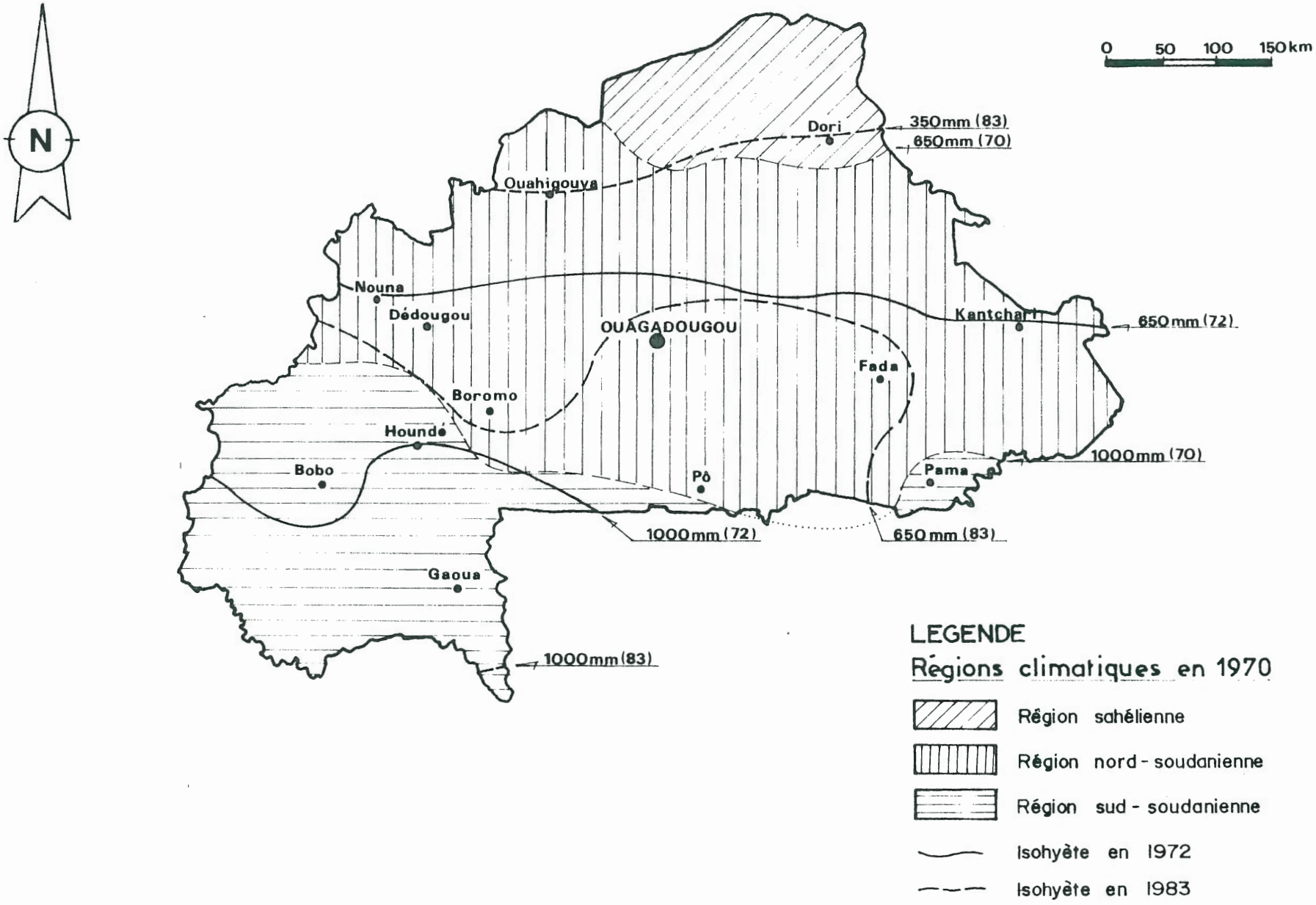


Fig. 1.1 : Les régions climatiques en 1970 et les accidents climatiques récents (1972 et 1983).

différentes façons :

- L'une d'elles consiste à représenter le tracé des isohyètes moyennes décennales.

C'est, par exemple, la méthode utilisée par C. Puech (1983) pour l'ensemble de l'Afrique de l'Ouest. A l'échelle du Burkina Faso, ce travail a été réalisé par J.P. Carbonel (Albergel *et al.*, 1984). La figure 1.2 montre les variations spatiales des isohyètes au cours des six dernières décennies et leur recul vers le sud, depuis la décennie 1950-60, de manière beaucoup plus rapide que ne l'avait été la "montée" précédente.

Le déplacement latitudinal de l'isohyète 500 mm est de plus d'un degré vers le sud, atteignant presque Ouahigouya (567 mm de moyenne sur la période 1971-80) alors que cette même ligne borde l'extrême nord du pays pour les années cinquante. L'isohyète 900 mm se replie davantage, de près de deux degrés sur certains méridiens (3°W et 1°E). Encore ce découpage par décennies est-il arbitraire ! La prise en compte des données jusqu'en 1984 accentuerait encore le phénomène, l'année 1983 notamment ayant été plus déficitaire que 1972 (Fig. 1.1), sans que cela n'éveille les mêmes échos dans la presse internationale.

- Le tracé des moyennes mobiles arithmétiques, annuelles ou mensuelles, constitue une seconde méthode pour illustrer l'évolution actuelle des précipitations. Nous y avons eu recours pour un ensemble de six stations, situées respectivement dans la partie sud du domaine strictement soudanien (Pô - Tiébélé), centrale (Zorgho, Koupela) puis septentrionale, sub-sahélienne (Ouahigouya) ou sahélienne (Dori) (Fig. 1.3 à 1.5) ; les postes où les séquences étudiées sont relativement courtes (Zorgho, Tiébélé) étant couplés avec la station plus ancienne, la plus proche.

Ces six localités sont en outre situées entre le méridien d'origine et le méridien 2°26'W, c'est-à-dire dans l'axe du pays.

Même s'il est vrai que ces courbes sont dépendantes du temps de base choisi (ici 5 ans) et présentent l'inconvénient de centrer des phénomènes qui ne sont pas en coïncidence avec l'observation réelle (Olivry, 1983), elles suffisent, dans notre cas, à mettre en

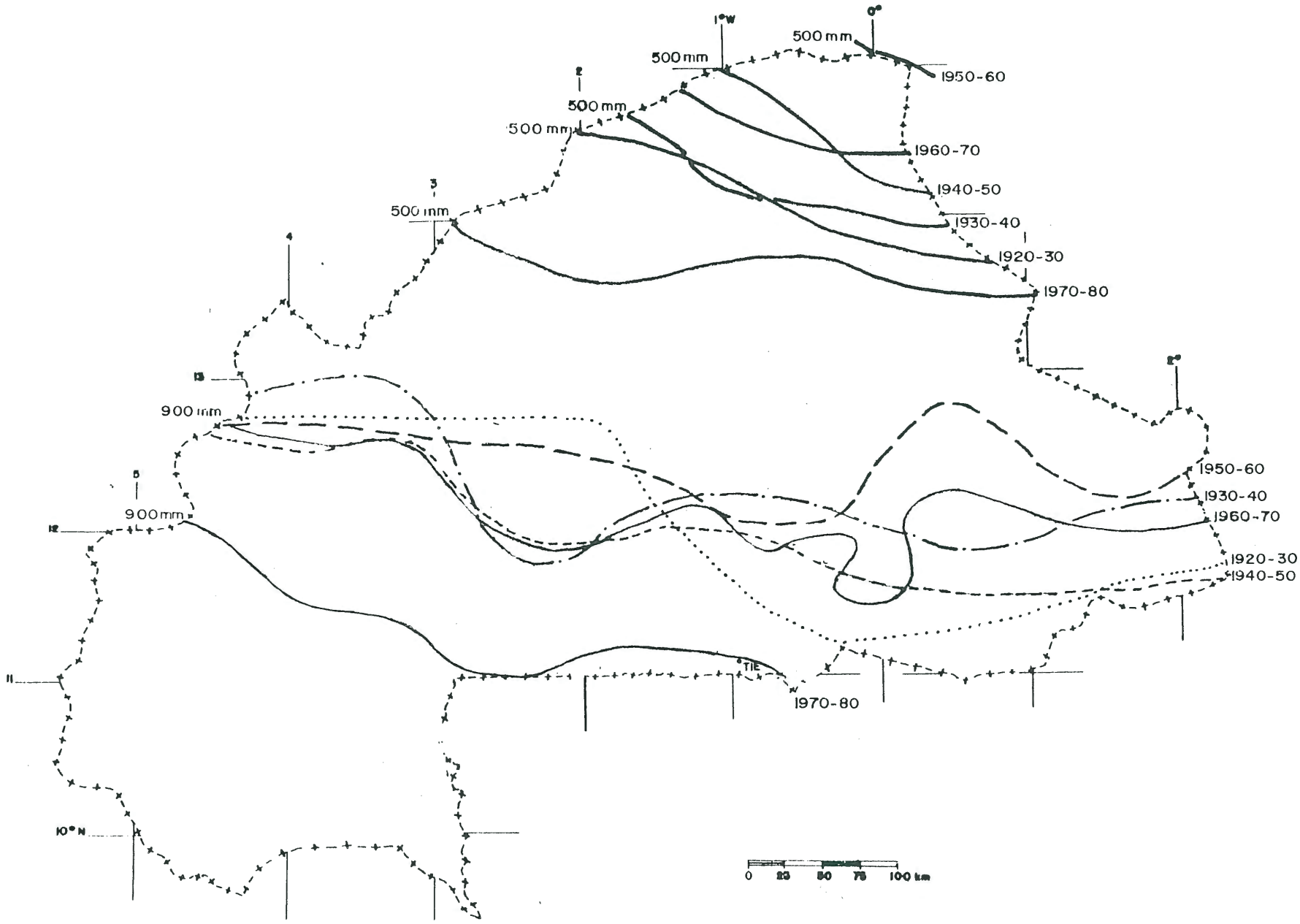


Fig. 1.2 : Variations des isohyetes 500 et 900mm au cours des 6 dernières décennies d'après Albergel *et al.*, 1984.

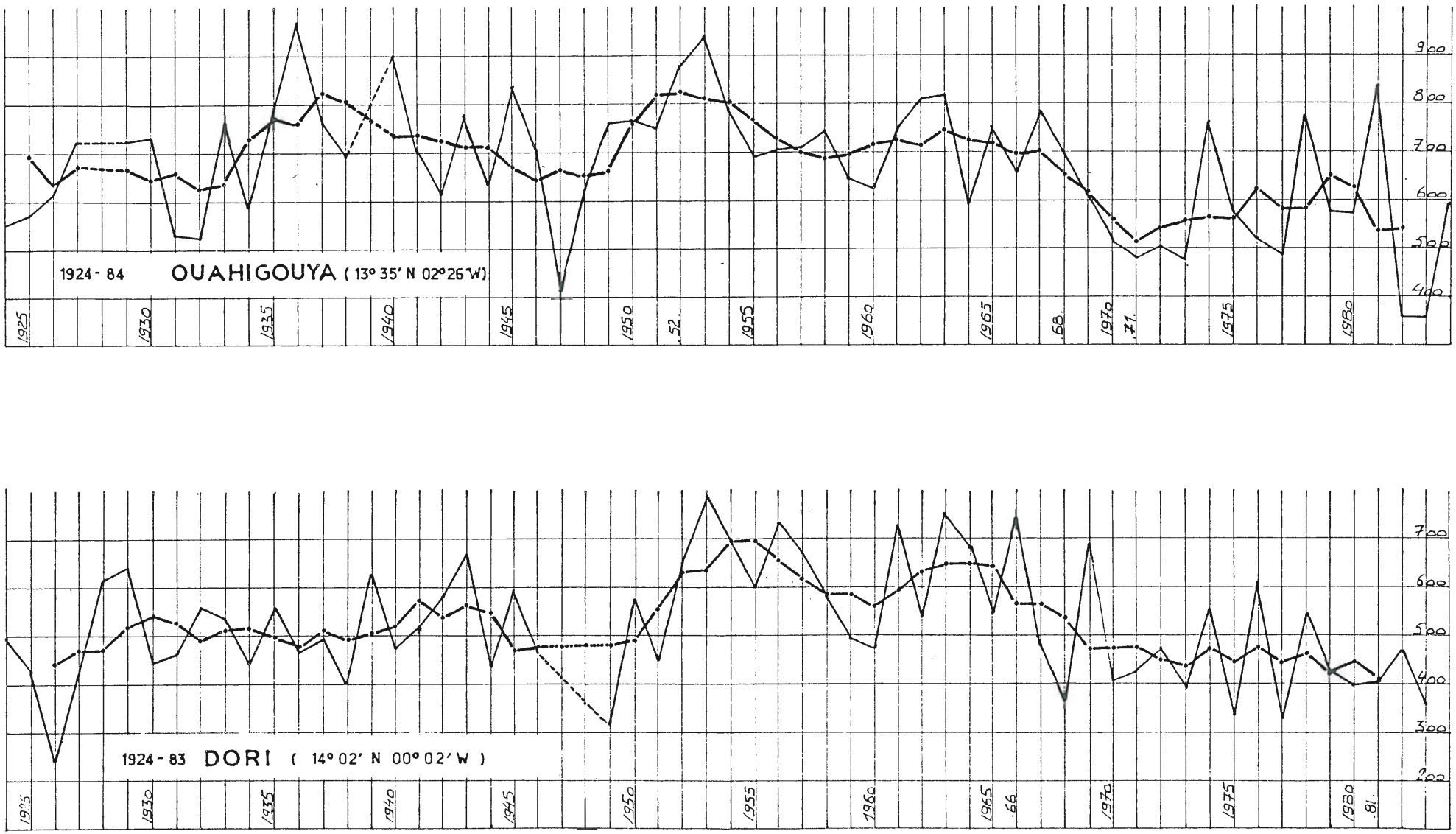


Fig. I.3 : Tendance des précipitations annuelles. Moyennes mobiles annuelles à Dori et Ouahigouya.

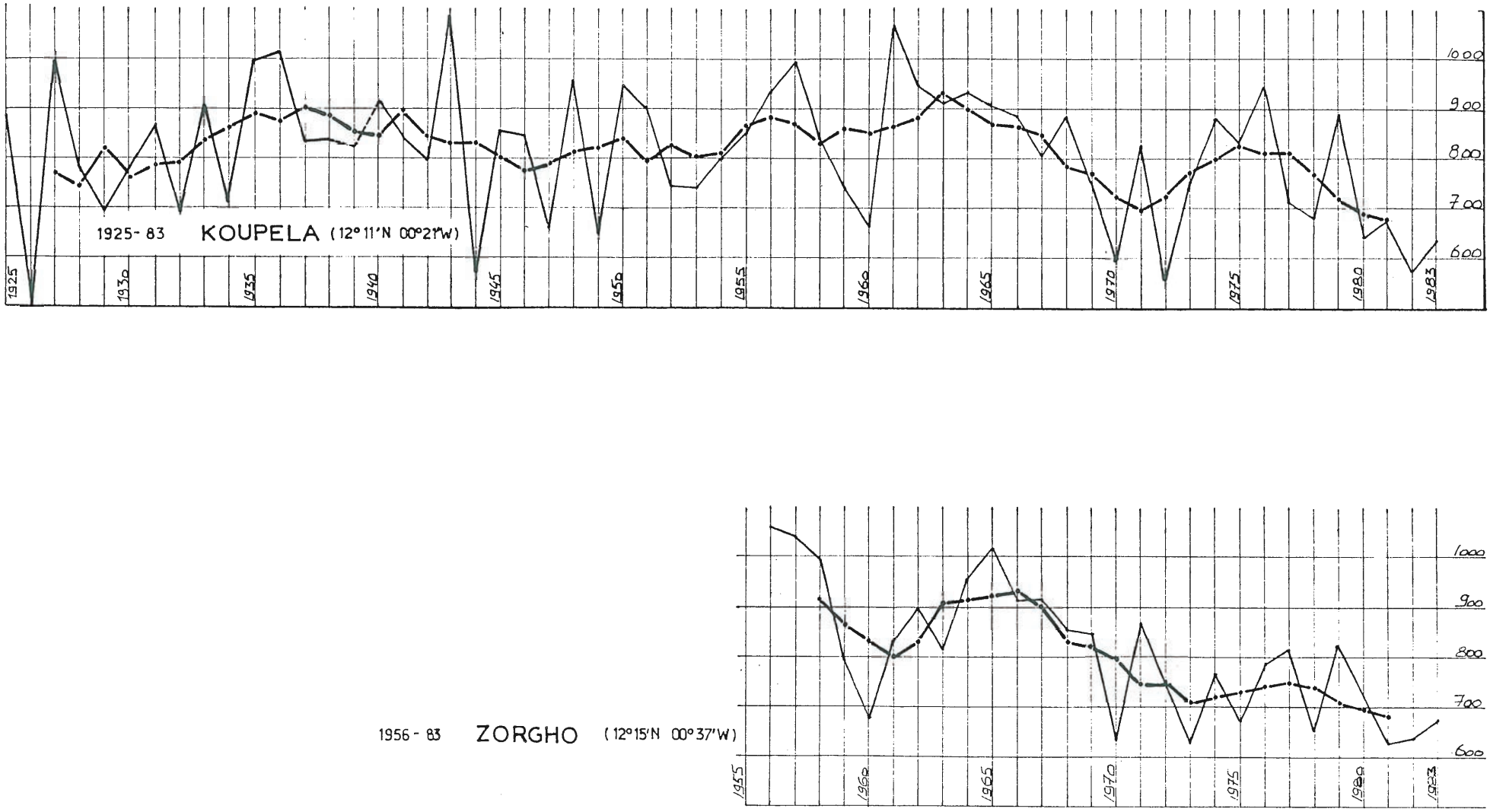


Fig. I.4 : Moyennes mobiles des précipitations annuelles à Koupela et Zorgho.

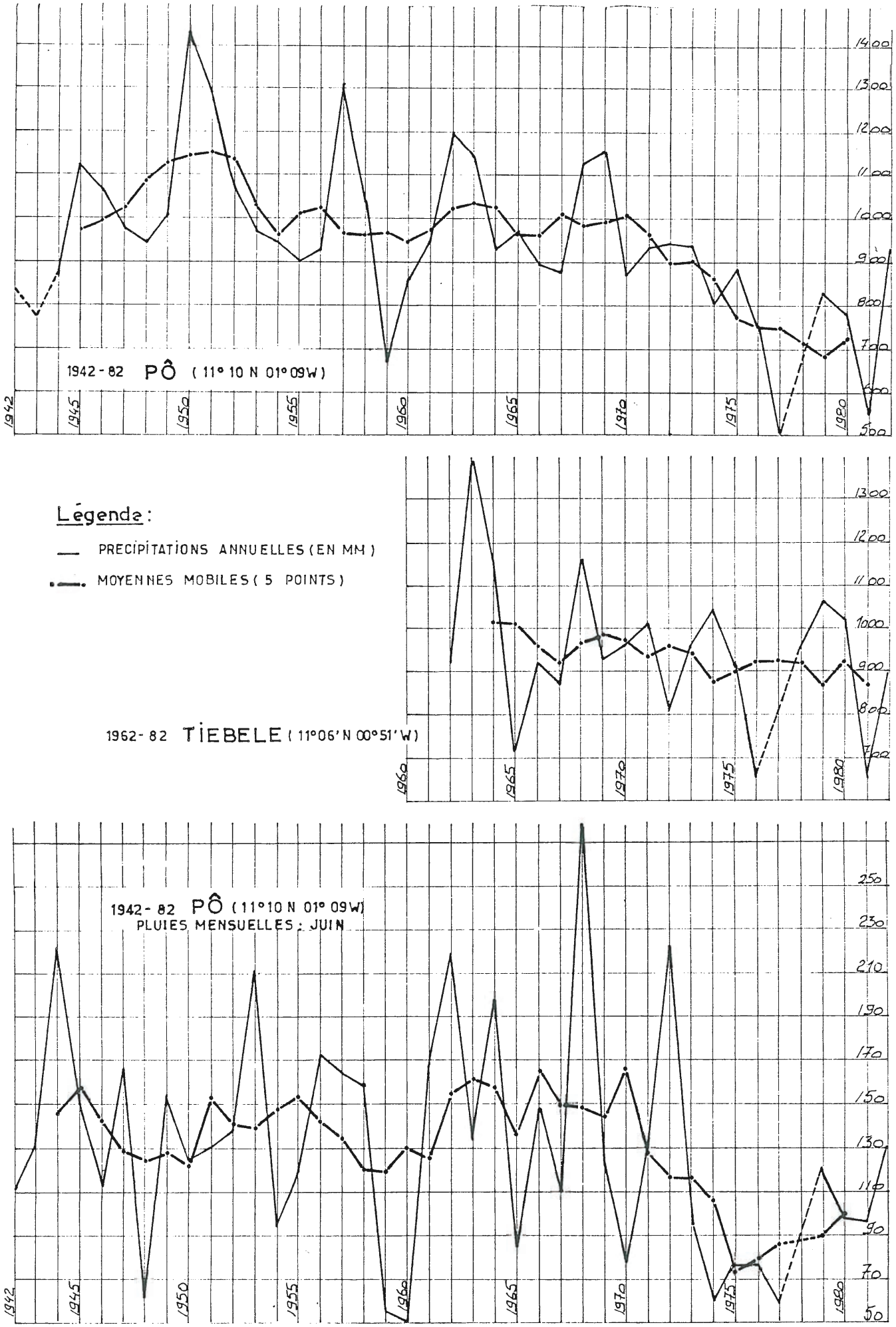


Fig. I.5 : Moyennes mobiles annuelles et mensuelles à Pô et Tiébélé.

évidence une tendance. Il apparaît ainsi que la phase sèche actuelle a débuté non en 1972 ou 1973 mais bien souvent dès le milieu des années soixante ; le déficit pluviométrique atteignant des records en 1983 aussi bien au nord qu'au sud du pays (- 47% à Ouahigouya, - 42% à Pama par rapport à la moyenne 1951-80). C'est dire si dans l'analyse des échantillons de pluies (ou de débits) le problème de la période de référence doit être désormais abordé. C'est ce que nous avons réalisé dans l'étude des classes de hauteurs de pluies.

1.1.2 Les classes de hauteurs de pluies :

L'étude des classes de hauteurs de pluies est conduite sur les six stations précédemment citées[1] auxquelles on a adjoint celle de Gonse (Roose, 1978). Les tableaux détaillés correspondants figurent en annexes (Tab. A.11.1 à A.11.7) tandis que les deux postes les plus éloignés (Léo et Dori) sont présentés également à titre d'exemples dans le texte (Tableau 1.1). Les données principales, relatives aux classes, sont regroupées sur le tableau 1.2. L'ensemble de ces valeurs permet de constater que :

- le nombre moyen annuel de jours de pluies passe pour ces sept stations de 66 (Léo) à 45 (Dori).

A l'échelle du territoire, la fourchette est d'ailleurs beaucoup plus large, comprise entre 97 jours à Niangoloko, à l'extrême sud-ouest, et 37 jours à Gorom-Gorom, au Sahel (Fig. 1.6). Toutefois, la diminution régulière dans la moitié nord du pays fait place à une grande variabilité entre stations dans le Sud, en fonction, semble-t-il, des topographies locales (sites de vallées, collinéens, d'abri, etc...) : à titre d'exemple, Pô enregistre 61 jours de pluies contre 74 à Zabre, 55 kilomètres à l'Est seulement.

- le pourcentage des petites pluies (inférieures à 10 mm), par rapport au nombre total des averses, augmente en revanche régulièrement du Sud au Nord, passant de 45% à Pô à près de 60% à Dori (Tableau

---

(1) *Le(s) poste(s) de Ouagadougou, qui semble constituer un îlot pluviométrique particulier (Sircoulon, 1976), a été délaissé.*

DORI (1925 - 1978) MOIS CLASSES	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	TOTAL PAR CLASSE	POURCENTAGE PAR RAPPORT AU NOMBRE TOTAL DES PLUIES n=49
0 - 10	2	4	13	35	132	146	311	351	233	79	3	3	1312 /n= 26,8	59,2%
10 - 20	1	0	3	4	28	63	104	146	86	21	1	0	457 /n= 9,3	20,6%
20 - 40	0	1	0	2	15	40	85	125	60	9	0	0	337 /n= 6,9	15,2%
40 - 60	0	0	0	1	3	8	31	35	12	2	0	0	92 /n= 1,9	4,2%
60 - 80	0	0	0	0	0	4	5	4	1	0	0	0	14 /n= 0,3	0,6%
> 80	0	0	0	0	0	0	2	0	1	0	0	0	3 /n= 0,1	0,1%
TOTAL PAR MOIS	3	5	16	42	178	261	538	661	393	111	4	3	2215 /n= 45,2	100,0%
POURCENTAGE DES PLUIES >40 mm PAR RAPPORT AU NOMBRE DE PLUIES DU MOIS	0,0%	0,0%	0,0%	2,4%	1,7%	4,6%	7,1%	5,9%	3,6%	1,8%	0,0%	0,0%		

LEO (1921 - 1978) [Excepté 1940-1965] MOIS CLASSES	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	TOTAL PAR CLASSE	POURCENTAGE PAR RAPPORT AU NOMBRE TOTAL DES PLUIES n=
0 - 10	5	13	58	146	195	228	276	345	327	180	31	5	1809 /n= 32,3	48,6%
10 - 20	1	2	18	38	98	147	127	211	218	55	6	1	922 /n= 16,5	24,8%
20 - 40	1	0	8	31	83	107	132	189	148	34	10	2	745 /n= 13,3	20,0%
40 - 60	0	0	4	12	12	13	44	50	34	11	0	1	181 /n= 3,2	4,9%
60 - 80	0	1	0	5	6	3	11	13	7	0	0	0	46 /n= 0,8	1,2%
> 80	0	0	1	1	0	1	8	8	3	0	0	0	22 /n= 0,4	0,6%
TOTAL PAR MOIS	7	16	89	233	394	499	598	816	737	280	47	9	3725 /n= 66,5	100,0%
POURCENTAGE DES PLUIES > 40 mm PAR RAPPORT AU NOMBRE DE PLUIES DU MOIS	0,0%	6,3%	5,6%	7,7%	4,6%	3,4%	10,5%	8,7%	6,0%	3,9%	0,0%	11,1%		

Tableau 1.1 : Répartition des classes de hauteur de pluie à Léo et à Dori.

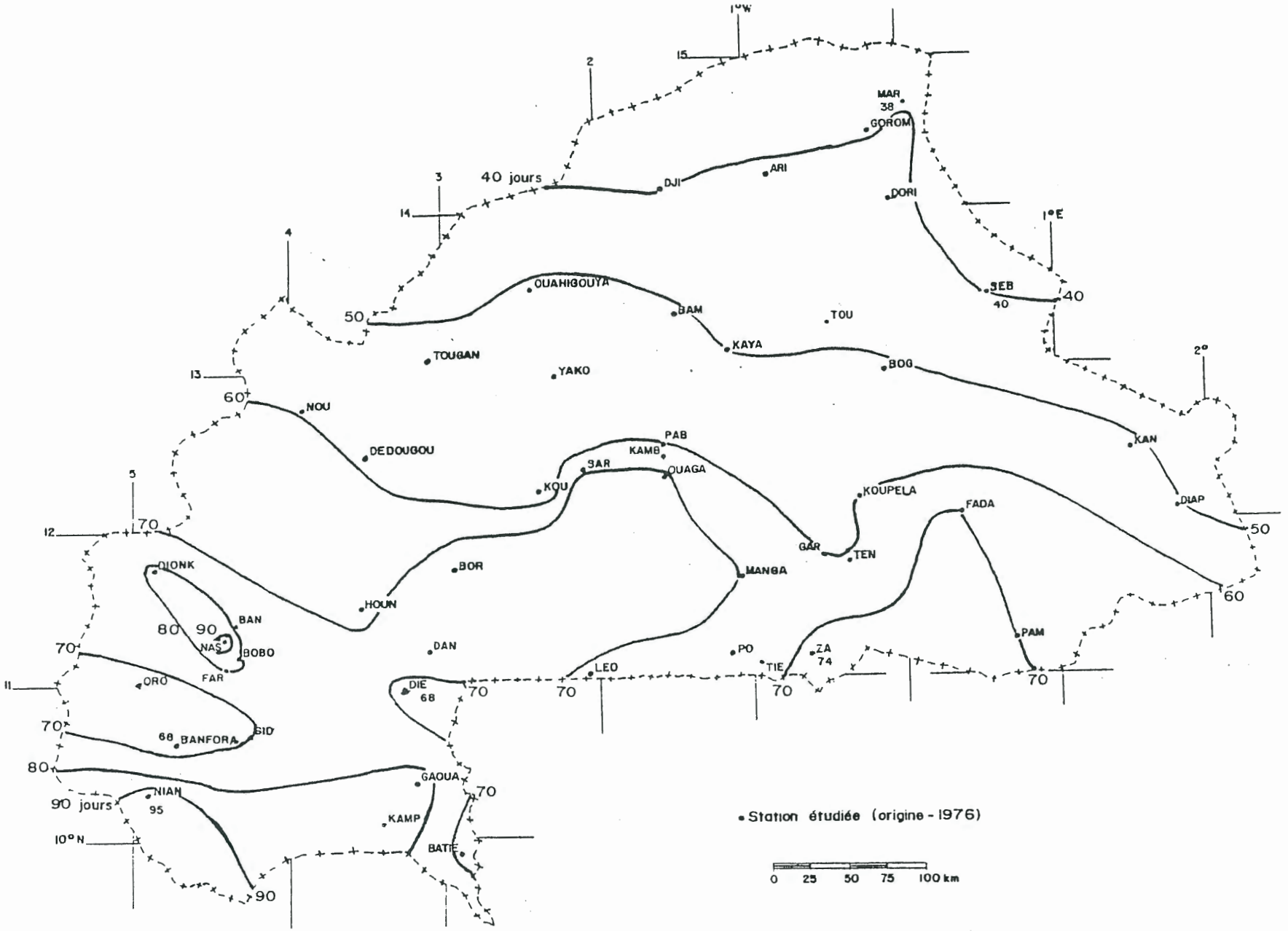


Fig. 1.6 : Nombre moyen de jours de pluies (d'après C. Baidy, 1980 - légèrement modifiée).

Classes en mm Stations	0-10	10-20	20-40	40-60	60-80	> 80
DORI	59,2	20,7	15,2	4,2	0,6	0,1
OUAHIGOUYA	55,8	22,3	16,4	4,1	0,9	0,5
ZORGHO	47,3	25,6	20	5,8	0,7	0,6
KOUPELA	53,4	22	18,5	4,2	1,1	0,8
GONSE	52,3	26,9	16,3	3,2	1,3	0
PÔ	45,5	26,2	21,6	4,9	1,2	0,6
LEO	48,6	24,8	20	4,8	1,2	0,6

Tableau 1.2 : Fréquence (en %) des classes de hauteurs de pluie en différentes stations du nord au sud du Burkina Faso.

1.2.). Corrélativement, les pourcentages des pluies les plus fortes (supérieures à 40 mm) mais aussi moyennes diminuent.

Si l'on s'en tient, dans un premier temps, à ce seul critère de hauteur de pluie, l'agressivité climatique est donc moindre au Sahel mais aussi les possibilités de forts ruissellements, seuls susceptibles d'atteindre les mares ou les barrages qui conditionnent la vie des éleveurs.

- Quelle que soit la latitude, le mois potentiellement le plus agressif, si l'on se réfère aux averses supérieures à 40 mm, est indifféremment juillet ou août.

- Enfin et surtout, si l'on classe les échantillons suivant deux périodes de référence, dont l'une correspond à la dernière décennie (Tableau 1.3), il se confirme que la sécheresse actuelle est liée principalement à une diminution (de l'ordre de 5% du total pluviométrique) des pluies supérieures à 40 mm. Pareil constat avait été fait auparavant par J.P. Carbonel (Albergel *et al.*, 1984). Toutefois, le résultat singulier de Dori (- 0,2% seulement) nous a incité à étendre cette recherche à l'ensemble des stations sahéliennes. Il s'avère ainsi que Markoye, poste le plus septentrional, enregistre même une augmentation du pourcentage des pluies supérieures à 40 mm (+ 1%) tandis qu'Aribinda n'a un déficit que de 2,6%. Seuls Gorom-Gorom (- 4,9%) et Djibo (- 4,6%) plus à l'Ouest connaissent une situation identique au reste du pays. Au Sahel, les précipitations supérieures à 40 mm sont essentiellement liées à des lignes de grains ou à des orages locaux et non à des pluies de mousson. On peut donc raisonnablement émettre l'hypothèse que, plus au Sud, en zone de savane, *la baisse du total des pluies supérieures à 40 mm, affecterait principalement le corps même de la mousson.*

A ce stade, il est nécessaire de s'arrêter sur les implications morphogéniques que peuvent avoir ces modifications pluviométriques qualitatives et quantitatives. Un examen simpliste consisterait à assimiler la baisse des totaux annuels, comme du pourcentage des plus fortes averses, à une diminution des risques d'érosion. En fait, le phénomène est plus complexe car la sécheresse s'accompagne, de manière directe, d'une dégradation du couvert végétal, notamment par modi-

Pluies > 40 mm		% du nombre de pluies	% des précipitations totales	
Stations	Périodes de références			
LEO 11° 06'N 02° 06'W	1921-1978 (≠ 1940 et 1965)	6,6	24,7	- 4,3%
	1973-1978	5,3	20,4	
PÔ 11° 10'N 01° 09'W	1942-1982 (≠ 1943 et 1978)	6,7	22,5	- 4,4%
	1973-1982	3,9	18,1	
KOUPELA 12° 11'N 00° 21'W	1923-1983 (≠ 1924)	6,1	29,6	- 7,7%
	1973-1983	5,6	21,9	
ZORGHO 12° 15'N 00° 37'W	1956-1982	7,1	25	- 5,6%
	1973-1982	5,2	19,4	
OUAHIGOUYA 13° 35'N 02° 26'W	1924-1984 (≠ 1939 et 1983)	5,5	23,2	- 4,8%
	1973-1984	3,2	18,4	
DORI 14° 02'N 00° 02'W	1924-1984 (≠ 1947, 1948 et 1980)	4,9	21,2	- 0,2%
	1973-1984	4,0	21,0	

Tableau 1.3 : Diminution de la classe des pluies supérieures à 40mm en liaison avec la sécheresse actuelle.

fication progressive des espèces, surtout dans les phases, difficiles, de reconquête après défrichement. D'autre part, elle agit indirectement sur le milieu en pesant sur les activités humaines :

- chez les éleveurs, elle détermine ainsi une surcharge pastorale autour des rares points d'eau, une désertification ponctuelle rapidement évidente ;

- chez les agriculteurs, elle favorise le caractère extensif de leurs activités, les défrichements accrus (notamment vers les bas-fonds), seuls susceptibles de pallier la chute des rendements par unité de surface. La fragilisation du milieu, plus insidieuse dans ce cas, n'en est pas moins réelle. Nous y reviendrons.

1.2 LES FREQUENCES DES PRECIPITATIONS.

Du fait de l'extrême variabilité spatiale et temporelle des précipitations (Mietton, 1980 ; Baldy, 1985), elle-même liée aux perturbations de type orageux, les valeurs pluviométriques moyennes ont peu de sens en zone tropicale. *Seules les analyses fréquentielles permettent de prendre en compte les évènements exceptionnels à travers leur durée de retour.*

On sait le caractère fondamental de ces études en agronomie : à titre d'exemple, la connaissance des seuils minimums de pluviosité annuelle ou mensuelle suivant de faibles à très faibles fréquences (0,1 à 0,01%) permet de préciser les éventuels besoins en eau d'irrigation. De la même façon, la méthode établie par P. Franquin (1969) s'appuie sur une approche fréquentielle pour comparer les précipitations décadaires et l'évapotranspiration potentielle, définir ainsi le début de la saison humide et les meilleures chances de succès pour les semis (Ouattara *et al.*, 1982).

En géomorphologie, c'est *la connaissance des maximums pluviométriques qui importe du fait de leur efficacité morphogénique. Leur durée de retour permet de mieux cerner la vitesse d'évolution actuelle des modelés.*

En dehors de ces accidents climatiques, il est nécessaire de caractériser en outre, par leur fréquence, chacune des années, chacun des mois d'expérimentation sur le terrain de manière à donner une véritable signification à nos résultats.

1.2.1 : Récurrences des précipitations annuelles et mensuelles :

Cette étude statistique a donc porté, de manière préférentielle, sur les deux stations (Pô et Zorgho), où nos dispositifs expérimentaux ont été installés. Ces résultats sont toutefois plus largement significatifs et peuvent être étendus aux zones méridionale et centrale du domaine strictement soudanien.

Le travail a été réalisé sur mini-ordinateur (Apple III) après constitution d'un fichier de données annuelles et mensuelles. Les paramètres des différentes lois ainsi que les quantiles correspondants sont alors estimés. La valeur de l'ajustement est donnée par le test du KHI 2 puis visuellement sur écran et enfin sur papier pour les lois qui paraissent les mieux adaptées. Dans ce cas, il s'agit de la loi de Gauss qui est retenue, comme le montrent les deux exemples suivants, annuel (Zorgho) ou mensuel (Pô en août) ; ces deux exemples (Tableaux 1.4 et 1.5) étant extraits d'une série complète placée en annexes (Tab. A 121.1 à A.121.16).

Les résultats les plus importants extraits de cette série d'analyses préliminaires sont regroupés en deux tableaux (Tableaux 1.6 et 1.7) relatifs aux deux stations étudiées sur 39 et 27 années. Toutefois, ayant soulevé le problème de l'ajustement de la série complète à une même loi, nous y avons ajouté les quantiles des pluies annuelles en prenant comme référence la période 1971-82. On constate que l'écart est significatif puisque de l'ordre de 150 mm à Pô, pour chacune des fréquences retenues ; de 50 à plus de 100 mm à Zorgho. La pluviosité médiane passe ainsi de 953 mm à 801 mm dans le premier cas, de 808 à 718 dans le second et, surtout, on enregistre un quantile inférieur de 640 mm seulement à Pô, équivalent de celui de Zorgho. Une étude plus détaillée ultérieure devrait permettre de savoir si, de manière relative,

Station : ZORGHO : Précipitations annuelles

(12°15'N - 00°37'W)

	X	LOG(X)	SQR(X)
Moyenne :	807.96	6.68	28.33
Ecart type :	135.55	0.17	3.38
Coef.Variation	0.17	0.03	0.08
Mt. ordre 3:	570875000.00	298.75	23198.80
Nb de points:	27		

ESTIMATION DES PARAMETRES

	Lois	Parametre 1	Parametre 2
1	GUMBEL MOMENTS	746.967	105.726
2	GUMBEL M.CARRES	743.541	120.859
3	GUMBEL MAX.VRAI	743.234	113.536
4	FRECHET MOMENTS	6.605	0.131
5	FRECHET M.CARRE	6.601	0.150
6	FRECHET MAX.VRA	6.599	0.147
7	GAUSS	807.963	135.546
8	GALTON	28.329	2.378
9	EXPONENTIELLE	672.417	0.202
10	RACINE MOMENTS	27.259	1.855
11	RACINE M.CARRES	27.198	2.121
12	PEARSON III	22.739	35.531
13	PEARSON V	0.004	1585.370

ESTIMATION DES QUANTILES

(sont soulignés les quantiles retenus dans le texte)

FREQUENCES	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
0.001	542.6	510.0	523.8	573.9	551.2	552.7	389.1	440.2	672.6	560.4	533.6
0.010	585.5	559.0	569.8	605.2	585.7	586.7	492.7	519.7	673.8	596.6	574.1
0.100	658.8	642.7	648.5	662.7	649.7	649.7	634.5	639.3	686.7	661.1	646.7
0.200	696.7	686.0	689.2	694.5	685.4	684.8	693.9	693.1	702.7	695.7	685.9
0.300	727.3	721.1	722.2	721.4	715.8	714.7	736.9	733.4	720.8	724.4	718.5
0.400	756.2	754.1	753.2	747.6	745.7	744.0	773.6	768.7	741.7	751.9	749.9
0.500	785.7	787.8	784.8	775.4	777.5	775.1	808.0	802.5	766.4	780.6	782.6
0.600	818.0	824.7	819.5	807.0	813.8	810.7	842.3	837.0	796.6	812.5	819.3
0.700	856.0	868.1	860.3	845.9	858.7	854.7	879.0	874.7	835.6	850.9	863.5
0.800	905.5	924.8	913.5	899.4	921.2	915.8	922.0	919.9	890.6	902.5	922.9
0.900	984.9	1015.5	998.7	992.3	1030.6	1022.7	981.5	984.3	984.5	988.0	1022.1
0.950	1061.0	1102.5	1080.5	1090.3	1147.8	1136.9	1030.9	1039.5	1078.5	1073.8	1122.0
0.990	1233.3	1299.5	1265.5	1349.6	1464.8	1445.0	1123.2	1146.5	1296.6	1281.1	1365.6
0.999	1477.2	1578.4	1527.5	1825.3	2068.6	2028.9	1226.8	1272.9	1608.7	1605.7	1751.1
KHI2	2.44	1.92	2.03	2.62	2.14	2.14	1.90	1.93	9.08	2.53	2.02

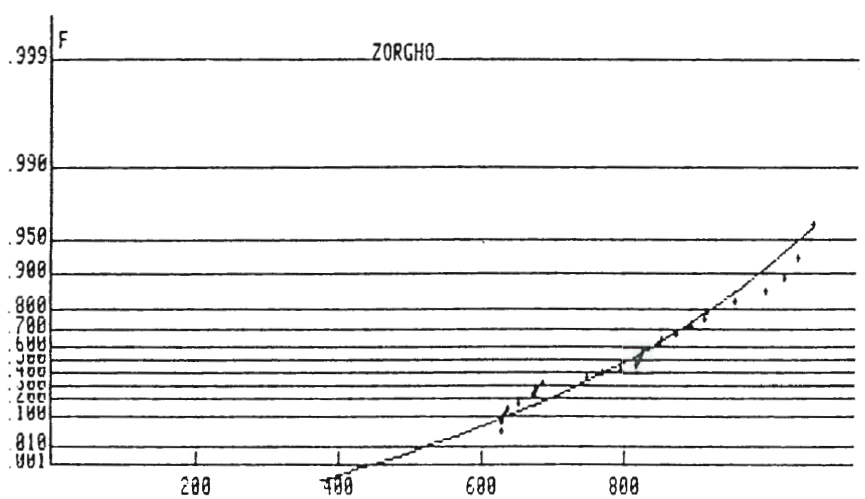


Tableau 1.4 Recurrence des précipitations annuelles à Zorgho. Estimation des quantiles et des paramètres pour différentes lois d'ajustement.

Station : PO AOUT
(11°10'N - 01°09'W)

	X	LOG(X)	SQR(X)
Moyenne :	262.58	5.51	15.96
Ecart type :	91.41	0.38	2.86
Coef.Variation	0.35	0.07	0.18
Mt. ordre 3:	25027700.00	169.23	4442.62
Nb de points:	40		

ESTIMATION DES PARAMETRES

	Lois	Parametre 1	Parametre 2
1	GUMBEL MOMENTS	221.353	71.460
2	GUMBEL M.CARRES	219.509	79.289
3	GUMBEL MAX.VRAI	219.399	80.786
4	FRECHET MOMENTS	5.337	0.294
5	FRECHET M.CARRE	5.330	0.326
6	FRECHET MAX.VRA	5.309	0.420
7	GAUSS	262.580	91.615
8	GALTON	15.957	2.855
9	EXPONENTIELLE	170.965	0.536
10	RACINE MOMENTS	14.672	2.227
11	RACINE M.CARRES	14.615	2.471
12	PEARSON III	31.965	8.215
13	PEARSON V	0.026	213.871

ESTIMATION DES QUANTILES

FREQUENCES

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
0.001	83.2	66.3	63.3	117.9	109.9	89.7	-20.5	50.9	171.1	107.5	96.8
0.010	112.2	98.4	96.0	132.8	125.5	106.4	49.5	86.8	171.9	127.0	117.5
0.100	161.8	153.4	152.0	162.8	157.2	142.4	145.3	151.3	180.6	164.2	157.6
0.200	187.3	181.8	181.0	180.8	176.7	165.5	185.5	183.7	191.4	185.3	180.6
0.300	208.1	204.8	204.4	196.9	194.2	187.0	214.5	209.1	203.6	203.3	200.4
0.400	227.6	226.4	226.5	213.3	212.3	209.8	239.4	232.1	217.8	221.0	220.0
0.500	247.5	248.6	249.0	231.6	232.5	235.9	262.6	254.6	234.5	239.9	240.9
0.600	269.4	272.8	273.7	253.3	256.9	268.2	285.8	278.2	254.9	261.4	264.9
0.700	295.0	301.3	302.7	281.5	288.8	311.9	310.6	304.6	281.3	287.9	294.5
0.800	328.5	338.4	340.6	323.0	336.4	379.9	339.7	337.1	318.4	324.5	335.7
0.900	382.2	397.9	401.2	402.7	429.6	520.9	379.8	384.6	381.9	387.5	407.1
0.950	433.6	455.0	459.3	497.5	543.2	705.0	413.3	426.6	445.4	453.2	482.0
0.990	550.1	584.3	591.0	802.9	924.0	1399.0	475.7	510.7	592.9	620.9	675.1
0.999	714.9	767.2	777.4	1581.1	1959.7	3690.6	545.7	614.1	803.8	903.4	1003.9

KHI2	0.84	0.91	0.93	2.57	2.75	3.88	0.38	0.54	17.83	1.44	1.53

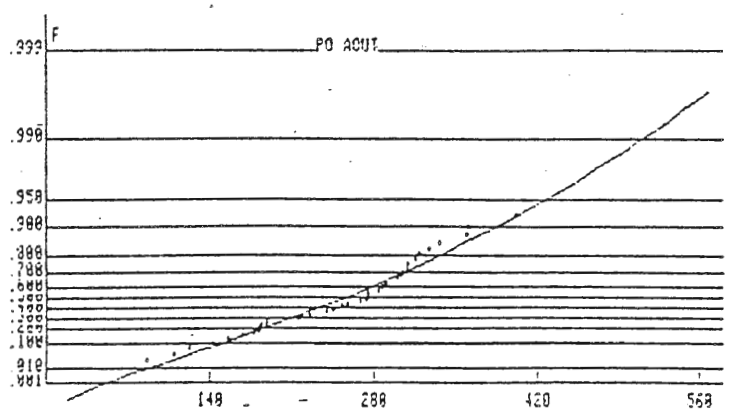


Tableau 1.5 : Récurrence des précipitations mensuelles, en août, à Pô Estimation des quantiles et des paramètres pour différentes lois d'ajustement.

Probabilité P>x (en %)	Durée de retour	Année (Période de référence 1971-82)	Année (1942-78)	Avril (1942-78)	Mai "	Juin "	Juillet "	Août "	Septembre "	Octobre "
0,2	4 années sur 5	640	797	14	54	86	122	185	128	17
0,5	1 année sur 2	801	953	41	93	131	171	263	181	48
0,8	1 année sur 5	973	1108	68	132	175	220	340	235	80

Tableau 1.6 : Analyse fréquentielle des précipitations annuelles et mensuelles à Pô. (Loi normale).

Probabilité P>x (en %)	Durée de retour	Année (Période de référence 1971-82	Année (1956-82)	Avril (1956-82)	Mai "	Juin "	Juillet "	Août "	Septembre "	Octobre "
0,2	4 années sur 5	640	694	2	42	70	130	176	113	10
0,5	1 année sur 2	718	808	24	75	101	178	233	157	33
0,8	1 année sur 5	804	922	45	109	132	225	291	200	56

Tableau 1.7 : Analyse fréquentielle des précipitations annuelles et mensuelles à Zorgho. (Loi normale).

la phase de sécheresse se fait davantage sentir au sud du pays que dans le Centre ou le Nord.

1.2.2 : Récurrences des précipitations maximales journalières :

Les précipitations maximales constituent un paramètre climatique particulièrement décisif dans l'étude de la dynamique de surface. Ces "tornades" constituent en effet l'un des agents, sinon l'agent le plus efficace de la morphogenèse actuelle. Aussi doivent-elles retenir particulièrement l'attention des géomorphologues comme elles ont pu le faire chez des chercheurs de disciplines voisines (Fournier, 1967 ; Hudson, 1973 ; Roose, 1973).

L'étude générale de ces averses exceptionnelles a été entreprise dès le début des années soixante, par les hydrologues, notamment Y. Brunet-Moret de l'ORSTOM (Brunet-Moret, 1963 et 1968). Son travail sur la Haute-Volta a été poursuivi par J.P. Lahaye (1980,a) qui a mis au point une méthodologie généralisée depuis lors à l'ensemble des états membres du CIEH[1] (Lahaye, 1980,b). Ces informations sont, il est vrai, capitales pour les hydrologues ou ingénieurs qui ont à cerner le mieux possible la réalité des crues pour assurer un dimensionnement convenable des barrages.

Cette analyse des plus fortes averses est conduite ici suivant différentes échelles de temps : de la journée à deux ou plusieurs jours consécutifs. D'autre part, elle peut porter sur tous les mois de l'hivernage ou plus précisément, comme nous le verrons, sur les premiers mois de la saison des pluies.

1.2.2.1 : Les précipitations maximales journalières en tout mois.

L'analyse statistique des pluies journalières de fréquence rare réalisée par J.P. Lahaye a porté sur 83 stations totalisant 3041 années de mesures. L'ajustement a été réalisé sur les valeurs rédui-

---

(1) CIEH : *Comité Interafricain des Etudes Hydrauliques.*

tes ($\frac{x}{\bar{x}}$) qui suivent remarquablement bien une même loi de Gumbel.

La synthèse de cette étude peut être illustrée par les deux cartes représentant les isohyètes des pluies décennales et centennales en Haute-Volta (Fig. 1.7 et 1.8). Les premières apparaissent ainsi comprises entre 70 mm au Sahel et 125 mm dans l'extrême sud-ouest du pays ; les secondes entre 100 et 175 mm. Ces valeurs sont évidemment sans commune mesure avec celles de la zone tempérée mais inférieures à celles des régions équatoriales ou sub-équatoriales (230 mm de pluie décennale à Abidjan, d'après Y. Brunet-Moret). Elles augmentent régulièrement du nord au sud du Burkina Faso, dans un rapport de 1 à 1,75, aussi bien pour les pluies décennales que centennales. Les isohyètes ont, du fait d'une opération de lissage, des tracés réguliers, disposés grosso modo suivant des parallèles, hormis à l'extrême sud-ouest du territoire.

On peut également observer que deux régions aussi éloignées que le Sahel et le sud de la Volta Noire enregistrent la même tornade mais avec des fréquences bien différentes. Ainsi la pluie décennale de 110 mm à Diebougou (10°58'N, 03°15'W) correspond - elle à une averse journalière centennale à Gorom-Gorom (14°27'N, 00°14'W) ! Dans l'intervalle, à la station de Ouagadougou-Ville, les résultats, plus complets, sont les suivants :

Durée de retour (ans)	5	10	20	50	100
Fréquence (%)	0,80	0,90	0,95	0,98	0,99
x(mm) selon Lahaye Période de référence 1921-1976, 51 ans	84	97	109	124	137
x(mm) selon Brunet-Moret. Période de référence 1921-1957, 32 ans	92	107	123	147	166

Tableau 1.8 : Fréquences des pluies maximales journalières à Ouagadougou.

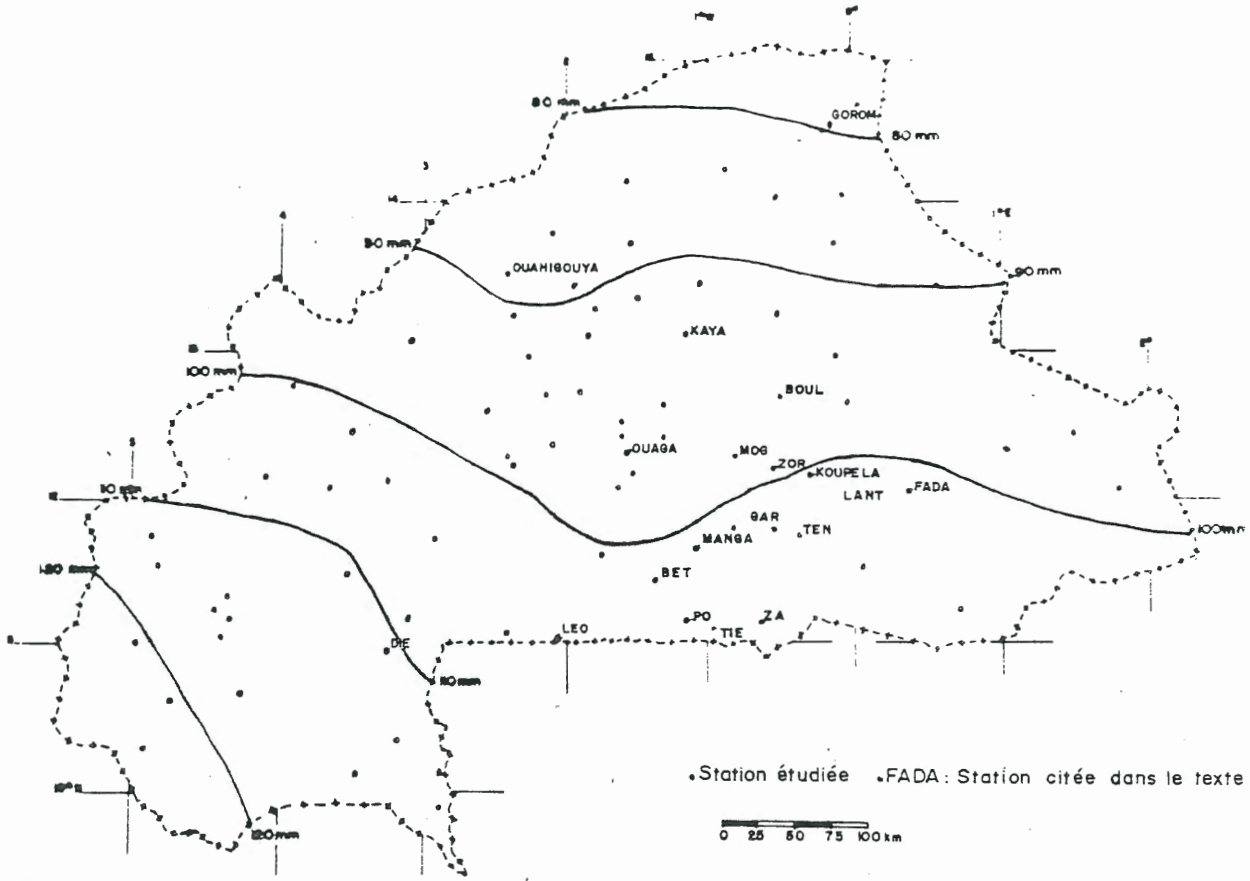


Fig. 1.7 : Isohyètes des pluies journalières maximales annuelles (en mm), de fréquence décennale, d'après J.P. Lahaye (1980 b).

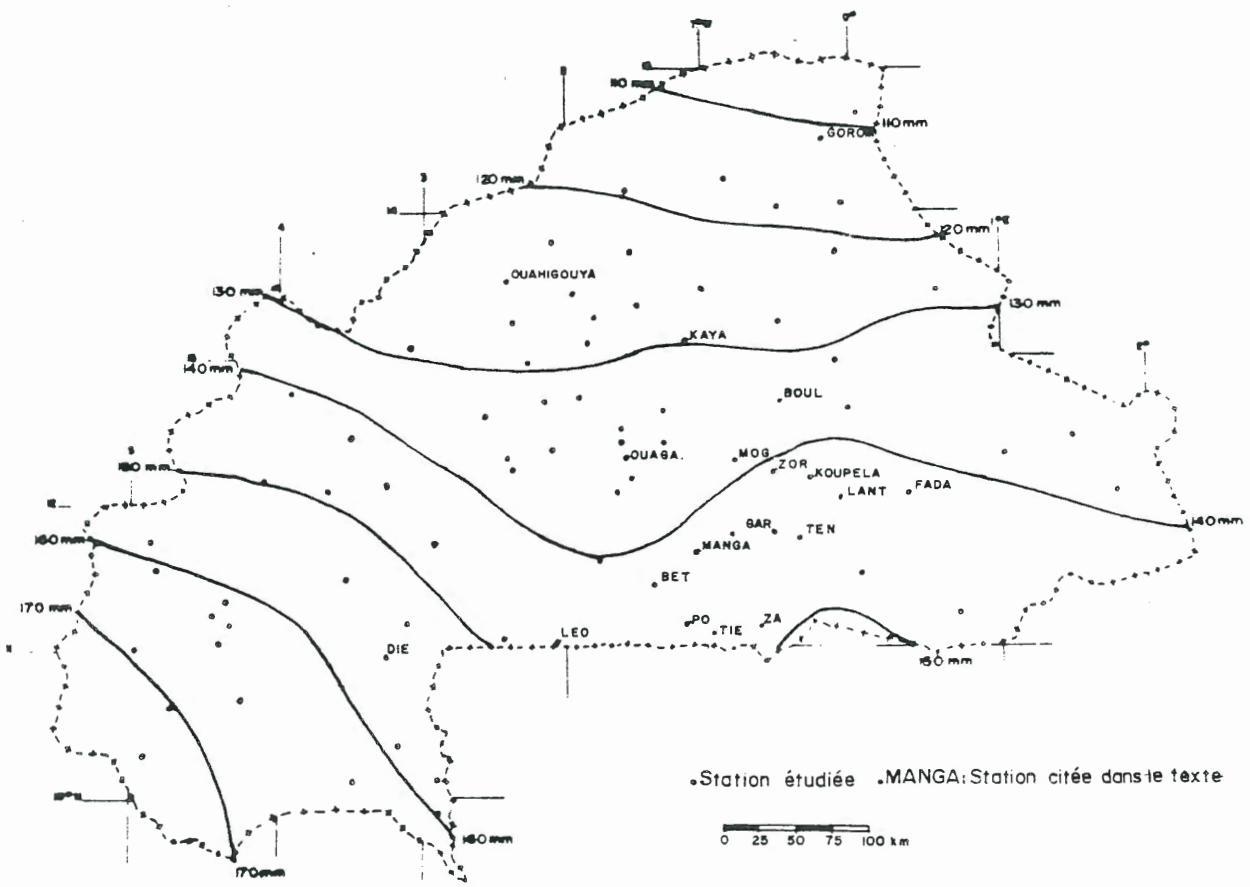


Fig. 1.8 : Isohyètes des pluies journalières maximales annuelles (en mm), de fréquence centennale, d'après J.P. Lahaye (1980 b).

Réalisée entre 1978 et 1980 sur des données allant jusqu'en 1976 ou 1977, l'étude de J.P. Lahaye n'aborde pas le problème de la période de référence. Toutefois, si l'on compare ces résultats avec ceux obtenus par Y. Brunet-Moret vingt ans plus tôt, l'influence de la phase climatique alors toute nouvelle et de la tendance à la sécheresse se fait déjà sentir.

1.2.2.2 : Les précipitations maximales journalières en début d'hivernage :

A la lumière des expérimentations de terrain, il nous est apparu très vite que *la plupart des ruissellements les plus volumineux se placent en début d'hivernage sur des sols peu protégés par le couvert végétal*. Dès lors, il a semblé intéressant, dans notre perspective de travail, de rechercher les fréquences des pluies exceptionnelles durant ces premiers mois (avril, mai, juin). Notre recherche n'a pu s'étendre à l'ensemble du pays, faute de temps. Néanmoins, nous avons constitué un fichier de 1747 données pour 45 stations (3 mois pour chacune des 15 localités choisies et groupées en deux zones Sud et Centre-Est) (Annexes, p. 24-26 et p. 31-34). Moyenne, écart-type, coefficient de variation (CV), paramètres des différentes lois (X_o,S) ainsi que les quantiles, loi par loi, pour chacune des fréquences, sont alors estimés. *Les lois les mieux adaptées* à l'étude de ces phénomènes extrêmes apparaissent incontestablement *celles de Gumbel et de Galton*, qui donnent des résultats assez semblables, à l'exception des fréquences les plus élevées. La formulation exacte des paramètres de la loi de Gumbel dépend en fait de la méthode d'ajustement (méthode des moments, des moindres carrés ou du maximum de vraisemblance) mais, là encore, les quantiles sont très voisins. A titre d'exemple, la station de Pô en juin (Tableau 1.9) est présentée ci-dessous ainsi que les quatre ajustements graphiques les mieux adaptés (Fig. 1.9). La précision de la méthode peut être appréciée grâce au calcul et au dessin, du moins pour la loi de Gumbel avec le programme utilisé, de l'intervalle de confiance à 90% dans lequel s'inscrit la quasi totalité des valeurs. D'une manière plus générale toutefois, il est clair que les ajustements en avril, du fait de coefficients de variation plus élevés, supérieurs à 1 lorsqu'on remonte

Station : PO JUIN

	X	LOG(X)	SQR(X)
Moyenne :	35.03	3.50	5.84
Ecart type :	12.07	0.34	0.99
Coef.Variation	0.34	0.10	0.17
Mt. ordre 3:	59575.90	44.07	216.01
Nb de points:	40		

ESTIMATION DES PARAMETRES

	Lois	Parametre 1	Parametre 2
1	GUMBEL MOMENTS	29.594	9.414
2	GUMBEL M.CARRES	29.351	10.446
3	GUMBEL MAX.VRAI	29.604	9.754
4	FRECHET MOMENTS	3.345	0.268
5	FRECHET M.CARRE	3.338	0.297
6	FRECHET MAX.VRA	3.325	0.368
7	GAUSS	35.025	12.069
8	GALTON	5.836	0.993
9	EXPONENTIELLE	22.956	0.526
10	RACINE MOMENTS	5.390	0.774
11	RACINE M.CARRES	5.370	0.859
12	PEARSON III	4.159	8.422
13	PEARSON V	0.034	103.846

ESTIMATION DES QUANTILES

FREQUENCES

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
0.001	11.4	9.2	10.8	16.9	15.9	13.6	-2.3	7.7	23.0	15.2	13.8
0.010	15.2	13.4	14.7	18.8	17.9	15.8	7.0	12.4	23.1	17.7	16.5
0.100	21.7	20.6	21.5	22.7	22.0	20.5	19.6	20.8	24.2	22.5	21.7
0.200	25.1	24.4	25.0	25.0	24.5	23.3	24.9	25.0	25.6	25.2	24.6
0.300	27.8	27.4	27.8	27.0	26.7	26.0	28.7	28.3	27.3	27.5	27.1
0.400	30.4	30.3	30.5	29.0	28.9	28.7	32.0	31.2	29.1	29.8	29.6
0.500	33.0	33.2	33.2	31.3	31.4	31.8	35.0	34.1	31.3	32.2	32.3
0.600	35.9	36.4	36.2	34.0	34.4	35.6	38.1	37.1	34.0	34.9	35.4
0.700	39.3	40.1	39.7	37.4	38.3	40.7	41.4	40.4	37.5	38.3	39.1
0.800	43.7	45.0	44.2	42.4	44.0	48.3	45.2	44.5	42.4	42.9	44.3
0.900	50.8	52.9	51.6	51.8	55.0	63.7	50.5	50.5	50.7	50.9	53.3
0.950	57.6	60.4	58.6	62.9	68.1	83.1	54.9	55.8	59.1	59.1	62.8
0.990	72.9	77.4	74.5	97.3	110.6	151.4	63.1	66.3	78.5	80.1	86.9
0.999	94.6	101.5	97.0	180.5	219.5	354.2	72.3	79.3	106.3	115.3	127.8
KHI2	0.47	0.71	0.53	0.81	0.99	1.88	0.78	0.56	16.61	0.56	0.72

Tableau 1.9 : Estimation des paramètres et des quantiles suivant différentes lois d'ajustement. Exemple de la station de Pô en juin.

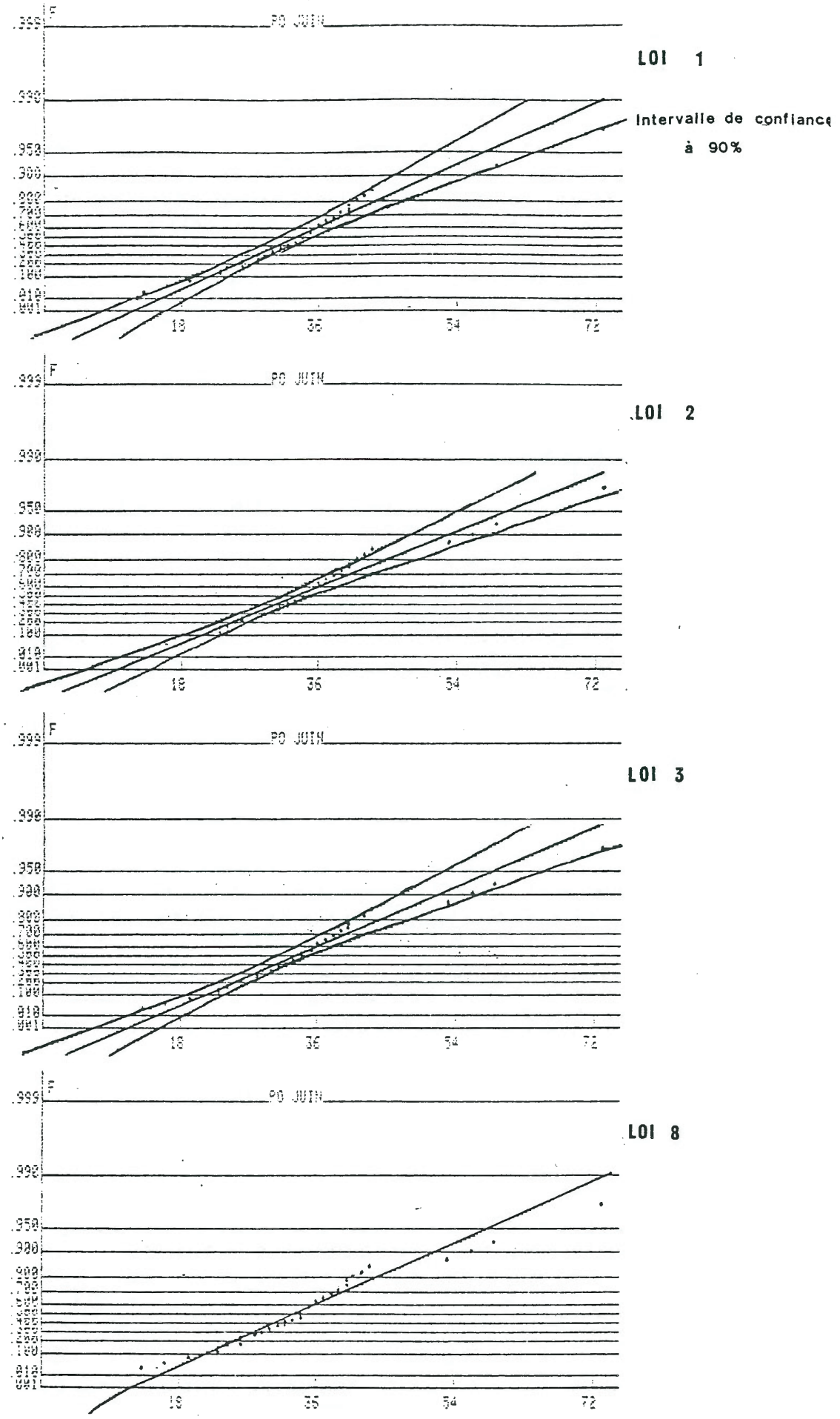


Fig. 1.9 : Ajustements des pluies mensuelles (juin) à Pô suivant les lois de Gumbel et de Galton.

en latitude (Tableau 1.10), sont de moins bonne qualité.

L'ensemble des calculs est regroupé en annexes pour ne pas augmenter inutilement le volume du texte. Leur examen a permis de retenir la loi de Gumbel (moindres carrés) comme méthode d'ajustement globalement bien appropriée et les quantiles correspondants, qui constituent les résultats les plus intéressants pour l'utilisateur (P5, P10, P100), apparaissent en résumé sur le tableau 1.10(1).

Les pluies décennales (P10) et centennales (P100) sont évidemment inférieures à celles calculées par J.P. Lahaye aux mêmes latitudes(2) puisque les averses maximales annuelles sont enregistrées non pas en avril, mai ou juin mais en août ou juillet.

Il est tentant ensuite de rechercher une loi régionale d'ajustement pour l'ensemble des valeurs brutes agglomérées. Cette agglomération semble pouvoir être réalisée entre stations indépendantes (Lahaye, 1980,a) du moins mois par mois ; les coefficients de variation étant assez voisins dans cet intervalle. Cette opération a porté sur les mois d'avril et juin dans la zone méridionale, mai et juin en zone centrale.

La loi de Galton(3) est particulièrement bien adaptée pour les valeurs de juin du secteur Centre (KHI 2 = 0,65) ; la loi de Gumbel (moindres carrés) pour les valeurs d'avril (KHI 2 : 0,78 ; l'ensemble des 204 points étant dans l'intervalle de confiance à 95%). Cette dernière loi sous-estime en revanche la fréquence des averses exceptionnelles en mai et juin.

---

(1) *La station de Lantaogo en juin a été éliminée du fait d'une erreur initiale dans la constitution du fichier (annexe p. 34).*

(2) *Nos stations s'inscrivent entre les isohyètes décennales 100 et 110 mm, les isohyètes centennales 140 et 150 mm.*

(3) *La loi de Galton n'a pu être appréciée sur avril. Lors des premiers traitements, les valeurs nulles de ce mois n'avaient pas été remplacées en effet par -1 ; d'où l'annulation des paramètres et des quantiles pour toutes les lois dans lesquelles les valeurs de base sont des logarithmes.*

Tableau 1.10 Pluies journalières maximales mensuelles en début d'hivernage sur 15 stations du Burkina (Loi de Gumbel-Moindres carrés)

STATION	Long.	Lat.	n	Moy	Sigma	Cv	Xo	S
KAYA AVRIL	01°05'W	13°06'N	59	6,8	10,7	1,56	1,9	9,0
KAYA MAI	01°05'W	13°06'N	59	22,2	17,6	0,79	14,0	14,9
KAYA JUIN	01°05'W	13°06'N	59	32,4	16,1	0,50	24,9	13,6
BOULSA AVRIL	00°34'W	12°35'N	25	12,7	19,9	1,56	3,2	17,9
BOULSA MAI	00°34'W	12°39'N	25	26,6	16,6	0,62	18,7	14,9
BOULSA JUIN	00°34'W	12°35'N	25	37,0	17,8	0,48	28,6	16,0
OUAGA VILLE AVRIL	01°31'W	12°22'N	60	14,4	16,9	1,17	6,6	14,2
OUAGA VILLE MAI	01°31'W	12°22'N	60	31,2	21,2	0,68	21,3	17,9
OUAGA VILLE JUIN	01°31'W	12°22'N	60	34,7	13,7	0,39	28,3	11,5
MOGTEDO AVRIL	00°50'W	12°17'N	17	14,6	16,0	1,09	6,9	14,9
MOGTEDO MAI	00°50'W	12°17'N	17	28,9	17,4	0,60	20,5	16,2
MOGTEDO JUIN	00°50'W	12°17'N	17	33,9	9,5	0,28	29,4	8,9
ZORGHO AVRIL	00°37'W	12°15'N	28	17,6	19,2	1,09	6,5	17,0
ZORGHO MAI	00°37'W	12°15'N	27	31,0	15,9	0,51	23,5	14,1
ZORGHO JUIN	00°37'W	12°15'N	28	37,5	14,4	0,38	30,7	12,8
KOUPELA AVRIL	00°21'W	12°11'N	60	17,3	16,5	0,95	9,6	13,9
KOUPELA MAI	00°21'W	12°11'N	59	33,9	22,0	0,65	23,7	18,6
KOUPELA JUIN	00°21'W	12°11'N	60	37,1	19,4	0,52	28,0	16,4
FADA AVRIL	00°22'E	12°02'N	60	14,6	12,7	0,87	8,7	10,7
FADA MAI	00°22'E	12°02'N	60	30,8	14,5	0,47	24,6	12,3
FADA JUIN	00°22'E	12°02'N	60	30,5	12,6	0,36	29,1	10,6
LANTAOGO AVRIL	00°05'W	12°01'N	17	20,5	17,5	0,65	12,0	16,3
LANTAOGO MAI	00°05'W	12°01'N	17	31,2	13,9	0,44	24,5	12,9
TENKODOGO AVRIL	00°23'W	11°46'N	51	19,4	17,8	0,92	11,1	15,2
TENKODOGO MAI	00°23'W	11°46'N	51	37,2	21,1	0,57	27,3	18,6
TENKODOGO JUIN	00°23'W	11°46'N	51	35,2	18,3	0,52	26,6	15,6
MANGA AVRIL	01°04'W	11°40'N	34	19,7	14,8	0,75	12,8	12,9
MANGA MAI	01°04'W	11°40'N	34	34,5	13,5	0,39	28,1	11,8
MANGA JUIN	01°04'W	11°40'N	34	38,4	19,5	0,51	29,2	17,1
BETARE AVRIL	01°22'W	11°26'N	18	25,5	21,4	0,84	15,2	19,9
BETARE MAI	01°22'W	11°26'N	18	36,1	17,2	0,48	27,8	16,0
BETARE JUIN	01°22'W	11°26'N	18	39,9	18,8	0,47	30,9	17,4
PO AVRIL	01°09'W	11°10'N	39	21,1	14,4	0,68	14,3	12,5
PO MAI	01°09'W	11°10'N	39	36,0	15,5	0,43	28,7	13,5
PO JUIN	01°09'W	11°10'N	40	35,0	12,1	0,34	29,4	10,4
ZABRE AVRIL	00°36'W	11°10'N	30	30,1	17,6	0,58	21,8	15,5
ZABRE MAI	00°36'W	11°10'N	30	40,6	20,2	0,50	31,0	17,8
ZABRE JUIN	00°36'W	11°10'N	30	38,7	17,6	0,45	30,4	15,5
TIEBELE AVRIL	00°58'W	11°06'N	21	34,5	22,4	0,65	23,8	20,4
TIEBELE MAI	00°58'W	11°06'N	23	35,0	16,2	0,46	27,3	14,6
TIEBELE JUIN	00°58'W	11°06'N	23	32,8	16,6	0,51	24,9	15,0
LEO AVRIL	02°06'W	11°06'N	62	28,9	20,4	0,71	19,4	17,2
LEO MAI	02°06'W	11°06'N	63	34,0	14,7	0,43	27,1	12,4
LEO JUIN	02°06'W	11°06'N	62	39,1	22,3	0,57	28,7	18,8

STATION	P5	P10	P100	Maxi observé
KAYA AVRIL	15,4	32,1	43,3	52,0
KAYA MAI	36,3	47,4	82,4	104,0
KAYA JUIN	45,4	55,6	87,6	100,0
BOULSA AVRIL	30,0	43,4	85,4	83,0
BOULSA MAI	41,1	52,2	87,2	65,0
BOULSA JUIN	52,5	64,5	102,1	91,0
OUAGA AVRIL	27,9	38,6	72,1	85,0
OUAGA MAI	46,2	61,7	103,9	123,0
OUAGA JUIN	45,6	54,3	81,4	67,0
MOGTEDO AVRIL	29,3	40,5	75,5	52,0
MOGTEDO MAI	44,8	57,0	95,1	67,0
MOGTEDO JUIN	42,6	49,3	70,1	51,0
ZORGHO AVRIL	34,0	46,8	86,9	61,0
ZORGHO MAI	44,7	55,3	88,5	81,0
ZORGHO JUIN	49,9	59,6	89,7	68,0
KOUPELA AVRIL	30,5	40,9	73,6	55,0
KOUPELA MAI	51,6	65,6	109,4	110,0
KOUPELA JUIN	52,7	65,0	103,6	89,0
FADA AVRIL	24,8	32,8	58,0	68,0
FADA MAI	42,4	51,6	80,4	76,0
FADA JUIN	45,1	53,0	78,0	69,0
LANTAOGO AVRIL	36,5	48,7	87,0	49,0
LANTAOGO MAI	43,9	53,7	84,1	59,0
TENKODOGO AVRIL	33,9	45,3	81,0	79,0
TENKODOGO MAI	54,3	67,7	110,0	123,0
TENKODOGO JUIN	50,0	61,7	98,4	88,0
MANGA AVRIL	32,2	41,9	72,3	68,0
MANGA MAI	45,8	54,6	82,3	68,0
MANGA JUIN	54,8	67,6	107,8	98,0
BETARE AVRIL	45,0	59,9	106,6	78,0
BETARE MAI	51,7	63,7	101,2	70,0
BETARE JUIN	57,0	70,1	111,1	79,0
PO AVRIL	33,1	42,5	71,8	55,0
PO MAI	48,9	59,0	90,7	66,0
PO JUIN	45,0	52,9	77,4	73,0
ZABRE AVRIL	45,1	56,7	93,1	84,0
ZABRE MAI	57,8	71,2	113,1	106,0
ZABRE JUIN	53,7	65,3	101,8	101,0
TIEBELE AVRIL	54,4	69,7	117,7	86,0
TIEBELE MAI	49,3	60,2	94,6	63,0
TIEBELE JUIN	47,4	58,7	94,0	95,0
LEO AVRIL	45,2	58,2	98,6	93,0
LEO MAI	45,7	55,0	84,0	76,0
LEO JUIN	57,0	71,1	115,4	174,0

Une fois encore, si l'on extrait de l'ensemble de ces estimations les quantiles correspondant aux lois les plus performantes, on obtient les résultats suivants, seuls susceptibles d'intéresser l'homme de terrain (Tableau 1.11).

Durée de retour		5 ans	10 ans	100 ans
Pluie (mm)	Avril (Région Sud)	40,6	52	87,8
	Mai (Région Centre)	44,7	56,1	91,9
	Juin (Région Centre)	46,6	56,7	90,5
	Juin (Région Sud)	48,8	58,7	98

Tableau 1.11 : Fréquences des pluies journalières maximales en avril, mai ou juin dans le centre et le sud du Burkina Faso.

La première constatation, à la lumière de ce tableau, est que la différence de valeurs est peu marquée entre tous ces mois. De ce point de vue, à pluies maximales égales, *les risques d'érosion sont plus élevés en avril ou mai* qu'en juin du fait d'une protection encore moindre par le couvert végétal. Ces valeurs sont en outre voisines entre nos deux régions. Si l'on reprend les estimations station par station (tableau 1.10), un gradient latitudinal peut être cependant observé, les pluies maximales journalières se renforçant globalement du Nord au Sud. Certains postes, comme Koupela ou Pô, constituent cependant des îlots particuliers (P10 et P100 à Koupela sont supérieures aux pluies de même fréquence à Pô, située à un degré plus au sud).

D'autre part, les valeurs obtenues après agglomérations sont tout à fait voisines de celles estimées station par station. Un exemple : en mai, P10 est de l'ordre de 55 mm sur les postes de la région centrale si l'on écarte les extrêmes (Kaya et Tenkodogo), P100 comprise entre 80 et 100 mm. Enfin, la lecture comparée sur le tableau 1.10 du

maximum observé et de P100 montre que *ces évènements, que l'on qualifie d'exceptionnels, ont pour probabilité centennale une valeur estimée qui, en fait, est une valeur déjà bien souvent observée* (10 cas sur 44).

En dehors de ces pluies journalières maximales rares, les ruissellements efficaces peuvent aussi succéder à des épisodes pluvieux, dont les averses unitaires sont moins élevées mais rapprochées dans le temps. Il est donc nécessaire de déterminer également les fréquences des pluies maximales sur deux ou plusieurs jours consécutifs.

1.2.3 : Récurrences des précipitations maximales annuelles sur plusieurs jours :

Cette étude statistique, entreprise manuellement sur trois stations représentatives des climats sud, centre et nord-soudaniens (Léo, Koupéla et Ouahigouya) a été progressivement étendue à 15 puis 49 postes pluviométriques grâce à un traitement sur ordinateur de 1916 stations-années (125 000 pluies environ). Les durées des épisodes pluvieux retenus sont de 2, 3, 5, 10, 15 ou 30 jours et les durées de retour de chacun de ces phénomènes exceptionnels de 5, 10, 20, 50 et 100 ans : le tableau 1.12 présente ainsi 1470 quantiles pluviométriques.

L'analyse critique des pluies journalières jusqu'à 1978, réalisée par J.P. Lahaye suivant la méthode des doubles masses, a été prise en compte pour écarter un certain nombre d'années.

Les données pluviométriques utilisées vont, pour toutes les stations, de leur origine, elle-même très variable (Gaoua: 1908 ; Mogtedo: 1965), à nos jours (1983 ou 1984). Ce premier traitement retient en effet volontairement l'ensemble de l'information disponible, mais la période de référence est changeante et, en outre, non homogène, associant une phase sèche (1970-1984) à une phase "humide" antérieure,

plus ou moins longue[1].

Une fois encore, quelle que soit la latitude, ces pluies maximales tombées en n jours obéissent remarquablement bien à une loi de Gumbel, à l'exception de quelques valeurs extrêmes correspondant aux durées de retour les plus élevées, notamment pour des stations sahéliennes (Exemple : pour f = 0,933, on a 440 mm calculés sur 30 jours contre un maximum de 534 mm observés, à Sebba). Très généralement, les droites ajustées par la méthode des moindres carrés prennent bien en compte la série de points et permettent d'obtenir les quantiles principaux correspondant aux durées de retour de 5 (f = 0,80), 10 (f = 0,90); 20 (f = 0,95), 50 (f = 0,98) et 100 ans (f = 0,99) (Fig. A.123.1 à A. 123.10 [2].

Sur 4°30' de latitude entre Markoye et Niangoloko, on constate que les pluies maximales extrêmes, pour des durées de retour allant de 5 à 100 ans, sont comprises entre 68 et 126 mm sur deux jours consécutifs dans le premier cas, 116 et 215 mm dans le second, entre 220 et 468 mm (f = 0,80) puis 356 et 770 mm sur 30 jours. Le rapport entre ces quantités maximales aux deux extrémités du pays est donc toujours voisin de 2. On peut aussi considérer que, pour une même séquence (2 jours par exemple), une valeur identique (115 mm) est enregistrée tous les 5 ans à Banfora, tous les 10 ans à Koupela, tous les 20 seulement à Dori (Tableau 1.13).

---

(1) *Trois autres périodes de référence ont été retenues pour tenter de souligner, par comparaison, leur influence :*
- *l'une correspond à un intervalle (1970-1984) homogène, tant par la durée que du point de vue climatique (48 stations) ;*
- *la phase 1955-1984 intéresse encore 43 stations pour lesquelles l'origine et la durée des observations sont identiques ;*
- *enfin, la période s'arrêtant en 1969 est relativement homogène du point de vue climatique et permet une comparaison avec la phase de sécheresse qui fait suite (48 stations).*

(2) *Sur les 96 graphiques (disponibles auprès de l'auteur), 10 seulement ont été retenus en annexes. Ce sont les ajustements relatifs aux stations en situation latitudinale extrême (Batié, Markoye) ou moyenne (Ouagadougou) et aux sites expérimentaux (Zorgho et Pô).*

Tableau 1.12 : Quantiles des pluies maximales annuelles de fréquence rare en n jours consécutifs sur 49 stations du Burkina
(Période de référence: origine-1984)

Durée de retour	5 ans (f=0,80)						10 ans (f=0,90)					
Nombre de jours	2	3	5	10	15	30	2	3	5	10	15	30
BATIE	125	138	162	212	268	418	147	160	186	240	308	486
NIANGOLOKO	126	146	179	244	310	468	147	172	210	283	362	540
GAOUA	111	127	153	214	272	412	128	148	176	247	314	472
BANFORA	116	137	164	230	296	440	133	158	186	263	340	500
SIDERADOUGOU	112	128	148	210	264	405	130	148	170	240	304	463
DIEBOUGOU	119	132	158	212	265	400	140	154	184	242	303	450
ORODARA	111	121	160	211	265	404	127	153	184	240	296	445
LEO	104	120	146	200	250	388	120	142	170	230	286	438
TIEBELE	97	112	137	185	244	380	110	127	156	208	276	430
BOBO	118	136	169	228	288	440	138	157	195	260	326	496
PO	103	115	141	207	254	384	121	133	162	240	292	436
ZABRE	100	110	127	182	228	360	114	125	141	206	254	410
PAMA	109	120	143	206	265	392	124	137	162	237	306	450
HOUNDE	103	119	142	190	245	380	119	136	160	210	274	424
MANGA	99	114	140	195	242	362	110	126	157	215	268	402
BOROMO	95	106	134	194	245	366	109	120	150	220	277	408
TENKODOGO	112	124	144	200	250	374	128	142	162	225	282	423
DIONKELE	105	118	137	200	249	378	122	136	155	224	278	416
GARANGO	108	118	136	185	234	363	125	135	155	208	263	408
DIAPAGA	94	105	133	186	240	366	108	119	152	214	276	420
FADA N GOURMA	104	115	126	204	248	386	120	131	165	231	280	436
KOUPELA	100	109	131	177	225	340	115	124	148	198	252	378
KOUDOUGOU	98	112	139	189	243	370	112	128	158	214	272	418
ZORGO	100	110	129	184	228	360	118	130	149	210	258	412
SARIA	87	102	129	176	230	343	100	118	148	203	264	388
MOGTEDO	94	105	126	170	216	327	110	123	145	192	240	366
OUAGADOUGOU	98	114	138	186	214	359	112	130	156	210	262	400
DEDOUGOU	112	130	155	220	266	404	131	152	180	154	304	456
KANTCHARI	102	115	145	194	232	347	121	136	170	224	266	398
GUILONGOU	99	111	135	188	234	348	115	128	156	216	271	397
BOULSA	103	117	136	190	230	340	121	140	162	225	272	394
BOUSSE	90	99	117	166	204	310	102	112	133	190	232	350
NOUNA	94	109	130	186	234	364	109	125	148	215	268	418
YAKO	94	104	137	184	220	340	109	119	157	210	244	383
BOGANDE	105	116	136	180	210	317	124	137	160	212	238	364
TOUGAN	98	115	140	200	246	368	114	135	164	232	287	421
KAYA	97	100	129	188	232	342	118	122	150	228	272	394
GOURCY	82	96	112	160	200	306	96	113	129	185	234	355
BAM	97	112	135	180	226	328	114	130	157	209	260	376
SEBBA	93	108	130	177	230	340	110	128	153	210	276	406
SEGUENEGA	93	109	134	180	208	296	108	126	157	210	236	330
OUAHIGOUYA	90	106	127	172	214	330	104	122	146	196	242	378
BOURZANGA	77	92	123	146	172	262	90	108	133	170	198	300
TITAO	83	91	107	138	172	260	99	107	122	156	196	298
DORI	83	93	108	146	176	272	96	107	122	166	198	306
DJIBO	85	100	124	174	216	310	100	120	150	211	262	370
ARIBINDA	84	93	107	148	182	300	103	112	128	180	216	360
GOROM-GOROM	93	101	113	145	176	257	110	120	131	168	203	295
MARKOYE	68	75	90	114	128	220	80	86	103	143	170	253
Moyenne	99	112	136	187	232	354	116	131	156	213	266	402
Ecart-type	12	14	17	25	34	50	14	16	20	28	38	56

Durée de retour	20 ans (f=0,95)						50 ans (f=0,98)					
Nombre de jours	2	3	5	10	15	30	2	3	5	10	15	30
BATIE	167	180	210	266	346	550	194	208	240	300	394	634
NIANGOLOKO	168	197	240	320	411	608	194	229	278	370	476	700
GAOUA	145	168	204	280	354	531	167	193	225	320	406	608
BANFORA	148	178	209	294	380	554	168	204	237	333	433	625
SIDERADOUGOU	146	167	190	270	342	520	168	192	218	308	390	596
DIEBOUGOU	160	176	209	272	340	398	186	204	241	310	386	560
ORODARA	153	174	207	267	326	486	163	201	237	302	365	538
LEO	137	163	192	260	320	486	158	190	220	296	363	550
TIEBELE	123	141	175	228	307	480	139	159	200	254	346	540
BOBO	156	177	219	286	362	546	180	202	250	323	408	614
PO	137	150	180	274	328	485	160	172	206	316	376	550
ZABRE	126	139	155	226	278	460	144	157	172	255	308	524
PAMA	140	153	180	266	344	505	159	174	204	303	394	577
HOUNDE	134	152	177	232	300	467	153	172	200	259	336	520
MANGA	122	138	174	234	293	440	136	153	195	260	326	490
BOROMO	121	133	165	244	306	446	138	150	185	275	346	498
TENKODOGO	143	158	179	250	314	469	163	180	201	282	356	530
DIONKELE	138	154	173	248	306	453	159	177	195	278	342	500
GARANGO	141	151	173	229	290	454	162	172	196	257	326	510
DIAPAGA	120	131	170	240	310	472	137	148	193	274	354	540
FADA N GOURMA	136	146	184	258	310	482	156	166	207	292	350	544
KOUPELA	130	138	164	218	280	414	148	157	185	245	313	463
KOUDOUGOU	126	143	176	238	300	462	143	163	200	268	338	520
ZORGO	136	150	167	232	286	460	160	174	191	264	322	521
SARIA	113	133	166	228	298	430	130	153	189	260	340	486
MOGTEDO	126	139	164	213	306	406	147	161	188	240	296	458
OUAGADOUGOU	125	145	173	232	288	440	141	164	195	260	324	490
DEDOUGOU	150	174	204	287	340	506	173	202	235	330	388	572
KANTCHARI	138	155	193	254	299	445	161	180	224	292	340	508
GUILONGOU	131	144	177	244	305	443	152	175	203	280	350	505
BOULSA	139	163	187	258	310	446	162	193	220	301	360	514
BOUSSE	115	125	148	212	257	384	130	142	168	240	291	437
NOUNA	123	140	166	242	300	468	142	160	190	278	340	534
YAKO	123	134	176	233	268	424	141	152	202	264	298	476
BOGANDE	142	157	182	240	264	410	165	184	211	280	300	468
TOUGAN	130	154	187	264	326	472	150	178	217	306	376	540
KAYA	138	141	170	263	308	440	164	167	194	312	358	505
GOURCY	110	129	145	210	265	401	128	150	166	242	306	460
BAM	130	147	178	236	294	421	150	170	205	270	338	480
SEBBA	125	148	174	242	318	470	148	173	202	284	374	564
SEGUENEGA	122	143	179	238	263	363	140	164	206	274	300	405
OUAHIGOUYA	117	138	164	220	270	422	135	158	188	248	305	480
BOURZANGA	102	123	152	192	220	338	118	144	177	220	252	385
TITAO	114	122	136	174	220	332	134	142	155	196	250	378
DORI	110	122	136	184	218	338	125	140	155	209	244	380
DJIBO	114	137	176	246	309	428	133	160	210	290	360	502
ARIBINDA	120	130	148	209	246	408	144	152	173	246	287	475
GOROM-GOROM	127	136	149	189	228	331	148	159	171	218	261	378
MARKOYE	90	97	116	160	190	285	105	111	132	184	217	326
	131	148	176	241	299	447	151	170	201	275	339	509
	16	19	23	31	43	63	18	22	27	36	50	72

Durée de retour	100 ans (f=0,99)					
Nombre de jours	2	3	5	10	15	30
BATIE	214	228	264	326	442	694
NIANGOLOKO	215	252	307	406	514	770
GAOUA	183	212	246	352	446	684
BANFORA	183	223	258	364	472	680
SIDERADOUGOU	184	210	239	338	428	650
DIEBOUGOU	206	226	265	338	420	607
ORODARA	180	221	259	329	394	577
LEO	174	210	242	323	396	596
TIEBELE	151	173	217	274	376	587
BOBO	199	222	273	350	442	664
PO	176	189	225	348	408	598
ZABRE	156	170	185	275	330	572
FAMA	174	190	222	331	432	630
HOUNDE	167	187	216	278	363	560
MANGA	147	165	212	278	350	528
BOROMO	150	162	200	300	346	498
TENKODOGO	178	193	218	305	386	574
DIONKELE	174	194	213	301	369	536
GARANGO	178	187	214	278	352	552
DIAPAGA	150	160	210	300	388	591
FADA N GOURMA	171	180	225	318	380	590
KOUPELA	162	171	191	265	338	500
KOUDOUGOU	156	178	217	290	365	563
ZORGO	177	193	209	286	350	568
SARIA	153	168	206	286	374	528
MOGTEDO	162	178	206	260	320	496
OUAGADOUGOU	154	179	211	282	350	528
DEDOUGOU	191	223	258	362	413	620
KANTCHARI	178	199	247	320	374	554
GUILONGOU	167	181	222	305	383	550
BOULSA	180	215	243	334	398	564
BOUSSE	142	154	183	262	316	474
NOUNA	156	175	207	304	376	582
YAKO	135	166	220	287	320	516
BOGANDE	182	203	233	307	325	505
TOUGAN	164	196	239	336	414	588
KAYA	183	186	213	348	393	550
GOURCY	140	165	181	266	336	506
BAM	166	187	236	296	370	525
SEBBA	160	192	224	314	415	616
SEGUENEGA	154	180	227	300	525	436
OUAHIGOUYA	148	173	206	270	332	524
BOURZANGA	130	159	196	243	276	420
TITAO	148	157	169	214	274	412
DORI	159	154	168	228	264	412
DJIBO	147	178	234	324	402	560
ARIBINDA	160	168	193	274	318	525
GOROM-GOROM	164	176	188	239	285	413
MARKOYE	116	121	145	200	237	356
	166	186	220	300	369	554
	20	25	30	41	55	80

Fréquences	0,80			0,90			0,95			0,98			0,99		
Durées de retour	5 ans			10 ans			20 ans			50 ans			100 ans		
Stations	①	②	③	①	②	③	①	②	③	①	②	③	①	②	③
Pluies maximales en 2 jours (en mm)	83	100	116	96	115	133	110	130	148	125	148	168	139	162	183
3 jours	93	109	137	107	124	158	122	138	178	140	157	204	154	171	223
5 jours	108	131	164	122	148	186	136	164	209	155	185	237	168	191	258
10 jours	146	177	230	166	198	263	184	218	294	209	245	333	228	265	364
15 jours	176	225	296	198	252	340	218	280	380	244	313	433	264	338	472
30 jours	272	340	440	306	378	500	338	414	554	380	463	625	412	500	680

Tableau 1.13 : Fréquence des pluies maximales annuelles en n jours.
à Dori, Koupela et Banfora
1 2 3

Ces valeurs sur 2 et 30 jours peuvent être utilement mises en parallèle respectivement avec les pluies journalières maximales et les pluies mensuelles. L'étude de ces dernières n'ayant porté que sur les stations de Pô et Zorgho, nous reprendrons donc ces deux postes à titre d'exemples sud et centre-soudaniens ; nous pouvons ajouter Dori comme poste sahélien dans le cas des pluies journalières maximales.

- Les rapports des quantiles correspondant à deux et une seule journée, pour chacune de ces trois stations, sont présentés dans le tableau suivant :

Station	f = 0,90			f = 0,99		
	1 jour	2 jours	Ecart	1 jour	2 jours	Ecart
DORI	83mm	96mm	15,7%	120mm	139mm	15,8%
ZORGHO	102mm	118mm	15,7%	148mm	177mm	19,6%
PO	102mm	121mm	18,6%	146mm	176mm	20,5%

Tableau 1.14 : Ecarts (en %) entre pluies (en mm) maximales sur 2 jours et pluies maximales quotidiennes pour des fréquences décennales et centennales.

Les écarts ne sont donc pas négligeables puisque compris entre 15 et 20% sur trois degrés de latitude ; la progression n'apparaissant pas du nord au sud du pays pour une fréquence donnée. Nous reviendrons sur les écarts extrêmes qui sont enregistrés au sud du pays.

- Les précipitations maximales sur 30 jours doivent être, quant à elles, évidemment comparées à celles du mois d'août puisqu'il s'agit du mois le plus pluvieux. Les résultats principaux sont regroupés sur le tableau 1.15.

L'écart apparaît variable suivant les fréquences, la méthode d'ajustement des pluies mensuelles et les stations. Mais il n'est jamais négligeable et atteint 45% à Zorgho si l'on considère la fréquence centennale et les valeurs mensuelles obtenues suivant le loi de Gauss, qui a été retenue, rappelons-le, comme donnant le meilleur ajustement.

Stations	f / Ajustement	0,8	0,9	0,95	0,99
ZORGHO août	Loi de Gauss	291(-23,7%)	320(-28,8%)	345(-33,3%)	392(-44,9%)
	Loi de Gumbel Moindres carrés	291(-23,7%)	337(-22,2%)	380(-21,1%)	478(-18,8%)
ZORGHO maximum en 30 jours	Loi de Gumbel Moindres carrés	360	412	460	568
PO août	Loi de Gauss	345(-12,9%)	380(-14,7%)	413(-17,4%)	476(-25,6%)
	Loi de Gumbel Moindres carrés	338(-13,6%)	398(- 9,5%)	455(- 6,6%)	584(- 2,4%)
PO maximum en 30 jours	Loi de Gumbel Moindres carrés	384	436	485	598

Tableau 1.15 : Pluies (en mm) maximales en 30 jours consécutifs et pluies d'août comparées (entre parenthèses, l'écart en % entre ces 2 périodes).

Ces averses exceptionnelles sont évidemment capitales par leurs conséquences hydrologiques qui préoccupent les aménageurs. L'analyse des récurrences sur 30 jours peut être utile, à l'échelle des grands bassins-versants, dans le dimensionnement des réservoirs des barrages, dans une meilleure approche des phénomènes d'envasement également. De même, les projets hydro-agricoles dans la gestion de l'irrigation ou du drainage ont intérêt, semble-t-il à *prendre en compte ces récurrences de pluies maximales sur 30 jours plutôt que les précipitations d'un mois, fut-il le plus pluvieux.*

Les averses exceptionnelles sur de courts intervalles de temps ont davantage retenu l'attention, notamment les pluies journalières maximales, nous l'avons vu. Celles-ci sont très préoccupantes par leurs débits de pointes, à l'aval de petits ou moyens bassins-versants, dans la perspective du dimensionnement des déversoirs de barrages, sachant aussi que l'on dépend, ici plus qu'ailleurs, de contraintes financières qui interdisent le surdimensionnement.

La connaissance des quantiles pluviométriques sur deux jours permet en outre de prendre en compte deux risques supplémentaires :

- celui, déjà signalé par Y. Brunet-Moret (1968) *d'une seule et même averse pouvant être arbitrairement partagée entre deux journées successives* de part et d'autre de l'heure de relevé matinal (6 ou 8 heures du matin) ;

- celui de *deux pluies certes distinctes par leur date mais suffisamment rapprochées* pour entraîner des coefficients de ruissellement extrêmes.

Le rapport des quantiles correspondant à deux et une seule journée, dont on a vu qu'il se situe autour de 1,20 à Dori, Zorgho et Pô, peut atteindre 1,30 à Tenkodogo et un maximum absolu de 1,64 à Niangoloko (pour f = 0,95). On remarque que cette dernière station est, à l'extrême sud-ouest du pays, la plus arrosée, mais il est vrai aussi que Batié, à la même latitude, n'a plus un rapport que de 1,08.

Ceci nous conduit à commenter quelques-unes des 120 cartes (1) d'isolignes qui peuvent être tracées en combinant les cinq fréquences, six durées d'épisodes pluvieux et quatre périodes de référence. Ces cartes apparaissent d'emblée tout à fait différentes de celles réalisées, pour les pluies journalières, par J.P. Lahaye, suivant un krigeage qui explique le parallélisme des isolignes en un dispositif grosso modo latitudinal. Pour notre part, nous avons volontairement conservé les tracés contournés de ces lignes d'isovaleurs, mettant ainsi en évidence des "anomalies" positives ou négatives, géographiquement intéressantes.

Sur les cartes correspondant à l'épisode "origine - 1984", l'influence de la falaise de Bobo-Banfora, à un moindre degré de la chaîne birrimienne de Batié-Diebougou et peut-être, pour le sud-est du

---

(1) *Nous nous sommes contenté d'en réaliser 40 correspondant à 2 et 30 jours consécutifs, pour chacune des 5 fréquences précitées et des quatre périodes de référence (Fig. A.123.11 à A.123.50).*

pays, de la chaîne de l'Atakora et de ses prolongements, explique très probablement la poussée, vers le nord de ces isolignes, dans chacun de ces trois secteurs. Inversement, des îlots déficitaires peuvent être liés à des sites de vallées (Boromo sur la Volta Noire et Zabre près de la Volta Rouge), mais il reste aussi des points énigmatiques tels que Sebba, copieusement arrosé en zone sub-sahélienne ou, inversement, Boussé, station déficitaire au nord-ouest de Ouagadougou.

En comparant quelques unes de ces cartes entre elles (Fig. 1.10 à 1.17), on constate que :

1°/- Pour un épisode de 2 jours consécutifs, le Burkina Faso enregistre, sur l'essentiel du territoire, des pluies maximales centennales comprises entre :

- 140 et 180mm si l'on considère la période "origine-1984" ;
- 140 et 220mm sur l'intervalle 1955-1984 ;
- 160 et 220mm pour la période "origine·1969" ;
- 120 et 180mm sur 1970-1984.

Le déficit est donc de 18 à 25% sur la dernière période par rapport à la phase antérieure à 1970.

2°/- Pour un épisode de 30 jours consécutifs, le Burkina Faso enregistre des pluies maximales centennales comprises entre :

- 400 et 700mm si l'on considère la période origine-1984 ;
- 400 et 650mm sur l'intervalle 1955-1984 ;
- 400 et 800mm pour la période origine-1969 ;
- 300 et 600mm sur 1970-1984.

Le déficit est donc de 25% sur la dernière période par rapport à la phase antérieure à 1970.

3°/- Le caractère contourné des isohyètes existe quelle que soit la période de référence choisie. Leur poussée vers le nord dans la partie sud-ouest du pays est en particulier très nette. Cet effet permanent tend à confirmer le rôle de reliefs comme la falaise de Banfora dans la distribution régionale de ces phénomènes pluvieux exceptionnels ;

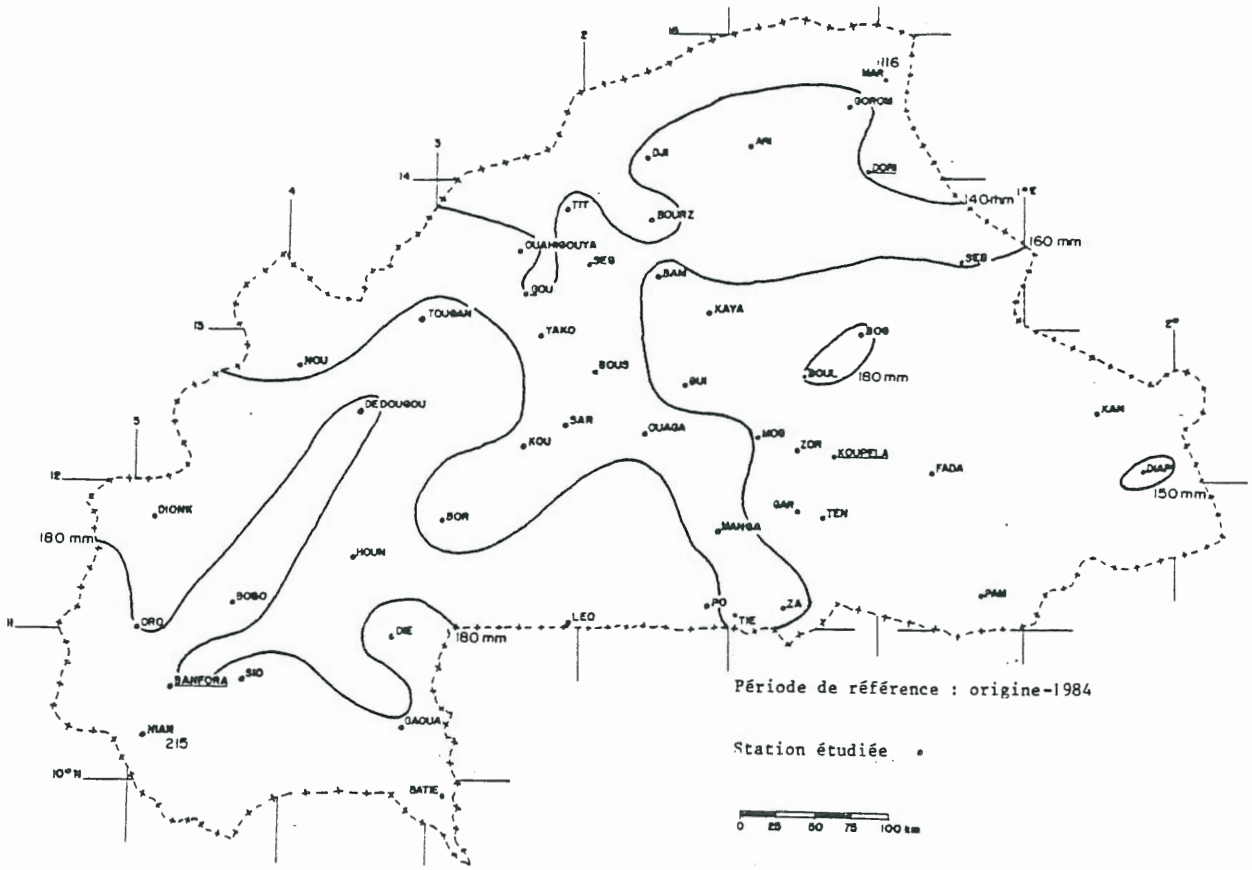


Fig. 1.10 : Isohyètes des pluies maximales annuelles pour un épisode de 2 jours consécutifs et une durée de retour de 100 ans.

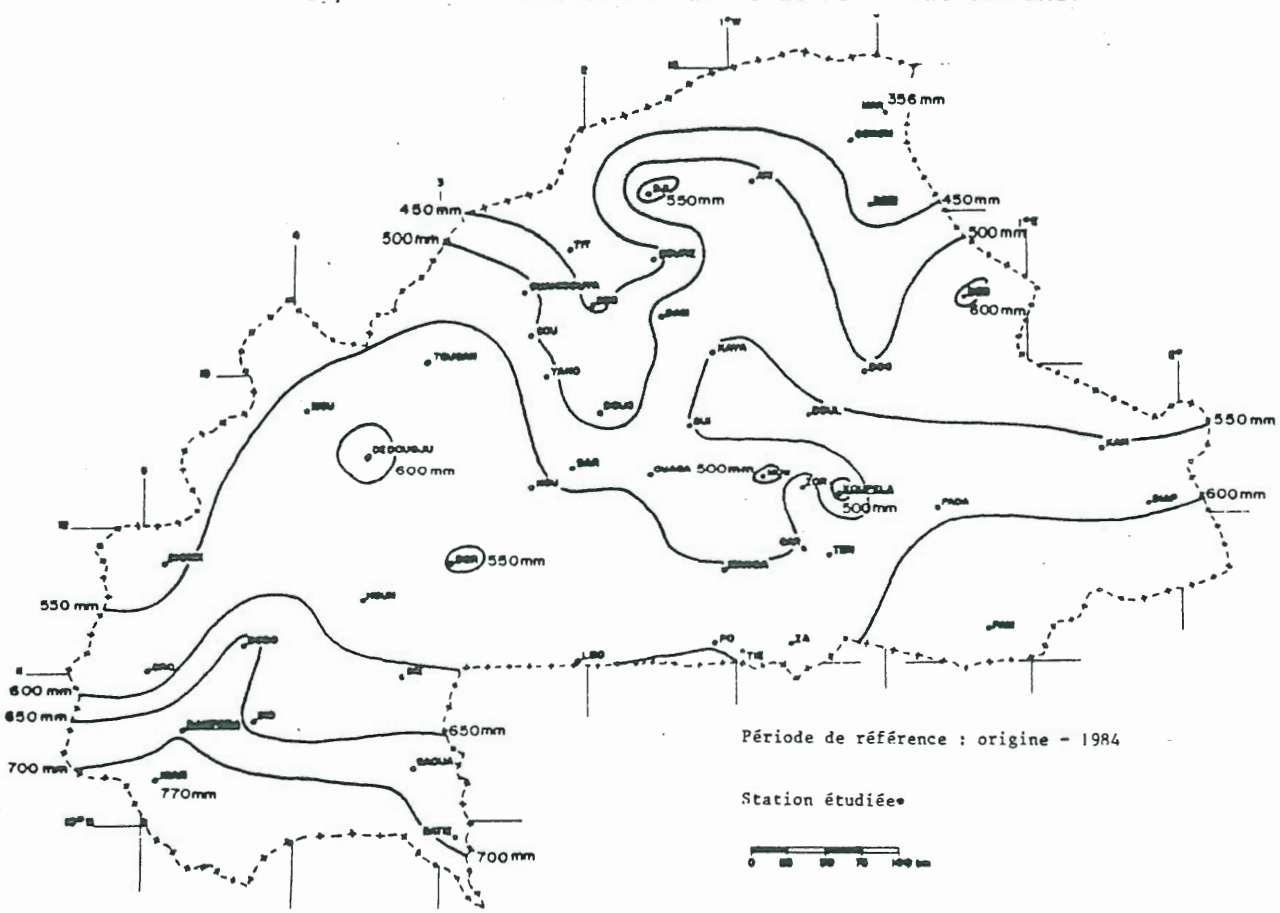


Fig. 1.11 : Isohyètes des pluies maximales annuelles pour un épisode de 30 jours consécutifs et une durée de retour de 100 ans.

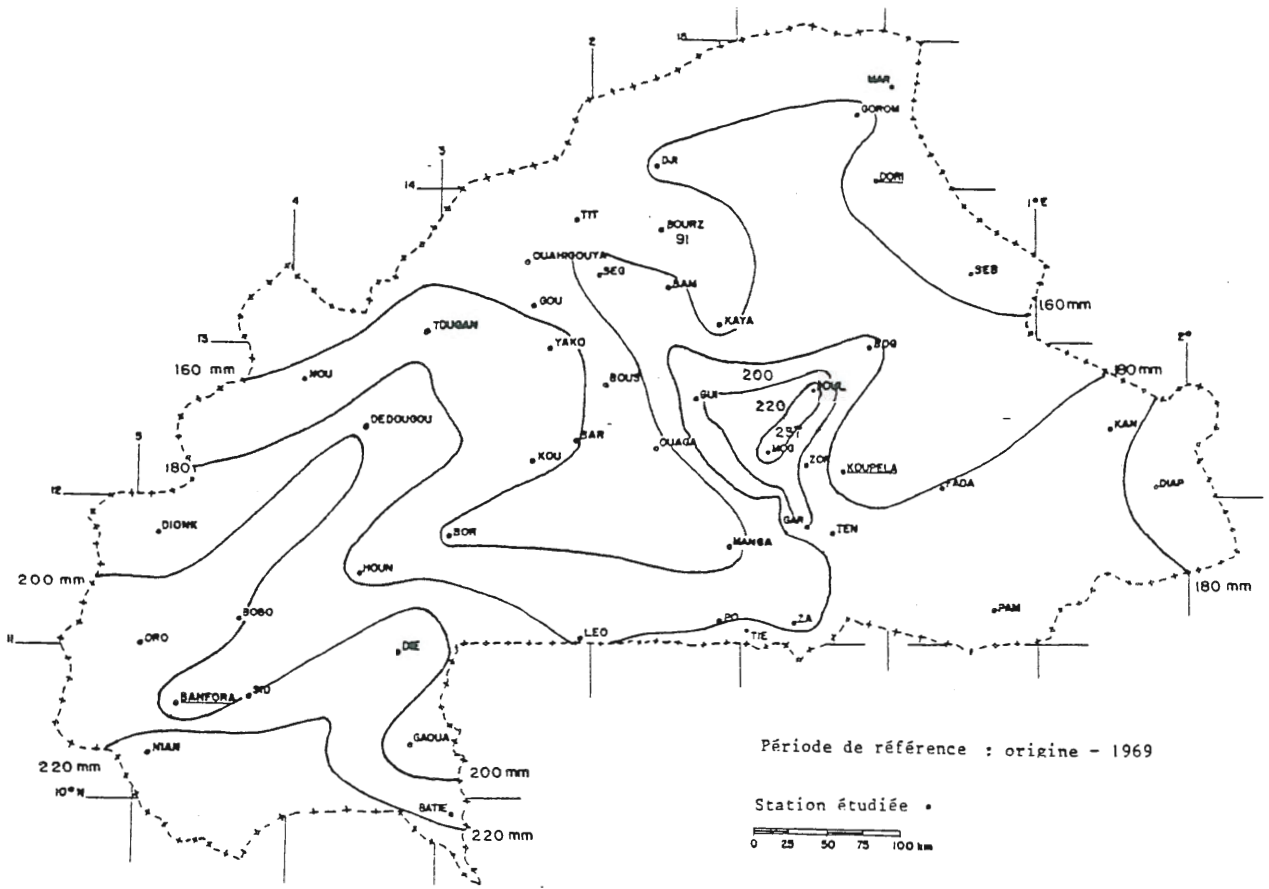


Fig. 1.12 : Isohyètes des pluies maximales annuelles pour un épisode de 2 jours consécutifs et une durée de retour de 100 ans.

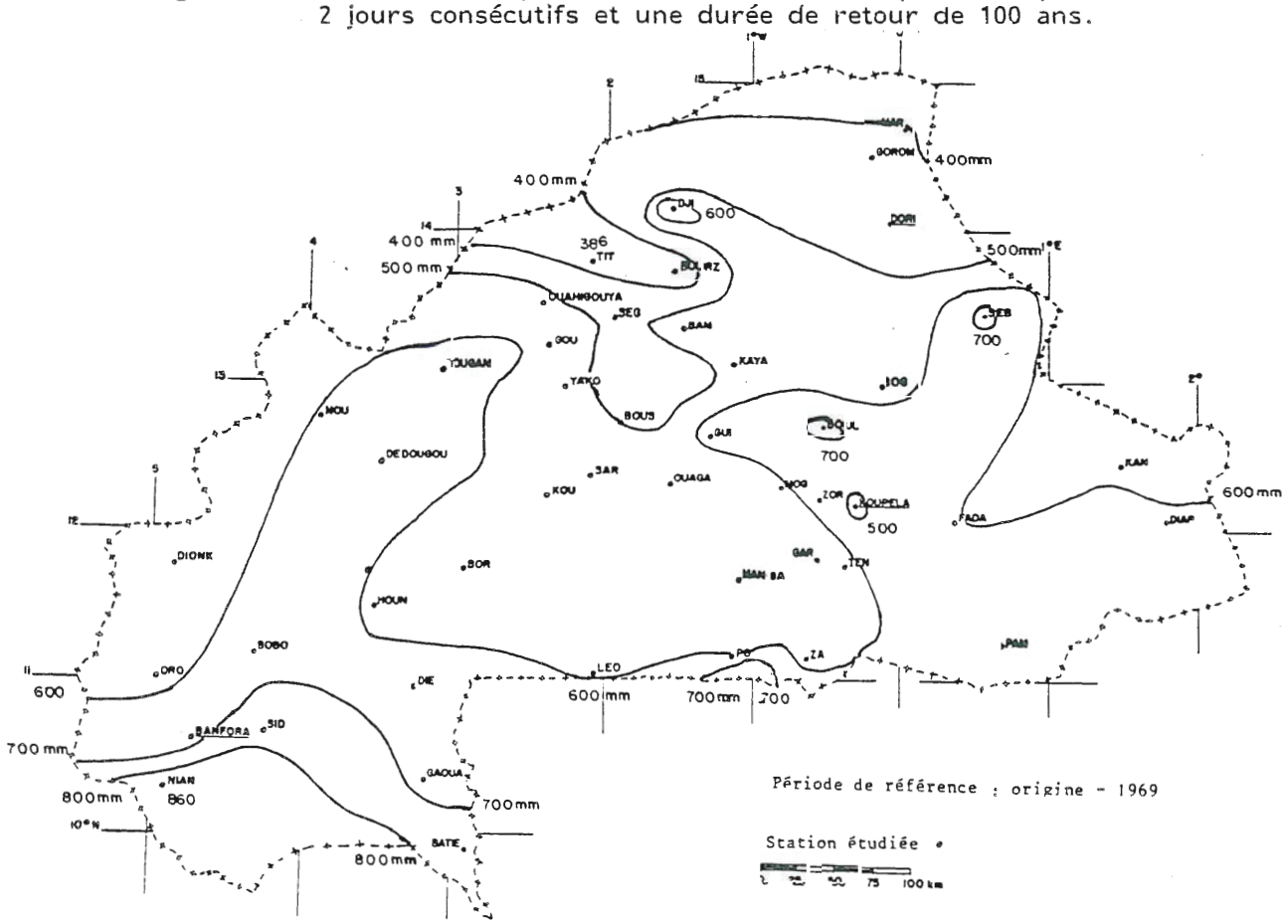


Fig. 1.13 : Isohyètes des pluies maximales annuelles pour un épisode de 30 jours consécutifs et une durée de retour de 100 ans.

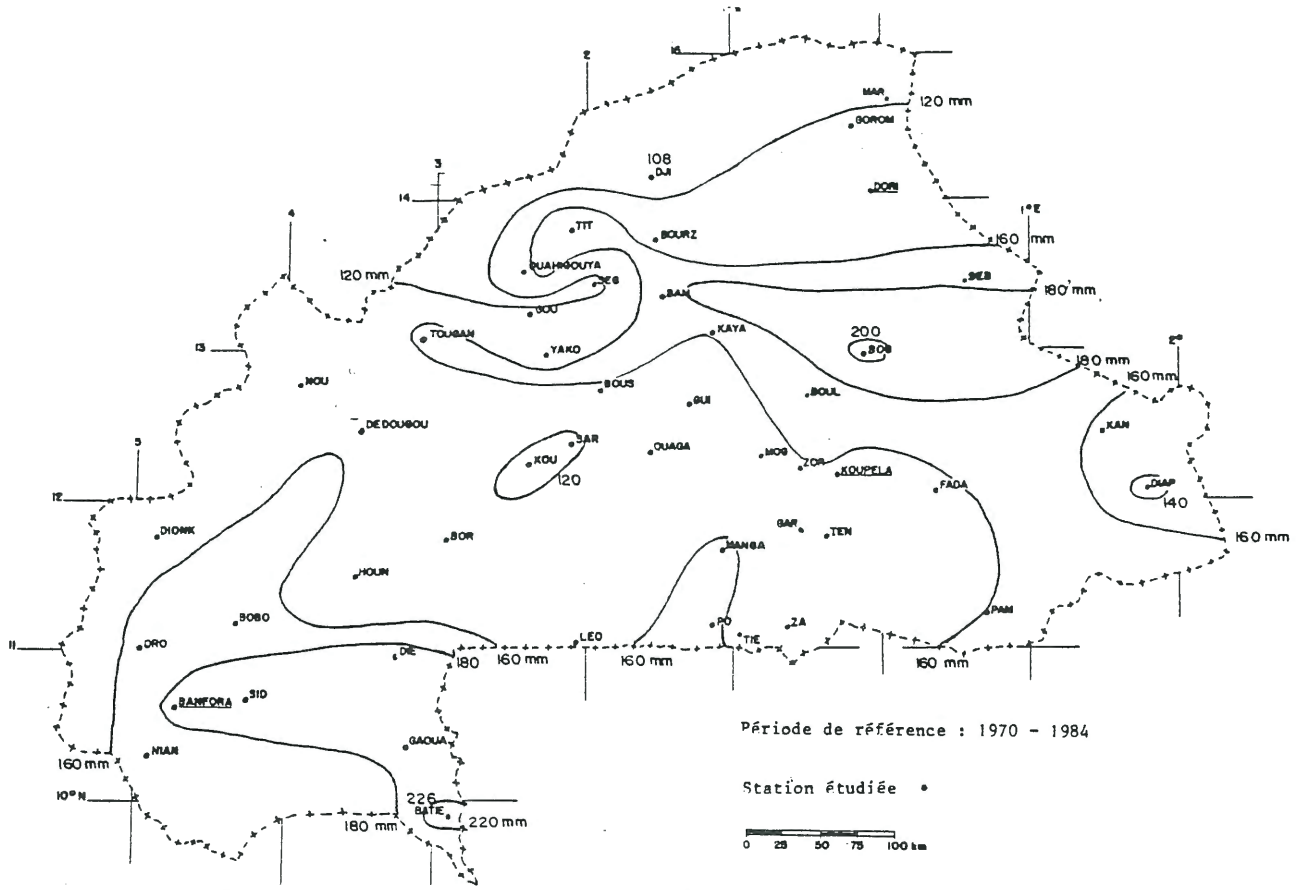


Fig. 1.14 : Isohyètes des pluies maximales annuelles pour un épisode de 2 jours consécutifs et une durée de retour de 100 ans.

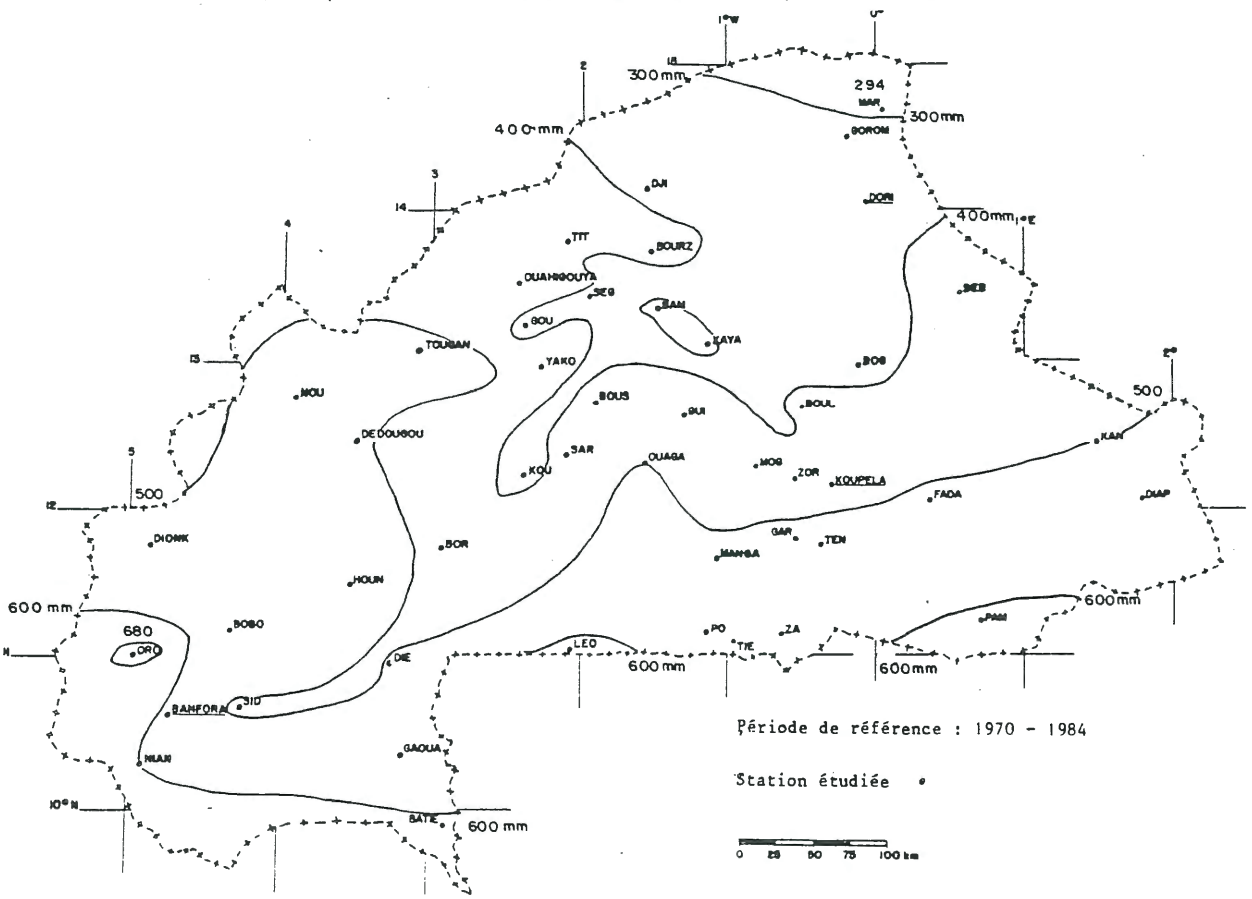


Fig. 1. 15 : Isohyètes des pluies maximales annuelles pour un épisode de 30 jours consécutifs et une durée de retour de 100 ans.

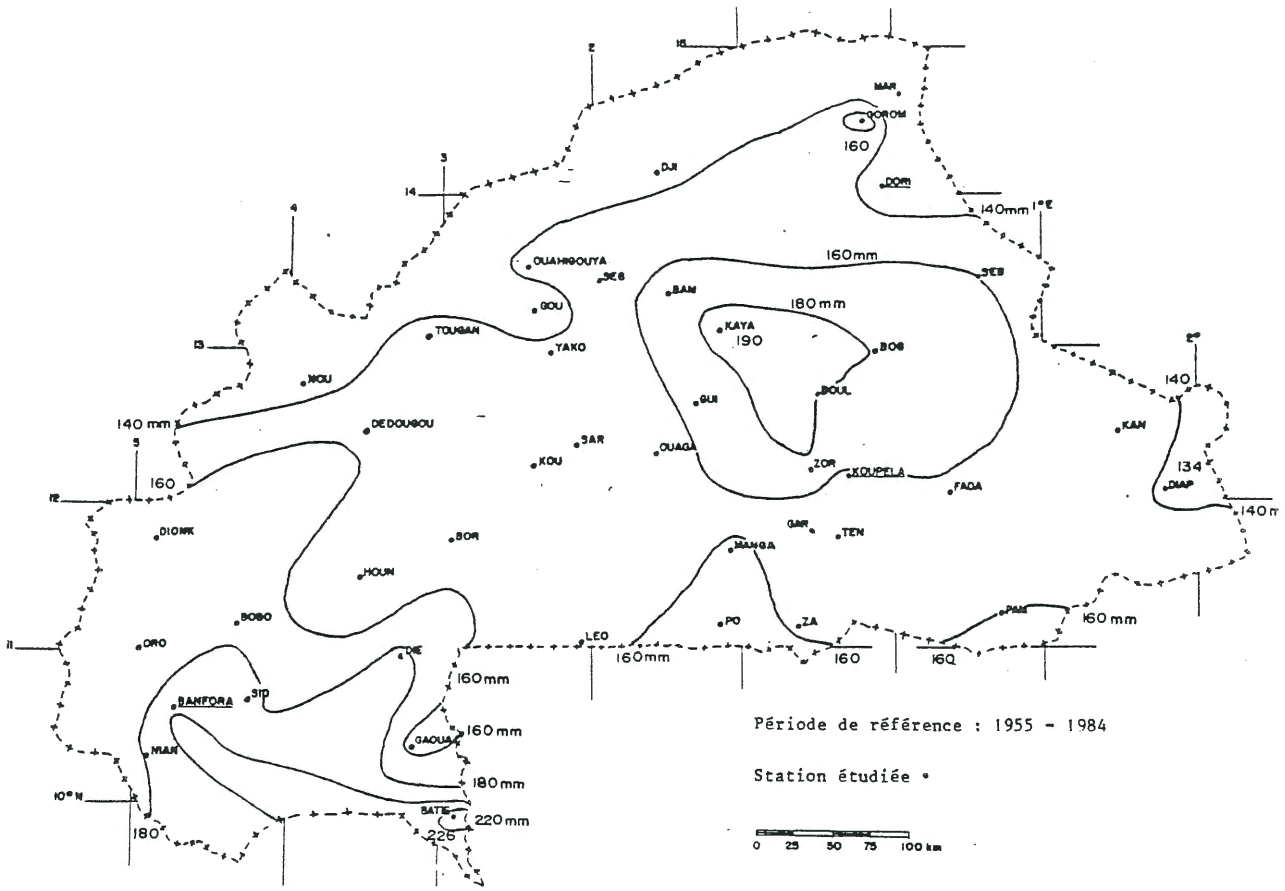


Fig. 1.16 : Isohyètes des pluies maximales annuelles pour un épisode de 2 jours consécutifs et une durée de retour de 100 ans.

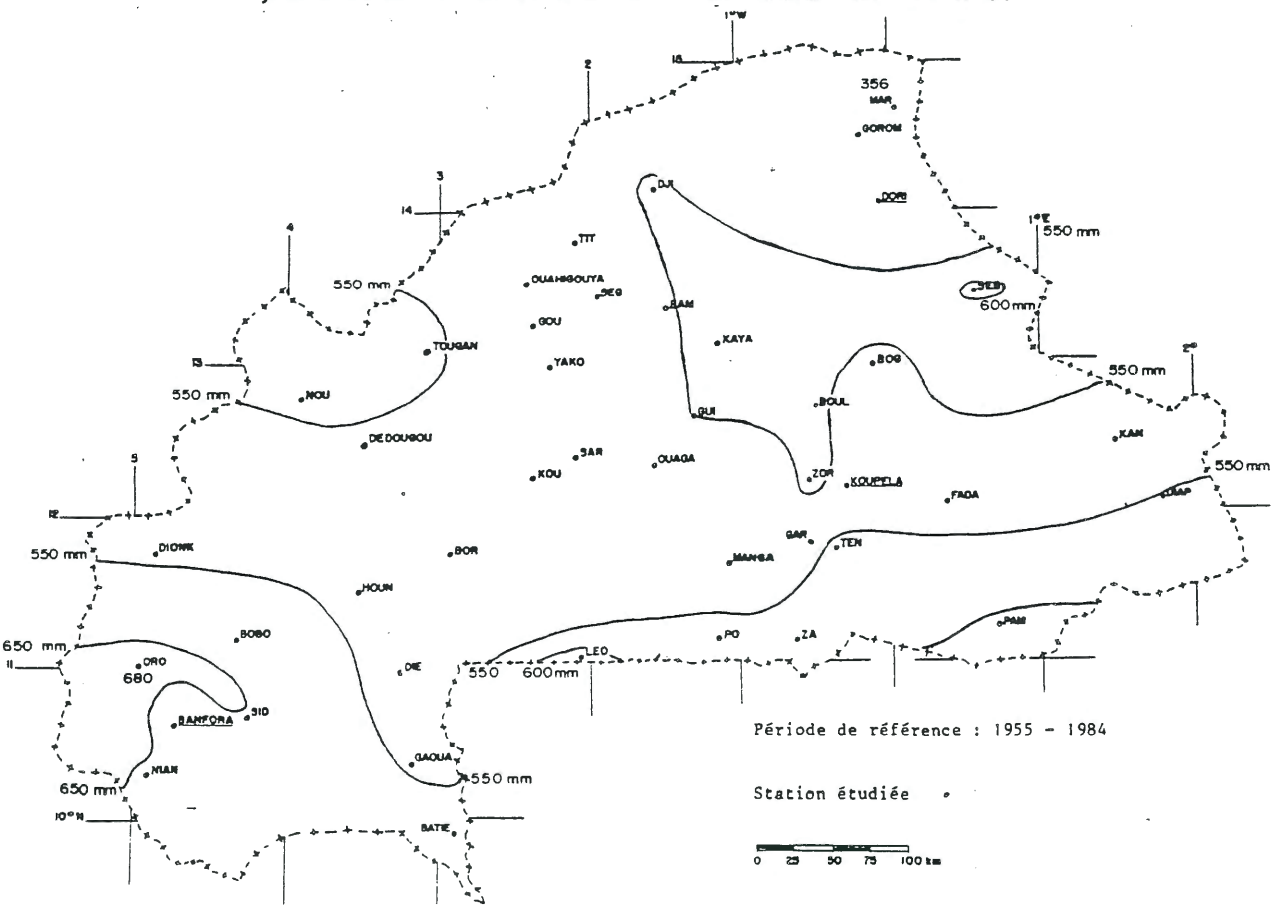


Fig. 1.17 : Isohyètes des pluies maximales annuelles pour un épisode de 30 jours consécutifs et une durée de retour de 100 ans.

leur influence s'exerçant probablement aussi bien vis-à-vis des ondes de l'est que des pluies de mousson.

1.3. INTENSITES ET DUREES DES PRECIPITATIONS.

Toute information précise concernant ces deux variables ne peut être fournie que par les pluviographes, dont il faut souligner le caractère indispensable pour une analyse de la dynamique actuelle en milieu tropical (Michel, 1969, p. 144).

Un examen des pluviogrammes permet d'opposer graphiquement les précipitations et d'en dresser ainsi une première typologie.

1.3.1 : Typologies des pluies :

* *La classification graphique* des averses a été entreprise, à notre connaissance, par E. Roose à Saria (Roose *et al.*, 1974), dans le centre-est du pays. Nous l'avons reprise (Mietton, 1980) et précisée tout au long de nos huit années d'observation sur les sites de Pô-Banon puis de Zorgho-Imiga.

Cinq types principaux peuvent être distingués :

- Le type 1 correspond à des pluies de courte durée (10 à 30 minutes), de hauteur variable, généralement faible à moyenne (10 à 40 mm), dont l'intensité est forte du début à la fin de l'averse, avec des maximums instantanés *pour une durée de cinq minutes* dépassant très généralement 60 mm/h et atteignant parfois 140 mm/h (144 mm/h le 26.06. 1982) (Fig. 1.18).

- Le type 2 : ce sont des orages qui présentent, dans un premier temps, un régime analogue au précédent, c'est-à-dire une précipitation brutale de 10 à 40 mm (10 à 20 le plus souvent), en 10 à 30 minutes, suivie d'une traîne variable en intensité mais d'une durée de plusieurs heures. La transition entre ces deux phases peut correspon-

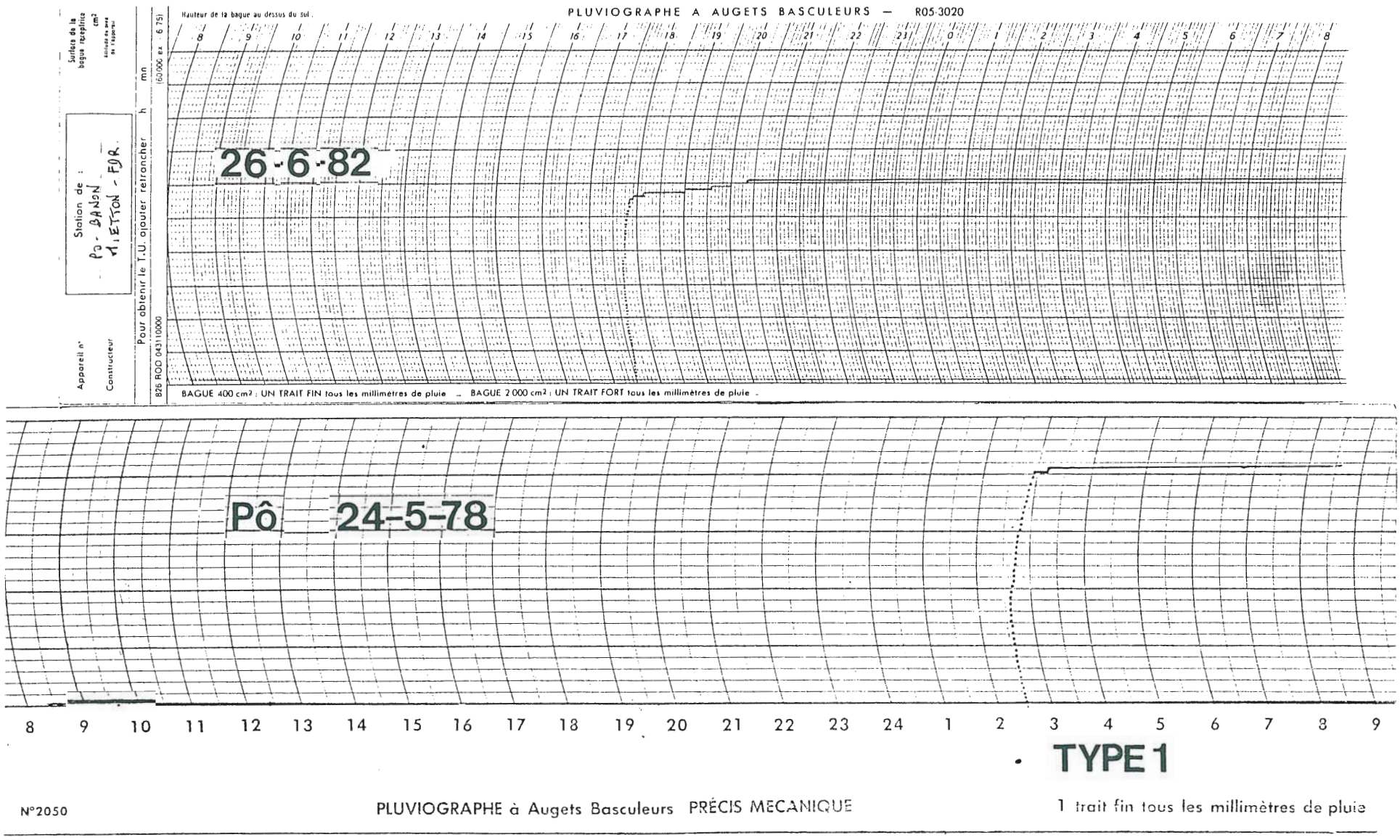
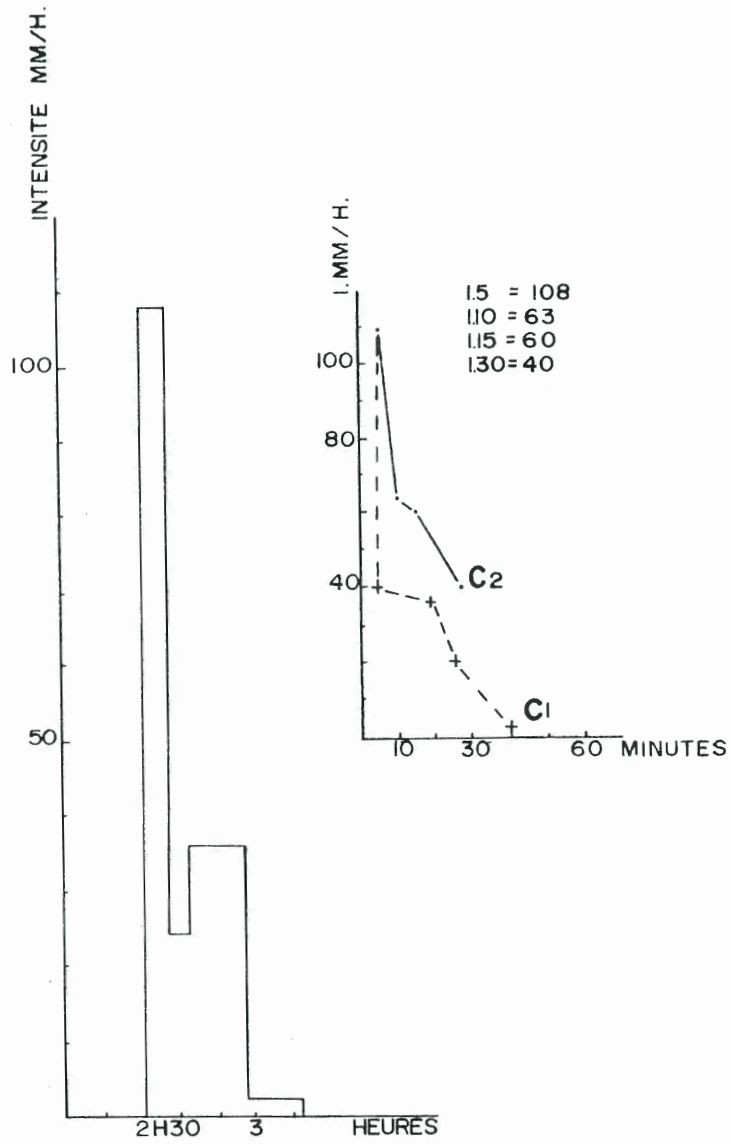
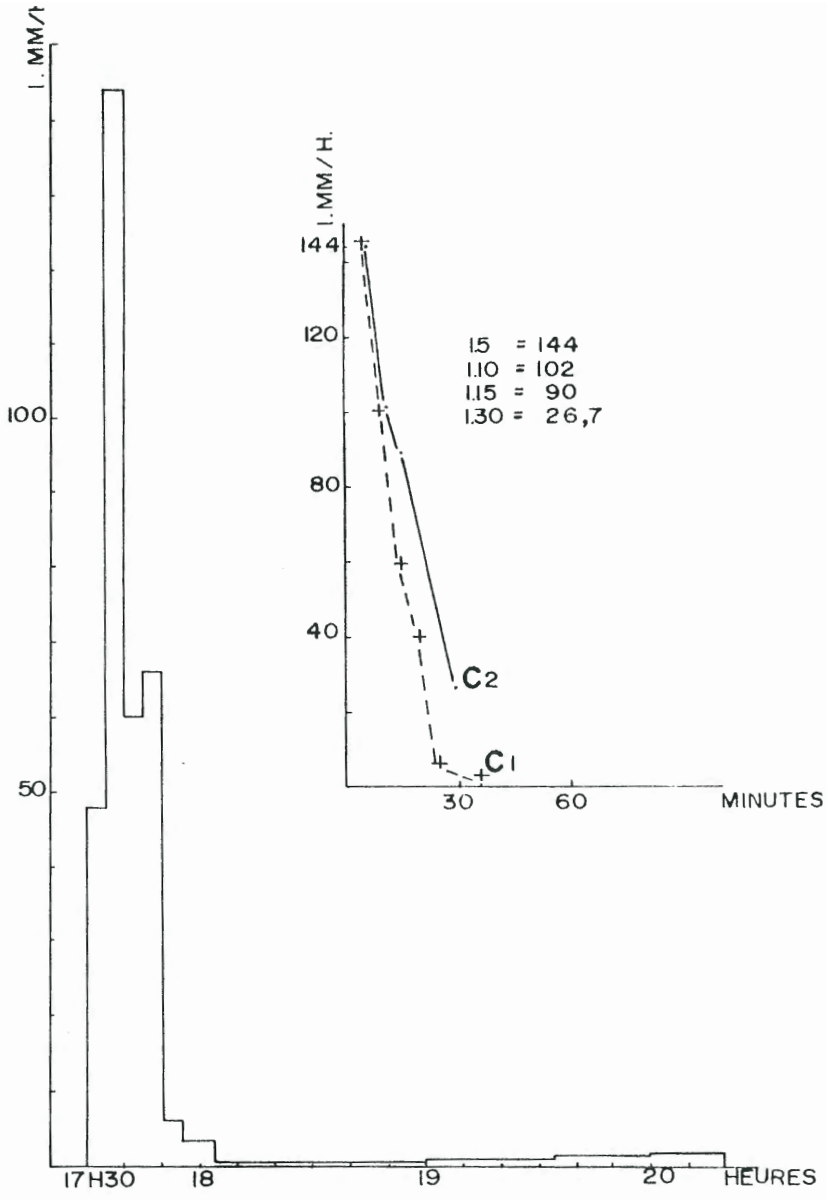


Fig. I.18 : Type de pluies n° 1 - Les lignes de grains sans traîne.



Pluie du 24_5_78

P= 21mm R= 12,9



Pluie du 26_6_82

P= 29,5mm R= 25,6

Fig. 1.19 : Hyétogrammes, courbes intensité-durée (C1) et courbes des intensités maximales (C2) pour deux averses du type des lignes de grains sans traîne (Type 1).

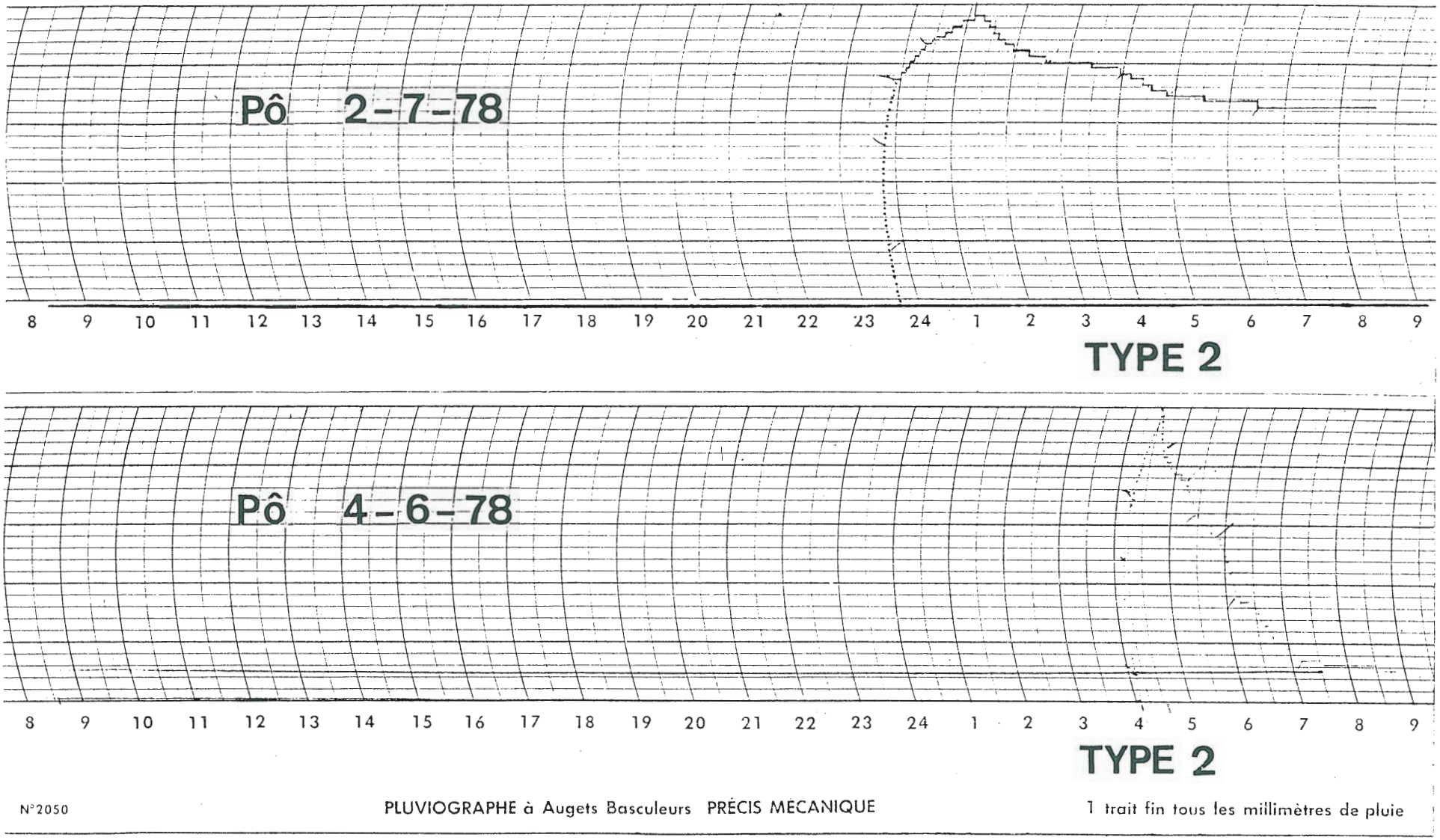


Fig. 1.20 : Type de pluies n° 2 - Les lignes de grains avec traîne.

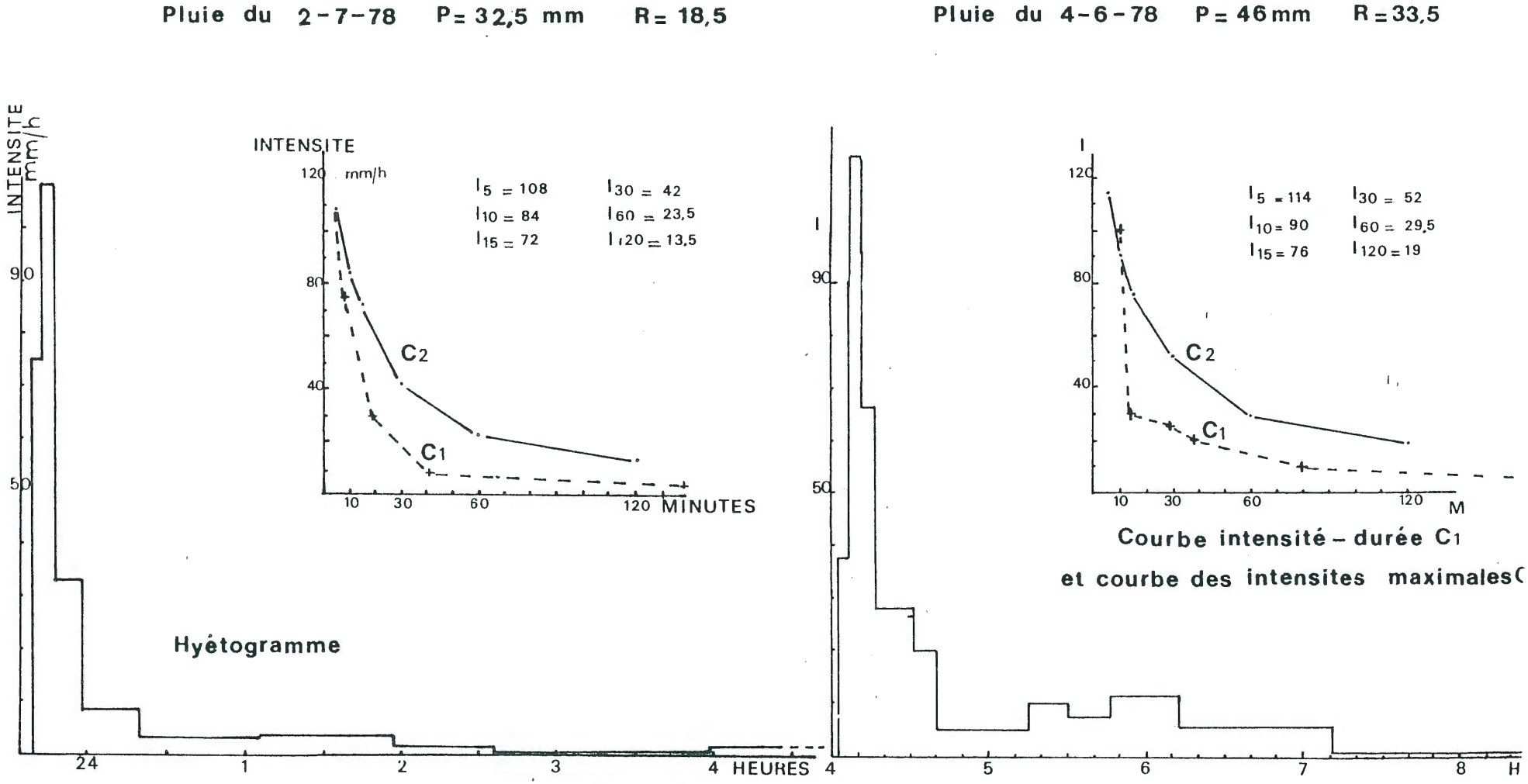


Fig. 1.21 : Hyétogrammes, courbes intensités-durées (C1) et courbes des intensités maximales (C2) pour deux averses du type des lignes de grains avec traîne.

dre à une inflexion progressive de la courbe d'enregistrement ou, au contraire, à une rupture de pente nette (Fig. 1.20).

- Le type 3 : ce sont des pluies composites, à plusieurs maximums d'intensité, se succédant au cours d'une même averse ou à quelques heures d'intervalle, deux ou trois fois en 24 heures (Fig. 1.22).

- Le type 4 (Fig. 1.24) correspond aux tornades exceptionnelles tant par leur hauteur relative (mise en rapport avec la date) que par leur intensité. La fréquence de ces tornades est tellement rare qu'elles peuvent échapper à l'observateur. Durant nos huit années au Burkina Faso, nous en avons enregistré une première à Pô-Banon, le 2 août 1978, de 121 mm et d'une intensité instantanée de 120 mm/h pendant 18 minutes. La durée de retour d'un tel évènement est ici comprise entre 20 et 50 ans (pluie décennale de l'ordre de 105 mm). Le hasard a voulu que nous l'observions durant notre première année d'expérimentation et que nous soyions placé au coeur de la tornade : à cinq kilomètres de distance, l'averse n'a atteint que 48,6 mm !

Le 19 juin 1983, à Imiga (Zorgho), la hauteur enregistrée est de 74 mm et l'intensité instantanée de 148 mm/h pendant 15 minutes (Fig. 1.24). La durée de retour en ce mois de juin est comprise entre 10 ans (59,6 mm) et 100 ans (89,7 mm) (Tableau 1.10).

- Le type 5 correspond à de petites pluies nombreuses mais peu efficaces, inférieures en effet dans leur grande majorité à 20 mm, voire à 10 mm, de plus ou moins longue durée et de faible à très faible intensité (1 à 5 mm/h avec des pointes possibles de 20 à 30 mm/h).

Sur l'ensemble des 5 années d'étude à Pô (191 pluviogrammes), les types 1 et 2 représentent en moyenne 40% du total ; le type 5: 45%, le type 3: 15% (Tableau 1.16).

* *Une classification génétique* des précipitations permet d'opposer quant à elle trois groupes d'averses : les lignes de grains, les pluies de mousson, les orages thermiques locaux (Baldy, 1985). Leur

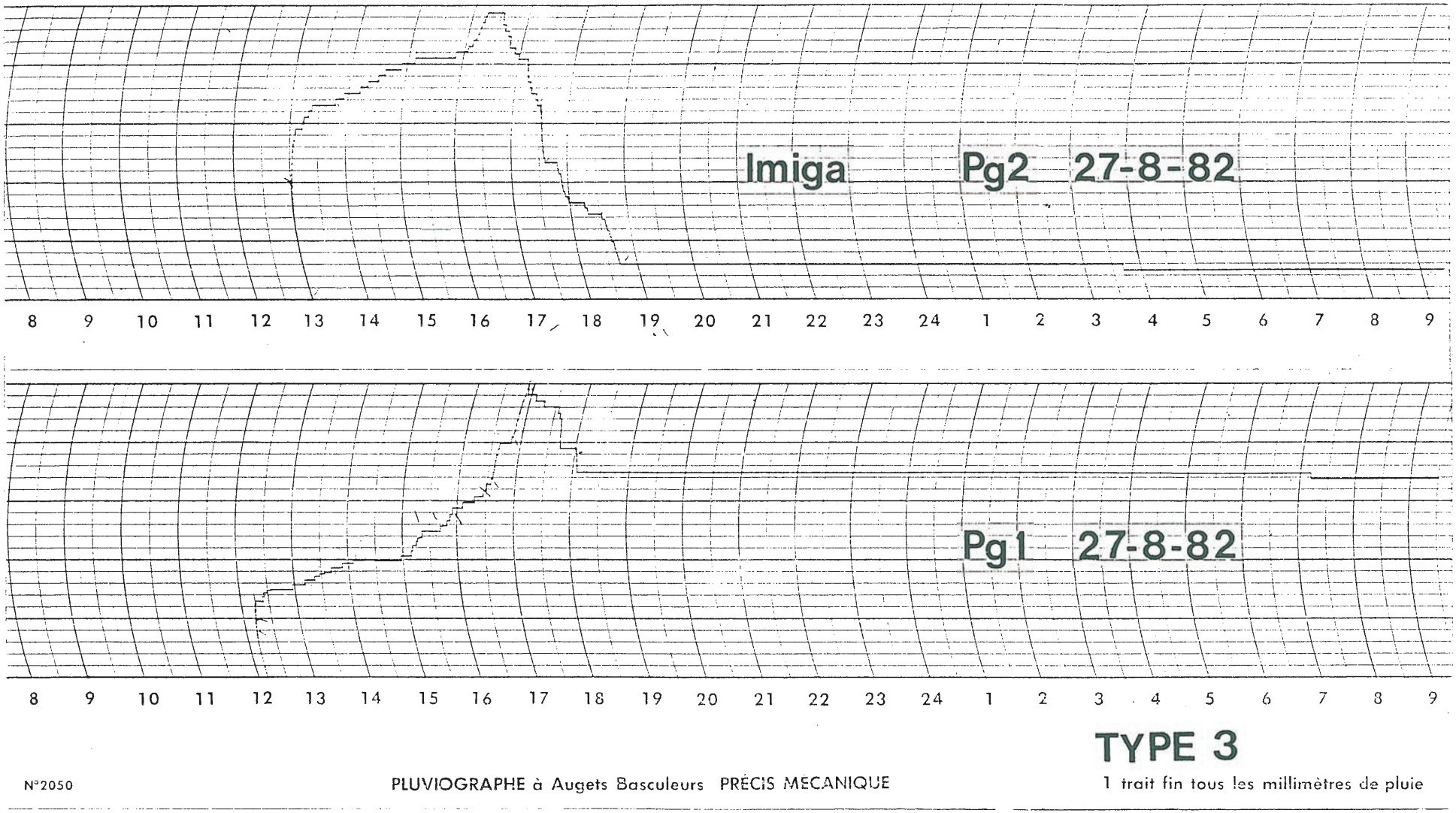


Fig. I.22 : Type de pluies n° 3 - Pluies composites avec plusieurs maximums d'intensité.
(Comparaison entre averses, pour un même orage, à 3 kilomètres de distance).

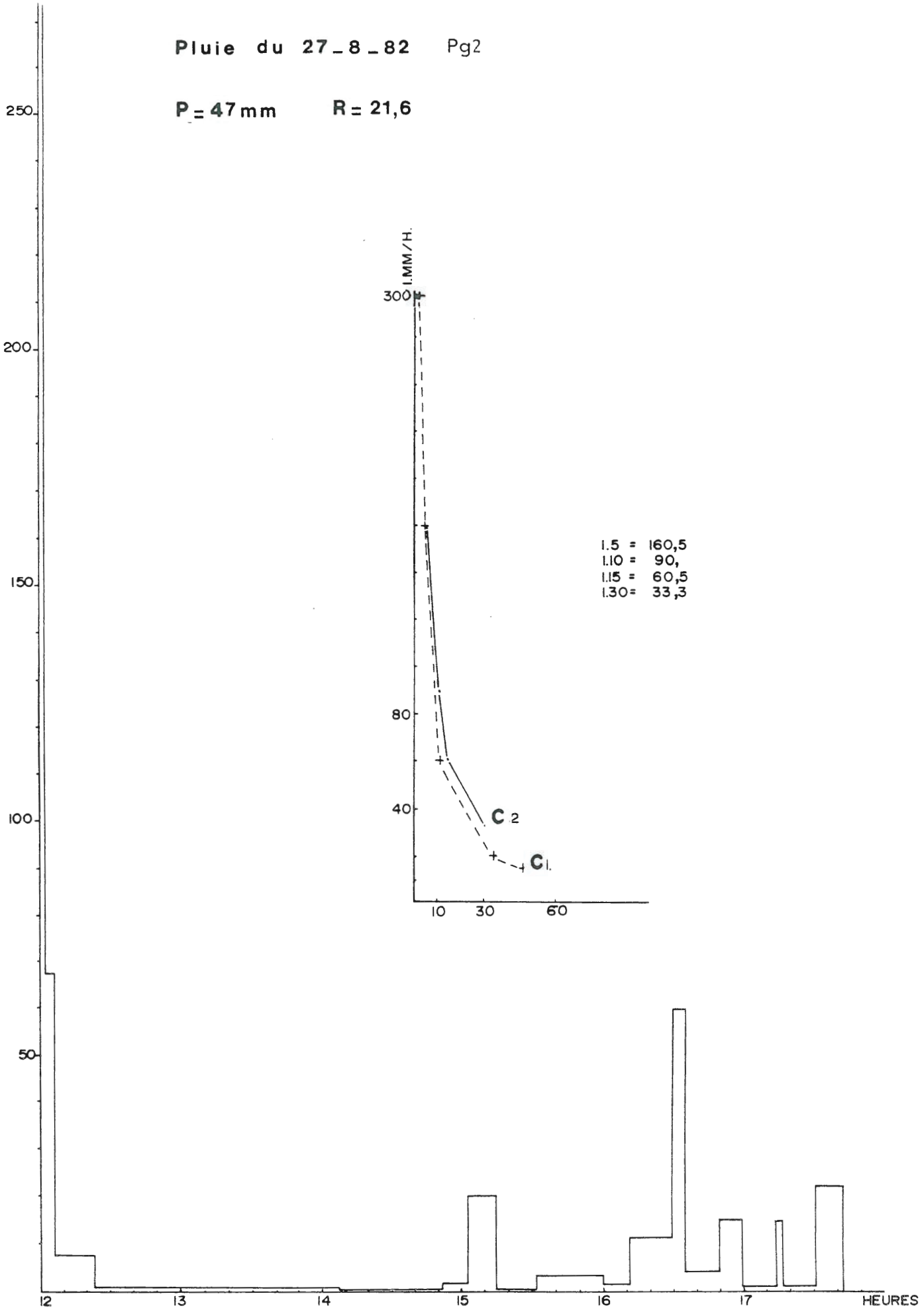


Fig. 1.23 : Hyétogramme, courbe intensité durée (C1) et courbe des intensités maximales (C2) pour une pluie de mousson à plusieurs maximums.

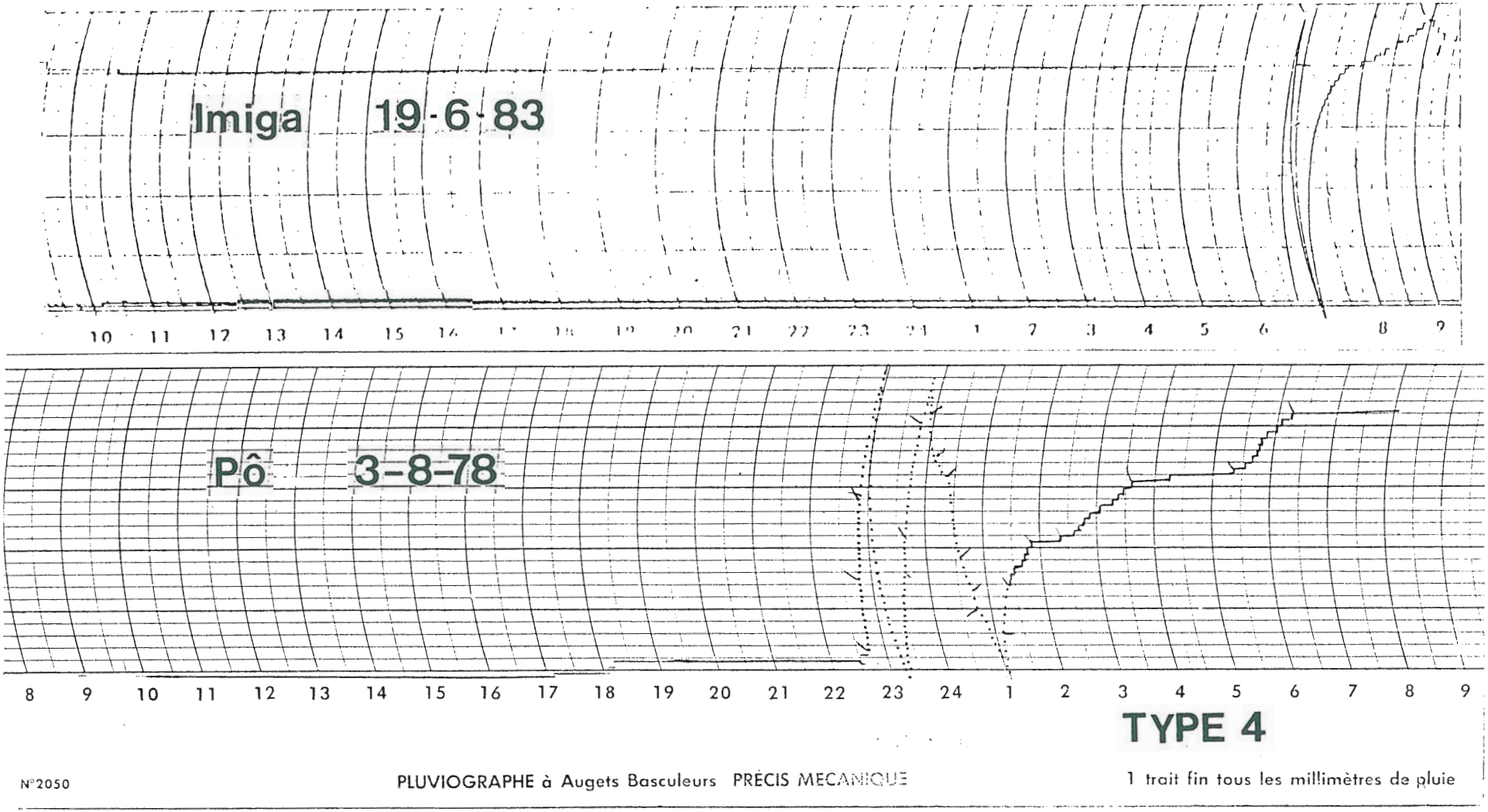


Fig. I.24 : Type de pluies n° 4 - Les tornades exceptionnelles.

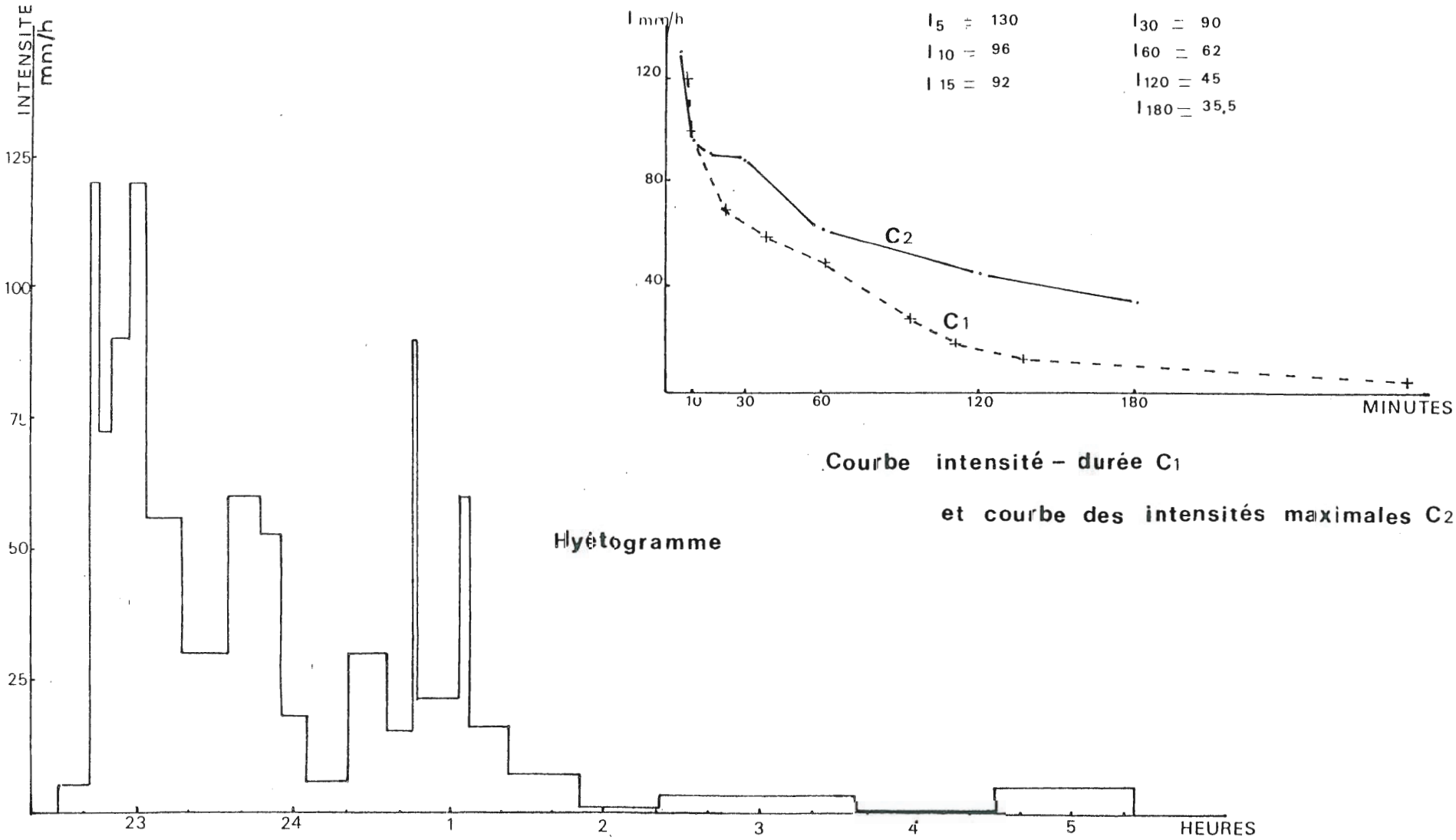


Fig. 1.25 : Hyétogramme, courbe intensité-durée (C1) et courbe des intensités maximales (C2) pour une tornade exceptionnelle.

distinction n'est pas toujours facile a postériori car l'identité n'est malheureusement pas totale entre ces trois groupes et les types graphiques précédents.

Elle suppose un examen des données pluviométriques sur des stations suffisamment nombreuses, rapprochées pour certaines d'entre elles, afin de cerner le caractère local, régional ou général de la perturbation. Nous avons entrepris ce travail en 1981 et 1982 sur les quatre postes de Pô (station climatologique), Pô (station synoptique créée en 1982), Banon et Tiébélé (les deux premières étant distantes d'un kilomètre, la troisième étant éloignée de 5 kilomètres de Pô, la quatrième de 21 kilomètres), avec un contrôle aux mêmes dates sur les postes de Tenkodogo, Zorgho et Ouagadougou.

Le tableau 1.17 permet d'opposer les pluies locales et régionales puis, parmi ces dernières, les lignes de grains et les pluies de mousson grâce à l'examen des pluviogrammes de Banon(1)

Les lignes de grains, caractérisées par une phase de grande intensité, suivie ou non d'une traîne, s'identifient bien en effet aux enregistrements de type 1 et, à un moindre degré, de type 2. En revanche, les types 3 et 4 peuvent être des orages locaux ou des pluies de mousson. Ces dernières correspondent alors aux pluies régionales non encore identifiées ou bien à des pluies générales affectant une grande partie du pays mais échappant ponctuellement à l'une de nos quatre stations méridionales. Ces pluies de mousson se placent essentiellement entre la mi-juillet et la mi-septembre tandis que les lignes de grains se concentrent en début de saison des pluies (Tableau 1.16). Tout en soulignant les incertitudes liées à ce type d'analyse, il est remarquable de constater qu'en 1982 comme en 1981 nous trouvons des pourcentages très voisins : *40% de lignes de grains ; un tiers environ de pluies de*

---

(1) *En l'absence de référence horaire sur Tiébélé, ce travail est en fait délicat : une même perturbation, à cheval sur deux journées climatologiques, est parfois manifestement rattachée à une journée sur le poste de Tiébélé et à la journée suivante sur Pô-Banon. Des regroupements ont été ainsi opérés sur 3 pluies de juin. Parfois un doute subsiste (3 mai 1982).*

	AVRIL			MAI			JUIN			JUILLET			AOUT			SEPTEMBRE			OCTOBRE			TOTAL		
TYPES / ANNEES	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
1978				1	1		2	3		1	1	4			3	1		3	5	1		10	6	10
1979	1						5	1			2	2	3	2	3		2	1				9	7	6
1980		2			1		2	1		1	2		1		4	2		1	2			8	6	5
1981								3		2	2		1	2	1							3	7	1
1982	1			3	1	1	4	1		1	2	2	2	2	2			1				11	6	6
TOTAL (% par rapport aux 191 Pluies)	2	2		4	3	1	13	9		5	9	8	7	6	13	3	2	6	7	1		41 (21,4 %)	32 (16,7 %)	28 (14,6 %)

Tableau 1.16 : Répartition mensuelle des types de pluies sur cinq ans à Pô-Banon.

Rappel - Type 1 : Lignes de grains sans traîne.
Type 2 : Lignes de grains avec traîne.
Type 3 . Pluies composites à plusieurs maximums d'intensité.
(Les maximums par type sont soulignés)

POSTES **TIEBELE T** } 16 km
BANON B } 5
PO Clim P_1)
Synop P_2) 1

Année 1982
du 21/4 au 4/10

DATE	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	
1						P_1P_2BT *		P_1P_2T		P_2			
2					P_1P_2B *				B				
3					P_2T ?	P_1P_2BT *		P_1P_2B					
4									P_1P_2B	P_1P_2B			
5						P_1P_2B	P_1P_2B	P_1P_2BT	P_1P_2				1
6							P_2						
7								P_1P_2BT	P_1P_2BT				
8						P_1P_2BT *							
9					P_1P_2B		P_1B	T	P_1P_2T				
10					P_1P_2BT *		P_2	P_2BT	P_1P_2				
11					P_1P_2BT *			P_1P_2T	P_2B				
12						T	P_1P_2B		T				
13					P_1P_2BT *	P_2	P_1P_2BT *	P_1P_2BT					
14								T					
15								P_1P_2B	P_1P_2BT *				
16													
17						P_1P_2BT *	P_1P_2BT						
18					P_1P_2BT *		P_1P_2T						
19									P_1P_2B				
20								P_1P_2B	T				
21				P_1P_2BT *		T	P_1P_2BT						
22					P_1P_2BT *	P_2	P_2	T	T				
23					P_2			P_1P_2B	P_1P_2BT *				
24							P_1P_2BT		P_2				
25				P_1P_2B									
26						P_1P_2BT *	T						
27								P_1P_2					
28				P_1P_2BT *					P_1P_2T				
29								P_2B	P_2T				
30							P_1P_2B		T				
31							P_2T						
TOTAL LIGNES DE GRAINS				2	6	5	1	0	2		16/40 : 40 % des averses à Banon		

Tableau 1.17 : Distribution spatiale des averses sur quatre stations voisines du sud du Burkina Faso et identification des pluies locales ou régionales (lignes de grains : *)

mousson, un cinquième à un quart d'orages locaux.

Une étude plus approfondie mériterait d'être reprise par le Service Météorologique National, disposant de toutes les données, afin de préciser notamment la raréfaction des pluies de mousson du sud au nord du pays.

Cette recherche permet d'illustrer également l'extrême variabilité spatiale des précipitations, liée aux perturbations orageuses : orages thermiques locaux certes mais aussi exacerbation ponctuelle de la mousson ou d'une ligne de grain. Les corrélations entre précipitations sont en effet mauvaises, au-delà de quelques kilomètres seulement de distance. C'est ce que montrent le tableau 1.18, relatif à quatre stations durant l'année 1982, ainsi que la figure 1.12 pour deux d'entre elles durant 5 ans.

Coefficient de corrélation en 1982	Pô Climato-Pô Synoptique 1 km	Pô Climato-Banon 5 km	Pô Climato-Tiebélé 21 km
Précipitations totales	0,95	0,76	0,09
Précipitations supérieures à 20 mm	0,89	0,32	-0,38

Tableau 1.18 : Coefficients de corrélation entre les précipitations annuelles de quatre stations au sud du Burkina Faso.

Nous retrouvons le même coefficient de corrélation (0,33) entre Pô et Banon sur les 5 années d'étude (Fig. 1.12).

J.P. Lahaye (1980,b), pour sa part, a montré que la corrélation entre les pluies journalières maximales annuelles n'existe plus au-delà de 10 à 15 kilomètres (Pô - Tiébélé : - 0,08).

Cette variabilité spatiale des précipitations, notamment extrêmes, pour laquelle P. Michel recommandait dès 1969 des études détaillées

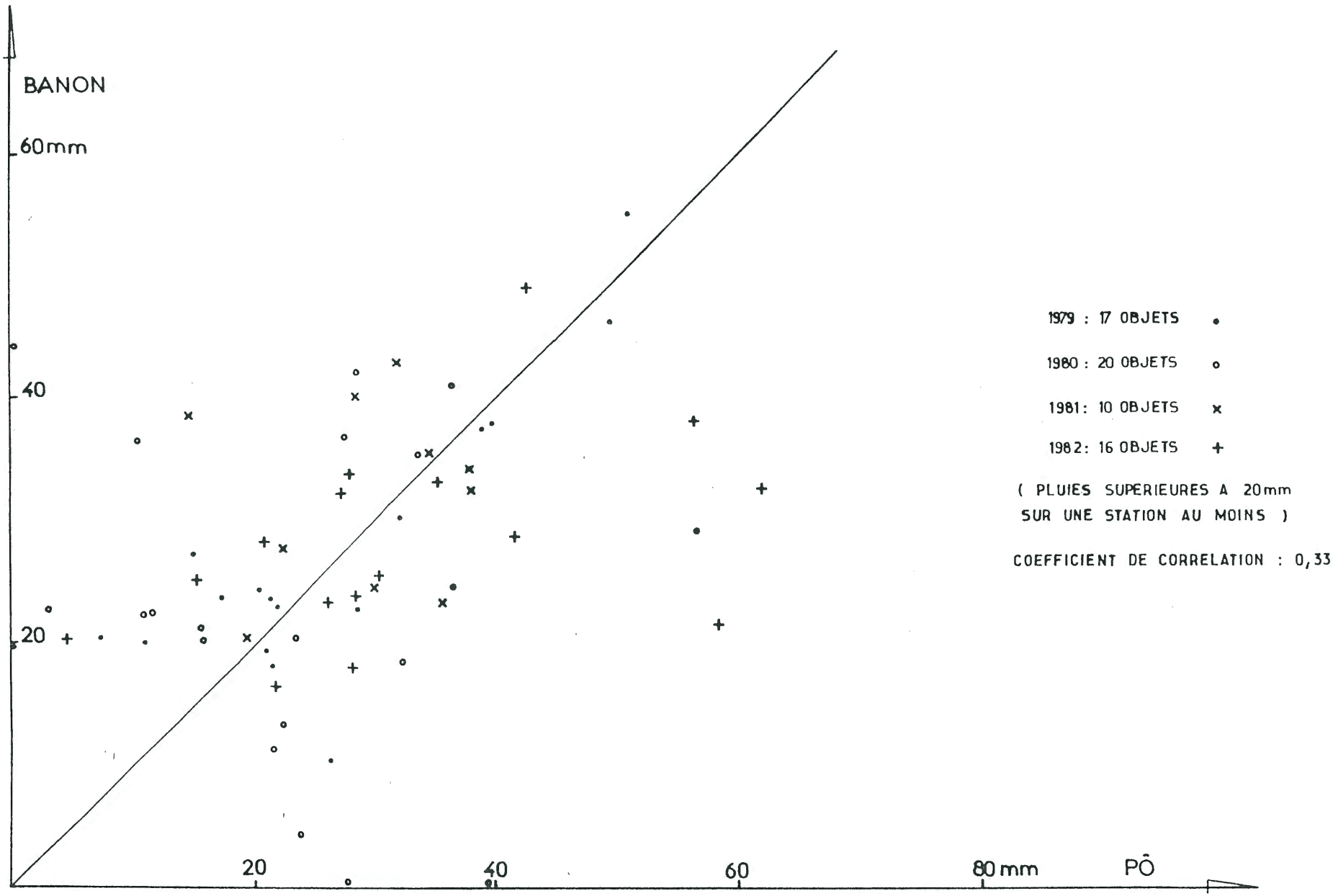


Fig. 1.26 : Variabilité des pluies dans l'espace (Distance Pô-Banon 5 km).

(p. 112), doit toujours être présente à l'esprit lorsqu'il s'agit d'interpréter des formes d'érosion, notamment de dissection linéaire, dans un environnement apparemment pénéstable. *Ces paroxysmes morphogéniques peuvent être liés à une succession d'averses mais aussi à des tornades locales qui échappent totalement au réseau météorologique.*

1.3.2 : Les courbes intensités - durées - fréquences :

La connaissance des pluies de courte durée à forte intensité est une donnée indispensable lorsqu'on s'intéresse aux écoulements possibles sur parcelles-témoins ou petits bassins-versants ruraux ou urbains (Le Barbe, 1982).

Les premières approches systématiques en ce sens sont la publication CIEH-ORSTOM de Y. Brunet-Moret (1963) puis celle de Mounis et Mansongi (1974) proposant 20 courbes intensités - durées - fréquences pour les villes du Sahel et d'Afrique Centrale. Plus récemment, ce travail a été repris par C. Puech et D. Chabi-Gonni (1984) et porte désormais sur 87 stations synoptiques de 13 pays d'Afrique dont 7 au Burkina (135 années-stations).

Aux courbes tracées par C. Puech (1984), nous ajoutons celle obtenue après cinq ans d'enregistrement à Pô-Banon (Fig. 1.28).

Les pluies les plus fortes sont remarquablement ajustées à une loi exponentielle quelle que soit la durée (Fig. 1.27) ou la fréquence (Fig. 1.28). Dans ce cas, les résultats sont présentés en échelles doublement logarithmiques : durée en abscisse, hauteur ou intensité en ordonnées. L'ajustement à une formule de Montana du type $I = a\ t^{-b}$ (a et b coefficients d'ajustement - Tableau 1.20) se traduit par une droite dont la pente s'infléchit au-delà des durées d'1 heure ou 1h30 ; cette particularité étant probablement liée à l'opposition génétique précédente entre lignes de grains ou orages de durée inférieure ou égale à 1 heure et pluies de mousson d'intensité plus faible. Ces courbes permettent de définir des relations intensités - durées pour des averses de fréquence donnée : ainsi, au cours d'une averse de fréquence annuelle, on peut

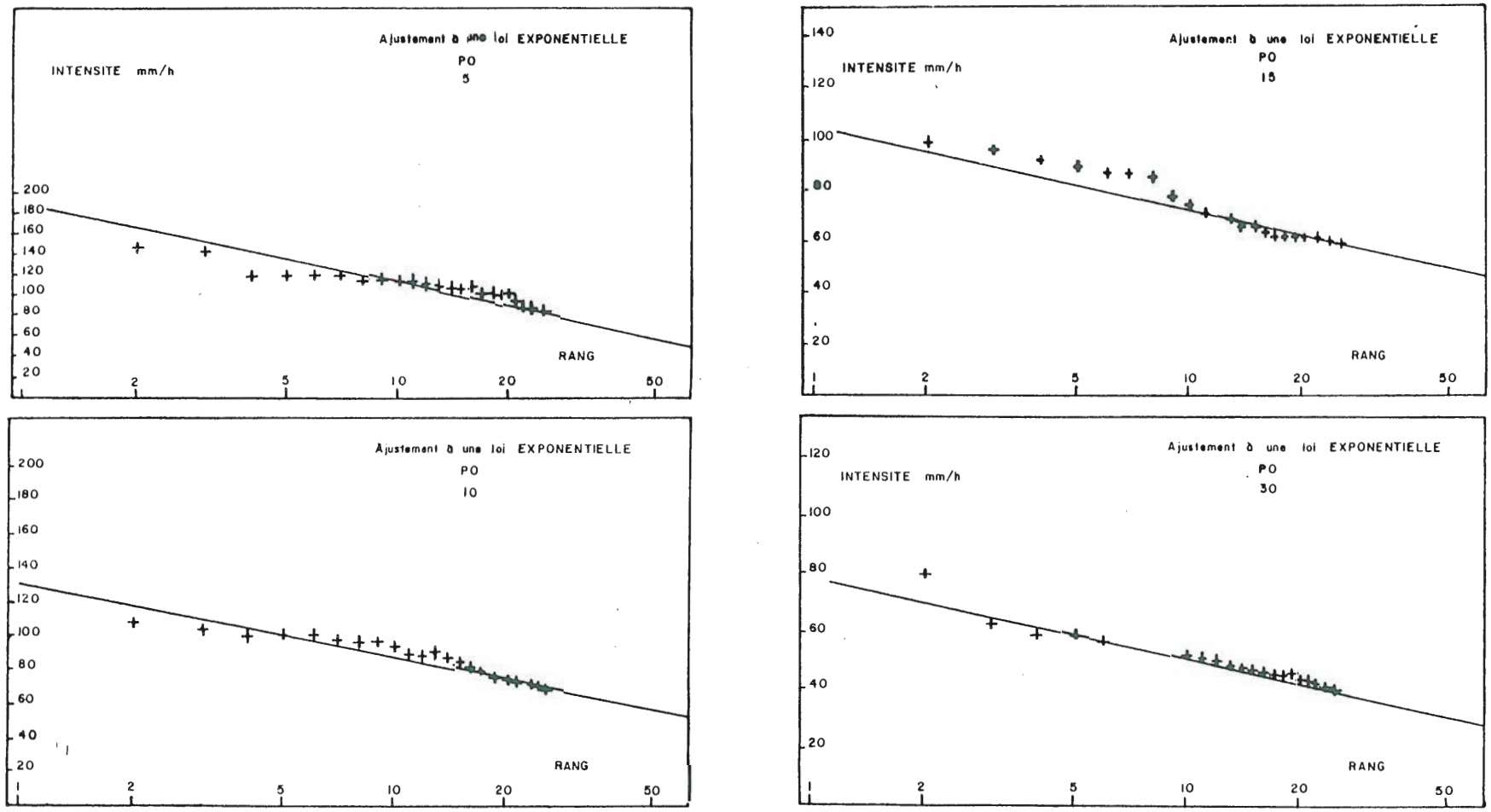


Fig. 1.27 : Ajustement des pluies les plus intenses à une loi exponentielle - Pô 1978-1982.

Remarque : La fréquence empirique associée à chaque valeur est prise égale à Pi = i/n + 1 (i = rang de la 1ère valeur, n = taille de l'échantillon). En échelle logarithmique Log f et Log i sont égaux à une constante près d'où la représentation ci-dessus pluie en fonction du rang, qui est semblable à pluie en fonction de la fréquence. *in Puech-Chabi (1984).*

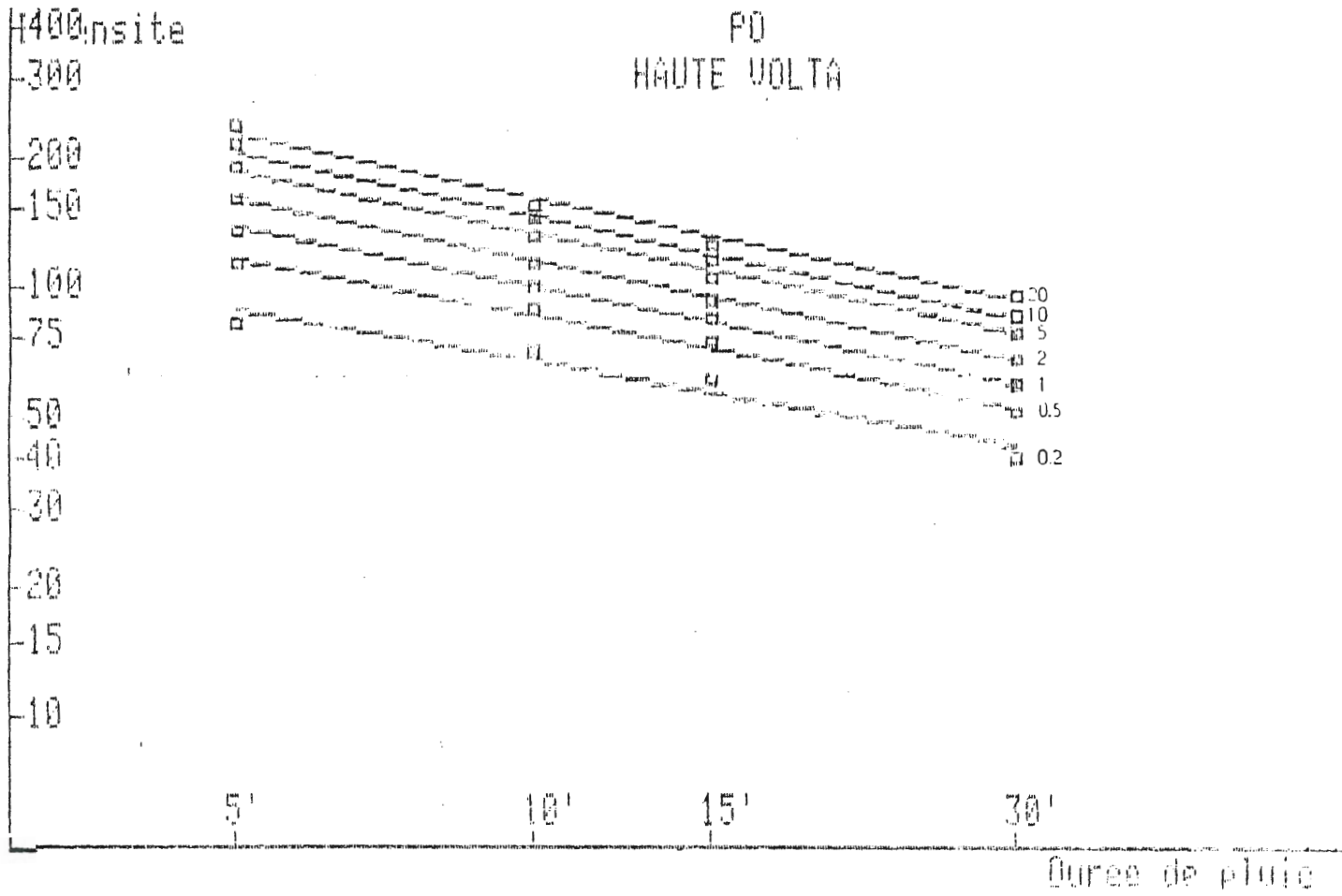


Fig. 1.28 : Courbes intensités durees-fréquences à Pô (1978-1982).

STATION	Duree	N	M	Moy	Sig	.2	.5	1	2	5	10	20
PO	5	5	25	114.56	33.30	81.3	111.8	134.9	157.9	188.5	211.5	234.6
STATION	Duree	N	M	Moy	Sig	.2	.5	1	2	5	10	20
PO	10	5	25	89.18	18.34	70.8	87.6	100.4	113.1	129.9	142.6	155.3
STATION	Duree	N	M	Moy	Sig	.2	.5	1	2	5	10	20
PO	15	5	25	74.30	14.05	60.3	73.1	82.9	92.6	105.5	115.2	124.9
STATION	Duree	N	M	Moy	Sig	.2	.5	1	2	5	10	20
PO	30	5	25	51.70	12.03	39.7	50.7	59.0	67.4	78.4	86.7	95.1

N = 5 = NOMBRE D'ANNEES ETUDIEES (1978-1982) M= 25 = NOMBRE DE POINTS RETENUS

Tableau 1.19 : Les quantiles estimés sur les courbes intensités - durées - fréquences de Pô (1978 - 1982).

FREQUENCE ENTRE 5' ET 30'	COEFFICIENTS A ET B DE MONTANA	
0.2	-0.40	5.11
0.5	-0.44	5.46
1.0	-0.46	5.66
2.0	-0.48	5.83
5.0	-0.49	6.01
10.0	-0.50	

Tableau 1.20 : Les coefficients de Montana des droites d'ajustement.

s'attendre à des intensités maximales durant 30 minutes de 74 mm/h à Ouaga ; au cours d'une averse décennale, les intensités maximales en 30 minutes seront de 104 mm/h. En fait, la période de référence prise en compte pour ces calculs paraît déterminante si l'on compare (Tableau 1.21) ces résultats à ceux de Y. Brunet-Moret (1954-1963) ou les nôtres sur la station de Pô (1978-1982), située à 150 kilomètres au sud de Ouagadougou.

Référence / Fréquence	Brunet-Moret (Ouaga : 1954-1963)	Puech-Chabi (Ouaga : 1954-1982)	Mietton (Pô : 1978-1982)
1 an	56 mm/h	74 mm/h	59 mm/h
10 ans	78 mm/h	104 mm/h	87 mm/h

Tableau 1.21 : Intensités maximales durant 30 minutes à Ouagadougou et Pô suivant différentes périodes de référence.

Quoi qu'il en soit, le caractère remarquablement élevé de ces intensités instantanées (Fréquence annuelle de 135 mm/h durant 5 minutes à Pô - tableau 1.19) ou de plus longue durée, se conjugue aux modifications de structure de surface du sol pour expliquer une saturation et l'occurrence de puissants débit liquides et solides. L'agressivité globale de l'averse peut être définie par un indice d'érosivité.

1.3.3 : Les indices d'érosivité :

Il n'y a pas lieu ici de revenir sur les différents indices existants, largement présentés par ailleurs, notamment par E. Roose (1981). Ce dernier a principalement utilisé l'indice R de Wischmeier, égal au produit de l'énergie cinétique de l'averse par son intensité maximale pendant 30 minutes (I30). Les chercheurs du C.T.F.T. (Galabert *et al.*, 1972) ont établi également un indice R', très proche de R, donné par la formule $R' = \frac{(1,5884 \times P \times I30)}{100} - 1,24$. Cet index présente l'énorme avantage de ne plus réclamer un long dépouillement des pluviogrammes mais une simple lecture de I30. Une carte de l'agressivité climatique en

Haute-Volta a ainsi été ébauchée par le C.T.F.T. donnant l'indice annuel moyen et les indices extrêmes sur 10 stations, pour la période 1966-1972.

E. Roose a pour sa part établi une relation beaucoup plus satisfaisante dans la mesure où elle permet de couvrir véritablement l'ensemble du territoire, de tracer des isolignes d'agressivité climatique. Cette relation simple relie l'indice d'agressivité annuel (R am) à la hauteur de pluie annuelle moyenne (H am) suivant la formule R am / H am = 0,50 $\pm$ 0,05.

Nous avons vérifié la validité de cette équation sur notre site expérimental de Pô, où la moyenne est de 0,44 sur cinq années d'enregistrement, puis sur les postes de Boromo et de Fada pour lesquels nous avons pu obtenir les pluviogrammes sur 8 années (1973-1980). Pour ces deux stations, l'indice moyen est respectivement de 0,49 et 0,56. Les écarts par rapport à l'équation générale peuvent provenir, du moins à Pô, de l'impossibilité de calcul de quelques indices unitaires, d'une différence de dépouillement, de la durée relativement courte des observations ou de la présence des dômes rocheux au sud et à l'est de cette localité.

Cette relation offre donc la possibilité de transformer de longues séries pluviométriques et de cartographier avec précision la distribution spatiale de l'indice moyen annuel de Wischmeïer. Au Burkina Faso, ce dernier est compris entre 200 et plus de 600 unités(1) ce qui correspond à une agressivité élevée, supérieure à celle des régions tempérées ou méditerranéenne mais inférieure à celle de la zone équatoriale ou sub-équatoriale. Le total pluviométrique est en effet moins abondant mais *l'agressivité par mm de pluie n'est pas plus faible* (Roose, 1979).

Une fois encore, la notion de fréquence doit être rattachée à celle de l'agressivité, du moins sur les stations expérimentales afin de caractériser précisément chacune des années de mesures. C'est ce qui a

(1) *L'indice de Wischmeïer, annuel, mensuel ou unitaire, est exprimé tout au long de ce travail en unités américaines.*

été réalisé notamment par B. Lidon (Lidon *et al.*, 1978), sur la station de Saria, dans le centre-ouest du pays (12°16'N - 02°09'W), représentative du domaine soudanien.

Fréquence	0,2	0,5	0,8
R	324	441	559

Tableau 1.22 : Fréquences des indices d'agressivité annuels à Saria.

Enfin, dans la perspective de recherches morphodynamiques, il est utile également de caractériser la répartition mensuelle de l'indice d'érosivité. Aux données établies à Saria par E. Roose, nous ajoutons celles de Pô, Fada et Boromo. Le tableau 1.23 montre, quelle que soit la station, que la moitié de l'agressivité des pluies s'exerce de mars-avril à juillet, c'est-à-dire lorsque le sol est pratiquement dépourvu de couvert végétal naturel ou cultivé.

Ce tableau montre également que, par delà les moyennes, l'indice de variation peut s'élever pour l'index R à 2,5 à Fada, 2,2 à Boromo avec des valeurs annuelles maximales de 741 et 698 à Fada en 1975 et 1977, 571 en 1980 à Boromo. Cela signifie que l'agressivité des pluies ne s'est pas abaissée pendant la période de sécheresse. On retrouve là une conclusion de J. Albergel (1986) : *la dégradation de la pluviosité annuelle se caractérise par une diminution du total des pluies supérieures à 40 mm mais sans affecter les valeurs extrêmes de pluviométrie journalière.*

	Janv	Fév	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil	Août	Sept	Oct	Nov	Déc	TOTAL
SARIA d'après E.Roose													
1971	0	0	14	13,6	3,3	16,9	154,8	69,8	29,4	0	0	0	301,8
1972	0	0	0	1,4	34,8	82,9	69,7	60,8	18,3	26,2	0	0	294,1
1973	0	0	0	7,9	43	19,1	295,1	50,9	37,1	0	0	0	453,1
1974	0	0	0	0	65	33	126,8	190,5	88,7	8,2	0	0	512,2
Moyenne 1922 - 1980	0	0	1	12 47%	32	56	113	152	76	13	0 53%	0	342
FADA													
1973	0	0	2,3	0	31,2	25,7	242	76,1	11,8	0	0	0	389,1
1974	0	0	0	0	9,7	48,1	105,9	85,6	66,2	0	0	0	315,5
1975	0	0	0	0	97,4	29,3	223,8	134,8	255,3	0	0	0	740,6
1976	0	0	0	0	24,1	67,7	98,9	25,1	7,2	72	0	0	295
1977	0	0	0	0	84,5	6,6	0	388,4	185,1	33,4	0	0	698
1978	0	0	46,6	8,2	64,2	54,3	50,9	67,4	87,9	0	0	0	379,5
1979	0	0	0	4,1	36	65	260,4	134,2	55,6	2,6	0	0	557,9
1980	0	0	0	0	18,8	83,3	64,1	177,1	18,7	4,4	0	0	366,4
Moyenne 1922 -1980	0	0	4	14 49%	42	64	95	130	85	16	0 51%	0	355
BOROMO													
1974	0	0	0	83,1	47,1	11,4	103,3	140	70,9	1,6	0	0	457,4
1975	0	0	0	0	14,5	32,4	37,7	230,1	183,7	0	0	0	498,4
1976	0	0	43,3	13	34,1	60,8	190,3	46	44,9	48,7	0	0	481,1
1977	0	0	0	0	15,2	38,3	78,7	100,6	27,2	0	0	0	260
1978	0	0	0	30,9	19,5	23,2	148,7	103,7	16,8	17,8	0	0	360,6
1979	0	0	0	0	0	57,6	89	27,1	75,8	7	30,9	0	287,4
1980	0	0	0	0	225,4	46,1	107,3	173,9	16,4	2,3	0	0	571,4
1981	0	0	0	0	19,5	50,3	13	192,5	50,2	1,3	0	0	326,8
Moyenne 1923 - 1981	0	0	5	20 48%	43	58	100	129	89	24	1 52%	0	369
PO													
1978	-	-	-	-	30	45	61	184	27	14	-	-	361
1979	-	-	-	-	42	17	43	103	28	-	-	-	233
1980	-	-	-	21	6	24	73	114	21	5	-	-	264
1981	-	-	-	-	-	47	70	83	-	-	-	-	200
1982	-	-	-	22	97	73	45	61	-	-	-	-	298
Moyenne 1942 -1982	0	0	6	20 47%	44	62	82	125	86	23	5 53%	0	371

Tableau 1.23 :
REPARTITION MENSUELLE DE L'INDICE D'EROSIVITE DANS 4 STATIONS DU BURKINA-FASO

CONCLUSION.

Agent morphoclimatique essentiel du domaine des savanes, les précipitations font l'objet, dans ce premier chapitre, d'un examen détaillé dans la perspective d'une interprétation des résultats de mesures du ruissellement et de l'érosion et d'une meilleure compréhension de la dynamique morphogénique actuelle. Les différentes caractéristiques pluviométriques (totaux, classes, fréquences, intensités et durées) sont abordées aux différentes échelles : territoriale, régionale et ponctuelle dans le cas des deux sites d'expérimentations (Pô et Zorgho).

Cette analyse confirme d'une part des résultats antérieurs tout en les précisant, le plus souvent, en fonction d'une période de référence distincte, postérieure à 1970 et, d'autre part, débouche sur de nouveaux acquis :

- Le tracé des moyennes mobiles relatives à six stations du domaine soudanien illustre le caractère de gravité de la sécheresse actuelle et confirme son démarrage dans la seconde moitié des années soixante. Cette sécheresse s'identifie principalement à une diminution du total des pluies supérieures à 40 mm, qui est bien vérifiée dans le domaine soudanien mais pas au Sahel. L'hypothèse est faite que cette baisse (de l'ordre de 5% du total pluviométrique) affecte surtout les phénomènes orageux dans le corps même de la mousson plus que les lignes de grains. L'examen des indices d'érosivité montre que les valeurs extrêmes de pluviométrie journalière ne sont cependant pas forcément affectées dans ce contexte.

- Les classifications graphique et génétique des précipitations à partir des pluviogrammes et les comparaisons des données pluviométriques journalières à 1, 5, 20 et 100 kilomètres de distance permettent d'avancer les proportions suivantes pour chaque type d'averse : 40% de lignes de grains, un tiers environ de pluies de mousson, un cinquième à un quart d'orages locaux.

Quant à l'extrême variabilité dans l'espace des précipitations, elle est bien mise en évidence par l'absence de corrélation ($r = 0,33$) entre deux stations distantes de 5 kilomètres seulement.

- L'analyse, à l'échelle plus vaste du territoire ou du moins d'une région soudanienne, des récurrences de précipitations maximales journalières en tout mois ou en début d'hivernage apporte des résultats essentiels pour la compréhension des phénomènes morphogéniques extrêmes.

L'analyse statistique fait apparaître dans tous les cas un bon ajustement de ces précipitations à la loi de Gumbel.

Le calcul des fréquences de pluies maximales en avril, mai ou juin, dans le centre et le sud du Burkina Faso, montre que les évènements que l'on qualifie d'exceptionnels ont pour probabilité centennale une valeur estimée en fait déjà bien souvent observée. Les risques d'érosion appréciés ainsi sont en outre plus élevés en avril et mai qu'en juin.

L'établissement des cartes d'isohyètes à l'échelle du Burkina Faso pour les précipitations maximales annuelles sur n jours, en fonction de quatre épisodes de référence différents, constitue l'apport le plus important de cette recherche climatique. Les quantiles obtenus sur 2 et 30 jours sont respectivement mis en parallèle avec les pluies journalières maximales d'une part et les pluies mensuelles d'autre part. Dans le premier cas, le rapport généralement voisin de 1,20 peut atteindre 1,64 au sud du pays. Quant à l'écart entre pluies maximales sur 30 jours et en août, mois le plus pluvieux, il peut atteindre 45%.

Ces données fréquentielles permettent de mieux cerner la vitesse d'évolution des modelés en situant les érosions maximales par rapport aux durées de retour des phénomènes climatiques. Elles ont en outre un intérêt appliqué indéniable vis-à-vis des aménagements hydro-agricoles en particulier.

Dans le chapitre II, consacré à la dynamique éolienne, la même démarche a pour objectif d'améliorer notre connaissance des seuls vents *efficaces*, abordés une fois encore non seulement sous l'angle de leurs *intensités* mais aussi de leurs *fréquences*.

CHAPITRE II

LE VENT

Le vent constitue à l'évidence un agent d'érosion non négligeable sur le territoire du Burkina Faso. Son activité est cependant mieux cernée sur les marges sahéliennes (Mainguet et Cossus, 1980) qu'en milieu de savane proprement dit, où les modalités de la dynamique éolienne sont en effet particulièrement variables. Cette variabilité est liée à la densité changeante dans le temps et dans l'espace du couvert végétal ainsi qu'à l'origine du vent lui-même, à son rythme saisonnier opposant harmattan et mousson. Au total l'examen, dans notre second livre, des modalités de cette dynamique ainsi que des formes consécutives sera délicat.

Dans cette première partie, ce sont les principales composantes climatiques des vents au sol qu'il faut définir. C. Baldy *et al.*, (1982) ont analysé de manière très détaillée les vents moyens ; nous présentons à notre tour les vitesses, les fréquences et les directions relatives aux vents maximums, les plus efficaces sur le plan érosif. A cet égard, le vent efficace est défini, suivant Bagnold, comme un vent dont la vitesse est égale ou supérieure à 5 m/s.

2.1 LES MESURES ANEMOMETRIQUES.

Elles sont encore très incomplètes. On ne dispose que de deux sources principales d'informations, les unes relatives aux vents *instantanés*, les autres aux intégrales du vent *passé* par unité de temps.

- Les mesures de vents instantanés : elles ne sont faites que toutes les trois heures dans la plupart des stations synoptiques, hormis certaines stations d'aérodromes, où des observations horaires sont effectuées. Dans tous les cas, la vitesse instantanée notée ne représente au mieux que la moyenne des vitesses relevées pendant les dix dernières minutes précédant l'observation.

- Les mesures totalisées des stations agrométéorologiques : peu valables jusqu'à une date récente du fait de la trop faible hauteur des anémototalisateurs (Baldy, 1980), elles ont été singulièrement améliorées avec l'installation de huit anémomètres-girouettes enregistreurs mécaniques, dans le cadre du développement du Service agrométéorologique de la Direction de la Météorologie.

Dans notre optique d'analyse des vents maximums, nous avons pu disposer ainsi de trois types d'informations :

* les données trihoraires diurnes (6h - 12h - 18h) relatives à la force du vent et regroupées par J. Renard (1966). Elles intéressent six stations(1) : Bobo-Dioulasso, Boromo, Dori, Fada N'Gourma, Gaoua, Ouagadougou (Tab. A.2.1).

* les données des stations aéronautiques de Ouagadougou et Bobo-Dioulasso. Recueillies auprès des Services Centraux de l'ASECNA à Dakar, elles nous fournissent, à partir de 24 observations par jour, la force maximale du vent instantané quotidien et la direction associée (Tab. A.2.2). L'information est d'autant plus fiable qu'elle s'appuie sur des périodes de référence de neuf ou dix ans : 1968-1977 à Ouagadougou, 1968-1976 à Bobo-Dioulasso. En revanche, l'heure correspondant au maximum n'est pas notée ; l'analyse systématique des vitesses maximales instantanées, heure par heure, resterait donc à faire pour préciser notre travail sur ces deux stations.

---

(1) *Les tableaux climatologiques mensuels de Pô, à notre disposition pour la période 1979-1982, nous ont permis de connaître les données trihoraires en cette station (Fig. A.2.4). Toutefois, les vitesses sont seulement estimées suivant l'échelle de Beaufort et le seuil retenu est de 4 m/s.*

* Les tableaux relatifs aux fréquences, en pourcentage des cas, des vitesses des vents par heure et par mois (Tab. A.2.3). Ils ont été construits (Baldy *et al.*, 1982) après dépouillement des anémomètres-girouettes pour des périodes de deux ou trois ans. Nous avons pu reprendre ces tableaux pour quatre stations (Markoye 14°38'N, Di Sourou 13°6'N, Mogtedo 12°17'N, Saria 12°16'N) et considérer les vitesses moyennes horaires supérieures à 5 m/s ou 4 m/s. Il s'agit bien en effet, répétons-le, d'une moyenne, d'une intégrale du vent passé.

Là encore, il eut fallu pouvoir dépouiller les diagrammes de manière à faire ressortir les vitesses maximales instantanées ! Une vitesse supérieure à 6 m/s, par exemple, est très rarement observée en vent horaire moyen passé. En revanche, des pointes de vent de cet ordre peuvent exister dans le même temps (Baldy *et al.*, 1982), au passage des lignes de grains en particulier. La vitesse de propagation(1) de celles-ci est en effet d'au moins 13 à 18 m/s (Lemaître, 1981). Ces pointes échappent à notre observation dans les tableaux considérés. Toutefois, l'occurrence de moyennes fortes, supérieures à 5 m/s ou même 4 m/s, ne se conçoit que s'il a existé quelques pointes plus élevées encore. En ce sens, elles sont bien synonymes d'épisodes érosifs efficaces, quelle que soit leur durée.

A ces trois types d'informations correspondent trois catégories de graphiques, qui se complètent relativement bien et que nous commenterons tour à tour.

2.2 LES CARACTERISTIQUES DES VENTS MAXIMUMS.

2.2.1 : Fréquences aux différentes échelles de temps : quotidiennes, mensuelles, annuelles.

* A l'échelle quotidienne, les données de J. Renard (1966)

---

(1) *Il s'agit de la composante horizontale. La composante verticale peut atteindre 30 à 35 m/s !*

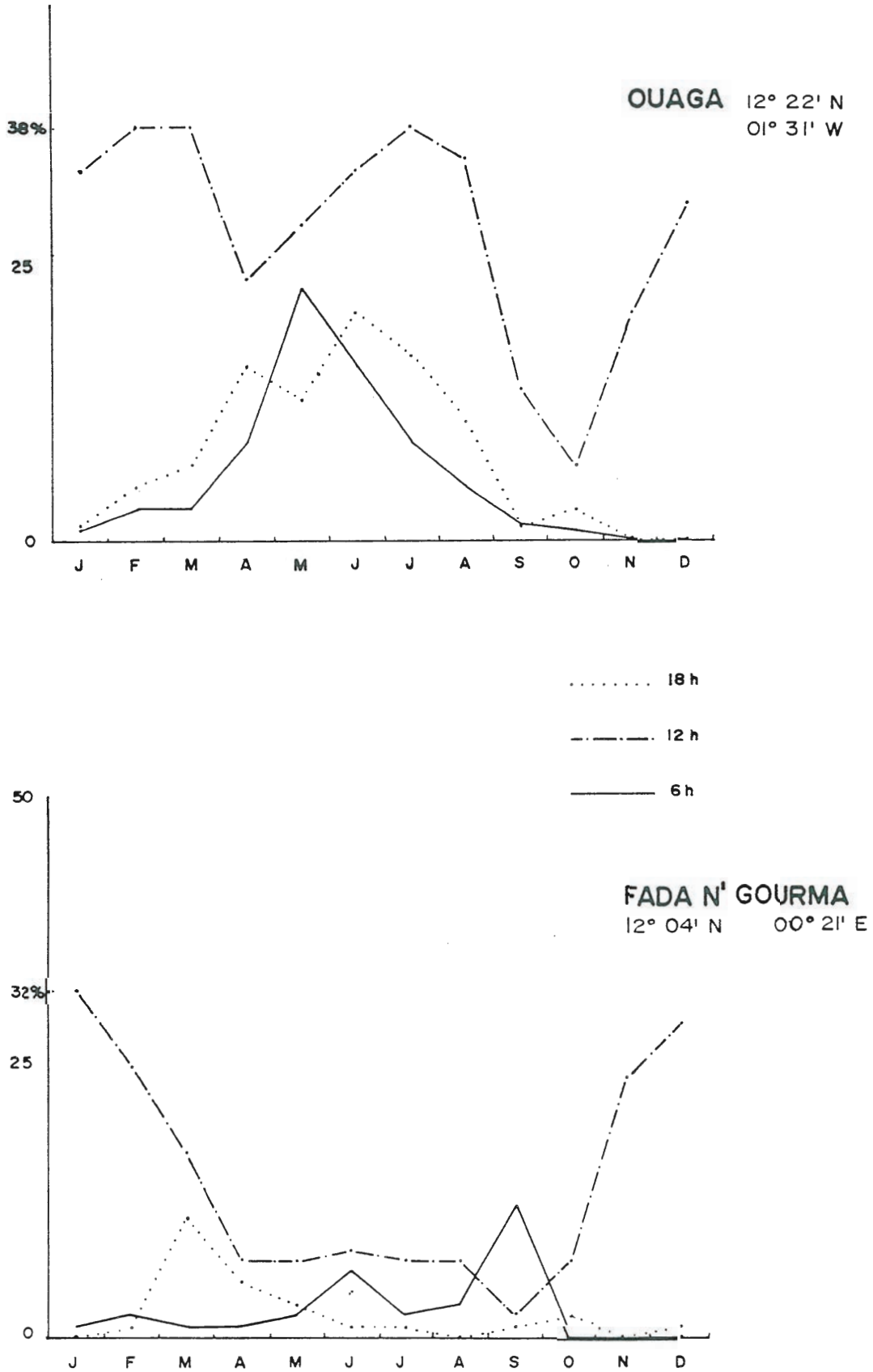


Fig. 2.1 : Fréquence des vents instantanés efficaces (> 5m/s), par mois, pour 3 heures d'observation, en pourcentage des cas.

montrent que les vents efficaces sont beaucoup plus fréquents à 12h qu'à 6h ou 18h (Fig. 2.1). Ces renseignements sont évidemment insuffisants et le seul examen des vents à Pô permet de placer les pointes de vents forts plus tôt dans la matinée, à 8h beaucoup plus qu'à 12h (Fig. A.2.4).

Beaucoup plus significatifs sont les renseignements fournis par les anémomètres de type Lambrecht. Les vitesses moyennes efficaces calculées sur 24 heures présentent *une fréquence maximale entre 9 et 11h*, quelle que soit la station, avec parfois une occurrence encore marquée durant l'après-midi tandis qu'en saison sèche, les vents moyens efficaces disparaissent totalement la nuit (Fig. 2.2 à 2.5). Calculée sur l'ensemble de la durée d'observations, la vitesse moyenne horaire la plus élevée est enregistrée à Markoye à *11 heures* (en janvier) ; elle est de 14 km/h soit 3,9 m/s (Baldy *et al.*, 1982, p. 56). Elle est encore de 13,3 km/h (3,7 m/s) à Saria, à 11 heures (janvier) une nouvelle fois, en milieu savanien, mais il est probable que les situations locales influent beaucoup sur cette dynamique éolienne puisque ces valeurs tombent à 11,1 km/h à Mogtedo (mars - 10h) et 10,5 km/h à Di-Sourou (avril - 10h).

* A l'échelle mensuelle, les données de J. Renard font apparaître pour chacune des stations étudiées deux pics de fréquence : l'un, généralisé, au coeur de la saison sèche (janvier, février ou décembre), en régime d'harmattan ; l'autre en juin ou juillet, essentiel à Ouagadougou, Bobo ou Dori mais très effacé sur les autres stations. Durant les mois d'hiver, ces vents instantanés efficaces peuvent, en pourcentage des cas, à une heure donnée, caractériser plus du tiers des jours de vent, voire plus de la moitié à Pô(1).

Si l'on considère les moyennes des vents passés, les fréquences les plus élevées se rencontrent encore en janvier à Markoye en climat sahélien (49%, en pourcentage des cas de vents moyens supérieurs

(1) *La valeur de 53,8% à Pô en décembre (Fig. A.2.4), apparemment suspecte, s'explique par le fait que le seuil fixé est ici de 4 m/s et non plus de 5 m/s comme sur les autres stations. Cet ordre de grandeur, en décembre, se vérifie bien chacune des quatre années étudiées.*

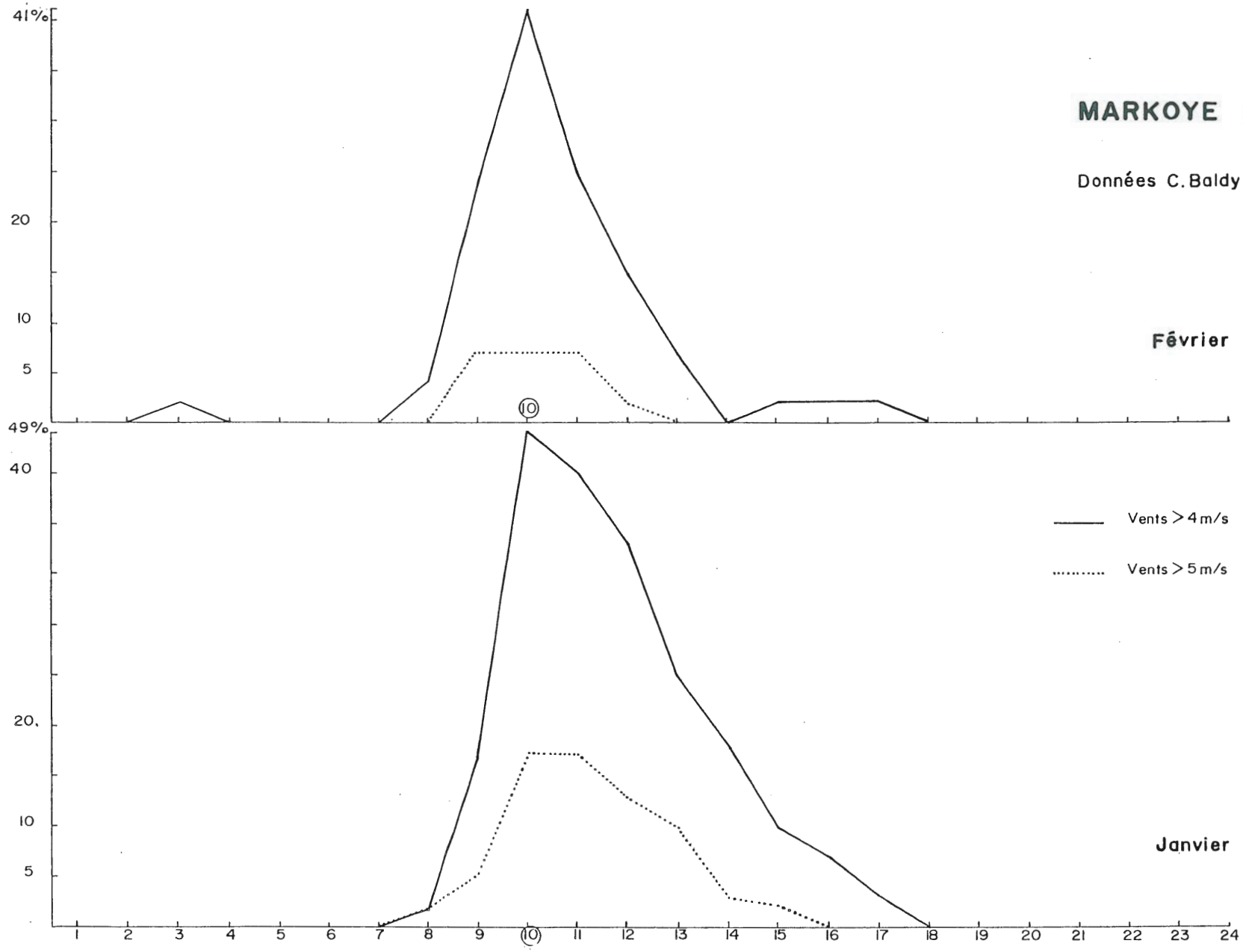


Fig. 2. 2 : Fréquence des vents passés horaires efficaces (> 4 ou 5m/s), par mois, à Markoye.

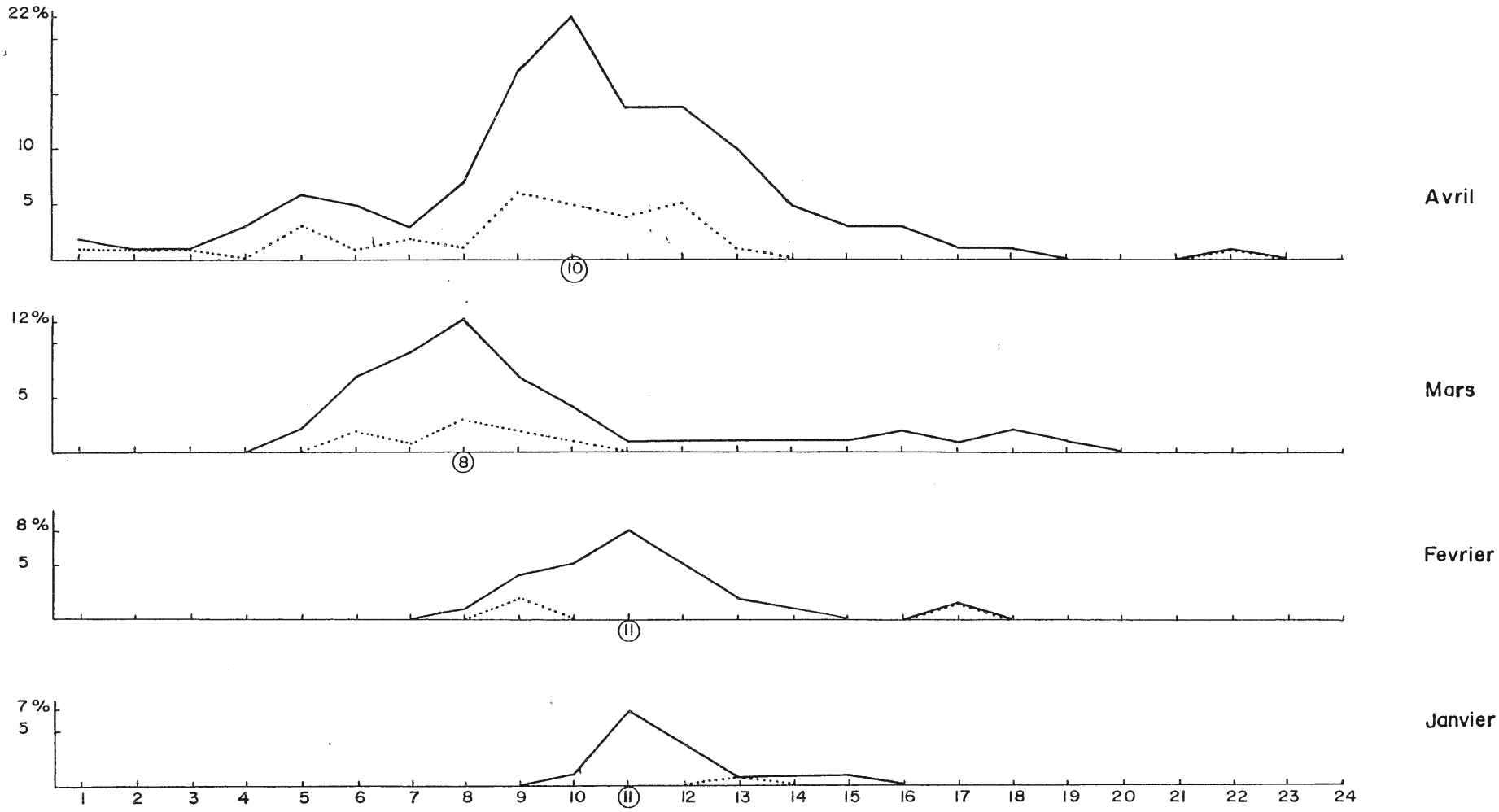


Fig. 2. 3 : Fréquence des vents passés horaires efficaces (> 4 ou 5m/s), par mois, à Di-Sourou.

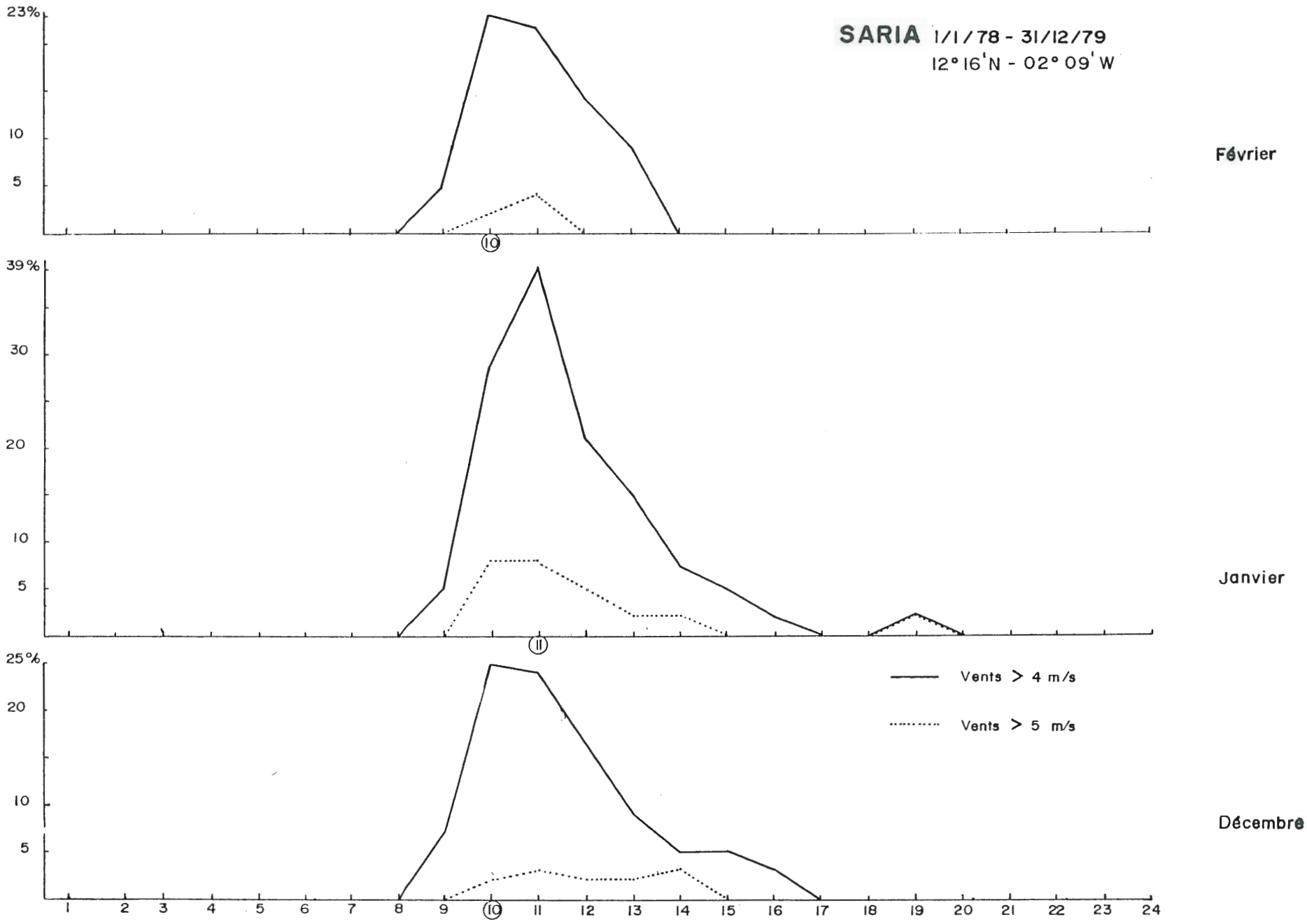


Fig. 2. 4 : Fréquence des vents passés horaires efficaces (> 4 ou 5m/s), par mois, à Saria.

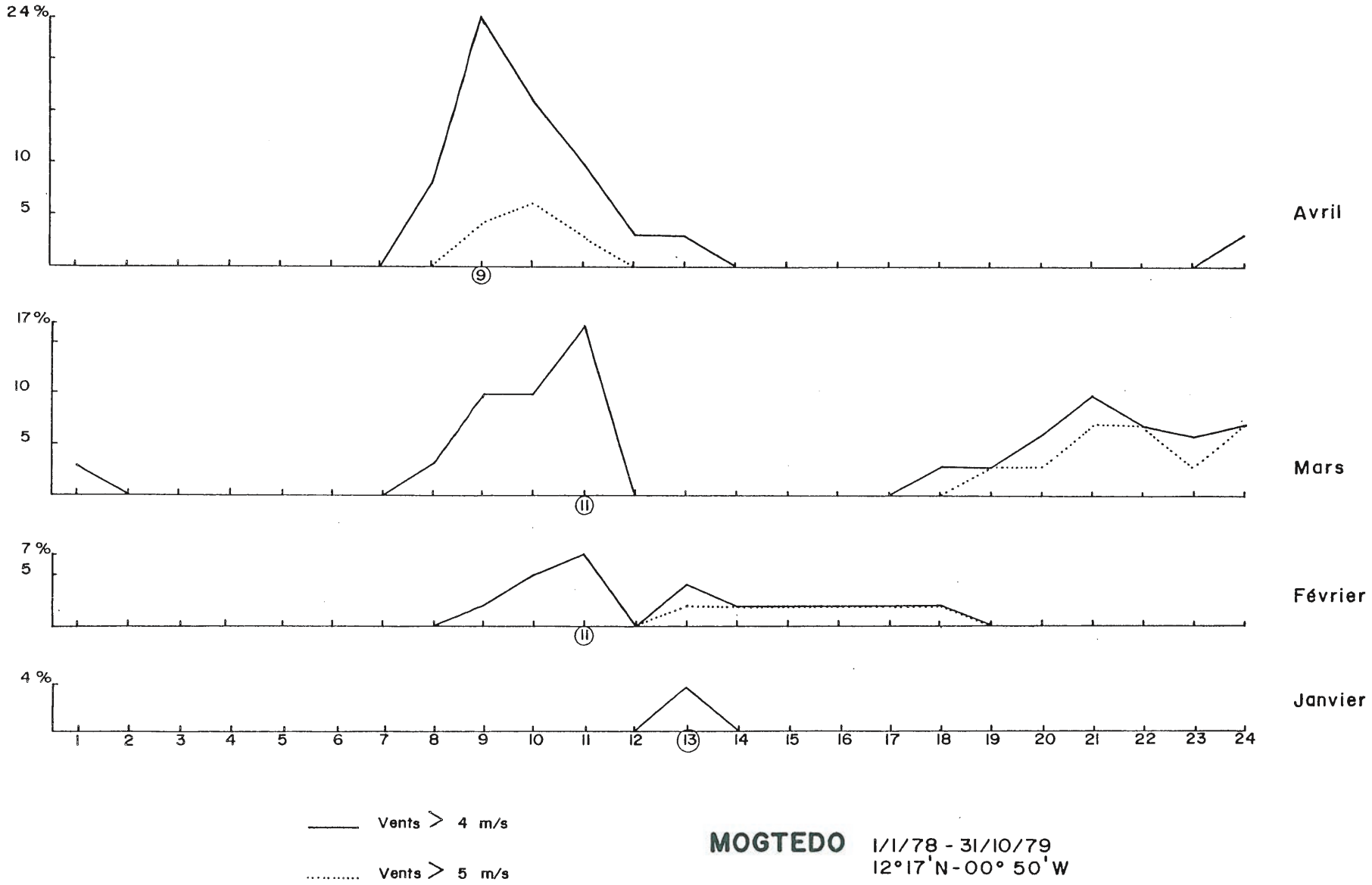


Fig. 2. 5 : Fréquence des vents passés horaires efficaces (> 4 ou 5m/s), par mois, à Mogtedo.

à 4 m/s, 17% supérieurs à 5 m/s) (Fig. 2.2) ainsi qu'à Saria en climat soudanien (39% et 8%) (Fig. 2.4) mais à cette latitude Mogtedo a son maximum en avril (24% et 6%) de même que Di-Sourou (22% et 6%) dans le domaine sub-sahélien (Fig. 2.5 et 2.3). Les 3610 et 3001 journées d'observation[1] des stations aéronautiques de Ouagadougou et Bobo-Dioulasso fournissent d'autres renseignements sur la distribution mensuelle des vents instantanés maximums. Les résultats, exprimés en pourcentage du nombre total des journées d'observations, sont regroupés dans les deux tableaux suivants.

Force du vent	⩾ 10 noeuds (5,4 m/s)		⩾ 9 noeuds (4,85 m/s)	
	juin	43,1%	juin	55,2 %
	mai	42	mai	52,3
	juillet	36	juillet	45,5
	août	34	avril	44,1
M	septembre	33	mars	43,2
O	avril	26	août	41,9
I	octobre	23,1	septembre	39,3
S	mars	22,4	février	31,9
	février	13	octobre	29,3
	janvier	6,8	janvier	19,1
	novembre	6	novembre	17,1
	décembre	4,3	décembre	14,1
Année	24,4%		36,1%	

Tableau 2.1 : Fréquences mensuelles et annuelles d'un vent instantané quotidien maximum à Ouagadougou (1968-1977).

(1) *On compte 43 jours seulement sans relevé à Ouagadougou durant les dix années mais 287 à Bobo, où l'enregistrement semble moins fiable, en particulier en 1975.*

Force du vent	⩾ 10 noeuds		⩾ 9 noeuds	
	mai	38,1%	mai	50,2%
	juin	37,5	juin	50
	septembre	28,2	avril	43,4
	avril	25,3	septembre	34,6
M	juillet	21,5	mars	32,6
O	octobre	20,1	juillet	29,4
I	août	17,5	octobre	27,8
S	mars	16,7	janvier	27,3
	février	14,2	février	26,1
	janvier	11,5	août	25,8
	novembre	5,1	novembre	10,6
	décembre	1,9	décembre	6,2
Année	20,4%		31,3%	

Tableau 2.2 : Fréquences mensuelles et annuelles d'un vent instantané quotidien maximum à Bobo-Dioulasso (1968-1976).

Dans ce cas, à Ouagadougou comme à Bobo-Dioulasso, les mois les plus fréquemment affectés par un vent instantané supérieur ou égal à 5 m/s, sont les mois de mai, juin, juillet puis avril ou septembre. Il s'agit donc principalement de la phase initiale, d'installation, de la mousson et secondairement de la phase plus rapide de retrait, toutes deux caractérisées par un grand nombre de lignes de grains, accompagnées de tornades sèches ou de violentes averses.

Près d'une journée sur deux et, en tout cas, deux journées sur cinq au moins connaissent un vent supérieur à 5 m/s à Ouagadougou comme à Bobo durant mai ou juin ! En revanche, les mois de décembre, novembre et janvier sont les moins touchés par ces pointes (Fig. 2.6).

En résumé, les vents efficaces connaissent un maximum de début de saison des pluies, bien mis en évidence par les enregistrements les plus continus (mesures totalisées, mesures des aéroports). Le maxi-

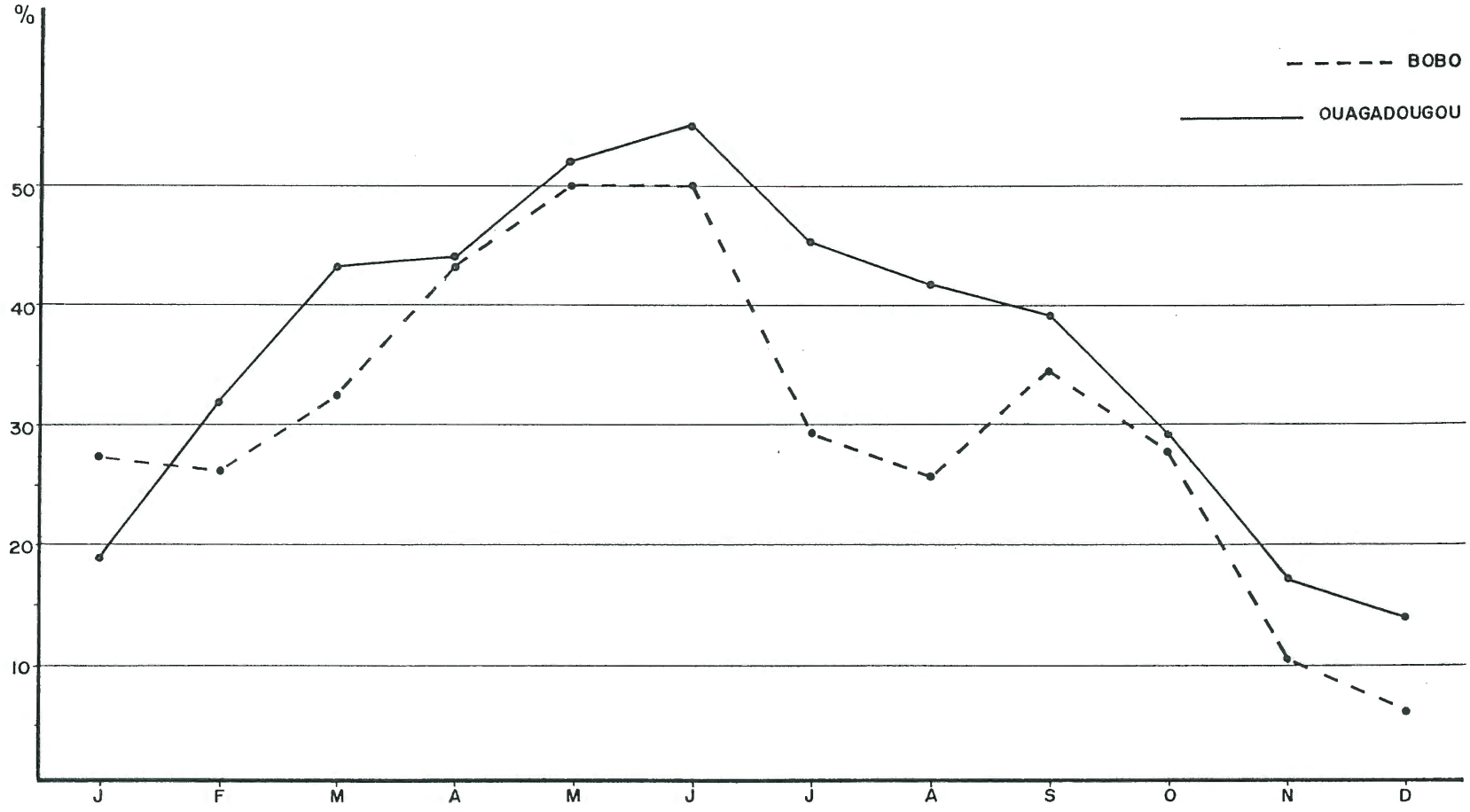


Fig. 2.6 : Fréquences mensuelles des vents instantanés quotidiens maximums (⩾ 9 noeuds) à Ouagadougou (1968-1977) et Bobo (1968-1976).

mum secondaire de saison sèche doit être relativisé à plusieurs titres : d'une part, il est exprimé en pourcentage des cas ; d'autre part, les observations trihoraires sur 10 minutes privilégient les vents réguliers comme l'harmattan, tandis qu'elles sous-estiment les pointes qui ont de fortes chances de se placer entre les heures de relevés.

Enfin, il faut noter le rôle de la latitude : aux latitudes sahéliennes, le nombre de lignes de grains diminue et avec lui les pointes de vent maximales instantanées. Par ailleurs, l'harmattan est plus puissant qu'il ne l'est en pays de savanes. Ceci permet d'expliquer la place du mois de janvier pour une station comme Markoye. Toutefois, les enregistrements effectués à Oursi sur une période plus longue (1976-1983) (Chevallier *et al.*, 1985), donnent, même dans ce cas, les mois de juin et juillet comme les plus venteux, précédant le mois de mai.

* A l'échelle annuelle, les vents instantanés quotidiens maximums, supérieurs à 9 noeuds affectent un tiers des journées (36,1% à Ouagadougou, 31,3% à Bobo (Tableaux 2.1 et 2.2).

Les variations interannuelles, plus nettement marquées à Bobo-Dioulasso qu'à Ouagadougou, sont délicates à interpréter. Certains "creux", comme celui de 1975 pour Bobo-Dioulasso, paraissent suspects, mais le déficit est visible également à Ouagadougou (surtout si l'on retient le seuil de 10 noeuds) (Fig. 2.8). Sur cette station, l'intervalle 1970-1975 est marqué par une diminution régulière de ce pourcentage, à l'exception de 1973. A Bobo-Dioulasso, c'est l'intervalle 1969-1972 qui connaît la même tendance. On peut penser que cette diminution est liée à la phase sèche et à une décroissance du nombre des lignes de grains.

Une autre approche consiste à examiner ces variations de pourcentages de vents efficaces durant les saisons sèches (novembre à mars). Les maximums sont enregistrés en 1968, 1975-76 ainsi qu'en 1973-74 (Tableau 2.3).

Fig. 2.7 : Fréquence annuelle des vents quotidiens maximums instantanés

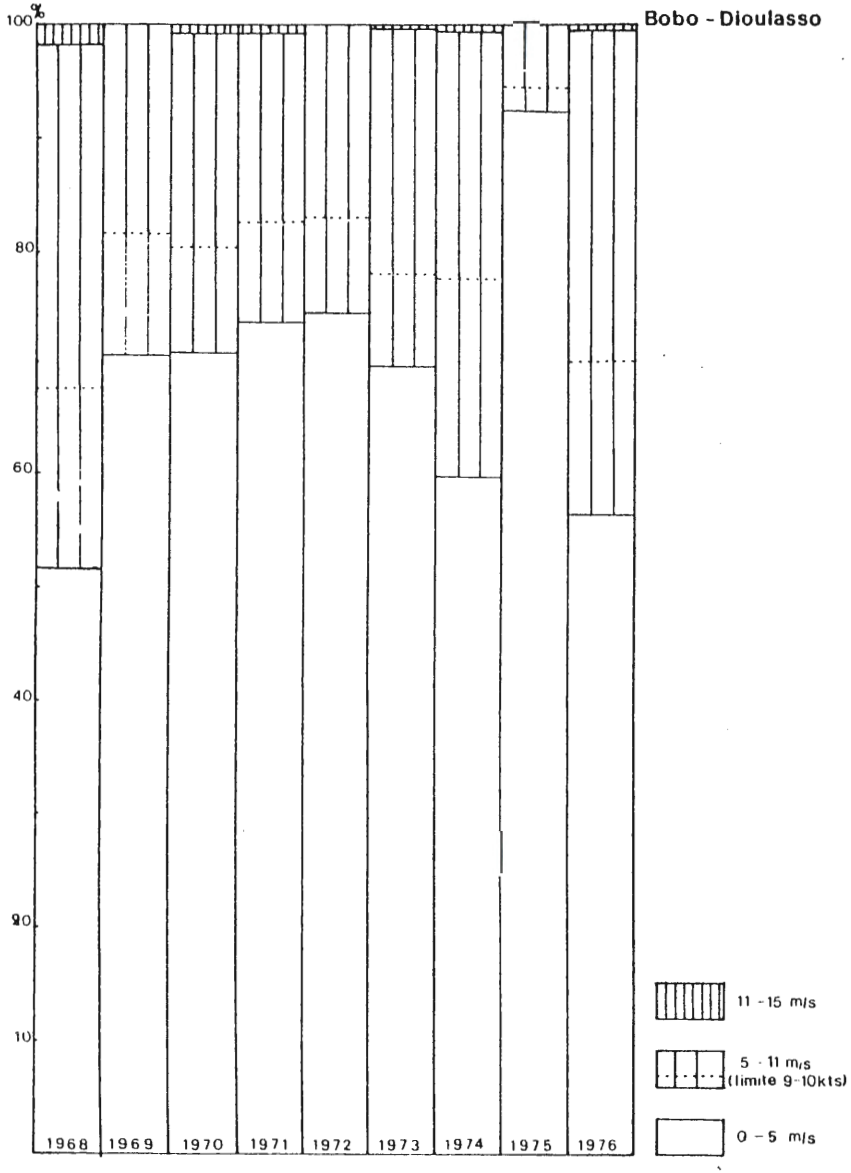
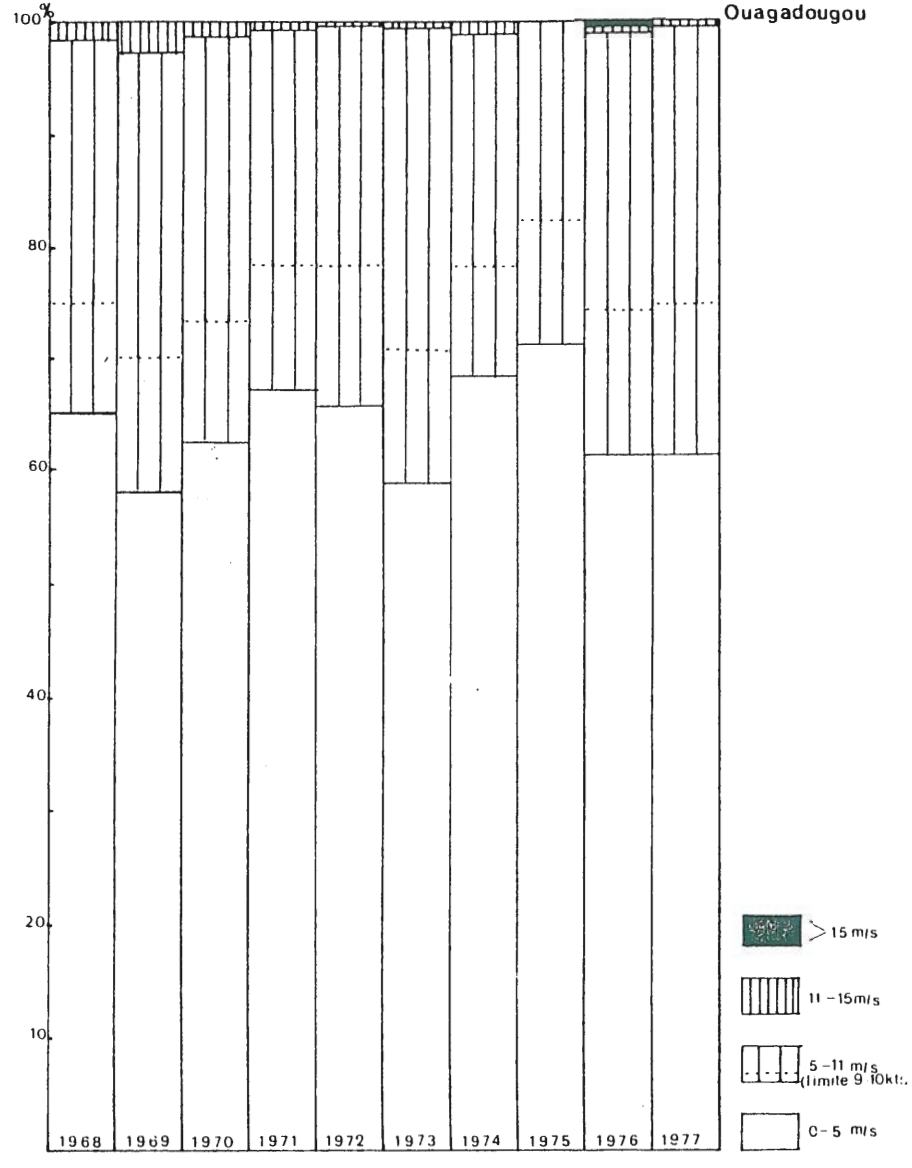


Fig 2.8 Fréquence annuelle des vents quotidiens maximums instantanés



	1968 (Janv. Mars)	1968-1969	1969-1970	1970-1971	1971-1972	1972-1973	1973-1974	1974-1975	1975-1976	1976-1977
Ouagadougou	11%	15,9%	10%	6%	7,9%	9,3%	12,9%	6%	10,1%	20,9%
Bobo	34,9%	8,3%	5,3%	5,3%	7,3%	0,7%	23,8%	0%	21,1%	

Tableau 2.3 : Variations, entre saisons sèches, des vents forts quotidiens en pourcentage du total annuel.

Une fois encore, les écarts entre années apparaissent importants, mais aucune corrélation n'a pu être dégagée de manière précise avec quelque autre facteur climatique. Il n'existe pas en tout cas de tendance au renforcement de ces vents forts tout au long de la phase sèche à l'inverse de ce que M.F. Courel (1984, p. 71) a pu constater à Dakar, dans des conditions climatiques totalement différentes et peu représentatives du domaine continental, qui est celui du Burkina Faso.

2.2.2 : Fréquences, vitesses et directions associées :

La première distribution des directions des vents au sol, regroupées en 16 secteurs de la rose des vents, a été établie par J. Renard (1966) à partir des données trihoraires (Fig. 2.9). La figure 2.9 rappelle les deux directions privilégiées évidentes, à peu près opposées :

- l'une, principalement nord-est, secondairement est ou nord, correspondant à la saison sèche, la période de l'harmattan ;

- la seconde au sud-ouest, ou encore au sud ou à l'ouest, traduisant le souffle de la mousson.

Les effets locaux, comme l'a précisément montré C. Baldy (1982 et 1985), peuvent en fait influencer considérablement ce régime des vents : il suffit ici, pour s'en assurer, d'opposer la rose de Ouagadougou à celle Fada N'Gourma, où l'aérodrome est dans un petit talweg orienté est-ouest canalisant l'écoulement de l'air.

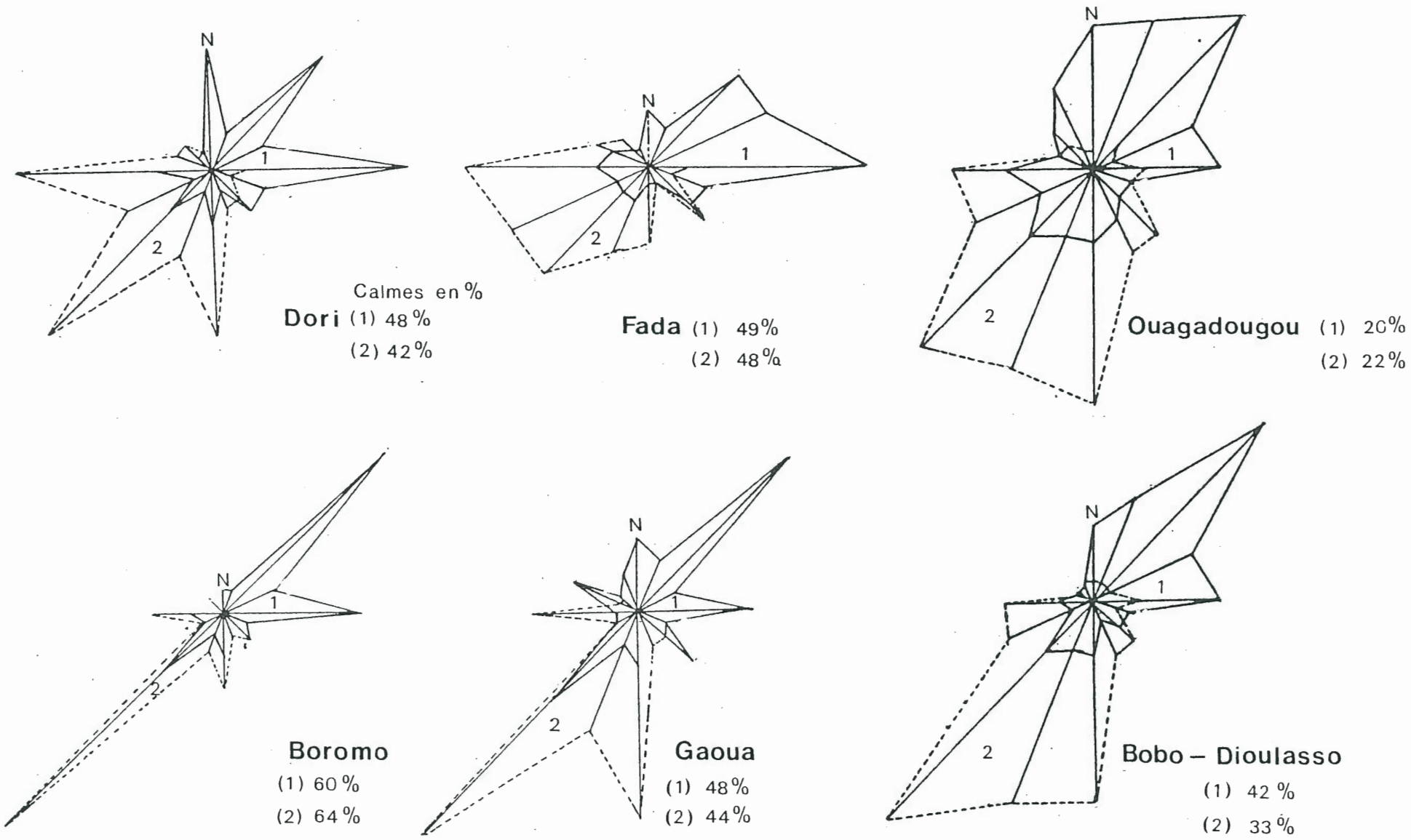


Fig. 2.9 : Roses des vents au sol pour six stations du Burkina Faso.
(1) Saison sèche - (2) Saison des pluies.
(*in Renard, 1966*).

Les vents les plus forts correspondent-ils toutefois à ces directions les plus fréquentes déjà relevées ? Les données des aéroports de Ouagadougou et de Bobo-Dioulasso doivent nous permettre de répondre à cette question d'importance. Les informations regroupées par faisceaux de 20° (rose de 36) ont été traduites en deux séries de roses des vents instantanés maximums, supérieurs à 10 noeuds, annuelles ou mensuelles ; ces dernières étant construites suivant une double échelle unitaire absolue (nombre de cas) ou relative (pourcentage des jours d'observation du mois).

* *Les roses des vents annuelles* (Fig. 2.10 et 2.11).

Les roses de Ouagadougou et Bobo-Dioulasso montrent une grande similitude dans la direction de ces vents forts. Dans les deux cas, la composante principale est NE (Bobo) à E (Ouaga.) ; c'est celle de l'harmattan mais aussi et surtout celles des ondes de l'est (lignes de grains).

La proportion de coups de vents supérieurs à 10 noeuds et correspondant à des pluies est de 3 sur 5 ; les pourcentages étant d'ailleurs remarquablement identiques sur les deux sites (60,7% à Ouagadougou ; 61,1% à Bobo-Dioulasso).

On aurait pu également rechercher la part des tornades sèches, identifiables par une saute de pression de quelques millibars.

Les deux roses annuelles présentent en outre un maximum secondaire au Sud, plus franchement marqué à Ouagadougou. Il n'y a pas d'autres secteurs d'orientation privilégiée. Plus précisément, la direction des vents instantanés maximums la plus fréquemment enregistrée à Ouagadougou est N80°E ; N40° et N60°E à Bobo-Dioulasso.

La première représente à elle seule 3,6% de l'ensemble des journées d'observation sur 10 ans (le faisceau E-NE:2,6%) ; pour chacune des deux directions suivantes : 2,9% des journées d'observation sur 9 ans à Bobo-Dioulasso.

Les tableaux 2.4 et 2.5 résument les variations annuelles et

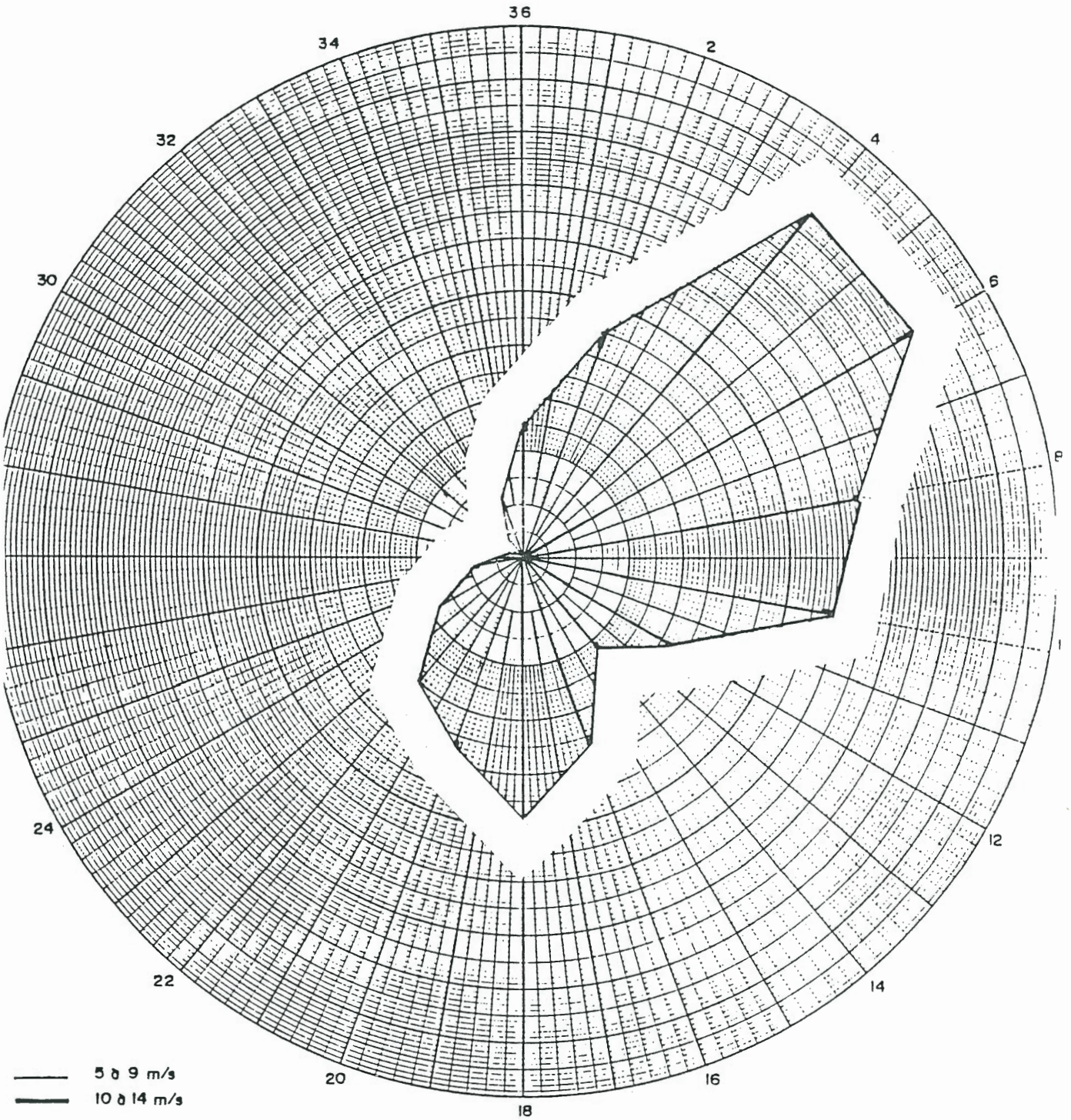


Fig. 2. 10 : Rose des vents journaliers maximums
Bobo - 1968-1976
(en pourcentage du total des journées d'observations).

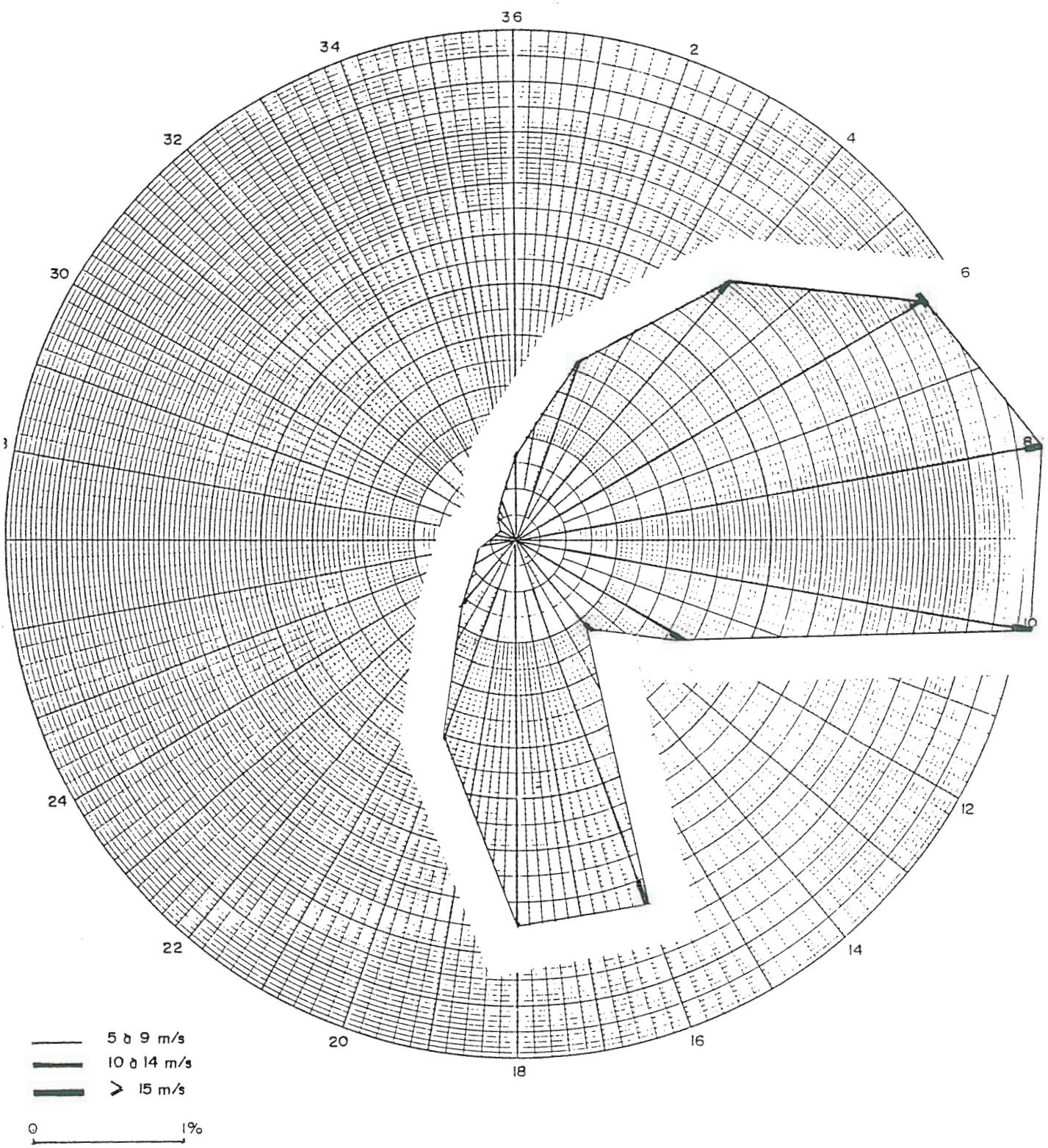


Fig. 2.11 : Rose des vents journaliers maximums
Ouagadougou - 1968-1977
(en pourcentage du total des journées d'observation)

BOBO	34	36	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30	32
1968 (110)	7,3 %			28,2 %			36,4 %			19,1 %			6,3 %			2,7 %		
1969 (64)	31,2 %			50 %			7,8 %			6,3 %			3,1 %			1,6 %		
1970 (71)	15,5 %			45,1 %			25,4 %			5,6 %			8,5 %			0 %		
1971 (60)	11,7 %			40 %			5 %			25 %			15 %			3,3 %		
1972 (62)	3,2 %			14,5 %			40,3 %			32,3 %			8,1 %			1,6 %		
1973 (76)	9,2 %			42,1 %			11,8 %			23,7 %			11,8 %			1,3 %		
1974 (78)	7,7 %			46,2 %			0 %			24,4 %			20,5 %			1,3 %		
1975 (17)	5,9 %			47,1 %			23,5 %			17,6 %			0 %			5,9 %		
1976 (63)	27 %			20,6 %			9,5 %			30,2 %			7,9 %			5,8 %		

Tableau 2.4 : Variations interannuelles des directions des vents forts à Bobo-Dioulasso (1968-1976) (> 10 noeuds).

OUAGA	34	36	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30	32
1968 (93)	11,8 %			43,0 %			22,6 %			20,4 %			2,2 %			0 %		
1969 (108)	3,7 %			38 %			20,4 %			28,7 %			7,4 %			1,8 %		
1970 (97)	6,1 %			40,2 %			17,5 %			24,7 %			11,3 %			0 %		
1971 (88)	6,8 %			37,5 %			12,5 %			35,2 %			3,4 %			4,5 %		
1972 (79)	1 %			31,6 %			29,1 %			27,8 %			0 %			1,3 %		
1973 (107)	10,3 %			36,4 %			19,6 %			23,4 %			7,5 %			2,8 %		
1974 (78)	9 %			32,1 %			26,9 %			30,8 %			1,3 %			0 %		
1975 (60)	11,7 %			40 %			20 %			23,3 %			3,3 %			1,7 %		
1976 (96)	13,5 %			32,3 %			26 %			19,8 %			3,1 %			5,2 %		
1977 (86)	3,5 %			36 %			30,2 %			25,6 %			2,3 %			2,3 %		

Tableau 2.5 : Variations interannuelles des directions de vents instantanés quotidiens efficaces (> 10 noeuds) à Ouagadougou.

interannuelles des directions du vent, exprimées en pourcentages sur les six directions retenues (faisceaux de 20° groupés par trois). Il met en évidence quelques changements importants d'une année sur l'autre, surtout à Bobo-Dioulasso où l'on enregistre, par exemple, aucun vent fort (> 10 noeuds) de direction E-SE en 1974 ! Ces variations contrastent toutefois avec la constance de la répartition des directions des vents pris globalement (Chevallier *et al.*, 1985) à Oursi.

* *Les roses des vents mensuelles* (Fig. A.2.20 à A.2.43)

Une fois encore, à l'échelle mensuelle, des traits identiques entre les deux stations sont mis en évidence : sept mois sur douze, la direction principale est N.40°E ou N.60°E à Bobo-Dioulasso ; N.60° ou N.80°E à Ouagadougou. La fréquence maximale enregistrée à Bobo-Dioulasso est de 6,4% en juin, sur une direction N.40°E. Elle est de 8,45% à Ouagadougou, à 80°E en août.

En avril et en mai (Fig. 2.12 et 2.14), les deux stations présentent toutefois un maximum mensuel au Sud. Cette direction se maintient en un maximum secondaire durant juin (Fig. 2.13 et 2.15). Comme il s'agit des mois les plus venteux, cette composante méridionale est donc fortement représentée comme on a pu le constater sur les roses annuelles.

CONCLUSION.

1°/- La dynamique érosive des vents efficaces s'exerce suivant deux orientations privilégiées :

- l'une, d'E-NE à W-SW, la plus fréquemment empruntée et balayée par les pointes les plus violentes. Durant la période 1968-1976, le maximum maximorum enregistré à Ouagadougou est de 30 noeuds (16,2 m/s) le 14 mai 1976 et de direction N.60°E ;

- l'autre, du sud au nord, n'est pas franchement opposée à la précédente, sinon occasionnellement dans le temps et dans l'espace (Bobo-Dioulasso en avril, mai ou juin).

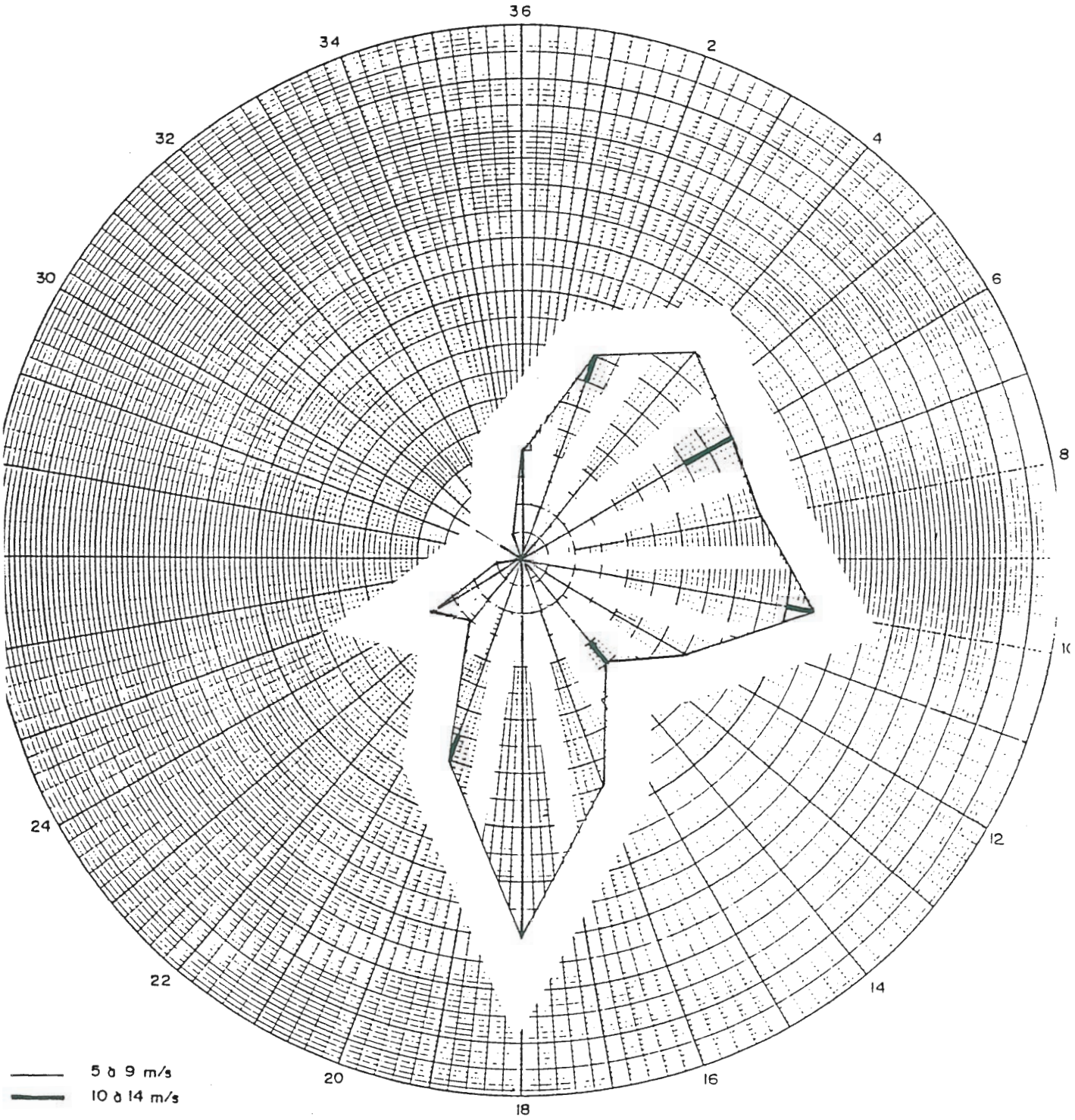


Fig. 2.12 : Rose des vents journaliers maximums Bobo - 1968-1976. Mois de mai (en nombre de cas où V ⩾ 5m/s et en pourcentage des jours d'observation du mois).

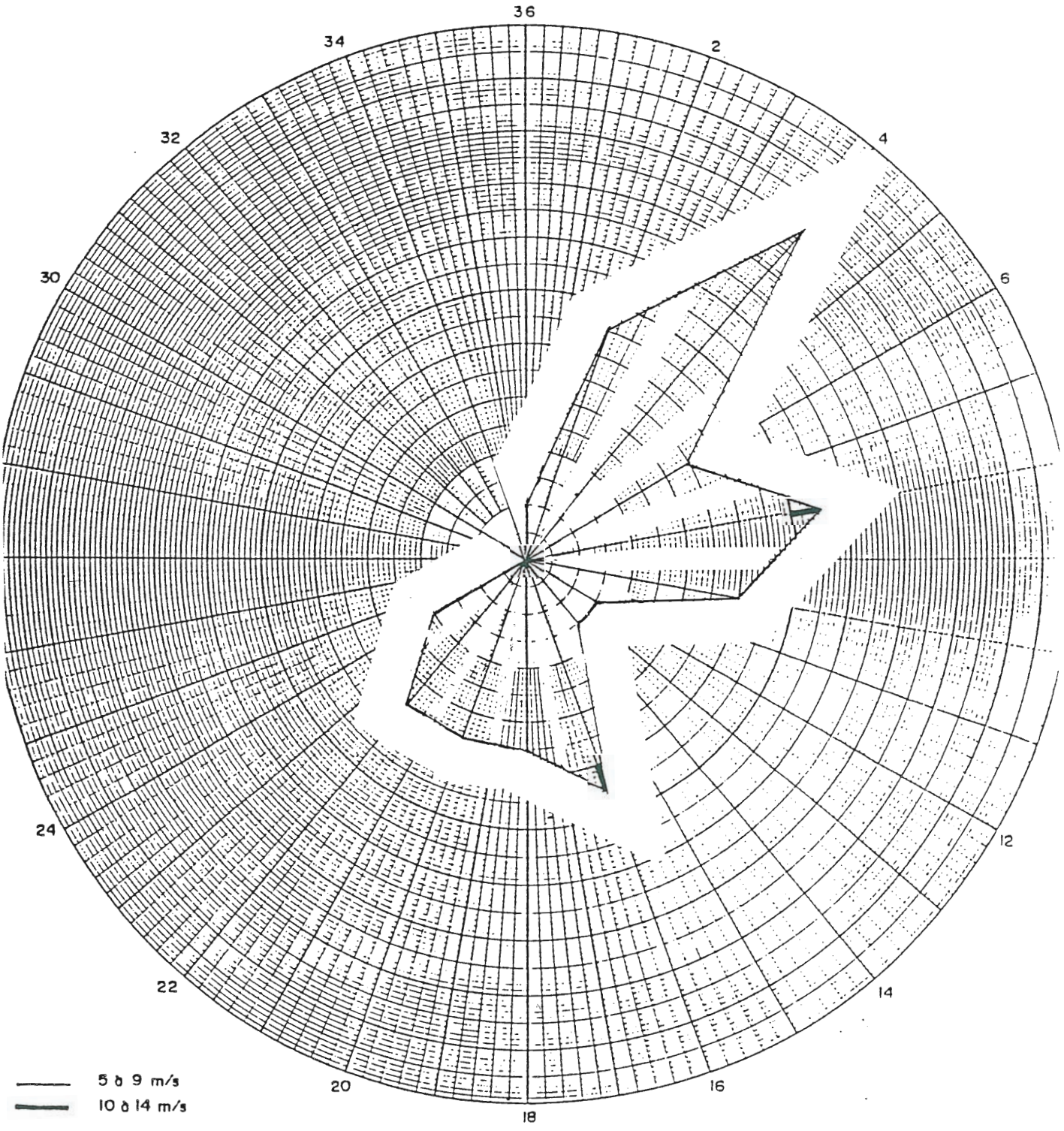


Fig. 2.13 : Rose des vents journaliers maximums Bobo - 1968-1976 Mois de juin (en nombre de cas où V ⩾ 5m/s et en pourcentage des jours d'observation du mois).

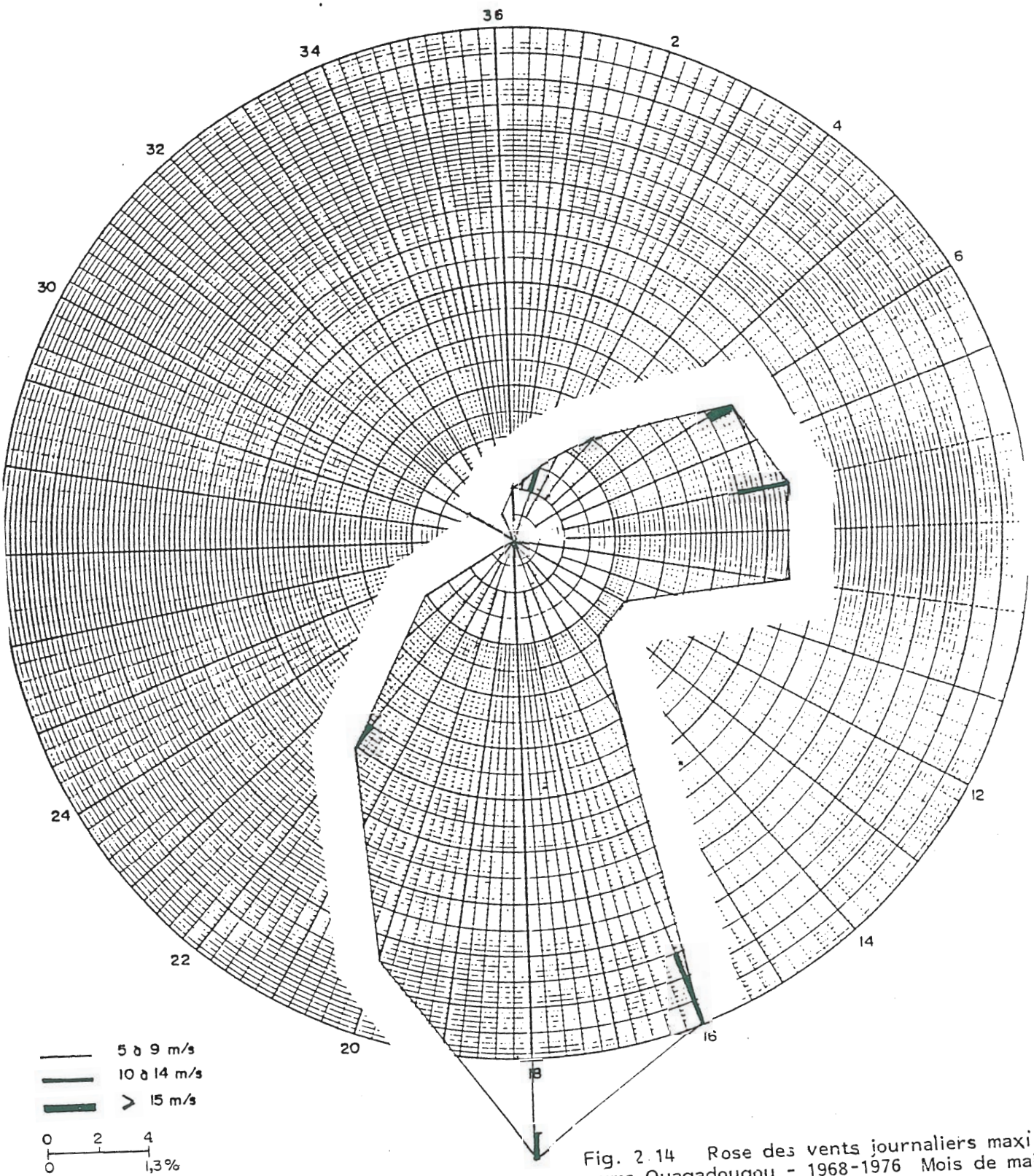


Fig. 2.14 Rose des vents journaliers maximums. Ouagadougou - 1968-1976 Mois de mai (en nombre de cas où V ⩾ 5m/s et en pourcentage des jours d'observation du mois).

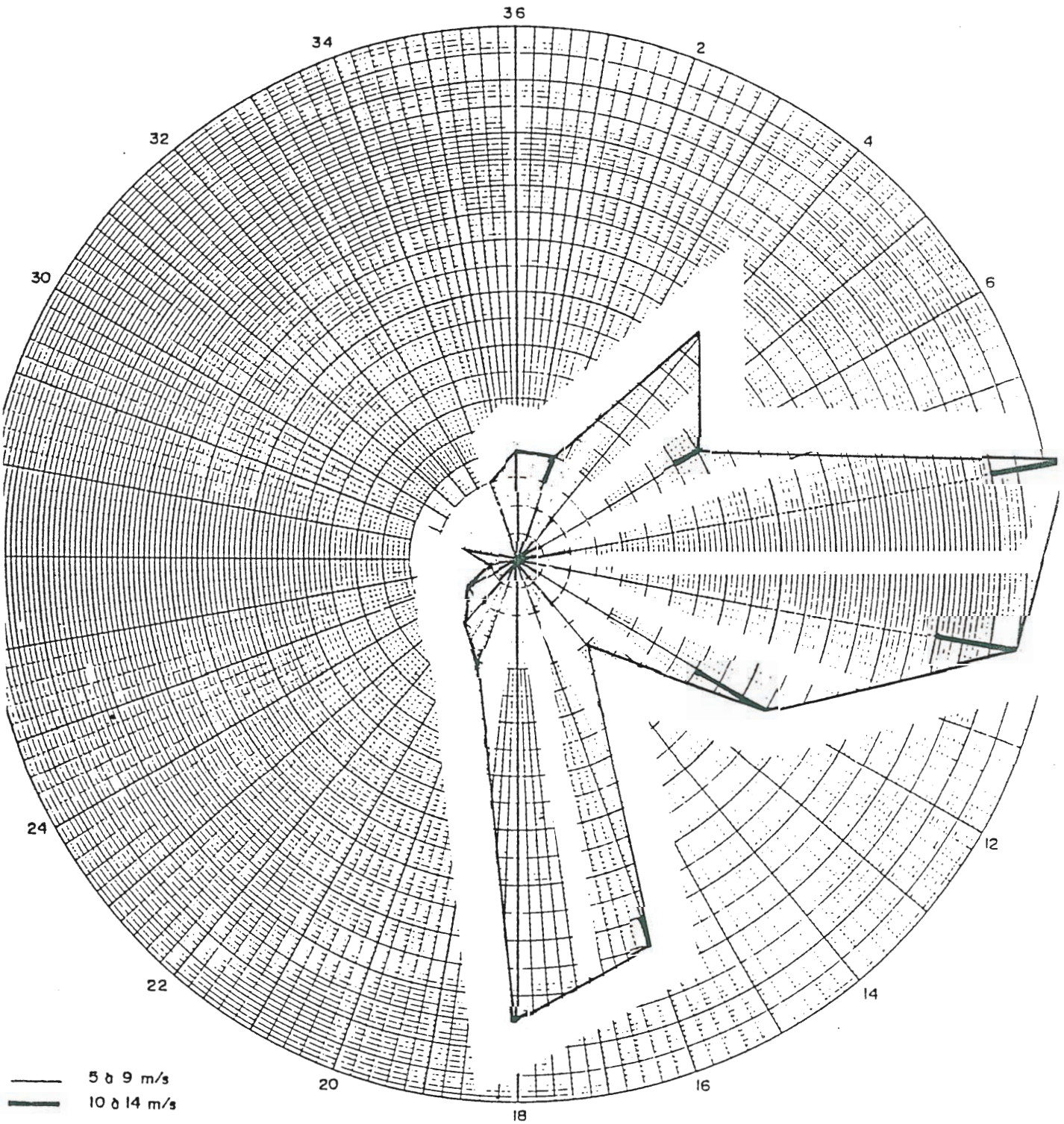


Fig. 2.15 · Rose des Vents journaliers maximums Ouagadougou · 1968-1976 Mois de juin (en nombre de cas où V ⩾ 5m/s et en pourcentage des jours d'observation du mois).

Globalement, toutefois, certaines unités morphologiques ou hydrologiques orientées NE-SW, notamment les bordures de fonds de vallées à sols nus, doivent se révèler plus vulnérables vis-à-vis des vents extrêmes. Cette caractérisation directionnelle des vents forts sera évidemment à reprendre lorsque nous chercherons, dans le livre II, à interpréter les formes à l'échelle du pays.

2°/- Les coups de vent supérieurs à 10 noeuds (5,4 m/s) se produisent, dans 60% des cas, lors de phénomènes orageux accompagnés de précipitations. Ce pourcentage est remarquablement identique à Ouagadougou (60,7%) et à Bobo-Dioulasso (61,1%).

Sur les deux stations, les mois les plus fréquemment affectés sont mai et juin, durant lesquels plus de deux journées sur cinq connaissent un vent supérieur à 5 m/s. Il s'agit là de la phase d'installation de la mousson durant laquelle les lignes de grains sont nombreuses. Celles-ci demeurent fréquentes en juillet à Ouagadougou tandis qu'à Bobo-Bioulasso, plus au sud en latitude et davantage placé dans le corps de la mousson, un second pic de fréquence est visible en septembre lors du retrait du F.I.T. ; en revanche juillet et août présentent logiquement un déficit.

Ces lignes de grains ont une double efficacité : d'une part, elles entretiennent, grâce à leur vitesse de déplacement horizontal, des phénomènes de transport ; d'autre part, elles alimentent ce transport grâce à une force d'arrachement redoutable, liée à leur composante verticale.

3°/- A l'échelle annuelle, les vents instantanés quotidiens maximums, supérieurs à 9 noeuds (4,85 m/s), affectent un tiers des journées. Les maximums secondaires de saison sèche sont liés à des pointes dans le souffle régulier de l'harmattan. Celles-ci se placent généralement entre 10 et 11 heures, c'est-à-dire dans une atmosphère déjà chaude et turbulente.

C'est à l'examen des températures au niveau du sol mais aussi dans le sol que sera consacré le chapitre III.

CHAPITRE III

LES FACTEURS MICROCLIMATIQUES

AMPLITUDES THERMIQUES ET VARIATIONS D'HUMIDITE DANS LA ROCHE ET LES SOLS

Les incidences sur la morphogenèse de facteurs climatiques autres que les précipitations et le vent sont souvent méconnus en zone tropicale. Les variations de températures ou d'humidité pondérale par exemple induisent, dans les sols et le substratum, des processus mécaniques et/ou chimiques généralement lents, peu perceptibles et davantage pressentis que réellement mis en évidence.

La connaissance elle-même du facteur pédoclimatique(1), sans parler de ses effets, n'est pas générale. Si les températures dans les sols sont assez bien caractérisées grâce aux relevés des stations synoptiques, en revanche les données de variations thermiques en milieu rocheux sont très rares. Quant à la détermination, en données continues, de l'humidité dans le sol, elle nécessite un suivi avec des moyens coûteux (sonde à neutrons, humidimètre à chocs thermiques) ou d'utilisation délicate (tensiomètre). Compte-tenu de ces contraintes, nous avons fait porter notre effort sur l'examen des amplitudes thermiques, dans deux milieux peu étudiés jusqu'à présent : la roche en place (granite)

---

(1) *L'épithète pédoclimatique n'est pas pris au sens strict mais désigne les variations microclimatiques au contact lithosphère-atmosphère, dans des sols proprement dits mais aussi dans la roche.*

et la cuirasse affleurante et nue. Les variations d'humidité dans le sol sont présentées ensuite à titre d'exemples à travers le cas des trois parcelles d'érosion de Pô-Banon (hivernage 1978).

Les mesures de températures dans la roche en place sont rares sous toutes les latitudes. Les résultats, dont on dispose, concernent principalement les zones arides (Roth, 1965 ; Peel, 1974 ; Jäkel et Dronia, 1976 ; Smith, 1977) et subsidiairement les milieux froids (Pancza, 1979). Une meilleure connaissance des variations thermiques *in situ*, à différentes échelles de temps, est pourtant nécessaire pour tenter de cerner parallèlement aux expériences conduites en laboratoire (Coutard *et al.*, 1974 ; Journaux, Coutard, 1974 ; Lautridou, 1984), leur impact dans la fragilisation des surfaces rocheuses, notamment sous des *climats contrastés*. Tel est bien le cas du climat tropical soudanien dans lequel la saison des pluies succède à une période d'échauffement maximum.

La raison majeure de cette lacune tient probablement aux contraintes d'installation du matériel, qui doit être en outre adapté à des contrées climatiquement rudes, parfois difficiles d'accès. Ces difficultés de suivi et aussi de forage, dans un pays comme le Burkina Faso, nous ont conduit à placer notre premier dispositif expérimental à proximité immédiate de Ouagadougou. Cette situation a comme autre avantage de permettre une corrélation de ces mesures de températures avec les données pluviométriques, l'insolation et le rayonnement global relevés dans cette ville.

3.1 LES CARACTERISTIQUES DES EXPERIMENTATIONS : SITES, DISPOSITIF ET METHODE DE MESURES DES AMPLITUDES THERMIQUES

3.1.1 : Les sites .

Le premier dispositif expérimental a été installé à la sortie ouest de Ouagadougou, à proximité de la route de Bobo-Dioulasso et d'une carrière désaffectée, où affleure le granite du vieux socle anté-

cambrien. Il s'agit d'un granite à tonalité sodique, dont la composition minéralogique est la suivante :

Quartz	Feldspaths alcalins	Biotite	Hornblende	Apatite	Sphène
26,5%	46,5%	13,7%	11,8%	0,2%	1,3%

Tableau 3.1 : Composition minéralogique du granite de la carrière de Ouagadougou (Analyses modales - Institut Dolomieu - Grenoble).

La couleur, relativement blanche dans la masse mais pigmentée par les noyaux de biotite, est gris-clair en surface du fait de l'existence d'une pellicule altérée soumise à la micro-desquamation.

En 1979, ce site avait été retenu pour une première série discontinue de mesures, effectuées au moyen d'un potentiomètre manuel branché sur des thermo-couples cuivre-constantan (Mietton, 1980). A partir de 1982, l'utilisation d'un enregistreur galvanométrique[1] et de sondes thermoélectriques à résistance de platine[2] nous a permis d'obtenir des données continues pendant plus d'une année (février 1982-juin 1983) sur granite.

Une seconde série de mesures a pu être conduite pendant un mois (avril-mai 1984) sur une cuirasse ferrugineuse du bassin-versant d'Imiga (Fig. 5.6 ou carte 3).

3.1.2 : Le dispositif (Fig. 3.1).

Cinq sondes thermoélectriques sont placées, après forage au marteau-perforateur, aux profondeurs suivantes : -50, -20, -10, -5 et - 2 cm ; une sixième est à l'air libre, à 0,5 cm au-dessus de la roche. Elles sont logées dans un support cylindrique en bois, de diamètre

(1) *L'ensemble de ces mesures n'aurait pu être réalisé sans l'aide du Service Bioclimatologie de l'INRA à Avignon, qui nous a prêté cet appareil. Nous tenons à remercier son Directeur et tout particulièrement C. Baldy.*

(2) *Sondes Degussa. Caractéristique : 100 Ω à 0°C.*

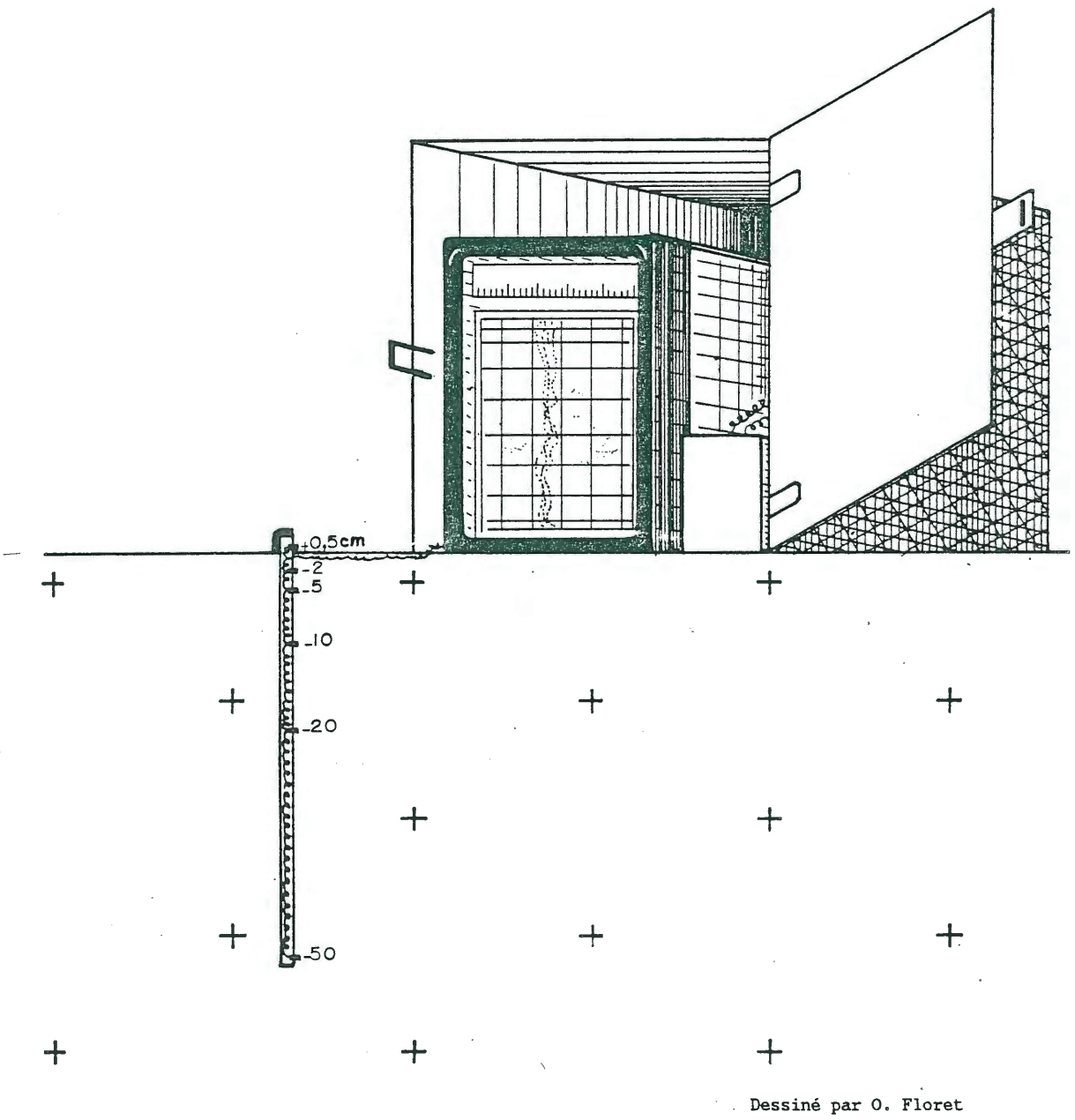


Fig. 3.1 : Dispositif expérimental de mesures des températures dans le granite.

équivalent à celui du forage (4 cm), finement usiné longitudinalement pour introduire les fils et transversalement pour les sondes. Ces dernières viennent en contact étroit avec la paroi rocheuse lorsque l'ensemble est enfoncé sous faible pression. La poussière de roche est réintroduite dans les interstices puis un anneau de mastic est placé en surface autour du cylindre, sauf à la verticale des sondes.

L'enregistreur est à proximité immédiate, sous une caisse métallique, habillée de plaques de polystyrène limitant l'échauffement et arrimée à des pitons à extension. L'énergie électrique est fournie par des piles de 9 volts, assurant une autonomie de l'ordre de 45 jours. Le mécanisme horloger est en revanche remonté toutes les 36 heures seulement, ce qui suppose l'emploi d'un observateur. L'enregistreur est équipé de six pistes de lecture, interrogées toutes les 30 secondes. Chaque point de mesure fournit une information toutes les 3 minutes. Le tracé de chaque courbe, différenciée par les couleurs des rubans encreurs, apparaît ainsi clairement, de manière quasi continue(1) sur le papier enregistreur. L'établissement d'une courbe d'étalonnage préalable fournit la valeur en degrés Celsius de chaque point.

3.1.3 : La méthode - Choix et limites.

Le choix des profondeurs de mesures résulte d'abord d'une contrainte matérielle. Le diamètre des sondes disponibles (5 mm) interdisait toute implantation dans les premiers millimètres ou même une comparaison détaillée des températures dans la partie superficielle. En outre, du fait d'un gradient thermique très fort dans cet intervalle proche de la surface, la mesure aurait revêtu, avec une telle sonde, un caractère de précision illusoire. Nous avons donc opté pour un premier niveau à - 2 cm, tout en ayant pleinement conscience que des discontinuités thermiques essentielles peuvent se placer au-dessus ! Les quatre autres profondeurs ont été choisies dans un souci de comparaison des températures de la roche en place avec celles des sols, dans lesquels

---

(1) *Distance entre deux points consécutifs : 1 mm.*

les relevés se font à - 5, - 10, - 20, - 50cm. La confrontation des données, dans le granite et dans une cuirasse ferrugineuse par exemple, peut être instructive, notamment pour la compréhension de leurs réponses spectrales sur les images-satellites. Dans le même esprit, la sixième sonde nous a fourni une référence utile sur la température de l'air au voisinage de la roche.

- La mesure de température se fait à l'extrémité de la sonde, c'est-à-dire à son contact étroit avec la roche. Le bois, choisi comme support, constitue, avec certains plastiques non disponibles, le meilleur isolant possible. Il évite en tous cas, tout transfert thermique rapide, de même que l'araldite qui a servi à enrober l'ensemble des fils, dans les parties creusées du cylindre.

La précision des mesures dépend de l'enregistreur lui-même. Elle a été établie par le constructeur et vérifiée à l'INRA, à Avignon ; elle est comprise entre 0,2 et 0,5°C.

L'étalonnage des sondes, réalisé avec un thermomètre à affichage digital est fixé à 0,1°C près. Enfin, la qualité de nos résultats dépend du soin apporté aux opérations de digitalisation lors du traitement des courbes. Finalement, la précision est voisine de $\pm$ 1°C. Cette marge d'erreur ne réduit pas *la signification des écarts maximums*, dont l'ordre de grandeur est de 10°C au moins et sur lesquels porte, pour l'essentiel, notre étude.

3.2 LES RESULTATS.

3.2.1 : Les résultats sur substratum granitique :

3.2.1.1. Le traitement des données :

Les enregistrements, qui peuvent être dépouillés manuellement à l'aide d'une réglette d'étalonnage, ont été traités sur mini-ordinateur (Mini 6)(1) après digitalisation et mémorisation (Tektronic

(1) *Le programme Fortran utilisé a été mis au point par M. Ayel du Laboratoire d'Informatique Appliquée de l'Université de Savoie.*

4052). Cette méthode reste longue surtout si l'on retient tous les points sur chaque courbe (480 points par courbe de 24 heures soit 2880 points pour les 6 niveaux de mesures). En fait, la comparaison des résultats de quelques journées, en prenant en compte l'ensemble des points ou bien un point tous les quarts d'heure, nous a montré une grande similitude. On a dès lors retenu la seconde solution. Il faut préciser qu'il ne nous était pas possible, avec le programme dont nous disposions, d'utiliser un pas de temps variable, d'un quart d'heure en général ou de trois minutes au moment des changements de températures les plus rapides.

L'ensemble des informations recueillies entre février 1982 et juin 1983 n'est pas traité ici. Seuls, quelques intervalles significatifs ont été retenus : 45 journées, soit 270 courbes, 25 920 points. Les résultats sont obtenus par épisodes de 24 heures. Sur chacun de ces tableaux quotidiens, l'espérance mathématique correspond à la moyenne des 96 valeurs saisies tandis que la moyenne est ici égale à la demi-somme du minimum et du maximum. Outre l'écart simple entre ces deux valeurs, "l'écart-max." permet d'appréhender la différence la plus grande entre deux points consécutifs, à une heure qui est précisée. Enfin, l'écart maximum entre chaque niveau et l'air libre (N = + 0,5 cm) d'une part, ou bien entre chaque niveau et la profondeur - 2 cm (M) d'autre part, est spécifié ainsi que sa référence horaire (Tab. A.3.1 à A.3.9).

Les températures peuvent être examinées en effet de deux manières : dans leurs variations, à une profondeur donnée, suivant diverses échelles de temps et aussi selon leurs écarts, à un même instant, entre différents niveaux.

3.2.1.2 : Les variations de températures à une même profondeur :

a- A l'échelle de l'année.

Le tableau 3.2 regroupe ci-après les minimums et maximums absolus pour chacune des profondeurs et les amplitudes correspondantes.

Profondeurs / Températures	+ 0,5cm	-2cm	-5cm	-10cm	-20cm	-50cm
Minimum absolu (7.01.1983)	16°4	13°7	17°1	18°1	19°7	22°2
Maximum absolu (9.05.1983)	48°4	51°0	47°8	46°2	43°5	41°3
Amplitude annuelle	32°0	37°3	30°7	28°1	23°8	19°1

Tableau 3.2 : Minimums et maximums absolus annuels à différentes profondeurs dans le granite (Ouagadougou).

Ces amplitudes *mesurées* (A = Tx-Tn)(1) s'ajustent remarquablement bien (R^2 = 0,99) suivant une fonction du type $y = \alpha + \beta \log x$ (Tomassone *et al.*, 1983), assymptotique en y (fig. 3.2). La question se pose de savoir si l'on peut ajouter à ces valeurs mesurées des valeurs calculées par extrapolation, notamment dans la tranche comprise entre 0 et - 2cm. Cette extrapolation ne se justifierait pas si elle consistait à établir, *à un instant donné*, la température à - 0,5 cm par exemple. En revanche, elle est applicable aux *amplitudes*, dont les calculs se font à *différents instants* suivant les profondeurs. Or, les *extrêmes* sont évidemment renforcés, à un moment quelconque de l'année (ou de la journée), à ce niveau le plus proche de la surface.

C'est ainsi qu'à - 0,5 cm l'amplitude maximale annuelle peut être évaluée à 57°C environ. En profondeur, on peut admettre qu'il n'existe plus de variation, même annuelle, au-delà d'1,80m à 2m. On retrouve ainsi le chiffre cité par J. Dresch (1966) pour un granite en zone aride.

Le tableau 3.2 fait apparaître que les valeurs extrêmes sont observées à -2 cm et non pas à l'air libre. Ce classement se vérifie pour toutes les journées analysées, quel que soit le mois. C'est non seulement la surface de la roche mais *toute la tranche d'épaisseur comprise entre 2 et 5cm qui se réchauffe ou se refroidit davantage que l'air à son contact.*

---

(1) *La précision de ces valeurs est toujours de* ± 1°C.

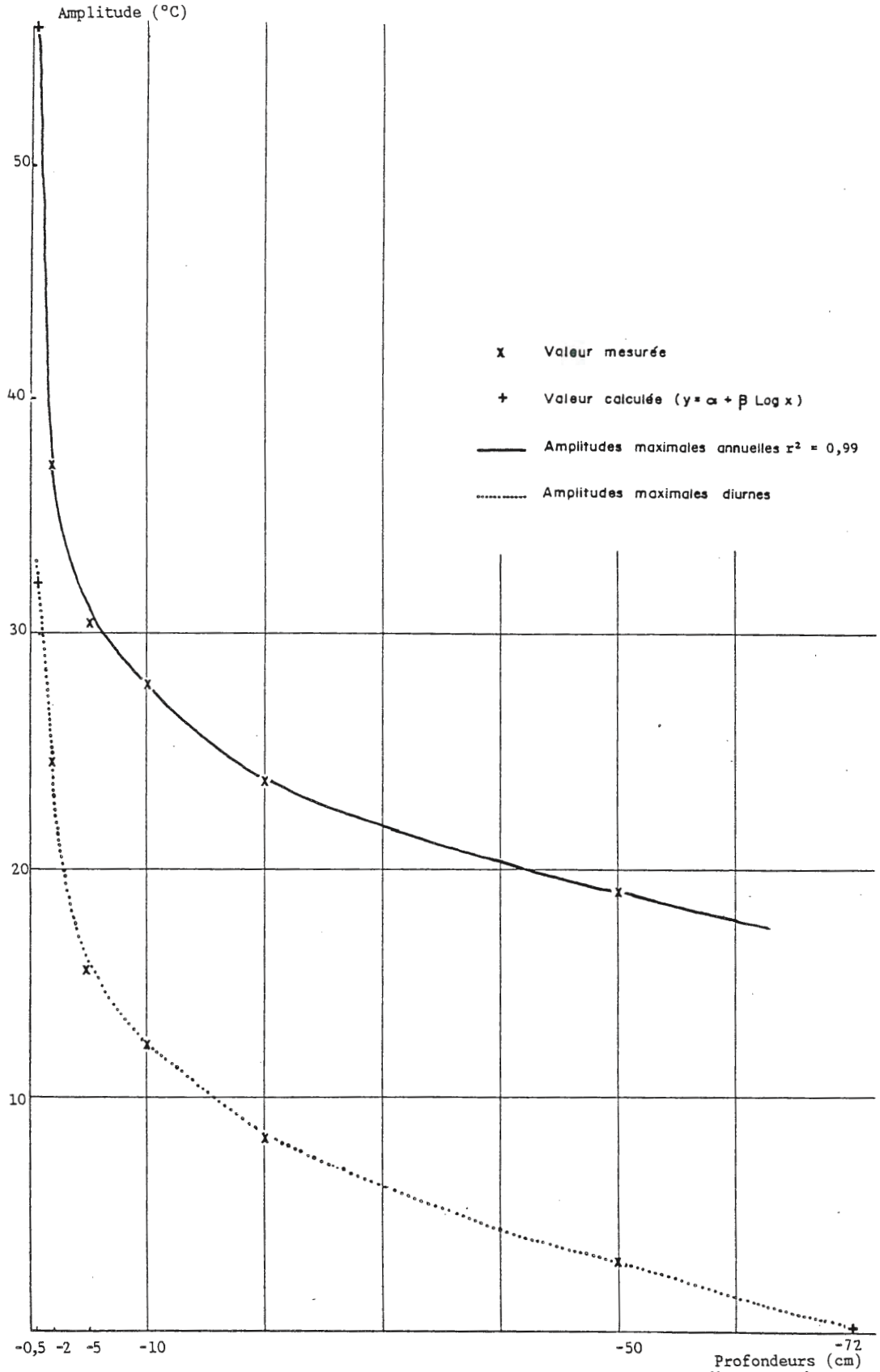


Fig. 3.2 : Amplitudes thermiques maximales annuelles et diurnes dans le granite en fonction de la profondeur.

Ces valeurs extrêmes sont en outre partout enregistrées le même jour : 7 janvier 1983 pour le minimum absolu, 9 mai 1983 pour le maximum absolu. La corrélation est assez bien vérifiée entre ces températures extrêmes et l'insolation ou le rayonnement global, le même jour ou le jour précédent. Le minimum absolu succède ainsi à l'insolation la plus faible enregistrée après le solstice d'hiver (9,6 heures en moyenne par jour entre le 22 décembre et le 5 janvier ; 7,4 heures le 6 janvier ; 9,8 heures le 7 Janvier). Le maximum absolu correspond à la plus forte insolation d'avril et mai (11,2 heures le 7 mai).

La date des maximums peut être mise en relation, non seulement avec la durée, mais aussi la qualité de l'ensoleillement, la verticalité des rayons solaires. Le second maximum observé l'est en effet le 19 avril 1983 (49°2C à - 2cm), au moment du passage du soleil au zénith (20 avril) à Ouagadougou (12°22'N).

D'autres facteurs sont à prendre en compte qui perturbent l'insolation : ce sont bien évidemment les précipitations et les temps couverts qui les accompagnent. A titre d'exemple, le maximum enregistré le 19 avril 1982 atteint 45°6C à - 2cm, valeur inférieure de 3°C à celle du 19 avril 1983. Pourtant, la durée d'insolation est de 11 heures le 19 avril 1982 (rayonnement global : 2556 $j.cm^{-2}$/jour) contre 8,2 heures seulement l'année suivante (1). Cet écart ne peut être apprécié qu'en fonction des différences d'insolation cumulée le mois précédent, elles-mêmes mises en relation avec l'occurrence des précipitations. Le tableau 3.3., qui permet une comparaison des duréesd'insolation durant les quatre premiers mois de 1982 et 1983, montre clairement que c'est en mars-avril qu'il faut rechercher une explication.

---

(1) *Durée d'insolation et rayonnement global (Baldy, 1985) sont mesurés à la station Ouagadougou-Aérodrome, à 5 kilomètres environ de notre site.*
Les valeurs du rayonnement global, manifestement sous-estimées en 1983, sont malheureusement inutilisables cette année-là.

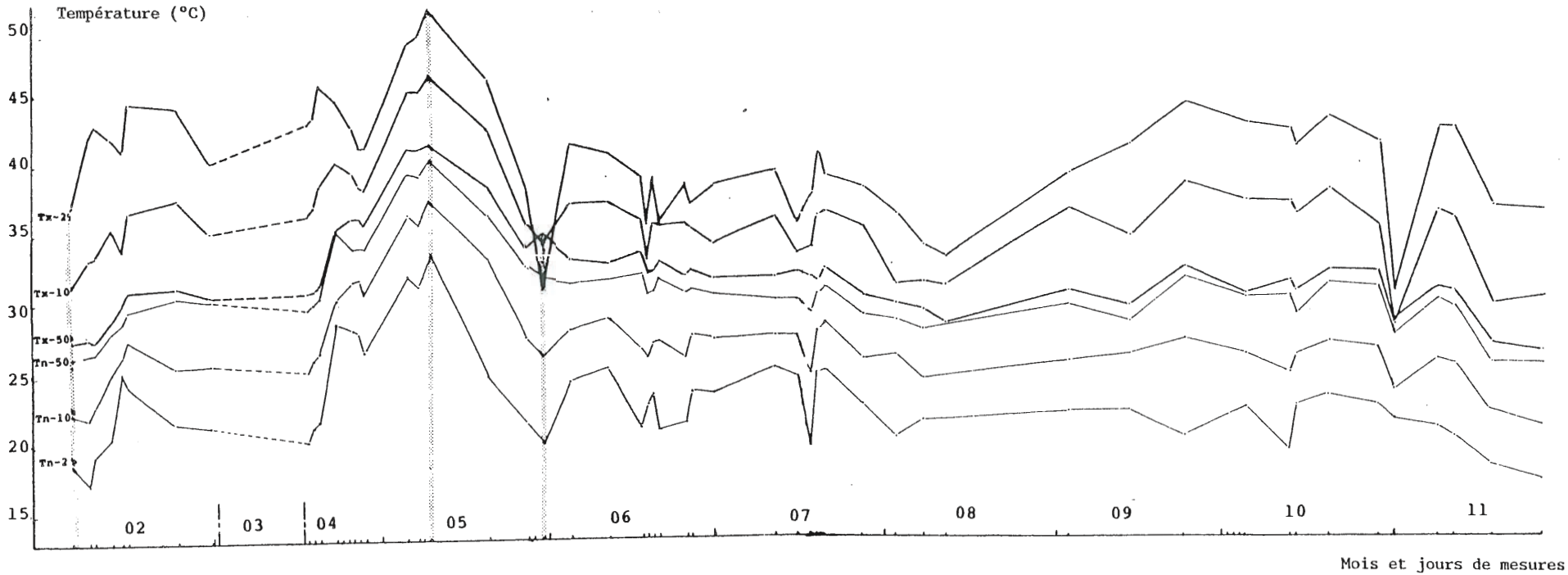


Fig. 3.3 : Variations annuelles des températures maximales (tx) et minimales (Tn), journalières, à trois niveaux de profondeur (-2, -10 et -50cm) : en grisé, les journées les plus remarquables.

Insolation cumulée	1er janvier au 18 avril	1er mars au 18 avril
1982	936 heures	385,6 ($\overline{M}$ = 7,8)
1983	966,7	426,1 ($\overline{M}$ = 8,7)
Ecarts	30,7	40,5

Tableau 3.3 : Différences de durées d'insolation de janvier à avril, en 1982 et 1983.

La différence d'insolation de 40,5 heures (soit 5 journées environ) est en effet supérieure à celle calculée sur une durée plus longue entre janvier et avril. La cause première en est l'arrivée plus précoce des pluies en 1982 : 70,9 mm tombent en 9 averses avant le 19 avril 1982 (dont deux de 37,1 mm et 7,6 mm les 14 et 15 avril) contre 0,1 mm seulement avant le 19 avril 1983. Ces épisodes pluvieux représentent un important déficit calorifique du fait d'une moindre insolation, d'un refroidissement direct sous l'averse et d'un refroidissement différé lié à l'évaporation de petites flaques sur la roche.

Dans le même ordre d'idées, il faut souligner que le maximum, qui pourrait être lié au second passage du soleil au zénith le 21 août, est totalement effacé durant la saison des pluies comprise entre mai et octobre (38°3C à - 2cm, le 21 août 1982, par temps couvert). A l'échelle de l'année, la courbe des variations de températures (Fig. 3.3) présente donc deux pics d'importance inégale : celui d'avril-mai dépassant largement celui de septembre-octobre. La croissance la plus brutale des températures à l'échelle de l'année se place entre janvier-février et mai : en 1983, l'amplitude de 37°3C (tableau 3.2) s'inscrit dans un intervalle de 122 jours seulement entre le 7 janvier et le 9 mai. Nous retrouvons pareille dissymétrie à l'échelle de la journée.

b- A l'échelle de la journée.

Le classement des amplitudes journalières est identique à celui des amplitudes annuelles comme le montre le tableau 3.4. L'écart maximum, proche de 25°C, supérieur de 7°C à celui enregistré en surface, est observé à -2 cm. La décroissance de ces valeurs en pro-

Profondeurs / Température	+ 0,5cm	-2cm	-5cm	-10cm	-20cm	-50cm
Amplitude maximale journalière	17°7	24°7	15°5	12°4	8°3	3°1
(date)	19.4.82	10.2.82	12.10.82	12.10.82	12.10.82	30.5.82

Tableau 3.4 : Amplitudes journalières maximales dans le granite et à l'air libre.

fondeur se fait au même rythme que les amplitudes annuelles (Fig. 3.2) et l'on peut estimer que les températures journalières sont quasi constantes à - 70 cm environ, quels que soient les phénomènes climatiques de surface. Très généralement, *la courbe thermique est étale dès - 50 cm* ; nous vérifions ainsi un résultat obtenu, grâce à des mesures discontinues, en 1980 (Mietton, 1980). Les coefficients de corrélation, calculés sur l'ensemble des résultats journaliers, entre les écarts quotidiens en surface d'une part et à chaque profondeur d'autre part sont excellents jusqu'à -10 cm (R = 0,96 à -2 cm ; 0,99 à -5 cm ; 0,93 à -10 cm), encore significatifs à -20 cm (R = 0,72) mais non significatifs à -50 cm (R = - 0,48).

Insolation, rayonnement global et éventuellement précipitations se conjuguent une nouvelle fois pour rendre compte de ces variations sur 24 heures. A -2 cm de profondeur, l'écart de 24°7C correspond à la plus faible insolation (6,8 h. le 9 et le 10 février) enregistrée depuis le début de l'année ce qui creuse le minimum (17°2C) tandis que le maximum (41°9C) est déjà bien supérieur à celui enregistré le 7 janvier (30°8C), date du minimum annuel absolu (13°7C).

Autre exemple, les amplitudes quotidiennes extrêmes du 12 octobre 1982 (22°9C à -2 cm) s'expliquent par un très fort rayonnement global de 2468 joules.cm^{-2}/jour (maximum absolu : 2647 j.cm^{-2}/jour) et une pluie de 15 mm ne limitant pas l'insolation (10,2 h.) puisque commençant à 18h10 pour s'interrompre momentanément à 21h10 puis définitivement à 1h25. En revanche, l'averse du 30 mai 1982 (34,7 mm), débutant beaucoup plus tôt, à 6h37, et s'accompagnant de très faibles rayonnement (785 j.cm^{-2}/jour) et insolation(3,3 h.), se fait sentir dans la même journée jusqu'à - 50 cm (Fig. 3.4).

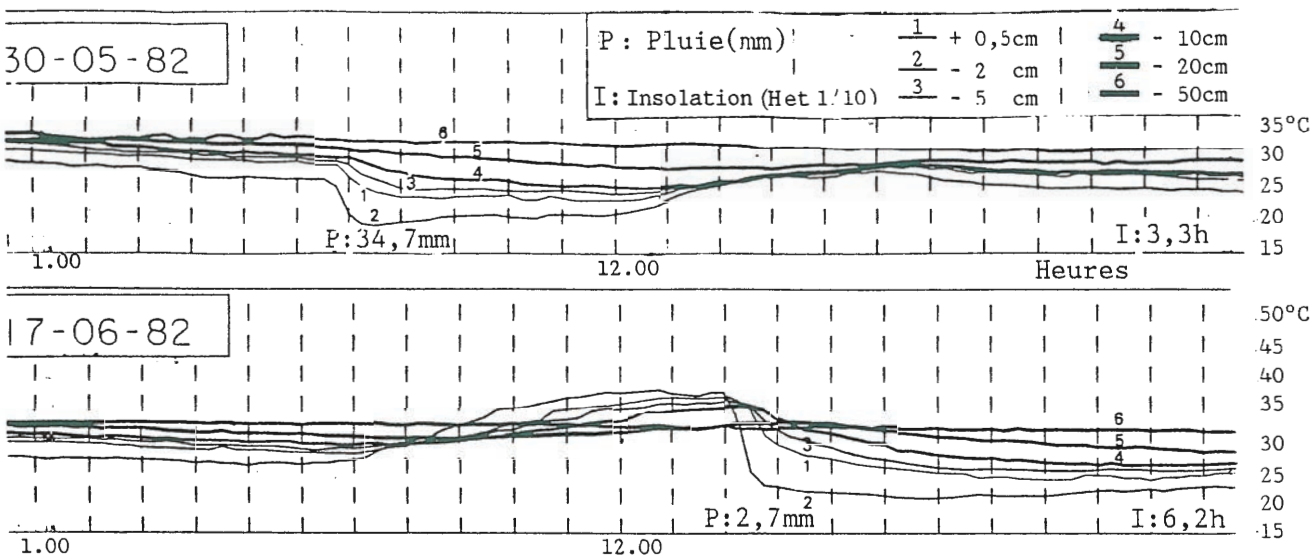


Fig. 3.4 : Variations thermiques modérées par temps couvert (30.5.1982) ou brutales sous-averses (30.5 et 17.6.1982).

Outre le problème de l'épaisseur de la roche pouvant être soumise aux influences climatiques externes, c'est celui de leur vitesse de propagation qui peut être posé. L'interprétation s'appuie dès lors sur les comparaisons des heures d'occurrence des maximums ou des minimums entre différents niveaux.

Nos mesures corroborent des faits établis depuis longtemps dans des sols meubles (Geiger, 1966 ; Seltzer, 1935) et précisent les données plus rares dans la roche en place :

- la température maximale est atteinte en début d'après-midi, après le passage du soleil au zénith, avec un décalage qui augmente en profondeur, de l'ordre de 12 heures à - 50 cm. A 10 cm de profondeur, la température continue à s'abaisser pendant une heure à une heure trente après que la surface ait commencé à se réchauffer (Peel, 1974) ;

- le refroidissement progressif nocturne atteint son maximum, par ciel clair, quelques minutes ou une heure après le lever du jour. Le décalage n'est net qu'à - 50 cm, où le minimum est enregistré

vers 14h-14h30, c'est-à-dire au moment du maximum à l'air libre (Mietton, 1980). Les courbes thermométriques présentent ainsi un tracé nettement dissymétrique, étalé à droite (Fig. 3.5), avec un temps d'échauffement d'environ huit heures, deux fois plus rapide que le refroidissement. Ce dernier est accéléré jusque vers 18h30 avant de se ralentir durant la soirée et la nuit, ce que R.F. Peel (1974) avait déjà constaté.

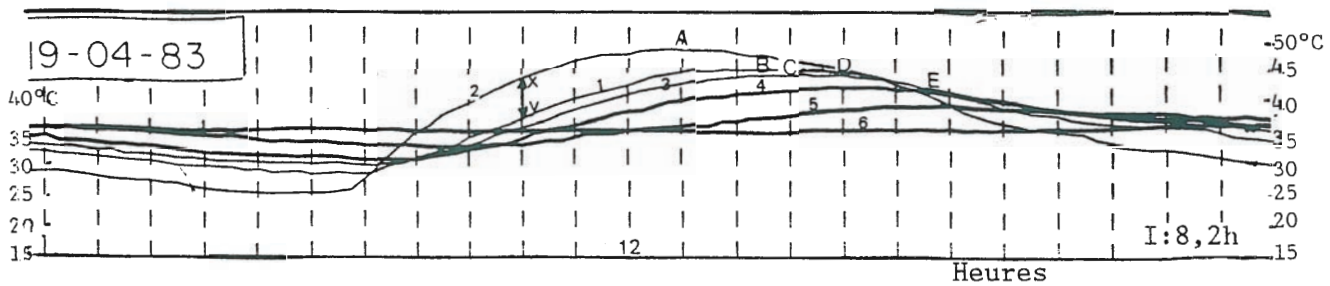


Fig. 3.5 : Variations thermiques habituelles sous ensoleillement.

Légende: A, B, C, D et E = heures moyennes des maximums journaliers et écarts-types (σ) sur l'ensemble des journées d'observations.

A (- 2 cm) = 13h (σ = 0,45)
B (+ 0,5 cm) = 14h30' (σ = 0,39)
C (- 5 cm) = 15h (σ = 0,25)
D (- 10 cm) = 16h (σ = 0,50)
E (- 20 cm) = 17h45' (σ = 0,56)

xy = Amplitude maximale, le 19 avril 1983, de 6°5C à 10 heures, entre -2 cm et +0,5 cm.

Dans le détail, ces vitesses de propagation n'apparaissent pas constantes tout au long du profil mais maximales entre 5 et 20 cm. Cette différence peut venir d'une meilleure cohésion des grains, les micro-fissures étant probablement plus nombreuses en surface. La compacité du granite assurerait ainsi davantage de conductibilité thermique.

On peut remarquer en outre que certaines journées à ciel couvert et très faible insolation peuvent être caractérisées par une quasi stabilité thermique à tous les niveaux. Ce phénomène peut s'accompagner d'une totale inversion de température, le niveau -50 cm restant le plus chaud durant toute la journée, suite à une averse durable (Fig. 3.4, 30 mai 1982).

c- A *l'échelle du quart d'heure.*

Les tableaux 3.5 et 3.6 regroupent les informations relatives aux écarts maximums, enregistrés généralement en 15 minutes. Les enseignements sont multiples :

- les variations de températures les plus accusées sont négatives et consécutives à une averse (tableau 3.5).

Date	Pluie (mm)	Amplitude thermique en 15 minutes (à -2 cm).	Amplitude maximale sur une durée ⩾ à 15' (à -2 cm)	Heure pluie	Heure amplitude maximale
20.5.83	18,6	- 9°6	-12°5 en 35'	20h45-20h49 puis 21h03-2h15	22h - 22h35
17.6.82	2,7	- 9°1	-14° en 42'	14h- ?	14h - 14h42
20.6.82	18,2	- 8°8	-8°8 en 15'	23h10 - 0h20	23h15-23h30
12.10.82	15,0	- 7°5	-11° en 47'	18h10-21h10 puis 21h25-1h25	18h18-19h05
2.8.82	20,9	- 5°1	-12°5 en 71'	8h02-9h20 puis 12h10-13h15	12h06-13h17
27.5.82	27,0	- 5°	-7° en 28'	2h35-4h15 puis 5h48-7h45	2h45-3h13
30.5.82	34,7	- 4°5	-7°5 en 33'	6h37 - 11h37	6h42 - 7h15
4.6.82	2,8	- 4°1	-6° en 27'	18h55 - 19h40	18h51-19h18
12.6.82	0,6	- 3°6	-5°5 en 24'	20h35 - 22h10	20h36 - 21h
25.6.82	4,3	- 3°2	-4°5 en 24'	23h06 - ?	23h06-23h30
18.7.82	28,6	+ 4°3	-5°5 en 38'	0h55 - 5h25	-5°5 entre 0h55 et 5h25 +4°3 entre 9h30 et 9h45
17.2.82	0,1	+1°9	pluie sans effet	20h30 - 21h05	7h30 - 7h45 échauffement matinal
19.4.83	traces	+2°1	"	16h03	6h45 - 7h "
31.10.82	traces	+2°3	"	15h10	8h15-8h30 "

Tableau 3.5 : Variations de température à la surface de la roche (-2 cm) sous averses.

Elles sont nettement plus sensibles à la surface de la roche (-2 cm) qu'à l'air libre ; le rapport des écarts étant généralement voisin de 2,5 mais pouvant atteindre 3,8 (20 mai 1983 et 17 juin 1982). La chute de température est également plus immédiate mais se prolonge moins durablement.

- l'abaissement maximal observé à -2 cm est de 9°6C en 15 minutes (20 mai 1983) et de 14°C en 42 minutes (17 juin 1982, Fig. 3.4). De manière plus instantanée, la chute de température est de 5°C en 6 minutes le 20 mai 1983 (1).

- ces écarts se font sentir jusqu'à -10 cm le plus souvent, quelquefois 5 cm (20 mai 1983 : 27 mai 1982 ; 4 juin 1982), exceptionnellement 20 centimètres (tableau 3.6). Cette détermination ne tient pas seulement compte du caractère négatif de l'écart tel qu'il peut être signalé dans chacun des tableaux unitaires mais de l'horaire correspondant, qui rend vraisemblable ou non la corrélation avec l'averse. En moyenne, l'écart n'est plus que de 1°5C à 5 cm (maximum observé : -2°1C) et de 1°C à -10 cm (maximum observé : -1°5C).

- l'amplitude thermique n'est pas corrélée de manière simple avec la hauteur de pluie. Deux petites averses identiques (2,8 mm le 4 juin et 2,7mm le 17 juin 1982), à moins de 15 jours d'intervalle, déterminent des baisses de températures très différentes de 4°1C et 9°1C. l'orage majeur du 30 mai 1982 (34,7 mm) n'a pas davantage d'impact (-4°5C).

Seules les traces du 17 janvier, 31 octobre 1982 et 19 avril 1983 n'ont pas ou peu d'effet, dans tous les cas inférieur à l'échauffement matinal de l'ordre de 2°C en 15 minutes (écart positif maximum observé : + 3°1C le 11 novembre 1982 à 7h30). La piuie de 0,6 mm (12 juin 1982), à laquelle est liée une baisse de 3°6C, peut être con-

---

(1) *Les déterminations horaires ont été faites, dans les cas les plus intéressants, non pas sur les courbes obtenues après digitalisation (Fig. 3.4 et 3.5) mais par un examen détaillé des diagrammes d'origine.*

Profondeurs / Dates (pluies en mm)	+ 0,5cm	-2cm	-5cm	-10cm	-20cm	-50cm
20.5.83 (18,6mm)	A -2°5 H 22	-9°6 21,5	-1°8 22,7	+1°1 10	+0°5 14,2	-0°5 10,5
17.6.82 (2,7)	A -4° H 14,5	-9°1 14,2	-2°1 14,5	-1°5 14,7	-0°4 0,5	-0°5 14,0
20.6.82 (18,2)	A -2°4 H 23,5	-8°8 23,2	-1°3 23,5	-1°1 0.0	-0°5 20,2	-0°4 4,5
12.10.82 (15,0)	A -2°6 H 18,7	-7°5 18,7	-2° 19,0	-1°1 19,2	0°8 9,0	0°4 16,0
2.08.82 (20,9)	A -2°9 H 12,2	-5°1 12,2	?	-1°1 13,0	-0°7 14,2	0°6 11,0
27.5.82 (27,0)	A -2° H 3	-5° 2,7	-1°2 3,2	-1°1 18,2	-1°2 1,7	-0°5 14,7
30.5.82 (34,7)	A -1°9 H 6,7	-4°5 6,7	-1°6 7,0	-0°8 7,2	-0°5 1,0	0°8 3,5
4.6.82 (2,8)	A -1°7 H 18,5	-4°1 18,7	-1°3 19,0	-1°1 17,7	+1°1 15,2	-0°5 22,2
12.6.82 (0,6)	A -1°4 H 20,7	-3°6 20,2	-1°1 20,7	-0°9 21,2	-0°9 20,2	+0°4 23,0
25.6.82 (4,3)	A -1°4 H 23,2	-3°2 23,2	-1°2 17.7	+1°2 8,7	+0°7 10,2	-0°4 8,7
18.7.82 (28,6)	A +1°6 H 9,7	+4°3 9,5	-1°7 1,5	+1° 10,5	+0°6 11,7	+0°4 20,7
17.2.82 (0,1)	A +1°5 H 10,2	+1°9 7,5	-1°1 19,2	-1°2 19,0	+0°5 14,7	-0°5 6,5

Tableau 3.6 : Amplitudes (A) maximales enregistrées en 15 minutes et horaires (H) correspondants (les quarts d'heure sont notés .2, .5 ou .7).
(Le double trait vertical marque la limite d'influence en profondeur de l'averse).

sidérée *a priori* comme une valeur limite ; elle doit être considérée en effet avec prudence dans la mesure où les relevés pluviométriques sont faits à quelque distance et l'on sait le caractère souvent ponctuel des orages. Dans tous les cas, il semble bien cependant qu'il suffise de quelques millimètres de pluie pour déclencher une baisse sensible de température à la surface de la roche. Ceci revient à dire que *la fréquence des chocs thermiques en est plus grande.*

- Ces chocs thermiques correspondent très largement au passage de lignes de grains s'abattant en début de saison des pluies (mai-juin) ou secondairement à la fin (pluie du 10 octobre 1982), sur une dalle rocheuse préalablement surchauffée. Ainsi, l'averse du 20 mai 1983, pour laquelle on enregistre des amplitudes maximales, n'est précédée que d'une seule pluie (15,6 mm le 17 mai) en ce début d'hivernage 1983.

A l'échelle de la journée, l'heure d'occurrence joue aussi un rôle capital. La petite pluie du 17 juin 1982, remarquable par son efficacité (tableau 3.5), survient à 14h, au moment de l'échauffement maximal. Il en est de même le 2 août. Les autres averses efficaces se placent en fin d'après-midi ou dans la soirée ; au contraire, les fortes pluies à influence limitée tombent au coeur de la nuit (27 mai 1982) ou tôt le matin (10 mai 1982).

- Les décalages horaires dans l'amorce des chutes de températures aux différentes profondeurs permettent une nouvelle fois d'apprécier la vitesse de propagation de l'onde de refroidissement (tableau 3.6). Les moyennes des écarts sont de trente minutes environ entre les niveaux -2 et -5 cm, puis 20 minutes entre -5 et -10 cm, soit des vitesses de 6 cm/h et 15 cm/h. On vérifie ainsi l'accélération de la propagation de l'onde thermique en profondeur (dans un rapport proche de 2 comme précédemment). Mais cette vitesse est, dans l'absolu, trois ou quatre fois plus élevée que dans le cas d'un simple refroidissement nocturne.

3.2.1.3 : Les écarts de températures entre niveaux au même instant :

a- Les contrastes thermiques roche - air libre.

Les écarts principaux avec l'air libre, occasionnellement soumis à des variations climatiques rapides, sont à rechercher généralement au niveau le plus profond de la roche (-50 cm), assujetti à une quasi inertie thermique. Ce contraste peut être positif ou négatif ; nous nous sommes borné à classer les cinq premières valeurs dans chacun des deux cas (tableau 3.7). On constate que l'amplitude roche (-50 cm) - air libre est au plus égal à 12°C.

	$T_N > T_V$ (+0,5) (-50)			$T_N < T_V$ (+0,5) (-50)		
	Ecart	Date	Heure	Ecart	Date	Heure
1	+ 12°	19.4.82	20	- 9°7	30.5.82	10.7
2	+ 11°3	11.2.82	14.2	- 8°9	18.7.82	6.0
3	+ 11°	10.2.82	14.7	- 8°4	17.6.82	19.7
4	+ 10°8	17.2.82	14.7	- 8°2	27.5.82	7.2
5	+ 10°5	14.2.82	15.2	- 7°5	20.6.82	2.7
		19.4.83	13.7			

Tableau 3.7 : Contrastes thermiques maximums entre l'air libre (T_N + 0,5 cm) et la roche (T_V: -50 cm) à un instant donné.

Les écarts sont positifs, autrement dit l'atmosphère est plus chaude que le granite, en début d'après-midi (14-15h) de saison sèche ou mieux de fin de saison fraiche (4 valeurs sur 6 relevées en février ; 2 en avril). En revanche, le coeur de la roche peut être plus chaud, au moment des averses bien sûr ou, plus précisément, à la fin de l'averse. La comparaison des tableaux 3.5 (heure de la pluie) et 3.6 (heure de l'écart) est très parlante à cet égard.

Toutefois, dans le cas de précipitations, on sait que la surface de la roche se refroidit davantage que l'air et l'on n'est donc

pas surpris de retrouver des différences de l'ordre de + 10°C entre l'atmosphère et le niveau -2 (10°9C le 20 mai ; 9°7C et 9°2C les 17 et 20 juin). A n'en pas douter, on doit retrouver des contrastes majeurs, durant ces journées, entre les points -2 et -50 cm.

b- Les contrastes thermiques à l'intérieur de la roche.

L'examen complet des 45 tableaux unitaires permet de limiter la comparaison entre le niveau - 2 cm et les niveaux -20 et -50 cm. Les valeurs absolues les plus élevées se concentrent en effet dans ces deux intervalles. Elles sont classées dans le tableau 3.8.

Contrastes thermiques entre -2 et - 20 cm				Contrastes thermiques entre -2 et -50 cm			
Ecarts positifs (T-2 > T-20)		Ecarts négatifs (T-2 < T-20)		Ecarts positifs (T-2 > T-50)		Ecarts négatifs (T-2 < T-50)	
A	Date et heure	A	Date et heure	A	Date et heure	A	Date et heure
+ 15°6	11.2.82 (12.5)	- 15°3	20.5.83	+ 15°5	11.2.82 (13.2)	- 14°	30.5.82 (7.7)
+ 15°4	10.2.82 (13.0)	- 12°5	30.5.82 (7.7)	+ 15°1	19.4.82 (14.5)	- 12°3	27.5.82 (3.5)
+ 14°1	19.4.82 (14.5)	- 12°5	20.6.82 (23.7)	+ 15°	10.2.82 (13.0)	- 11°9	20.6.82 (23.7)
+ 13°9	17.2.82 (11.7)	- 11°9	27.5.82 (3.5)	+ 14°9	17.2.82 (13.0)	- 11°8	12.10.82 (1.0)
+ 13°7	11.11.82 (11.2)	- 11°1	17.6.82 (16.0)	+ 14°	14.2.82 (13.7)	- 11°5	17.6.82 (18.2)

Tableau 3.8 : Contrastes thermiques maximums (A) à l'intérieur de la roche à un instant donné.

La surface de la roche étant plus sensible que l'air aux influences climatiques externes, il est logique de trouver des écarts, entre -2 et -50 cm, supérieurs aux précédents, de l'ordre de 14°C à 16°C désormais. Ces effets identiques mais amplifiés sont liés aux mêmes causes : averses de mai et juin pour les écarts négatifs, échauffement de surface en début d'après-midi (13h contre 14-15h à l'air libre) et en saison sèche pour les écarts positifs. Ces derniers sont en valeur absolue plus élevés que les refroidissements sous aver-

ses. S'il existe une fatigue de la roche pouvant être liée à des contrastes thermiques entre niveaux, *la fréquence de ce type de contraintes apparaît plus grande qu'on ne l'imaginerait a priori et pas seulement liée à des phénomènes exceptionnels.*

Enfin, il est notable que les amplitudes maximales, parmi toutes celles enregistrées, se placent entre -2 et -20 cm. Le maximum maximorum observé est de 15°5C le 11 février 1982, à 12h30 (tableau 3.8). Cette valeur peut être mise en rapport avec l'écart extrême de 24°C enregistré dans le désert mojave par E. Roth (1964), le 10 juillet 1962 à 14h30 environ, entre les niveaux -3,8 et -16,5 cm, durant une période d'observation de 8 mois.

3.2.2 : Les résultats sur cuirasse ferrugineuse :

Les enregistrements n'ont pu être réalisés dans ce cas qu'à 5 niveaux du fait de l'endommagement d'une sonde. La profondeur -50 cm a ainsi été délaissée.

En outre, les résultats ne s'échelonnent que sur moins d'un mois, entre le 25 avril et le 20 mai 1984, en une série de huit journées complètes d'observation. Ils caractérisent une surface cuirassée dénudée. Les caractéristiques analytiques de la cuirasse sont données en annexes (Tab. A.5. 8). Les amplitudes thermiques peuvent être tout d'abord considérées suivant cette échelle de temps mensuelle.

3.2.2.1 : Les variations de température à même profondeur :

a- A l'échelle mensuelle :

Le tableau suivant regroupe les minimums et les maximums observés à chaque niveau.

Profondeurs / Températures	+0,5cm	- 2	- 5	- 10	- 20
Minimum mensuel	22°1C (15-5)	17°8C (19-5)	25°3C (19-5)	27°9C (16-5)	32°1C (16-5)
Maximum mensuel	> 59°6C (15-5)	> 59°8C (15-5)	59°2C (15-5)	55°6C (15-5)	50°1C (15-5)
Amplitude mensuelle	>37°5C	>42°0C	33°9C	27°7C	28°0C

Tableau 3.9: Minimums et maximums thermiques dans une cuirasse en avril-mai 1984.

Les maximums absolus du 15 mai 1984, à l'air libre et à -2 cm, sont malheureusement donnés ici par défaut ; le réglage préalable du thermographe ne nous permettant pas d'enregistrer alors les températures supérieures à 60°C. Cette valeur est en fait dépassée en surface et même à -2 cm (70°C ?). Elle est approchée à -5 cm et à -10 cm(1). Ce sont probablement, en ce début de mai et alors qu'aucune averse n'a été enregistrée jusqu'à cette date du 15, des valeurs proches des maximums absolus annuels.

Cette période de fort échauffement, légèrement décaléepar rapport au passage du soleil au zénith, n'empêche pas les minimums d'être eux aussi bien marqués, à l'aube, après un intense rayonnement nocturne. Les amplitudes sont ainsi très appréciables, de plus de 40°0C à -2 cm. Pareils écarts se placent en fait dans un intervalle de temps plus limité, d'une journée seulement (15 mai).

b- A léchelle journalière :

Le classement des amplitudes fait apparaître une fois encore des contrastes thermiques plus accusés à la surface de la cuirasse qu'à l'air libre et s'atténuant en profondeur.

---

(1) *J. d'Hoore, cité par P. Michel (1969, p. 137) a mesuré, à 10cm de profondeur, des températures comprises entre 36 et 40°C, sur un bowal du Fouta Djalon, le 12 avril 1951.*

Profondeurs / Températures	+ 0,5cm	- 2	- 5	- 10	- 20
Amplitude maximale journalière (date)	> 37°5C (15.5.84)	>40°9C (15.5.84)	33°7C (15-5.84)	25°5C (15.5.84)	13°7C (15.5.84)

Tableau 3.10 : Amplitudes journalières maximales dans la cuirasse et en surface.

Ces écarts importants sont deux fois plus élevés que sur granite aux mêmes profondeurs. Ils se placent tous le 15 mai, date de la première averse enregistrée, en 1984, à Imiga, qui n'est que de 5,5 mm.

En dehors de ces phénomènes exceptionnels, les horaires des maximums et des minimums sont en moyenne les suivants :

Profondeurs	+ 0,5cm	- 2	- 5	- 10	- 20
Maximums	13h15	13h00	13h45	15h15	19h15
Minimums	6h15	6h00	7h00	7h15	9h00

Tableau 3.11 : Horaires des minimums et maximums thermiques quotidiens dans la cuirasse.

Ces valeurs moyennes, résultantes d'un petit nombre de journées de mesures, semblent prouver le caractère plus rapide des variations de température dans la cuirasse par rapport au granite, du moins dans les dix premiers centimètres. Au delà, en effet, le décalage de 2 heures environ entre les horaires des niveaux -5 et -10 cm est assez identique à ce qu'il est dans la roche granitique. L'analyse des écarts "instantanés", à l'échelle du quart d'heure, peut permettre de préciser ce phénomène.

c- A l'échelle d'un quart d'heure.

Les variations "instantanées" maximales sont regroupées dans le tableau suivant.

Profondeurs	+ 0,5cm	- 2	- 5	- 10	- 20
Amplitudes "instantanées" Date (Heure)	- 9°5C 15 mai (15.7)	-17°7C 15 mai (15.5)	- 3°C 15 mai (17.5)	- 1°5C 15 mai (20.5)	- 1°1C 19 mai (4.5)

Tableau 3.12 : Amplitudes "instantanées" maximales dans la cuirasse et en surface.

Ces écarts correspondent, dans tous les cas, à un abaissement de température lié à des averses : celle du 15 mai (15h30) principalement. L'amplitude maximale, enregistrée à -2 cm est, sur ce seul cas, *le double de ce qu'elle peut être sur granite* (-9°6C, tableau 3.5), *dans le même intervalle de temps*. Ceci confirme le caractère plus rapide de la variation thermique dans les premiers centimètres.

En revanche, l'influence de l'averse ne se fait pas sentir plus profondément que dans le granite (- 0°8C à - 20 cm le 15 mai). D'autre part, les décalages à partir de - 5 cm entre les horaires des écarts maximums, plus élevés qu'ils ne le sont dans le granite (Tableau 3.6), indiquent un refroidissement plus lent que dans la roche, semble-t-il. Cette discontinuité peut être liée, selon nous, au caractère non homogène du matériau, perdant rapidement sa massivité au-dessous du niveau superficiel le plus induré.

3.2.2.2 : Les écarts de températures entre niveaux au même instant :

a- Les contrastes thermiques cuirasse - air libre.

Les cinq plus grands écarts de température entre la surface de la cuirasse et les différents niveaux sont classés dans le tableau suivant.

Profondeurs comparées cm	+ 0,5 et -2		+ 0,5 et - 5			+ 0,5 et - 10			+ 0,5 et - 20		
Ecart	Date	Heure	Ecart	Date	Heure	Ecart	Date	Heure	Ecart	Date	Heure
+20°7C	15-5	16.0	-21°4C	15-5	17.5	-27°6C	15-5	19.7	-25°9C	15-5	20.5
+ 8°6C	19-5	22.2	- 9°0C	19-5	22.7	-12°7C	19-5	22.7	+18°0C	19-5	13.7
- 4°9C	18-5	9.2	+ 4°8C	18-5	13.5	+10°5C	18-5	14.0	+16°7C	18-5	14.0
+ 4°8C	25-4	20.5	+ 4°3C	25-4	13.0	+ 9°5C	20-5	14.0	+14°5C	20-5	14.0
- 4°5C	17-5	9.2	+ 3°9C	17-5	14.0	- 5°4C	16-5	4.7	+13°0C	17-5	14.2

Tableau 3.13 : Contrastes thermiques maximums entre l'air libre et la cuirasse.

Les écarts majeurs, qui dépassent 20°C, voire 25°C, se rencontrent tous le 15 mai et sont consécutifs à l'averse et à l'abaissement de température à l'air libre.

Seul, le niveau -2 cm se refroidit plus rapidement que l'atmosphère, d'où la valeur positive de + 20°7C.

Les autres écarts positifs se situent généralement vers 14h, au moment de l'échauffement maximum à l'air libre.

b- Les contrastes thermiques à l'intérieur d'une cuirasse.

Une fois encore, nous nous bornons à classer les cinq plus grandes valeurs absolues dans chacun des trois cas suivants où la température à -5, -10 et -20 cm est comparée à celle de -2 cm.

- 2 cm / - 5 cm			- 2 cm / - 10 cm			- 2 cm / - 20 cm		
Ecart	Date	Heure	Ecart	Date	Heure	Ecart	Date	Heure
-34°7C	15-5	16.2	-36°0C	15-5	16.5	-31°4C	15-5	19.5
-16°7C	19-5	22.7	-20°4C	19-5	22.7	-22°3C	19-5	23.0
+ 7°7C	18-5	11.7	+13°1C	18-5	13.2	+18°6C	18-5	14.0
+ 7°5C	17-5	9.7	+10°9C	20-5	14.0	+15°9C	20-5	14.0
- 7°2C	25-4	21.0	- 8°7C	25-4	21.0	-11°3C	16-5	3.0

Tableau 3.14 : Contrastes thermiques maximums à l'intérieur d'une cuirasse.

Les amplitudes maximales sont toujours enregistrées le 15 mai mais elles dépassent désormais 30°C, *atteignant même 36°C ce qui constitue le maximum maximorum de tous nos relevés.*

Cet écart est considérable puisqu'il s'inscrit sur un intervalle de 8 cm ; il est même de *35°C sur 3 cm.*

CONCLUSION.

Les variations de températures dans la roche en place ou la cuirasse, sous climat soudanien, sont désormais mieux connues, grâce à ces mesures réalisées en continu et sur une longue durée. Elles pourraient être évidemment précisées par l'emploi de sondes plus petites et placées plus près de la surface.

D'ores et déjà, les écarts de températures, entre niveaux ou bien à une même profondeur, apparaissent importants et surtout de manière répétée, y compris à l'échelle d'une journée commune, sans accident climatique. Toutefois les chocs thermiques les plus brutaux font suite aux averses, même de faible quantité, tombant sur une surface surchauffée durant les mois d'avril ou mai.

L'abaissement maximal observé à la profondeur de - 2cm dans le granite est de l'ordre de 5°C en 6 minutes ou 10°C en 15 minutes. Aux mêmes profondeurs, même mois (20 mai au lieu du 15 mai) et pour le même intervalle d'un quart d'heure, la chute de température est beaucoup plus marquée dans la cuirasse, de l'ordre de 18°C.

De la même façon, les contrastes thermiques maximums à l'intérieur de la roche sont voisins de 15°C (entre - 2 et - 20cm) tandis qu'ils sont deux fois plus élevés à l'intérieur de la cuirasse, où le maximum maximorum enregistré est de 35°C sur 3 cm d'intervalle seulement (- 2 et - 5 cm). Enfin, les mesures sur granite confirment qu'il n'y a plus d'amplitude diurne dès 50cm ou, au maximum, 70cm de profondeur. En revanche, c'est une tranche rocheuse d'épaisseur comprise entre 2 et 5 cm, qui se réchauffe ou se refroidit davantage que l'air à son contact.

Ces divers enseignements seront repris dans le livre II à travers l'analyse des processus de météorisation.

3.3 LES VARIATIONS D'HUMIDITE DANS LE SOL.

Les mesures continues d'humidité ont été faites sur le seul site de Pô-Banon, plus précisément sur trois de nos parcelles d'érosion (P_1: parcelle sous savane ; P_2: parcelle sous culture ; P_3: parcelle nue de Wischmeïer), à une même profondeur (-25cm) dans des limons sableux (Tab. A.5.1), durant la période juin-octobre 1978. Ce suivi a été rendu possible par l'utilisation de tensiomètres, préalablement étalonnés (Mietton, 1980, p. 141). Les courbes ainsi obtenues (Fig. 3.6) permettent plusieurs constats :

- D'une manière générale, elles présentent une série de variations identiques, *dissymétriques*, faites d'une brusque montée de la teneur en eau après une grosse averse (3 juillet ou 3 août) ou une succession de pluies rapprochées (28 au 30 août ou 9 au 11 septembre) et d'une décroissance plus lente. Celle-ci se place durant les périodes sèches, longues d'environ quinze jours, qui affectent durant cet hivernage pas moins de quatre fois le secteur (6 au 20 juin, 17 juillet au 2 août, 11 août au 30 août, 22 septembre au 5 octobre).

- Après chacune de ces périodes sèches, on aboutit à des teneurs minimales du même ordre. Celles-ci ne correspondent pas au point de flétrissement mais aux limites d'utilisation de l'appareil. Il n'empêche que *l'idée*, parfois avancée, *d'une saturation des sols en fin d'hivernage, doit être tout à fait nuancée*, du moins pour les sols sablo-limoneux, relativement filtrants, de versants. Encore ne tient-on pas compte ici de l'existence fréquente d'organisations pelliculaires superficielles qui limitent l'infiltration, comme nous le verrons au chapitre V !

- De même que pour les valeurs minimales, les teneurs maximales, atteintes après de fortes pluies, sont voisines, quelle que soit la période. La capacité au champ peut être déterminée puisqu'on sait qu'elle équivaut à la quantité d'eau retenue dans le sol après de grosses averses, une fois que le mouvement descendant de l'eau s'est considérablement ralenti, généralement de 1 à 3 jours après les précipitations. Cette teneur en eau est d'environ 12,5% sur P_1, 10% sur P_3 et 9,5% sur P_2.

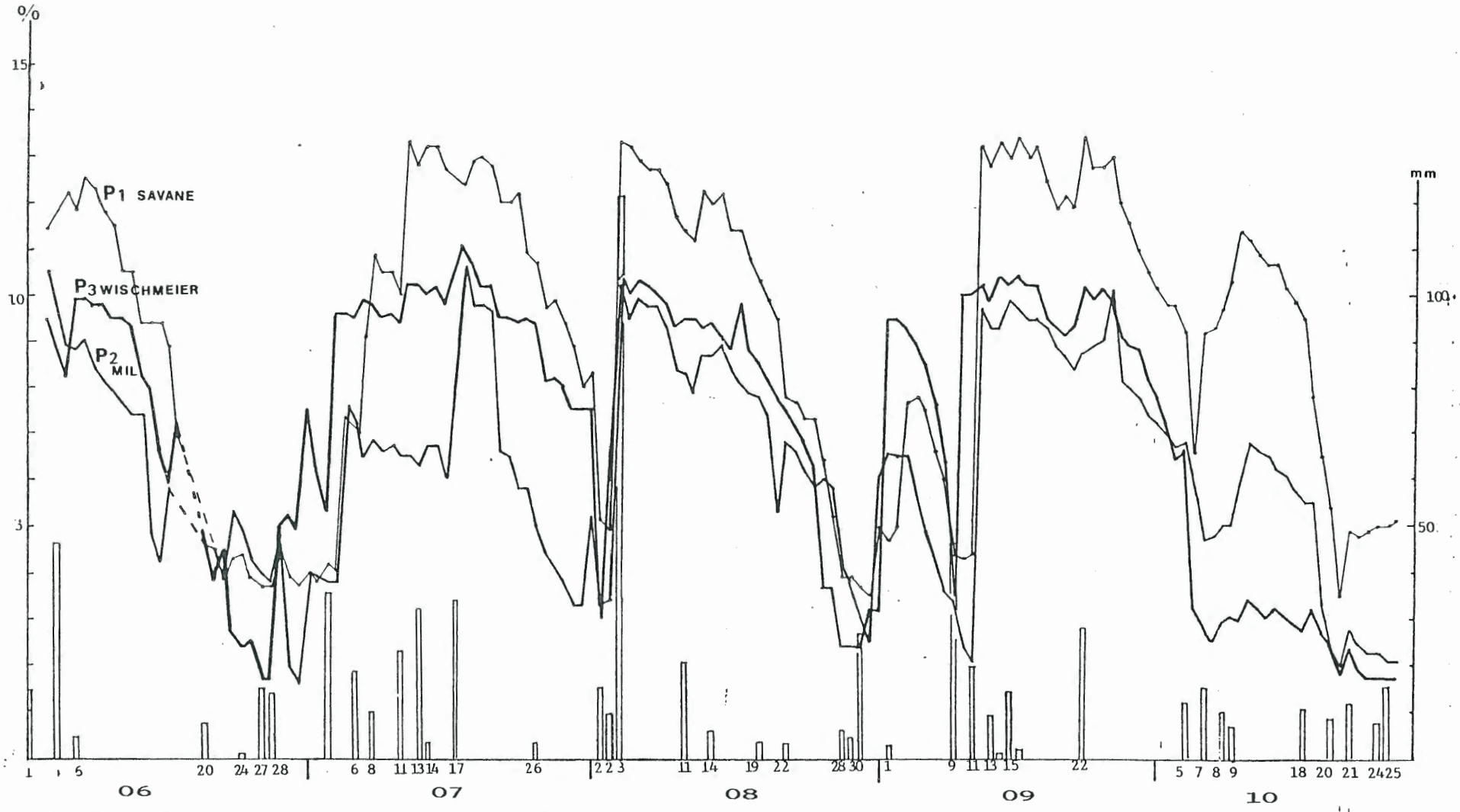


Fig. 3.6 : Exemple de variations du taux d'humidité à - 25cm, sur trois parcelles d'érosion à Pô-Banon.

- Enfin, on constate que les trois courbes sont généralement disposées, l'une par rapport à l'autre de la manière suivante : P_1, P_3 puis P_2, par ordre décroissant des taux d'humidité (81 journées sur les 122 d'observation).

Les courbes P_2 et P_3 sont toutefois assez proches l'une de l'autre tandis que P_1 est en revanche nettement décalée vers le haut. Nous verrons que la végétation ainsi que l'état de surface du sol peuvent rendre compte de ces situations.

En résumé, les sols sablo-limoneux, fréquents sur les substratums cristallins du Burkina Faso, semblent soumis durant la saison des pluies à des variations marquées de leur humidité pondérale pouvant induire directement des processus physiques et chimiques de météorisation.

Mais l'humidité préalable dans le sol constitue aussi, et plus encore, un facteur indirect d'érosion, dans la mesure où elle conditionne l'infiltration durant une averse et la genèse du ruissellement.

C'est à l'examen de ces facteurs indirects, végétation et sols, qu'est consacrée la deuxième partie de ce livre I.

2ème PARTIE

Les facteurs indirects de l'érosion. Végétation et sols entre influences climatiques et anthropiques

L'influence du climat sur la morphogenèse est liée à l'action directe des agents d'érosion atmosphériques comme la pluie, le vent, l'humidité de l'air, les températures. Cette influence climatique se traduit encore, mais de manière indirecte, par les deux "marqueurs" de surface que sont la végétation et les sols, dont l'identité zonale d'ensemble est particulièrement nette en ce milieu de savane.

Végétation et sols constituent ainsi, plutôt que des agents, des facteurs d'érosion. L'un et l'autre sont en outre sous la dépendance des activités anthropiques ; l'homme ayant le pouvoir d'infléchir le déroulement de la morphogenèse en l'accélérant le plus souvent, en la ralentissant parfois.

Ces facteurs indirects jouent un rôle primordial à l'interface lithosphère - atmosphère, en particulier dans le déroulement du cycle de l'eau ou bien vis-à-vis de la dynamique éolienne. Ce caractère primordial, largement pressenti, est cependant difficile à mettre en évidence :

- d'une part, par souci de commodité didactique, chacun des facteurs est pris, comme ici, isolément alors que la réalité est plus complexe, faite d'interactions, au-travers desquelles les processus se concurrencent ou s'épaulent (Tricart, 1981).

- d'autre part, ces facteurs sont généralement l'objet d'appréciations plus qualitatives. Le caractère indirect de leur influence

rend en effet toutes les corrélations difficilement quantifiables. En second lieu, l'équivalent du réseau climatologique, qui délivre à l'échelle du pays l'information de base permettant de caractériser les agents d'érosion, n'existe pas. Il faut y substituer des stations d'études, coûteuses en investissements de tous ordres, susceptibles d'appréhender la structure et si possible le fonctionnement de ces facteurs. Enfin, les travaux des pédologues et des botanistes ne sont pas toujours d'un grand secours car leurs approches sont différentes de celles du géomorphologue.

Quoi qu'il en soit, sols et végétation constituent, en association, un type de couverture qui conditionne la morphogenèse. La dynamique de cette couverture obéit à un bon nombre d'interactions soulignées par J. Tricart (1971).

La végétation modifie le climat à la surface du sol, dans le sol lui-même ainsi que son régime hydrique ; elle favorise sa résistance mécanique face aux pluies et au vent. La litière et l'humus, à leur tour, freinent le ruissellement, accélèrent l'infiltration, améliorent l'alimentation en eau des plantes. Cette rétroaction entre sol et végétation peut être particulièrement étroite, notamment dans le cas des formations édaphiques, qui constituent l'une des composantes du paysage végétal que nous présentons maintenant.

CHAPITRE IV

LA VEGETATION

Une couverture de savanes discontinues dans l'espace et dans le temps

L'influence prépondérante de la végétation sur la morphogenèse se marque à travers la notion de couverture, plus ou moins dense, plus ou moins continue. Celle-ci s'identifie à la biomasse aérienne, aux différents niveaux des ligneux et des herbacées, mais aussi à la biomasse souterraine. La première fait écran de manière évidente aux énergies solaire, éolienne et pluviale mais la seconde participe également à la fixation du sol. Cette influence de la biomasse n'est pas seulement liée à sa structure mais encore à son fonctionnement. Sa vie propre est en effet commandée par la transpiration qui influence le bilan hydrique ; sa mort saisonnière détermine les apports au sol de matière organique, la constitution d'un horizon humifère.

Malgré l'importance de toutes ces interactions, l'ensemble des caractères de la végétation n'a pu être décrit ici de manière détaillée pour toutes les espèces, ni à toutes les échelles. En particulier, seule la biomasse aérienne, et à travers elle les ligneux essentiellement, a fait l'objet d'une étude à l'échelle du territoire.

4.1 A L'ECHELLE DU TERRITOIRE : UNE ZONALITE ENCORE RECONNAISSABLE MAIS PERTURBEE.

Deux auteurs, le Père M. Terrible (1978) et Mme M. Marchal (1983) ont réussi, à l'issue de travaux impressionnants, à cartographier les paysages végétaux sur la totalité du pays. Par photo-interprétation

de 12000 clichés environ, M. Marchal s'est attachée à l'analyse physionomique de la végétation ou, du moins, de sa strate supérieure lorsque celle-ci est trop dense et cache les strates inférieures. Grâce à ses 800 stations étudiées au long de 15000 kilomètres d'itinéraires, le Père Terrible avait réussi auparavant à définir cinq régions phytogéographiques dont nous avons superposé les limites sur le travail, plus récent, de M. Marchal (Fig. 4.1).

La définition structurale de la végétation, faite à terre, par le premier de ces deux auteurs, est évidemment plus fine. Trois strates, herbacée, arbustive et arborée ont été systématiquement considérées ; la combinaison des taux de recouvrement de chacune des strates permettant alors de déterminer les formations, comme le montre le tableau ci-joint.

Recouvrement par strate (en %)			Formations
Herbacée	Ligneuse basse	Ligneuse haute	
0-100	0-100	75-100	Ligneuse haute dense
0-100	0- 25	25- 75	Ligneuse haute claire
0-100	25-100	25- 75	Ligneuse complexe
0-100	25-100	0- 25	Ligneuse basse
25-100	0- 25	0- 25	Herbeuse
0- 25	0-25	0- 25	Claire

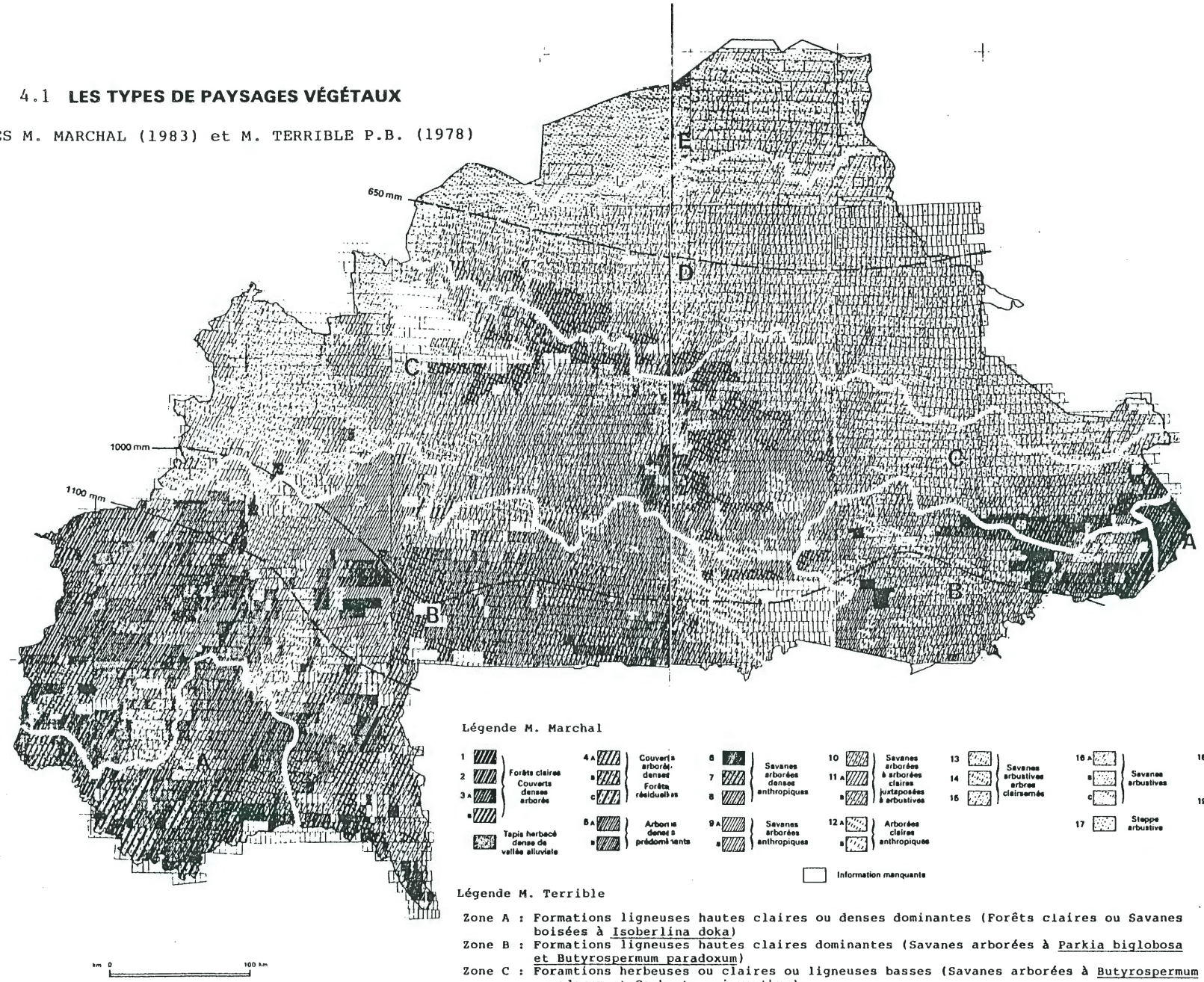
Tableau 4.1 : Définition des formations végétales par combinaison des recouvrements (Terrible, 1978).

Le travail du Père M. Terrible comporte en outre un examen floristique très utile, même à cette échelle. La détermination des espèces les plus fréquentes, la mise en évidence d'éventuels appauvrissements constituent en effet des indicateurs précieux d'une sélection anthropique et/ou pédo-climatique.

La disposition zonale de cinq grandes régions phytogéographiques (Fig. 4.1) est toutefois reconnaissable. Du Sud au Nord, on distingue :

FIG. 4.1 **LES TYPES DE PAYSAGES VÉGÉTAUX**

D'APRES M. MARCHAL (1983) et M. TERRIBLE P.B. (1978)



Légende M. Marchal

1 Forêts claires
2 Couverts denses arborés
3A
B
Tapis herbacé dense de vallée alluviale
4A Couverts arboré-denses
B Forêts résiduelles
C
5A Arbres denses prédominants
B
6 Savanes arborées denses anthropiques
7
8
9A Savanes arborées anthropiques
B
10 Savanes arborées à arborées claires juxtaposées à arbustives
11A
B
12A Arborées claires anthropiques
B
13 Savanes arbustives arbres clairsemés
14
15
16A Savanes arbustives
B
C
17 Steppe arbustive
18A Steppes arbustives
B
19A Fourrés tigrés
B
C
Information manquante

Légende M. Terrible

Zone A : Formations ligneuses hautes claires ou denses dominantes (Forêts claires ou Savanes boisées à Isoberlina doka)

Zone B : Formations ligneuses hautes claires dominantes (Savanes arborées à Parkia biglobosa et Butyrospermum paradoxum)

Zone C : Foramtions herbeuses ou claires ou ligneuses basses (Savanes arborées à Butyrospermum paradoxum et Combretum micranthum)

Zone D : Formations herbeuses et claires, secondairement ligneuses basses (Savanes arbustives à Balanites aegyptiaca et Combretum micranthum)

Zone E : Formations claires et herbeuses, secondairement ligneuses complexes (pseudo-steppes arbustives à Balanites aegyptiaca et Acacia raddiana).

© ORSTOM 1983

1°/- Une région de savanes boisées ou même de forêts claires, à houppiers plus ou moins jointifs, représentant l'écran arboré le plus efficace face aux agents atmosphériques. Cette zone (7% du territoire) est partagée en deux secteurs de manière inattendue et cette division constitue un premier exemple de l'insuffisance de l'explication climatique.

Les limites de ces deux secteurs ne correspondent pas à des isohyètes mais à des types différents d'occupation du sol (Terrible, 1978, p. 29). Le district de Sideradougou, au sud-ouest du pays, est le prolongement de la forêt claire à *Isoberlinia* de Côte d'Ivoire, très faiblement peuplé du fait des conflits historiques au XIXème siècle et de la permanence de l'onchocercose. Aujourd'hui, les conditions politico-économiques et sanitaires continuent de l'emporter sur les données climatiques mais jouent en sens inverse depuis quelques années, déterminant un afflux de population dans cette réserve de terres. Clanet (Clanet *et al., 1983)* a calculé en effet que la colonisation agricole occupe aujourd'hui 49,7% des terres de la zone pastorale projetée entre Banfora, Bobo-Bioulasso et Sideradougou, ce qui compromet évidemment la situation de l'élevage dans cette région d'accueil des éleveurs peuls sahéliens.

Au total, le besoin de terres, joint à la compétition entre l'agriculture et un élevage qui souffre de la péjoration des conditions climatiques au Sahel, expliquent la dégradation du milieu végétal jusqu'aux confins méridionaux du Burkina Faso. L'effet protecteur du couvert végétal doit y être relativisé(1).

2°/- La région centre-sud, la plus vaste (35,6% du pays) correspond à une aire de pluviosité moyenne supérieure à 900mm. Son extension d'Ouest en Est (Fig. 4.1) n'est interrompue que dans le cou-

---

(1) *Autre exemple : sur les 2500 km² cartographiés par les chercheurs de l'IEMVT dans la région de Léo-Kassou (Toutain, 1974), à la frontière du Ghana, nous avons calculé que les savanes boisées à Isoberlinia doka ne représentent que 3,5% de la superficie totale.*

loir de Tenkodogo-Zabré fortement peuplé (densité supérieure à 50 habitants/km^2) et où l'occupation du sol est supérieure à 30%.

L'évolution de l'occupation de l'espace de part et d'autre du cours inférieur de la Volta Blanche a été retracée par J.P. Hervouet (1978) (Fig. 4.2). Des raisons humaines (croissance démographique, interdiction d'abattage du caïlcédrat *Kaya senegalensis*, dissociation des fonctions d'éleveurs et d'agriculteurs) et techniques (recours à des outils nouveaux) rendent compte d'un changement de comportement de la société bissa depuis la conquête coloniale et l'abandon des pratiques culturales intensives au profit d'une agriculture vivrière extensive. Les sols sont rendus doublement vulnérables par cette "consommation" de l'écran végétal et aussi par les modifications floristiques : les parcs à *Acacia albida*, dont l'intérêt agronomique a été bien souligné, étant détruits autour des villages tandis qu'en brousse sont conservés les nérés *(Parkia biglobosa)* et les karités *(Butyrospermum paradoxum)*(1).

Pour toutes ces raisons, ces terroirs bissa s'apparentent déjà à ceux de la région centre.

3°/- La région centre (30,4% du territoire), dont la limite sud suit en grande partie le 12ème parallèle, enregistre une pluviosité moyenne de l'ordre de 700 à 900mm. L'espèce la plus fréquente (53 à 67%)(2) y est encore *Butyrospermum paradoxum*, le karité ou "arbre à beurre", protégé pour ses fruits, comme le néré. Comme l'écrit P. Pélissier (1980) "Le karité tire partie des défrichements pour s'étoffer et se multiplier". Il s'identifie véritablement à ces campagnes centre-soudaniennes mossi, densément peuplées, où l'élevage n'est pas intégré, mais où le pouvoir politique stable a donné la durée nécessaire à la création du parc. Le paysage est en effet celui d'une savane-parc arborée qui inclut, en dehors du domaine cultivé, un tapis graminéen en touffes. Ce dernier, de grande taille à la saison des pluies, assure alors une couverture quasi continue du sol dont le rôle sera précisé à grande échelle.

---

(1) *Désormais nommés Vitellaria paradoxa (Geerling, 1982).*
(2) *Les fréquences indiquées sont des intervalles de confiance à 95% de probabilité (Terrible, 1978, p. 19).*

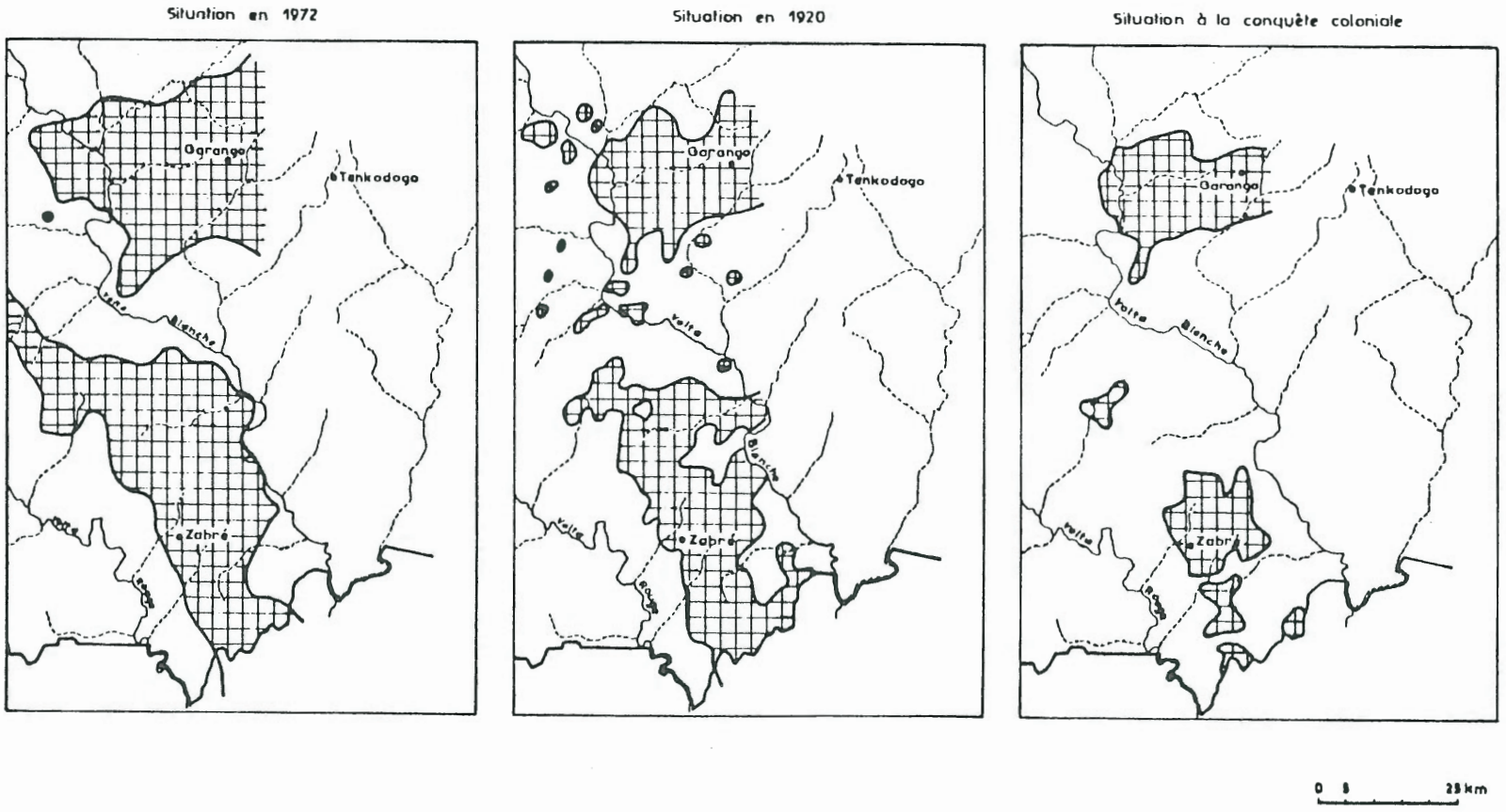


Fig 4.2 : Evolution de l'occupation de l'espace entre Volta Rouge et Volta Blanche en pays Bissa. (*in Hervouet, 1978, p. 182*).

Parmi les ligneux, le néré cède désormais la seconde place (33 à 47% de fréquence contre 52 à 66% dans le centre-sud) à des espèces plus basses : *Combretum micranthum* (43 à 57%), *Guiera senegalensis* (38 à 52%) ou même *Balanites aegyptiaca*, associées dans des savanes arbustives, annonciatrices des paysages sahéliens.

4°/- La zone centre-nord (20,1% du territoire) : sa limite sud, orientée ouest - nord-ouest, est - sud-est, coupe le 13ème parallèle mais suit approximativement l'isohyète 700mm. Les formations herbeuses et claires sont majoritaires avec une strate arborée ou arbustive, où les espèces les plus fréquentes sont *Balanites aegyptiaca* (60 à 70%), *Combretum micranthum* (52 à 68%), *Guiera senegalensis* 47 à 63%), *Piliostigma reticulatum* 42 à 58%). Les formations ligneuses hautes sont plus rares, en secteurs non dégradés ou en "galeries" avec *Anogeissus leiocarpus*.

C'est ce paysage de savane arbustive qui prédomine, par exemple au Yatenga, avec 45% de la superficie régionale (J.Y. Marchal, 1983). Le cortège des ligneux précédemment cités, auxquels on peut encore ajouter *Acacia macrostachya*, *Acacia seyal*, dominent une strate herbacée, de faible hauteur, discontinue, comprenant des espèces vivaces : *Loudetia togoensis*, *Aristida longiflora*, *Andropogon gayanus*. Savane arborée et savane-parc, encore étroitement associées sur les bas de pente et les bas-fonds dans la partie méridionale du Yatenga, ne représentent plus que 36% de la superficie totale. Dans cette province fortement peuplée (25% de la surface a plus de 50 hab./km^2) et où les taux d'occupation du sol supérieurs à 25% représentent 53% de l'espace (J.Y. Marchal, 1983), la transition se fait de manière rapide vers les paysages proprement sahéliens de la zone nord.

5°/- La zone nord : sa limite méridionale suit grossièrement le 14ème parallèle. Ce faisant, elle coupe l'isohyète 600mm à l'ouest tandis qu'elle rejoint l'isohyète 500mm à l'est du pays.

La première place est occupée désormais par des formations herbeuses et claires, souvent dénommées steppes, steppes arbustives

ou pseudo-steppes avec un tapis herbacé saisonnier et discontinu à base de *Loudetia togoensis*, *Pennisetum* sp., *Aristida adsencionis*, *Andropogon pulchelum*. Les espèces ligneuses les plus fréquentes sont *Balanites aegyptiaca* (61 à 89%), *Acacia raddiana* (32 à 64%), *Guiera senegalensis*, *Acacia seyal*, *Maerua crassifolia*.

En résumé, la figure 4.1 montre bien la distribution zonale des complexes herbacés-ligneux, parmi lesquels prédominent des formations à couvert peu fermé. Les modifications essentiellement latitudinales de la physionomie de la strate ligneuse en particulier font largement écho aux transitions climatiques perçues du sud au nord du pays. Les couverts les plus denses et les plus hauts correspondent aux régions méridionales les plus arrosées. Vers le nord, les strates arborescentes s'amenuisent ; les individus s'espacent, cèdent la place aux arbustes puis aux épineux ; le tapis herbacé s'appauvrit (M. Marchal, 1983). Cette réduction de l'appareil végétatif aérien en hauteur et en densité implique une vulnérabilité croissante des sols, du sud au nord du pays, vis-à-vis des agents d'érosion atmosphériques. Toutefois, il faut se garder d'oublier que les peuplements ligneux, pris isolément, sont dans leur très grande majorité, quelle que soit la latitude, des peuplements ouverts.

Cette distribution zonale de la végétation ligneuse peut donc suffire à ralentir vers le Sud et même à annihiler l'action des vents de saison sèche originaires du Nord-Est. En revanche, elle ne constitue pas, même dans les régions méridionales, un écran toujours suffisamment efficace pour limiter l'agressivité et l'impact des précipitations, notamment lors des orages locaux.

Ce schéma zonal se retrouve sur le plan floristique, quoique de manière moins tranchée. Les représentants de certaines familles sont en effet ubiquistes. C'est le cas des Combrétacées avec principalement les genres *Combretum*, *Anogeissus*, *Guiera*, dont les caractères écologiques peuvent varier toutefois dans une large mesure.

La zonalité est perturbée en effet par de nombreux facteurs qui interfèrent avec les précipitations moyennes. L'un est d'ailleurs

toujours de nature climatique : la tendance actuelle à la sécheresse. Les autres sont l'alimentation en eau du sol et les influences anthropiques.

Concernant les actions de l'homme, nous avons vu, à travers quelques exemples précis, qu'elles correspondent à une extension des terroirs de cultures, liée à une pression démographique mais aussi à des conditions historiques, techniques, économiques, parfois sanitaires nouvelles. Cette extension peut se faire suivant des directions privilégiées, celles des vallées des Voltas par exemple, dans un cadre politico-économique bien défini, ou bien de manière plus spontanée le long des routes principales qui conduisent du plateau mossi vers les ethnies voisines (Pays dagari, gourounsi, bobo). Dans ce cas, les techniques nouvelles d'exploitation se traduisent, non pas par une disparition du couvert arboré, mais une diminution de sa densité et son appauvrissement par sélection des seules espèces classées utiles *(Butyrospermum paradoxum, Parkia biglobosa)*.

Bien souvent, la sécheresse persistante se surimpose à ces nombreux défrichements, aux jachères écourtées, pour rendre compte d'un recul des espèces "zonales", dont les reconquêtes sont de plus en plus difficiles. Les individus nouveaux, plus bas, souvent épineux, n'ont plus seulement un caractère pionnier. Ils s'installent définitivement, semble-t-il. Nous le vérifierons, à grande échelle, sur des stations précises.

Cette évolution est bien connue de tous mais c'est sur la part respective de l'homme et de la sécheresse dans ce processus de dégradation du milieu naturel que porte le débat. En fait, ces contraintes, à l'évidence, se conjuguent à l'échelle du territoire. C'est seulement en détaillant l'examen, jusqu'au niveau de chacune des espèces, que l'on peut espérer situer ces actions l'une par rapport à l'autre. M. Terrible (1978) nous livre en tout cas quelques exemples probants :

- la mort de nombreux baobabs *(Adansonia digitata)* dans le nord, qui est la conséquence évidente du manque d'eau ;

- celle de peuplements d'Acacia qui est, en revanche, sinon provoquée, du moins facilitée par l'ébranchement, en vue de donner un

complément vert d'alimentation pour le bétail. Des cas de régénération spontanée s'observent même après une suite d'années sèches. Les jeunes individus peuvent reconstituer les formations, s'ils ne sont pas broutés !

- d'autres exemples encore avec *Anogeissus leiocarpus* qui résiste bien au feu et à la sécheresse tandis qu'*Isoberlinia doka* est plus fragile.

Il est notable, souligne toutefois M. Terrible (1978), que la disparition d'*Isoberlinia* est surtout le résultat de l'action humaine car il se maintient partout où cette pression est moins vive, en particulier sur les terrains impropres aux cultures.

La répartition des types de couverts à l'échelle du pays comme à l'intérieur de chacune des unités précédemment décrites dépend enfin des conditions pédologiques ou d'alimentation en eau du sol.

Les formations azonales les plus remarquables sont représentées par les galeries forestières le long des axes d'écoulement concentré, pérenne (Volta Noire) ou beaucoup plus fréquemment temporaire. Ces formations ripicoles, dans lesquelles dominent *Mitragyna inermis* et *Berlinia grandiflora*, exercent un rôle protecteur non négligeable, malgré leur étroitesse à petite échelle. Par leur couvert relativement dense et fermé, elles limitent l'impact des précipitations, freinent le ruissellement transversal sur les convexités de bas de versant ; par leur enracinement, elles stabilisent les berges, exercent une rugosité accrue vis-à-vis de l'écoulement principal et freinent les actions de sapement (1). L'excès d'eau des plaines ou cuvettes inondables peut aussi expliquer l'occurrence de savanes herbeuses ou prairies pratiquement monospécifiques (Toutain, 1974).

Les conditions pédologiques peuvent inversement imposer un déficit en eau et ainsi un type de couvert (savanes herbeuses à *Loude-*

---

(1) *La destruction de ces galeries est d'autant plus alarmante que leur régénération spontanée est inexistante et qu'il s'agit d'un phénomène général, mis en évidence par Terrible (1982). Leur longueur a diminué en moyenne des 2/3 entre 1952-56 et 1975 (3,5 km/100 km²) sur quatre zones-témoins.*

tia togoensis sur les bowé cuirassés) ou expliquer la prédominance d'une espèce hors de son aire de distribution naturelle. C'est le cas de peuplements de *Balanites aegyptiaca* au nord de Pama (11°15'N - 00°42'E) (Terrible, 1978) ou des formations arbustives lâches, à tapis graminéen très pauvre, qui dominent à l'ouest du pays sur les affleurements de grès nus.

Plus généralement, les formations végétales dites édaphiques apparaissent chaque fois que le sol constitue un milieu sélectif. Les propriétés contraignantes peuvent être physiques, concernant la réserve en eau utile (profondeur utile, teneurs en argile, richesse en sable, graviers) et la perméabilité. Elles peuvent être aussi chimiques (présence de calcaire, pH). Ce caractère sélectif du sol diminue toutefois du nord au sud du pays.

Ainsi, pour R. Boulet (1978), les steppes à épineux du domaine sahélien souvent fixées le long des axes d'écoulement cédent la place vers le sud, sur les mêmes sols lourds, compacts, calciques, à des savanes riches en Acacia. Mais au-delà de 900mm, cette formation végétale disparaît et "la végétation des sols argileux, calciques, ne se distingue plus que par son tapis graminéen neutrophile et par une plus grande abondance d'*Acacia gourmaensis*". Pour le même auteur, les bushs, formations buissonnantes denses, sont associés aux sols gravillonnaires sur cuirasse, au nord de l'isohyète 700m. Au-dessus de cette valeur, la présence d'une cuirasse influe de moins en moins sur la physionomie de la végétation, mais on note une plus grande abondance de certaines espèces telles que *gardenia*, *Combretum*, *Acacia macrostachya*. Nous le vérifions parfaitement à grande échelle, dans le cadre du petit bassin-versant d'Imiga.

C'est aussi à l'échelle du versant que peut être mise en évidence l'influence de la position topographique sur le sol lui-même et sur l'alimentation en eau des plantes. La répartition des types de couverts doit donc être examinée également au niveau de ces unités plus restreintes.

4.2 A GRANDE ECHELLE : UNE MOSAIQUE DE FORMATIONS LIGNEUSES ET HERBACEES, JUXTAPOSEES ET ETAGEES.

Trois exemples pris aux différentes latitudes et échelles spatiales, du grand bassin versant à la parcelle expérimentale, permettent de préciser davantage le rôle complexe d'écran joué par la végétation vis-à-vis des agents d'érosion.

4.2.1 : Le grand bassin versant de la mare d'Oursi (zone sahélienne).

Le travail des chercheurs du C.T.F.T. et de l'I.E.M.V.T. (Piot *et al.*, 1980) concerne la région de la mare d'Oursi, située entre les parallèles 14°30' et 14°50' Nord. Nous sommes ici en présence d'une steppe xérophile, à population arbustive très irrégulièrement répartie. Il s'agit de la marge sub-sahélienne de notre domaine d'étude, mais cet exemple mérite d'être retenu pour plusieurs raisons. D'une part, il constitue l'un des rares cas d'évaluation de la biomasse foliaire au Burkina Faso. D'autre part, cette étude a été réalisée partiellement en avril, période critique pour les herbivores domestiques mais aussi sur le plan morphogénique. Enfin, le degré de protection du sol peut être apprécié de manière différenciée, grâce à la mise en évidence de comportements variables entre espèces ligneuses et aussi entre unités morpho-pédologiques.

La production foliaire maximale de saison des pluies (juillet-août) est résumée dans le tableau ci-dessous.

Formations végétales	Surface (ha)	Biomasse foliaire (KG-MS)	
		à l'ha	Totale
Dunes	11.312	30	339.360
Glacis	20.863	40	834.520
Bas-fonds	4.825	225*	1.085.620
	37.000		2.259.500

Tableau 4.2 : Biomasse foliaire produite au "standing-crop" dans la région de la mare d'Oursi (* valeur moyenne/ha) (*in* Piot *et al.*,1980).

La masse végétale est de 2260 tonnes de matière sèche. On constate que 48% de la production sont assurés par les bas-fonds, qui n'occupent pourtant que 13% de la surface de la zone. Le reste est fourni par les glacis (37%) et les dunes (15%).

Le recouvrement de la strate ligneuse dans les bas-fonds peut atteindre 70 à 80%, avec principalement *Combretum aculeatum*, *Balanites aegyptiaca* et *Acacia seyal* contre 5 à 10% sur les autres unités.

La distribution des herbacées renforce ces inégalités. Le tapis herbacé est en effet discontinu sur les glacis (touffes de *Schoenefeldia gracilis* à recouvrement de 25 à 40%) ou sur les dunes *(Aristida mutabilis, Schoenefeldia gracilis, Cenchrus biflorus)* tandis qu'il est dense (80 à 100%) dans les talwegs et les dépressions.

A partir d'octobre, la biomasse va décroître pour atteindre, fin janvier-début février, son niveau le plus bas (565 tonnes). C'est justement le moment où, comme on l'a vu, les vents passés horaires efficaces (> 5 m/s) sont les plus fréquents (Fig. 2.2). La déflation éolienne est évidemment facilitée. Cette diminution de plus de 70% de la biomasse par rapport à la fin de saison des pluies est due pour 1/5 à une consommation directe par les animaux !

Enfin, les mesures faites en avril (1100 tonnes) montrent que la production de matière végétale double pratiquement en trois mois. En fait, l'année 1978, globalement déficitaire (380mm), a été caractérisée aussi par une remontée du degré hygrométrique de l'air dès le mois de mars ainsi que par des pluies précoces. Ce "redémarrage" de la production foliaire en fonction de l'hygrométrie est à souligner dans notre perspective de travail et peut d'ailleurs être précisé en fonction des essences.

Ainsi, la biomasse foliaire, en avril 1978, de *Balanites aegyptiaca*, comme celle de *Guiera senegalensis*, représente environ 35% de la biomasse maximale relevée de juillet à octobre. Parmi toutes les espèces étudiées, *Combretum aculeatum* est celle qui produit des feuilles *le plus précocement* (75% de la biomasse foliaire du "standing-crop" en

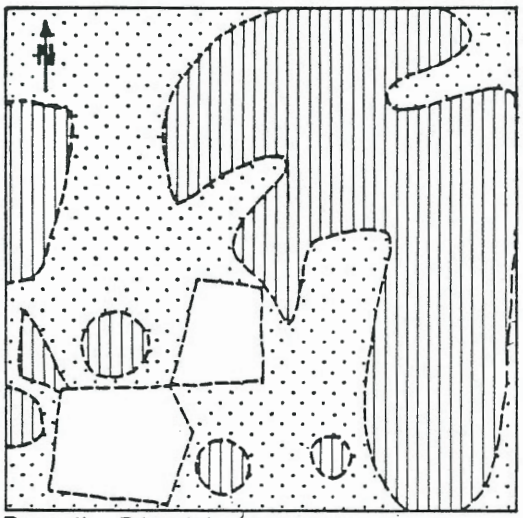
avril). En revanche, pour *Acacia seyal*, quelques individus seulement ont débourré à la mi-mai ; la production de feuilles n'est effective qu'à partir de la fin juin malgré les conditions hygrométriques favorables.

Les données floristiques sont donc à prendre en considération. Elles permettent même de nuancer l'importance des caractères physionomiques. Dans l'exemple précédent, l'arbre (l'Acacia) a une aptitude antiérosive qui n'est pas supérieure à celle des fourrés ou buissons souvent touffus de *Boscia*, *Guiera senegalensis* ou *Grewia bicolor*. L'effet d'écran joué par de nombreuses essences, les *Acacia* notamment, est limité. Ce ne sont que des squelettes d'arbres durant quelques mois tandis que les *Boscia*, dans le même contexte, restent feuillés toute l'année (Monnier, 1981).

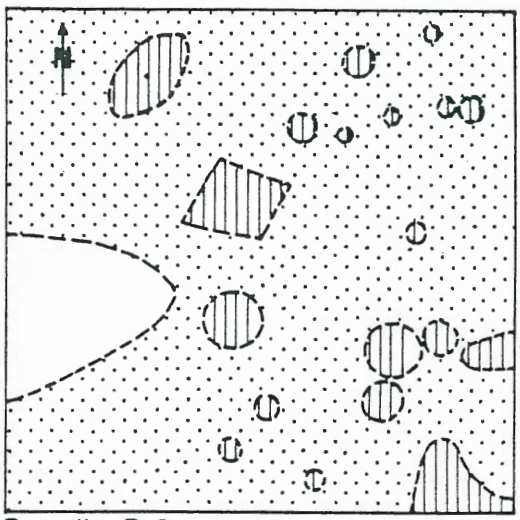
Ces problèmes de transferts d'humidité peu apparents se retrouvent évidemment au coeur des savanes. L'expérience nous a montré que la feuillaison de *Butyrospermum parkii* (karités) dépend largement de l'état hygrométrique de l'air plus que des pluies elles-mêmes. Le parc à karités bénéficie ainsi d'une protection relativement accrue en début de saison des pluies. Inversement, le retour à une phase sèche accusée, durant juin ou juillet, peut se traduire par un flétrissement des jeunes feuilles. C'est ce que J. Bougère (1976) a bien observé sur les collines de Similtanga, près de Kaya. Au début de juillet 1974, des *Combretum micranthum* ont alors perdu leurs feuilles et les *Gardenia* sp. ont vu leurs bourgeons sécher, tandis que les graminées elles-mêmes flétrissaient.

4.2.2 : Le petit bassin versant d'Imiga (zone soudanienne). (Photo 18).

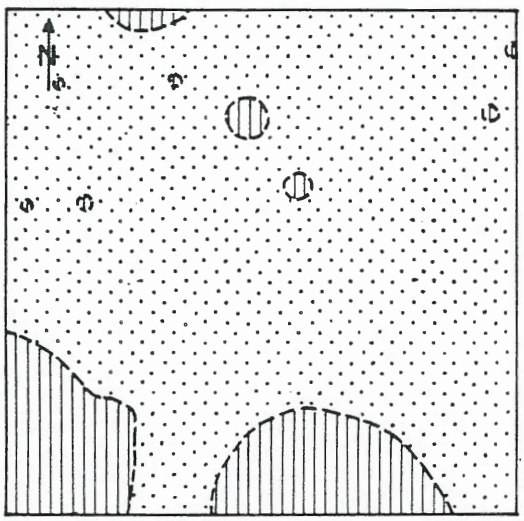
Au coeur du domaine soudanien, le petit bassin versant (12 km^2) d'Imiga (12°20' N, 0°41'W) permet d'illustrer, à plus grande échelle, la juxtaposition, sinon l'intrication des formations végétales de savanes. La cartographie (Fig. 4.4) de l'ensemble du paysage végétal a été précédée par l'examen détaillé de cinq placeaux-tests ayant permis de se familiariser avec les taux de recouvrement (Fig. 4.3). Le bassin versant a ensuite été longuement reconnu à pied, en avril et mai 1984, et les



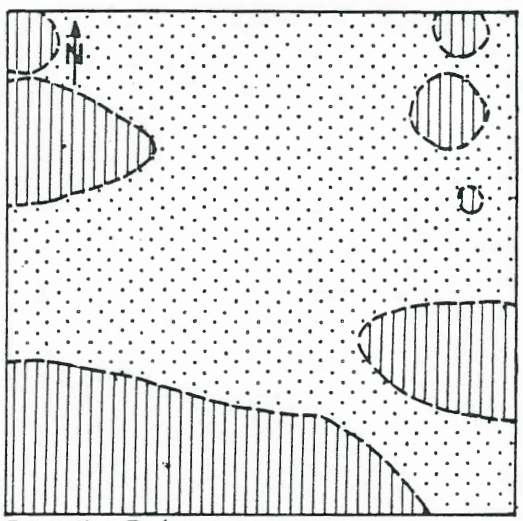
Parcelle P1 (1) 46,6 %
(2) 44,8 %
(3) 8,6 %



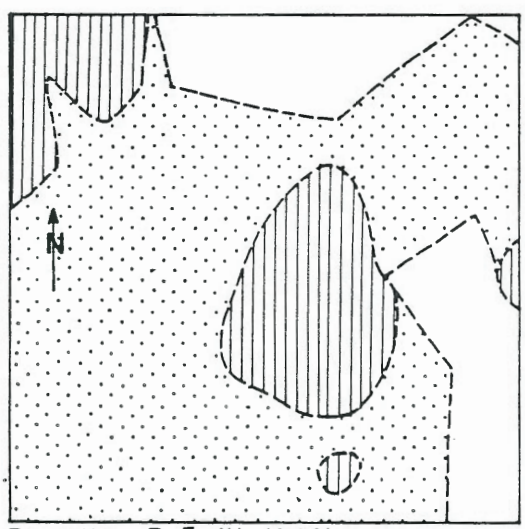
Parcelle P 2 (1) 10,2 %
(2) 82,5 %
(3) 7,3 %



Parcelle P 3 (1) 16,3 %
(2) 83,7 %



Parcelle P 4 (1) 35,9 %
(2) 64,1 %



Parcelle P 5 (1) 19,9 %
(2) 61,8 %
(3) 18,3 %

LEGENDE

(1) Zone à couvert arbustif ou arboré

(2) Zone à graminées

(3) Zone nue

Echelle : 0 2 4 6 8m

Les parcelles sont distantes de 200 mètres, à partir de Pg 2, suivant une direction NE-SW

Fig.4.3 : Taux de recouvrement sur les parcelles-témoins du Bassin BV2.

observations reportées sur un document au 1/10 000 préalablement établi(1).

Nous avons été amené à distinguer sept types de paysages, dont cinq s'identifient à des formations végétales naturelles ; les deux dernières correspondant aux champs cultivés (avec ou sans parc à karités) ou aux plaques de sols nus (Fig. 4.4 et carte 1). Leurs pourcentages respectifs sont regroupés dans le tableau ci-dessous :

COUVERT VEGETAL	BV_1 (en %)	BV_2 (en %)
- Galerie forestière	4,3%	6,4%
- Savane arbustive, localement arborée, dense (Taux de recouvrement arbustif > 20%)	15,9%	26 %
- Savane arbustive peu dense (Taux compris entre 10 et 20%)	17,2%	30,3%
- Savane arbustive très peu dense (Taux < 10%)	25,3%	14,6%
- Savane herbeuse	1,8%	2,6%
- Champs de Mil	25,4%	8,6%
- Sols nus (Plaques de ruissellement très intense)	10,2%	11,5%

Tableau 4.3 : Les types de recouvrements végétaux sur le bassin versant d'Imiga (BV_1: bassin versant total ; BV_2: sous-bassin en amont de la station de jaugeages S2).

La moyenne annuelle pluviométrique, enregistrée sur 27 années à Zorgho, à 10 kilomètres de distance, est de 808mm. Mais le climat n'est évidemment pas seul en cause dans l'organisation de paysages aussi différenciés et rapprochés les uns des autres. Les conditions pédologiques et/ou les actions anthropiques représentent la "clef" explicative essentielle à cette échelle. Nous le vérifions aisément par l'examen de quelques-unes des unités précédentes :

---

(1) *Ce document a été dressé grâce au concours de la cellule des topographes de l'HER sous la conduite de J. Reeb. Les lignes de niveau ont été dessinées par photogrammétrie à l'IGHV, à Ouagadougou.*

* Les galeries forestières, qui se distinguent davantage par la hauteur des ligneux que par leur densité, sont étroitement circonscrites aux bas-fonds, jusqu'en tête d'interfluves, principalement dans la moitié sud-orientale du bassin. Ces unités bénéficient d'une alimentation en eau prolongée dans le temps, au-delà des journées de précipitations, sous la forme d'un écoulement hypodermique, probablement enrichi transversalement beaucoup plus que par infiltration directe. Cet écoulement est bien visible sur les coupes naturelles des ravines, au lendemain de forts ruissellements.

A plus grande profondeur, au moins en aval du bassin, une nappe phréatique permanente prend naissance ; elle approvisionne jusqu'en fin de saison sèche le puits principal du village d'Imiga(1).

Ainsi, à travers des sols gris-brun, plus ou moins épais mais non indurés, les ligneux peuvent puiser là plus durablement leurs ressources en eau (Raunet, 1985 a).

* Les savanes herbeuses, situées sur le versant, au-delà de l'auréole des champs permanents, traduisent comme ces derniers la marque de l'homme sur le paysage végétal. Elles constituent en effet la première forme de reconquête, par la végétation naturelle, d'anciens champs de brousse, retrouvés grâce à l'examen des photographies aériennes de 1979 (Photo 13).

* Quant aux savanes arbustives très peu denses ou peu denses, dont les taux de recouvrement sont respectivement inférieurs à 10% ou compris entre 10 et 20%, elles constituent des jachères plus anciennes, de 10 ans d'âge ou plus. Le constat le plus saisissant est au total celui d'une *densification croissante de ces formations vers l'amont du bassin*, surtout au sud-est où elles représentent près des deux-tiers de la superficie du sous-bassin BV_2 (62,7%) contre un peu plus du tiers seulement sur l'ensemble (37,4%) (Tableau 4.3). La corrélation avec la carte des contraintes (Fig. 5.5) nous montre un lien étroit avec les sols ferrugineux à cuirasse sub-affleurante.

---

(1) *Ce puits est situé à trois cents mètres environ en aval de S1, exutoire de notre bassin.*

Cela ne signifie pas pour autant qu'il s'agisse de formations originelles. Plusieurs éléments nous incitent à penser que cette partie amont du bassin versant a été anciennement occupée (Fig. 4.4.). Ce sont les ruines d'anciennes cases, les restes de fours de forgerons, quelques aménagements antiérosifs élémentaires (cordons de pierres), dont l'enquête orale nous apprend qu'ils pourraient avoir 50 ans d'âge et qui traduisent, semble-t-il, *la perception d'une dynamique érosive dès cette époque.*

La mise en culture d'horizons superficiels peu épais aurait abouti à l'affleurement des carapaces ferrugineuses. Jointe à la pression démographique, à la difficulté d'approvisionnement en eau sur ces interfluves, cette dégradation aurait alors conduit à *un déplacement de la population vers l'aval*, où l'on retrouve aujourd'hui la totalité des cases et les champs permanents, le plus souvent sous parc à karités (Fig. 4.4). *Ce déséquilibre du peuplement au "profit" des bas de versants* a probablement été renforcé à une date plus récente par l'implantation des puits à l'aval des bas-fonds, par l'acquisition d'outils de coupe permettant l'extension des champs jusque dans les galeries elles-mêmes, par les projets d'aménagements rizicoles ou maraîchers. Le recensement de population, opéré à la fin du mois de juillet 1983 sur cette unité hydrologique, nous donne l'occasion de préciser l'extraordinaire pression démographique qui caractérise ce milieu.

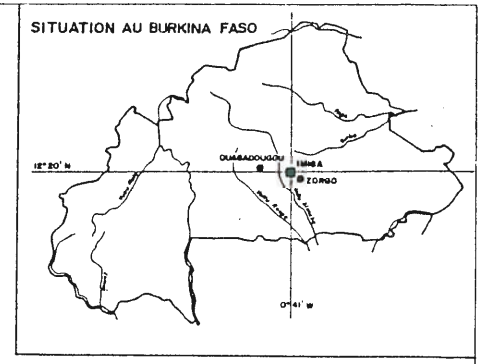
PRESENTS			EMIGRES				
Hommes	Femmes	Enfants	Hommes	Femmes	Enfants	Saisonniers	Annuels
78	116	204	67	43	87	71	126
398			197			197	

Tableau 4.4 : Recensement de population à Imiga (juillet 1983).

La population totale est d'au moins 400 personnes réparties en 56 concessions. S'y ajoutent épisodiquement 70 émigrés saisonniers, plus éventuellement une partie des 130 émigrés annuels. La densité de population par rapport à l'ensemble du bassin est donc de l'ordre de 35 à 40 habitants au km² mais de *130 à 150 habitants au km² par rapport aux seules terres cultivées* et pour ainsi dire cultivables.

VEGETATION ET OCCUPATION DU SOL

Bassin-versant d' IMIGA



LEGENDE

- Galeries forestières
- Savane arbustive dense localement arborée (Taux de recouvrement > 20%).
- Savane arbustive peu dense (Taux de recouvrement compris entre 10 et 20%).
- Savane arbustive tres peu dense (Taux de recouvrement < 10%)
- Savane herbeuse
- Culture de mil localement sous parc à karité
- Sols nus
- Jachères trés anciennes
- Jachères anciennes
- Jacheres recentes (Champs en 1979).
- Champs en 1984
- Terrains non cultivés
- Concession mossi
- Campement peul
- Témoins d'ancienne occupation.

S1 et S2 : Exutoires des bassins_versants

------ : Limite du sous_bassin BV 2

P5 : Parcelle_témoin

: Courbe de niveau

0 200 500m.

Fig. 4.4

Il est hautement significatif de constater qu'entre 1979 et 1984, il n'y a qu'1,8% des terres qui aient été mises en jachère. Malgré cela, la pression demeure très forte et l'émigration le seul remède économique possible.

En résumé, il existe une *zonation* des formations végétales à l'échelle du bassin versant. Celle-ci répond à une occupation particulière de l'espace par les hommes, elle-même liée au contraintes pédologiques.

Dans cette zonation, il n'est pas jusqu'aux plaques de sols nus, sur le genèse desquelles nous reviendrons, qui ne se placent en position particulière, sur les convexités de bas de versant le plus souvent, à proximité des bas-fonds.

L'examen détaillé des cinq placeaux de 225m^2 fournit d'autres renseignements sur la dynamique de ce paysage végétal. Ces cinq parcelles sont distantes de 200 mètres à partir du pluviographe Pg2 (Fig. 4.4.) suivant une direction NE-SW. Les parcelles 1 et 5 sont situées sur des sols ferrugineux à cuirasse localement affleurante et constituant un ressaut au-dessus d'un bas-fond voisin ; celles numérotées 2 et 3 sont dans l'interfluve sur des sols ferrugineux à recouvrement sableux et gravillonnaire de faible épaisseur tandis que le placeau n° 4 est au coeur d'un bas-fond.

De cette étude (Fig. 4.3), il ressort tout d'abord que *la strate herbacée*, peu prise en compte jusque-là, *représente en fait l'essentiel du recouvrement* (45% au moins et jusqu'à 84% de la surperficie d'une parcelle-témoin). Dans les talwegs eux-mêmes, la couverture arborée n'est que de 36% contre 64% pour les herbacées. La place des arbustes sur les interfluves n'est renforcée qu'à proximité du talweg, entre les blocs de cuirasse démantelée (parcelles 1 et 5) mais les plaques de sols nus également tiennent là une bonne place (8 et 18%).

Les déterminations floristiques complètes, le nombre d'individus par essence, leurs tailles extrêmes et moyennes sont regroupées en an-

nexes (Tab. A.4.1 à A.4.5). Une partie de cette information est synthétisée dans le tableau suivant (Tableau 4.5). Le nombre d'individus d'un placeau à l'autre apparaît remarquablement constant sur l'interfluve (61 ou 62 en P1, P2, P3 et P5). Ce caractère, apparemment étonnant, est logique dans la mesure où notre transect est tracé dans une direction *grosso-modo* parallèle aux courbes de niveau et dans une seule des zones de végétation précédemment définies (Fig. 4.4).

La strate ligneuse est très basse, en moyenne de 1m seulement de hauteur. Seuls, quelques très rares spécimens méritent le nom d'arbres, dans les bas-fonds (*Butyrospermum paradoxum* : 8,20m) ou sur leurs marges (*Anogeissus leiocarpus* : 7m en P1). Beaucoup de sujets ont inversement un port buissonnant : *Piliostigma thonningii*, *Guiera senegalensis* en particulier(1). Si le nombre d'espèces(26) est relativement élevé, certaines d'entre elles sont toutefois particulièrement abondantes ; les cinq plus fréquentes (*Combretum ghasalense*, *Acacia macrostachya*, *Gardenia* sp., *Piliostigma thonningii* et *Acacia pennata*) regroupant plus de la moitié des individus (54,5%) .

La grande place des *Combretum* n'est pas pour surprendre : ce genre, facile à identifier avec ses fruits secs à quatre ou cinq ailes membraneuses, donne en effet un véritable "cachet" à ces savanes soudaniennes. Toutefois, l'espèce *Combretum ghasalense* atteint généralement cette fréquence à de plus hautes latitudes.

Ce constat joint aux précédents (dimension réduite des ligneux, importance des buissons, des épineux) tendrait à confirmer une dégradation pédo-climatique pour des raisons pluviométriques et anthropiques conjuguées.

---

(1) Comme sur le terroir de Zaongho, proche de Koupela et décrit par Lahuec (1980), on peut considérer que les arbres sont en fait plus nombreux à l'intérieur du parc cultivé en permanence que sur les jachères situées plus en amont.

Nombre d'individus Genres et espèces	Ensemble des 5 parcelles (275 arbres ou arbustes)	Parcelles 1 et 5 Aval de versant - cuirasse	Parcelles 2 et 3 Interfluves	Parcelle 4 Bas - fond
Combretum ghasalense	55 (20%)	4	47	4
Acacia macrostachya	28 (10,2%)	24	2	2
Gardenia sp.	25 (9,1%)	2	22	1
Piliostigma thonningii	22 (8%)		15	7
Acacia pennata	20 (7,2%)	7		13
Entada sp.	16	5	2	9
Acacia dudgeoni	15	3	2	10
Anogeissus leiocarpus	13	7		6
Sclerocarya birrea	11	9	2	
Cassia sieberiana	10	9	1	
Capparis sepiaria	7		1	
Butyrospermum sp.	6	1	4	1
Combretum micranthum	6	5	1	
Grewia sp.	6	5	1	
Ximenia americana	6		6	
Diospyros mespiliformis	5	5		
Guiera senegalensis	5		5	
Acacia seyal	4			4
Annona senegalensis	3		3	
Acacia gourmaensis	2	2		
Crossopteryx febrifuga	2	2		
Lannea acida	2	1	1	
Maerua sp.	2	2		
Tamarindus indica	2	2		
Maytenus senegalensis	1	1		
Ziziphus sp.	1		1	

Tableau 4.5 : La strate ligneuse sur les 5 placeaux du bassin versant d'Imiga.

4.2.3 : La parcelle expérimentale sous savane arbustive de Pô-Banon (zone sud-soudanienne) (Fig. 4.5).

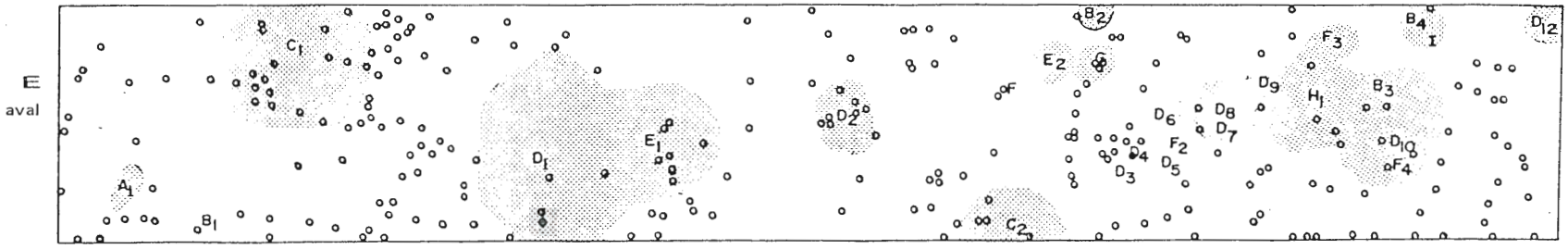
Les mêmes tendances se dessinent, semble-t-il, en domaine sud-soudanien à l'échelle d'une des parcelles expérimentales de Pô-Banon, où nous avons mesuré durant cinq années coefficients de ruissellement et érosion. Les données physionomiques et floristiques détaillées sont regroupées sur la figure 4.5 mais nous pouvons souligner ici les points suivants :

- cette jachère d'une dizaine d'années d'âge est située sur un sol ferrugineux dont la carapace, sub-affleurante à l'amont de la parcelle, est à 50-60 cm de profondeur à l'aval (Fig. 5.2). Elle bénéficie, à la date des relevés, d'une pluviosité moyenne de 970mm sur 37 années mais de 890mm sur les dix dernières années ;

- elle est, d'un point de vue physionomique, remarquablement comparable aux placeaux d'Imiga, totalement arbustive, avec une densité d'individus identique (28 pour 100m², soit 63 pour 225m²), une taille moyenne réduite quoique supérieure à celles enregistrées précédemment: 2,45m en 1978 (18 mesures) ou 2,27m en 1982 (26 mesures). On note, à ce propos, que dans 7 cas sur 17, pour lesquels la comparaison est strictement possible(1), la hauteur de l'arbuste diminue dans l'intervalle de 5 ans. Cela correspond à un ébranchement, ou à une coupe des arbustes dans cette parcelle qui n'a pas été mise en défens, ou encore au passage des feux de brousse. Dans les dix cas de croissance, celle-ci est de l'ordre de 30%. Le taux de recouvrement arbustif, calculé par la méthode des ombres portées au moment du passage du soleil au zénith (avril 1978) est de 28,3%. Toutefois, il faut tenir compte de la finesse du feuillage qui constitue "un voile plutôt qu'un écran" (Monnier, 1980), de la morphologie de la cime, étalée et assez ouverte *(Strychnos spinosa)* ou plus étroite et dense *(Anogeissus leiocarpus)*.

---

(1) *Dans le cas où l'arbuste n'a pas été identifié en 1978, il peut s'agir en 1982 de drageons ou de rejets de souche nombreux, dont la croissance a été rapide (Strychnos spinosa), mais peut-être aussi d'un oubli, lié en particulier à la petite taille.*



Genres et espèces		Hauteur (m) 1978	Hauteur (m) 1982	Surface couverte (m²) en 1978
A Combretum sp.				
	A_1	0,85	0,95	0,31
B Butyrospermum parkii				
	B_1	3,90	3,00	0
	B_2	2,10	2,00	0,35
	B_3		1,84	
	B_4		1,30	
C Anogeissus leiocarpus				
	C_1	2,40	1,60	5,59
	C_2	2,90	4,00	0,94
D Strychnos spinosa				
	D_1	3,75	4,00	6,88
	D_2	2,49	2,45	0,40
	D_3		1,84	
	D_4		1,80	
	D_5		2,50	
	D_6		1,80	
	D_7		1,55	
	D_8	0,80	1,45	1,27
	D_9		1,78	
	D_{10}	2,80	3,85	3,05
	D_{11}		2,68	
	D_{12}	2,70	0,60	0,42
E Combretum micranthum				
	E_1	4,00	4,50	3,45
	E_2	2,90	3,58	0,49
F Acacia gourmaensis				
	F_1	2,80	3,00	1,39
	F_2		1,30	
	F_3	1,53	0	
	F_4	2,40		0,52
G Ziziphus mucronata				
	G_1	2,90	1,50	0,42
H Gardenia erubescens				
	H_1	1,45	1,50	2,18
I Feretia apodanthera				
	I_1	1,30	2,85	0,68
o Graminées: Andropogon gayanus (287 pieds)		Taux de recouvrement arbustif		28,3 %

Fig. 4.5 : La parcelle P1 sous savane arbustive : examens floristique, physionomique et taux de recouvrement (Pô - Burkina Faso)

Cette dernière espèce est, du point de vue floristique, la seule à rappeler, par sa position sur des sols cuirassés d'interfluve, un pédoclimat plus humide. Mais l'on est frappé par la grande place des épineux avec *Strychnos spinosa*, essence la plus fréquente (43%), notamment en amont de la parcelle, mais aussi *Acacia gourmaensis* et *Ziziphus mucronata*.

La strate ligneuse nous paraît au total avoir un effet protecteur limité. Le recouvrement essentiel se place, du moins à partir du deuxième tiers de la saison des pluies (juillet), au niveau des herbacées, *d'autant qu'elles constituent deux écrans étagés*. L'écran le plus haut est constitué par *Andropogon gayanus*, graminée vivace poussant en touffes rapprochées (287 pieds sur 100m^2). Ces graminées atteignent deux mètres de hauteur en fin d'hivernage, cachant curieusement la plupart des arbustes ! Entre ces grosses touffes, on trouve soit un sol nu, rare ici, soit des herbes plus petites annuelles (*Tephrosia* sp., *Eragrostis* sp.). Comme le notait P. Birot (1959), elles n'apparaissent pas au voyageur car les feuilles des graminées principales se rejoignent à leur sommet. Elles n'en constituent pas moins un tapis serré en surface, dont le tissu racinaire peu profond est très dense et dont l'efficacité contre le ruissellement et plus encore l'érosion est très grande.

En résumé, il existe un *étagement de la végétation* en ce milieu de savane avec *trois niveaux d'interception*, dont l'efficacité doit être estimée proportionnelle à leur taux de recouvrement respectif beaucoup plus qu'à leur hauteur (Wischmeïer et Smith, 1978). Il faut bien convenir que, malgré leur importance morphodynamique, les herbacées de la savane restent méconnues. Les prises de vues aériennes, privilégiant la strate ligneuse, sont de peu de secours. Les déterminations floristiques, rendues difficiles une bonne partie de l'année par le dessèchement, le feu, le pâturage et le piétinement, restent incomplètes. Il faut pourtant nuancer la place des herbacées, en un lieu donné, du fait des variations inter et intrasaisonnières en espèces et en recouvrement. M. Terrible, après quatre ans d'observations précises près de Ouagadougou (1973), a mis en évidence ces changements, liés notam-

ment au passage ou non des feux de brousse (Tableau 4.6).

Date	Non brûlé			Brûlé		
	Sol nu	Couverture verte	Couverture sèche	Sol nu	Couverture verte	Couverture sèche
15/1	25	3	72	90	0	10
15/2	25	3	72	87	3	10
15/3	30	3	67	87	3	10
15/4	30	5	65	87	3	10
15/5	30	8	62	85	5	10
15/6	0	50	50	75	15	10
15/7	0	90	10	50	45	5
15/8	0	100	0	25	75	0
15/9	0	100	0	10	90	0

Tableau 4.6 : Evolution de la couverture du sol (en % de la surface) par *Andropogon gayanus* (graminée) non brûlé ou brûlé (environs de Ouagadougou) (*in* Terrible, 1973).

Les premières pluies attaquent le sol de façon évidemment très différente selon l'état de la couverture graminéenne. Si les feux de brousse ne sont pas passés, les chaumes brisées par le vent et les animaux forment un feutrage lâche entre 30 et 50cm du sol (Terrible, 1973). Cette couverture de matière sèche brise en grande partie l'énergie cinétique de l'averse. Si le sol a été brûlé, particulièrement par des feux tardifs, la couverture sèche est très réduite. La couverture verte ne s'installe que progressivement. Sur la parcelle P1 de Pô-Banon, les premières pluies ne sont interceptées, sur un quart de la surface, que par le voile des ligneux. Les graminées n'apparaissent pas, ou très peu, dans les intervalles, jusqu'en juin. A cette date, elles ne forment d'ailleurs qu'une couronne d'une dizaine de centimètres de hauteur au pied des arbustes. L'eau de pluie n'est pas canalisée par ces troncs minces et peu élevés mais l'humidité y est assurément conservée à l'ombre.

L'effet des feux de brousse a été précisément mis en évidence par comparaison de mesures de ruissellement et d'érosion sur cinq années d'expérimentation à Gonsé, à l'est de Ouagadougou (Roose, 1978). L'auteur montre qu'en cas de feux tardifs le ruissellement dé-

passe 9 à 16% des précipitations annuelles et jusqu'à 50 ou 73% des grosses averses, tandis que ces mêmes valeurs sont réduites à 2-3% et 8 ou 10% après les feux précoces et enfin 0,3% et 1% lors d'une protection intégrale. E. Roose souligne non seulement la disparition de la végétation herbacée en cas de feux mais aussi la réduction d'activité des termites et des vers de terre.

Avec cette pratique des feux (Photo 14), c'est déjà, bien évidemment, l'impact des actions anthropiques qui est souligné.

4.3 LE ROLE DE L'HOMME : DEFRICHEMENT ET MISE EN DEFENS.

L'impact de l'occupation humaine sur le paysage végétal a déjà été souligné à travers des exemples variés par leur situation géographique et leur échelle. La juxtaposition dans l'espace de ces différents paysages ne peut se comprendre en effet que par une prise en compte, la plus globale possible, des facteurs climatiques, pédologiques et anthropiques. D'autres estimations de l'action humaine, s'appuyant sur une comparaison des prises de vues à différentes dates, ont porté principalement sur les régions sahéliennes et sub-sahéliennes. La dégradation du milieu naturel, particulièrement alarmante dans ces contrées du fait de la sécheresse, était aussi la plus facilement repérable, y compris à l'échelle des clichés satellitaires (Terrible, 1980).

G. De Wispeleare et B. Toutain (1976) par exemple ont montré, au sud-est de la dune d'Oursi, que les surfaces cultivées, principalement localisées en bas de pente dunaire, ont augmenté de plus de 44% entre 1955 et 1975, soit de 2,2% par an en moyenne, chiffre très voisin de la croissance démographique dans ces régions. L'extension des secteurs très dégradés est considérable, passant de 7% à 32% de la surface des glacis en 20 ans.

A travers l'étude de la dune de Tin Ejar (14°42'N, 0°29'W) J. Bougère et G. Hugot (1979) illustrent le rôle du bétail et du piétinement comme facteur de dégradation des pâturages et d'apparition d'en-

tailles d'écoulement concentré.

Enfin, la région de Markoye (14°38'N - 0°04'W), représente un cas particulièrement intéressant. M. Ouedraogo (1984) a cartographié de manière détaillée (1/50 000) une zone de 230 km² à travers trois séries de prises de vues aériennes (Fig. A.4.1). Son étude met une nouvelle fois en évidence l'extension des champs de cultures, passant de 4% à 9% de la superficie totale entre 1955 et 1974 puis 7,1% en 1981. A partir des images Landsat, M.F. Courel (1984) examine, dans cette même région, le cas spécifique du périmètre du ranch de Markoye et enregistre l'évolution suivante :

Végétation \ Années	1973	1976
Arbres	5%	2%
Steppe arbustive dense	20%	11%
Steppe arbustive claire	42%	62%
Sols partiellement couverts	29%	26%
Sols nus	0%	0%

Tableau 4.7 : Evolution du couvert végétal dans le ranch de Markoye, à partir des images Landsat (*in* Courel, 1984, p. 358).

Ce constat est précieux puisqu'il permet théoriquement de distinguer, dans ce secteur protégé par une clôture, une dégradation imputable à la seule sécheresse. Cependant est-on tout à fait certain de l'inexistence d'agression extérieure dans ce centre ? M. Ouedraogo (1984) précise qu'il a été établi sans aucun dédommagement, ni aucune sensibilisation auprès des populations et que tout le monde s'accorde à reconnaître qu'il a été un échec. "Le seul intérêt, peut-être, de ce ranch est d'avoir montré aux pasteurs comment une mise en défens permet la protection des pâturages. Ils l'ont si bien compris que, maintenant, ils ne coupent la clôture pour faire paître leurs bêtes que lorsqu'ailleurs le bétail ne trouve plus rien à manger ! ...".

Ces lignes écrites par M. Ouedraogo (1984, p. 48) ne sauraient être plus claires !

L'exemple de jachère mise en défens depuis dix ans et étudiée par L. Bortoli (1984) dans la région de Sapone (12°07'N) à une trentaine de kilomètres au sud-ouest de Ouagadougou, est plus instructif. En comparant cette jachère à la savane environnante, l'auteur met en évidence les points suivants :

* La flore herbacée mise en défens est dominée par des graminées pérennes (Tab. A.4.8) alors que la savane alentour est dominée par des annuelles. Trois à cinq espèces contribuent à la production d'une biomasse de 7 à 8 tonnes à l'hectare(1) ; *Andropogon gayanus* en représentant à elle seule la moitié.

* Il n'y a pas dans le secteur enclos de buissons bas et couvrants (Tab. A.4.9) alors que ce type morphologique domine dans la savane régulièrement brûlée et pâturée. "Tout se passe comme si les buissons avaient été contraints à pousser en hauteur par une strate herbacée pérenne étouffante. D'une façon générale, la mise en défens semble avoir favorisé l'herbe plus que le bois". Si l'on veut produire du bois, conclut l'auteur, la mise en défens sans autre intervention est insuffisante à l'échelle d'une décennie.

Nous ajouterons que ces mises en défens, privilégiant la strate herbacée qui inhibe considérablement le ruissellement, seraient aussi en contradiction avec une politique de l'eau basée sur la multiplication de petits barrages.

---

(1) *Cette valeur est au moins le double de la capacité de production fourragère annuelle estimée par Toutain (1974) sur les différents types de savanes de la région de Léo-Kassou (1500 kg de M.S/ha en savane arbustive sur cuirasse à 4500 kg sur terrasses inondables).*

CONCLUSION.

Cette présentation des paysages végétaux du Burkina Faso permet de mieux saisir leur complexité, leur juxtaposition dans l'espace, leur dynamique interannuelle ou saisonnière.

A l'échelle du territoire, les modifications essentiellement latitudinales du couvert, tout du moins de sa strate ligneuse, font écho aux transitions climatiques perçues entre le 10ème et le 14ème parallèle. Cette distribution zonale de la végétation peut être reconnue à travers l'existence de cinq domaines phytogéographiques physionomiquement et floristiquement distincts. Un dénominateur commun subsiste cependant à travers une tendance constante à un amenuisement des espèces arborescentes, un espacement des individus, un appauvrissement du tapis herbacé du sud au nord du pays. Cette réduction de l'appareil végétal aérien en hauteur et en densité implique une vulnérabilité croissante des sols en direction du Sahel.

Les savanes sud-soudaniennes ne sont plus pour autant totalement préservées. La dynamique éolienne est certes contrariée par une strate ligneuse haute, même discontinue, mais dans ce cas l'effet d'écran n'est plus assuré vis-à-vis des pluies extrêmes des orages locaux. Cette réalité doit être d'autant mieux perçue qu'elle seule permet de comprendre le développement, dans un environnement apparemment stable, de crises morphogéniques en un lieu donné, mais aussi parfois à distance, plus en aval dans le cadre d'un bassin versant.

Le maintien d'une végétation climatique est en effet perturbé aujourd'hui par d'autres facteurs qui interfèrent avec les précipitations moyennes. L'un est toujours de nature climatique : la tendance actuelle à la sécheresse ; l'autre est d'origine anthropique. Ces deux données agissent de concert et leur part explicative respective dans ce constat de dégradation de la végétation reste difficile à préciser. L'influence de la sécheresse se marque probablement de manière plus spécifique vis-à-vis de certaines espèces, notamment arborées, aux limites-nord de leur aire d'extension ou bien sur des sites à fortes contraintes pédologiques.

En rendant plus difficile les reconquêtes des espèces "primaires" sur les zones défrichées, la sécheresse sert aussi de révélateur d'une action anthropique quasi générale et pas forcément toujours récente. A cet égard, l'exemple du petit bassin versant d'Imiga est significatif de la nécessité qui a prévalu de bonne heure pour cette population mossi, à forte croissance, de se déplacer des hauts de versants gravillonnaires, érodés, trop peu productifs vers les bas de pentes et les bas-fonds. Il en résulte aujourd'hui, dans ce cas, une quasi zonation altitudinale de la végétation à l'échelle d'un bassin versant : zonation originale, beaucoup plus en rapport avec les sols qu'avec le climat !

La plupart des formes économiques de mobilité de la population concourent aujourd'hui à une dégradation de la végétation, qu'il s'agisse de :

- mobilité pastorale, synonyme de déplacements de troupeaux, piétinement des touffes d'herbes et pulvérisation des horizons superficiels des sols, y compris dans le cadre d'un élevage contrôlé s'exerçant suivant des axes précis et autour des points "privilégiés" d'alimentation en eau ;

- mobilité agricole, propre à un système extensif qui multiplie les terroirs de culture, le désherbage et l'abattage des arbres ;

- mobilité commerçante de citadins, à la recherche d'une source d'énergie à la fois vitale et irremplaçable : le bois; ou bien de ruraux soucieux de vendre ce matériau pour arrondir de maigres budgets.

De tous ces facteurs, le plus décisif nous paraît être la mise en culture des champs de "brousse", non pas tant à cause de l'abattage des arbres, qui peuvent être d'ailleurs partiellement conservés (savanes-parcs), que de la disparition du tapis graminéen. L'efficacité de l'écran végétal est en effet proportionnelle aux différents taux de recouvrement et inversement proportionnelle à leur hauteur : les herbacées, fréquemment étagées sur deux niveaux, représentent donc le frein le plus efficace vis-à-vis des agents d'érosion atmosphériques.

Les données physionomiques et mêmes floristiques de la végétation doivent être ainsi appréhendées, dans une perspective dynamique, par tous les naturalistes qui se préoccupent d'interpréter en particulier l'écoulement des eaux et plus généralement l'érosion. Un descriptif détaillé est au moins nécessaire pour pouvoir comparer les résultats de mesures entre différentes unités hydrologiques de même taille (parcelles ou bassins-versants).

Dans la plupart des cas abordés jusqu'ici (à l'exception de celui de Gonsé), aucune corrélation n'a été établie toutefois entre l'évolution du couvert végétal et la morphogenèse. Ce lien sera mis en évidence, à travers deux autres exemples repris dans le second livre, à propos de la présentation des formes d'érosion.

Auparavant, il nous reste encore à souligner la spécificité des sols des milieux de savanes.

CHAPITRE V

LES SOLS DE SAVANE

A petite échelle, la distribution des sols comme celle de la végétation est un *phénomène zonal*, commandé une fois encore par le climat. Les cartes pédologiques générales, des atlas en particulier, traduisent relativement bien cette répartition latitudinale. Ainsi, en Afrique de l'Ouest, les sols ferrugineux et les vertisols de la savane succèdent-ils aux sols ferrallitiques du domaine forestier tandis qu'ils sont à leur tour bordés par les sols bruns sub-arides plus au nord.

Une fois encore, l'analyse peut et doit être conduite toutefois à deux échelles : au long d'un même versant, des associations plus ou moins complexes de sols, liés à la position topographique mais aussi à la roche mère, sont fréquemment mises en évidence. L'interprétation se complique encore dans la mesure où l'échelle de temps à prendre en compte est beaucoup plus longue que pour la couverture végétale. Les sols ne peuvent pas être partout considérés en équilibre avec les conditions actuelles du milieu. Ils constituent des témoins, beaucoup plus durables que le tapis végétal, des variations paléoclimatiques et leur examen doit faire une large place aux *héritages*.

Cette analyse complexe appartient principalement aux pédologues dont les cartographies détaillées (Leprun et Moreau, 1968 ; Boulet, 1968 ; Rieffel et Moreau, 1969 ; Kaloga, 1969 ; Boulet et Leprun, 1970) et les monographies (Boulet, 1978 ; Leprun, 1979 ; Pion, 1979 ; Kaloga, 1983 ; Roose, 1981) se sont multipliées depuis une quinzaine d'années.

Cet examen détaillé, au long de transects bien choisis, nécessitant le creusement de fosses pédologiques nombreuses et souvent pro-

fondes, n'a pu être réalisé, partiellement, que sur les deux sites expérimentaux de Pô-Banon et Imiga. Nous les présenterons après avoir rappelé les caractères généraux de ces sols de savane. A cette occasion, nous nous attacherons à souligner leur dynamique actuelle de surface, leur susceptibilité vis-à-vis à l'érosion, beaucoup plus que les modalités de leur genèse.

5.1 TYPOLOGIE DES SOLS.

5.1.1 : Rappel des caractères généraux.

Sept grands types de sols ont été distingués par les auteurs de l'étude pédologique de la Haute-Volta (Boulet *et al.*, 1970), auxquels nous empruntons l'essentiel de cette information générale.

Deux de ces types ne sont dominants qu'en milieu sahélien : ce sont les sols bruns subarides vertiques et les sols brun-rouge ferrugineux, peu lessivés, sur sables éoliens. Les autres classes sont beaucoup plus caractéristiques du domaine qui nous préoccupe : celui des savanes. Une exception : les sols ferrallitiques, probablement hérités, qui représentent toutefois 1% du territoire, principalement sur les grès du sud-ouest du pays (carte Ouest-Sud ; Boulet, 1976).

Les quatre familles essentielles par leur extension et/ou leurs potentialités agronomiques relatives sont ainsi : les sols hydromorphes ; les vertisols - sols bruns eutrophes - sols halomorphes ; les sols minéraux bruts et sols peu évolués ; les sols ferrugineux tropicaux (Fig. 5.1).

* *Les sols ferrugineux tropicaux* constituent la profonde originalité de ce domaine savanien. Leur extension y est largement prépondérante, du moins au sud du 13ème parallèle, comme le montre la carte ci-jointe. Ils sont caractérisés, rappelons-le, par un couple d'horizons éluvial-illuvial ; l'horizon d'accumulation est riche en sesquioxydes (fer et parfois manganèse) ainsi qu'en kaolinite qui est le minéral

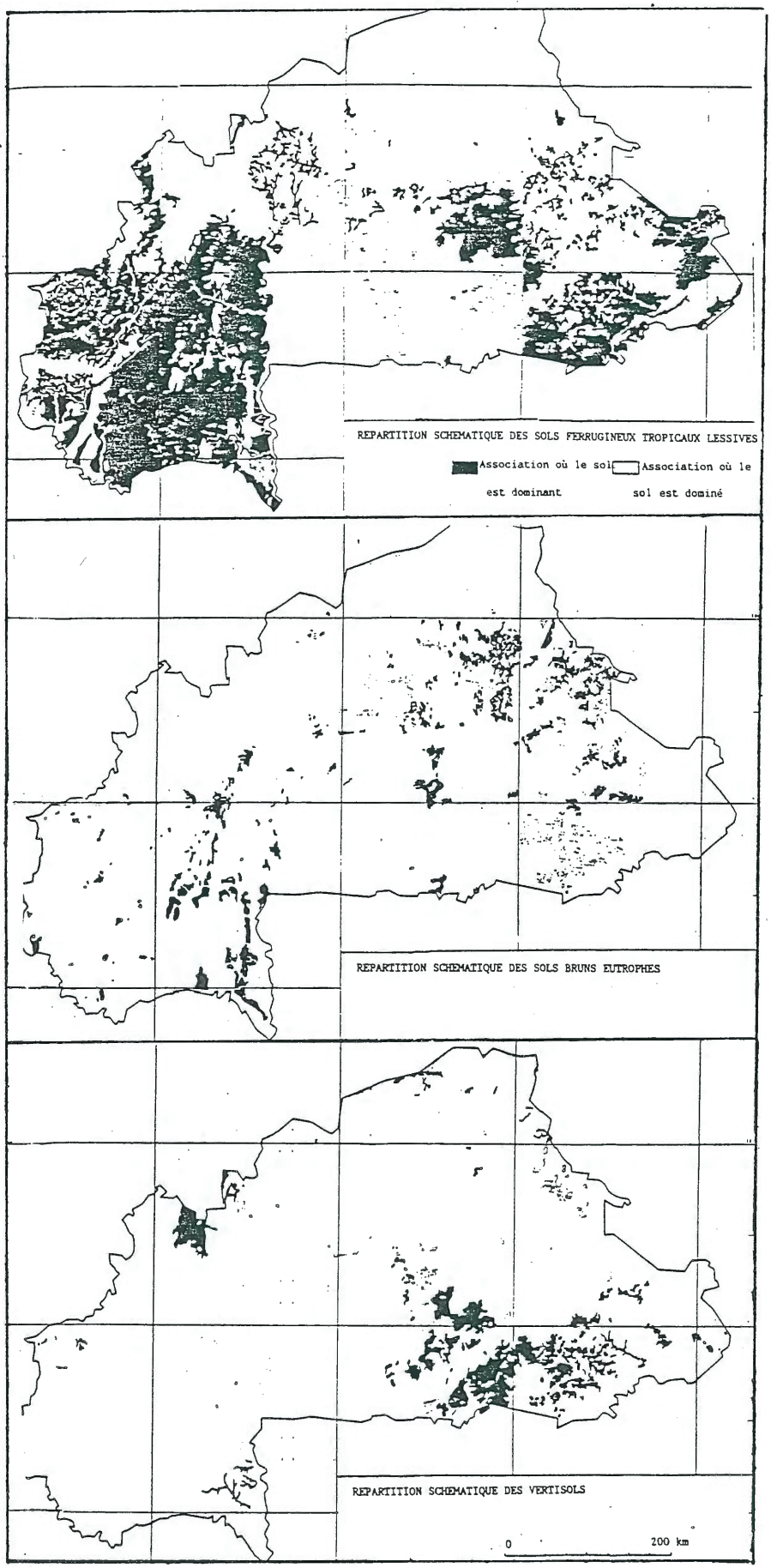


Fig. 5.1 : Répartition schématique des principaux types de sols en milieu de savanes, au Burkina Faso (*in* Boulet *et al.*, 1970).

argileux prépondérant tandis que l'alumine libre est absente. Les horizons A supérieurs, lessivés, appauvris, plus clairs, sont de texture souvent sableuse du fait d'un phénomène d'érosion sélective, au détriment des particules fines, sur lequel nous aurons à revenir. L'horizon A1 est fréquemment compacté, de structure massive, ce qui est déterminant vis-à-vis de l'infiltration. Au total, les caractères physiques de ces sols sont défavorables avec une épaisseur du sol exploitable trop faible, limitant la pénétration des racines ; un drainage interne qui peut être déficient en hivernage tandis que la rétention d'eau utile est toujours faible en saison sèche ; une susceptibilité vis-à-vis de l'érosion du fait d'une mauvaise stabilité structurale de surface, elle-même liée à la faiblesse des taux de matière organique, à la fréquence des limons et des sables fins.

A ces qualités physiques très médiocres, il faut ajouter le peu de richesses minérales (carences N, P ... parfois K, Ca, Mg). La lutte contre l'épuisement et l'érosion de ces terres suppose un travail du sol, même avec des outils traditionnels, visant à réduire le ruissellement et à améliorer la structure de surface. Le premier objectif peut être atteint grâce au billonnage cloisonné, technique préconisée par E. Roose en Haute-Volta dès 1971. Le facteur structural peut être amélioré par les apports de matière organique (enfouissement d'engrais verts ou mieux paillage) et, plus difficilement, grâce à des labours précoces, suffisamment profonds.

* *Les sols minéraux bruts et sols peu évolués*, définis par un profil (A)C, sont caractérisés par des facteurs physiques encore plus limitants que précédemment : faible à très faible épaisseur, rétention en eau extrêmement limitée. En revanche, la richesse chimique de la fraction fine peut être assez élevée sur les sols minéraux ou les sols peu évolués à faciès brun eutrophe par exemple. Ceci permet de comprendre que ces sols puissent être exploités traditionnellement sur des sommets de buttes cuirassées ou sur les flancs de collines birrimiennes, et pas forcément du fait d'une contrainte démographique excessive (chaînons birrimiens du sud-ouest).

* *Les vertisols, sols bruns eutrophes et sols halomorphes* sont caractérisés par une proportion plus ou moins importante de minéraux argileux gonflants, sur matériaux d'altération montmorillonitique. Les vertisols connaissent les alternances de gonflement et de retrait les plus prononcées et, par conséquent, une fissuration marquée qui a son influence sur les modalités de l'écoulement concentré dans les bas-fonds. Ces argiles noires ont une richesse minérale élevée qui n'exclut pas la nécessité d'une fumure équilibrée (carence en P. des sols vertiques) ; mais surtout, l'exploitation des vertisols topomorphes se heurte, dans ces contrées à faible mécanisation, à de difficiles problèmes du fait de l'adhérence aux engins, à l'état humide, et de l'effort de traction trop élevé à sec. Même les outils puissants, quand ils existent, n'y résistent que peu de temps, comme nous avons pu le constater dans la région de Pô ! Les sols bruns eutrophes, au travail plus aisé et aux meilleures caractéristiques structurales, sont plus intéressants du point de vue agronomique que les précédents. Leur capacité de gonflement est en effet relativement faible, soit par diminution de la proportion de minéraux gonflants, soit par amélioration du drainage interne. On les retrouve ainsi, sur roches basiques mais aussi sur granites, dans les sections amont des bas-fonds, où la pente longitudinale est encore relativement forte. Enfin, les sols halomorphes se différencient lorsque l'imperméabilité du matériau constitutif des sols, principalement due à l'action du sodium, ne permet l'humectation et le gonflement que dans la partie supérieure du profil. Ils sont également très érodibles après défrichement, y compris sur des pentes très faibles.

* *Les sols hydromorphes*, enfin, sont d'une grande diversité, mais leur évolution est toujours dominée par l'action plus ou moins temporaire d'un excès d'eau.

L'identification de chacune de ces grandes familles de sols ayant été faite, il s'agit d'examiner maintenant leur juxtaposition latérale au long d'une toposéquence comme celle de Pô-Banon ou dans le cadre plus complexe d'une unité hydrologique comme le bassin-versant d'Imiga.

5.1.2 Deux exemples de toposéquences :

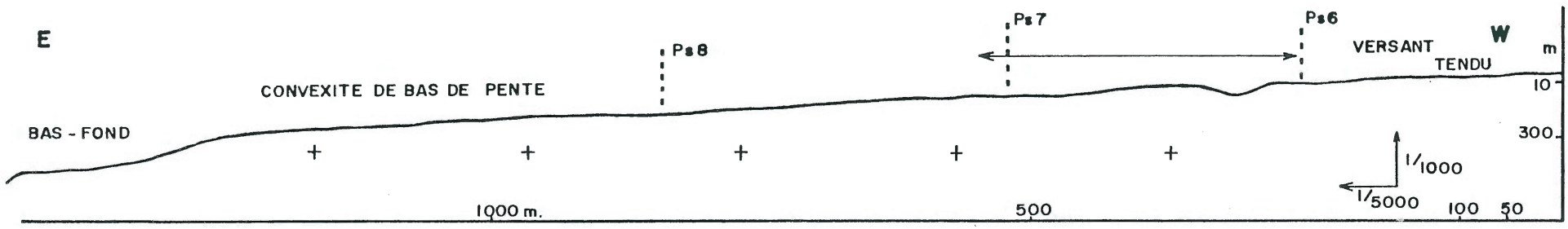
Les profils représentés par les figures 5.2 et 5.3 ainsi que les cartes ont essentiellement pour but de caractériser les substrats sur lesquels ont été réalisées nos expérimentations. Les résultats des différentes analyses de labcratoires sont en outre présentés en annexes (Tab. A.5.1, A.5.2, A.5.4 à A.5.7).

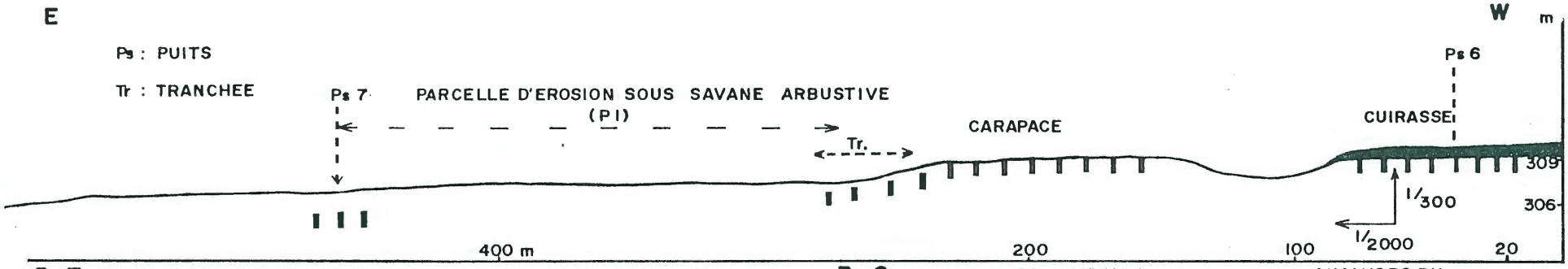
5.1.2.1. La toposéquence de Pô-Banon (Fig. 5.2 et 5.3) (Photo 17)(1)

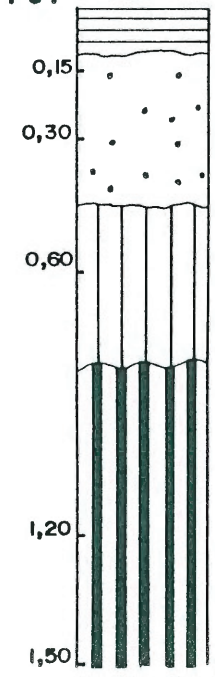
Les parcelles expérimentales sont situées à l'aval d'un versant de 1,5 kilomètre de longueur, de pente voisine de 2% au profil remarquablement rectiligne. Celui-ci est sous-tendu par un horizon de gravillons ferrugineux, à faible profondeur sous une couche humifère superficielle. Cet horizon d'accumulation affleure vers l'aval (Ps6), donnant un ressaut cuirassé, transversalement plus ou moins marqué (net au niveau de la parcelle P4) et au profil en long sinueux. La réalisation d'une tranchée d'une dizaine de mètres de longueur en contrebas de ce ressaut (entre les puits 6 et 7 ; Fig. 5.2) nous a montré que la carapace sous-jacente se prolonge vers l'aval en épousant l'inflexion topographique. Il n'y a pas là deux niveaux cuirassés mais continuité de la formation carapacée avec disparition de la seule cuirasse venue à l'affleurement. Continuité ne signifie pas pour autant prolongation sur une grande distance : à une vingtaine de mètres à l'aval de P1, la carapace cède la place sur la section convexo-concave de bas de pente à un horizon à taches, caractérisé par une légère hydromorphie (Ps8). Au-delà de cette section peu ou pas développée commence le bas-fond, large de 300 mètres environ.

Cette unité bien individualisée est ici le domaine des sols bruns eutrophes tandis que le versant est constitué essentiellement de sols ferrugineux sur matériau argilo-sableux, reposant lui-même sur un granite pegmatitique, à orthose et microcline, à faible profondeur. A l'affleurement, la cuirasse, vacuolaire, correspond plutôt à un grès ferrugineux, une sorte d'alios. La proportion de fer total est faible en effet, de l'ordre de 20% (Tab. A.5.7). Cette cuirasse contient de nombreux quartz de toutes tailles, le plus souvent inférieurs à 0,1 mm, aux

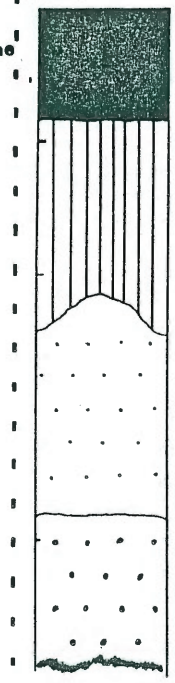
(1) *Les parcelles sont situées en H3.*







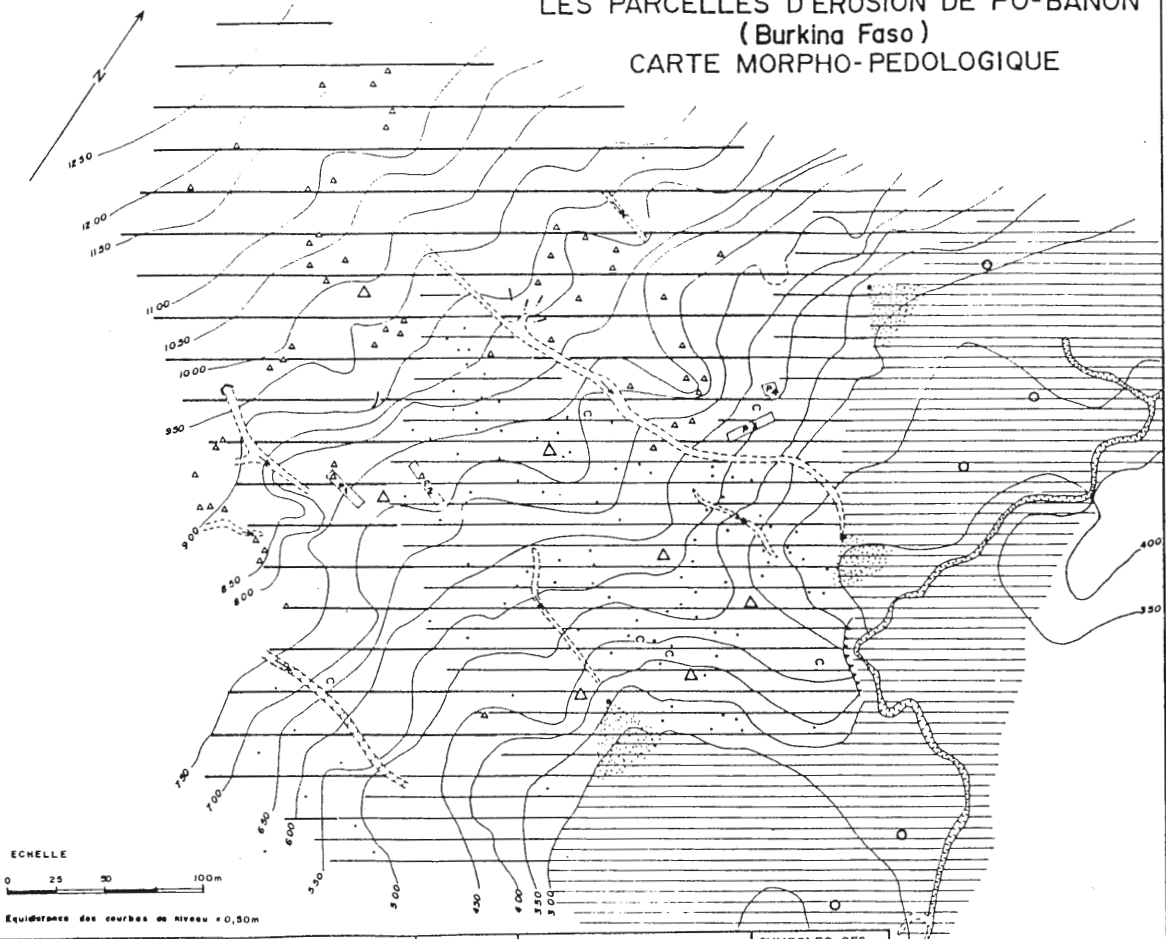
Ps7	DESCRIPTION	ANALYSES RX
1	Sable limoneux, faiblement humifère Couleur à l'état frais 10 YR/4/2 Système racinaire développé	Quartz ∝ : important Kaolinite : faible a moyenne Feldspaths : microcline Goethite : traces
2	Sable limoneux. Couleur 10YR/6/3 Apparition de gravillons ferrugineux ou de quartz et de taches rouges isolées. Système racinaire peu développé.	Idem
3	Horizon gravillonnaire, à matrice sablo - limoneuse, progressivement induré vers le bas.	Quartz ∝ : imp. Kaolinite : moy. Goethite : moy. Hématite : faible Feldspaths : tr.
4	Carapace avec nombreux fragments de quartz à la base Couleur 7,5 YR /5/6	Idem Pas d'hématite



Ps 6	DESCRIPTION	ANALYSES RX
1	Cuirasse mauve, très alvéolaire Faciès gréseux, parfois bréchique Nombreuses racines Poches de terre	Quartz ∝ : important Kaolinite : moyenne Goethite : " Hématite : faible Feldspaths : traces
2	Argile couleur 2,5 YR/4/8 avec nombreux gravillons ferrugineux. Fragments de pegmatites altérées Limite inférieure sinueuse.	Idem
3	Argile couleur 2,5 YR/4/6 Structure fine. Rares gravillons.	Idem Goethite : faible Hématite : traces
4	Argile couleur 7,5 YR/6/8 à nombreuses taches noires. Fragments de quartz.	Quartz ∝ : imp. Kaolinite : faible à moyenne Microcline : " " Goethite : faible
	Filon de quartz très fracturé.	

Fig. 5.2 : Toposéquence de la parcelle P_1 à Pô-Banon.

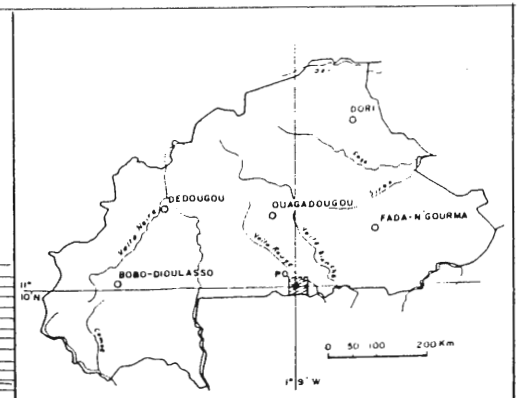
LES PARCELLES D'EROSION DE PO-BANON
(Burkina Faso)
CARTE MORPHO-PEDOLOGIQUE



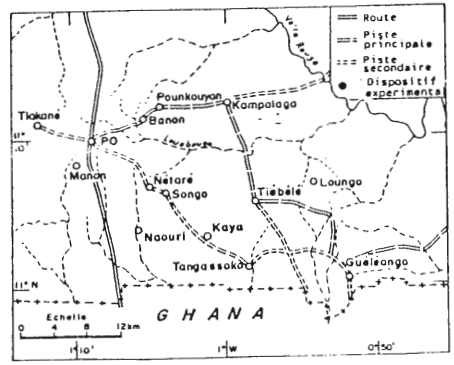
UNITES MORPHO-PEDO	MORPHOLOGIE	PENTE	SOLS ET RECOUVREMENT	VEGETATION	DYNAMIQUE-CONTRAINTES	SYMBOLES DES FORMES DE DETAIL
	Versant tendu ou glacis	⩽ 2%	Sols ferrugineux sur matériau argilo-sableux en profondeur : à carapace sub-affleurante ou cuirasse affleurante. Structure lamellaire en surface et voile de sable.	Savane arbustive	Ruissellement diffus peu intense, sauf en début d'hivernage. Localement ravineaux actuels et rigoles de dissection ancienne le long des talwegs cuirassés. Rare décapage. Nombreuses petites termitières : Trinervitermes.	
	Convexité de bas de versant	≃ 3 %	Sols argilo-sableux à légère hydromorphie. Croute lamellaire en l'absence de piochage.	Parc : karités(•) sur champ de mil.	Ruissellement diffus et ablation pelliculaire intenses. Localement rigoles d'écoulement concentré. Fréquence des hautes termitières : Bellicositermes. Fourmilières.	
	Bas-fond	0,5%	Sols bruns eutrophes.	Lambeaux de forêt-galerie et champs (mil-riz).	Nappe déferlante ou écoulement concentré en entaille discontinue. Epandage sableux. Sapement latéral	

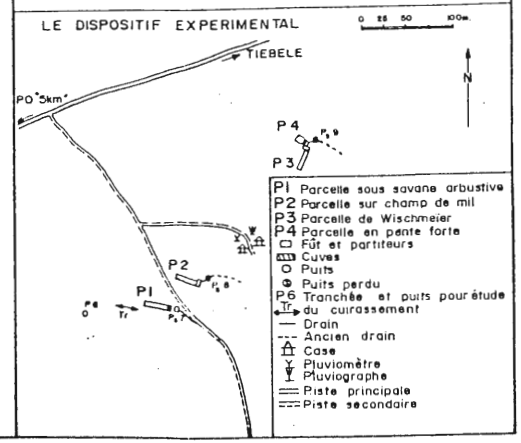
Fig. 5.3

Carte dressée par MIETTON M.
dessinée par TOE R.



CARTES DE SITUATION





contours très anguleux, généralement à extinction roulante, prisonniers d'une matrice brun-foncé à orange renfermant de la kaolinite et de la goethite en quantité moyenne, un peu d'hématite et des traces de feldspaths. Les micro-analyses réalisées sur nos échantillons par J.F. Pascual (1980) ont montré que le toit de cet horizon induré est le siège d'une déferruginisation active liée à la percolation des eaux et à une possible migration oblique. Les végétaux jouent également un rôle important dans les processus de ségrégation ; les brindilles et débris de racines étant le siège de minéralisation en place.

L'évolution paléogéomorphologique de ce modelé n'a pas lieu de retenir ici notre attention. On se bornera à confirmer notre point de vue exprimé dès 1980 (Mietton, 1980, p. 35) : l'ensemble de ce modelé multiconvexe a été cuirassé, *y compris les bas-fonds actuels* si l'on considère que des buttes cuirassées isolées se retrouvent parfois au coeur des talwegs. C'est à partir d'une phase de dissection ancienne, suffisamment profonde, que le paysage actuel se serait façonné. La marque d'une érosion régressive latérale subsisterait sous la forme des rigoles délimitant les lanières de cuirasse au profil en long sinueux. En amont de ces ravineaux, des phénomènes de soutirage ont pu provoquer "la fonte" ou du moins le tassement de la cuirasse, comme on peut l'observer ici, en amont de Ps6. (Fig. 5.3 et carte 5).

L'importance de ces phases de dissection ou de démantèlement des cuirasses se retrouve d'ailleurs à Imiga où, sur un ensemble plus vaste, elles permettent de comprendre la juxtaposition de différents types de sols.

5.1.2.2. La marqueterie des sols sur le bassin versant d'Imiga (Fig. 5.4, 5.5 et carte 2).

Trois types principaux de sols ont pu être différenciés sur ce bassin, après reconnaissance de surface et creusement de fosses pédologiques principalement dans la partie aval (Pslm1, Pslm2, Pslm3, Pslm4), où l'analyse se révèle plus complexe. Ce sont : des sols sur cuirasse ferrugineuse, des sols sur cuirasse démantelée et matériaux

d'altération, des sols bruns de bas-fonds. On retrouve là une partie de la classification de J.C. Leprun (1979, p. 181).

- *Les sols sur cuirasse ferrugineuse* peuvent être à leur tour subdivisés. Ce sont (Fig. 5.5) :

* soit des sols sur cuirasse nue ou lithosols. Ils constituent le sommet de quatre buttes distinctes mais dissymétriques, délimitant le bassin-versant au sud et à l'ouest ;

* soit des sols sur cuirasse à dégradation de surface. Ce sont alors des sols peu épais, d'érosion, sur matériau gravillonnaire. Ils représentent ici l'essentiel du sous-bassin BV2 et constituent bien l'une des caractéristiques d'un des géosystèmes cartographiés à Imiga, dans le tiers supérieur des versants (G2) ;

* soit des sols ferrugineux plus profonds, comportant un couple d'horizons éluvial-illuvial, situés principalement dans la partie médiane des versants. Vers l'aval, la carapace disparaît et ce ne sont plus que des sols ferrugineux à taches mais la distinction cartographique n'a pas été faite (Fig. 5.4 ; Pslm1 et Pslm2).

- *Les sols sur cuirasse démantelée et matériaux d'altération* ont une situation topographique particulière, au pied des buttes cuirassées et dans l'intervalle entre ces mêmes buttes (Fig. 5.5). Le profil ne présente plus là d'horizon induré mais un sol brun, remanié, riche de blocs de quartz en surface ou en profondeur (Pslm4(3) - Fig. 5.4). L'arène basale a tout à fait l'aspect d'un "tweed", pour reprendre l'expression de J.C. Leprun (1979, p. 177), avec des granules blancs dans une pâte vert pâle. L'identité entre notre échantillon Pslm4(3) et les altérations "pistache" décrites par J.C. Leprun (1979), relevée à l'examen macroscopique, est confirmée par les analyses de laboratoire. L'identification des argiles donne 75 à 80% de *smectite* bien cristallisée, un peu de kaolinite (10 à 20%), des traces d'illite, de goe-

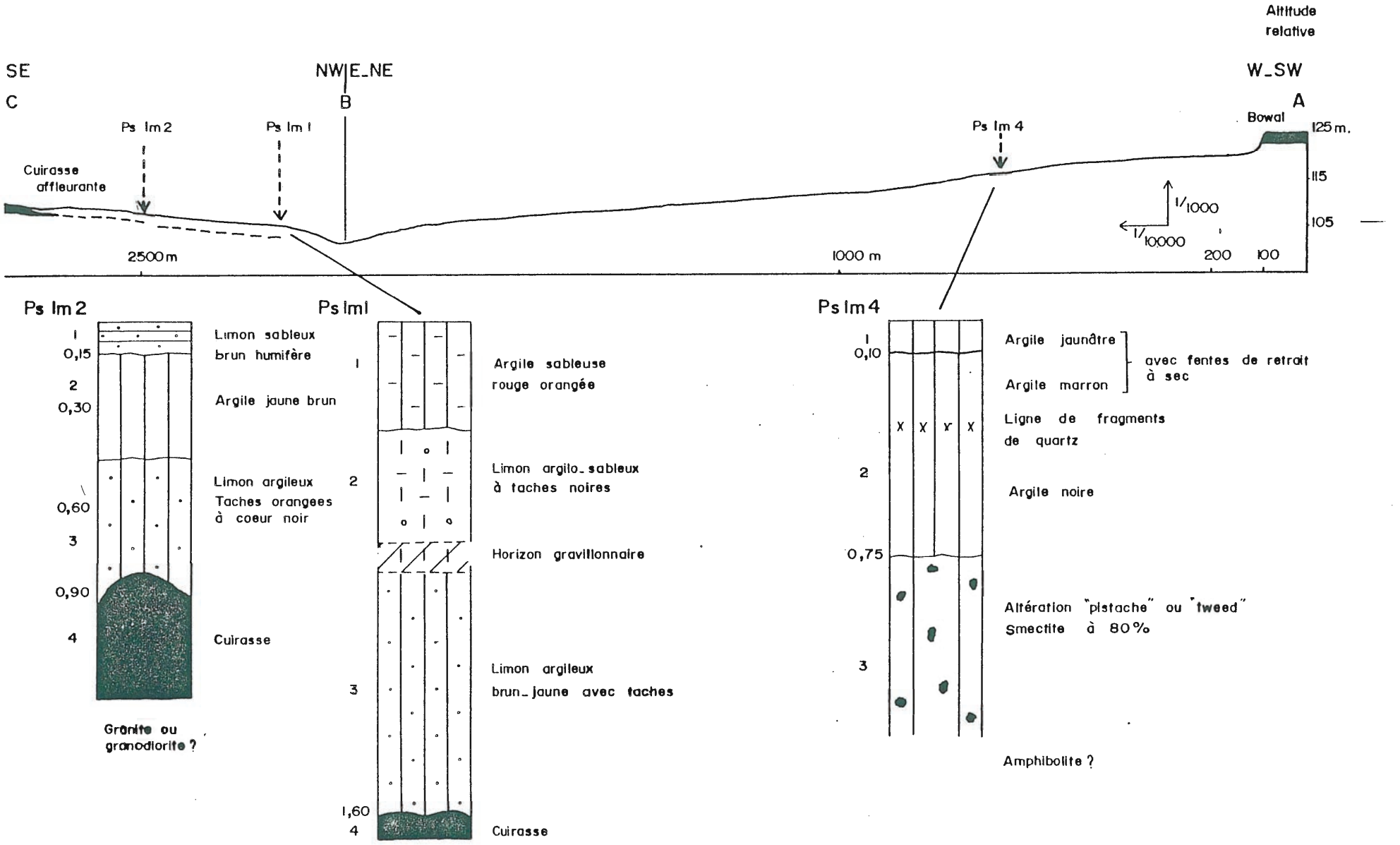
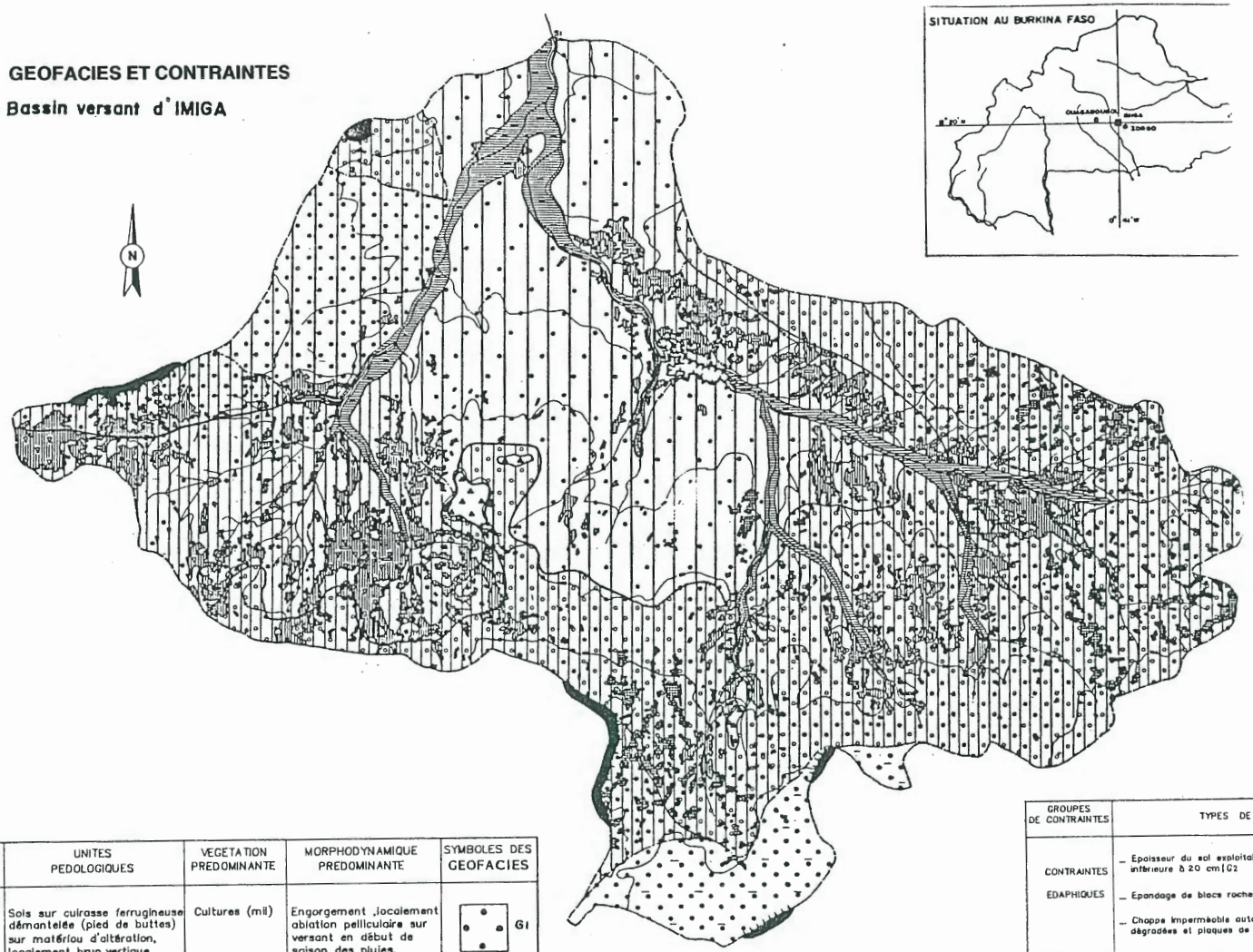


Fig. 5.4 : Exemple de toposéquence sur le bassin versant d'Imiga (Profil A.B.C, Fig. 5.6).

GEOFACIES ET CONTRAINTES

Bassin versant d'IMIGA



UNITES MORPHOLOGIQUES		PENTE	LITHOLOGIE	UNITES PEDOLOGIQUES	VEGETATION PREDOMINANTE	MORPHODYNAMIQUE PREDOMINANTE	SYMBOLES DES GEOFACIES
HAUT DE VERSANT	Sommet d'interfluve largement convexe	<1%	Granodiorite avec amphibolite dans le tiers-ouest du bassin versant	Sols sur cuirasse ferrugineuse démantelée (pied de buttes) sur matériau d'altération, localement brun,vertique (smectite)	Cultures (mil)	Engorgement ,localement ablation pelliculaire sur versant en début de saison des pluies.	G1
	Tiers supérieur de glacis-versant	<2%	Granite ou Granodiorite	Sols sur cuirasse ou sols peu évolués d'érosion sur matériau gravillonnaire	Savanes arbustives	Ruissellement diffus , intense à très intense	G2
MI - VERSANT ET AVAL DE VERSANT		<2% <3%	Granite ou granodiorite	Sols ferrugineux tropicaux lessivés et Sols ferrugineux à taches ou sols à pseudo-gley en profondeur	Cultures et Savanes herbeuses	Ruissellement et ablation pelliculaires très intenses en début de saison des pluies	G3
BAS - FOND		0,5% à 1%	Granite ou granodiorite	Sols gris à brun ,d'apport colluvial,à lit gravillonnaire, plus ou moins hydromorphe	Galeries arborées dégradées	Ecoulement concentré en nappe,localement ravinante	G4

Fig. 5.5

GROUPES DE CONTRAINTES	TYPES DE CONTRAINTES	FORMES DE DETAIL
CONTRAINTES EDAPHIQUES	- Epaisseur du sol exploitable par les racines inférieure à 20 cm (C2 - Epandage de blocs rocheux (quartz principalement) - Chappe imperméable autour des termitières dégradées et plaques de sols nus compacts	Affleurement rocheux Chaos de blocs Butte cuirassée avec talus supérieur à 5m inférieur à 5m Termitières
CONTRAINTES MORPHO-DYNAMIQUES	• Dynamique de saison sèche : - Déflation éolienne ponctuelle • Dynamique de saison des pluies : - Ruissellement très intense en tout mois - Ruissellement diffus très intense (en début de saison des pluies) ou intense - Ruissellement diffus et ablation pelliculaire très intenses en début ou durant la seconde moitié de la saison des pluies (ouest du bassin) - Ruissellement concentré élémentaire ou en nappe détersante . Erosion linéaire mineure,localement ravinante (G4)	Plaques de sols nus compacts Lit mineur incisé Rigole ou ravineau Ravin
CONTRAINTES HYDROLOGIQUES	- Régime hydrologique d'inondation temporaire sous fortes averses suivi d'écoulement hypodermique(dans les bas-fonds) - Régime hydrologique d'inondation saisonnière ou d'engorgement durant la seconde moitié de la saison des pluies	

thite, de calcite et de feldspaths (Fig. A.5.1.). Le ph (eau) est neutre (7). La somme des bases échangeables atteint une valeur très élevée (35,8 mé/100g. de sol) avec l'équilibre suivant :

Ca (27,8) > Mg (6,9) > Na (0,64) > K (0,45).

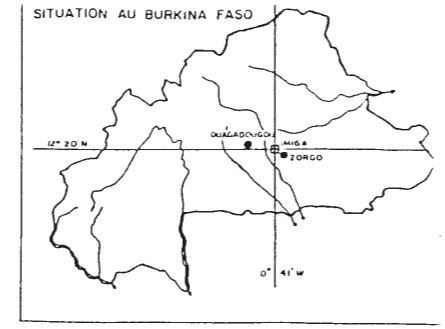
La mise à l'affleurement de ce type de sol est évidemment liée à l'évolution paléogéomorphologique, en l'occurrence le démantèlement d'une cuirasse qui affleure à peu de distance latéralement. Mais la genèse même de ce type d'altération paraît dépendante de la nature de la roche. C'est en effet à proximité de la butte cuirassée située le plus à l'ouest que nous avons pu observer (grâce à l'importance de la dissection !) la roche à l'affleurement : or il s'agit, à côté d'un granite ou granodiorite, de gros noyaux d'amphibolites riches en éléments ferro-magnésiens (Tab. A.5.8).

Là encore, sans nous étendre sur l'évolution paléogéomorphologique de ces paysages, il peut être intéressant de souligner, après l'examen détaillé, à petite échelle, de ce bassin-versant en pays cristallin, *le caractère*, semble-t-il , *étroitement dépendant entre modelé et substratum*. Sur un ensemble cuirassé originel, faiblement ondulé, les parties les plus hautes, aux cuirasses les plus épaisses, pourraient surmonter des échardes de roches vertes. Dans un deuxième temps correspondant à une phase de dissection linéaire, ces points hauts aux profils les plus épais se révèleraient les plus vulnérables vis-à-vis de l'érosion régressive. Les sols bruns, plus ou moins remaniés, à caractère vertique, sur manteau d'altération, apparaissent dès lors ponctuellement, à l'aplomb de ces entailles majeures tandis que la cuirasse subsiste, latéralement, sous la forme de bowé faiblement perchés, dissymétriques ou bien constitue, à plus grande distance, la surface fonctionnelle actuelle de ces bas-pays cristallins.

- *Les sols bruns de bas-fonds* sont évidemment plus aisément reconnaissables. Ils se limitent aux couloirs d'écoulement concentré intermittent, à partir d'un réseau d'ordre 3. L'échantillon E1 (Fig. 5.6) prélevé à 150 mètres en amont de la station de jaugeages S2 révè-

MESURES ET ECHANTILLONS

Bassin_versant d'IMIGA



LEGENDE :

Equipements pluviométrique, hydrométrique et thermométrique :

- Pluviomètre
- Pluviographe
- Limite des polygones de Thiessen
- Station de jaugeages (avec limnigraphe, passerelle et échelle limnimétrique)
- T Tensiomètre
- Mesure d'infiltration (cercle de Müntz)
- Thermographe

Observations pédologiques et échantillons :

- X : Fosse pédologique
- E : Echantillon de sol
- Er : Echantillon rocheux
- Ec : Echantillon de cuirasse
- A,B,C : Tracé de la coupe (Fig 5.4)

- Limite des bassins_versants
- Ecoulement concentré intermittent
- 12500 Courbe de forme
- 12750 Courbe intercalaire

0 200 500m

Fig. 5.6 Auteur : M.METTON

le une texture de limon sablo-argileux (Tab. A.5.5) à forte perméabilité dans les premiers centimètres. A ce matériel fin d'origine colluviale succède en profondeur un horizon gravillonnaire beaucoup plus soudé, du moins sur les coupes naturelles des ravines. Cette discontinuité est probablement responsable de l'écoulement hypodermique nettement visible sur ces coupes après les fortes averses.

En aval (ordre 5), le matériel devient plus franchement argileux et l'engorgement, temporaire à l'amont des bas-fonds ou sur les sols bruns d'altération des sommets d'interfluve, devient permanent durant la seconde moitié de la saison des pluies (août-septembre-octobre).

En résumé, les deux sites étudiés de manière détaillée confirment :

- l'existence des principales familles de sols précédemment énoncées ; la faible place des sols hydromorphes étant simplement liée à la situation très en amont des bassins-versants reconnus ;

- la prédominance des sols ferrugineux : sols ferrugineux lessivés proprement dits ou bien sols peu évolués sur matériau gravillonnaire. A ces deux groupes peuvent être même rattachés les sols minéraux sur buttes cuirassées ; la cuirasse étant le trait d'identité commun à ces trois groupes.

Si la cuirasse est aussi largement présente dans ces milieux savaniens, il paraît opportun de se préoccuper ici de son influence sur la dynamique des eaux de ruissellement. Ceci nous conduit auparavant à considérer les relations généralement admises entre la nature du substratum et des altérites d'une part et la densité du réseau hydrographique d'autre part.

5.2 TEXTURE ET ECOULEMENT DE SURFACE : LA PRISE EN COMPTE DES HORIZONS INDURES.

5.2.1 :Les relations roche-mère, densité du réseau hydrographique :

L'existence d'une relation entre la nature du substratum géologique et par conséquent celle des altérites, plus ou moins argileuses (ou plus ou moins sableuses), est fréquemment admise : les hydrogéologues, notamment, insistent sur les différences de perméabilité entre les altérites argileuses des roches basiques et les arènes granitiques beaucoup plus poreuses. A l'appui de cette thèse, N. Savadogo (1984) donne quatre exemples cartographiques intéressants dont deux sont reproduits ici en annexes (Fig. A.5.2). On remarque notamment dans la partie est du bassin-versant de la Sissili, au sud du pays, la plus grande densité du réseau sur les schistes et amphibolites par opposition aux migmatites et granites.

Le bien-fondé de cette relation nous paraît toutefois discutable, pour plusieurs raisons, les unes liées aux cas présentés ci-dessus, les autres plus générales :

- d'une part, l'échelle d'étude est celle des cartes topographiques disponibles jusque-là, c'est-à-dire le 1/200 000(1). Seul un examen minutieux des photos aériennes au 1/50 000 au moins est susceptible de bien faire ressortir l'ensemble du réseau d'ordre 1, peu apparent mais probablement le plus riche d'enseignements sur les modalités d'occurrence du ruissellement concentré élémentaire ;

- d'autre part, comme le souligne A. Savadogo, les affleurements rocheux sont rares dans ces régions. Un doute subsiste donc sur

---

(1) *La comparaison des réseaux d'ordre 1 sur l'une des toutes premières cartes au 1/50 000 du Burkina Faso (Tenkodogo d) avec le secteur correspondant de la carte Tenkodogo au 1/200 000 est à cet égard intéressant.*

la validité des limites géologiques. Il nous semblerait en tous cas prématuré de prendre en compte la densité du réseau pour cerner avec plus de précision les formations (p. 141) ;

- Plus généralement, les exemples étudiés sur prises de vues aériennes, aux échelles allant du 1/50 000 au 1/5 000 et pris sur des substratums variés, montrent que cette relation est très peu évidente.

La carte établie dans la région de Pô-Tiébélé (Fig. 5.7) montre que :

1. Le réseau hydrographique est moins dense sur les formations schisteuses birrimiennes que migmatitiques, ces dernières pourtant plus sableuses.

2. Une même formation, les granites intrusifs à gros grain par exemple, peut être caractérisée par un chevelu localement important (alvéoles de Kassoura) ou au contraire très peu dense (Tiébélé-Est). De la même façon, des oppositions très marquées de drainage pour une même roche-mère se retrouvent en grand nombre sur la carte géologique de Tenkodogo.

3. Un des facteurs décisifs est l'apparition des reliefs en hauteur, ici le "front-crête" des collines migmatitiques (Mietton, 1985) qui sert de ligne de partage des eaux entre la Volta Rouge et la Volta Blanche et autour de laquelle s'organisent les chiffres de densité maximums.

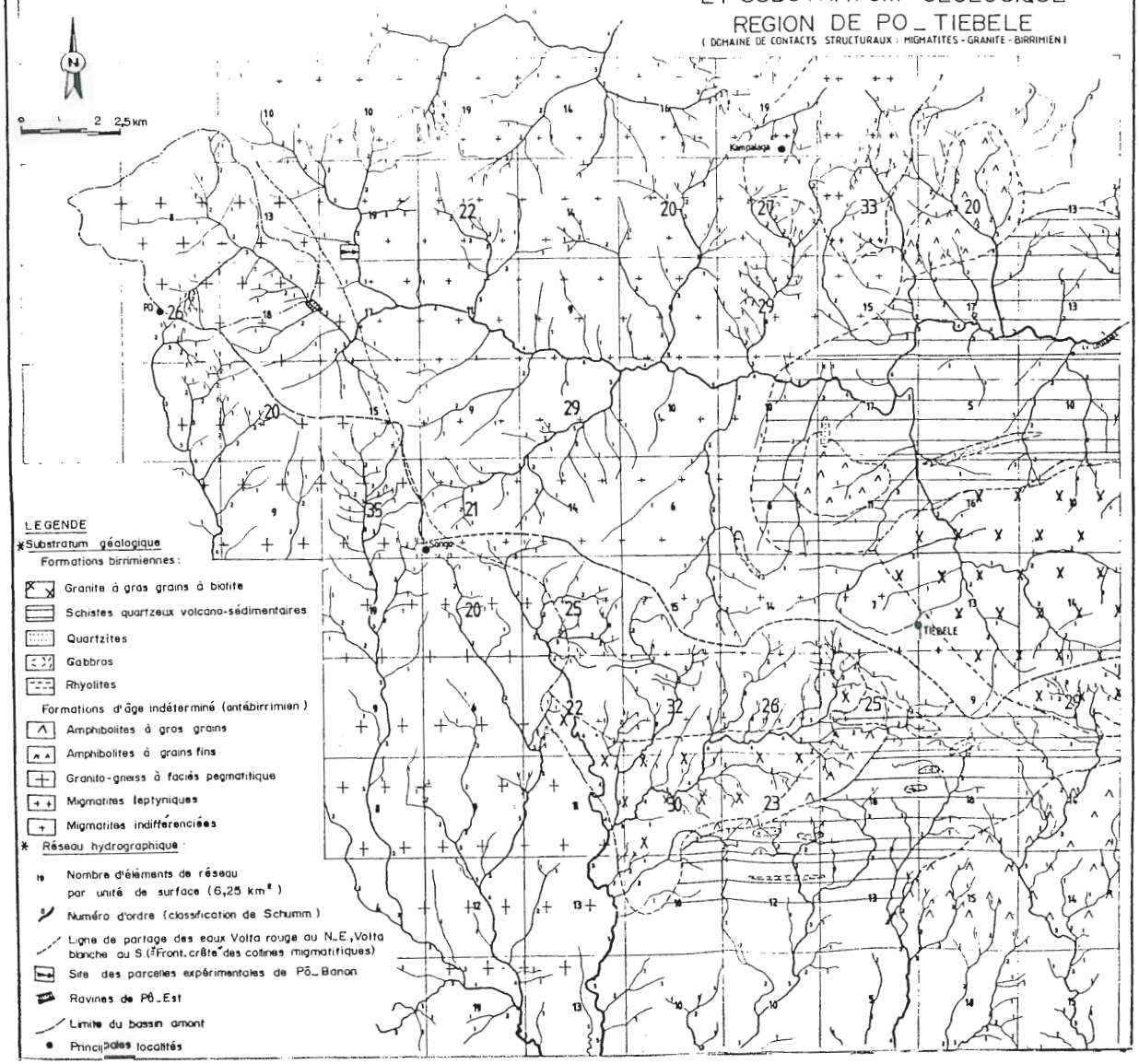
4. Une autre clé explicative est à rechercher, qui pourrait rendre compte des variations de densité à l'intérieur d'une même formation : le domaine migmatitique du bassin de la Louabouga par exemple. Cette clé pourrait être, à notre avis, le cuirassement.

- En effet, l'affirmation d'une relation entre la nature des altérites et la densité du réseau semble faire fi de l'horizon d'accumulation ferrugineux pourtant très largement fréquent (à des profondeurs

Fig.: 5.7 DENSITE DU RESEAU HYDROGRAPHIQUE ET SUBSTRATUM GEOLOGIQUE

REGION DE PO_TIEBELE

(DOMAINE DE CONTACTS STRUCTURAUX : MIGMATITES - GRANITE - BIRRIMIEN)



variables) dans ces régions, à moins que la cuirasse ou carapace ne soit englobée dans le terme altérite argileuse ou poreuse !... Ces niveaux indurés s'interposent en fait comme un écran entre l'altérite proprement dite et la surface, écran dont le comportement vis-à-vis de l'infiltration est à définir en fonction de sa nature même mais aussi de sa profondeur.

Leur existence est à prendre en compte au moins dans le cas de la genèse de l'écoulement concentré élémentaire (ordre 1 ou 2).

La mise en place du réseau hydrographique principal, installé dans des couloirs alluviaux, ne se conçoît pas forcément, quant à elle, en fonction d'un modelé identique à l'actuel et se pose en termes géochronologiques. Deux cas de figures se présentent à notre avis :

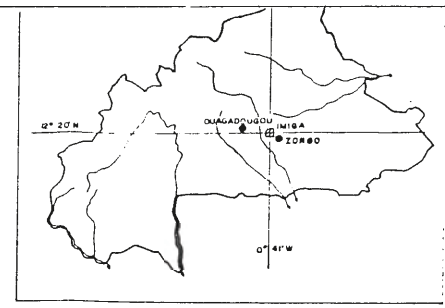
- ou bien le réseau hydrographique principal s'est installé sur un modelé multiconvexe entièrement carapacé et l'a disséqué localement ;
- ou bien l'induration est postérieure à la dissection, peut être même induite par elle si l'on retient l'hypothèse séduisante du pédologue M. Raunet (1985 b).C'est seulement dans cette dernière optique, ainsi précisée, qu'une relation entre nature de l'altérite et densité du réseau peut être discutée.

5.2.2 Les horizons indurés et la genèse du ruissellement :

L'examen du réseau hydrographique et de sa hiérarchie sur le bassin-versant d'Imiga complète utilement notre information (Fig. 5.8). La densité de drainage sur l'ensemble du bassin (BV1), dont le substratum est essentiellement granodioritique (Tab. A.5.8), est proche de 4 km/km^2. Le chiffre de 3,94 traduit un très bon drainage d'ensemble pour une région cristalline, moyennement arrosée. Mais, surtout, on notera que la densité du chevelu est la plus importante sur le sous-bassin BV2 = 4,7 km/km^2 contre 3,4 sur le reste du bassin (BV3). Or ce sous-bassin BV2 se caractérise justement par des sols sur cuirasse à dégradation de surface ou sols sur matériau gravillonnaire peu épais (géofaciès G2, Fig. 5.5) largement prépondérants. La fréquence des tronçons d'ordre 1 est élevée : 13,4 unités/km^2 contre 8,7 seulement sur BV3. Ces tronçons sont nombreux et courts (210m en moyenne). Certes, il faut distinguer les cuirasses ou carapaces qui sont perméa-

TOPOGRAPHIE ET RESEAU HYDROGRAPHIQUE

Bassin-versant d'IMIGA



HIERARCHIE DU RESEAU
ET DENSITE DE DRAINAGE

BASSINS	ORDRE n	N n	L n (km)	T n (km)
BV 1	5	1	2,5	2,5
	4	3	3,9	1,3
	3	9	5,5	0,61
	2	33	8,2	0,25
	1	130 (10,8 unites /km²)	27,35	0,21
Densité de drainage en BV 1 : $\frac{\Sigma Ln}{S} = \frac{47,45}{12,05} = 3,94$ km/km²				
BV 2	5	1	0,2	0,2
	4	2	2,0	1,0
	3	5	3,0	0,6
	2	17	4,1	0,24
	1	71 (13,4 unites /km²)	15,4	0,21
Densité de drainage en BV 2 : $\frac{\Sigma Ln}{S} = \frac{24,7}{5,3} = 4,66$ km/km²				
BV 3 (BV1 - BV2)	5	1	2,3	2,3
	4	1	1,9	1,9
	3	4	2,5	0,62
	2	15	4,1	0,26
	1	59 (8,7 unites /km²)	11,95	0,20
Densité de drainage en BV 3 : $\frac{\Sigma Ln}{S} = \frac{22,75}{6,75} = 3,37$ km/km²				

Limite des bassins versants
S 1 : exutoire de BV 1
S 2 : exutoire de BV 2
Ecoulement concentré intermittent et ordre des thalwegs (classification de Schumm).
125.00 Courbe de forme
127.50 Courbe intercalaire

0 100 200 300 400 500 m

Fig. 5.8 Auteur : M. MIETTON

bles en grand de celles, plus massives, qui sont totalement imperméables. Mais, lorsque la capacité d'infiltration est dépassée sous des averses de fortes intensités, les sols gravillonnaires dès la surface gênent incontestablement le ruissellement diffus[1]. Celui-ci déplace difficilement les matériaux, de taille centimétrique, qui dépassent généralement sa compétence sur ces pentes voisines de 2%. L'apparition du ruissellement concentré élémentaire est ainsi favorisée par la texture grossière d'un horizon induré à faible profondeur. Dans le cas du bassin versant d'Imiga, on peut même observer que les sols bruns, situés au pied de la butte cuirassée occidentale (Fig. 5.5), sols *sur altérite, sans horizon ferrugineux* (sols à cuirasse démantelée) argileux et à nombreuses fentes de retrait, sont en fait les moins bien drainés en surface.

Un constat identique, malheureusement plus ponctuel, a été fait en divers points du haut bassin versant de la Louabouga à l'est de Pô : les tronçons d'ordre 1 naissent là bien souvent sur des bas de pente où la cuirasse est affleurante ou sub-affleurante et confluent directement avec un réseau d'ordre 3 (Fig. 5.7).

Sans aller plus avant pour l'instant dans une analyse des processus qui retiendra notre attention dans le livre II, nous pouvons d'ores et déjà souligner que la profondeur de l'horizon induré a également une influence en limitant les possibilités de stockage de l'eau (Collinet et Valentin, 1979, p. 301) et la durée de la phase d'imbibition.

S'il paraît acquis que ces cuirasses ou carapaces constituent un facteur déterminant dans la genèse du ruissellement, la question à traiter est désormais celle d'une relation entre roche-mère et écoulement de surface par cuirassement interposé. En d'autres termes, les oppositions à l'échelle régionale entre formations géologiques (birrimiennes et cristallines en particulier) induisent-elles des différences de cuirassement ? Si oui, les modalités de l'écoulement de surface doivent elles

---

(1) *Nous nous plaçons, à ce stade, dans le cas simple et pas forcément le plus fréquent, où il n'existe pas d'organisation pelliculaire superficielle. Celles-ci sont étudiées au § 5.3.1.*

même être changeantes.

5.2.3 : Les relations roche-mère - cuirasses affleurantes : L'exemple du sud-ouest du Burkina Faso.

Ce thème de recherche est l'objet d'un débat débordant largement le cadre de notre étude puisqu'il porte sur l'évolution paléogéomorphologique des modelés cuirassés. Cette perspective passionnante a été pour nous l'occasion depuis quelques années d'autres travaux, dont une partie des résultats peut être utile ici à la compréhension des phénomènes de dynamique actuelle.

Notre estimation de l'extension des surfaces cuirassées a été réalisée dans le sud-ouest du Burkina Faso, sur une superficie de 39 000 km² (plus de 14% de la superficie du pays). La région est caractérisée par l'existence de deux sillons birrimiens, couvrant 51% de la surface étudiée (Fig. 5.9) constitués de roches volcaniques, volcano-sédimentaires et sédimentaires, riches en éléments ferro-magnésiens, plissées et métamorphisées. Plus de 8 700 opérations de planimétrie ont été effectuées sur les 68 cartes géomorphologiques au 1/50 000, dressées par GEOMAP (Facibeni et al., 1976) après photointerprétation et contrôle sur le terrain pour le compte du Projet de Recherches géologiques et minières des Nations Unies (UPV 74-004).

Deux grands groupes de cuirasses ont été distingués par les auteurs de ce travail cartographique :

- les unes, perchées, aisément reconnaissables en stéréoscopie, et différenciées par la nature du substratum. Ce sont les cuirasses notées La sur roche acide, Lb sur roche birrimienne (avec Lb1 pour les cuirasses alumino-ferrifères les plus hautes dans le paysage et Lb2 les bowé ferrugineux), enfin Li sur roche indifférenciée ;

- les autres sont les cuirasses sans rebord, affleurantes dans la plaine et dont la délimitation est beaucoup plus problématique. Leur extension a probablement été sous-estimée, précisent les auteurs.

Les superficies de ces multiples unités, regroupées par carte ou par "province" (degré-carré partiel ou total) sont données en annexes (Tab. A.5.9 et A.5.10) tandis que les pourcentages totaux de cuirasses affleurantes et de cuirasses perchées, par rapport à la superficie de chaque coupure, sont présentées sur les figures ci-jointes (Fig. 5.9 et 5.10 ; Fig. A.5.3). Le pourcentage total des surfaces cuirassées sur l'ensemble de la région, *de l'ordre de 20%*, est à souligner au passage comme exemple de contrainte (Tab. A.5.11).

A ce stade, les formations géologiques ont été à leur tour planimétrées sur les cartes au 1/200 000 de J. Marcelin (1971) et V. Sattran (1982) ; le domaine birrimien étant estimé dans sa totalité mais aussi en distinguant les ensembles schisteux et andésito-basaltique.

La recherche des *corrélations de rang* entre substratum et cuirasses affleurantes a alors été appliquée à l'échelle des "provinces" (Tableau 5.1) mais aussi à l'échelle des cartes au 1/50 000 dans le cas des deux degrés-carrés de Houndé et de Gaoua. Les résultats sont présentés dans les deux tableaux ci-dessous :

- à l'échelle des provinces, il apparaît que la corrélation est significative en ce qui concerne les cuirasses perchées (ρ = 0,89 significatif pour n = 8 avec un risque d'erreur de 1% seulement). En revanche, la corrélation n'existe pas entre le substratum birrimien et l'ensemble des cuirasses affleurantes. Le coefficient ρ est de 0,62 tandis que le seuil de significativité est très proche, il est vrai, puisque de 0,64 pour α = 5%.

Provinces	Cuirasses affleurantes totales		Birrimien		Cuirasses affleurantes perchées	
	%	Rang	%	Rang	%	Rang
DEDOUGOU	25,4	1	85,6	2	13,2	2
KOUBOUGOU	17,8	7	86	8	7,4	7
HOUNDE	24,4	2	92,3	3	10,5	5
LEO	15,4	8	89	7	3,5	8
GAOUA	18,9	6	59,5	4,5	11	4
BATIE - NORD	19,9	5	74,4	1	14,1	1
TENINI	21,9	4	59,5	4,5	12,2	3
BATIE - SUD	22,4	3	53,6	6	9	6
Coefficient de SPEARMAN	ρ = 0,62				ρ = 0,89	

Tableau 5.1 : Corrélation de rangs entre les pourcentages de cuirasses affleurantes et de substratum birrimien dans 8 provinces du sud-ouest du Burkina Faso.

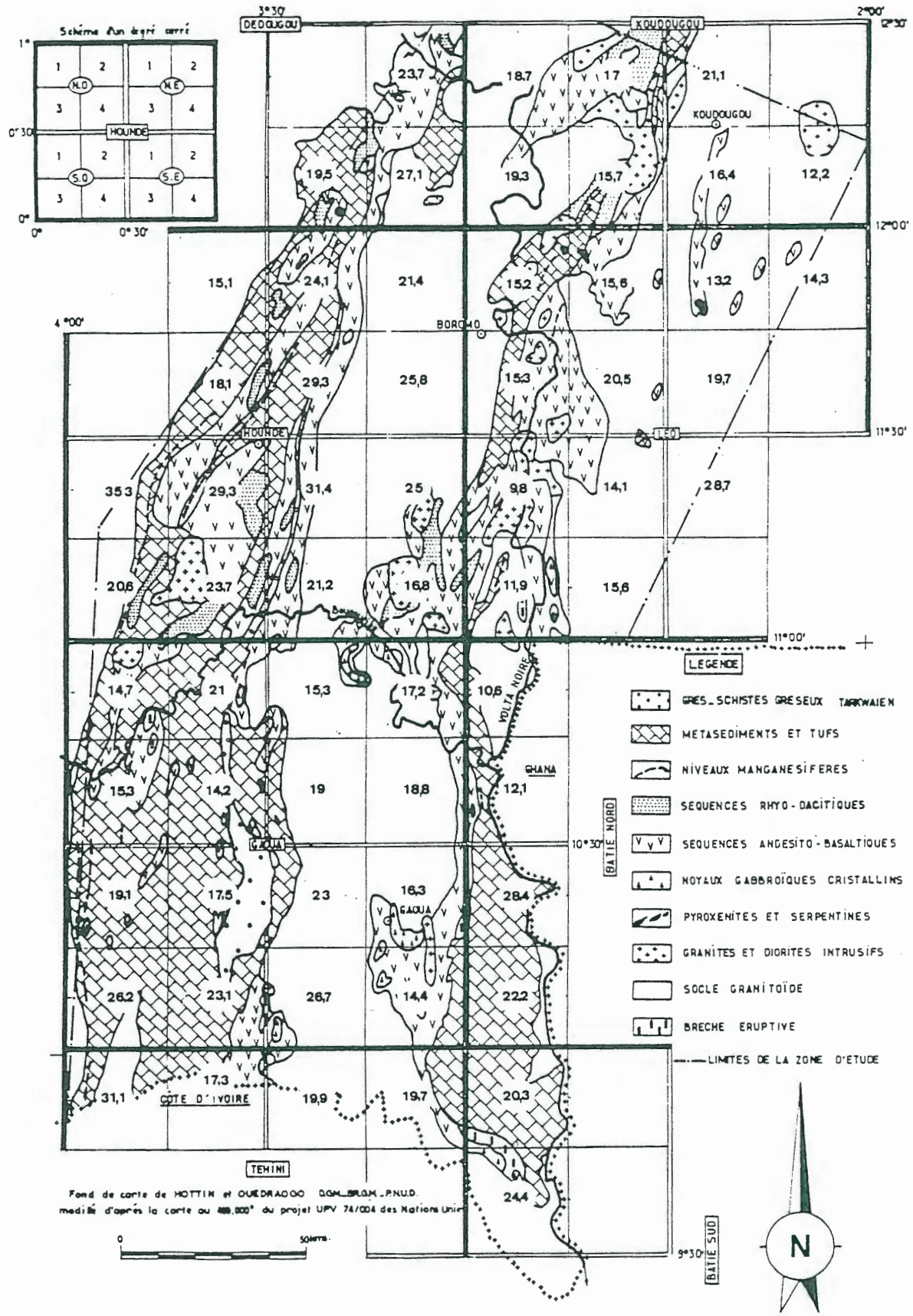


FIG.5.9 LES SILLONS BIRRIMIENS DE BOROMO ET HOUNDE.
POURCENTAGES TOTAUX DE CUIRASSES AFFLEURANTES PAR RAPPORT A LA SUPERFICIE DE CHAQUE COUPURE AU 1/50 000.

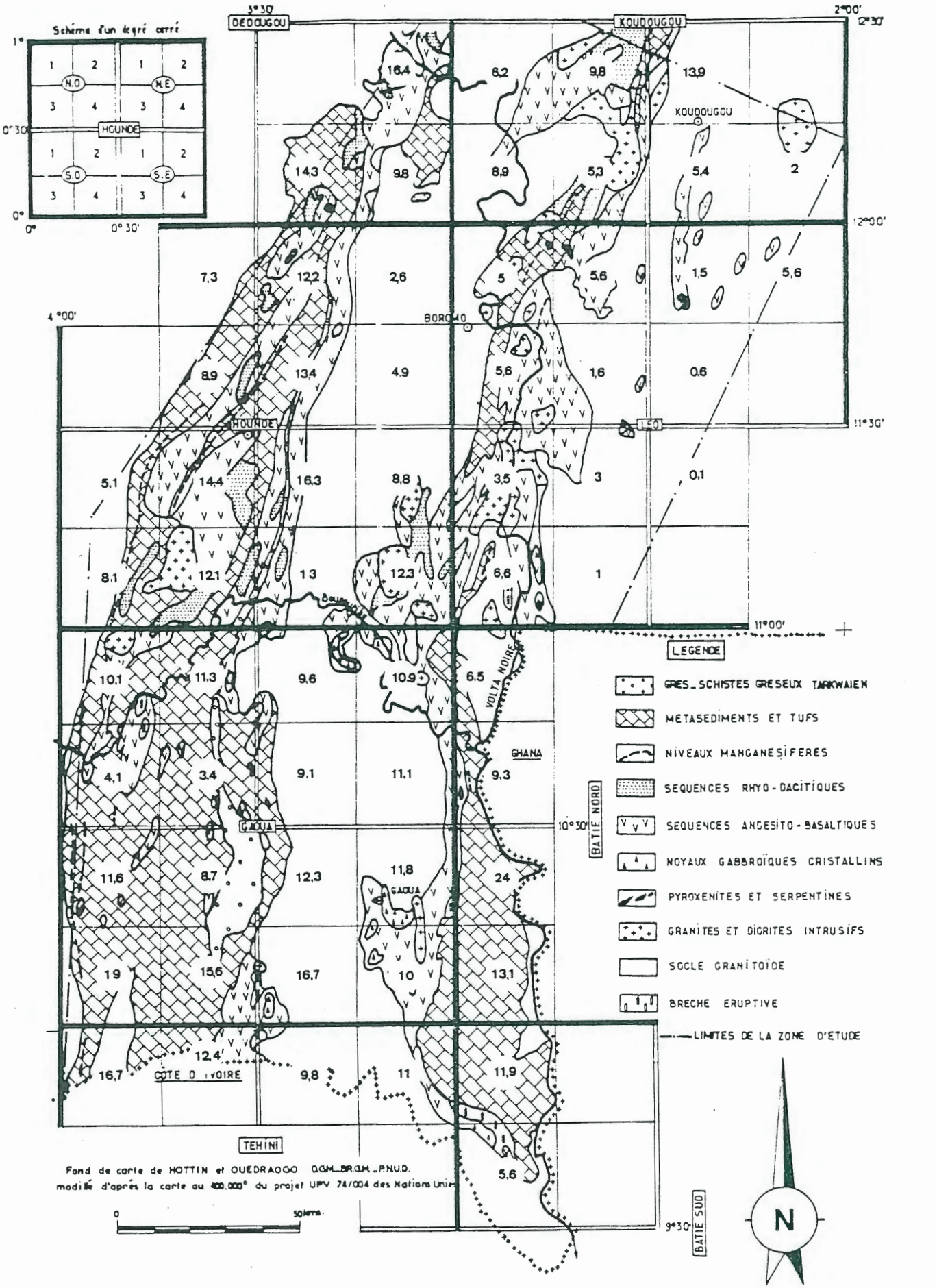


FIG.5.10 LES SILLONS BIRRIMIENS DE BOROMO ET HOUNDE.
POURCENTAGES DE CUIRASSES AFFLEURANTES PERCHEES PAR RAPPORT A LA SUPERFICIE DE CHAQUE COUPURE AU 1/50 000.

En d'autres termes, *les cuirasses affleurantes ne sont pas moins nombreuses sur les bas-pays cristallins que dans les domaines birrimiens aux roches réputées plus riches en fer.*

- à l'échelle des cartes au 1/50 000, une seule corrélation a été enregistrée, sur le degré carré de Houndé, entre les cuirasses perchées et les formations andésito-basaltiques ($\rho = 0,69$ pour $n = 13$ est significatif avec un risque d'erreur de 1%) mais cette corrélation ne se vérifie pas sur le degré-carré voisin de Gaoua.

	Birrimien schisteux		Cuirasses perchées		Birrimien andésito-basaltique	
	%	Rang	%	Rang	%	Rang
Houndé NE_1	31,2	4	12,2	6	56,6	3
NE_2	0	13,5	2,6	14	0,2	12
NE_3	34,8	3	13,9	3	26,9	8
NE_4	0	13,5	4,9	13	0	13,5
SE_1	13,5	9	16,3	1	32,2	7
SE_2	1,3	12	8,8	9	15,9	11
SE_3	6,3	10	13	4	36,8	5
SE_4	13,9	8	12,3	5	65,9	2
SO_1	30,9	5	5,1	12	17,1	10
SO_2	16,1	7	14,4	2	82,3	1
SO_3	4,5	11	8,1	10	36,6	6
SO_4	19,6	6	12,1	7	54,2	4
NO_2	100	1	7,3	11	0	13,5
NO_4	80,9	2	8,9	8	18,7	9
Coefficient de Spearman	$\rho = 0,26$		$\rho = 0,69$			

Tableau 5.2 : Corrélations de rangs entre les pourcentages de cuirasses affleurantes perchées et de substratum birrimien (schisteux et andésito-basaltique) sur chaque coupure du degré-carré de Houndé.

Il ressort de tout cela qu'il n'y a pas de *corrélation significative entre la nature du substratum géologique et l'extension de l'ensemble des cuirasses affleurantes.*

En conclusion, les différences de densité du réseau hydrographique ne semblent pas pouvoir être mises en relation avec des différences géologiques ou de cuirassement. Cela ne signifie pas pour autant que

les horizons indurés ne jouent aucun rôle. Bien au contraire, proches de la surface, ils favorisent la concentration du ruissellement. Mais leur présence est éminemment variable à l'intérieur d'une même unité géologique et dépend bien davantage des modalités complexes d'une dissection ancienne, dont l'intensité est à rattacher, en particulier, à la distance par rapport aux niveaux de bases régionaux.

Par delà l'examen pédologique des différents horizons, il convient de souligner aussi le rôle joué par les caractéristiques physiques des premiers centimètres du sol. Deux cas peuvent être, semble-t-il, distingués : le premier dans lequel des organisations superficielles distinctes du premier horizon lui-même se mettent en place suivant des processus physique ou biologique ; le second où l'horizon superficiel prend, en dehors de toute croûte, une structure massive et compacte.

5.3 LES STRUCTURES DE SURFACE A FORTE COHESION.

5.3.1 : La genèse des organisations pelliculaires superficielles:

L'expression "organisations pelliculaires superficielles" est extraite de l'ouvrage de C. Valentin (1981). Ses travaux, qui associent, en zone subdésertique, caractérisations morphologiques et expérimentations, débouchent sur des résultats à nos yeux fondamentaux et, pour l'essentiel, transposables dans la zone soudanienne. Après avoir décrit les organisations superficielles pour lesquelles les processus de mise en place sont d'origine physique, nous tenterons de souligner, de manière quelque peu complémentaire, mais à l'aide d'observations trop limitées, le rôle de la pédofaune.

5.3.1.1. Les organisations superficielles d'origine physique :

Ces organisations, fréquemment décrites sur les sols tropicaux ou sub-tropicaux, sont généralement désignées par le terme de "croûtes de battance". A l'examen macroscopique, il s'agit de struc-

tures lamellaires, d'épaisseur millimétrique, de granulométrie variée et présentant une forte cohésion. La "battance" définie par Hénin *et al.* (1969) est présentée comme un phénomène combinant l'éclatement et le rejaillissement de gouttes chargées de terre (le splash) ainsi que des dépôts laminaires liés au ruissellement. L'épithète "battant" qualifie dès lors aussi bien une pluie qu'un sol (Valentin, 1981, p.163). Mais le caractère peu satisfaisant de ce terme a d'autres raisons :

- d'une part, C. Valentin a montré grâce à des essais Pioger (1981, p. 131) que la destructuration d'un sol argileux apparaît même sous une lame d'eau qui ne ruisselle pas. "Des processus autres que le rejaillissement et le ruissellement peuvent également intervenir : le micro-transfert, le tassement des constituants de surface (plasma et squelette), le gonflement et la liquéfaction". Cela pourrait constituer une première explication pour les nombreuses "croûtes" observées sous savane alors que "l'effet de battance ne se produit que si le terrain n'est pas couvert" (Hénin *et al.*, 1969) ;

- d'autre part, alors que la battance est un phénomène caractéristique des sols limoneux, ces organisations superficielles existent aussi sur des sols très sableux. C. Valentin souligne ce fait en zone sub-désertique, mais c'est également le cas dans la région de Pô, au sud du Burkina Faso. Plus généralement, à propos des terrains cristallins de la zone soudanienne, nous écrivions dès 1980 (p. 200) que "ces structures lamellaires sont suffisamment fréquentes en Haute-Volta pour ne pas être liées à une granulométrie bien spécifique". E. Roose décrit cette même pellicule à Saria (12°16'N ; 2°9'W), où l'horizon superficiel est sableux à 70% ;

- enfin, les croûtes qui viennent en surface des sols sous savane, peuvent avoir une origine autre que physique.

5.3.1.2. Les organisations superficielles d'origine biologique.

L'examen de ces formations a été réalisé au microsco-

pe par le Professeur Gillet, du Laboratoire d'Ethnobotanique du Museum de Paris, sur deux de nos échantillons prélevés au coeur de la saison sèche (février 1982), à proximité de nos parcelles expérimentales de Pô-Banon.

Le premier échantillon, à 200 mètres en amont de la parcelle P1, est une portion d'une croûte rougeâtre s'étendant largement sous la savane arbustive. L'examen microscopique permet d'opposer nettement deux niveaux, différents par leur cohésion : une sorte de pellicule durcie et se desquamant, surmontant un niveau sableux peu consistant. La partie la plus superficielle est un dense feutrage de filaments enchevêtrés, agglomérés, formant un revêtement continu incluant des particules étrangères comme des fétus de paille et des graines de graminées. Parfois, la surface de ce réseau est différenciée en minuscules cuvettes, dont le fond est tapissé de filaments denses. Chaque filament est constitué d'une file ininterrompue de cellules toutes séparées par des cloisons plus ou moins circulaires. Certains filaments sont intensément colorés en rouge dans toute leur longueur, d'autres sont incolores et, d'autres enfin, sont bourrés de chloroplastes. Comme le nombre de chloroplastes est considérable dans chaque cellule, il faut croire que l'activité synthétique est intense. Ainsi, toute une évolution se dessine depuis les jeunes filaments incolores à ceux en pleine activité chlorophylienne, puis ceux, enfin, dans lesquels l'oxydation de la chlorophylle fait apparaître la pigmentation rouge. En même temps, les parois s'épaississent. En présence d'eau et des sucres synthétisés, il y aurait formation d'une sorte de gelée, conclut M. Gillet, qui agglutinerait le sol et les filaments eux-mêmes.

Le second échantillon correspond à une croûte sableuse de couleur bistre contenant de rares agglomérats. Ces espèces de concrétions sont pénétrées dans toute leur masse de très fins filaments de nature mycélienne. Ces filaments, par leur finesse, peuvent contourner tous les obstacles et s'infiltrer partout, entourant chaque grain de sable d'une sorte de feutrage.

Ce type de première infestation permet de reconsti-

tuer la chaîne d'installation sur un sol vierge. Dans un premier temps, à la faveur de l'humidité et de résidus organiques, des hyphes mycéliens saprophytes *pénètrent dans la couche superficielle de sable et en agglomèrent les grains*. Dans un deuxième temps, et uniquement en surface, une algue filamenteuse s'installe et par assimilation chlorophylienne fabrique des composés organiques sécrétés en *une matière interstitielle reliant les grains de sable*. Les hyphes mycéliens créent donc les conditions nécessaires à l'installation de l'algue à filaments. En revanche, on n'observe pas de lichens.

Au total, ces structures de surface à forte cohésion modifient considérablement la dynamique d'écoulement de surface(1) et probablement l'érosion éolienne de saison sèche elle-même. Elles s'avèrent plus importantes que le sol lui-même, assez indifférentes vis-à-vis des caractéristiques granulométriques et indépendantes de la position topographique. Celle-ci joue un rôle, en revanche, sur les plaques de sols nus compacts.

5.3.2 : Les plaques de sols nus compacts :

Ces unités, qui ont déjà retenu notre attention dans la région de Pô (1980, p. 201-202), ont fait l'objet d'une étude descriptive très détaillée sur le bassin-versant d'Imiga (carte 2), qui ne nous éclaire pas pour autant sur toutes les modalités de leur genèse, du moins dans le cas des plaques de sols nus de bas de versants. Le cas des plaques de sols nus à la périphérie des termitières est plus simple.

5.3.2.1 : Les chappes imperméables autour des termitières dégradées :

E. Roose (1976, 1981) a montré le rôle capital joué par

(1) *Le développement des algues a été constaté jusqu'en zone sahélienne, à la surface des sols dégradés par le surpâturage, notamment par F. Penning de Vries et al. (1982, p. 358). Les auteurs parlent de "nattes de filaments" dont la surface devient hydrophobe, difficile à mouiller lorsque les filaments sont morts. Ces structures expliquent le ruissellement sous de petites pluies.*

les termites dans l'évolution des versants en milieu de savane. Leur action est multiple et sera reprise par conséquent dans l'analyse des processus. Le brassage des sols, qui leur confère une macroporosité et favorise l'infiltration, est une influence directe à souligner, contrariant de manière heureuse les tendances à l'imperméabilisation décrites précédemment.

Mais les termites ont aussi un rôle indirect, consécutif à la dégradation ou à l'abandon de leurs édifices. Cette destruction partielle ou totale entraîne la mise en place d'une chappe de couleur claire, dissymétrique par rapport à l'édifice lui-même et dont le grand axe est dans le sens de la pente. Ces taches blanches, piquées d'un point noir correspondant à l'installation très fréquente d'arbustes sur la termitière elle-même, sont aisément identifiables sur photographies aériennes. Dans toute la région au nord de Zorgho et sur le bassin-versant d'Imiga en particulier, ces édifices sont nombreux sur les hauts de versants, où les horizons indurés sont peu profonds : ils constituent ainsi l'une des caractéristiques du géofaciès G2 (Fig. 5.5). Il s'agit soit du genre Trinervitermes, dont les constructions ne dépassent guère 50 à 60 cm, soit plus souvent d'édifices épigés plus élevés (1 à 2 mètres) pouvant être rattachés à deux autres genres (Cubitermes, Macrotermes). Dans ce cas, les pluies violentes créent un effritement de ces monticules qui va s'accélérant. Le dépôt et la consolidation du matériel argilo-sableux alentour créent une chappe imperméable, un "parapluie asphyxique" (Boudet, 1972), de dimension décamétrique, qui exacerbe le ruissellement. Ce dernier est peu capté par les galeries de la termitière en voie de destruction car il reste, même au stade ultime, une sorte de cône autour duquel divergent les écoulements venus à l'amont.

5.3.2.2 : Les sols nus compacts de bas de versant :

Dans ce cas, le caractère compact de la structure superficielle intéresse le sol proprement dit et non une organisation superficielle, qui lui serait superposée.

- Premier constat : les caractéristiques granulométri-

ques de l'horizon apparent après décapage superficiel sont variables. A titre d'exemple, les échantillons E3-E4 d'une part et E6 d'autre part, prélevés entre 0 et 5cm de profondeur, sur deux de ces plaques (Fig. 5.6), sont de nature différente : argileuse ou argilo-sableuse dans le premier cas, sablo-limoneuse dans le second (triangle de texture de Jamagne). Il ne semble donc pas, à priori, qu'un contraste textural bien défini avec l'horizon décapé (horizon A généralement sableux, humifère) soit responsable de conditions *originelles* défavorables, tant du point de vue du régime hydrique que de l'exploitation du sol par les racines. Toutefois, cette hypothèse peut ne pas être écartée si l'on considère simplement que ces plaques en sont à des stades plus ou moins avancés d'une même évolution, d'une même dégradation d'origine texturale. Des observations de longue durée seraient dans ce cas tout à fait nécessaires.

Ajoutons enfin que l'état de surface de ces unités peut être caractérisé par des micro-marches d'escalier (site de E3 et E4 par exemple) ou, plus étonnamment, par des fentes (de retrait ?) polygonales (site de E6).

Un point commun entre ces unités correspond en revanche à leur position en bas de versant. Pour des raisons physiques mais aussi anthropiques sur lesquelles l'analyse des processus et des formes nous éclairera, ces sections de versant sont soumises à une grande vulnérabilité vis-à-vis de l'érosion hydrique et éolienne. La genèse de ces structures compactes est à notre avis postérieure au décapage des graminées, probablement associée aux faibles teneurs en matière organique et à une action biogène limitée.

Les phénomènes d'"ultradessication"(1) décrits par A. Chauvel (1977) et tout à fait caractéristiques de notre zone d'étude à saisons contrastées, pourraient également affecter ces sols de bas de pente dénudés, expliquant leur "érosion sélective superficielle".

---

(1) *Nous avons cherché à préciser les variations de température et d'humidité dans ces sols. Malheureusement, une panne de notre thermographe ne nous a pas permis d'obtenir les données thermiques ; quant aux tensiomètres, leurs limites d'utilisation étaient ici dépassées.*

CONCLUSION.

Depuis une date relativement récente, des auteurs de plus en plus nombreux s'efforcent de souligner le rôle fondamental des structures de surface des sols. Notre constat en milieu de savane, essentiellement descriptif et malheureusement pas assez combiné à des mesures expérimentales de comportement, va dans le même sens.

Ces structures de surface, d'origine physique ou biologique, en relation avec la pédofaune, modifient considérablement le comportement hydrodynamique du sol et les modalités de l'érosion hydrique mais aussi éolienne. Par leur caractère peu perméable, elles limitent en effet l'infiltration et exacerbent le ruissellement. En revanche, leur rigidité, leur cohésion, peuvent dans le même temps, par un paradoxe apparent, limiter l'érosion, du moins en deçà d'un certain seuil d'agressivité climatique. Ces structures, qui constituent une interface étroite entre lithosphère et atmosphère et masquent plus ou moins le sol, se révèlent être en définitive un facteur d'érosion plus décisif que la nature pédologique proprement dite.

Cette dernière joue cependant son rôle. Les sols ferrugineux, largement présents sur les interfluves quelle que soit la nature du substratum, ne sont pas synonymes d'uniformité. La diversité de leur comportement est à rattacher au caractère plus ou moins profond de l'horizon induré. Les surfaces gravillonnaires à carapace sub-affleurante ne favorisent pas strictement la genèse du ruissellement mais du moins le ruissellement concentré, lorsque la capacité d'infiltration est dépassée. On admettra que ces surfaces gravillonnaires constituent, une fois encore, un état de surface particulier !

En revanche, le ruissellement peut être capté, sur versants ou dans les bas-fonds, partout où les sols à tendance vertique (vertisols ou sols bruns eutrophes) présentent des fentes de retrait.

Plus encore que l'analyse des autres agents d'érosion, l'examen des sols nous a conduit à évoquer déjà les processus et même certaines formes d'érosion. Les mesures expérimentales aux différentes échelles spatiales doivent aider maintenant à leur compréhension.

LIVRE II

LES MESURES, LES PROCESSUS ET LES FORMES D'EROSION AUX DIFFERENTES ECHELLES SPATIALES

INTRODUCTION

L'installation d'équipements de mesures ponctuelles, sur parcelles expérimentales ou sur bassins versants répond au besoin évident de quantifier l'activité de processus morphogéniques - notamment ceux de l'ablation par l'eau - dans des régions (sud du domaine soudanien) ou à des échelles peu étudiées (petits bassins). Les données obtenues sont donc complémentaires des résultats, parfois méconnus, des travaux de l'ORSTOM, du CTFT ou de l'IRAT ; travaux dont nous avons cherché à faire par ailleurs une synthèse accessible.

L'évaluation de la vitesse de l'érosion constitue une préoccupation de la géomorphologie quantitative (Coque, 1977) mais les données de mesures doivent être appréciées en fonction des caractéristiques physiques et humaines du milieu, notamment de la durée de retour des évènements climatiques exceptionnels. Elles doivent être aussi critiquées du fait des phénomènes de discontinuités spatio-temporelles, très tôt soulignés par J. Tricart (1962, 1978), mais que l'on perd de vue à l'aval d'une case d'érosion ou à l'exutoire d'un bassin. De ce point de vue, les recherches stationnelles sont inséparables d'une pratique répétée et la plus large possible du terrain qui, seule, nous a permis de reconnaître les rares indices d'une accumulation ou la succession des formes d'érosion au long du versant.

CHAPITRE VI

LA METEORISATION A L'ECHELLE PONCTUELLE ET L'EROSION SUR PARCELLES EXPERIMENTALES OU SUR VERSANT

Les processus élémentaires d'érosion se répartissent en deux groupes (Coque, 1977). L'ensemble des mécanismes, qui concourrent à l'attaque des roches mais aussi des sols, constitue la météorisation. Les autres représentent des processus de transport, qui fonctionnent à l'échelle du versant.

6.1 LA METEORISATION.

La météorisation des roches cohérentes ou des sols plus ou moins meubles correspond à une érosion élémentaire ou ponctuelle, par désagrégation et/ou altération, suivant des processus d'attaque mécanique, chimique ou biologique.

Cette action est généralement lente mais elle peut être aussi instantanée. Dans un cas comme dans l'autre, elle est donc difficilement perceptible dans son déroulement et peu reproductible en laboratoire. Aussi les données qui concernent cette préparation du matériel sont-elles peu nombreuses, hormis celles qui sont relatives au travail de la mésofaune, précisément étudié par E. Roose (1976) et sur lesquelles nous reviendrons. Le plus souvent, les facteurs d'évolution nous échappent, qui fonctionnent à une échelle de temps qui n'est pas la nôtre. C'est principalement le cas pour les versants rocheux, qui méritent par conséquent d'être étudiés séparément.

6.1.1 : Les processus peu perceptibles sur versants rocheux:

L'identification de certaines formes oblige, malgré les difficultés déjà signalées, à s'interroger sur la nature des mécanismes qui les engendrent. Trois types d'attaques, chimique , biologique et enfin mécanique, sont abordés tour à tour. Les deux premiers exemples n'ont qu'une valeur indicative tandis que l'analyse du thermoclastisme s'appuie au moins sur une analyse détaillée des variations thermiques.

6.1.1.1 : L'altération chimique : un exemple d'impact sur les versants schisteux.

Cet exemple nous est fourni à partir d'un ensemble d'observations effectuées dans une région du sud du Burkina Faso (Mietton, 1980). Dans le secteur de Tiébélé, les crêtes schisteuses birrimiennes ne sont pas (ou plus) cuirassées. Le modelé de détail est marqué par un aspect profondément chaotique en surface. La marche y est difficile dans un dédale de blocs individualisés mais stables. De cette topographie apparemment confuse, il ressort pourtant que les blocs rocheux sont allongés selon la direction (N90°E), celle de la schistosité et des nombreux filons de quartz. Recoupés par des diaclases obliques, ces blocs sont séparés par des "couloirs" de largeur et de profondeur variables, généralement décimétriques, dont le plancher est tapissé de grains de quartz. Tandis que la surface des blocs est très irrégulière, leurs flancs subverticaux sont généralement lisses et couverts soit d'une patine ferrugineuse rougeâtre, soit d'un placage de quartz plus ou moins craquelé. Celui-ci peut être détaché par petits panneaux et, sous ces éclats, la patine apparaît parfois.

Le débitage des blocs nous semble donc commandé par les filons de quartz, évidemment très résistants en eux-mêmes, mais constituant autant de lignes de faiblesses vis-à-vis d'une altération qui progresserait au contact de la roche et du quartz. Ces processus de démantèlement se perpétuent-ils ? On peut le penser dans la mesure où une circulation d'eau de pluie acide, ralentie dans les fissurations, suffirait pour une dissolution de la silice et un dépôt d'hy-

droxydes de fer. La patine ainsi formée contribuerait en s'épaississant à fragmenter ensuite le panneau de quartz. Cette migration actuelle du fer est en outre confirmée par l'examen des lames minces. Dans tous les schistes, par exemple ceux de Dem (Pascual, 1980), quelle que soit leur quantité de silice libre, le *fer occupe les positions fissurales*, indiquant très nettement une imprégnation postérieure à leur altération.

6.1.1.2 : Un exemple d'action biologique végétale :

L'intervention des végétaux jusque sur ces substrats rocheux ne doit pas être sous-estimée, même si elle ne donne pas véritablement naissance à des formes spécifiques.

L'occasion nous a été donnée, au sud de Tiébélé, d'apprécier le pouvoir de dislocation d'un matériel rocheux volumineux par les racines d'un arbuste. L'ouverture d'une fracture affectant une grosse boule de granite de 10 tonnes environ, dans laquelle s'est logé un arbuste de moins de 2 mètres de hauteur, a été mesurée à deux ans d'intervalle suivant des repères précis (Mietton, 1980).

Les résultats sont les suivants :

Dates / Mesures	9-11-1977	25-8-1979
AB	34,5 cm	36,1 cm
AC	38,0 cm	40,4 cm
DE	37,6 cm	27,1 cm
FG	32,6 cm	23,1 cm

Tableau 6.1 : Déplacement d'une boule de granite sous l'action des racines d'un arbuste.

Cette comparaison met en évidence une mobilité des blocs qui est loin d'être négligeable, surtout à une échelle de temps géologique et en fonction de paléoclimats qui ont favorisé des couvertures végétales plus denses. D'autre part, on enregistre dans ce cas précis non pas un simple élargissement sur toute la longueur mais plutôt une sorte de mouvement tournant. Ce dernier confirme que seule la crois-

sance de l'arbre est en cause et non pas la gravité ou un affaissement de terrain d'ailleurs bien improbable sur une pente quasi nulle.

6.1.1.3 : Une attaque mécanique très probable : le thermoclastisme.

La thermoclastie correspond à la fragmentation d'une roche cohérente sous l'effet des seules variations de températures. C'est un processus complexe et, comme tel, encore très controversé.

Les essais effectués en laboratoire sont à notre avis peu assimilables au phénomène grandeur nature. D'une part, l'échauffement superficiel des roches y est dû au contact de l'air et non plus au rayonnement solaire (Tricart, 1977). La couleur des roches, facteur capital puisqu'il détermine leur pouvoir réflecteur, ne joue pas de rôle puisqu'un simple échauffement ne fait pas appel au rayonnement infrarouge (Journaux et Coutard, 1974). D'autre part, la taille forcément réduite des échantillons ne prend pas en compte l'inertie thermique, mise en évidence précédemment, à faible profondeur. La notion de volume est ici capitale. Enfin, les protocoles expérimentaux auraient intérêt à intégrer au maximum des alternances humectation-dessication ; nous verrons en effet que l'évaporation de l'eau de pluie peut dans certains cas jouer un rôle essentiel.

Quoi qu'il en soit, le phénomène est complexe. La dilatation des roches est certes admise en liaison avec l'échauffement. Elle est variable suivant leur nature : supérieure en moyenne, il faut le souligner, pour les granites (coefficient d'expansion linéaire moyen de $8 \pm 3 \times 10^{-6}$ pour un intervalle de 20 à 100°C) par rapport aux andésites et diorites ($7 \pm 2 \times 10^{-6}$) et surtout aux basaltes et gabbros ($5,4 \pm 1 \times 10^{-6}$(1). Mais, comme le souligne J. Tricart (1977), le cisaillement, responsable de la desquamation, suppose une discontinuité dans la pénétration des ondes thermiques. Celle-ci doit être en outre située à faible profondeur.

---

(1) *Handbook of Physical Constants.*

Quels enseignements de terrain pouvons-nous apporter dans ce domaine, au-delà d'une meilleure connaissance des variations de température dans la roche en place ?

1°/- L'existence de matériel rocheux de petit calibre, à la surface des affleurements, est incontestable. Les éclats "frais" sont particulièrement nombreux sur les laves sombres des roches basiques birrimiennes. Nous les avons observés dans les collines proches du lac de Sian, à l'ouest de Kaya, ou plus encore à Pilimpikou (sud de Yako). Ces plaquettes, dites de desquamation, peuvent être retrouvées libres au milieu de la blocaille ou même, comme "posées", non déplacées, mais détachées de leur support. La couleur vert sombre à noir en surface tranche fortement sur le vert beaucoup plus clair de la face interne. La taille, d'ordre millimétrique à centimétrique en épaisseur, de plusieurs centimètres sur la plus grande longueur, l'emporte nettement sur celle du matériel plus fin, plus petit et aussi moins abondant sur les affleurements de granite.

2°/- La couleur de la roche représente un facteur d'évolution décisif. Les roches sombres (basaltes-andésites-amphibolites etc...) des collines birrimiennes ont une capacité d'absorption calorifique bien supérieure à celle des roches cristallines(1). On peut, à titre indicatif et malgré le changement de nature, rappeler la valeur du maximum thermique enregistré sur une cuirasse, elle-même très foncée. Celui-ci dépasse 60°C à 2 cm de profondeur contre 51°C dans le granite. Toutes conditions égales par ailleurs, pareil écart, de l'ordre de 10°C, n'est pas inconcevable, au moment des échauffements maximums, entre les substrats birrimiens et les roches du socle les plus claires.

3°/- La structure en coussins (pillow-lavas) des laves basiques, fluides, mises en place sous la mer sous de fortes pressions, prédispose également à la thermoclastie. Il s'agit en effet d'une structure amygdalaire, faite de feuillets concentriques autour d'un noyau

---

(1) *Nous n'avons pu malheureusement enregistrer ces valeurs, faute de pouvoir acheminer le matériel lourd de forage sur des sites birrimiens, éloignés de Ouagadougou (Mietton, 1980, p. 178).*

mieux cristallisé. On conçoît que cette disposition puisse favoriser l'écaillage.

Au total, couleur sombre et structure en coussins semblent l'emporter sur la dilatation moindre des basaltes pour expliquer leur desquamation plus fréquente que sur les granites.

4°/- La thermoclastie aux dépens des granites est commandée par d'autres facteurs :

- la perméabilité de ces formations cristallines, liée à leur degré de fissuration et à leur porosité ouverte ;
- l'origine multiple des variations thermiques et la répétition des tensions.

La perméabilité est généralement peu évidente à l'échelle des affleurements granitiques. En revanche, sur une lame mince du granite de Ouagadougou (site de mesures des températures), la microfissuration est nette. Les fissures, grossièrement parallèles[1] remplies de microcristaux brisés, traversent les minéraux, par ailleurs non altérés et réunis en une structure grenue. Cette microfissuration est bien d'origine tectonique. Elle est probablement fréquente sur ces granites des plates-formes antécambriennes ayant subi de multiples efforts.

Les mesures de laboratoire effectuées sur un autre échantillon de ce même site de Ouagadougou révèlent une porosité assez élevée, de l'ordre de 2,6% (Fig . A.6.1).

La perméabilité, principalement fissurale, apparaît comme une condition suffisante à une bonne pénétration des ondes thermiques. Celles-ci peuvent être ainsi génératrices de tensions *non seulement superficielles mais à une profondeur d'ordre centimétrique*. La progression d'une onde d'échauffement ou de refroidissement ne se fait donc pas uniquement par le haut, de manière simple et parallèle à la surface, mais aussi latéralement, dans la masse, à partir de ces lignes de faiblesse. Cette progression peut en outre être inégale suivant les différents minéraux rencontrés.

---

(1) *Le repérage dans l'espace de l'échantillon n'ayant malencontreusement pas été fait, nous ne savons pas encore s'il s'agit de fissures parallèles, obliques ou perpendiculaires à la surface.*

Les variations thermiques agissent de manière répétée en liaison avec le rayonnement solaire mais elles sont surtout brutales, comme on l'a vu au chapitre III, lors des averses, même de faible quantité, tombant sur une roche surchauffée. *Le refroidissement a alors plusieurs origines* : la perte de rayonnement direct, l'impact de la pluie, l'évaporation des flaques ou des gouttes d'eau qui subsistent à la surface mais aussi une évaporation dans les interstices ou les fissures de la roche. Cette évaporation plus profonde devrait être la plus efficace dans les processus de fragmentation de tous les matériaux cristallins suffisamment perméables.

Conclusion.

Depuis les travaux de Blackwelder (1933) et Griggs (1936), de nombreux auteurs continuent de s'opposer sur l'efficacité réelle des variations thermiques dans la roche en place (Ollier, 1984). Compte tenu du caractère significatif des écarts de températures dans les premiers centimètres du substratum, il nous semble qu'une fatigue de la roche liée aux tensions successives est tout à fait concevable et seule susceptible de rendre compte de l'existence des éclats rocheux.

Ces écarts sont surtout très répétés, dans le domaine tropical plus qu'en toute autre zone, y compris désertique. Les échauffements demeurent en effet très élevés du fait de la situation latitudinale et du passage du soleil au zénith à deux reprises. Quant aux averses, elles sont suffisamment fréquentes durant une partie de l'année au moins pour multiplier l'occurrence de véritables chocs thermiques sur les roches volcaniques sombres surchauffées ou sur les roches cristallines mélanocrates moins échauffées mais plus perméables.

6.1.2 : L'efficacité de l'érosion pluviale sur les sols :

Même en l'absence de ruissellement, une averse entraîne toujours une érosion, liée à l'impact des gouttes de pluie. Cette action mécanique obligée détermine dans un premier temps une trituration des agrégats et une mobilisation d'éléments fins puis ouvre la voie à une intervention plus efficace du ruissellement (Féodoroff, 1965 ; Neboît, 1983).

Cette météorisation est fonction de différents facteurs : la sensibilité ou érodibilité du sol, l'état de surface de ce sol, l'agressivité de la pluie.

6.1.2.1 : L'érodibilité du sol.

La capacité de résistance du sol augmente avec les teneurs en argile et en matière organique humifiée, qui assurent la stabilité des agrégats vis-à-vis de l'eau. Elle peut être définie par un indice de stabilité structurale, mis au point par Hénin, qui ne prend en compte toutefois que les seules données texturales. Les indices, calculés en différents sites, varient entre 1,2 (Pô) (Mietton, 1980) et 2,3 (Saria) ou 2,4 (Gonsé) (Roose, 1981) mais traduisent *une stabilité mauvaise à médiocre*. D'une manière plus générale, dans le pays, la plupart des sols ferrugineux sur granite ont des horizons de surface sableux ou sablo-limoneux ce qui les rend sensibles à l'érosion pluviale, principalement au niveau des champs, où le stock d'humus s'épuise par minéralisation, en l'absence de fumures. Quant à la matière organique, les sols du Burkina Faso en sont en général très peu pourvus. Les taux, inférieurs à 1% en zone sahélienne, sont compris le plus souvent entre 1 et 2% dans le reste du pays (Boulet, 1976). A titre d'exemple, l'analyse de dix échantillons prélevés sur des terres cultivées du secteur de Sirgui, au sud-ouest de Kaya, donne une teneur moyenne de 2,1% sur les horizons de surface (0-5cm) et de 2,2% sur l'horizon inférieur (5-15 cm) ; les valeurs extrêmes étant respectivement de 1,17% et 3,24% dans le premier cas, de 1,36% et 3,27% dans le second cas, la texture étant limoneuse à limono-argileuse. Ces ordres de grandeur se retrouvent à Pô (Tab. A.5.1).

Ces valeurs, ainsi que celles beaucoup plus nombreuses données par les pédologues, attestent bien l'épuisement des terres par la culture en zone de savane.

La vulnérabilité des sols est également fonction de leur état de surface. Elle est maximale partout où le sol est travaillé, où la "détachabilité" des agrégats est renforcée par une perte de cohésion, une réduction des forces de frottement. Il suffit d'observer, pour

s'en convaincre, la surface d'une parcelle de Wischmeïer nouvellement piochée après une forte averse. Elle présente alors un aspect "fondu" : les traces de chaque motte se retrouvent mais aux reliefs en saillie font désormais place des monticules émoussés, séparés par des cuvettes à fond noir, bordées d'un liseré de sables.

La meilleure façon d'apprécier la puissance de l'érosion pluviale est d'observer le phénomène durant l'averse elle-même, sous des intensités instantanées maximales. On a alors l'impression de voir les mottes se tordre sous le choc ; elles sont véritablement cisaillées et le matériel est préparé, qui sera emporté dès qu'une lame d'eau se mettra à ruisseler. Au total, il semble bien que cette action d'érosion pluviale soit essentielle, du moins sur sol cultivé, supérieure à celle du ruissellement lui-même, ce qui expliquerait que ce sont très généralement les premiers écoulements qui sont les plus chargés à l'aval des parcelles expérimentales.

L'efficacité de l'érosion pluviale dépend enfin, pour un même sol, des caractéristiques de l'averse, plus précisément de l'intensité instantanée maximale et de l'intensité-durée.

6.1.2.2 L'érosion pluviale et l'agressivité climatique :

Le premier système de mesure de la saltation pluviale a été mis en place à la station I.R.H.O. de Niangoloko sur un sol ferrugineux tropical sableux, peu stable (sable : 92%, limon : 5%, argile : 3%).

Les particules de terre projetée ont été recueillies dans des bouteilles enfouies dans la terre , bouchées par des entonnoirs de 20cm de diamètre, situés à plusieurs millimètres au-dessus du sol. Chaque bouteille a été placée au centre d'une surface matérialisée par un cylindre de 40cm de hauteur. Le rayon des cylindres variait de 40 à 120cm (CTFT, 1979). Le tableau suivant fournit un exemple des résultats obtenus.

Rayon du cylindre en centimètres	Pluie de 46 mm	Pluie de 22 mm	Pluie de 9 mm
120	39,7	25,6	7,4
80	33,4	11,4	6,2
60	17,8	6,2	1,8
40	5,5	1,5	1,7

Tableau 6.2 : Etude de battance du sol à Niangoloko (Haute-Volta). Poids de terre recueillie par les "bouteilles-pièges" en grammes par 314 cm^2, en provenance de différentes surfaces et pour trois classes de pluie. in CTFT (1979).

La corrélation avec les différentes intensités des averses n'est malheureusement pas faite dans ce tableau. C'est ce que nous avons cherché pour notre part à préciser en recommençant l'expérience à Pô.

Sur ce site, des bouteilles en plastique ont été placées en terre, à 2cm, 4cm et 8cm au-dessus du sol. Leur goulot a été coupé et retourné en entonnoir (section de 55,4cm^2). Sur sol travaillé, la bouteille est retirée après chaque averse ; sur sol non pioché, elle est en revanche laissée en place et les projections sont recueillies sur un papier filtre préalablement fixé sur l'entonnoir.

Une dernière série d'expériences nous a conduit à ceinturer occasionnellement ces bouteilles d'anneaux ou couronnes circulaires de largeur variable (1,2 ou 4 cm), protégeant le sol et permettant ainsi d'évaluer une distance minimale de projection latérale.

Dans tous les cas, différentes précautions sont prises : contre le ruissellement, en faisant écran avec une tôle fixée à l'amont ; contre le vent en coiffant la bouteille d'un capuchon la protégeant vis-à-vis des poussières en suspension. Ce capuchon doit être enlevé très peu de temps avant l'averse, surtout si l'on fait la mesure en début d'hivernage, période où les coups de vents, précédant la ligne de grain, sont les plus forts.

L'ensemble des résultats obtenus sur limon sableux (argile : 8%, limons : 38%, sables : 54%), mis en rapport avec les caractéristiques des pluies, est regroupé dans les tableaux suivants.

Date	Pluie			Hauteur des projections (cm) par rapport au sol pioché	Quantité de terre (g)	Quantité de sables		Quantité de sab. gros.		Poids du gravillon le plus lourd (g)
	Hauteur (mm)	Indice R	Intensité instantanée maximale			en g	en %	en g	en %	
9.7.79	18,1	5,75	105 mm/h pendant 2'	2 cm 4 cm 8 cm	1,5462 1,2395 0,4599	1,033 0,8864 0,2782	66,8 71,5 60,5	0,3231 0,2587 0,0393	20,9 20,9 8,5	0,0084 0,0032 0,0017
16.7.79	37,5	23,24	64 mm/h pendant 7'	2 cm 4 cm 8 cm	4,9104 3,6068 1,8169	3,5312 2,5748 1,328	71,9 71,4 73,1	1,3631 0,8106 0,3734	27,8 22,5 20,6	0,0188 0,0094 0,0092
19.7.79	16,5	6,55	60 mm/h pendant 4'	2 cm 4 cm 8 cm	0,9497 0,8675 0,2933	0,6934 0,5885 0,203	73 67,8 69,2	0,1776 0,1431 0,0299	18,7 16,5 10,2	0,0016 0,0018 0,0012
7.8.79	37,3	12,93	75 mm/h pendant 2'	2 cm 4 cm 8 cm	4,7118 2,6735 0,9930	3,6727 2,0206 0,68	77,9 75,6 68,5	1,3123 0,5265 0,1307	27,9 19,7 13,2	0,0108 0,0057 0,0063
18.8.79	20,5	11,18	90 mm/h pendant 2'	2 cm 4 cm 8 cm	4,4053 2,0594 1,0499	2,7265 1,2208 0,6536	61,9 59,3 62,3	1,191 0,4576 0,1583	27 22,2 15,1	0,0121 0,0083

Tableau 6.3 : Saltation pluviale sur sol travaillé.

Date	Pluie			Hauteur des projections (cm) par rapport au sol non travaillé ou protégé (anneaux)	Quantité totale projetée (g)	Quantité de sables		Quantité de sab. gros.		Poids unitaire maximal
	Hauteur (mm)	Indice R	Intensité instantanée maximale			en g	en %	en g	en %	
7.8.79	37,3	12,93	75mm/h pendant 2'	2 cm 4 cm 8 cm	4,6296 1,1085	4,0131 0,8355	86,7 75,4	1,2491 0,1751	27 15,8	0,0092 0,0062
21.8.79	23,6	16,89	102mm/h pendant 5'	2 cm 4 cm 8 cm	2,5786 1,5378 0,2090	1,8196 1,0814 0,1066	70,6 70,3 51	0,6003 0,3601 0,0256	23,3 23,4 12,2	0,0161 0,0084 0,0064
7.8.79	37,3	12,93	75mm/h pendant 2'	2 cm 1 4 cm 2 8 cm 3	3,1132 2,2203 1,12	2,2856 1,6048 0,8284	73,4 72,3 73,9	0,674 0,3916 0,1703	21,6 17,6 15,2	0,0088 0,0051 0,0048
23.8.79	20	6,03	40mm/h pendant 6'	4 cm 1 4 cm 2 4 cm 3	0,8371 0,6033 0,4777	0,4954 0,3863 0,3004	59,2 64 62,9	0,1434 0,1044 0,0849	17,1 17,3 17,8	0,0043 0,0043 0,0030

1: Anneau de 1cm de largeur ; 2: Anneau de 2cm ; 3: Anneau de 4cm.

Tableau 6.4 : Saltation pluviale sur sol non travaillé ou partiellement protégé.

L'échantillon est malheureusement trop peu fourni pour que des corrélations multiples ou simples soient véritablement significatives.

* Sur sol nu et travaillé, les quantités de terre projetées semblent toutefois en rapport assez étroit avec *l'agressivité de la pluie*, c'est-à-dire avec le couple intensité-durée. L'averse du 16 juillet 1979 étant quatre fois plus agressive que celles du 9 et du 19 juillet, les projections sont entre trois et cinq fois plus importantes. Comme l'a écrit J. Tricart, "la destruction des agrégats est un phénomène cumulatif ; les gouttes successives atteignant le même agrégat ajoutent leurs effets" (Tricart, 1972).

* Les corrélations sont d'autant plus difficiles à mettre en évidence que des facteurs essentiels, comme l'*humidité préalable* à l'averse ou plus encore à sa phase d'intensité maximale, sont méconnus. De ce point de vue, l'examen détaillé des pluviogrammes peut apporter une aide précieuse et rendre compte de l'efficacité de certaines averses comme celles du 7 et 18 août. A l'inverse des trois tornades de juillet qui s'abattent très brutalement, les épisodes orageux d'août commencent calmement (intensité inférieure à 20mm/h pendant 11 minutes) ou même très mollement (intensité inférieure à 2mm/h pendant 38 minutes le 18 août). Dans ce cas, les phases les plus intenses vont donc frapper un sol déjà humecté et plus sensible à l'érosion (Hénin, 1976). Leur efficacité sera ainsi maximale.

* *L'intensité instantanée maximale* peut rendre compte, quant à elle, des *écarts* sur la *taille maximale des grains de sable*, notamment entre deux pluies de même agressivité globale : 9 et 19 juillet ; 7 et 18 août. Mais la relation ne se vérifie pas le 16 juillet ! Il faut noter enfin que cette érosion pluviale ne concerne pas seulement des particules fines mais aussi des sables grossiers dans une proportion voisine de 20% (du moins jusqu'à 4cm au-dessus du sol) alors que cette proportion dans le sol ne dépasse pas 30%.

Si l'on compare les résultats sur sol pioché, pour une

même pluie, avec et sans anneaux ceinturant les bouteilles, il apparaît que les projections se font de manière principalement oblique, latérale, puisque la charge mesurée dans le cas d'une protection au sol représente au moins les 2/3 de ce qu'elle est sur sol nu ; ce pourcentage augmentant avec la hauteur de récupération.

Sur un sol de même texture mais caractérisé par une structure superficielle à forte cohésion, la quantité totale projetée est identique, sous une même pluie, à celle obtenue après piochage (7 août). Cela signifie-t-il que la croûte de battance est détruite par l'érosion pluviale ? Nous ne le pensons pas ; les projections sont probablement le fait d'un voile de sables libres, discontinu, qui transite sur cette organisation pelliculaire superficielle. D'ailleurs, le pourcentage de sables, plus précisément la part de sables fins, augmente par rapport à ce que l'on a sur sol pioché. Quant au calibre des projections, il est toujours en relation, semble-t-il, avec l'intensité maximale (pluies du 7 août et du 21 août).

En résumé, nous pouvons tout d'abord souligner la double action de l'érosion pluviale *qui ne se borne pas à préparer le matériel mais le déplace*. Rapporté aux unités habituelles (kg/ha), ce travail apparaît dans toute son efficacité : pour une averse de 20 mm, pourtant peu agressive (R = 6), ce n'est pas moins de 2,5 tonnes/ha qui sont remuées ; pour une averse de près de 40 mm, d'agressivité moyenne, plus de 7,5 t/ha. Encore s'agit-il de valeurs appréciées par défaut puisque les projections au-dessous de 2 cm ne sont pas prises en compte dans ce calcul !

6.2 L'EROSION HYDRIQUE MECANIQUE SUR PARCELLES EXPERIMENTALES.

6.2.1 : Analyse critique des méthodes de mesures sous pluies naturelles : choix et limites.

Cette analyse critique doit permettre de préciser l'intérêt de telles études mais aussi leurs limites et, d'autre part, de présenter

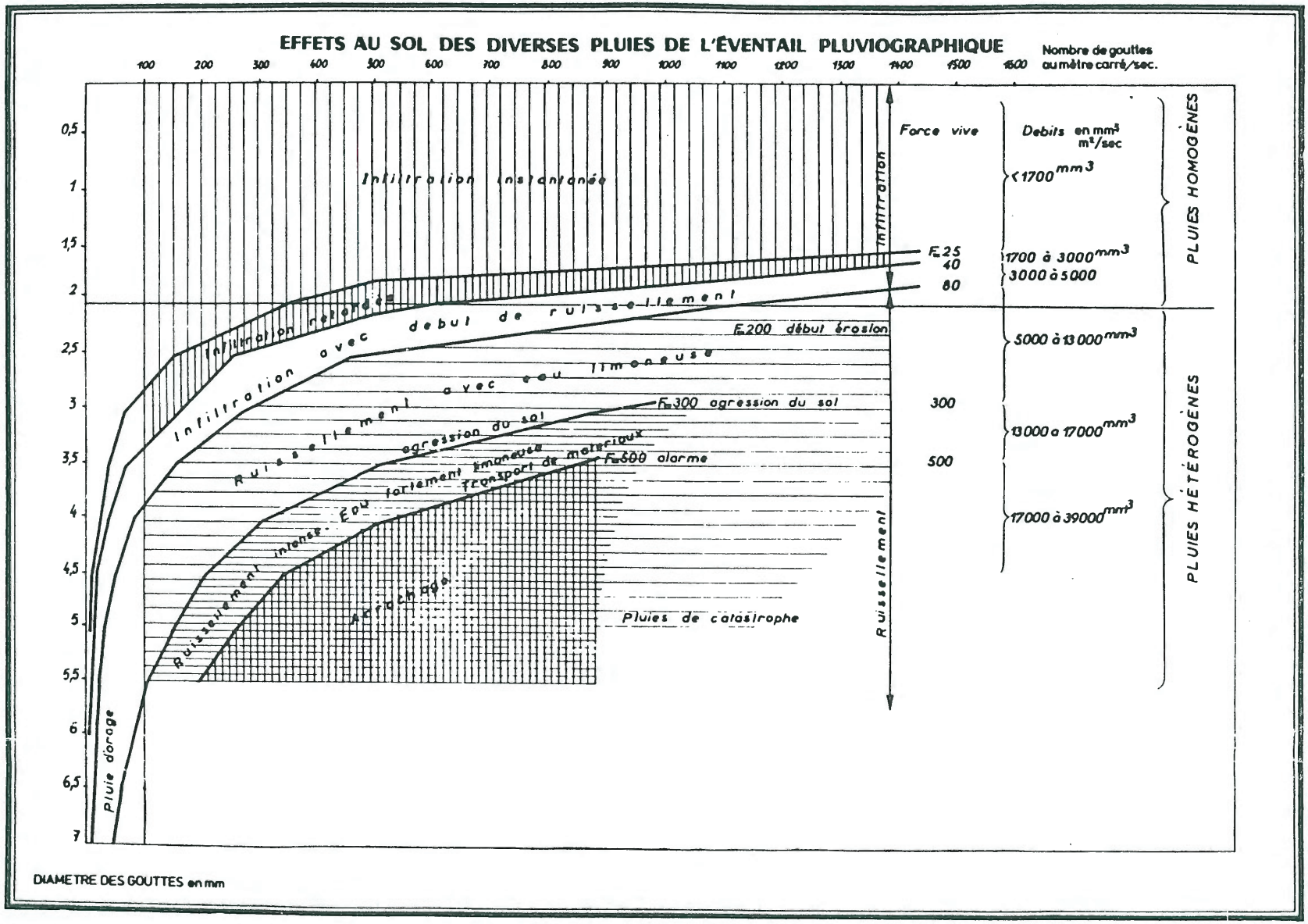


Fig. 6.1 · Erosion pluviale en fonction du nombre et du diamètre des gouttes de pluie. *In C. Barat (1957).*

non pas tant les techniques elles-mêmes (Fournier, 1954 ; Roose, 1968, 1973 et 1981), que les contraintes de tous ordres qui leur sont liées. Cet exposé est fait en réponse aux questions posées par de jeunes enseignants-chercheurs africains, qui ne disposent pas de moyens matériels comparables à ceux des instituts de recherche, ni de beaucoup de temps.

6.2.1.1 : L'intérêt des parcelles expérimentales et leurs limites :

L'installation par les pédologues, les agronomes, les hydrologues et les géographes de parcelles-témoins répond au souci de quantifier les processus morphogéniques, tels que le ruissellement élémentaire. De taille petite à moyenne (quelques dizaines à quelques milliers de m^2) et bien implantées, c'est-à-dire placées dans une portion d'espace représentative, ces parcelles présentent l'avantage de constituer des milieux globalement homogènes, à l'inverse des bassins-versants. Elles permettent aussi de cerner le rôle de tel ou tel facteur conditionnel du ruissellement, *en comparant* des réponses à une même pluie, entre témoins, ou sous des pluies différentes, pour une même case d'érosion.

Les parcelles ne donnent probablement qu'*une idée relative de l'érosion* du fait de leur caractère fermé à l'amont. Nous manquons toutefois de mesures, en savanes arbustives peu denses, sur l'effet de la longueur de pente, pour établir si cette longueur est significative ou non.

Les valeurs chiffrées de vitesses d'érosion doivent être considérées comme des ordres de grandeur (Coque, 1977), d'autant plus que les techniques de mesures des charges ruisselées sont délicates, comme nous le verrons. En revanche, l'appréciation des coefficients de ruissellement est beaucoup moins entachée d'erreurs. Mais ces données sont d'autant plus précieuses et valables qu'elles résultent de mesures répétées pendant plusieurs années et qu'elles sont mises en rapport avec les phénomènes climatiques traduits en termes d'agressivité et de fréquence .

Si la comparaison des données unitaires, mensuelles ou

annuelles est vivement recommandée à l'échelle locale, en revanche, la confrontation des résultats entre sites éloignés doit être conduite avec prudence. "Il ne faut comparer que des choses comparables, c'est-à-dire des valeurs obtenues par des méthodes identiques, sur des superficies analogues" (Neboît, 1983). A cet égard, la référence à une parcelle standard, comme la parcelle dite de Wischmeïer, est très souhaitable mais, même dans ce cas, il faut s'assurer que le protocole suivi est partout identique. Ainsi, à Gampela sur un site étudié par le CTFT et, plus encore, sur notre parcelle de référence de Pô-Banon, les valeurs relativement faibles du ruissellement et de l'érosion annuelles ne se comprennent que par la fréquence plus élevée des binages superficiels à la houe(1).

6.2.1.2 : Les choix techniques : parcelles et systèmes collecteurs :

* Les parcelles du Burkina Faso, pour lesquelles nous disposons de résultats, se différencient d'abord par leur taille: les unes comprises entre 100 et 250 m^2, les autres de plus de 1 000 m^2 (Sirgui, Oursi) comprises généralement entre 3 000 et 8 000 m^2 (Gampela, Linoghin, Bané). Ces cases d'érosion sont limitées, dans le premier cas, par des tôles fichées dans le sol, avec soin, pour limiter l'infiltration ; dans le second par des bourrelets de terre, moins coûteux à mettre en place mais pouvant entraîner une augmentation artificielle de l'érosion, estimée par E. Roose (1981) à 1 ou 2 tonnes/ha/an.

La distribution des parcelles en deux groupes suivant leur taille est étroitement liée aux différences observées entre systèmes collecteurs.

* Les systèmes collecteurs peuvent être classés en

---

(1) *Il faut s'en tenir à l'expression "binage à la houe sur 5 cm tous les mois pluvieux en vue de briser la croûte superficielle" (Roose, 1968) plutôt qu'au "travail superficiel pour éviter la formation d'une pellicule de surface" (CTFT, 1979). Ces pellicules se reconstituant très vite après chaque averse, la seconde pratique est obligatoirement beaucoup plus répétitive !*

trois types :

- les cuves avec déversoirs tarés et limnigraphes ;
- les cuves ou fûts avec partiteurs ;
- les cuves simples.

Les premières sont associées aux parcelles les plus vastes, où les volumes ruisselés peuvent être évidemment les plus forts ; les autres sont situées à l'aval des cases les plus petites. Dans chaque cas, nous nous proposons non pas tant de rappeler la méthode de mesure que d'en souligner les avantages et les inconvénients.

* *Les cuves équipées de déversoirs tarés et de limnigraphes* donnent de bons résultats, si la présence des observateurs est permanente sur le terrain. Les débits liquides sont connus de manière précise grâce aux limnigrammes. Les débits solides correspondent à la somme des éléments grossiers recueillis dans la cuve et des suspensions évacuées au déversoir.

Toutefois, cette mesure de l'érosion nécessite de nombreux travaux : détermination du volume puis du poids sec des matériaux de la cuve, prélèvements périodiques au déversoir durant la crue, détermination des concentrations correspondantes au laboratoire. Les échantillons seront d'autant plus nombreux que le pas de temps entre prélèvements devra être réduit (5 minutes par exemple) pour une meilleure précision, notamment à la montée de la crue.

Outre le coût des installations, du traitement des échantillons (transport, laboratoires), le principal problème réside dans le recrutement d'observateurs compétents et encadrés. La main d'oeuvre est difficile à recruter sur place, surtout en début de saison, au moment des semis. Les techniciens, eux-mêmes, peuvent être rebutés par un travail ingrat, fréquemment conduit la nuit, dans des conditions assez impressionnantes !

Ces contraintes sont telles que même un organisme comme le CTFT a été amené à délaisser ce système à Oursi (Piot-Millogo, 1980) au profit de cuves à partiteurs. Bien évidemment, un chercheur isolé ne peut qu'exceptionnellement envisager pareille installation !

* *Les cuves ou fûts équipés de partiteurs* présentent l'incontestable avantage de permettre le calcul du volume global ruisselé, tout en n'en stockant qu'une partie. Dans l'absolu, cette dernière est fonction de la taille de la parcelle, qui devra être le plus souvent réduite, à moins de monter une série de cuves et partiteurs (Exemple: les deux parcelles de 3 000m^2 à Oursi sont équipées de trois cuves de 1,5 à 3,5m^3, reliées par deux partiteurs). Mais, dans ce cas, l'installation se révèle aussi coûteuse que précédemment.

La mesure de l'érosion se fait soit par précipitation de la charge en suspension après adjonction de sulfate d'alumine puis vidange avec des seaux ou siphonnage avec une pompe ; soit par prélèvements d'échantillons après agitation et remise en suspension.

Cette méthode présente l'avantage indéniable de ne pas nécessiter la présence, pendant l'averse elle-même , d'un personnel nombreux. Les opérations sont effectuées en plein jour, dans des conditions plus sereines. C'est là une garantie dans la qualité du travail, qui peut faire défaut dans le système précédent (communication orale de J. Piot). Seuls, les épisodes orageux rapprochés, qui ne nous laissent que trop peu de temps pour effectuer ces différents travaux, sont à redouter.

Les véritables inconvénients sont d'un autre ordre : d'une part, les partiteurs les plus perfectionnés sont coûteux, à moins qu'il ne s'agisse que de simples tubes déverseurs soudés sur des fûts; d'autre part, les risques d'erreurs existent du fait d'un possible engorgement partiel par des matières végétales (parcelles sous savanes, en début de saison des pluies par exemple). La planéité des partiteurs, des fûts doit être assurée de manière durable. Des tests doivent être menés *sur le terrain*, au moins au moment de l'installation, qui conduisent si besoin à une modification des fractions prévues initialement.

Globalement, la précision peut être estimée, d'après E. Roose (1984) à dix pour cent près. En ce qui nous concerne, elle nous a paru peu satisfaisante et nous avons donc recherché d'autres solutions sur notre site expérimental (Mietton, 1980).

* *Les cuves simples* ont pour objectif de stocker toute l'eau ruisselée. Elles ne sont implantées de ce fait qu'au bas de parcelles de petites dimensions. A l'aval d'une case de 100m² par exemple, en misant sur un coefficient de ruissellement de 80% pour une pluie de 100 mm, la cuve devra atteindre une capacité de 8m³. Le fond de la cuve est plan (Pô) ou régulièrement incliné (Sirgui), ce qui facilite l'appréciation des ruissellements les plus faibles. Dans tous les cas, les volumes ruisselés sont connus, grâce à cette méthode, de manière suffisamment satisfaisante par simple lecture d'une échelle limnimétrique(1).

Ce faisant, un autre problème apparaît, qui est celui de la vidange de ces cuves, longue à effectuer même avec une pompe. C'est une difficulté supplémentaire dans le cas de pluies rapprochées. Une vanne peut être installée à leur base mais elle doit ouvrir sur un puits perdu ou sur des fossés d'évacuation. Mais, dans ce cas, leur longueur est fonction d'une pente longitudinale qui, au Burkina Faso, est généralement faible (Photo 9).

La mesure de l'érosion est réalisée en revanche, comme dans les systèmes précédents, soit par précipitation de la charge, soit par prélèvements après remise en suspension. A Pô, nous avons d'abord opéré par adjonction de sulfate d'alumine (un demi-litre par m³ d'une solution de 100 mg/l) puis opté, dès 1979, dans un souci de gain de temps, pour le prélèvement d'un échantillon d'un litre placé ensuite à l'étuve, au laboratoire. Estimant toutefois que cette prise d'un litre pouvait être insuffisante et peu représentative, surtout par rapport aux gros volumes ruisselés dans les cuves, nous avons utilisé en parallèle un appareil(2) permettant de carotter toute la tranche d'eau après remise en suspension. Les mesures comparées, réalisées tout au long de l'hivernage 1980, ont montré une grande identité des concentrations.

---

(1) *Dans une cuve dont la surface de base est de 4m², une erreur de lecture à l'échelle de 0,5cm correspond à 0,2mm de lame d'eau ruisselée à l'aval d'une parcelle de 100m².*

(2) *Cet appareil a été imaginé par A. Poisson, hydrogéologue à l'H.E.R. Il s'agit d'un tube P.V.C. haut de 1,5m, d'un diamètre de 10cm monté sur une structure métallique. Une commande à distance permet le coulissement d'une plaque emprisonnant la colonne d'eau.*

Cette mesure de la charge remise en suspension dans la cuve principale ne peut dispenser de collecter la fraction la plus grossière dans une goulotte de petite taille ($0,3m^3$) ou, plus simplement, dans un fût directement placé sous le canal d'amenée au bas de la parcelle.

Un test réalisé le 23 juillet 1983 à Pô nous a permis d'estimer le caractère par défaut de la mesure dans le cas où cette fraction grossière n'est pas distinguée. L'opération a consisté ce jour-là à déverser dans le système collecteur une charge connue (7 kg), prélevée sur la parcelle de Wischmeïer, entraînée par un volume d'eau de 1,2 m^3 amenée par citerne. Huit prélèvements de la charge remise en suspension dans la cuve principale (1 à 1,1 mg/l) et dans un fût de 200 litres (10,7 à 11,7 g/l) nous ont permis d'obtenir une charge globale de 4 kg environ, soit un déficit de plus de 40% par rapport au poids réel !

En résumé, le système collecteur par cuves simples(1) à l'aval des parcelles expérimentales de petite taille, nous paraît la méthode la plus appropriée pour un chercheur disposant de peu de moyens et ne pouvant travailler durant les phénomènes orageux eux-mêmes. Il ne faut pas cacher cependant que ces dispositifs sont lourds à gérer et que le chercheur doit envisager une présence quasi permanente sur le terrain par lui-même ou, à défaut, par un personnel de confiance !

Cette méthode donne des résultats très fiables en ce qui concerne le ruissellement. Pour une bonne appréciation des débits solides, il est nécessaire d'adjoindre à ces cuves une goulotte ou réservoir de petite taille piégeant la fraction la plus grossière.

La présentation technique de ces dispositifs étant réalisée, il convient d'examiner les principaux résultats obtenus au Burkina Faso, durant quinze années (1967-1982), par différents organismes

(1) *Celles-ci peuvent être en fer ou en béton en fonction des coûts comparés et aussi des possibilités de transport de ce matériel.*

6.2.2 : Synthèse des résultats de 8 stations expérimentales (Tableaux 6.5.a et b).

Ce travail de synthèse reprend et complète celui effectué par E. Roose et J. Piot (1984), portant sur les quatre stations du centre du pays (Gampela, Gonsé, Linoghin et Saria[1]). Nous y ajoutons les résultats, en notre possession, obtenus à Oursi (zone sahélienne) et Bané (sud de la zone soudanienne) par le CTFT[2], à Sirgui (zone nord-soudanienne) par l'HER[2] et enfin à Pô-Banon, par nous-même, au sud du pays [3].

Ce travail répond au souci de regrouper une information souvent dispersée dans de nombreux rapports, pas toujours accessibles, conformément aux souhaits exprimés par certains responsables du Développement rural ou de la Recherche.

La lecture détaillée des rapports annuels et des résultats unitaires, la connaissance de chacun des sites d'observation ne nous autorisent pas, comme on l'a déjà signalé, à comparer tous ces résultats entre eux, mais au moins à les classer par grands types de parcelles, notamment en fonction de leur couvert végétal.

6.2.2.1 : Le ruissellement et l'érosion des parcelles sous savane :

Cinq des huit stations fournissent des informations relatives au ruissellement et à l'érosion sous savane (Gonsé, Saria, Linoghin, Bane et Pô).

Sur des pentes très faibles, comprises entre 0,5 et 3%,

---

(1) *Les résultats obtenus à Saria par le CIEH en 1978 sont adjoints à ceux présentés par E. Roose.*

(2) *CTFT : Centre Technique Forestier Tropical (Haute-Volta).*
HER : Hydraulique et Equipement Rural (Service Hydrologie).

(3) *Les mesures de ruissellement et de l'érosion faites à Niangoloko, au sud-ouest du pays (10°16'N) nous sont connues grâce à R. Christoï (1966). Effectuées entre 1956 et 1961, elles sont les seules représentatives d'un contexte beaucoup plus humide. Les informations sont cependant trop partielles pour être présentées dans le tableau 6.5.*

SARIA (ORSTOM-IRAT puis CIEH-IRAT) (in Roose et al., 1977 ; in Lidon et al., 1979 et 1983).

- Coordonnées : 12°16'N, 2°9'W, altitude 300m.
- Dispositif : * 3 parcelles de 100 à 250 m², de pente : 0,7% ; sur sol ferrugineux lessivé sur carapace à 50cm.
  * 1 parcelle de 250m², de pente 1,4%, sur sol ferrugineux, gravillonnaire dès la surface.

Années (5)		1971	1972	1973	1974	Médiane	1978	1979	1980	1981
Pluies - Hauteur (mm)		602	724	672	714	643	1010	740,2	704,9	652,5
R_{USA} index		302	295	458	512	380	358	?	?	?
Pluies (mm) de fréquence rare (f au non dépassement)		-	-	97(f an. = 0,95)	-		-	-	-	-
Ruissellement										
KRAM %							KRAM %			
Sol nu travaillé		43	35	40	42	39	W	42,2	38,5	36,8	41,8
Sorgho butté		26	10	29	37	27	BO	35,3	34,0	34,8	=
Jachère jeune (b)		20	5	6	8+	10	MO	33,4	31,1	30,3	33,3
Jachère ancienne (a)		10	0,4	0,3	3+	3	BR	33,7	21,5	25,1	26,5
KRMAX %							KRMAX %				
Sol nu		7	69	69	71	70	W	81,2	77,5	77,4	74,5
Sorgho butté		57	40	64	65	60	BO	74,9	73,6	65,9	=
Jachère jeune		51	29	22	30+	30	MO	84,2	80	80,4	74,4
Jachère ancienne		41	2	1	8+	5	BR	76	52,1	55,9	74,4
Erosion ($t.ha^{-1}$)							** Erosion ($t.ha^{-1}$)				
Sol nu		3,4*	13,8	35,4	26,8	20	W	3,4	1,6	5,4	=
Sorgho butté		5,7*	3,2	6,2	14,3	6	BO	2,1	1,7	4,1	=
Jachère jeune		0,70*	0,43	0,19	0,72+	0,5	MO	2,8	1,2	2,9	=
Jachère ancienne		0,17*	0,09	0,10	0,34+	0,15	BR	1,9	0,7	3	=
Indice d'érodibilité : K		0,06	0,21	0,35	0,23	0,23					

* Campagne incomplète débutant le 8/7/71 : aucune grosse averse érosive préalable

\+ Fauche et enlèvement de toutes les pailles le 15/5/1974 avant le début des des pluies

a Jachère de plus de 30 ans d'âge
b Repousse naturelle après culture de petit mil et récolte en septembre 1970.
** Pas de mesures de terre en suspension en 1978 et 1979.
= Pas de mesures

W : parcelle de Wischmeier
MO: travail manuel superficiel. Sarclages sans billonnage. Mil
BO: Labour profond Sarclage sans billon
BR: idem + enfouissement compost.

GAMPELA - (CTFT/HV) (in Roose et Piot, 1984).

- Coordonnées : Longitude 1°21W ; latitude 12°25'N ; altitude 280m.
- Dispositif : 3 parcelles de 5000m², longueur 100m, pente 0,8%
  1 parcelle nue standard 200m², longueur 25m.
- Sol ferrugineux tropical gravillonnaire peu épais (30cm) sur cuirasse.

Années (6)		1967	1968	1969	1970	1971	1972	Médiane
Pluies (mm)		636	722	773	720	720	817	731
R_{USA} index		270	254	449	266	308	366	319
Ruissellement								
KRAM %	P1	4	2,3	10,1	18,1	20,5	7,6	10,4
	P2	12	12,6	23,3	31,5	45,3	17,1	23,7
	P3	22,2	15,1	15,8	23,1	32,4	26,2	22,5
KRMAX %	P1	29	14	37	33	31	31	31
	P2	46	70	40	45	57	39	45
	P3	42	38	43	39	37	51	40
Erosion ($t.ha^{-1}$)								
	P1	non testé	0,64	1,67	6,12	5,43	2,14	3,20
	P2	non testé	2,53	4,22	8,18	10,28	4,27	5,90
	P3	non testé	1,56	2,54	5,12	6,54	4,52	4,06
	PW	non testé	non testé	10,60	21,07	18,17	14,38	16,04
Indice d'érodibilité K			0,054	0,09	0,32	0,24	0,16	0,20
Cultures		sorgho	sorgho §	mil	arachide	mil	arachide	
Rendements ($t.ha^{-1}$)								
	P1	0,83	0,43	1,08	1,58	1,35	1,46	1,12
	P2	0,85	0,46	1,01	1,46	1,03	1,40	1,03
	P3	0,76	0,43	1,24	1,63	0,99	1,25	1,05

§ Développement considérable de Striga, parasite du sorgho.
P1 Diguettes de diversion (h=40cm, pente 0,2%) ; billonnage isohypse cloisonné en 1967, 1968 et 1972 ; non cloisonné en 1969, 1970 et 1971 ; labour isohypse au tracteur, fertilisation à la dose vulgarisée.
P2 Diguettes idem, labour au tracteur selon la plus grande pente, sarclage et buttage selon la pente, fertilisation idem.
P3 Méthode traditionnelle de semis à la houe mais avec une densité et une fertilisation semblable à P1-P2. Sarclage non butté.
PW Parcelle nue, labourée chaque année et sarclée chaque fois que le sol s'encroûte, environ toutes les 3 semaines (donc plus souvent que dans les conditions standard définies par Wischmeier).

LINOCHIN (CTFT/HV) (d'après Piot et Millogo, 1980,b).

* Coordonnées : 12°28'N - 01°12W
* Dispositif : 4 parcelles de 5000m² environ ; de pente comprise entre 1,2 et 1,33% ; de longueur comprise entre 92 et 140m.
  1 parcelle de 200m², de pente 1%, de 25m de longueur (PW).
* Sols : sols tropicaux bruns vertiques.

* Années (6)		1973	1974	1975	1976	1977	1978	Médiane
Pluies : Hauteur (mm)		>577	896	633	892	555	636	636mm
R_{USA} index		>185	485	309	452	202	223	309
Pluies (mm) de fréquence rare (f au non dépassement)		-	92,6(f an = 0,85)	82,1(f an = 0,75)	57,8(f=0,1 en juin) 104,9(f an= 0,95)	-	-	
* Ruissellement								
KRAM %	P1	6.8	27.8	16.3	22.2	0.6	-	18%
	P2	6.8	31.9	13.2	25.8	0.8	4.6	19%
	P3	0.5	15.1	3.1	7.6	-	-	6.6%
	P4 savane	18.9	21	4.5	3.3	18.2	3.2	b 19% nb 3.7%
	PW	incomplet	40.6	50.8	57.9	44	40	47%
* Erosion ($t.ha^{-1}$)								
	P1	0.95	5.13	1.81	4.76	0.02	0	3.2
	P2	1.42	7.07	1.54	5.76	0.05	0.36	3.9 (+23%)
	P3	0.15	1.5	0.11	0.69	-	-	0.6 (-80%)
	P4 savane	0.80b	0.93b	0.08nb	0.13nb	0.81b	0.07nb	b=0.8 nb=0.09
	PW	incomplet	6.72	9.04	35.06	10.42	8.52	14.1
* Cultures		coton	sorgho	niébé	maïs	jachère	jachère	
	P1	sans billon	butté	sans billon	butté	naturelle	naturelle	
	P2	butté	butté	sans billon	butté	pois d'Angole	naturelle	
	P3	buttage et billonnage : parcelle d'absorption totale						
	P4	brûlée	brûlée	protégée	protégée	brûlée	protégée	
* Rendements ($kg.ha^{-1}$)								
	P1	1140	2390	3075		-	-	
	P2	1390	2360	2725		-	-	
	P3	1140	1700	3075		-	-	
* Indice d'érodibilité K		0.008	0.05	0.28		0.19	0.14	0.14

P3 = Parcelle P3 équipée de bourrelets antiérosifs de 40cm de hauteur et de 25m de distance, ainsi que d'une diguette de ceinture (absorption totale).
b = brûlé - nb = non brûlé.

CONSE (ORSTOM-CTFT) (in Roose, 1978).

- Coordonnées : 12°22'N, 1°19'W, altitude 300m.
- Dispositif : 1 parcelle de 250 m², pente : 0,5%, longueur 46m.
  Savane arborée soumise à des feux précoces, tardifs ou à une protection intégrale.

Années (7)	1968	1969	1970	1971	1972	1973	1974	Médiane
Etat du couvert	feux précoces		protection intégrale		feux tardifs			
Pluies								
Hauteur (mm)	809	759	799	674	691	553	596	691
R_{USA} index	355	407	407	321	293	318	189	321
Pluies (mm) de fréquence rare (f au non dépassement)	-	-	79,3 (f=0,965 en mai)	-	-	78,5 (f>0,99 en avril) 42,5 (f =0,8 en mai)	-	
Ruissellement								
KRAM %	3.0	2.3	0.3	0.2	8.9	16.1	14.9	3
KRMAX %	8.2	10.4	1.3	0.7	73.3	52.8	55.6	10
Erosion ($t.ha^{-1}$)	0.149	0.047	0.018	0.047	0.408	0.304	0.321	0.149

Tableau 6.5.a : Synthèse des résultats des 8 stations expérimentales du Burkina Faso.

OURSI (CTFT-HV) (d'après Piot et Millogo, 1980,a).

-Coordonnées : latitude : 14°34'N ; longitude : 0°26'W.

-Dispositif : 3 parcelles :-parcelle cultivée traditionnellement (Pc) de 3105m² ; pente : 5%
-parcelle mise en défens (Pp) de 2838m² ; pente : 5%
-parcelle de Wischmeier (Pw) de 100m² ; pente : 6,25%

-Sol ferrugineux tropical peu lessivé et placage sableux

-Années		1977	1978	1979
Pluies : Hauteur (mm)		388	279	289
R_{USA} index		123	53	76
Pluies (mm) de fréquence rare (f au non dépassement)		39,5 en juin	47 (f an =0,6)	-
-Ruissellement				
KRAM %	Pc	7,2	4,5	4,8
	Pp	18,8	6	4,2
	Pw	5,3	6,4	6,2
KRMAX %	Pc	43,7	21,3	33,5
	Pp	44,1	10,7	18,9
	Pw	30,3	26,5	37,3
-Erosion ($t.ha^{-1}$)				
	Pc	3,5	0,5	0,8
	Pp	6,2	0,21	0,22
	Pw	21,4	14,2	17,8
-Indice d'érodibilité K		0,13	0,21	0,18
-Rendements ($t.ha^{-1}$)				
	Pc	0,18	0,14	0,09

SIRGUI (HER) (d'après Service Hydrologie, 1981 et 1982).

- Coordonnées : 13°02'N ; 01°14'W
- Dispositif : 3 parcelles Pt = parcelle de mil sans billonnage, ni buttage ; 1485m² ; pente : 0,8%
Pp = parcelle située entre 2 bourrelets antiérosifs ; 1504m² ; pente : 0,8% distants de 65m
Pw = parcelle de Wischmeier (100m²)
- Sols bruns sur roche birrimienne.

- Années (*) (2)		1980	1981
Pluies Hauteur (mm)		540	660
R_{USA} index		242	?
Pluies (mm) de fréquence rare (f au non dépassement)		-	47,7 (f>0,8 en juin)
- Ruissellement			
KRAM %	Pt	20,6	46,4
	Pp	21,5	36,5
	Pw	19,7	36,6
KRMAX %	Pt	52,7	75,2
	Pp	63,7	75,7
	Pw	68,8	75,6
- Erosion ($t.ha^{-1}$)			
	Pt	7,3	19,9
	Pp	5,7	11,8
	Pw	27,2	49,2
- Indice d'érodibilité K		0,45	0,59

(*) Résultats inconnus à partir de 1982.

BANE (CTFT-HV) (d'après CTFT, 1977 et 1981).

- Coordonnées : 11°35'N ; 00°20'W
- Dispositif : 5 parcelles - P1: savane naturelle, pâturée et brûlée.
- P2: parcelle défrichée, dessouchée, à herbes rabattues avec bourrelets isohypses.
- P3: parcelle protégée du feu, du bétail, non défrichée mais à herbes sèches enlevées.
- P4: parcelle reboisée (Eucalyptus, Acacia ...).
- P5: parcelle reboisée avec bourrelets isohypses.
- Pw: parcelle de Wischmeier (100m² ; pente : 3,7%).
Surfaces de P1 à P5 : 3100 à 3800m² ; pentes : 2,5 à 3% .
- Sols : vertisols topomorphes dégradés.

- Années (*) (2)		1976	1980
Pluies Hauteur (mm)		745,6	891,5
R_{USA} index		447	456
Pluies (mm) de fréquence rare (f au non dépassement)		63,8 (f>0,90 en juin)	-
- Ruissellement			
KRAM %	P1	3,9	22,4
	P2	0,5	1,9
	P3	1,9	9
	P4	2	9,5
	P5	0,2	2,5
	Pw	33,5	32
KRMAX %	P1	5,3	62,1
	P2	0,5	32,7
	P3	3,4	38
	P4	2,3	51,1
	P5	0,2	23
	Pw	72,9	96,9
- Erosion ($t.ha^{-1}$)	P1	0,05	0,73
	P2	0,005	0,07
	P3	0,026	0,11
	P4	0,026	0,24
	P5	0,002	0,03
	Pw	38,8	68,3
- Indice d'érodibilité K		0,12	0,21

(*) Résultats non publiés à notre connaissance en 1977, 1978 et 1979.

PO-BANON (Mietton)

- Coordonnées : 11°11'N - 01°06'W ; altitude : 305m
- Dispositif : 4 parcelles P1: sous savane arbustive, non protégée 100m² pente : 2,1%
P2: cultivée (sorgho) sans buttage ni billonnage 100m² pente : 1,8%
P3: Wischmeier 100m² pente : 1,7%
P4: en pente forte, gravillonnaire, à couverture de hautes graminées 28m² pente : 16,5%
- Sols ferrugineux tropicaux, gravillonnaire dès la surface (P4), à carapace en profondeur (80cm-P1), à taches (P2,P3).

- Années (5)		1978 (13/5 au 29/10)	1979 (16/4 au 15/9)	1980 (13/4 au 30/10)	1981 (23/4 au 8/10)	1982 21/4 au 4/10)
Pluies Hauteur (mm)		780,1	704,5	737,9	561,2	657,5
R_{USA} index		368	235	271	212	298
Pluies (mm) de fréquence rare (f au non dépassement)		.42 et 46 (f=0,8 en mai et juin) .128 (f an=0,975)	55,1 (f=0,86 en juin)	72 (f an =0,68)	-	49 (f=0,8 en mai)
- Ruissellement						
KRAM %	P1	4,7	1,6	2,4	1,4	2,9
	P2	15,6	17,1	14,3	8,8	6,2
	P3(W)	11,3	29,1	21,6	14,1	24,6
	P4	5	8,2	7,3	4,6	2,2
KRMAX %	P1	25,4	11,4	11,3	5,2	10,9
	P2	52,8	60	46,2	49,4	37,4
	P3(W)	45,1	74,8	71,7	67,8	93,3
	P4	25,8	22,6	34,3	18,6	13,7
- Erosion ($t.ha^{-1}$)						
	P1	0,13	0,03	0,13	0,16	0,13
	P2	1,4	0,86	1,38	0,76	1,8
	P3(W) *	2,3	3,9	4,9	5,4	8,9
	P4	0,06	0,54	1,07	0,33	0,03

*mesures par défaut

Tableau 6.5.b : Synthèse des résultats des 8 stations expérimentales du Burkina Faso.

quel que soit le type de sol, brun vertique ou ferrugineux, à carapace plus ou moins profonde, *les ruissellements annuels sont généralement faibles*, voire très faibles, *quoique variables sur un même site* (KRAM (1) compris entre 0,2 et 22%).

Il en va de même pour l'érosion (0,03 à 0,93 $t.ha^{-1}/an$). Ces pertes en terre limitées, toujours inférieures à 1 tonne et très généralement de l'ordre de 100 $kg.ha^{-1}/an$, traduit *le caractère pénéstable* de ce milieu, quelles que soient les conditions pédologiques et climatiques. Quatre années sur cinq à Pô-Banon, l'érosion est rigoureusement du même ordre de grandeur (130 $kg.ha^{-1}$). Même sur un versant en pente forte comme l'est celui de la parcelle P_4 à Pô, le ruissellement est limité par les hautes graminées (Andropogon gayanus), qui couvrent la parcelle durant la seconde moitié de l'hivernage, et aussi, il est vrai, par le sol gravillonnaire, perméable en grand.

Le facteur très largement déterminant vis-à-vis de la dynamique d'écoulement est d'origine anthropique : il s'agit de la pratique déjà signalée des feux de brousse, dont il faut connaître non seulement le passage (ce qui suppose une surveillance, même intermittente, des sites expérimentaux en saison sèche) mais aussi la date. Trois exemples suffisent à illustrer les méfaits des brûlis :

- à Linoghin, le ruissellement annuel atteint 18 à 21% après le passage des feux tandis qu'il est de 3 ou 4% seulement en cas de protection. Les pertes en eau par ruissellement sont donc limitées lors d'une mise en défens, y compris sur cette parcelle P1 de Linoghin, où les taux de recouvrement nous ont paru très faibles ;

- le site de Bané donne la possibilité d'une comparaison, non plus seulement interannuelle mais intraannuelle, entre deux parcelles sous savane, identiques par ailleurs, mais soumises au feu pour l'une (P_1) tandis que l'autre est protégée (P_3). Le facteur climatique est donc éliminé dans ce cas de figure puisque les deux témoins sont voisins l'un de l'autre. Entre les deux, le ruissellement varie dans un rapport de 1 à 2 ; cependant, le coefficient (KRAM) atteint une valeur étonnamment élevée en 1980 (9%) ce qui s'explique par la coupe et l'en-

(1) KRAM = *coefficient de ruissellement annuel moyen.*

lèvement des herbes sèches ainsi que par le passage du bétail (CTFT, 1981). L'impact de l'occupation par l'homme des savanes naturelles, en dehors même de toute mise en culture, apparaît ainsi de manière différenciée et hiérarchisée : les brûlis sont évidemment les plus néfastes tandis que les méfaits de la pâture par le bétail (bovin mais aussi ovin et caprin) ainsi que l'enlèvement des herbes coupées (mis en évidence aussi à Saria en 1974 - Tableau 6.5 a) ne sont pas négligeables mais moins redoutables ;

- enfin, les résultats de Gonsé mettent en évidence l'importance de *la date des feux*. En cas de feux tardifs (janvier-février-mars), particulièrement efficaces vis-à-vis des graminées desséchées, le ruissellement annuel est multiplié par 50 en moyenne contre un facteur 10 "seulement" après les brûlis précoces (Roose, 1978). Les coefficients multiplicateurs sont à peu près équivalents, si l'on considère les ruissellements unitaires maximums (KRMAX).

6.2.2.2 : Le ruissellement et l'érosion sur jachères récentes et sur parcelles cultivées :

* les trois stations de Saria, Linoghin (Roose et Piot, 1984) et d'Oursi (Piot et Millogo, 1980) nous renseignent sur la dynamique de ces milieux nouvellement reconquis par *une jachère naturelle ou cultivée*.

Apparemment, quel que soit le type de sol ou les conditions climatiques, le coefficient de ruissellement annuel s'abaisse rapidement, après une année de mise en repos ou même dès la première année à Linoghin, y compris sur une jachère cultivée (pois d'angole sur P_2 en 1977 - Tableau 6.5 a). L'érosion diminue également, brutalement à Linoghin (0,05 $t.ha^{-1}$), plus progressivement à Saria et à Oursi.

Le sol joue peut être un rôle, par sa richesse relative, en favorisant plus ou moins la reconquête du couvert graminéen. A Saria, sur un sol gravillonnaire, le coefficient (KRAM) demeure en effet à un niveau élevé (20%) la première année de jachère, de même qu'à

Oursi (18,8%), tandis qu'il passe de plus de 20% à 0,6 ou 0,8% sur les sols bruns vertiques de Linoghin.

L'examen des tableaux unitaires (dans chacun des rapports annuels pour chaque station) montre toutefois, comme on l'avait déjà souligné, qu'une interprétation prudente est de rigueur. Les valeurs très faibles enregistrées sur P_1 et P_2 en 1977 à Linoghin doivent prendre en compte en effet une baisse accusée de l'agressivité climatique. L'indice R annuel n'est que de 200 points, soit un tiers au-dessous de la médiane calculée sur six ans ; la pluie la plus agressive (21 juillet ; 105 mm ; R = 99,9) explique à elle seule 25 à 30% du ruissellement annuel tandis que l'année 1978 n'a pas d'équivalent climatique (pluie maximale de 43mm, d'indice égal à 30, de coefficient de ruissellement voisin de 4% sur P_1 et P_2).

En résumé, la dynamique hydrique sur ces jachères récentes semble rapidement stabilisée. Le ruissellement est généralement limité à des valeurs proches de celles enregistrées sous savane naturelle grâce à la reconquête du couvert herbacé, y compris dans les milieux sahéliens. A Oursi en effet, le taux de recouvrement graminéen passe de 40% la première année à 65-70% puis 80% les deux années suivantes. Cependant, le ruissellement peut être exacerbé par la constitution d'organisations pelliculaires superficielles très peu perméables, mais dont la cohésion limite l'érosion.

* *Les parcelles mises en culture* ont été testées sur chacune des stations expérimentales, hormis Bané et Gonsé, dans des contextes climatiques et pédologiques différents.

- *En milieu sahélien, à Oursi* (14°34'N), la parcelle (Pc) est cultivée de petit mil, semé traditionnellement à la houe, sarclé à plat, à plusieurs reprises probablement en 1977 et 1978 ; une fois seulement (14 juin) en 1979. L'effet de la mise en culture ne semble pas représenter un danger considérable (Piot et Millogo, 1980, p. 16). Le

ruissellement moyen annuel est effectivement du même ordre que sur la parcelle mise en défens (Tableau 6.5.b) ; l'érosion, un peu plus forte, n'atteint pas des proportions inquiétantes (1,6 $t.ha^{-1}$ en moyenne) et reste plus de dix fois inférieure aux pertes en terre mesurées sur la parcelle nue de Wischmeïer. Deux facteurs, climatique et cultural, sont cependant à prendre en compte : d'une part, l'agressivité climatique est très faible (Ra est inférieur à 100 points alors que la moyenne, pour la période 1966-1972 à Dori, est de 261) ; d'autre part, la pratique d'un sarclage "largement étalé dans le temps, crée une structure en bandes alternées très efficace".

Au demeurant, même dans ce contexte, le coefficient de ruissellement maximal est le double de la valeur enregistrée sur la parcelle protégée. Cela signifie que le *déficit d'alimentation en eau* des cultures est très inquiétant lors des rares averses utiles : à titre d'exemple, la pluie maximale du 30 juillet 1978 (47mm) dont le coefficient est de 21,3% (Tableau 6.5.b)- 81% du ruissellement annuel - représente la seule grosse averse supérieure à 30mm, pour 26 jours de pluie seulement. Ce régime hydrique très sévère suffit à expliquer la médiocrité des rendements.

- *En milieu nord-soudanien*, la station de *Sirgui* (13° 02'N ; 01°14'W) est la seule située sur un substratum volcano-sédimentaire birrimien. Les sols limoneux en surface (0-5cm) à limono-argileux (5-15cm), bruns, sont très pauvres en matière organique, y compris sur ces champs de case, où s'inscrivent les trois parcelles (Tableau 6.5.b). L'une (Pt) est cultivée traditionnellement en mil, semée et sarclée à deux reprises à la houe ; la seconde (Pp) est placée entre deux diguettes antiérosives, semée en lignes parallèles aux bourrelets, mais ne bénéficie pas davantage de soins culturaux ; enfin la parcelle nue est celle dite de Wischmeïer. Deux enseignements principaux ressortent de cette étude :

en premier lieu, *l'importance de l'érosion*, comprise entre 5 et 20 tonnes.ha^{-1}.an sur les parcelles cultivées, 25 et 50 tonnes pour la parcelle de Wischmeïer apparaît dans des proportions inquié-

tantes. Ces valeurs de référence sont les plus élevées, mesurées dans le pays, avec celles de Bané et occasionnellement de Saria. *Les tranches de terrain enlevées sont comprises entre 1 et 2mm par an sur la parcelle de Wischmeïer, 0,2 et 0,8mm par an sur les parcelles cultivées.* A Sirgui, ce ne sont pas la pente (0,8%) ou l'agressivité climatique(1) qui sont en cause. L'explication du phénomène, non abordée jusqu'ici (HER, 1981 et 1982 ; Reij, 1983), réside dans la conjonction de deux caractéristiques : l'érodibilité du sol (l'indice K est voisin de 0,50), liée à sa texture, à ses faibles teneurs en matière organique, et aussi leur faible perméabilité, qui exacerbe le ruissellement au-dessus d'une carapace proche de la surface.

en second lieu, l'"*effet de longueur de pente*" peut être légitimement discuté sur ce site. En effet, les deux parcelles voisines, cultivées traditionnellement (Pt et Pp) sont tout à fait semblables par leurs cultures, leur sol, leur pente longitudinale. Seules leurs dimensions diffèrent et notamment la longueur, avec 100 mètres pour la première, 65 mètres pour la seconde (largeurs 15 et 22m). Les caractéristiques identiques peuvent rendre compte de la similitude entre coefficients de ruissellement, aussi bien annuels que maximums, chacune des deux années. En revanche, les écarts très sensibles (35 à 70%) dans les mesures d'érosion pourraient s'expliquer par un effet de la longueur permettant sur le champ traditionnel une accélération des écoulements, une capacité d'arrachement et de transport plus importante.

Deux données viennent toutefois contrarier cette hypothèse. D'une part, les modalités d'écoulement et de dépôt ne sont pas identiques au bas des deux parcelles : un canal maçonné facilite en effet les transferts latéraux vers la cuve de ruissellement au bas de Pt tandis que les écoulements sont ralentis contre l'ados du bourrelet antiérosif en Pp. D'autre part, l'excès d'érosion sur le champ traditionnel ne se vérifie pas en mai, juin et juillet 1980.

- *En milieu centre-soudanien*, les stations de *Gampela*,

---

(1) *Aucun accident climatique de fréquence centennale ou même décennale n'est enregistré durant les deux années de mesures (1980 et 1981).*

Saria et Linoghin représentatives du plateau mossi (pentes comprises entre 0,7% et 1%), fournissent de précieux renseignements sur l'importance des façons culturales et l'efficacité relative des aménagements antiérosifs (Roose et Piot, 1984).

A *Gampela*, à 15 kilomètres à l'est de Ouagadougou, ce sont cette fois deux parcelles (P_1 et P_2) qui sont aménagées avec des terrasses de diversion mais elles diffèrent par la nature de leurs travaux ; billonnage isohypse et cloisonné (du moins en 1967, 1968 et 1972) sur P_1 ; billonnage selon la plus grande pente et non cloisonné sur P_2. La comparaison de leurs résultats avec la parcelle témoin P_3 cultivée traditionnellement (Tableau 6.5.a) montre bien que la qualité des façons culturales (orientation, cloisonnement) est bien plus efficace que le seul aménagement antiérosif, labouré au tracteur dans le sens de la pente (Roose, 1986). Sur les sols ferrugineux gravillonnaires peu épais de Gampela, le ruissellement et l'érosion demeurent à des niveaux élevés : 11 à 21 tonnes par hectare et par an sur la parcelle de référence !

Ces valeurs sont globalement encore plus fortes à *Saria*, où le sol est gravillonnaire dès la surface. La parcelle nue enregistre des ruissellements très redoutables : 40% en moyenne annuelle, 70% pour les maximums unitaires et l'érosion est également impressionnante, de 13 à 35 t/ha/an. Sous culture de sorgho butté, les pertes en eau et en terre sont toujours inquiétantes, avec une ablation comprise entre 3 et 14 t/ha/an (Tableau 6.5.a). L'agressivité climatique annuelle n'a rien d'exceptionnel puisque trois des quatre années de mesures ont un indice inférieur ou égal à l'indice médian calculé à Saria (441 points, Chap. I, page 80) mais il ne faut toujours pas perdre de vue l'importance des averses de fréquence rare qui fixent le niveau global du ruissellement et de l'érosion. E. Roose (1979) nous en donne un exemple à Saria avec la pluie de durée de retour 1 année sur 20 (97mm, 14% de la hauteur annuelle), qui provoque 61% de l'érosion sur sol nu et 38% sous sorgho.

La faible perméabilité de ce sol ferrugineux, gravillon-

naire, mince, dès lors qu'il est mis à nu ou même cultivé, mérite d'être soulignée. Elle s'oppose à la perméabilité élevée caractérisant ce même sol lorsqu'il est en jachère, couvert d'une litière de pailles (jachère ancienne de Saria) ou de hautes graminées comme à Pô-Banon (Andropogon gayanus sur la parcelle P_4). Il y a donc là une évidente hiérarchisation des facteurs conditionnels du ruissellement : la couverture végétale jouant un rôle plus décisif que la nature du sol, elle-même plus déterminante que la pente. Enfin, l'influence du mode de préparation du sol et de la restitution des résidus de cultures apparaît dans la diminution de l'érosion en 1978 (Tableau 6.5.a) mais nos données sont trop fragmentaires pour être significatives.

Au total, l'érosion enregistrée à Saria sur des parcelles très représentatives des champs des paysans mossi par leur pente et leur sol apparaît grave et d'autant plus insidieuse qu'elle arrache sélectivement les particules colloïdales, organiques et minérales, assurant la réserve en eau et en éléments nutritifs (Roose, 1979, p. 31).

Les données de *Linoghin*, recueillies sur un sol brun vertique, illustrent une fois encore, peut-être même davantage qu'à Saria, l'importance du ruissellement sur sol nu (47%) tandis que l'érosion est caractérisée par des variations interannuelles considérables (7 à 35 t/ha/an). Les parcelles en culture améliorée (P_1 et P_2) ont logiquement des résultats voisins puisqu'elles subissent les mêmes traitements (hormis en 1973). Quant à la parcelle P_3 (à absorption totale), sa mise en place est à resituer dans le contexte d'une recherche sur les dispositifs antiérosifs conduite dans ce pays au milieu des années soixante-dix. Ce dispositif de ceinture autour de la parcelle, obligeant toute l'eau à s'infiltrer, s'est révélé globalement efficace (diminution du ruissellement des 2/3 et de 80% pour l'érosion - Tableau 6.5.a) mais en même temps très risqué. En effet, au delà d'un certain seuil d'intensité-durée, d'ailleurs mal défini, le bourrelet cède et entraîne des ruptures en "cascades" vers l'aval. Pareille mésaventure s'est d'ailleurs produite le 22 juin 1973 (sur une diguette probablement mal consolidée), pour une pluie de 43,1mm et de 37 points d'agressivité seulement ainsi

que le 24 juillet 1974 (I_{30} = 88 mm/h ; pointe de ruissellement de 168 l/s/ha). Nous verrons, dans le dernier chapitre, que cette technique, pourtant soignée dans le cadre d'une expérimentation mais occasionnellement défectueuse, ne pouvait être retenue à l'échelle du pays.

- *Dans la partie méridionale du domaine soudanien*, les résultats de l'expérimentation de *Bané* mettent surtout en évidence, on l'a vu, le rôle des protections multiformes et du reboisement sur des parcelles qui ne sont pas cultivées. La seule parcelle travaillée est celle de Wischmeïer, pour laquelle l'ablation atteint des proportions énormes, non rencontrées jusque-là, même à Sirgui. La tranche de terrain enlevée peut être estimée entre 1,5 mm et 2,6 mm par an (1,5 m à 2,6m par millénaire !). Il faut noter qu'en 1976 les deux tiers de l'érosion sont déjà enregistrés à la mi-juillet ce qui souligne les risques, considérables dans cette période, que font courir aux sols cultivés des travaux aratoires trop poussés.

Par comparaison, les valeurs enregistrées sur notre parcelle standard de Pô-Banon paraissent bien minimes, surtout la première année durant laquelle la fréquence des piochages a été trop grande.

Cette lacune ayant été soulignée, les données de Pô-Banon peuvent cependant nous servir à établir d'autres corrélations entre facteurs conditionnels du ruissellement et ablation ainsi qu'à préciser les processus mis en jeu. Auparavant, ces données peuvent nous permettre plus généralement d'établir un bilan hydrique schématique, valable pour nos cinq années d'expérimentation.

6.2.2.3 : Les essais de bilans hydriques.

Sur deux des stations citées précédemment, Gonsé et Saria, des bilans hydriques ont été établis par E. Roose (1978 et 1979). Ces calculs ont été poursuivis à Saria par B. Lidon (Lidon et al., 1978). Nous avons repris, sur le modèle le plus simple, le calcul du bilan en eau au niveau de deux de nos parcelles, sous savane (P1) et cultivée

(P2), de Pô-Banon. Les termes de ce bilan sont toutefois plus imprécis du fait du caractère incomplet de certaines données d'observation.

a- Les données du bilan :

Une première source d'imprécision tient aux relevés pluviométriques eux-mêmes (Tab. A.6.1 à 6.5). En effet, les campagnes de mesures à Pô-Banon n'ont généralement commencé qu'à la mi-avril pour s'interrompre en octobre ou à la fin septembre (1979, 1982). Les pluviométries mensuelles utilisées intègrent en conséquence quelques valeurs enregistrées à Pô mais on sait que les averses entre les deux postes ne sont pas bien corrélées (Chap. I, p. 72). En outre, dans le cas, heureusement rare, où il s'agit de fortes pluies, le coefficient de ruissellement correspondant est apprécié de manière approximative.

L'évapotranspiration potentielle (ETP) est établie selon la formule de Penman. Il peut s'agir soit de valeurs moyennes décadaires, estimées au CIEH (Forest, 1974) avec des interpolations spatiales pour les simples stations climatologiques comme Pô, jusqu'en 1981 et pour les mois de mai à octobre ; soit de valeurs[1] calculées pour ces mêmes mois, à partir de 1982, sur la station synoptique nouvellement installée ou, enfin, de valeurs estimées à Léo (Baldy *et al.*, 1976), pour les mois de saison sèche (novembre à avril).

A cette notion théorique (supposant des conditions pédologiques optimales) qu'est l'ETP, il est nécessaire d'ajouter celle d'évapotranspiration réelle (ETR), correspondant "au volume d'eau (en mm par jour) perdu par évaporation et par transpiration, égal ou inférieur à ETP, selon la teneur en eau réelle du sol, la salinité, la dimension du champ ..." (Doorenbos et Pruitt, 1975).

Ainsi, en début de saison des pluies, les agroclimatologues admettent qu'un sol nu évapore en moyenne $\frac{ETP}{2}$ évaluée selon la

---

(1) *Ces valeurs sont disponibles dans les bulletins décadaires établis par le Service agrométéorologique de la Météorologie nationale, à Ouagadougou.*

formule de Penman. Au coeur de l'hivernage, l'ETR peut être considérée proche d'ETP. Enfin, après l'arrêt des précipitations, l'ETR n'est pas immédiatement égale à zéro car la végétation utilise l'eau du sol, qui évapore au-delà du point de flétrissement. La réserve hydrique du sol - différence entre le stock d'eau à capacité au champ et le stock hydrique du sol desséché - doit donc être connue pour être ajoutée à ETR brute (ETR corrigée) et soustraite au drainage (Tableaux 6.6 et 6.7).

Ce stock d'humidité du sol a été apprécié de manière plus ou moins satisfaisante. La capacité au champ a été déterminée grâce aux suivis hydriques, à 25cm de profondeur, effectués sur nos parcelles en 1978 (Chap. III, p. 137-138). Les teneurs en eau lues sur la figure 3.6 sont corroborées par les valeurs du potentiel capillaire à pF 2,5 et pF 3 (Tab. A.5.1). Les densités apparentes ont été calculées à partir des densités réelles (Tab. A.5.1) et de mesures de porosité, malheureusement limitées à des échantillons de surface (Mietton, 1980, p. 121). Quoi qu'il en soit, ces réserves hydriques sur les 25 premiers centimètres du sol ont été estimées à 53mm pour P1 et 38mm pour P2(1)

Tous les éléments de l'équation générale suivante :

Pluie = Ruissellement + ETR ± Stock hydrique du sol + Drainage

sont donc connus, hormis le drainage qui est ainsi calculé en l'absence d'observation directe.

b- Résultats et premiers commentaires.

- Les tableaux 6.6 et 6.7 montrent que *la percolation, même à faible profondeur, est très réduite, voire nulle*. On rejoint là un constat déjà fait par E. Roose à Saria, sous culture et sur jachère, ou à Gonsé, du moins en année sèche ou moyenne. Ce bilan peut surprendre toutefois à Pô, à plus d'un degré plus au sud, mais nos mesu-

---

(1) La formule utilisée pour calculer la quantité d'eau (Q) pour amener l'épaisseur (e) à la capacité au champ (H2) est :

$$Q_{mm} = \frac{exda}{10} \times (H2-H1)$$

H1, taux d'humidité en fin de saison sèche, a été considéré comme nul.

P1	J	F	M	A	M	J	J[t]	A	S	O	N	D	TOTAL mm	TOTAL %
1978														
Pluies (mm)	0	0	0	0	79	102	155,7	215,6	123,5	104,3	0	0	780,1	100
ETP (1)	152	155	195	192	188	168	159	149	143	163	144	133	1941	249
Ruissellement	0	0	0	0	5,8	6,3	19,4	16,5	0	0	0	0	48	6,2
ETR brut	0	0	0	0	73,2	95,7	136,3	149	123,5	104,3	0	0	682	87,4
													(+50,1)	
corrigé													732,1	93,8
Drainage brut								50,1					50,1	
								(-53)					(-53)	6,4
cor.													0	0
1979														
Pluies (mm)	0	0	3,9(1)	7	116,1	115,5	125,9	241,2	98,8	20,7(1)	12,4(1)	0	741,5	100
ETP (1)	152	155	195	192	188	168	159	149	143	163	144	133	1941	261
Ruissellement	0	0	0	0	8,2	2,8	0	0,2	0,05	0	0	0	11,25	1,5
ETR brut	0	0	3,9	7	107,9	112,7	125,9	149	98,75	20,7	12,4	0	638,25	86,1
													(+39)	
corrigé													677,25	91,3
Drainage brut								92					92	
								(-39)					(-39)	
cor.								53					53	7,2
1980														
Pluies (mm)	0	0	0	53,5	41,3	86,6	150	222,6	103,4	80,5	0	0	737,9	100
ETP (1)	152	155	195	192	188	168	159	149	143	163	144	133	1941	263
Ruissellement	0	0	0	0,2	0,2	2	5,6	4,55	2,4	2,75	0	0	17,7	2,4
ETR brut	0	0	0	53,3	41,1	84,6	144,4	149	101	77,75	0	0	651,15	88,2
													(+53)	
corrigé													704,15	95,4
Drainage brut								69,05					69,05	9,4
								(-53)					(-53)	
cor.								16,05					16,05	2,2
1981														
Pluies (mm)	0	0	0	14,5	65,5	107,5	161,9	165,9	35,1	10,8	0	0	561,2	100
ETP (1)	152	155	195	192	188	168	159	149	143	163	144	133	1941	346
Ruissellement	0	0	0	0	0,9	2	2,9	1,7	0,2	0	0	0	7,7	1,4
ETR brut	0	0	0	14,5	64,6	105,5	159	149	34,9	10,8	0	0	538,3	95,9
													(+15,2)	
corrigé													553,5	98,6
Drainage brut								15,2					15,2	2,7
								(-53)					(-53)	
cor.								0					0	0
1982														
Pluies (mm)	0	0	30,3(1)	60,4(1)	138,2	121,4	125,9	172,6	57,4	105,8(1)	0	0	812	100
ETP (1)	152	155	195	192	179	156	152	131	149	149(2)	144	133	1887	232
Ruissellement	0	0	0	0	6,65	6,7	2,4	3,6	0	1,2	0	0	19,35	2,5
ETR brut	0	0	30,3	60,4	131,55	114,7	123,5	131	57,4	104,6	0	0	753,45	92,8
													(+38)	
corrigé													791,45	97,5
Drainage brut								38					38	4,7
								(-53)					(-53)	
cor.								0					0	0

(1) Valeurs pluviométriques mensuelles enregistrées (au moins partiellement) à Pô-ville.

(2) Lames ruisselées estimées.

Tableau 6.6 : Schéma de bilan hydrique sur la parcelle sous savane (P1) de Pô-Banon (1978-1982).

P2	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	TOTAL mm	TOTAL °/₀
1978														
Pluies (mm)	0	0	0	0	79	102	155,7	215,6	123,5	104,3	0	0	780,1	100
ETP (1)	152	155	195	192	188	168	159	149	143	163	144	133	1941	249
Ruissellement	0	0	0	0	33 (2)	20,3	41 (2)	24,3	8,3	11,6 (2)	0	0	138,5	17,7
ETR brut	0	0	0	0	46	81,7	114,7	149	115,2	92,7	0	0	599,3	76,8
													(+38)	
corrigé													637,3	81,7
Drainage brut								42,3					42,3	5,4
								(-38)					(-38)	
cor.													4,3	0,6
1979														
Pluies (mm)	0	0	3,9 (1)	7	116,1	115,5	125,9	241,2	98,8	20,7 (1)	12,4 (1)	0	741,5	100
ETP (1)	152	155	195	192	188	168	159	149	143	163	144	133	1941	261
Ruissellement	0	0	0	0	51,1	22,9	14,3	24,8	2,45	0,3 (2)	0	0	115,85	15,6
ETR brut	0	0	3,9	7	65	92,6	111,6	149	96,35	20,4	12,4	0	558,25	75,3
													(+38)	
corrigé												0	596,25	80,4
Drainage brut	0	0	0	0	0	0	0	67,4	0	0	0		67,4	9,1
								(-38)					(-38)	
cor.								29,4					29,4	4
1980														
Pluies (mm)	0	0	0	53,5	41,3	86,6	150	222,6	103,4	80,5	0	0	737,9	100
ETP (1)	152	155	195	192	188	168	159	149	143	163	144	133	1941	263
Ruissellement				1,9	1,05	5,3	34,3	47,45	12,5	3,1	0	0	105,6	14,3
ETR brut	0	0	0	51,6	40,25	81,3	115,7	149	90,9	77,4	0	0	606,15	82,1
													(+26,15)	
corrigé													632,3	85,7
Drainage brut	0	0	0	0	0	0	0	26,15	0	0	0	0	26,15	3,5
													(-38)	
cor.													0	0
1981														
Pluies (mm)	0	0	0	14,5	65,5	107,5	161,9	165,9	35,1	10,8	0	0	561,2	100
ETP (1)	152	155	195	192	188	168	159	149	143	163	144	133	1941	346
Ruissellement	0	0	0	0,3	9,6	22,45	15	2,05	0	0	0	0	49,4	8,8
ETR brut	0	0	0	14,2	55,9	85,05	146,9	149	35,1	10,8	0	0	496,95	88,6
													(+14,85)	
corrigé													511,8	91,2
Drainage brut	0	0	0	0	0	0	0	14,85					14,85	2,6
													(-38)	
cor.													0	0
1982														
Pluies (mm)	0	0	30,3 (1)	60,4 (1)	138,2	121,4	125,9	172,6	57,4	105,8 (1)	0	0	812	100
ETP (1)	152	155	195	192	179	156	152	131	149	149	144	133	1887	232
Ruissellement	0	0	3,7 (2)	1,5 (2)	23	5,6	2,85	8,15	0	6,3 (2)	0	0	51,1	6,3
ETR brut	0	0	26,6	58,9	115,2	115,8	123,05	131	57,4	99,5	0	0	727,45	89,3
													(+33,45)	
corrigé													760,9	93,7
Drainage brut	0	0	0	0	0	0	0	33,45					33,45	4,1
													(-38)	
cor.													0	0

(1) Valeurs pluviométriques mensuelles enregistrées (au moins partiellement) à Pô-ville.
(2) Lames ruisselées estimées.

Tableau 6.7 : Schéma de bilan hydrique sur la parcelle cultivée de Pô-Banon (1978-1982)

res sont à rapporter à un *contexte climatique très sec*, avec cinq années d'observation dont la pluviométrie est inférieure à la moyenne et un minimum très creusé en 1981 (561,2mm), de fréquence égale à 0,010% (Tab. A.121.1) ! Une autre limite à considérer est le pas de temps mensuel choisi pour l'établissement de ces bilans en eau, qui entraîne probablement une sous-estimation du drainage lors des averses exceptionnelles (Roose, 1983, p. 249). Nous aurons l'occasion de revenir, à propos des bilans géochimiques (§ 6.3), sur un constat de terrain fait au lendemain d'une tornade de 121mm (3 août 1978). Compte tenu de ces réserves, le seul mois, où la percolation en profondeur apparaît possible durant ces années sèches, est le mois d'août. Le drainage corrigé atteint un maximum de 7,2% des précipitations annuelles sous savane et 4%, la même année (1979), sous culture.

- Le ruissellement moyen annuel est faible également. On retrouve, sous savane, des valeurs comprises entre 1,5% et 6,2%, très voisines des moyennes établies par ailleurs en ne considérant que les seules données pluviométriques enregistrées à Banon (Tab. A.6.16 à 6.20). La raison est liée, on l'a vu, au bon effet de couverture de la végétation, arborée et surtout herbacée.

Sous culture, le ruissellement annuel n'est pas beaucoup plus élevé, avec un coefficient compris entre 6 et 18%. Trois raisons peuvent être avancées :

- la faiblesse du total pluviométrique bien sûr, qui affecte principalement les grosses averses. L'examen des classes de hauteur de pluie est édifiant à cet égard : le pourcentage des pluies inférieures à 20mm par rapport au nombre total d'averses est de 84,5% en 1980 et 76,7% en 1981 contre 71,7% pour la période 1942-1982 (Tab. A.11.7) ;
- la baisse concomittante de l'agressivité des pluies, particulièrement à partir de 1979. L'efficacité des averses supérieures à 30mm vis-à-vis du ruissellement, va diminuant de 1980 à 1982 sur cette parcelle P2 (Tab. A.6.21) ;

- enfin, l'existence d'une *culture de niébé, associée au sorgho*, à partir de 1979. Cette plante rampante, qui couvre bien le sol, est efficace jusqu'en fin d'hivernage car seules les gousses sont ramassées à la fin de septembre. En revanche, il n'existe pas d'autres façons culturales responsables d'une diminution des écoulements. La culture du gros mil blanc se fait en effet à plat, avec un ou deux sarclages seulement.

Le terme important de ce bilan, représentant 80 à 90% des précipitations annuelles, est donc l'évapotranspiration réelle, plus élevée semble-t-il sous culture que sous savane. Cette évaporation, comprise entre 3 et 5mm par jour au coeur même de l'hivernage, correspond à une perte directe du sol par évaporation mais aussi à une transpiration des plantes, nécessaire à leur croissance.

6.2.3 : Processus hydrodynamiques et facteurs conditionnels du ruissellement.

La détermination des processus hydrodynamiques élémentaires, à l'échelle de la parcelle, est effectuée à travers l'examen des données obtenues sous pluies naturelles à Pô-Banon (pour lesquelles nous avons évidemment le maximum d'informations) et aussi lors des simulations de pluies conduites par l'ORSTOM.

6.2.3.1 : Le ruissellement et l'érosion sous pluies naturelles à Pô-Banon : essai de hiérarchisation des facteurs.

L'ensemble des données obtenues à Banon, à cinq kilomètres à l'est de Pô, durant cinq années (1978-1982) est regroupé sur le tableau 6.8, dans lequel on retrouve une partie des informations discutées précédemment : les coefficients de ruissellement unitaires maximums (voir aussi Tab. A.6.16 à A.6.20) et les érosions globales annuelles, exprimées également en tranches moyennes de terrain enlevées par siècle (0,4mm sous savane en moyenne contre 5mm en parcelles cultivées et 20mm sur parcelle nue).

Ces tableaux constituent une base pour toute recherche de corrélation, qu'il s'agisse de corrélations partielles (entre les intensités instantanées ou intensités-durées maximales et les coefficients de ruissellement unitaires maximums à titre d'exemple) ou de corrélations multiples. Ces dernières ont été retenues préférentiellement dans une double perspective : tenter de hiérarchiser des paramètres, dont on sait bien que chacun d'entre eux joue un rôle ; établir si possible des équations permettant de prédire le phénomène étudié.

Les facteurs conditionnels de l'écoulement peuvent être classés en deux grandes familles, déjà distinguées dans le livre I : les facteurs difficilement quantifiables, du moins à l'échelle de chaque pluie (le couvert végétal, la structure de surface du sol) ; les

1978		P1 (Savane)		P2 (Champ de Mil)		P3 (Wischmeier)		P4 (gravillonnaire - en pente forte)	
Date	P(mm)	Coefficient (C) %	Erosion (E) kg/ha	C	E (kg/ha)	C	E (kg/ha)	C	E (kg/haxO,28)
13/5	16	0		5,8	36,5	0		0	
23/5	21	7,8	34,1	52,8	246,2	0		24,8	N
30/5	42	*		*		0		13,8	N
1/6	14,5	12	29,3	13,1	45,7	13,1	16,2	25,8	2,98
4/6	46	*		39,1	*	*		*	
6/6	4	0		11,2	N	0		0	
2/7	32,5	4,4	3,03	11,5	119,5	1,5	9,9	11,1	3,94
6/7	17,5	1,4	N	31,3	62	24,1	87,2	15,9	N
11/7	23,1	4,8	N	37	62,3	2,2	3,7	11,2	N
13/7	32,2	25,4	25,73	35,1	122,3	45,1	245,3	14,6	10,27
3/8	121	13,6	34,08	18,9	424,3	*	1 289,3 p.d	*	
11/8	20,4	0		6,6	30,11	0		0	
30/8	27,3	0		15,1	57,1	5	113,9	1,1	N
9/9	46,5	0		7,9	99,8	11,8	73,9	5,1	N
11/9	19,8	0		1,2	N	18,6	*	0	
13/9	9,5	0		0		29,4	N	0	
15/9	14,5	0		5,2	N	24,4	*	0	
22/9	28	0		14	80,2	44,1	100,7	4,3	N
5/10	12	0		7	N	30,7	64	0	
7/10	15	0		29,1	30,8	40,5	130,5	0	
8/10	10,1	0		3,1	N	2,1	N	0	
9/10	7	0		1,8	N	0		0	
20/10	8,7	0		2,7	N	0		0	
21/10	11,8	0		14,7	11,9	28,7	146,2	0	
25/10	16,2	0		0		17,3	31,3	0	
Erosion totale en kg/ha/an			126		1 430		2 312 par défaut		61
Tranche de terrain enlevé par siècle			0,48 mm		5,5 mm		8,9 mm		0,24 mm

1979		P1 (Savane)		P2 (Champ de Mil)		P3 (Wischmeier)		P4 (gravillonnaire - en pente forte)	
Date	P(mm)	Coefficient (C) %	Erosion (E) kg/ha	C	E (kg/ha)	C	E (kg/ha)	C	E (kg/haxO,28)
23/4	8	0		2	2,3	2,2	2,8	0	
28/4	6,5	0		2	2,3	1,2	N	0	
1/5	8	4	34,9	24,1	31,8 p.d	23,7	117,3	*	*
7/5	32,5	1,3	3,3	17,7	31,6 p.d.	23,5	*	4,6	
19/5	18	1	2,1	11,1	*	11,1	*	3,6	5,3
4/6	6,5	0		2,4	4,4	0		0	
11/6	20,5	0		2,6	11,6	0		0	
21/6	23,4	1,4	1,3	8,5	8,1	5,1	39,9	0	
23/6	40	4,2	15	49,4	66,9	67,8	743	15,4	20,7
5/7	19,7	1,1	27,6	10,2	26,5	2,7	55,1	5,8	13,1
13/7	24,5	1,3	10,7	1,8	19,9	8,2	225	5	19,9
17/7	27,5	0,8	6,8	2	13,5	1,1	42	2,1	2
22/7	38,5	5,2	27,3	30,2	470,5	34,7	1453	18,6	7,8
29/7	18	0,9	0,5	2,2	39,6	3,7	37,7	3,6	2,7
5/8	34	1,2	8,1	1,7	5,6	1,9	155,3	1,9	0,9
14/8	43	1,5	3,2	2,1	3,5	4,7	132	5,1	1,5
19/8	35,5	1,9	16,9	1,5	23,3	53,8	2 291	10,7	17,7
9/9	17	1,1	N	0		3,9	118,3	0	
Erosion totale en kg/ha/an			158		761,4 p.d		5413 p.d.		327
Tranche de terrain enlevé par siècle			0,6 mm		2,9 mm		20,8 mm		1,3 mm

Tableau 6. 8 : Ruissellement et érosion sur les quatre parcelles expérimentales de Pô-Banon, de 1978 à 1982.

1980		P1 (Savane)		P2 (Champ de Mil)		P3 (Wischmeier)		P4 (gravillonnaire - en pente forte)	
Date	P(mm)	Coefficient (C) %	Erosion (E) kg/ha	C	E (kg/ha)	C	E (kg/ha)	C	E (kg/hax0,28)
19/4	16,2	0		0		11,7	99,6	0	
26/4	24,3	0,8	N	7,5	30,7	7,8	137,4	1,6	N
12/5	14,2	0,9	18,9	1,9	42,4	0,9	28	0	
20/5	19,3	0,7	1,5	4,1	29,3	0		2,2	17
7/6	20,4	3,9	N	8,4	5,4	9,8	122,6	2,2	*
9/6	21,1	4,4	18	8,3	48,5	9,8	228,8	2,3	44,4
13/6	19,5	1,4	0,6	9,5	17,2	1,2	18,2	6,2	50,7
3/7	20,2	0,8	0,3	2	N	0,9	N	1,3	20,7
5/7	44,5	8,7	6,7	46,2	223,4	55,8	312,7	*	12,4
6/7	4,4	0		1,2	N	0		0	
7/7	13,2	1,2	N	1,2	N	1	*	1,4	N
23/7	41	3,2	3,7	32,2	109,3	67,6	1 275	16,6	36,5
3/8	36,5	2,1	1,1	0,7	N	4,1	204,9	15,5	10,8
6/8	19	1,3	0,3	0,9	N	9,8	63	22,8	21,8
10/8	72	2,6	3,8	44,4	118,4	75	*	*	
20/8	36,3	3,6	54,9	41,1	557,3	52,8	2275	15,6	36,6
29/8	18,5	2,2	9,2	1,4	4,7	3,9	11,2	10,2	12,5
1/9	22,2	6,7	3,8	5,9	3	71,7	369	29,7	21,4
2/9	*	0,8	N	2,2	N	0		0	
3/9	21,3	1,8	2,6	45,2	184	*		*	
11/9	22,5	1,2	1,8	1,8	1,2	0		8,4	10,7
25/9	10,3	1,4	0,2	1,1	N	1,8	N	10,1	1,5
6/10	15,1	11,3	1,9	8,7	1,7	10,5	10,6	34,3	2,6
24/10	14	1,5	N	1,9	N	1,9	N	0	
27/10	11,1	1,7	N	1,4	N	1,4	N	12,9	N
30/10	35,1	1,9	N	4,1	3,3	5,4	26,1	0	
Erosion totale en kg/ha/an			130		1 380		4924 par défaut		1 070
Tranche de terrain enlevé par siècle			0,48 mm		5,3 mm		18,9 mm		4,1 mm

1981		P1 (Savane)		P2 (Champ de Mil)		P3 (Wischmeier)		P4 (gravillonnaire - en pente forte)	
Date	P(mm)	Coefficient (C) %	Erosion (E) kg/ha	C	E (kg/ha)	C	R (kg/ha	C	E (kg/hax0,28)
1/5	55,1	11,4	N	60	*	*		19,6	*
7/5	12	0,7	N	*		*		0	
8/5	19	2,2	N	*		*		3	N
25/5	30	4,8	10,7	60	492,9	35	74,5	22,6	38,5
7/6	13	0		16,9	4,1	1,4	12,7	8	5,2
10/6	27	6,8	11,9	28,6	41,2	28,2	30,26	42,6	90,2
11/6	14	3,2				32,8			
12/6	10	2,6	2,8	40,6	68,1	50,2	381,8	36,6	
15/6	10,1	2,6							
27/6	14,8	0		5,2	16,4	3,3	15,4	9,2	4,5
6/7	19,2	0		6,1	37,9	10,2	24,4	3,3	1,7
9/7	18,1	0		8,2	17,1	0,6	N	3,2	0,8
16/7	37,5	0		19	36	6,6	75,6	1,7	N
19/7	16,3	0		27,7	21,5	45,1	111,7	5,5	0,5
7/8	37,3	0		2,6	11,6	14,3	103,8	0	
11/8	23,5	0		24	25,5	59,4	301	1,7	N
18/8	20,5	0,13	N	25,7	48,9	54	215,5	2,8	3,4
21/8	23,6	0,45	2,2	35	23	74,8	383,7	11,1	4,4
22/8	9,8	0		0		10	9	0	
23/8	20	0		12,3	4,9	59,7	221,4	0,5	N
25/8	20	0		5,1	8,9	51,2	250,6	1,1	2
31/8	46,1	0,14	N	2,6	1,2	62	586,9	6,2	
3/9	22,7	0		9,2	2,1	34,9	201,7	7,2	
7/9	22,9	0,11	N	0		53,4	359	3,9	
9/9	24,3			0,6	0,15	36,1	184	0	
12/9	2,5			0		26,4	14,4	0	
14/9	4,2			2,5	0,1	0		0	
15/9	14,8			0,7	0,1	34,1	113,8	0	
Erosion totale en kg/ha/an			27,6		862		3 944		540
Tranche de terrain enlevé par siècle			0,11 mm		3,3 mm		15 mm		2 mm

Tableau 6.8 : Ruissellement et érosion sur les quatre parcelles expérimentales de Pô-Banon, de 1978 à 1982.

1982		P1 (Savane)		P2 (Champ de Mil)		P3 (Wischmeier)		P4 (Gravillonnaire- en pente forte)	
Date	P (mm)	Coefficient (C) %	Erosion E (kg/ha)	C	E (kg/ha)	C	E (kg/ha)	C	E (kg/haxO,28)
28/4	25	0		3,7	161,3	0		0	
2/5	33,5	5,5	47	6	101,3	79,5	3 200	0	
9/5	16,3	1,7	4	2,9	8,8	0		0	
10/5	20,2	9,7	19,3	5,2	31,3	93,3	1 794	1,9	N
18/5	14	5,4	5,5	1,9	3,9	0		0	
22/5	49	3,8	18	37,4	1 142	67,9	*	13,7	18
1/6	23,7	3,9	7,6	5,8	36,9	8,5	180	0	
5/6	18	10,9	4,8	11,1	63,2	34,8	651	6,9	14,5
8/6	33	5,8	N	3,2	5,5	18,2	296	0,8	N
26/6	28	6,9	N	4,1	*	46,3	187(Cf)	8,8	N
13/7	32,1	6	19	6	89,8	53,8	2 107	7,9	N
24/7	25,4	1,3	N	2,9	22,4	0		0,5	N
30/7	23,3	0,8	N	0,9	6	0		0	
3/8	21,5	0,5	N	1,2	4,7	0		0	
5/8	32,5	5,9	N	5,9	29,4	35,5	138(Cf)	0	
12/8	28,4	1,1	N	2,5	100	23,3	*	1,1	N
20/8	38	3,4	N	11,1	22,1	53,6	355(Cf)	1,5	N
23/8	16,7	0		6,8	*	0		0	
Erosion totale en kg/ha/an			126		1 829		8 908		33
Tranche de terrain enlevé par siècle			0,5mm		7,1mm		34,3mm		0,1mm

Tableau 6. 8 : Ruissellement et érosion sur les quatre parcelles expérimentales de Pô-Banon, de 1978 à 1982.

facteurs quantifiés. Six paramètres ont été distingués dans cette analyse : la hauteur de pluie (mm), sa durée (en minutes), l'intensité instantanée maximale (mm/h), l'intensité-durée (supérieure à 30mm/h), l'indice d'humectation.

La mesure de l'humidité au sol, préalable à une averse donnée, est la plus difficile : nous avons vu, au chapitre III, que l'utilisation des tensiomètres est très délicate ; celle des sondes à chocs thermiques trop coûteuse. Quant aux prélèvements à la tarière, ils sont peu représentatifs : l'humidité mesurée dépendant beaucoup du taux de gravillons ou de la quantité de matière organique (Casenave, 1982). Toutes ces méthodes réclament en outre une présence quasi permanente sur le terrain.

Ces raisons nous ont incité à utiliser un indice, l'indice de Kolher (Ik), présenté par A. Casenave (1982, p. 220) et utilisé par les chercheurs de l'ORSTOM, confrontés à ces problèmes (Chevallier, 1982). Il est calculé, pour une averse donnée, à partir du total cumulé des précipitations antérieures, corrigé en fonction du temps qui les sépare de l'averse considérée.

L'indice (qui n'a pas de signification physique réelle), considéré comme nul à la fin de la saison sèche, dépassant exceptionnellement 30 sous pluies naturelles (maximum de 39 à Pô), répond à l'équation : $Ik_n = (P_{n-1} + Ik_{n-1})e^{-\alpha\theta}$

dans laquelle : Ik_{n-1} = valeur de l'indice avant la pluie n-1

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

θ = durée entre les deux pluies de rang n-1 et n (en jours et dixièmes)

α = coefficient d'ajustement = 0,50

Ces variables (x_1 à x_6), que l'on peut soupçonner avoir une influence sur le ruissellement et l'érosion, sont donc nombreuses mais il est prévisible que certaines soient corrélées entres elles. Chacune des matrices de corrélation nous permettra de préciser ces cas de redondance sur lesquels nous aurons à revenir.

Pour chacune des trois parcelles P_1, P_2 et P_3, des tableaux d'observations (Tab. A.6.22) ont donc été construits, regroupant l'information de chacune des années d'expérimentation, à l'exclusion des averses pour lesquelles l'une des variables explicatives fait défaut. *La méthode de la régression multiple pas à pas* a alors été appliquée, dans laquelle les variables sont choisies une à une, en commençant par les plus significatives et en s'arrêtant à un seuil de signification donné au-delà duquel l'addition d'une variable supplémentaire n'apporte à peu près rien (Lagarde, 1983).

Les résultats de la régression multiple relative aux *parcelles* P_1 *(sous savane) et* P_2 *(cultivée)* montrent de façon éclatante que, globalement, les descripteurs choisis ne sont que très partiellement explicatifs. Les coefficients de détermination multiple sont de l'ordre de 0,35 dans tous les cas ce qui signifie que 35% de la variance de y (ruissellement ou érosion) est expliquée par les variations de l'ensemble des x. Ce coefficient très médiocre ne saurait totalement nous surprendre. L'examen précédent des résultats moyens annuels (§ 6.2.2) mettait déjà en évidence le rôle de la végétation et de ses transformations d'origine anthropique ainsi que l'influence des sols, de leur nature et de leur aménagement. Pour les mêmes raisons, il n'est pas surprenant de constater que la régression est meilleure en ce qui concerne la parcelle P_3 *nue*, même si les structures de surface, évolutives à l'échelle du mois et même durant une averse, jouent un rôle très important. Nous examinons ci-dessous les résultats statistiques obtenus successivement en interprétant le ruissellement (CP_3) et l'érosion (EP_3) sur la parcelle de Wischmeïer.

A partir d'un tableau d'observations comportant 77 enregistrements, la matrice de corrélation (corrélation simple de chaque couple de deux variables) se présente comme suit :

** Matrice de corrélation ** Indice d'hu-

C	Int.instant.	Int.durée	mectation	Index R	Hauteur	Durée
Y	X 1	X 2	X 3	X 4	X 5	X 6
+1.000						
+0.312	+1.000					
+0.364	+0.465	+1.000				
+0.406	-0.018	-0.023	+1.000			
+0.448	+0.535	+0.716	-0.089	+1.000		
+0.432	+0.549	+0.831	-0.020	+0.803	+1.000	
-0.022	-0.017	+0.140	-0.075	+0.243	+0.392	+1.000

La régression linéaire multiple pas à pas[1] débute par une régression simple, dans laquelle l'ordinateur choisit comme première variable, x_4 (*indice R*), *celle qui est le plus corrélée avec y* (0,448). Le résultat est le suivant :

<< Régression linéaire multiple pas à pas >>

fichier traité :

Choix numéro 1 =variable numéro 4

Coefficient de corrélation : +0.448
Taux total réduction variance : 0.200
dont à cette étape : .200384

équation	ec.type coeff	F partiel	ddl dénom.	ddl num.
Y= 10.69695				
+ 1.063218 R	.2420396	19.29622	75	1

La deuxième variable sélectionnée n'est pas x_5, la hauteur de pluie, car celle-ci est évidemment fortement corrélée et redondante avec R. Nous choisissons x_3, l'indice d'humectation. La régression double est alors exprimée par l'équation ci-dessous :

<< Régression linéaire multiple pas à pas >>

fichier traité :

Choix numéro 2 =variable numéro 3

Coefficient de corrélation : +0.633
Taux total réduction variance : 0.401
dont à cette étape : .2004716

équation	ec.type coeff	F partiel	ddl dénom.	ddl num.
Y=-.9499321				
+ 1.158669 R	.2117348	29.94569	74	1
+ 1.714513 IHU	.3399957	25.42933	74	1

(1) *Cette recherche n'a porté malheureusement que sur des variables non transformées.*

Le coefficient de corrélation multiple avec deux variables, l'indice d'agressivité unitaire et l'indice d'humectation, est de 0,63 ; le coefficient de détermination multiple de 0,40. L'indice d'humectation apparaît comme un facteur d'ailleurs légèrement plus important que l'indice R. Les coefficients de chacune de ces deux variables sont bons puisque suffisamment grands par rapport à leur écart-type. Quant aux F partiels, ils sont positifs, c'est-à-dire que F calculé est supérieur au F d'une table de Fischer. Ces tests étant concluants, on peut poursuivre le calcul avec une troisième variable (x_6: durée de la pluie).

```
Choix numéro 3 =variable numéro 6

Coefficient de corrélation :        +0.643
Taux total réduction variance :      0.413
          dont à cette étape :       1.214116E-02

  équation            ec.type coeff     F partiel      ddl dénom.   ddl num.
-------------------------------------------------------------------------------
Y= 2.526363
+ 1.222891 R           .217181          31.70529          73           1
+ 1.691022 IHU         .339294          24.83971          73           1
-2.799323E-02 DUR      2.247566E-02     1.551247          73           1
-------------------------------------------------------------------------------
```

On constate que la variable "durée" n'apporte rien de significatif ; la valeur de F tombant largement au-dessous des seuils de signification de la table de Fischer.

Au total, le ruissellement n'est donc que partiellement conditionné par les facteurs choisis : *40% seulement de la variance sont expliqués* par la variance des descripteurs. La meilleure corrélation linéaire possible prend en compte, à parts quasi égales, l'indice d'humectation et l'indice d'agressivité des pluies mais l'interprétation du ruissellement doit être apparemment recherchée ailleurs.

Le traitement de cette parcelle standard n'ayant pas été le même, comme on l'a vu, en 1978, nous avons tenté une nouvelle régression en excluant cette année de notre tableau d'informations (Tab. A.6.22). La corrélation, certes améliorée (R^2 = 0,45), est cependant loin d'être excellente.

Coefficient de corrélation : +0.655
Taux total réduction variance : 0.429
dont à cette étape : .1979031

équation	ec.type coeff	F partiel	ddl dénom.	ddl nom.
Y=-15.06417				
+ 1.193355 PRE	.2361788	25.5304	59	1
+ 1.681961 IHU	.365739	21.14898	59	1

Les graphes des résidus (obtenus par différence entre les valeurs y réellement observées et celles qui sont fournies par les variables de l'équation de régression) confirment, par le caractère orienté du nuage de points, la médiocrité de l'équation de prédiction.

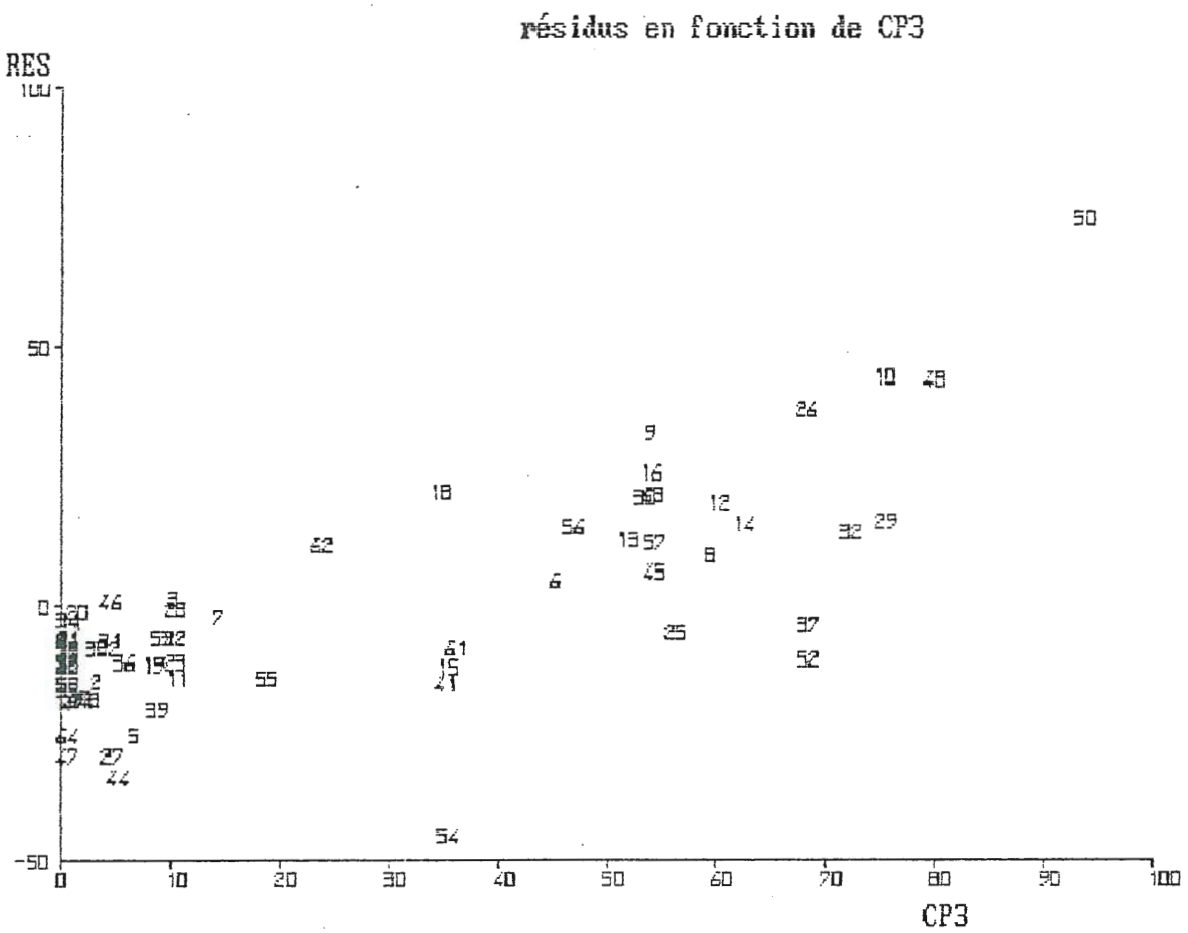


Fig. 6. 2 : Les résidus en fonction du coefficient de ruissellement dans l'équation de régression linéaire multiple à deux variables explicatives (indice d'humectation et indice d'agressivité).

Les coefficients de ruissellement sont mal prédits par cette équation au-delà d'une valeur voisine de 20 à 30%. Quant aux numéros d'ordre des observations, apparents sur le graphe et pouvant être retrouvés dans le tableau d'informations initial (Tab. A.6.22), ils montrent que les écarts principaux ne se situent pas préférentiellement telle année ou tel mois.

Enfin, les corrélations multiples relatives aux données de l'érosion sur la parcelle de Wischmeïer donnent des résultats bien plus médiocres encore puisque le coefficient de corrélation multiple ne dépasse pas 0,50 avec les deux variables explicatives que sont l'indice d'humectation et l'agressivité.

Ainsi, le traitement par corrélation multiple des données acquises sous pluies naturelles à Banon permet-il au moins, en relativisant le "poids" des facteurs quantifiables, de situer l'importance du seul paramètre restant impliqué dans les processus hydrodynamiques sur une parcelle nue, l'état de surface du sol.

Seule, l'utilisation du simulateur de pluies peut permettre à ce stade de préciser l'influence des modifications structurales du sol.

6.2.3.2 : L'enseignement des simulations de pluies conduites par l'ORSTOM.

L'utilisation des techniques de simulation de pluies (simulateur de type Swanson ou infiltromètre à aspersion) assure une maîtrise de paramètres difficilement isolables sous précipitations naturelles. Les protocoles expérimentaux, facilement multipliés surtout avec l'infiltromètre, offrent la possibilité de régler à volonté les états d'humectation initiale, les caractéristiques de l'averse et notamment l'insensité, qui peut être maintenue constante.

Les travaux de J. Collinet et C. Valentin (1979), sur six sites différents proches du lac de Bam (13°20'N ; 01°30'W) et de la réserve de Loumbila (12°30'N ; 01°30'W) ont permis de dégager en

particulier les interrelations entre l'hydrodynamique superficielle et l'érodibilité des sols soumis à différentes techniques culturales. Leurs effets, à l'exception du paillage dont l'efficacité durable est mise en évidence, dépendent de l'instabilité structurale et de la teneur en éléments grossiers de l'horizon remanié. Le labour crée bien sûr une macroporosité qui favorise l'infiltration : la pluie d'imbibition est en effet augmentée de 5 à 10mm, atteignant des valeurs regroupées autour de 15mm, quel que soit le type de sol. *Mais la permanence de son effet dépend*, à texture équivalente, *de la stabilité des mottes et du maintien de fortes perméabilités* (Collinet et Valentin, 1979, p. 302). Cela signifie que les gains à l'infiltration peuvent, au-delà d'un seuil lié aussi à l'agressivité climatique être effacés par les pertes en fines. C'est là un *dilemme essentiel et supplémentaire* pour le monde rural , que nous soulignions dès 1980 (p. 163).

En outre, le traitement en buttes cloisonnées ne semble pas constituer une parade totalement efficace puisque les diguettes se rompenten chaîne, le plus souvent, à partir de 50 à 60mm de pluies cumulées. Les auteurs insistent même sur le caractère potentiellement néfaste de cette pratique pour des sols riches en éléments grossiers, qui doivent être remués profondément.

Le second enseignement de cette étude est de montrer la convergence des comportements entre sols de nature différente (sol peu évolué d'érosion sur matériau gravillonnaire, sols ferrugineux tropicaux hydromorphes, sol brun eutrophe, ...). Celle-ci s'explique par la *préexistence* d'une pellicule de battance et l' *accentuation de sa constitution* lors de la succession des averses, ou, à Loumbila, par la *présence d'un horizon induré près de la surface, limitant les possibilités de stockage de l'eau* (Collinet et Valentin, 1979, p. 301).

Ainsi se trouve confirmé et précisé le caractère déterminant, déjà énoncé au Chapitre V (p. 194 et 206), des données morphologiques de l'horizon superficiel et de l'existence ou non d'un horizon induré à faible profondeur.

L'étude réalisée par P. Chevallier, dans le cadre sahélien déjà évoqué de la mare d'Oursi (Chap. IV, p. 153), ap-

porte des informations complémentaires, notamment pour l'évaluation de deux paramètres indicateurs du déclenchement du ruissellement : la pluie d'imbibition et l'intensité limite de ruissellement. Un classement de 9 parcelles étudiées, de celle qui ruisselle le plus (sol nu avec débris de cuirasse) vers celle qui ruisselle le moins (parcelle avec épandage sableux et végétation) est établi. Les résultats obtenus sous pluies simulées sont d'autant plus remarquables qu'ils sont confrontés positivement (28 fois sur 29 sur l'unité de Jalafanka d'une superficie de 0,8 km^2) avec le comportement naturel des bassins-versants ; cependant, les mesures réalisées sur des parcelles d'$1m^2$ ne sont probablement pas transposables à l'échelle de bassins beaucoup plus vastes et nous devrons revenir sur ces "effets d'échelle".

6.2.3.3 : De la parcelle au versant : les types de ruissellement et les caractéristiques de l'érosion.

Les modalités et les formes du ruissellement ont été particulièrement bien décrites par J. Tricart (1972). Selon lui, le ruissellement apparaît dans deux cas : lorsqu'il y a saturation et lorsque la battance occasionne le glaçage.

L'expression ruissellement de saturation peut désigner, toutefois, deux situations différentes. Il peut s'agir :

. soit d'une *saturation "durable"* correspondant à un engorgement préalable de tous les horizons du sol ou du moins des horizons de surface ;

. soit d'une *saturation instantanée* liée à une capacité d'absorption, d'infiltration insuffisante vis-à-vis des intensités instantanées maximales.

- Le premier cas est très rare, notamment sous climat tropical à saisons contrastées et sur des sols sableux, dérivés de granite et relativement poreux en profondeur. L'examen des taux d'hu-

midité, à moins 25cm, durant l'hivernage 1978 à Pô-Banon, nous en a fourni une bonne illustration (Fig. 3.6, p. 138).

- Le deuxième cas ne se confond pas, comme on pourrait le croire, avec le ruissellement de battance tel qu'il est analysé par J. Tricart. Ce ruissellement de saturation instantanée est généralement lié à une structure litée *préexistante* (Mietton, 1980, p.199), à une croûte superficielle qui limite l'infiltration. L'averse ne participe pas à une action d'imperméabilisation par effet splash. L'imperméabilisation est déjà réalisée. C'est notamment ce qui se passe en début d'hivernage sur sol nu alors que cette structure lamellaire présente une forte cohésion.

- Les modalités du *ruissellement de battance* sont différentes. Il correspond à une action d'imperméabilisation durant la pluie elle-même et il est commun notamment aux *sols préalablement travaillés*. Les particules fines des microreliefs sont entraînées vers les creux qui sont obturés et se transforment en plages d'engorgement. La durée de l'averse intervient alors pour rendre ces plages coalescentes et déterminer l'apparition d'un écoulement. La preuve incontestable de ce tri du matériel est donnée par l'apparition de liserés sableux sur le pourtour des cuvettes de décantation.

La battance, qui correspond à l'action de dislocation des agrégats et d'aplanissement du microrelief, ouvre la voie au ruissellement de saturation instantanée, sous des pluies ultérieures, en ce sens qu'elle est toujours accompagnée de la formation d'une pellicule (croûte de battance) peu épaisse mais à forte cohésion. Mais les deux types de ruissellement correspondent, on le voit, à deux phénomènes différents. L'expérience de terrain nous a montré enfin, sur la parcelle de Wischmeïer de Banon, que l'occurrence d'une croûte est systématique après chaque pluie, quelle que soit son importance, quelle que soit la période.

Quelles que soient ses modalités d'occurrence, le ruissellement proprement dit est toujours précédé par la formation de flaques ou plages d'engorgement (Tricart, 1972) et non d'une lame

d'eau (Feodoroff, 1965) sinon sur une surface régulière et homogène. Ce premier stade est d'une durée variable : l'état de surface du sol, l'humidité préalable et les caractéristiques de la pluie se combinent pour déterminer le délai d'apparition du ruissellement. Cette première phase est celle dite *d'imbibition*, décomposable en une phase d'infiltration totale et une phase transitoire (flaques).

Le déclenchement du ruissellement est lié à une extension des flaques qui, débordant, deviennent coalescentes et se rejoignent en contournant les obstacles : mottes de terre, touffes de graminées, piedsde mil, brindilles ou chaumes qui jouent tous un rôle de frein. Les vers, en soulevant et en brisant la pellicule de battance, favorisent l'infiltration. Les termites jouent un rôle variable. Les petits nids des Trinervitermes, lorsqu'ils sont abandonnés, constituent des orifices, où l'eau peut être captée. En revanche, les hautes termitières, même lorsqu'elles sont en voie de destruction, ne font pas office de piège pour les eaux, car elles se présentent comme des cônes, certes aplatis, mais suffisamment en relief pour que le ruissellement diverge à leur entour (Chap. V, p. 204).

Il s'agit par conséquent d'un ruissellement en filets ou *ruissellement diffus* qui apparaît comme le mode d'écoulement spécifique du milieu de savane "naturelle". Le ruissellement en nappe caractérise davantage les bas de versants, lorsque se développent les plaques de sols découverts déjà évoquées, ainsi que les parcelles cultivées lorsqu'elles sont encore nues et lissées par les pellicules de battance.

Une fois déclenché, ce ruissellement se poursuit avec une intensité et une durée variables selon les caractéristiques de la pluie mais son efficacité érosive, changeante elle aussi, n'évolue pas de façon simple, dans le même sens que l'épaisseur de la lame d'eau ruisselée. Enfin, cet écoulement diminue progressivement après l'arrêt de l'averse et s'interrompt : c'est *la phase dite de vidange*.

Ces différentes phases se retrouvent sur les hydrogrammes des parcelles expérimentales mais avec davantage de précision sur les enregistrements obtenus sous pluies simulées d'intensité

constante (Lafforgue, 1977 ; Collinet et Valentin, 1979). A titre d'exemple relevé sous une pluie naturelle de 13,5mm, le 27 juin 1979 à Banon, la phase d'imbibition se prolonge neuf minutes sur la parcelle de mil où les plants atteignent 20 à 25cm de hauteur pour un écartement de 40 à 60cm au-dessus d'un sol encroûté. L'intensité de l'averse atteint pourtant 90mm/h pendant les trois premières minutes mais fléchit durant les six minutes suivantes (40mm/h) avant de remonter à 90mm/h pendant deux minutes. C'est alors que le ruissellement est déclenché; il dure au total dix minutes, dont sept après la fin de la pluie.

Complémentaire du travail de préparation de l'érosion pluviale, le ruissellement diffus ou en nappe est le processus responsable d'une *ablation extraordinairement changeante dans le temps et dans l'espace, pelliculaire, insidieuse parce que sélective.*

. Les résultats expérimentaux précédents illustrent clairement le *caractère pénéstable* des savanes ou même des jachères anciennes *mais aussi la fragilité* de ces mêmes milieux lorsqu'ils sont marqués par l'homme. Les estimations de l'érosion obtenues sur des parcelles ne donnent probablement, répétons-le, qu'une idée relative de la dynamique morphogénique à l'échelle du versant. Les vitesses d'ablation obtenues dans ces conditions ne doivent être considérées que comme des ordres de grandeur. En revanche, leurs rapports, de *1 à 10 entre savane et champ de culture ou même de 1 à 100 entre savane et parcelle nue*, conservent davantage de signification.

La compétence de ce ruissellement peut être remarquable lors des tornades exceptionnelles. Un test portant sur le déplacement de gravillons colorés a été à cet égard réalisé dans les meilleures conditions, sous une averse de 121mm (3 août 1978), d'une durée de retour de 25 ans (f = 0,96. Fig. A.123.10) à Pô-Banon (Mietton, 1980, p. 208).

Les distances parcourues sur cette pente courte mais fortement inclinée (10%) ont été systématiquement mesurées pour chacun des gravillons de même que leur poids respectif. Les déplacements s'échelonnent entre 1 cm et 1,05m (Tableau 6.9). Le gravillon le

Distance parcourue (cm)	Nombre de gravillons	Poids des gravillons (g)	Dimension maximale du gravillon (cm)
1 cm	5	0,58 à 1,33	1,09 à 1,49
2,2 cm	1	0,53	1,01
2,4 cm	2	0,79 à 1,36	1,13 à 1,39
3,2 cm	1	0,13	0,69
3,8 cm	1	0,87	1,26
4,2 cm	1	1,00	1,23
4,7 cm	1	0,29	0,88
5,2 cm	1	0,53	1,02
5,3 cm	2	0,02 à 0,17	0,35 à 0,73
5,6 cm	1	0,35	1,00
5,7 cm	1	0,88	1,15
6 cm	1	0,44	1,12
6,1 cm	2	0,09 à 0,09	0,64 à ?
6,6 cm	1	0,31	1,06
7,1 cm	1	0,29	0,76
7,8 cm	2	0,10 à 0,41	0,59 à 0,60
8 cm	2	0,21 à 0,26	0,97 à 0,79
12,8 cm	2	0,07 à 0,26	? à ?
13,4 cm	1	0,06	0,48
13,7 cm	1	0,22	0,80
19,2 cm	1	0,12	0,59
19,9 cm	1	0,09	0,59
37,5 cm	1	0,04	0,42
55 cm	10	0,001 à 0,016	0,19 à 0,33
76 cm	1	0,011	0,29
83 cm	1	0,013	0,30
87 cm	1	0,010	0,28
91 cm	1	0,007	0,23
105 cm	1	0,003	0,22
Médiane : 8 cm		0,116 g.	

Tableau 6. 9 : Déplacement de gravillons colorés sous une pluie exceptionnelle (121mm) d'une durée de retour de 25 ans à Pô-Banon (3 août 1978).

plus lourd (1,36 g.), dont la dimension maximale est de 1,13cm, a parcouru 2,4cm ! On peut se demander toutefois si l'impact des grosses gouttes n'est pas responsable, au moins partiellement, de ce transfert. C'est apparemment possible pour les grains les plus petits, voisins de 0,01 g., si l'on se réfère aux résultats précédents, concernant la saltation pluviale (Tableaux 6.3 et 6.4). En fait, l'expérimentation s'est déroulée sur une plage nue, dont le pavage gravillonnaire masque ou emprisonne les éléments plus fins sous-jacents et le ruissellement agit probablement seul dans ce cas. L'absence de végétation renforce cette dynamique agressive beaucoup plus que la pente : J. Bougère (1976, p. 40) en a fait la démonstration a contrario au pied des collines birrimiennes de Similtanga (près de Kaya) - aux versants fortement inclinés (25 à 58% de pente) mais bien couverts d'arbustes et de graminées - où sa fosse à sédiments n'a rien recueilli durant les hivernages 1974 et 1975.

D'une manière plus générale, il semble bien que *l'action de l'érosion pluviale* soit pourtant essentielle, *supérieure à celle du ruissellement lui-même*. Comment expliquer autrement que les courbes de concentrations (Fig. 6.3) ou les turbidigrammes enregistrés sur parcelles présentent toujours des pics durant les premiers temps de l'écoulement ? La puissance de l'impact des gouttes est évidente pour l'observateur, sous des intensités maximales. Les mottes donnent l'impression de se tordre sous le choc ; elles sont en tout cas véritablement cisaillées et le matériel est *préparé* puis emporté par la première lame d'eau. La constitution d'une pellicule de battance pendant la pluie elle-même limite ensuite l'infiltration mais aussi l'érosion, du fait de sa cohésion.

Le ruissellement intervient sur le transport des particules mais peu sur leur érosion au sens strict, écrit C. Valentin (1985). D'ailleurs, les vitesses minimales nécessaires à l'arrachement des particules (20 cm/s) ne semblent pas atteintes.

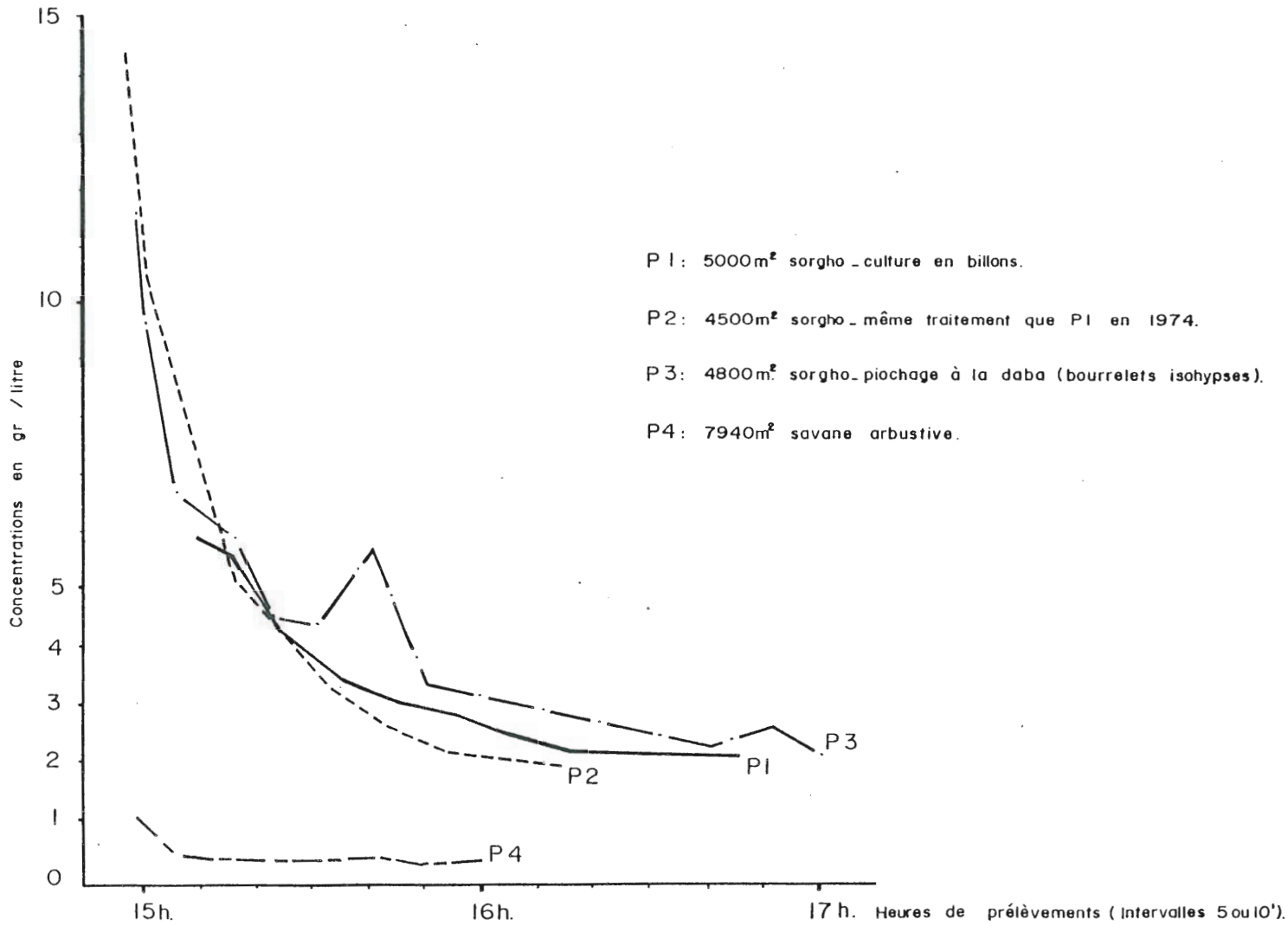


Fig. 6.3 : Variations des concentrations à l'aval des 4 parcelles de Linoghin, sous une pluie de 40mm, d'indice R égal à 34,7 (5 juillet 1974)

in Piot et Millogo, 1980b

A l'échelle kilométrique, cette appréciation doit être cependant nuancée : des processus nouveaux peuvent affecter en effet les sections aval des versants où les écoulements sont plus rapides, du fait d'un cumul probable des volumes ruisselés mais aussi pour des raisons qui appartiennent à la dynamique du bas-fond, sur laquelle nous reviendrons dans le prochain chapitre. Sur ces bas de pente, l'érosion en nappe semble assez violente pour agir par cisaillement; ce processus rendant alors bien compte d'une forme spécifique qui est celle des micro-marches d'escalier de hauteur millimétrique à centimétrique.

Micro-marches d'escalier sur plaques de sols nus, exhaussement des touffes là où il existe une couverture graminéenne, toutes ces formes attestent du caractère *pelliculaire* de l'érosion. Mais celle-ci est également insidieuse parce que *sélective*[1]. L'entraînement préférentiel des fines se traduit par l'accroissement du pourcentage d'argile et de limons recueillis dans des cuves de ruissellement par rapport au même pourcentage dans l'horizon de surface du sol. Il peut être mis en évidence aussi par la comparaison des courbes granulométriques de l'horizon de surface et des horizons inférieurs du sol. Ce contraste est d'ailleurs fréquemment perceptible à l'oeil nu, chaque fois qu'un mulch de sable grossier voile le terrain. Arrivé à ce stade, le processus d'érosion sélective n'est pas pour autant bloqué, car les termites remontent davantage de matériaux fins puisés à la limite des horizons A et B (1200 kg.ha^{-1}/an) que le ruissellement n'en emporte (20 à 400 kg.ha^{-1}/an) (Roose, 1978).

E. Roose (1978, p. 99) a recherché également une vitesse d'appauvrissement en particules fines suivant une méthode que nous illustrons avec les données texturales de notre parcelle sous savane (P_1) de Banon, détaillées en annexes (Tab. A.5.1).

Parcelle P_1 Pô-Banon	Argile + Limons	Densité	Poids de terre
Horizon 1 (0-5cm)	44,2 %	2,69	1345 T./ha

(1) *Ce caractère sélectif est mis en évidence par R. Christoï dès 1966 à propos des mesures d'érosion effectuées à Niangoloko. Les départs préférentiels en éléments fins et en carbone sont également mis en rapport avec les différentes façons culturales.*

Sachant que l'horizon sous-jacent a une teneur en argile et limons égale à 47,1%, si l'on suppose qu'à l'origine la texture du sol est la même jusqu'à la surface, l'appauvrissement est pour la partie superficielle de :

$$\left(\frac{47,1 - 44,2}{100}\right) \times 1345 = 39 \text{ T/ha.}$$

L'érosion annuelle, *dans les conditions actuelles*, étant de 115 kg/ha/an, soit 40 kg d'argile et limons (A + L représentant 35% des terres déposées dans les cuves), il aurait fallu 975 ans (39000/40) ou, mieux, *environ 1000 ans pour que cette ablation pelliculaire sélective s'opère aux dépens des cinq premiers centimètres de ce sol sous savane.*

Il s'agit là bien sûr d'un ordre de grandeur ; le dynamique morphogénique s'accélérant ou se ralentissant, à cette échelle de temps, en fonction des crises climatiques et des modalités de l'occupation humaine. Nous verrons à ce propos que les bas-fonds conservent quelques témoins archéologiques de cette évolution.

Mais, même dans un intervalle de temps plus restreint, de l'ordre de la décennie, en supposant l'agressivité climatique constante, les modalités de la dynamique érosive ne sont pas identiques chaque année tout au long du versant. Les conditions d'occupation du sol, *les structures agraires sont également à prendre en compte.* Nous avons déjà évoqué ce thème à propos du bassin-versant d'Imiga, où l'on assiste globalement à une "descente" de la population vers les bas de pente. Dans une région beaucoup moins anciennement exploitée comme l'est celle de Pô, le rapport à l'espace entre habitat et mise en culture est différent. Les villages (Pô, Banon, Pounkouyan, Kampalaga, Songo) sont groupés en tête d'interfluves[1] avec leur auréole de champs permanents, tandis que les champs temporaires représentent autant de lanières dispersées. Ces champs de brousse, peu ou pas enrichis d'engrais, se déplacent et "remontent" du bas vers le haut de versant ; leur bordure géométrique à l'amont faisant nettement contraste, sur les prises de vues aériennes, avec le flou de l'aval progressivement recon-

(1) *Photo 17.*

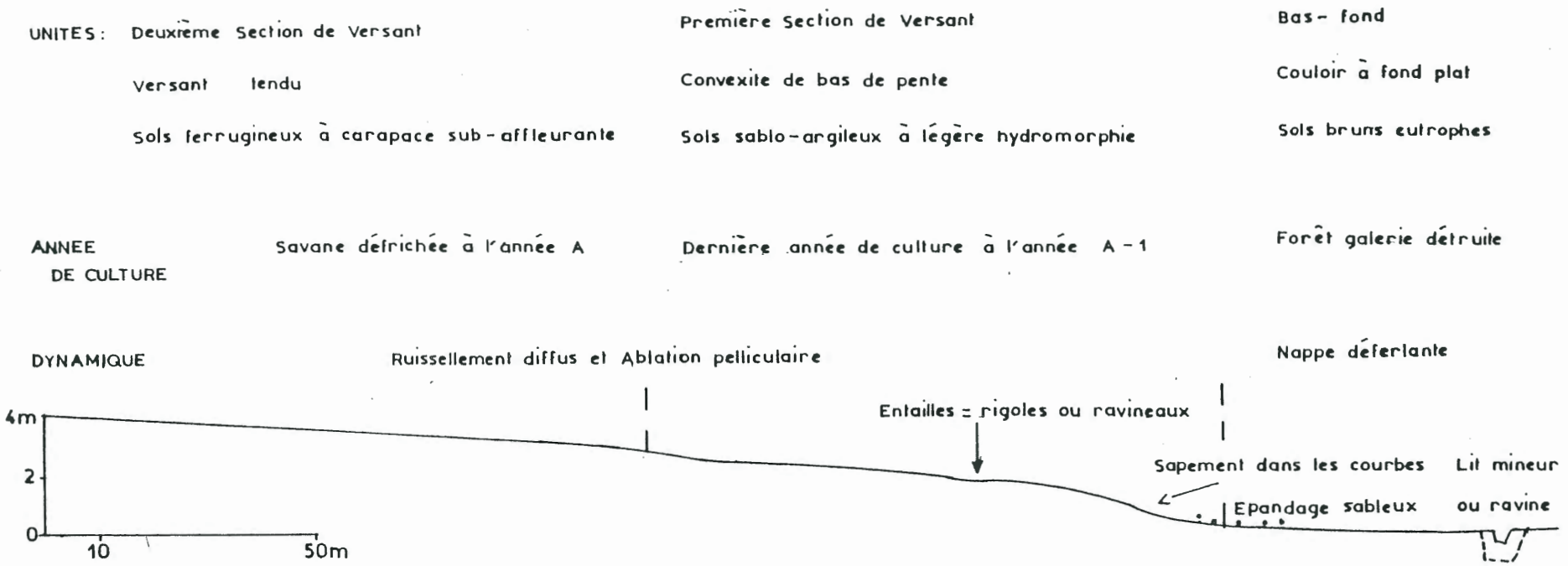


Fig. 6. 4 : La dynamique érosive sur versant : sa variabilité dans l'espace et dans le temps.

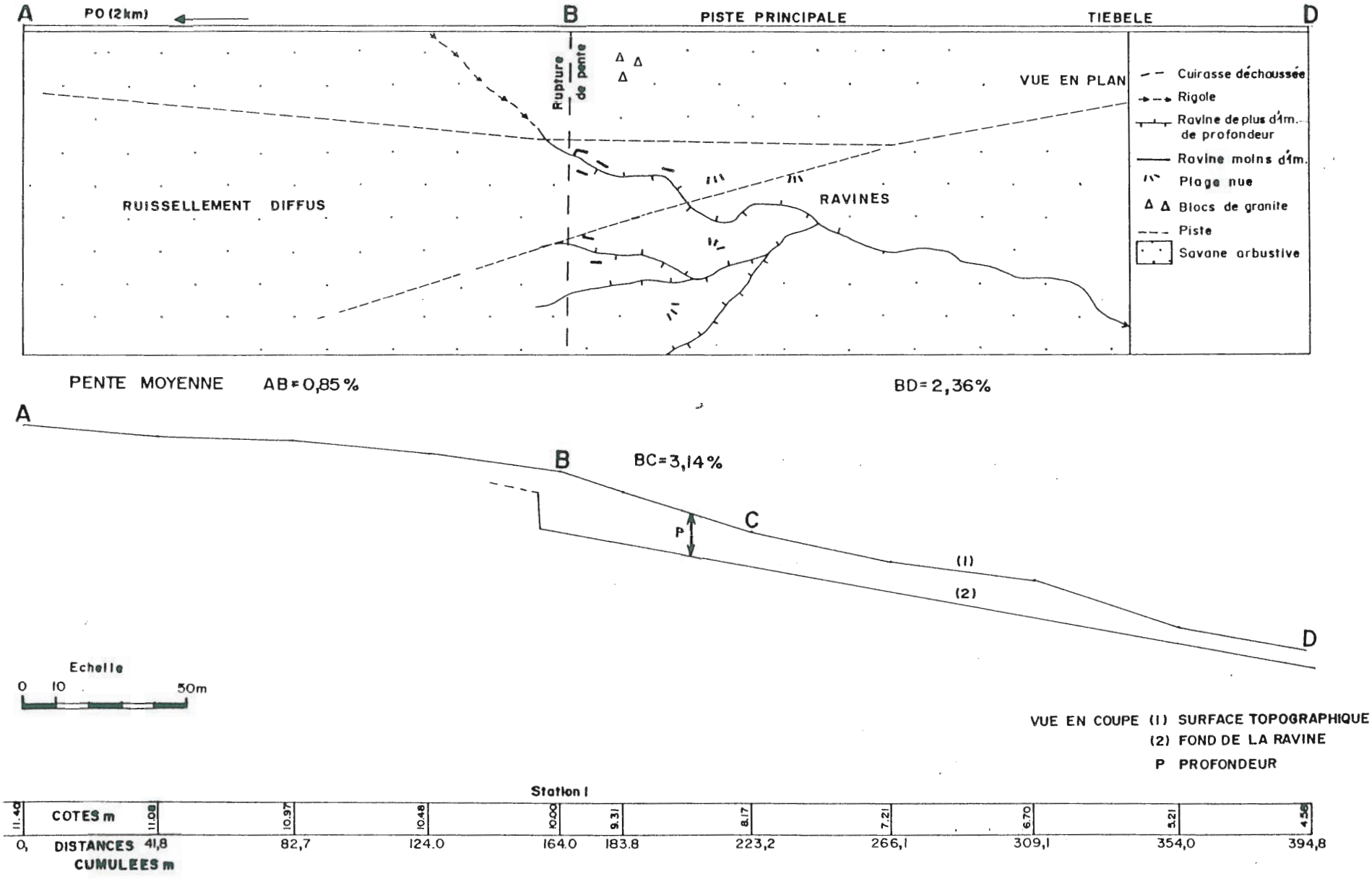


Fig. 6.5 : Les ravines de versants : le rôle de la pente et des pistes.

quis par la végétation. Ces champs sont malheureusement allongés dans le sens de la pente, sur une distance variant entre 250 et 500 mètres. Chaque défrichement constitue, en tout point, une véritable blessure, d'autant plus grave qu'elle reste ouverte longtemps, entre huit et quinze ans selon la richesse du terrain.

La section aval de versant est désormais, ici aussi, la plus menacée pour des raisons physique et socio-économiques conjuguées : accroissement de la pente, prolongation des temps de culture sur des sols non cuirassés et voisins des terroirs complémentaires de bas-fond. Seul, le maintien d'un écran végétal à l'amont limite le ruissellement mais cette protection n'est que temporaire et disparaît avec la mise en exploitation de la deuxième section de versant. Toutes conditions égales par ailleurs, c'est l'année ou les premières années de culture sur cette seconde lanière que les convexités de bas de pentes sont les plus vulnérables (Fig. 6.4).

Ces bas de versants constituent au total *des zones-charnières, aux formes spécifiques* : plaques de sols nus ou bien entailles linéaires. Ces dernières traduisent l'amorce d'un ruissellement concentré et peuvent être soit des rigoles, au profil en berceau, soit des ravineaux et ravines, plus profondément encaissés et sièges d'une dynamique plus active. Ces ravineaux et ravines semblent liés à des accroissements de pente plus ou moins marqués ou à une érosion anthropique le long des pistes ou bien encore à la conjonction des deux. A l'est de Pô (Fig. 6.5), la ravine se greffe indubitablement sur la rupture de pente qui est nette mais les pistes, ici nombreuses, jouent probablement le rôle essentiel en collectant des écoulements concentrés. Dans ces conditions, ces ravines sont fonctionnelles même sous de faibles averses (4mm le 12 août 1979). La fraîcheur de l'entaille, où les graminées ne prennent pas place, est remarquable tout comme son caractère de discontinuité avec le milieu pénéstable environnant.

On retrouve la même impression de contraste lorsqu'on débouche brutalement sur les ravins plus encaissés des bas-fonds, où la dynamique érosive doit être envisagée à l'échelle des bassins versants. Ce sera l'objet du chapitre VII.

Auparavant, il nous reste à préciser la place des transports chimiques en solution et des transports éoliens, qui constituent deux domaines de recherche pour lesquels l'information est beaucoup plus rare.

6.3. LES EROSIONS DIFFICILEMENT QUANTIFIEES.

6.3.1 : La dégradation chimique des sols.

L'érosion des sols correspond en fait à une dégradation recouvrant des aspects combinés : physiques, biologiques mais aussi chimiques. Les informations relatives aux départs de substances dissoutes dans l'eau sont bien moins nombreuses que les données sur les pertes de sol. A notre connaissance, seul E. Roose (1978 et 1979) fournit des résultats, obtenus sur les sites de Saria et de Gonsé. Nous leur ajoutons nos analyses d'échantillons d'eaux de pluie et de ruissellement prélevés à Pô et à Sirgui.

6.3.1.1 : Les apports par les précipitations.

Les résultats sont exprimés, pour chacune des pluies, en p.p.m ainsi que pour les moyennes pondérées que nous avons calculées, en fonction de la hauteur de pluie unitaire (Tableau 6.10).

De ces analyses, il ressort que la charge soluble des eaux de pluie est globalement faible ; la résistivité est généralement supérieure à 50 000 ohms.cm (1).

Cependant, les variations sont importantes au cours de l'hivernage. En début de saison des pluies, l'air est chargé des poussières des feux de brousse (Roose, 1979). Les ondes de l'est sont les plus efficaces, comme on l'a vu, et s'exercent sur un sol peu protégé. La comparaison des valeurs entre les sites de Pô (où les prélèvements sont faits en début d'hivernage) et de Sirgui (prélèvements sur l'ensemble de la saison pluvieuse) est révélatrice de l'importance de ces écarts. Peut-être, cette dynamique des lignes de grains l'emporte-t-elle sur l'effet de protection du couvert végétal et entraîne-t-elle une nou-

(1) *Les valeurs de résistivité des eaux de pluie mesurées sur le bassin du Loserigue (nord de la Côte d'Ivoire), en milieu de savane, sont comprises entre 14 700 et 666 000 Ω.cm sur trois ans (Mathieu et Monnet, 1971).*

velle recrudescence des apports en fin de saison des pluies (pluie du 6 octobre 1980 à Sirgui) ?

Référence lue sur les flacons			N° Labo	Les résultats sont exprimés en ppm Mn	Fe	Si	Al	Ca	Mg	Na	K
Pô pluie	(4,5 mm)	16.05.80	1	0,04	<	<	<	30,35	0,87	0,69	7,8
Pô pluie	(14,2 mm)	12.05.80	2	<	<	<	<	4,45	0,34	3,38	7,8
Pô pluie	(19,3 mm)	20.05.80	3	0,01	<	<	<	20,70	0,34	0,64	12,25
Pô pluie	(20,4 mm)	07.06.80	4	<	<	<	<	12,95	0,28	0,33	0,34
Pô pluie	(21,1 mm)	09.06.80	5	0,01	<	<	<	1,15	0,11	0,24	0,37
Pô pluie	(19,5 mm)	13.06.80	6	0,005	<	<	<	0,80	0,08	0,12	0,23
Pô pluie	(44,5 mm)	05.07.80	7	<	<	<	<	3,70	0,11	9,10	0,85
Moyenne pondérée (début de saison des pluies)					<	<	<	7,4	0,21	3,4	3,1
Sir pluie	(17,5 mm)	13h 13.06.80	47	<	<	<	<	2,90	0,26	0,60	0,80
Sir pluie	(23,4 mm)	9h35 24.06.80	15	0,01	<	<	<	2,10	0,20	0,59	0,80
Sir pluie	(4,2 mm)	12h26 25.06.80	48	<	<	<	<	4,65	0,34	0,54	0,80
Sir pluie	(4,9 mm)	13.07.80	16	0,005	<	<	<	2,50	0,19	0,47	0,60
Sir pluie	(6,5 mm)	02.09.80	49	<	<	<	<	1,95	0,14	0,26	0,30
Sir pluie	(15,2 mm)	07.09.80	17	<	<	<	<	1,30	0,11	0,26	0,32
Sir pluie	(43,2 mm)	18.09.80	18	<	<	<	<	0,50	0,07	0,26	0,25
Sir pluie	(6,0 mm)	06.10.80	50	<	<	<	<	2,65	0,24	0,72	0,75
Moyenne pondérée					<	<	<	1,67	0,15	0,41	0,51
Apports moyens (kg/ha/an) (P = 538mm) annuels à Sirgui								9	0,8	2,2	2,7

Tableau 6.10 : Dosages d'eaux de pluie prélevées à Pô et à Sirgui, moyennes pondérées en fonction des hauteurs de pluies unitaires et apports moyens annuels à Sirgui. (Laboratoire d'Analyses chimiques, Institut Dolomieu, Grenoble).

Les teneurs en calcium sont les plus élevées avec une moyenne de 1,67 p.p.m à Sirgui (contre 7,4 en début de saison à Pô), valeur tout à fait comparable à celle de Saria (2,14). Ensuite viennent dans l'ordre le potassium (0,51 contre 0,39 à Saria), le sodium (0,41 contre 0,12 à Saria) et le magnésium (0,15 contre 0,31 à Saria).

Les valeurs moyennes des apports (kg/ha/an) sont obtenues en multipliant les teneurs moyennes par le volume des précipitations moyennes annuelles. Ces apports, de l'ordre du kg. par hectare et par an sont plus faibles qu'à Saria ou en Côte d'Ivoire, principalement en raison d'une pluviosité annuelle inférieure.

6.3.1.2. Le départ des substances dissoutes dans les eaux de surface.

En 1980 et 1981, 101 échantillons ont été prélevés à Pô et

à Sirgui, auxquels on ajoute ici les 8 échantillons récoltés, en 1984, à l'aval du bassin-versant d'Imiga. Sur chacun d'entre eux, huit éléments ont été dosés dans la phase liquide, ce qui représente 872 analyses, effectuées à l'Institut de Géologie (Dolomieu) de Grenoble. Les délais d'acheminement et de traitement ont été de plusieurs mois mais n'ont probablement pas entraîné d'évolution notable dans la mesure où les échantillons étaient recueillis dans des flacons pleins à ras bord, parfaitement bouchés et conservés à l'abri de la lumière.

Les mesures de ph et de résistivité ont pu être faites au laboratoire de Géomorphologie de Ouagadougou dans des délais plus courts.

a- Le pH et la résistivité (Tab. A.6.23 et 24).

Le pH a été mesuré dans un délai de moins de deux mois après prélèvement[1]. Deux échantillons ont parfois été collectés à la même date, sur le même site, de manière à contrôler nos résultats. Ces analyses montrent que les eaux ruisselées sont proches de la neutralité ou peu acides , avec des moyennes identiques à Pô et Sirgui, comprises entre 6,9 et 7,2 (valeurs extrêmes : 6,1 et 7,6). Aucune corrélation entre les variations d'acidité et le type de parcelle ou la période de l'hivernage n'a pu être établie ; pareil constat a d'ailleurs été fait auparavant par E. Roose (1978, p. 68). La tendance à un peu plus d'acidité, lorsque les volumes ruisselés sont abondants, ne se retrouve pas ici.

La résistivité a été appréciée, avant et après filtrage, sur une soixantaine d'échantillons. Elle varie entre 5500 et 48 000 ohms.cm à Sirgui, entre 5500 et 180 000 ohms.cm à Pô. Aucune corrélation entre la résistivité et les volumes écoulés ou érodés n'a pu être mise en évidence : en effet, l'accroissement des volumes ruisselés entraîne un effet de dilution (augmentation de la résistivité) mais, en même temps, cet accroissement va souvent de pair avec une élévation de la charge (diminution de la résistivité).

(1) *Le stockage de l'eau même durant des intervalles de temps très courts (24 ou 48 h.) entraîne cependant une variation nette du pH, avec une tendance vers la neutralité le plus souvent* (Mathieu et Monnet, 1971, p.97).

b-La composition des solutions.

Tandis que les bases représentent les substances dissoutes dont le départ est manifeste à Pô comme à Sirgui, les ions fer, aluminium, manganèse et silicium ont, en revanche, des comportements très différents sur ces deux sites. A Pô, leurs teneurs sont le plus souvent négligeables tandis qu'à Sirgui, au pied des collines birrimiennes cuirassées, le transfert de ces mêmes éléments dans les eaux ruisselées est tout à fait évident. Les résultats unitaires sont regroupés sur les tableaux 6.11 et 6.12, où sont présentées également les moyennes pondérées, par élément et par parcelle, en fonction des volumes écoulés.

- Le classement des cations basiques, suivant une importante décroissante des pertes, est toujours identique avec *dans l'ordre le calcium, le potassium, le magnésium et enfin le sodium.*

Les moyennes pondérées des teneurs en *calcium* sont assez homogènes à Pô, comprises entre 5 et 8 mg/l avec un maximum sur le sol gravillonnaire (7,7 mg/l), ce que l'on constate aussi à Saria. Les valeurs sont plus élevées et surtout plus variables à Sirgui (5 à 17 mg/l), où des valeurs unitaires exceptionnelles peuvent même atteindre 25 p.p.m. Les pertes correspondantes en calcium, calculées en fonction des lames d'eaux ruisselées, ne sont pas négligeables puisque de l'ordre de 5 à 15 kg/ha/an sur les parcelles cultivées, avec un maximum de 28 kg. sur la parcelle traditionnelle de Sirgui en 1981 (Tableau 6.13), soit trois fois plus que les apports par les précipitations. L'importance relative des pertes en calcium à Pô peut être mise en rapport avec la richesse, moyenne à forte, des horizons superficiels concernant ce même élément (Tab. A.5.1. et 5.2). Enfin, on peut noter que la prééminence du calcium ne se retrouve pas sur les échantillons, malheureusement trop peu nombreux, prélevés à l'aval du bassin-versant d'Imiga.

Le potassium en solution apparaît remarquablement constant autour d'une valeur moyenne de 4 mg/l à Sirgui, quelles que soient l'année et la parcelle ainsi qu'à Imiga ; autour de 1 à 2 mg/l à Pô, sauf pour la parcelle P4 où l'on retrouve 4 p.p.m de moyenne. Il faut souligner cette identité des données entre milieux où les sols sont plus ou moins gravillonnaires dès la surface. Les pertes en potassium

Référence		N° Labo	Mn	Fe	Si	Al	Ca	Mg	Na	K
Pô P1	13.06.80	8	<	0,13	<	<	7,95	0,79	0,77	1,70
Pô P1	23.07.80	57	0,005	<	<	<	4,95	0,48	0,34	0,93
Pô P1	10.08.80	68	0,01	<	<	<	5,80	0,55	0,42	1,04
Pô P1	20.08.80	69	<	<	0,25	<	10,95	2,09	0,49	2,0
Pô P1	01.09.80	70	0,005	<	<	<	4,45	0,49	0,33	0,80
Pô P1	06.10.80	71	<	<	<	<	6,85	0,61	0,51	1,44
Moyenne pondérée			0,004	0,004	0,041	<	6,35	0,8	0,43	1,24
Pô P2	09.06.80	9	<	<	<	<	7,65	0,68	0,41	1,70
Pô P2	13.06.80	10	<	<	<	<	5,80	0,58	0,39	1,40
Pô P2	03.07.80	92	0,015	<	<	<	12,50	1,18	1,84	5,6
Pô P2	23.07.80	58	<	0,07	<	<	5,05	0,63	0,48	1,87
Pô P2C	23.07.80	61	<	0,17	<	0,15	24,30	0,85	0,13	2,82
Pô P2	03.08.80	93	<	<	<	<	3,05	0,19	0,47	1,25
Pô P2	10.08.80	72	<	<	<	<	4,20	0,44	0,38	0,90
Pô P2C	10.08.80	62	0,05	0,37	<	<	4,75	0,49	0,32	0,90
Pô P2	20.08.80	73	<	<	<	<	10,80	1,83	0,29	1,60
Pô P2C	20.08.80	63	<	<	<	<	7,30	1,14	0,34	1,44
Pô P2	01.09.80	74	<	<	<	<	5,30	0,64	0,34	1,04
Pô P2	03.09.80	89	<	<	<	<	5,35	0,44	0,42	0,95
Pô P2	06.10.80	75	0,03	<	<	<	9,35	3,02	0,78	11,0
Pô P2	30.10.80	76	<	<	<	<	11,95	0,97	0,63	8,25
Moyenne pondérée	(11 valeurs)		<	0,01	<	<	5,07	0,66	0,33	1,29
Pô P3	07.06.80	11	<	0,65	1,50	1,65	7,50	1,29	0,53	1,60
Pô P3	13.06.80	12	0,02	<	0,25	<	10,60	1,49	0,66	3,30
Pô P3	23.07.80	59	<	0,96	1,25	2	7,10	0,87	0,43	1,14
Pô P3C	23.07.80	64	<	0,63	0,75	1,45	19,95	1,37	0,36	1,60
Pô P3	03.08.80	77	<	0,15	<	0,25	25,30	2,07	0,31	4,9
Pô P3	06.08.80	78	0,04	1,10	1,50	2	3,65	0,62	0,25	1,45
Pô P3	10.08.80	79	0,005	<	<	<	6,40	1,35	0,44	2,0
Pô P3C	10.08.80	65	0,03	<	<	<	7,35	1,25	0,31	2,16
Pô P3	20.08.80	80	<	<	<	<	9,20	1,40	0,29	1,52
Pô P3C	20.08.80	66	<	0,39	1,5	1,45	19,50	3,26	0,81	5,0
Pô P3	01.09.80	81	<	0,07	<	<	5,10	0,52	0,33	1,68
Pô P3C	01.09.80	67	<	0,05	<	0,1	6,65	0,63	0,32	1,44
Pô P3	03.09.80	90	<	1,05	1,75	2	10,70	1,14	0,37	1,10
Pô P3C	03.09.80	56	0,01	<	16,0	9,10	6,65	1,48	0,43	1,45
Pô P3	06.10.80	82	<	<	<	<	5,90	0,89	0,33	1,92
Pô P3	30.10.80	83	<	0,15	<	0,25	7,40	1,02	0,61	8,63
Moyenne pondérée	(10 valeurs)		0,003	0,25	0,32	0,50	7,03	1,16	0,32	1,82
Pô P4	09.06.80	13	<	<	1,0	<	10,0	2,30	0,58	5,60
Pô P4	13.06.80	14	0,06	1,70	1,0	<	13,0	2,23	0,75	6,30
Pô P4	23.07.80	60	0,11	0,94	0,5	0,15	10,25	1,82	0,50	7,75
Pô P4	03.08.80	84	<	0,08	<	0,20	7,25	1,70	0,33	3,18
Pô P4	10.08.80	85	<	<	<	<	7,40	1,19	0,34	2,0
Pô P4	20.08.80	86	<	<	<	<	8,55	1,22	0,31	1,45
Pô P4	01.09.80	87	<	<	0,5	<	4,40	0,67	0,43	0,85
Pô P4	03.09.80	91	<	<	<	<	3,55	0,47	0,25	1,05
Pô P4	06.10.80	88	<	<	<	<	6,75	1,02	0,46	5,9
Moyenne pondérée	(7 valeurs)		0,03	0,28	0,27	0,07	7,71	1,34	0,43	3,97

Tableau 6.11 : Dosages effectués sur la phase liquide des échantillons d'eaux de ruissellement prélevés sur les parcelles expérimentales de Pô-Banon en 1980 et moyennes pondérées en fonction du volume des écoulements.

(Analyses chimiques - Institut Dolomieu - Grenoble).

Référence lue sur les flacons			N° Labo	Mn	Fe	Si	Al	Ca	Mg	Na	K
Sirgui (Kaya) P.P.	10h09	13.06.80	19	<	0,96	3,75	2,40	4,30	1,85	0,36	3,0
Sirgui (Kaya) P.P.	6h12	24.06.80	20	<	2,0	14,0	0,60	3,95	1,64	0,36	2,95
Sirgui (Kaya) P.P.		09.07.80	21	<	0,20	1,25	0,25	8,05	1,54	1,50	2,75
Sirgui (Kaya) P.P.		10.07.80	22	<	0,81	1,75	1,65	6,75	1,28	0,89	2,95
Sirgui (Kaya) P.P.		20.07.80	51	<	0,90	2,90	2,10	7,25	2,30	0,94	3,70
Sirgui (Kaya) P.P.		23.07.80	23	<	0,12	3,45	0,1	17,95	2,20	0,61	5,6
Sirgui (Kaya) P.P.		30.07.80	24			4,0	<	25,90	2,50	4,46	11,35
Sirgui (Kaya) P.P.		06.08.80	25	<	<	1,75	<	13,15	1,85	0,48	5,5
Sirgui (Kaya) P.P.		29.08.80	26	<	0,07	1,75	<	8,25	2,18	0,77	4,75
Sirgui (Kaya) P.P.		02.09.80	27	<	0,78	2,0	1,75	5,30	0,89	0,37	2,77
Sirgui (Kaya) P.P.		07.09.80	28	<	<	0,5	<	7,65	0,85	0,39	4,08
Sirgui (Kaya) P.P.		18.09.80	29	<	<	3,15	0,1	3,15	2,04	0,37	7,80
Sirgui (Kaya) P.P.		06.10.80	52	<	<	1,25	<	12,55	2,48	0,76	20,7
Moyenne pondérée				<	0,52	4,8	0,45	9,18	1,94	1,14	6
Sirgui (Kaya) P.T.	10h14	13.06.80	30	<	1,03	11,0	6,40	5,35	1,94	0,62	4,0
Sirgui (Kaya) P.T.	6h16	24.06.80	31	<	1,31	4,90	4,55	5,90	1,74	0,50	2,8
Sirgui (Kaya) P.T.		09.07.80	32	<	0,54	4,0	1,90	20,60	2,0	2,76	16,50
Sirgui (Kaya) P.T.		10.07.80	33	<	1,54	10,5	5,45	6,90	1,92	1,19	2,65
Sirgui (Kaya) P.T.		20.07.80	53	<	0,05	1,75	0,40	16,25	2,0	0,63	3,35
Sirgui (Kaya) P.T.		23.07.80	34	<	0,07	2,90	0,15	17,20	2,5	0,90	7,90
Sirgui (Kaya) P.T.		30.07.80	35	<	0,48	2,25	1,30	12,10	2,15	0,43	4,0
Sirgui (Kaya) P.T.		06.08.80	36	<		2,25	0,1	19,40	2,05	1,73	4,2
Sirgui (Kaya) P.T.		29.08.80	37	<	1,50	13,5	5,45	11,25	1,90	0,72	6,9
Sirgui (Kaya) P.T.		02.09.80	38	<	1,81	11,0	5,45	6,90	2,20	0,52	2,70
Sirgui (Kaya) P.T.		07.09.80	39	<	1,75	13,0	7,30	6,25	1,61	0,71	4,75
Sirgui (Kaya) P.T.		18.09.80	40	<	1,15	13,0	4,55	6,50	2,05	0,58	3,45
Sirgui (Kaya) P.T.		06.10.80	54	<	0,04	2,0	0,1	17,70	1,90	1,78	10,10
Moyenne pondérée				<	0,93	7,4	3,46	10,24	1,99	0,85	3,88
Sirgui (Kaya) P.W.		09.07.80	41	<	<	2,25	<	25,90	3,0	1,85	7,10
Sirgui (Kaya) P.W.		20.07.80	55	<	<	3,85	0,1	22,35	2,0	0,93	3,45
Sirgui (Kaya) P.W.		30.07.80	42	<	<	2,0	<	10,0	2,50	0,88	3,20
Sirgui (Kaya) P.W.		18.09.80	43	0,01	2,61	30,86	15,45	4,0	2,60	0,64	1,50
Moyenne pondérée				<	0,45	8,06	2,72	17,06	2,25	0,9	3,26

Références lues sur les flacons		Mn	Fe	Si	Al	Ca	Mg	Na	K
		Résultats exprimés en mg/l ou en ppm							
SIR 1 - PW (Parcelle de Wischmeier)	25.06/81	0,02	3,70	17,5	10,60	6,30	0,75	0,50	2,68
SIR 2 - PW	22/07/81	0,02	5,85	26,25	18,45	4,75	0,23	0,20	3,05
SIR 3 - PW	23/07/81	0,005	2,05	14,15	6,85	6,20	0,95	0,40	3,50
SIR 4 - PW	25/07/81	0,01	5,65	26,25	18,20	4,90	0,22	0,32	2,90
SIR 5 - PW	28/07/81	0,005	3,35	16,65	9,60	4,15	0,29	0,24	2,07
Moyenne pondérée		0,02	4,03	21,15	13,8	5,49	0,51	0,35	2,87
SIR 6 - P.T. (Parcelle traditionnelle)	25/06/81	0,01	3,00	15,40	9,40	9,95	1,19	0,83	4,42
SIR 7 - P.T.	28/06/81	0,005	0,80	9,15	2,40	8,30	1,70	0,70	3,80
SIR 8 - P.T.	2/07/81	0,005	2,65	15,0	7,45	5,95	0,84	0,42	3,16
SIR 9 - P.T.	7/07/81	0,01	1,15	9,55	3,80	10,90	1,86	1,43	5,45
SIR 10- P.T.	13/07/81	0,005	2,35	15,85	7,65	9,20	1,21	0,76	4,60
SIR 11- P.T.	22/07/81	0,005	2,40	14,60	8,05	6,55	0,75	0,67	3,38
SIR 12- P.T.	23/07/81	<	1,25	10,85	3,80	6,75	1,29	0,74	2,85
SIR 13- P.T.	25/07/81	0,005	1,65	10,85	5,20	8,40	0,90	0,82	3,46
SIR 14- P.T.	28/07/81	<	0,35	7,30	0,80	16,05	2,63	2,95	6,24
SIR 15- P.T.	5/08/81	<	1,85	10,85	6,20	8,30	0,84	1,00	4,28
SIR 16- P.T.	9/08/81	<	2,00	14,15	5,60	10,30	1,21	0,93	4,74
Moyenne pondérée		0,007	1,17	13,01	7,38	9,02	1,21	0,89	4,17
SIR 17- P.P. (Parcelle sur site	25/06/81	<	0,45	5,40	0,80	6,90	2,47	0,80	3,05
SIR 18- P.P. antiérosif)	28/06/81	<	0,05	5,90	0,20	5,95	1,62	0,90	2,90
SIR 19- P.P.	2/07/81	<	0,15	6,15	0,2 <	3,90	1,10	0,30	2,63
SIR 20- P.P.	7/07/81	<	0,40	8,75	0,80	6,20	1,24	2,50	3,23
SIR 21- P.P.	13/07/81	<	1,05	12,5	2,80	6,20	1,33	0,30	4,19
SIR 22- P.P.	22/07/81	<	0,15	8,75	0,40	6,20	1,57	0,36	3,59
SIR 23- P.P	23/07/81	<	1,50	12,10	2,60	6,75	1,0	1,76	4,87
SIR 24- P.P	25/07/81	0,005	1,30	12,10	2,60	6,65	1,29	0,72	3,74
SIR 25- P.P.	28/07/81	0,02	6,10	20,40	13,15	3,00	0,19	0,30	3,12
SIR 26- P.P.	9/08/81	0.005	1.60	10.0	3.20	4.90	0.93	0.50	2.93
Moyenne pondérée		0,001	0,69	7,46	1,47	6,3	1,79	0,79	3,34
IMI 10	12/08/84	<	2,00	8,75	5,0	2,05	0,24	0,60	4,30
IMI 11	"	<	0,90	5,0	2,8	1,85	0,29	0,63	4,03
IMI 12	"	<	2,80	11,25	6,80	1,15	0,06	0,55	4,13
IMI 13	"	<	2,50	9,15	6,0	1,00	0,07	0,57	3,95
IMI 14	31/09/84	<	0,60	4,25	1,60	2,00	0,46	0,67	3,97
IMI 15	"	<	0,30	3,45	1,0	1,95	0,60	0,68	3,88
IMI 16	"	<	0,35	3,05	1,0	0,95	0,21	0,26	1,95
IMI 17	"	<	0,45	2,70	0,80	2,05	0,55	0,67	3,97

Tableau 6.12 : Dosages effectués sur la phase liquide des échantillons d'eaux de ruissellement prélevés sur les parcelles expérimentales de Sirgui (SIR) en 1980 et 1981 ou à l'aval du bassin versant d'Imiga (IMI) en 1984. Résultats unitaires et moyennes pondérées en fonction du volume des écoulements.

sont elles aussi non négligeables, surtout à Sirgui où elles représentent trois ou quatre fois le volume des apports par les pluies.

Les teneurs en *magnésium* (0,5 à 2 mg/l) et surtout en *sodium* (0,3 à 1,1 mg/l) sont moins importantes. En ce qui concerne le sodium, les pertes estimées à Sirgui sont même inférieures aux apports par les pluies.

Eléments / Parcelles et lames ruisselées	Mn	Fe	Si	Al	Ca	Mg	Na	K
Pô 1980								
P1 - Savane (17,7 mm)	0,001	0,001	0,007	<	1,16	0,14	0,08	0,22
P2 - Mil (105,6 mm)	<	0,01	<	<	5,35	0,70	0,35	1,36
P3-Wischmeïer(159,5 mm)	0,005	0,40	0,51	0,80	11,21	1,85	0,51	2,90
P4 Gravillonnaire (43,7 mm)	0,01	0,12	0,12	0,03	3,37	0,59	0,19	1,73
Sirgui 1980								
PP (116,1 mm)	<	0,60	5,57	0,52	10,66	2,25	1,32	6,97
PT (111,2 mm)	<	1,03	8,23	3,85	11,39	2,23	0,95	4,31
PW (105,8 mm)	<	0,48	8,53	2,88	18,05	2,38	0,95	3,45
Sirgui 1981								
PP (240,9 mm)	0,002	1,66	17,97	3,54	15,18	4,31	1,90	8,05
PT (306,2 mm)	0,02	3,58	39,84	22,6	27,62	3,71	2,73	12,77
PW (241,6 mm)	0,05	9,74	51,1	33,34	13,26	1,23	0,85	6,93

Tableau 6.13 : Pertes en charges solubles (kg/ha/an) sur les parcelles expérimentales de Pô (1980) et de Sirgui (1980 et 1981).

- *Les ions fer, silicium, aluminium et manganèse.*

Les teneurs en *fer* soluble doivent être interprétées avec beaucoup de prudence dans la mesure où ces eaux n'ont pas été stabilisées. Cependant, il apparaît que les eaux de Sirgui sont beaucoup plus chargées que celles de Pô où la parcelle gravillonnaire (P4) et la parcelle voisine (P3) ont toutefois des moyennes pondérées plus de dix fois plus importantes que sur P1 et P2. A Sirgui, les concentrations sont étonnantes, comprises entre 0,5 et 4 mg/l en moyenne avec des pics de 6 mg/l, notamment sur la parcelle de Wischmeïer en 1981, lors de l'épisode du 22 au 28 juillet durant lequel on compte deux coefficients de

ruissellement supérieurs à 60% et un troisième supérieur à 20% (pluies de 41mm, 7mm et 15,1mm). La valeur de 6,1 p.p.m sur la parcelle protégée (PP), le 28 juillet 1981, alors que le ruissellement n'est pas particulièrement important (K.R = 16,9%), est à considérer en revanche avec circonspection.

Il faut noter enfin que les quelques teneurs relevées sur le bassin versant d'Imiga, où les sols peu évolués sur cuirasses sub-affleurantes sont nombreux, sont assez élevées, en particulier le 12 août 1981.

Les teneurs en ions silicium montrent les mêmes écarts que pour le fer entre les deux sites de Pô et de Sirgui. A Pô, les teneurs sont insignifiantes (P1, P2) ou faibles (P3 et P4). En revanche, à Sirgui, les moyennes sont élevées à très élevées sur la parcelle de Wischmeïer et se renforcent de 1980 à 1981 (maximums de 26 mg/l). Ces fortes concentrations se retrouvent également sur le bassin-versant d'Imiga où leur origine peut correspondre en particulier à une dissolution des minéraux silicatés sur les affleurements rocheux. Tel n'est pas le cas dans le cadre étroit des parcelles où il faut, peut-être, faire intervenir une destruction partielle des argiles plutôt qu'une minéralisation bien improbable des litières sur ces témoins cultivés. Les pertes annuelles sont en tout cas les plus significatives (jusqu'à 50 kg/ha/an) comme elles le sont pour l'ion aluminium.

Les teneurs moyennes en ions aluminium varient une fois encore dans le même sens : insignifiantes à Pô, elles se redressent à Sirgui, principalement en 1981 et sur la parcelle de Wischmeïer. L'écart entre les parcelles protégée et traditionnelle est toutefois plus net que pour les ions Fe et Si. Enfin, les teneurs en manganèse sont quasi négligeables dans tous les cas.

c- Tentative de détermination de la minéralisation globale.

Les mesures de résistivité des eaux ruisselées, faites au laboratoire de Géomorphologie, permettent une estimation de la charge globale dissoute. Après un filtrage éliminant les suspensions et une correction des valeurs en fonction de la température ($\rho\ 20 = \frac{\rho T}{A}$, avec

A = 1,219 pour 30°C), la minéralisation globale en sels dissous peut être calculée rapidement par la formule de Doroschewski, améliorée en tenant compte des ordres de grandeur de la résistivité. Ainsi, pour ρ supérieure à 20 000 Ω.cm, la minéralisation est égale à $\frac{1\ 365\ 079}{\rho 20}$ (Rodier, 1971 , p. 56). Les valeurs correspondantes sont regroupées sur les tableaux A.6.23 et 24 et mises en rapport avec la minéralisation partielle concernant les huit éléments dosés séparément et pouvant être calculée rapidement sur les tableaux 6.11 et 6.12. Sur chacune des parcelles de Pô et de Sirgui (hormis Pw, pour laquelle on ne dispose que de deux mesures de résistivité), une moyenne pondérée en fonction du volume des écoulements est d'abord calculée puis les pertes correspondantes en kg/ha/an, pour l'année 1980.

Parcelles / Erosion	Pô P1	P2	P3	P4	Sir PT	PP
Minéralisation globale (mg/l) (nombre de valeurs)	55,5 (5)	36,8 (7)	52 (7)	63,3 (5)	74,5 (6)	81,2 (8)
Pertes (kg/ha/an) en 1980	9,8	38,9	82,9	27,7	82,8	94,3

Tableau 6.14 : Estimation de la minéralisation et des pertes globales en charges dissoutes, durant l'année 1980, sur les parcelles de Pô et de Sirgui.

Ces valeurs ne représentent que des estimations car le calcul s'appuie sur un trop petit nombre de mesures de résistivité. Néanmoins, il semble que les pertes globales en sels dissous soient très minimes, surtout par rapport aux transports lourds et en suspension *sur les parcelles cultivées, où l'érosion chimique n'est que de 1 à 3% de l'érosion totale*. Ce n'est que sur la parcelle sous savane (P1) de Pô que cette dégradation chimique atteint 7%. Enfin, il faut noter que les dosages sur les huit éléments précités ne représenteraient que 30 à 40% de la minéralisation globale à Sirgui et environ 20% à Pô. Sur cette dernière station, cela laisserait une place essentielle et étonnamment élevée pour les autres éléments non dosés : le carbone principalement, l'azote, le phosphore, les chlorures, les sulfates, etc...

Conclusion :

L'enseignement des prélèvements faits à Sirgui, sur des terres très érodées au pied de collines birrimiennes, ainsi que des premiers échantillons récoltés à Imiga est de montrer que le caractère peu chargé en solubles des eaux superficielles tel qu'il est perçu sur parcelles à Pô ou, dans des conditions assez identiques, à Saria et à Gonsé, ne peut être généralisé. L'importance de ces pertes varie manifestement dans l'espace et dans le temps.

Dans l'espace, il y a bien sûr nécessité de considérer la structure du milieu, cristalline ou volcano-sédimentaire, et les sols qui leur sont liées. Mais il faut, semble-t-il, tenir compte également d'un effet d'échelle. Ainsi, le petit bassin versant d'Imiga, situé en domaine cristallin, intègre-t-il différents types de sols à l'affleurement qui peuvent rendre compte d'une qualité des eaux de ruissellement très dissemblable de celle obtenue à Pô, sur granite également. Enfin, on note sur ce bassin que les concentrations relativement élevées(1) enregistrées lors de ces deux journées, du 12 août et 31 septembre 1984, correspondent à des crues très modestes.

La comparaison des deux années de résultats à Sirgui illustre la variabilité dans le temps de ces départs de matières solubles. Si l'on constate une augmentation en 1982 des teneurs moyennes en Fe, Si et Al, en revanche les charges en cations basiques diminuent globalement. Il ne semble donc pas que le départ des bases puisse être mis en relation avec la seule agressivité climatique, traduite en volumes écoulés. Peut-être l'alimentation en bases est-elle d'origine plus lointaine que le cadre de la parcelle et va-t-elle progressivement en diminuant du fait de la fermeture à l'amont ? La fourniture en ions Fe, Si et Al pourrait provenir en revanche d'une destruction locale des argiles, renforcée lors des années climatiques les plus agressives et sur les sols les plus travaillés (parcelle de Wischmeïer). Leur migration se ferait ainsi à courte distance, en association avec les terres érodées.

Un schéma de bilan géochimique, même partiel, ne peut malheureusement être établi, sur nos deux sites de Pô et de Sirgui, du fait de l'absence de diverses données :

- d'une part, sur les différents éléments chimiques liés à des solides dans les terres de fond et dans les suspensions

(1) *Il est normal de penser que sur un bassin les eaux soient plus minéralisées du fait d'un parcours plus long. Cet effet de taille sera vérifié à l'échelle des très grands bassins versants.*

- d'autre part, sur d'autres éléments non analysés dans les eaux de ruissellement, tels que le carbone ou l'azote total
- enfin, sur les pertes en solubles liées aux drainages obliques et profonds.

Seul E. Roose (1978, 1979, 1983) a établi un bilan géochimique sous savane arborescente à Gonsé ainsi que sous jachère et cultures à Saria. A Gonsé et sur la jachère de Saria, le bilan semble légèrement positif compte tenu des apports par les remontées biologiques et par les pluies ou les aérosols ; compte tenu aussi de la faiblesse des pertes par ruissellement et surtout par drainage.

Le bilan est très probablement de même nature à Pô, où les apports atmosphériques, ne serait-ce que par les dépôts de début de saison de pluies (Tableau 6.10), compensent des pertes modérées en solubles (Tableau 6.13). Toutefois, sous des sols gravillonnaires perméables et situés en aval de versant (site de la parcelle P4), *le drainage peut être occasionnellement important*, comme cela a été le cas lors de la pluie exceptionnelle du 3 août 1978(1). L'analyse d'un échantillon prélevé à 1,20m de profondeur a donné les résultats suivants :

Mn	Fe	Si	Al	Ca	Mg	Na	K	ρ (KΩ·cm
<0,5	2,7	23,2	7,2	15,8	2,8	3,5	3,2	9,1

Tableau 6.15 : Teneurs en solubles (en p.p.m) et résistivité dans un échantillon de lessivage oblique, prélevé à l'aval de la parcelle P4 à Pô-Banon, au lendemain d'une pluie exceptionnelle (121mm).

Ces bilans positifs sont cependant contrariés, vis-à-vis de la production végétale, par la pratique des feux de brousse qui détruisent 80% des matières organiques et "réduisent à néant l'espoir d'améliorer les faibles taux de carbone et d'azote, de phosphore assimilable et de bases échangeables de ces sols ferrugineux" (Roose, 1979, p.69).

---

(1) *A toute chose, malheur est bon ! Cette tornade ayant fait flotter nos fûts de 200 litres, placés à 1m de profondeur, nous avons pu observer cet écoulement oblique en profondeur et faire un prélèvement.*

Quant au bilan sous culture de sorgho, à Saria, il est caractérisé par une lixiviation qui reste faible mais aussi par une augmentation des pertes par ruissellement. La nutrition des cultures se trouve compliquée par une autre pratique qui est celle de l'exportation des pailles, dans lesquelles sont immobilisées des bases.

Le problème de l'utilisation des résidus de culture (Dugue, 1984 ; Quilfen et Milleville, 1984) se pose donc à plusieurs niveaux : comme écran protecteur vis-à-vis de l'érosion pluviale puis de l'érosion mécanique, comme catalyseur d'infiltration et enfin comme agent de nutrition minérale.

Dans une politique antiérosive et de développement non utopique, c'est-à-dire accessible à un monde rural disposant de peu de moyens, les résidus de culture constituent un des outils dont il faut impérativement accroître l'utilisation. Nous y reviendrons au chapitre VIII.

6.3.2 : Les transports éoliens.

Les données relatives à l'érosion éolienne au Burkina Faso sont extrêmement rares. Les raisons en sont probablement les grandes difficultés techniques rencontrées pour piéger les particules, notamment en suspension, mais aussi peut-être la conviction chez nombre de chercheurs que cette dynamique est, sinon négligeable, du moins très secondaire par rapport à l'érosion hydrique.

Les impressions que nous avons acquises sur le terrain, notamment en saison sèche, nous incitent à un jugement plus nuancé. Elles ne s'appuient malheureusement pas sur des mesures précises. Nos tentatives d'estimations des transports en suspension conduites à Ouagadougou (sur le toit de la bibliothèque universitaire !) se sont soldées par un échec. Les appareils hémisphériques(1), montés en série sur un même support à différentes hauteurs, se sont révélés trop "aérodynamiques" et inadéquats, les particules fines, un instant piégées et déposées, étant reprises et balayées par un mouvement tourbillonnant.

---

(1) *Ces appareils ont été introduits dans le pays par Mme Mainguet, dans le cadre d'une étude de la dynamique externe dans la plaine du Sourou (Mainguet et Cossus, 1980). Nous la remercions de nous en avoir laissé quelques-uns à notre disposition.*

Les seules informations disponibles, à notre connaissance, ont été acquises sur les parcelles d'érosion du CTFT à Oursi, en milieu sahélien. En 1978 et 1979 ont été évaluées les quantités de sables, piégés par les cuves, les parois des goulottes et des partiteurs, transportés probablement par charriage et saltation lors des coups de vent sans pluie ruisselante. Ces prélèvements ont été rapprochés des relevés anémométriques, en direction et en vitesse horaire, effectués à cinq kilomètres de distance. Les vitesses horaires sont regroupées par classe de cinq en cinq km/h, entre 15 et 45 km/h. En dessous de 15 km/h (4,2 m/s), aucun apport n'a été observé, ce qui confirme la validité du seuil de 4-5 m/s choisi comme limite de vents efficaces. Au dessus de 45 km/h, la quasi totalité des éléments est reprise et déblayée à l'extérieur des cuves.

Les principaux enseignements empruntés aux auteurs de l'étude sont les suivants :

1°/ Il apparaît que les piégeages ne sont pas proportionnels aux surfaces des ouvertures. "Les petites différences de situation par rapport au modelé local et par rapport au lit du vent se révèlent fondamentales pour créer des écarts considérables". A titre d'exemple, le fort vent de sable, de plusieurs heures, précédant la petite pluie (0,8 mm) du 3 juillet 1978 a déposé les quantités suivantes à l'aval de chacune des parcelles :

parcelles (P)	Cuves		Dépôts éoliens (kg)
	N°	Surfaces (m^2)	
P. Wischmeïer	1	2,1	6,4
P protégée	2	2,1	4,5
P cultivée	2	2,1	15,3

Tableau 6. 16 : Résultats ponctuels de transports éoliens à Oursi (Piot et Millogo, 1980 a).

Les différences observées entre parcelles sont à mettre en relation avec l'emplacement des cuves par rapport à la végétation. La parcelle cultivée, en ce début d'hivernage, n'a pas encore d'écran protecteur tandis que la parcelle mise en défens est entourée d'une végétation abondante. En revanche, l'écart important entre la parcelle de mil et la parcelle de Wischmeïer, nue elle aussi, n'est pas expliqué par les auteurs (travail du sol ?, micro-modelé ?). Durant la pluie du 24 juin 1978 (11,1 mm) n'ayant pas entraîné de ruissellement, l'accumulation de sables sur la parcelle de Wischmeïer est de 4,5 kg dans la cuve n° 1 et de 29,4 kg dans le canal d'amenée.

2°/ Les valeurs globales de la charge transportée, estimées en $kg.ha^{-1}$, en référence à la superficie de chacune des parcelles, permettent de mettre en évidence la possibilité d'erreurs considérables lors de l'évaluation de l'érosion hydrique dans le cas où la distinction des dépôts éoliens ne serait pas faite. L'excès est alors voisin de 50% (Piot et Millogo, 1980 a, p. 15).

A notre avis, cette expression de l'érosion éolienne est cependant à considérer avec prudence. Elle peut laisser croire que les matériaux piégés par les cuves sont le résultat d'une ablation sur la seule parcelle considérée. En fait, malgré les tôles qui les ceinturent, les sables peuvent être charriés de l'extérieur après amoncellement derrière les obstacles ou provenir par saltation de zones plus ou moins éloignées. En outre, ces parcelles sont orientées vers le N-NW ; elles reçoivent donc le plus fréquemment les vents efficaces transversalement. Tous les matériaux piégés ne proviennent donc pas d'un seul déplacement dans le cadre de la parcelle. Il vaut donc mieux s'en tenir à l'expression incomplète d'un "débit" en faisant référence aux superficiesdes ouvertures.

Dates	Parcelle cultivée	Parcelle protégée	Parcelle Wischmeïer
19 juillet 1979	0,31 kg/m²	0,16	0,33
29 août "	0,11	0,015	1,55
2 septembre "	0,06	0,05	0,125
21 septembre "	0,23	0,03	1,73

Tableau 6. 17: Résultats de transports éoliens à Oursi, pour différentes averses, durant l'hivernage 1979 (Piot et Millogo, 1980 a).

En revanche, l'écart devient important à partir de la fin du mois d'août entre Pw et les autres parcelles. On peut donc penser que la parcelle nue de Wischmeïer devient elle-même un élément d'alimentation du collecteur, durant le dernier tiers de la saison des pluies, lorsque la végétation alentour freine les transports à plus grande distance.

Cette difficulté à distinguer les apports très locaux et lointains est un handicap supplémentaire dans cet essai de perception de la dynamique éolienne. Celle-ci est très active à Oursi mais nous sommes là dans un cadre sahélien. Dans quelle mesure, la savane, même dégradée, fait-elle encore écran plus au sud face aux vents forts ? Nous aurons à revenir sur cette question à propos de l'interprétation des formes à l'échelle des bassins-versants.

CONCLUSION.

La dynamique morphogénique aux échelles élémentaires est la résultante du jeu combiné de multiples processus d'origine physique, chimique ou biologique. Ces différentes actions s'apparentent à un bilan de transfert de matières, dont la complexité tient au caractère tantôt positif (dépôt), tantôt négatif (ablation) de chacun de ses termes. Chacune de ces actions est en outre plus ou moins perceptible et par là même quantifiable. Leur examen détaillé en ce milieu de savane est d'autant plus nécessaire que leur efficacité relative peut se révéler surprenante. Ainsi en est-il des remontées par les termites ou de l'érosion pluviale, qui entraînent des déplacements de matières au moins aussi importants que le ruissellement, supérieurs à une tonne par hectare et par an.

Ces actions sont également variables dans l'espace et dans le temps. Dans l'espace, les processus biologiques d'origine animale ou végétale interviennent de façon plus ponctuelle que les processus mécaniques ou chimiques. Mais la vulnérabilité des sols vis-à-vis des processus aréolaires comme l'érosion pluviale, le ruissellement ou la déflation est cependant très contrastée en fonction du maintien ou non d'un couvert, lui-même sous l'emprise anthropique.

Ces contrastes prennent toute leur signification en saison des pluies ou mieux lors de la période charnière de début d'hivernage (avril-mai-juin). Durant ces mois, des facteurs atmosphériques, phytogéographiques, anthropiques, aussi indépendants que les lignes de grains et leur agressivité pluviale ou éolienne, le couvert végétal et son faible recouvrement, l'homme et ses activités agricoles (nettoyage des champs, labour), concourent de manière étonnante et brutale à déstabiliser ce domaine savanien.

S'il n'est pas forcément le plus efficace morphogéniquement, le ruissellement n'en constitue pas moins le processus le plus analysé dans ces milieux où l'économie de l'eau est vitale. Trente neuf (39) années de mesures sur parcelles ont été cumulées sur 8 sites différents, répartis entre 11°11'N et 14°34'N, entre 1967 et 1982.

Dans un contexte de précipitations déficitaires mais sur un modelé représentatif par ses pentes généralement inférieures à 3%, l'ensemble des données ainsi recueillies attestent que le ruissellement atteint des valeurs élevées sur sols cultivés à très élevées sur sols nus. Les coefficients de ruissellements annuels moyens dépassent 20% sous une monoculture conduite à plat et 40% sur sols nus peu travaillés. Quant aux écoulements unitaires maximums, ils se situent à des niveaux inquiétants de plus de 50% de l'averse ou même 75%, avec un maximum maximorum de 96,9% enregistré à Bané. En termes de prévisions, la prudence est tout autant de rigueur en ce qui concerne la savane proprement dite, puisque les coefficients de ruissellements moyens annuels peuvent y être multipliés par 10 ou 50 après des feux de brousse précoces ou tardifs, passant de 0,3% à 3 ou 15%, tandis que les extrêmes journaliers atteignent, dans ce dernier cas, des niveaux records supérieurs à 50% et quasi identiques à ceux évalués en terrain cultivé. C'est dire si la stabilité de la savane est due très largement à son couvert herbacé. Le sol en revanche ne joue pas, du moins à travers sa nature pédologique, le rôle fondamental hormis dans les régions sub-sahéliennes ou sahéliennes où leur caractère sableux leur confère davantage de perméabilité.

L'érosion mécanique varie elle aussi dans les mêmes conditions: exacerbée sur les sols nus où elle dépasse 10 T/ha/an, elle est encore très préoccupante sur sols cultivés (1 T/ha/an au moins) et insignifiante ou limitée sous savane. Le ruissellement et l'érosion ne sont pourtant pas directement assimilables. Si le premier est d'abord contrôlé par le couvert végétal, l'érosion en revanche dépend prioritairement de la structure de surface du sol, de l'existence ou non des croûtes superficielles lamellaires qui lui confèrent sa cohésion. Dans tous les cas, cette érosion liée à un ruissellement diffus ou en nappe est insidieuse parce que pelliculaire et sélective. Elle n'est manifeste dans le paysage que sur les plaques de sols nus, le plus souvent situées sur les avals de versants où l'on rencontre également les premières incisions linéaires en rigoles, ravineaux ou ravines.

La dégradation chimique apparaît globalement réduite, de l'ordre de la dizaine à quelques dizaines de kg/ha/an. La mobilité des ions

fer, silicium et aluminium est cependant variable dans l'espace et davantage marquée partout où les cuirasses sont affleurantes ou sub-affleurantes.

Les possibilités de drainage en profondeur sont très limitées, du moins durant les années sèches et en dehors des évènements pluvieux exceptionnels. Les essais de bilans hydriques à Pô-Banon donnent en effet un drainage maximum de 7% des précipitations annuelles sous savane et 4% la même année sous culture. La raison essentielle en est l'importance de l'évapotranspiration potentielle, comprise entre 4 et 6mm par jour au coeur même de l'hivernage.

CHAPITRE VII

L'ECOULEMENT ET L'EROSION SUR LES BASSINS VERSANTS AUX DIFFERENTES ECHELLES.

Les facteurs conditionnels de la dynamique actuelle identifiés sur parcelles expérimentales continuent d'opérer à l'échelle des bassins versants. Mais il existe aussi des processus nouveaux tels que l'écoulement concentré dans les bas-fonds ou les vallées, générateur de formes nouvelles. En outre, la complexité de l'analyse tient à l'hétérogénéité grandissante du milieu naturel avec la taille des unités considérées. A une variabilité dans le temps de certaines de ses caractéristiques sur parcelles (le couvert végétal par exemple) se surajoute la variabilité dans l'espace des mêmes facteurs mais également de facteurs considérés comme globalement homogènes sur des surfaces limitées : les sols et aussi la pente.

Une nouvelle fois, les mesures de terrain, notamment d'écoulement et d'érosion, doivent précéder toute tentative d'interprétation du fonctionnement de ces unités plus vastes. Ces mesures expérimentales réalisées en vraie grandeur ne s'opposent pas pour autant mais, bien au contraire, *complètent* celles réalisées sur parcelles. Tandis que ces dernières permettent d'éclairer précisément les modalités de chacun des processus élémentaires à l'échelle du champ et d'envisager, dans certains cas, les parades appropriées sur un plan agronomique, les premières doivent assurer davantage de réussite dans la conduite d'autres aménagements, notamment hydrauliques. Leur confrontation permet aussi d'aborder le délicat problème des extrapolations, des effets d'échelles, de la discontinuité des phénomènes d'érosion.

C'est dans cette perspective que nous avons préconisé (1984,

p. 21) l'installation de parcelles à l'intérieur même du bassin d'Imiga. L'expérimentation, engagée là dans le centre-est du plateau mossi, répondait aussi à des objectifs plus immédiatement appliqués que nous définirons ci-dessous. Auparavant, il est nécessaire de rappeler l'apport considérable des hydrologues de l'ORSTOM pour la connaissance des débits liquides aux différentes échelles, dans le domaine savanien du Burkina Faso.

7.1 : ECOULEMENT ET EROSION HYDRIQUE A L'ECHELLE DES PETITS ET MOYENS BASSINS VERSANTS.

7.1.1 : Les bassins versants représentatifs et expérimentaux de l'ORSTOM.

Les études réalisées par l'ORSTOM, au début des années soixante principalement, avaient pour but de dégager les caractéristiques hydrologiques de bassins versants représentatifs par leur taille[1], variant de moins d'1 km² à plusieurs centaines de km², ainsi que par leur situation géographique au sud, au nord ou au centre du domaine soudanien. Il importait essentiellement de connaître les crues de fréquence annuelle, décennale, si possible cinquantennale, de même que les coefficients de ruissellement sous des pluies exceptionnelles ou pour un cycle annuel.

Nous rappelons ci-dessous les principaux résultats obtenus sur de petits et moyens bassins, généralement emboîtés, successivement dans les régions de Manga (11°40'N, 01°04'W), Ouagadougou (12°22'N, 01°31'W), Boulsa (12°39'N, 00°34'W) et enfin Tikaré (13°17'N, 01°43'W). Les données les plus nombreuses, obtenues avant 1965, sont donc représentatives d'un contexte humide. Cela ne signifie pas que chacune des années de mesures enregistre une pluviométrie excédentaire mais, tout au moins, que le milieu naturel n'est pas encore aussi dégradé qu'après la période sèche 1969-1984. D'autres observations ont été faites par J. Albergel (1987), plus récemment, sur quelques uns de ces bassins, dans un souci de comparaison.

---

(1) Nous considérons arbitrairement les petits bassins comme ayant une superficie au plus égale à une dizaine de km² ; les moyens bassins comptant entre 10 et 100 km². Les classes de taille de 10, 100, 1000 km² sont celles retenues par F. Fournier (1969).

7.1.1.1 : Les écoulements dans le sud du domaine soudanien (région de Manga).

Quatre bassins, petits à moyens, compris entre 10 et 100 km², emboîtés dans un bassin principal de 572 km², ont été suivis durant trois saisons des pluies (1963 à 1965) autour de Manga (Klein, 1967). Les cinq unités sont considérées comme "assez imperméables" avec deux catégories de sols : des sols peu évolués et des vertisols. L'occupation humaine est très dense dès ces années soixante, hormis sur le bassin résiduaire de Niarba à l'aval, où il n'existe aucune culture à l'époque. Les précipitations sont déficitaires en 1963 et 1965. Il faut noter enfin que les fortes pluies (supérieures à 30mm) sont toutes tombées (hormis deux en 1964) avant le 10 août. Le schéma d'écoulement est le suivant (Klein, 1967) : des écoulements sporadiques de quelques heures à quelques jours répondent aux premières averses de mai et juin ; l'écoulement permanent s'installe courant juillet et s'achève vers la mi-octobre. Bien que tout écoulement fasse défaut par conséquent pendant la majeure partie de l'année, les modules, notamment le module spécifique (terme de comparaison souvent employé), sont présentés dans le tableau 7.1 qui regroupe aussi les coefficients d'écoulement annuels.

Les enseignements principaux de ce tableau sont les suivants :

1. Les coefficients d'écoulement (ruissellement + écoulement de base) apparaissent partout et chaque année, assez élevés, puisque compris entre 8 et 30%. Ces valeurs sont nettement supérieures à celles que l'on retrouvera plus au nord.

2. Pour une même année, le coefficient d'écoulement augmente jusqu'au bassin de Louré (98 km²) puis diminue à Niarba dans un rapport de 0,5 à 0,6. Le débit estimé de la crue décennale diminue lui à partir de Kazanga (175 m³/s contre 146 m³/s à Louré).

Bassin	Année	Pluie moyenne annuelle (mm)	Module annuel (m^3/s)	Module spécifique ($l/s/km^2$)	Coefficient d'écoulement (%)
Binnde ($10,6km^2$)	1963	740	0,023	2,2	9,2
	1964	929	0,058	5,5	18,6
	1965	815	0,023	2,2	8,5
	1982*	744	0,020	2,1	8,9
	1983*	683	0,037	3,8	17,6
Zaptinga ($16,8km^2$)	1963	-	-	-	-
	1964	964	0,122	7,3	23,8
	1965	795	0,032	1,9	7,5
Kazanga ($54,3km^2$)	1963	810	0,259	4,8	18,6
	1964	826	0,377	6,9	26,5
	1965	800	0,161	3,0	11,7
	1983*	655	0,137	2,5	12,0
Louré ($98km^2$)	1963	925	0,570	5,8	20,0
	1964	895	0,816	8,3	29,2
	1965	875	0,476	4,9	18,2
Niarba ($572km^2$)	1963	860	1,903	3,3	12,2
	1964	855	2,832	4,9	18,3
	1965	770	1,310	2,3	9,4

Tableau 7.1 : Comparaison des écoulements entre cinq bassins versants de la région de Manga (sud du domaine soudanien du Burkina Faso).
d'après Klein (1967) et Albergel* (1987).

3. Les valeurs plus récentes enregistrées à Binnde et Kazanga montrent en 1983 qu'une année faiblement pluvieuse peut donner aujourd'hui une lame écoulée relativement forte.

7.1.1.2 : Les écoulements au centre du domaine soudanien (régions de Ouagadougou et de Boulsa) (Pieyns et Klein, 1964 ; Sircoulon et Klein, 1964).

- Treize bassins versants de la *région de Ouagadougou* ont fait l'objet d'un suivi plus ou moins long, au début des années soixante, et d'une estimation des écoulements, par observation notamment du remplissage de barrages. Cinq d'entre eux sont regroupés ci-dessous à titre d'exemples de petits et moyens bassins versants, inférieurs à

100 km². Toutes ces unités sont représentatives de terres très fortement occupées, aux pentes plus faibles et au réseau hydrographique plus dégradé que dans le cas précédent. Sur les trois années d'études, la saison 1962 peut être considérée comme très pluvieuse, tandis que 1963 est l'équivalent (pour l'époque) de l'année décennale sèche sur la majorité des unités étudiées.

Bassin	Année	Pluie moyenne annuelle (mm)	Module annuel (m^3/s)	Module spécifique ($l/s/km^2$)	Coefficient d'écoulement (%)
Bazoulé (10km²)	1962 1963	800 600	0,011 0,001	1,1 0,13	4,2 0,7
Zagtouli (11km²)	1962 1963	900 570	0,044 0,003	4,0 0,3	14,0 1,7
Moro Naba (18km²)	1961 1962 1963	800 1080 600	0,038 0,167 0,040	2,1 9,3 2,2	8,5 29,0 11,3
Gogen (30km²)	1963	800	0,117	3,9	15,0
Selogen (75km²)	1961 1962 1963	780 900 906	0,097 0,250 0,410	1,3 3,3 5,5	5,1 10,8 20,0

Tableau 7.2 : Comparaison des écoulements entre 5 petits et moyens bassins versants de la région de Ouagadougou (centre du domaine soudanien du Burkina Faso). d'après Pieyns et Klein (1964).

Sur ces bassins versants :

1. Les écoulements atteignent 1 à 20% des précipitations annuelles, exceptionnellement 30% sur le bassin du Moro Naba où la densité de drainage est forte.

2. Ces coefficients augmentent une fois encore avec la taille du bassin mais jusqu'à *un seuil difficile à définir*, compris entre 30 et 75 km² pour une pluviométrie annuelle de 800mm.

3. Le ruissellement peut s'élever jusqu'à 53% lors d'une crue sur le bassin du Moro Naba, suite à deux averses rapprochées (6

et 7 août 1963) dont le maximum cumulé est de 118mm. Ces maximums unitaires sont également atteints ou dépassés dans la région de Manga (49% à Binnde, 55% à Kazanga, 74,6% à Louré le 1er septembre 1964).

- A une latitude assez voisine, deux des trois bassins emboîtés de *la région de Boulsa* sont représentatifs des unités de taille moyenne. La majeure partie de ce domaine est occupée par des sols ferrugineux, généralement cuirassés et peu perméables. Le réseau hydrographique présente un caractère dégradé et une tendance au comblement, l'écoulement des crues s'étalant dans de vastes plaines d'inondation (Sircoulon et Klein, p. 2). Sur les trois années d'étude, les deux premières (1960 et 1961) enregistrent des précipitations inférieures à la moyenne tandis que l'année 1962 est excédentaire, de fréquence plus que décennale. Il faut souligner l'occurrence, durant cette année 1962 (18 août), d'une averse exceptionnelle dépassant 200mm en 48 heures sur trois postes d'observation (maximum : 219 mm).

Les principaux termes du bilan hydrologique sont regroupés dans le tableau ci-dessous.

Bassin	Année	Pluie moyenne annuelle (mm)	Module annuel (m^3/s)	Module spécifique ($l/s/km^2$)	Coefficient d'écoulement (%)
Kognere ($21,5km^2$)	1960	725	0,020	0,9	4,0
	1961	685	0,012	0,6	2,5
	1962	1140	0,086	4,0	11,0
	1984*	591	0,012	0,6	3,4
Kogho ($82,0km^2$)	1960	775	0,070	0,9	3,5
	1961	675	0,016	0,2	0,9
	1962	1030	0,250	3,0	9,4
Niegha ($1010km^2$)	1960	650	0,499	0,5	2,4
	1961	840	0,950	0,9	3,5
	1962	1150	3,378	3,3	9,2

Tableau 7.3 : Comparaison des écoulements entre trois bassins versants de la région de Boulsa (centre du domaine soudanien du Burkina Faso).
d'après Sircoulon et Klein (1964) ; Albergel* (1987).

1. L'irrégularité interannuelle du coefficient d'écoulement est évidente une fois encore, même pour deux années qui ont approximativement le même total pluviométrique. Ainsi, sur le bassin de Kognere, les apports annuels sont réduits de plus de 30% en 1961 par rapport à 1960 alors même que la pluie moyenne est semblable. La proximité des pluies dans le temps (Sircoulon *et al.*, 1964, p. 26) ainsi que leur distribution dans l'espace, pensons-nous, jouent un rôle plus important.

La tornade du 18 août 1962 (150,8mm à Boulsa - fréquence : 0,96% - mais 180mm de pluie moyenne) ne donne en tout cas qu'un coefficient modéré de 25,8% sur Kognere ou 26,4% sur Kogho, probablement en raison d'une humidité préalable du sol peu marquée.

2. Pour une même année, les coefficients d'écoulement diminuent systématiquement à l'échelle du bassin de Kogho (82km^2) par rapport à celle du bassin Kognere (21,5 km^2), même si la pluie moyenne est plus élevée sur l'unité la plus vaste (1960).

3. Malgré une pluviométrie très déficitaire en 1984 (inférieure de 150mm à la moyenne interannuelle), l'écoulement reste comparable à celui observé pour les années anciennes plus humides (Albergel, 1987).

7.1.1.3 : Les écoulements au nord du domaine soudanien (région de Tikaré).

Les trois années de mesures (Oberlin *et al.*, 1966), conduites sur les petits ou très petits bassins versants de *la région de Tikaré*, permettent également de mettre en évidence à une latitude subsahélienne l'importance prépondérante du groupement des averses.

Bassin	Année	Pluie moyenne annuelle (mm)	Module annuel (m^3/s)	Module spécifique ($l/s/km^2$)	Coefficient d'écoulement (%)
Tikare I ($0,25km^2$)	1963	800	0,00005	0,2	0,8
	1964	815	0,0001	0,5	2,0
	1965	853	0,0004	1,8	6,5
Ansouri ($0,76km^2$)	1963	780	0,0005	0,7	2,8
	1964	672	0,0008	1,05	4,9
	1965	767	0,001	1,6	6,5
Tikare II ($2,68km^2$)	1963	815	0,0005	0,2	0,8
	1964	778	0,001	0,45	1,85
	1965	813	0,003	1,3	4,85

Tableau 7.4 : Comparaison des écoulements entre trois bassins versants de la région de Tikaré (nord du domaine soudanien du Burkina Faso).
d'après Oberlin et al., (1967).

L'année 1963 est marquée par des écoulements très déficitaires du fait de l'isolement des averses notables et malgré un total pluviométrique supérieur à la moyenne interannuelle. En 1964, année voisine de la moyenne, le ruissellement se redresse du fait de meilleures conditions de saturation. En 1965, plusieurs épisodes pluvieux, notamment en fin d'hivernage, favorisent un fort ruissellement. Dans tous les cas, le bassin d'Ansouri produit les écoulements les plus notables du fait de pentes assez fortes (2% contre 0,8% à Tikaré II) et de la présence de larges zones argileuses.

Conclusion :

Parmi les très nombreux enseignements fournis par les campagnes de mesures de l'ORSTOM à l'échelle de petits et moyens bassins versants, nous retiendrons les suivants :

1. Les écoulements sont marqués par une grande irrégularité interannuelle qui peut être rattachée, selon les différents auteurs, principalement à la distribution dans le temps des précipitations. L'épisode de la tornade exceptionnelle enregistrée le 18 août 1962 à Boulsa (180mm) et suivie d'un coefficient de ruissellement relativement

modeste[1] montre bien que l'humidité préalable au sol, par conséquent le caractère plus ou moins rapproché des averses, joue un rôle plus déterminant que la quantité de pluie elle-même et son intensité.

Les crues exceptionnelles présentent quoiqu'il en soit des coefficients maximums surprenants, supérieurs à 20 ou même 40% et finalement peu inférieurs à ceux enregistrés sur parcelles. Le maximum de 74,6% enregistré à Louré (Manga) à l'aval d'un bassin de 98km² correspond à un total pluviométrique moyen de 208,2mm en 6 jours. Les calculs de fréquences de pluies maximales en n jours relatifs à la station de Manga (Tableau 1.12, p. 47) permettent de situer la durée de retour du phénomène entre 10 et 33 ans.

2. Par delà cette irrégularité, on constate que globalement le ruissellement est moins actif du sud du domaine soudanien jusque vers le nord. Plus qu'aux différences de pluviosité, de pente ou de sols, il faut retenir le rôle du réseau hydrographique moins bien individualisé vers le nord, davantage marqué par les zones d'épandage et la tendance à l'alluvionnement.

3. Pour une même année et quel que soit le site, il semble que le ruissellement annuel puisse être relativement croissant sur ces bassins versants, jusqu'à un seuil voisin de 100 km² et qu'il diminue au-delà. L'explication peut être recherchée du côté des pentes et de l'importance relative des zones d'inondation. Nous reviendrons sur leur influence à l'examen des caractéristiques hydrologiques des grands bassins.

4. L'analyse comparée conduite par J. Albergel tend à prouver que le ruissellement augmente durant la période sèche, ce qui montre une fois encore que les précipitations, prises isolément, ne constituent pas le facteur explicatif essentiel. Pour l'auteur, cette modification du régime hydrologique est liée à la dégradation des états de surface, c'est-à-dire l'extension des zones sans végétation et la formation des pellicules de battance.

Sur le site de Kognere (Boulsa), C. Valentin (1985 b) a d'ailleurs quantifié cette extension par comparaison des photogra-

(1) *Ce caractère est a priori d'autant plus étonnant que la tornade est aussi remarquable par son extension spatiale.*

phies aériennes de 1956 et 1980. Entre ces deux dates, le pourcentage de terres cultivées passe de 16,1% à 37,4% ; celui des zones très érodées, impropres à la culture est multiplié par 20 (1,2 à 20,4%) ! C. Valentin note que les bas-fonds tendent à être complètement et en permanence exploités. Pareil constat ressemble, ce n'est pas pour surprendre, à celui fait sur le site voisin d'Imiga et à celui que nous présentons sur le bassin de Boulbi (§ 7.2.1.2).

A Imiga, nous essayons également de mettre en relation les caractéristiques du bassin avec son fonctionnement, même si la comparaison ne peut pas être faite avec la période antérieure à la sècheresse. En revanche, le bilan hydrologique est plus complet pour chacune des années dans la mesure où les débits solides sont également évalués ce qui n'est malheureusement pas le cas sur les bassins expérimentaux de l'ORSTOM.

7.1.2 : L'expérimentation sur les petits bassins versants d'Imiga.

7.1.2.1 : Les objectifs de l'expérimentation, l'équipement du bassin et ses difficultés.

1. L'expérimentation, que nous entreprenons en 1982 sur le site d'Imiga, n'a pas seulement pour but d'apprécier la dégradation des sols durant une période limitée. Elle s'inscrit dans une perspective appliquée consistant à comparer débits liquides et solides, avant et après mise en place d'aménagements antiérosifs (terrasses de diversion) sur toute la partie du bassin cultivée par les paysans.

A cette date, ce type de réalisations se multiplie en Haute-Volta dans le cadre d'une politique de développement rural conduite par le F.D.R.(1), financée principalement par la Banque Mondiale et sur laquelle nous reviendrons dans le chapitre VIII. Notre souci de tester l'efficacité de ces dispositifs est cependant bien perçu par cet office. L'effort de l'organisme pour associer un volet "Recherche"

(1) F.D.R. : Fonds de Développement Rural.

à son champ d'application mérite d'être souligné. C'est avec J. Reeb, responsable auprès du Fonds de ce type d'aménagements, que nous avons choisi le bassin d'Imiga, placé en amont d'un petit barrage et d'un bas-fond amélioré (Photo 18)[1]. L'existence de cette retenue, la présence d'un encadreur rural, la sensibilisation paysanne devaient effectivement faciliter le suivi de cette opération.

Selon le protocole d'origine, celle-ci doit alors se poursuivre cinq ou six années avec deux phases distinctes de caractérisation des écoulements avant et après édification des banquettes de diversion (Mietton, 1986 d). Pour des raisons que nous avons précisées dès l'introduction générale de cette thèse, il s'avère malheureusement que cette comparaison n'est pas possible à l'heure actuelle. Nous nous contentons de présenter les résultats acquis jusqu'en 1985 mais cette recherche est désormais poursuivie par nos collègues de l'Université de Ouagadougou.

2. *L'équipement hydropluviométrique* (Fig. 5.6, p. 187 ou carte 4) a été mis en place par nos soins et progressivement renforcé, au prix de difficultés plus ou moins lourdes[2].

L'installation des deux passerelles de jaugeages, opération la plus éprouvante, est réalisée dès le 24 avril 1982. Chacune d'elles est montée sur deux poutrelles métalliques de 12 mètres fixés sur des socles de béton. Chaque station est équipée d'un limnigraphe à rotation journalière OTT X et d'une échelle limnimétrique de 3 mètres. Ce sont en effet deux bassins emboîtés (BV1 et BV2) qui sont suivis ; le plus petit (BV2 = 5,3 km² - Tableau 7.5) étant tout à fait représentatif du géosystème G2 avec une savane arbustive sur sols peu évolués, désormais peu cultivés (Fig. 5.5, p. 185 et carte 1).

---

(1) *La retenue est située en G3, la station S1 en G4, la station S2 en H7.*

(2) *Pour la réussite de cette expérimentation réclamant des moyens importants en matériel et en hommes, le F.D.R. a apporté son soutien en finançant notamment les campagnes de mesures hydrologiques de l'H.E.R., le gros matériel (poutrelles, maison des observateurs) et une partie de nos déplacements. Nous avons réuni d'autres concours : ceux du C.T.F.T. (limnigraphes, pluviographes) de l'Université de Ouagadougou (Département de Géographie, Institut Polytechnique), du C.N.R.S. (C.E.G.E.T.), de l'I.N.R.A. Que tous ces organismes soient remerciés pour leur aide.*

Caractéristiques morphométriques	BV_1	BV_2
Superficie	12,051 km²	5,301 km²
Périmètre	17,4 km	9,3 km
Indice de Gravelius	1,40	1,13
Dimensions du Rectangle équivalent	L= 6,94 km l = 1,76 km	L= 2,76 km l = 1,89 km
Indice global de pente (Ig)	3,5 m/km	6,7 m/km

Bassins	Ordre n	N n	L n (km)	T n (km)
BV1	5 4 3 2 1	1 3 9 33 130 (10,8 unités/km²)	2,5 3,9 5,5 8,2 27,35	2,5 1,3 0,61 0,25 0,21
Densité de drainage en BV1 : $\frac{\Sigma Ln}{S} = \frac{47,45}{12,05} = 3,94$ km/km²				
BV2	5 4 3 2 1	1 2 5 17 71 (13,4 unités/km²)	0,2 2,0 3,0 4,1 15,4	0,2 1,0 0,6 0,24 0,21
Densité de drainage en BV2 : $\frac{\Sigma Ln}{S} = \frac{24,7}{5,3} = 4,66$ km/km²				
BV3 (BV1-BV2)	5 4 3 2 1	1 1 4 15 59 (8,7 unités/km²)	2,3 1,9 2,5 4,1 11,95	2,3 1,9 0,62 0,26 0,20
Densité de drainage en BV3 : $\frac{\Sigma Ln}{S} = \frac{22,75}{6,75} = 3,37$ km/km²				

Tableau 7.5 : Caractéristiques morphométriques et hydrographiques des bassins versants d'Imiga (Burkina Faso).

Deux pluviographes journaliers et quatre pluviomètres sont placés dès la fin du mois de mai 1982, auxquels viennent s'ajouter trois autres à partir d'avril 1984, soit un réseau de neuf postes d'observation pour 12 km^2. Huit tensiomètres sont implantés à différentes profondeurs en quatre points du bassin.

Une seule crue est cependant analysée durant la première campagne (1982) du fait de certains problèmes plus spécifiques.

* d'une part, le volume global ruisselé à hauteur de chacune des deux stations de jaugeages (S1 et S2) ne peut être estimé d'emblée. En effet, les entailles linéaires du lit mineur, au-dessus desquelles sont placées nos passerelles, ne captent qu'une partie de l'écoulement ; une fraction non négligeable continuant de se faire en nappe dans le lit majeur du fait de légères contre-pentes transversales (bourrelets de berges en S1). La solution retenue en S1 a consisté à construire le 5 août 1982 une diguette transversale en enrochements de manière à dériver les eaux vers le chenal du lit mineur (Fig. 7.1).

* d'autre part, la montée des eaux dans ce lit mineur est freinée en S1 par l'existence d'une contre-pente à l'aval de la station (Fig. 7.1) ; l'eau s'emmagasinant lentement jusqu'à la cote 1,10 m avant qu'un faible écoulement ne commence. La venue d'une unité motorisée (D4) a permis de dégager ce bourrelet le 19 août. Les limnigrammes ne sont pas utilisables avant cette date sinon pour définir un écoulement modéré ou fort (Tableau 7.10). Les premiers jaugeages datent eux du 27 août 1982.

* enfin, la vitesse élevée du courant à l'amont, dépassant parfois 2 m/s, interdit l'utilisation des simples perches cylindriques. L'équipe technique de l'H.E.R. ne disposant pas de perches profilées, nous avons fait réaliser par nos collègues du Lycée Technique de Ouagadougou un système de doubles perches : l'une à l'extrémité pointue se fichant dans le fond sableux du lit et servant d'appui à la barre qui supporte le moulinet. Ces deux barres peuvent être déplacées assez rapidement, malgré leur poids, grâce à un "chariot-support" coulissant sur la poutrelle.

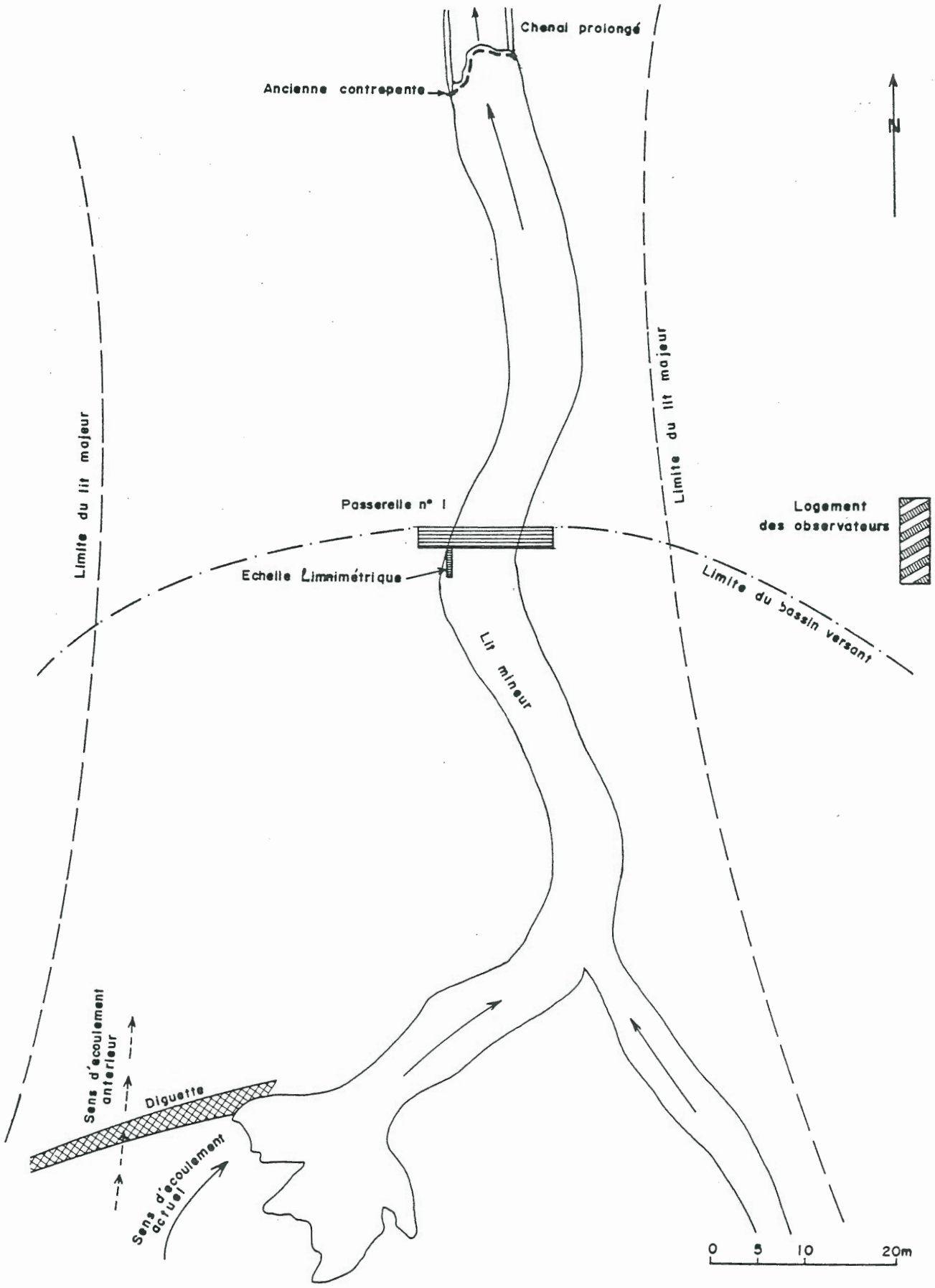


Fig. 7.1 : La station de jaugeages S1 du bassin versant d'Imiga

Malgré cela, les jaugeages effectués en S2 sont peu nombreux et la courbe d'étalonnage encore mal définie en hautes eaux.

7.1.2.2 : Les jaugeages.

Ils ont tous été réalisés par une équipe de cinq techniciens, sous la conduite, le plus souvent, d'I. Ouedraogo, technicien supérieur à l'H.E.R., et travaillant dans des conditions parfois difficiles, notamment la nuit.

a- Les jaugeages des débits liquides.

* *En S1*, les jaugeages, effectués au moulinet, sont très satisfaisants. Au nombre de 62 sur l'ensemble des quatre campagnes de mesures, ils s'échelonnent de 0,13 à 10,85 m^3/s pour des hauteurs d'eau variant de 68cm à 143cm. La hauteur moyenne correspondant au débit et indiquée au tableau 7.6 est calculée par la formule $\overline{H} = \frac{\Sigma Hi.\, qi}{\Sigma qi}$, qi étant le "débit" unitaire sur une verticale donnée[1] et Hi la hauteur correspondante lue à l'échelle. A partir des fiches de jaugeages, nous avons recalculé ces valeurs unitaires et les débits instantanés qui ont été comparés à ceux établis par l'hydrologue de l'H.E.R. Le seuil de déversement ou d'écoulement au pied de l'échelle a été fixé à 65cm en 1982 et 1983 puis abaissé à 40cm pour les saisons suivantes. La hauteur de débordement des eaux hors du lit mineur est voisine de 150cm. Ce débordement est apparu lors de la crue exceptionnelle du 19 juin 1983. L'absence malencontreuse de jaugeages ce jour-là a été partiellement effacée par une estimation faite à l'aide des éléments suivants:

- le limnigramme, qui nous donne la variation de la hauteur d'eau dans le temps et la cote maximale (1,83m) (Fig. A.7.1.).

---

(1) Sur chacun des deux sites (S1 et S2), le lit mineur a une largeur d'environ 10 mètres. Le nombre de verticales est en moyenne de six ou sept ; les profondeurs de mesures de vitesses sont généralement au nombre de trois (à 10cm sous la surface, 10cm du fond et dans l'intervalle (Fig. 7.2).

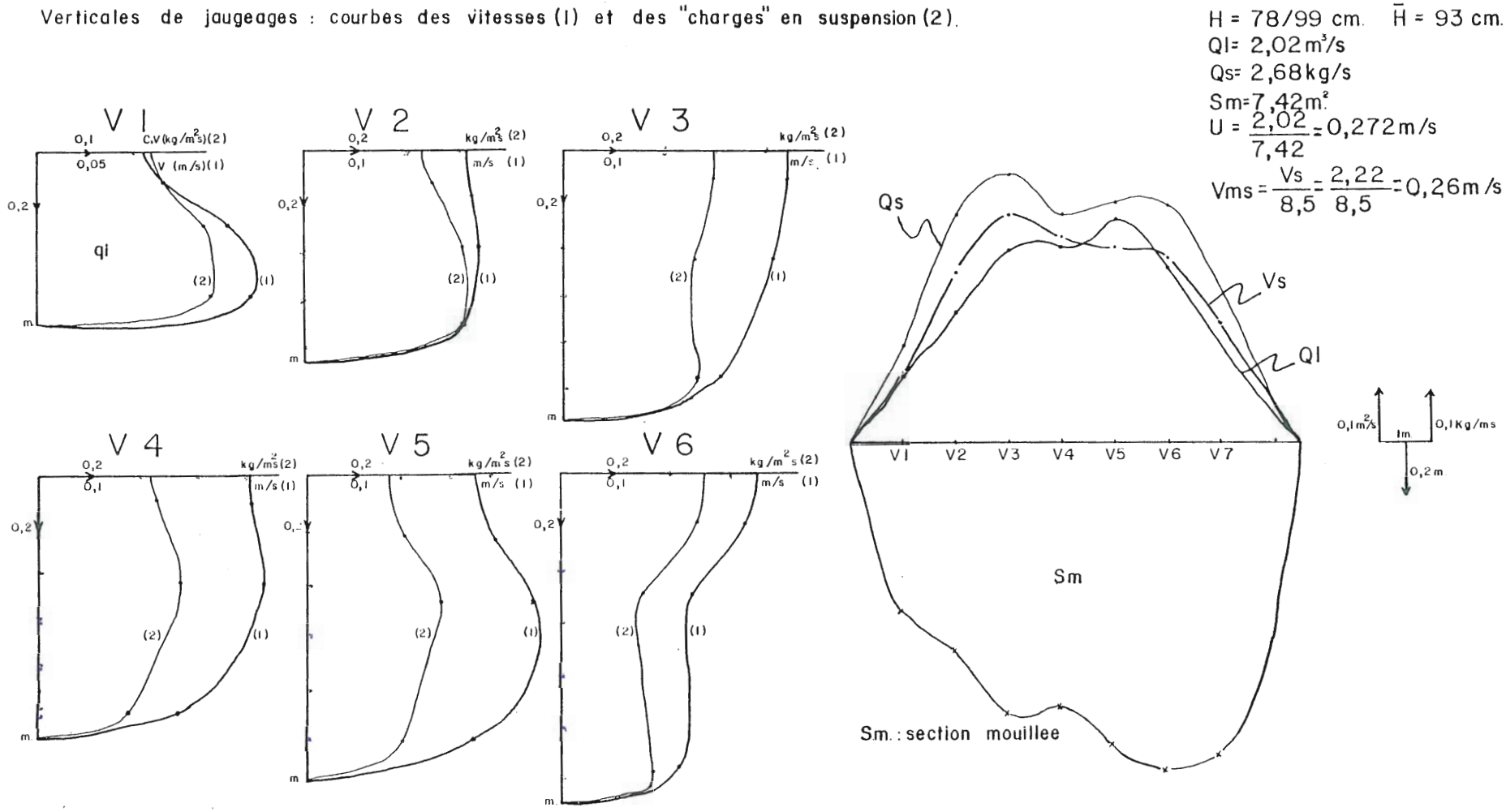


Fig. 7. 2 : Un exemple de jaugeage des débits liquide et solide en S1 lors de l'écoulement du 11 août 1983 à Imiga (Burkina Faso).

Tableau 7.6 : Les jaugeages de 1982, 1983, 1984 et 1985 sur la passerelle n° 1 (S1) en aval de BV1 (Imiga - Burkina Faso).

Date	Hauteurs (cm)	$\bar{H}$ moyenne calculée (cm)	Débit liquide (m^3/s)	Débit solide (kg/s)	Numéro de jaugeages
27.08.82	90 - 96	93	1,30	1,17	1
27.08.82	96 - 119	108	2,67	4,08	2
27.08.82	124 - 120	122	5,50		3
27.08.82	118 - 108	113	3,55		4
27.08.82	105 - 98	102	2,05		5
27.08.82	87 - 83	85	0,85		6
14.05.83	79 - 93	90,7	1,65	4,08	7
14.05.83	93 - 77	83	1,10	1,66	8
14.05.83	77 - 72,5	74	0,55		9
20.05.83	114 - 110	112,5	6,56		10
20.05.83	107 - 96	103,5	3,32		11
20.05.83	93 - 80	86,5	1,23		12
06.06.83	114 - 96	105	3,43	4,0	13
06.06.83	96 - 79	89	1,60	1,4	14
19.06.83		183	70,1*		
19.06.83		150	24,2*		
08.08.83	77 - 79	79	0,76		15
11.08.83	78 - 99	93	2,02	2,68	16
11.08.83	107 - 104	107	3,62	3,40	17
11.08.83	103 - 90,5	97	2,08	1,20	18
11.08.83	88 - 81	85	1,19		19
14.08.83	78 - 82,5	80	1,0	0,765	20
14.08.83	83,5- 82,5	83,5	1,04	0,635	21
13.09.83	80 - 89	84	1,24		22
13.09.83	89 - 95	93	2,11		23
13.09.83	96 - 95	96	2,0		24
15.09.83	80 - 94	88	1,71		25
15.09.83	95 - 105	100	2,83		26
15.09.83	107 - 100	106	2,72	1,61	27
17.09.83	97,5- 97,5	97,5	2,07		28
17.09.83	97 - 95	96	2,01		29
17.09.83	94,5- 93	94	1,69		30
17.09.83	89 - 87,5	87,5	1,33		31
22.09.83	136 - 136	142	9,75		32
22.09.83	125 - 117	121	5,20		33
22.09.83	116 - 108	113	3,75		34

Date	Hauteurs (cm)	$\bar{H}$ moyenne calculée (cm)	Débit liquide (m^3/s)	Débit solide (kg/s)	Numéro de jaugeages
27.05.84	79,5- 74	76	0,99	1,0	35
02.06.84	77 - 75	78	1,15	1,0	36
18.07.84	108 - 93	100	2,85		37
18.07.84	85 - 75	81	0,88		38
31.08.84	98 - 89	94	0,66		39
31.08.84	89 - 81	86	0,29		40
06.07.85	70 - 66	68	0,13	0,45	41
10.07.85	89 - 96	94	3,37	4,68	42
10.07.85	96 - 86	91	2,85		43
11.07.85	90 - 79	85	1,84	1,4	44
20.07.85	110 - 121	120	8,84	15,54	45
20.07.85	120 - 109	115	6,82	6,84	46
20.07.85	99 - 84	91	2,25	1,77	47
26.07.85	92 - 101	98	4,62	6,67	48
26.07.85	103 - 98	100	3,44		49
26.07.85	98 - 80,5	93	2,11		50
29.07.85	117 - 113	114	6,89		51
29.07.85	110 - 98,5	102	4,18		52
29.07.85	98 - 87,5	91	2,23		53
02.08.85	132 - 107	121	6,36		54
02.08.85	105 - 88	100	2,47		55
04.08.85	102 - 92	96	2,41		56
13.08.85	110 - 149	143	10,85	18,1	57
13.08.85	149 - 137	143	9,96	11,1	58
13.08.85	136 - 117	126	6,59		59
13.08.85	117 - 106	112	4,27		60
12.09.85	78 - 80	80	0,51	0,32	61
12.09.85	80 - 79,5	80	0,50	0,33	62

* Débits reconstitués

- les levés topographiques détaillés (échelles : 1/50) des profils transversal et longitudinal du bas-fond, réalisés avant la crue. Le périmètre mouillé et le rayon hydraulique sont donc connus pour chacune des hauteurs.

- l'établissement du coefficient de rugosité de Horton, dans le lit mineur, à partir des résultats des crues précédentes et en utilisant la loi de Manning-Strickler. Le coefficient K a été évalué supérieur à 23, en début de saison, compris entre 25 et 30. Pour le lit majeur, où aucun jaugeage n'avait pu être fait jusque-là, K a été estimé égal à 20 en raison d'une végétation plus abondante (cultures de riz et de sorgho).

A la cote 1,83m, le débit instantané est alors de 70,1 m^3/s. Un fait important vient corroborer ces calculs : le débordement du barrage d'Imiga situé à 600 mètres en aval de la station S1. Celui-ci est attesté par le témoignage de l'encadreur rural, les marques d'érosion sur l'aval de la digue, les traces d'écoulement latéral (branchages, herbes couchées). A partir de ces dernières, la hauteur maximale de la lame d'eau débordée, retrouvée par nivellement, est de 20,1 cm. La non rupture de ce barrage en terre n'a été dûe qu'à une durée de débordement heureusement limitée (environ 10 minutes selon l'encadreur).

Le dimensionnement de cet ouvrage ayant été fait à partir des abaques de J.M. Gresillon (1977), qui donnent pour une pluie décennale de 100mm un débit centenaire, voisin de 40 m^3/s, sur ce type de bassin, c'est donc bien un débit largement supérieur à 40m^3/s qui s'est écoulé ce jour-là. Enfin, connaissant la revanche du déversoir (0,50m), sa longueur (90m), ainsi que celle de la digue (200m), estimant le coefficient de débit m égal à 0,45 pour la digue en terre et à 0,43 pour le déversoir, l'équation générale de l'écoulement sur un seuil normal donne un débit instantané maximal encore supérieur (135m^3/s) mais à l'exutoire d'un bassin plus vaste, il est vrai, qu'en S1 (14,5 km^2).

Les valeurs des débits extrêmes ainsi reconstituées paraissent donc cohérentes et sont retenues pour l'établissement des courbes d'étalonnage.

La courbe ci-jointe (Fig. 7.3), intégrant tous les

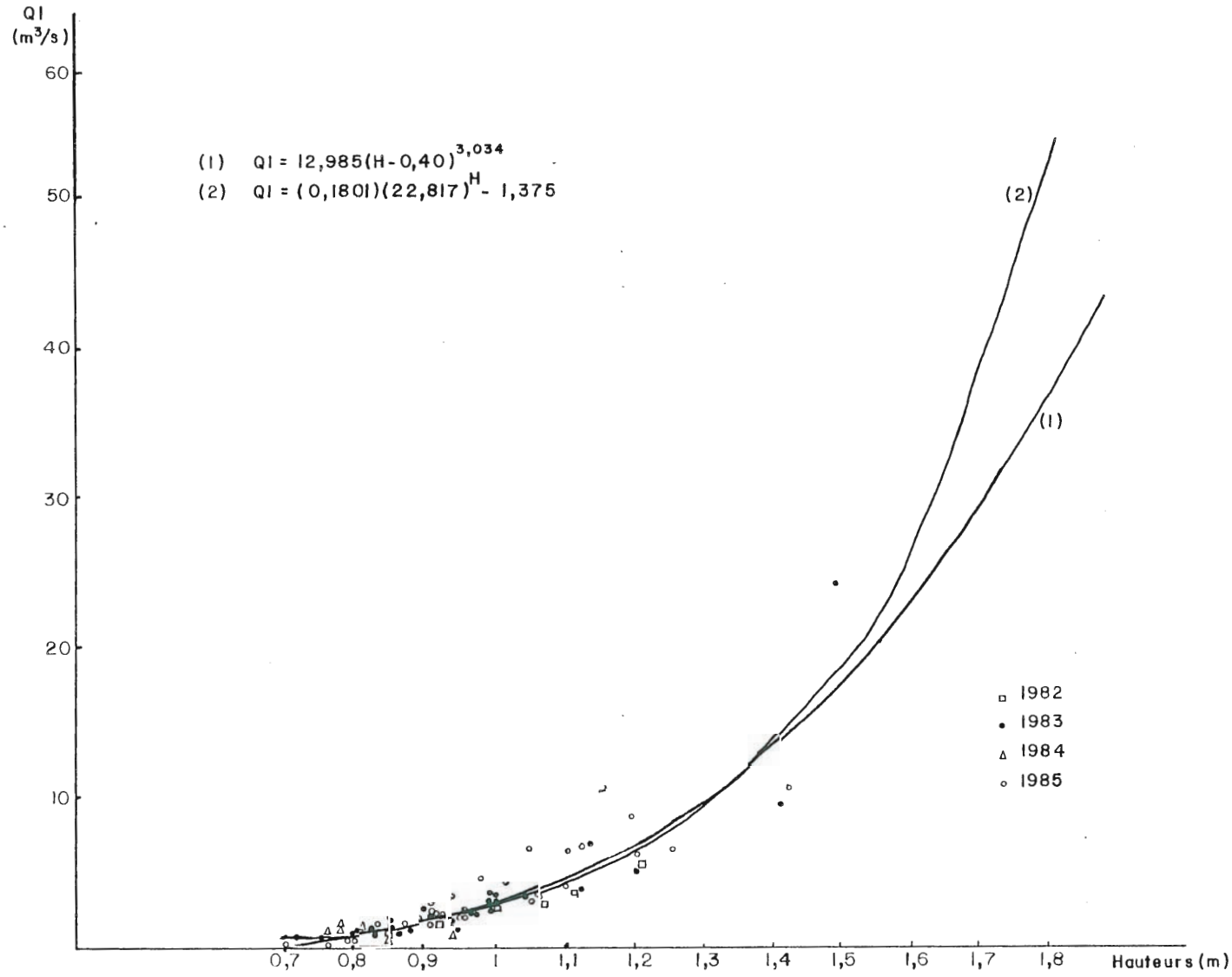


Fig. 7.3 : Les courbes de tarage de la station S1 et leur incertitude aux hautes eaux.

jaugeages, effectués aussi bien en basses eaux qu'en hautes eaux, en phase de crue comme de décrue, a été utilisée pour le calcul des volumes globaux ruisselés, lors de chaque écoulement, en 1984 et 1985. Il s'agit d'une courbe de fonction puissance, dont le coefficient de détermination R^2 est égal à 0,88(1). En fait les jaugeages effectués au cours d'une même crue (15-9-83, 13-8-85) semblent montrer qu'il n'existe pas une courbe univoque en S1. La présence de la retenue à 600m. à l'aval peut créer un contrôle à niveau variable et des changements de pente de la ligne d'eau. Pour les campagnes précédentes (1982 et 1983), une première courbe présentant une moindre dispersion des points et un coefficient excellent (R^2 = 0,975) avait été utilisée après de multiples tarages sur ordinateur(2). La dispersion des points au fil des années est liée très probablement au caractère instable, mobile, du lit et de son fond sableux.

* *En S2*, la courbe d'étalonnage utilisée est moins satisfaisante du fait de la difficulté déjà énoncée à jauger en hautes eaux. Les 28 valeurs (Tableau 7.7) s'échelonnent entre 0,41 m^3/s et 4,8 m^3/s pour une hauteur moyenne maximale de 87 cm seulement. Cette dernière valeur, qui influence beaucoup le tracé de la courbe (Fig. 7.4) est pourtant incertaine du fait notamment de la variation rapide de la cote en cours de jaugeage (110 à 69 cm entre 15h35 et 16h09 le 13 août 1985).

Les débits liquides présentés ci-dessous ont été déterminés par le Service Hydrologie pour les années 1983 et 1984 tandis qu'ils correspondent à des calculs personnels à partir des fiches de jaugeages en ce qui concerne la campagne 1985. Le tracé de la courbe

---

(1) Il s'agit de la courbe (1) de la figure 7.3. La courbe (2), prenant mieux en compte le débit extrême reconstitué du 19 juin 1983 aurait pu être préférée. De toutes façons, la courbe n'a été utilisée, pour les écoulements de 1984 et 1985, que sur des hauteurs inférieures à 1,50m.

(2) L'équation de régression de cette première courbe est $q = -5,945 + 0,199H - 0,243 \times 10^{-2} H^2 + 0,127 \times 10^{-4} H^3$ *pour H supérieur à 65cm (valeurs du 19 juin 1983 exclues).*

Date	Hauteurs (cm)	$\bar{H}$.moyenne calculée (cm)	Débit liquide (m^3/s)	Numéro de jaugeages	Débit solide (kg/s)
01.06.83	25 - 20	22,5	1,87	1	
01.06.83	18 - 15	16,5	1,07	2	
14.08.83	-4		0,15	3	
09.09.83	1		0,45	4	
09.09.83	5 - 4	4,5	0,56	5	
11.09.83	3		0,48	6	0,53
11.09.83	2 - 1	1,5	0,41	7	
13.09.83	1 - 3	2	0,47	8	0,93
13.09.83	4,5		0,63	9	
15.09.83	32 - 19	27	2,19	10	3,58
15.09.83	18 - 13	15,5	1,73	11	
15.09.83	13 - 10	11,5	1,17	12	
15.09.83	9 - 5	7,5	0,81	13	
17.09.83	1		0,49	14	
22.09.83	23 - 18	20,5	2,02	15	
22.09.83	17 - 12,5	15	1,66	16	
22.09.83	12 - 9	10,5	1,09	17	
22.09.83	9 - 6	7,5	0,92	18	
22.09.83	5 - 4	4,5	0,72	19	
18.07.84	23 - 13	19	1,2	20	
18.07.84	13 - 9	10,5	0,55	21	
29.07.85	50 - 26	35	2,04	22	
02.08.85	35 - 22	28,5	2,6	23	
02.08.85	22 - 19	20,5	2,14	24	
04.08.85	45 - 42	43,5	3,13	25	
04.08.85	42 - 32	38	2,56	26	
13.08.85	110 - 69	87	4,8	27	
13.08.85	55 - 40	48	2,74	28	3,62

Tableau 7.7 : Les jaugeages de 1983 à 1985 sur la passerelle n° 2 (S2) en aval de BV2 (Imiga - Burkina Faso).

d'étalonnage peut être différent de celui que doit établir l'H.E.R. et entraîner éventuellement des écarts dans l'appréciation des volumes globaux ruisselés.

b- Les jaugeages des débits solides.

Les prélèvements de charges en suspension sont assurés, en 1982 et 1983, à l'aide de pompes Japy, simultanément à la mesure de la vitesse et à même profondeur. Après adjonction de 10 cc. d'a-

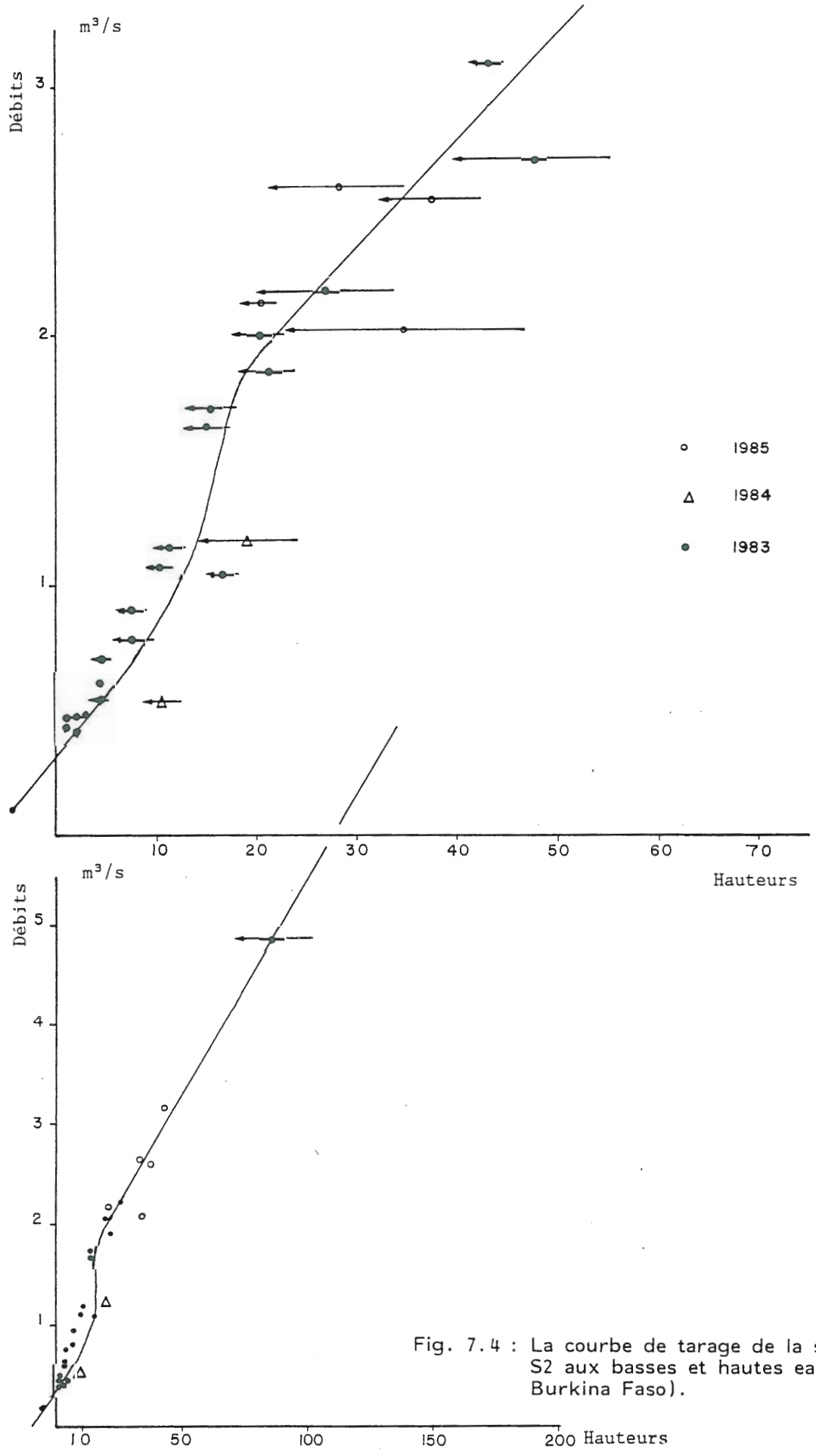


Fig. 7.4 : La courbe de tarage de la station S2 aux basses et hautes eaux (Imiga-Burkina Faso).

cide chlorhydrique N/10[1] et décantation pendant 24 heures, ces prélèvements initiaux de 10 litres sont ramenés à 2 litres contenant les précipités. Les bidons sont ensuite acheminés au laboratoire de l'Université, où les charges sont déterminées après passage à l'étuve et pesées. En 1984, nous avons introduit des bouteilles de prélèvement à axe horizontal et commande par câble le long de la canne de sustentation. Ces bouteilles ont l'avantage de capter la totalité de la charge, y compris la plus grossière (sables grossiers, voire gravillons ferrugineux), qui n'apparaît pas dans les échantillons et bloque pourtant occasionnellement le fonctionnement de la pompe ! Notre souci était surtout de comparer les charges prélevées suivant ces deux modes différents. Cela entraînait toutefois une manoeuvre supplémentaire pour les observateurs et ces résultats sont aujourd'hui trop partiels pour qu'une comparaison soit possible.

* *En S1*, 320 échantillons ont été, quoi qu'il en soit, récoltés puis pesés entre 1982 et mi-1984, auxquels sont venues s'ajouter environ 280 valeurs fournies par l'H.E.R. pour la deuxième moitié de la campagne 1984 et l'ensemble de la saison 1985. Les charges unitaires, généralement voisines de 1 g/l, sont comprises entre 0,1 et 4,4 g/l ; les plus fortes concentrations étant mesurées à la montée de la crue. L'influence de la date de prélèvement est plus difficile à mettre en évidence mais on remarque cependant que les charges maximales sont enregistrées lors d'un premier écoulement, en 1985 (6 juillet). Les débits solides instantanés varient entre 0,32 kg/s et 18,1 kg/s (Tableau 7.6).

Ces 25 valeurs de débits solides sont corrélées linéairement de manière satisfaisante avec les débits liquides correspondants.[2] Cette validité est traduite par le coefficient de corrélation (R = 0,95) et le tracé de l'intervalle de confiance à 95% dans lequel s'inscrit la très grande majorité des points (Fig. 7.5). *Ceci nous permet d'estimer non pas seulement la charge de quelques crues mais de l'ensemble des écoulements annuels.*

---

(1) La charge dissoute en fer est de ce fait additionnée à la charge en suspension. Si on l'admet équivalente à 1 mg/l (Tableau 6.12), elle est cependant généralement négligeable (1‰).

(2) Il n'existe généralement pas de corrélation satisfaisante entre les transports en suspension et le débit, comme le soulignait, dès 1962, J. Tricart (1962 ; p. 235). Nous verrons que la relation obtenue ici peut peut-être s'expliquer par une origine essentiellement ponctuelle de la charge (ravines).

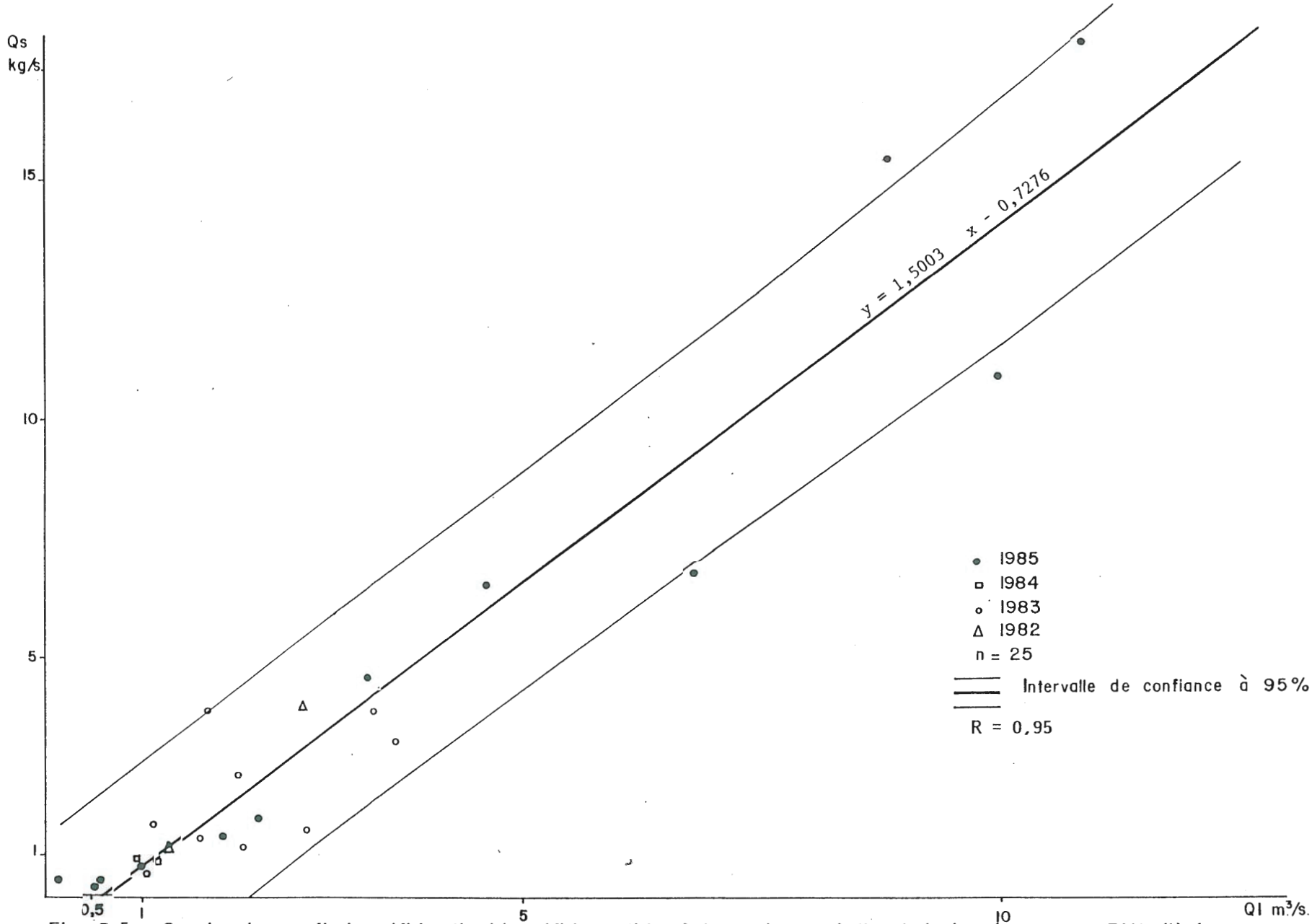


Fig. 7 5 : Courbe de corrélation débits liquides-débits solides à la station S1 à l'aval du bassin versant BV1 d'Imiga.

* *En S2*, l'information est beaucoup plus fragmentaire. Seuls, quatre jaugeages sont utilisables (Tableau 7.7) pour ces premières campagnes. Les valeurs des débits solides sont comprises entre 0,53 et 3,63 kg/s. Du fait de ce petit nombre de points, du fait aussi du caractère encore incertain des débits aux hautes eaux, il nous a paru impossible d'utiliser une courbe de régression corrélant débits liquides et débits solides. On remarquera cependant que l'équation obtenue ($y = 1,3913 x + 0,11975$ avec $R = 0,978$) est très voisine par son coefficient de pente de la précédente. Nous ne l'utiliserons avec prudence que pour quelques comparaisons avec les données obtenues en S1. Ce travail sera évidemment repris et complété au-delà de cette thèse.

7.1.2.3 : L'écoulement et l'érosion hydrique sur les deux petits bassins versants d'Imiga (1982-1985).

a- *Les observations pluviométriques.*

Malgré leur caractère incomplet, les relevés pluviométriques effectués à Imiga (Tableau 7.8) traduisent bien le contexte climatique de cette expérimentation.

Année	Mai	Juin	Juillet	Août	Septembre	Octobre	Total (période d'observation à Imiga	Total annuel (Zorgho)
1982	-	-	138,7	126,1	35,6	-	300,4	636,3
1983	71,3	178,7	70,4	157,5	190,7	0,0	668,6	672,1
1984	83,4	54,5	82,2	124,8	112,9	14,3	472,1	559,1
1985	-	58,2	183,1	217,5	100,4	-	559,2	516,0

- Pas d'observation.

Tableau 7.8 : Précipitations mensuelles et annuelles à Imiga et Zorgho, entre 1982 et 1985.

Deux caractéristiques importantes apparaissent à la lumière de ce tableau : le déficit global des précipitations et aussi leur irrégularité interannuelle et mensuelle.

- *La campagne 1982* est très déficitaire par rapport à la moyenne de Zorgho, voisine, rappelons-le, de 800mm (Tableau 1.7, p. 35). Le total de 636mm est dépassé 9 années sur 10. Chacun des mois de juillet, d'août et surtout de septembre est déficitaire ($f \simeq 0,2$ pour juillet et août). Si l'on considère les pluies moyennes sur le bassin BV1, le nombre de pluies supérieures à 20mm seulement n'est que de deux (Tab. A.7.1 à 3), soit 7,7% contre 27,1% en moyenne (Tableau 1.2, p. 28). L'indice d'agressivité est voisin de 90 (Tableau 7.9).

- *La campagne 1983* est encore déficitaire avec des totaux très voisins à Imiga et Zorgho, de l'ordre de 670mm ($f \simeq 0,15$ d'après Tab. A.121.1). Mai est dans la moyenne (71,3mm contre 75mm); *juin est très excédentaire* avec une valeur (178mm) qui correspond à la moyenne de juillet (Tableau 1.7). En revanche, le mois de juillet est très déficitaire ($f < 0,2$) comme, dans une moindre mesure août. Enfin, le mois de septembre redevient très excédentaire ($f \simeq 0,8$). La distribution mensuelle des pluies est donc tout à fait particulière avec un coeur de mousson très peu pluvieux tandis que le début et la fin de l'hivernage (qui s'interrompt toutefois brutalement) sont bien arrosés.

L'agressivité des pluies est en revanche supérieure à la moyenne :

* Si l'on se réfère aux classes de hauteur de pluie, il apparaît que 13 averses sur 44 sont supérieures à 20mm (Tab. A.7.4 à 7.8), soit 29,5% (contre 27,1% pour la période 1956-1983) ; 5 d'entre elles dépassent 40mm, soit 11,4% (contre 7,1%). De ce point de vue, les mois les plus agressifs sont juin (4 pluies supérieures à 20mm) et septembre (3).

* Si l'on se réfère aux indices d'agressivité de Wischmeïer, l'indice R annuel moyen, estimé à 378 points sur la station voisine de Mogtedo (Galabert, 1972), est donc dépassé à Imiga en 1983. En prenant les valeurs obtenues successivement sur les pluviographes

Pg1					Pg2				
Date	R	R mensuel	R'	R' mensuel	Date	R	R mensuel	R'	R' mensuel
07.07.82	2,7		2,1		07.07.82	5,8		6,0	
18.07.82	6,4		6,6		18.07.82	2,0		1,7	
24.07.82	.	11,4	.	10,5	24.07.82	7,9	33,0	7,9	33,7
25.07.82	.		.		25.07.82	9,2		9,4	
30.07.82	2,3		1,8		30.07.82	6,5		6,5	
31.07.82	.		.		31.07.82	1,6		2,2	
07.08.82	.		.		07.08.82	5,2		5,4	
20.08.82	30,9		34,7		20.08.82	16,6		19,9	
26.08.82	.	48,8		55,1	26.08.82	6,2	51,2	5	54,8
27.08.82	17,9		20,4		27.08.82	20,7		22,6	
29.08.82	.		.		29.08.82	2,5		1,9	
02.09.82	.		.		02.09.82	6,3		5,6	

. Pluies inférieures à 10mm : indices non calculés.

Pg1					Pg2				
Date	R	R mensuel	R'	R' mensuel	Date	R	R mensuel	R'	R' mensuel
14.05.83	9,9		11,3		14.05.83	-			
20.05.83	1,5	11,4	1,1	12,4	20.05.83	-			
01.06.83	17,5		17,6		01.06.83	-			
06.06.83	8,8		8,7		06.06.83	-			
11.06.83	15,2		14,1		11.06.83	29,5*		25,9*	
19.06.83	138,2		132,2		19.06.83	-			
29.06.83	.	179,7	.	172,6	29.06.83	3,9		3,3	
08.07.83	.		.		08.07.83	9,6		7,7	
17.07.83	1,4*	1,4	0,8*	0,8	17.07.83	2,4*	12	2,1*	9,8
08.08.83	-		-		08.08.83	6,6		7,7	
09.08.83	4,9		4,5		09.08.83	6,2		6,2	
11.08.83	25,4		18,2		11.08.83	18,8		19,6	
15.08.83	-		-		15.08.83	5,1		4,1	
21.08.83	3,5		3,2		21.08.83	5,7		5,5	
22.08.83	2,8		2,5		22.08.83	2,5		2	
26.08.83	1,4		0,7		26.08.83	.	44,9	.	44,5
02.09.83	.		.		02.09.83	2,9		1,9	
08.09.83	3,2		2,2		08.09.83	.		.	
10.09.83	30,6		27,8		10.09.83	31,6		30,3	
11.09.83	1,8		1,1		11.09.83	5		4,5	
14.09.83	10,4		9,3		14.09.83	7,8		7,1	
16.09.83	4,1		3,5		16.09.83	33,7		31,2	
18.09.83	6,9		6,3		18.09.83	4,8		4,1	
22.09.83	33,6	90,6	36,5	86,7	22.09.83	56,6	142,4	58,8	137,9

. Pluies inférieures à 10mm ou nulles : indices non calculés.
- Pluies supérieures à 10mm mais enregistrements défectueux.
* Valeurs incertaines.

Pg1					Pg2				
Date	R	R mensuel	R'	R' mensuel	Date	R	R mensuel	R'	R' mensuel
24.05.84	5,0		5,2		24.05.84	5,4		5,2	
27.05.84	13,4	21,9	13,7	23,5	27.05.84	12,6	27,3	12,8	27,8
31.05.84	3,5		4,6		31.05.84	9,3		9,8	
02.06.84	2,5		1,8		02.06.84	7,3		6,9	
13.06.84	3,0	5,5	2,6	4,4	13.06.84	3,3	19,2	3,1	18,6
23.06.84	.		.		23.06.84	-		8,6	
06.07.84	12,2		10,2		06.07.84	.		.	
18.07.84	34,1	51,6	33,9	50,7	18.07.84	17,3	21,8	17,7	21,0
23.07.84	5,3		6,6		23.07.84	4,5		3,3	
11.08.84	.		.		11.08.84	2,7		1,6	
12.08.84	7,4		6,6		12.08.84	4,9		3,8	
17.08.84	3,3	51,5	3,1	51,6	17.08.84	5,4		5,4	
					18.08.84	-			
27.08.84	12,1		13,0		27.08.84	.		.	
31.08.84	28,7		28,9		31.08.84	-			
05.09.84	2,1		2,1		05.09.84	8,9		8,5	
14.09.84	12,9	41,8	11,5	41,0	14.09.84	6,0	22,3	5,2	21,7
30.09.84	26,8		27,4		30.09.84	7,4		8,0	
09.10.84	4,2	4,2	3,0	3,0	09.10.84	.		.	

. Pluies inférieures à 10mm : indices non calculés.
- Pluies supérieures à 10mm mais enregistrements défectueux.

Tableau :

7.9 : Indices d'agressivité des pluies à Imiga en 1982 (période 1er juillet - 2 septembre), 1983 et 1984 (R: indice de Wischmeier ; R': indice de Galabert).

Pg1 et Pg2 (Tableau 7.9), l'indice Ra est en effet voisin de 390 points. Il est vrai que la seule averse du 19 juin totalise 138 points.

Cette pluie moyenne de 76,5mm, dépassant 80mm sur trois postes avec un maximum de 90,9mm en Pp1 (Tab. A.7.5) a un caractère exceptionnel. *Ce dernier n'est pas mis en évidence si l'on s'en tient aux fréquences des pluies maximales annuelles* ($f \simeq 0,65$). En revanche, rapportée aux premiers mois de l'hivernage (§ 1.2.2.2), la fréquence de la tornade est d'ordre quasi centennal (Tableau 1.10, p. 43).

- *La campagne 1984* enregistre une pluviométrie catastrophique, inférieure à 500mm à Imiga et guère supérieure à Zorgho. Il s'agit d'un minimum absolu, enregistré là comme en bien d'autres stations du pays pour lequel cette année est la plus terrible des années de sécheresse. Des épisodes de près de dix jours sans pluie frappent les mois de juin, juillet et août, au cours desquels l'indice d'humectation des sols redevient quasi nul. Le nombre d'averses (52) reste certes conforme à la normale (Tab. A.11.1) mais les averses fortes ou moyennes sont très affectées : 7 seulement dépassent 20mm, dont une au-dessus de 40mm. L'indice d'agressivité annuel n'atteint pas 200 points.

- *La campagne 1985* reste très déficitaire avec un total voisin de 550mm (516mm à Zorgho) mais la distribution mensuelle est plus équilibrée. Les trois mois de juillet, août et septembre dépassent tour à tour 100mm ; août enregistrant même plus de 200mm. Il s'agit là du point de vue hydrologique de conditions tout de même plus favorables aux écoulements que l'année précédente. Dix averses sur un total de trente-deux (32) sont supérieures à 20mm(1)

En résumé, l'expérimentation s'inscrit dans une période de quatre années déficitaires à très déficitaires avec un minimum très creusé en 1984 et inconnu jusque là. Une averse exceptionnelle est cependant enregistrée le 19 juin 1983.

---

(1) *Les indices d'agressivité des pluies de 1985 n'ont pu être calculés en l'absence de pluviogrammes.*

Il s'agit de voir désormais comment se déroule le fonctionnement du bassin d'Imiga, dans ces contextes journaliers ou saisonniers que l'on peut qualifier "d'accidentels"(1).

b- *Les caractéristiques des crues au cours des quatre campagnes (1982-1985).*

Malgré les incertitudes entourant encore la définition des courbes d'étalonnage, notamment en S2, les limnigrammes disponibles ont été traduits en hydrogrammes donnant le volume global écoulé puis en turbidigrammes pour ce qui concerne la station S1. Les caractéristiques hydrologiques essentielles, journalières et saisonnières, sont ainsi présentées sur quatre tableaux successifs (Tableau 7.10 à 7.13) correspondant à chacune des années d'expérimentation. Le régime hydrologique est dans tous les cas celui d'un écoulement *intermittent*, fait de crues plus ou moins aiguës faisant rapidement suite aux averses. Entre ces phases, il n'existe pas de débit de base. Seul, un chapelet de mares encombrant le lit mineur témoigne des ruissellements antérieurs. En revanche, un écoulement d'inféro-flux subsiste indubitablement à l'aval, dans la profondeur du lit sableux ou de manière plus générale sur toute la largeur du bas-fond. Le suivi de la nappe en 1981, à travers une chaîne de quinze piézomètres dont deux à 200-300 mètres en aval de notre exutoire (S1), montre bien une série de battements synchrones des précipitations et des ruissellements de surface (Ki, 1982).

La campagne 1982 : Durant cette année déficitaire, douze crues sont enregistrées à chacune des deux stations, avec une quasi identité dans les dates d'écoulement. En revanche, les volumes écoulés peuvent être étonnamment dissemblables.

- *En début d'hivernage*, de mai à début juillet (7/7), il semble bien, en dépit du caractère lacunaire des observations pluviométriques et hydrométriques (S1) que *les volumes écoulés à l'amont*

---

(1) La pluviométrie de 1986 à Zorgho (708,2mm) demeure inférieure à la moyenne 1971-1982 (Tableau 1.7). Elle retombe à 572,4mm en 1987 !

Bassin	Date 1982	Pluie moyenne-Thiessen (mm)	Volume écoulé (m^3)	Lame écoulée (mm)	Coefficient d'écoulement (%)
BV 1	09.05.82	33,5 (Pp1)	N		
	24.06.82	18,6 (Pp1)	N		
	25.06.82	?	F		
	07.07.82	15,0	N		
	18.07.82	18,2	F		
	25.07.82	15,4	F<18500		
	30.07.82	14,5	F< 3000		
	07.08.82	13,2	0		
	20.08.82	36,4	N		
	27.08.82	42,7	76 600	6,4	14,9 (43 000kg)
	29.08.82	8,9	N		
	02.09.82	13,1	N		
	N : écoulement négligeable F : écoulement moyen à fort (non évalué à cause d'une contre-pente longitudinale)				
BV 2	09.05.82	33,5 (Pp1)	1er écoulement (non enregistré)		
	24.06.82	18,6 (Pp1)	10 440	2,0	10,6
	25.06.82	?	22 460		
	07.07.82	17,5 (Pg2)	9 650	1,8	10,4
	18.07.82	16,0	0	0	0
	24.07.82	19,6	0	0	0
	25.07.82	18,1	11 520	2,2	12,0
	30.07.82	12,3	0	0	0
	07.08.82	15,5	0	0	0
	20.08.82	36,6	?		
	27.08.82	47,9	59 760	11,3	23,5
	02.09.82	15,2	0	0	0

Tableau 7. 10 : Caractéristiques de l'écoulement aux exutoires (S1 et S2) des deux bassins versants (BV1 et BV2) d'Imiga (Burkina Faso) en 1982.

(S2) soient plus importants que ceux retrouvés à l'exutoire principal. C'est un constat a priori surprenant, qui avait été d'ailleurs déjà fait sur les petits bassins de la région de Tikaré (Oberlin *et al.*, 1966, p. 79) et qui s'explique ici facilement. Une raison tient au réseau hydrographique proprement dit, une autre est d'ordre pédologique. *La partie occidentale du bassin est en effet constituée*, nous l'avons vu (Chap. V ou carte 2) *de sols localement bruns, vertiques, dont les fentes de retrait absorbent le ruissellement durant les premières averses*. De ce fait, le bassin BV2, avec ses sols nus ou gravillonnaires et mal protégés par la savane arbustive, se comporte potentiellement (toutes conditions de distribution spatiale des averses mises à part) comme le principal fournisseur d'eaux de ruissellement. Mais une caractéristique hydrographique peut limiter le transfert de ces eaux jusque vers S1. En effet, à l'aval de S2, la pente longitudinale du talweg diminue et le *lit mineur à fond sableux est constitué de nombreuses mouilles que les eaux doivent remplir en combattant les pertes par évaporation et surtout par infiltration*. Sur le talweg principal occidental, le lit mineur est moins marqué (carte 2) et cède rapidement la place à un "bas-fond plaine" où les épandages provoquent également d'autres pertes. Cette conjonction de phénomènes peut expliquer que les volumes écoulés soient négligeables ou moyens lors des quatre premières crues en S1 tandis qu'ils atteignent 10 000 ou 20 000 m^3 en S2.

Le 18 juillet, une tendance contraire s'amorce pour la première fois. Elle peut être liée à une différence de comportement des sols ou plus simplement à la variabilité spatiale des pluies (16mm en Pg2 contre 21mm en Pg1 - Tab. A.7.1).

- *Le 25 juillet, la variabilité spatiale des averses* caractérise une nouvelle fois le bassin mais au profit du sous-bassin BV2. La pluie moyenne est de 18,1mm sur BV2 contre 15,4mm sur BV1. Cette pluie moyenne sur BV1 rend d'ailleurs mal compte de l'écart qui existe entre BV2 et le bassin résiduaire (BV1-BV2) : Pg2 enregistre 20,5mm contre 7,5 seulement en Pg1 ! Cet écart est renforcé en outre par la pluie précédente (24 juillet) qui a la même distribution spatiale (Tab. A.7.1). Au facteur conditionnel pluviométrique, on pourrait

donc raisonnablement ajouter le facteur d'humidité préalable au sol pour rendre compte des différences de fonctionnement hydrologique entre BV2 et le bassin occidental. En fait, les valeurs enregistrées sur nos tensiomètres(1) en Pg1, Pg2 ou PA nous incitent à plus de réserve. Les taux d'humidité sont de 4% seulement à moins 20cm sur les sols gravillonnaires, plus ou moins filtrants, autour de Pg2 (8% à - 40cm) tandis qu'ils sont de 7% à - 20 et - 40cm en Pg1 (12,5% en PA à - 20cm). *A l'échelle d'un bassin-versant*, compte tenu de la marqueterie des sols et de la diversité de leur fonctionnement, *les états d'humectation doivent être utilisés, semble-t-il, avec prudence.*

Quoi qu'il en soit, l'écart de pluviosité est donc marqué entre ces deux sous-bassins le 25 juillet. Il semble au total que :

1. La totalité du volume passé en S2 (11520m^3) rejoigne l'exutoire principal (S1). Désormais, le remplissage des mares est effectué et facilite le transfert des eaux de l'amont.

2. le seuil de déclenchement du ruissellement est probablement atteint dans la partie occidentale malgré des pluies limitées (7,5mm en Pg1). Cet écoulement viendrait compléter le précédent pour donner en S1 un volume dont on peut estimer la limite supérieure à 18500m^3.

En effet, la lecture des hauteurs limnimétriques dans la retenue du barrage d'Imiga (41cm le 24 juillet ; 91cm le 26 juillet) puis de la courbe de cubature (Lis, 1979) permet d'évaluer l'apport à 18500m^3 (20500-2000) pour un bassin, rappelons-le, de 14,5 km^2.

Le volume de 3000m^3 au maximum le 30 juillet 1982 est estimé de la même façon(2). Cette fois, seul l'aval du bassin (23,8 mm en PA - Tab. A.7.1) semble participer au ruissellement puisque le débit est nul en S2.

---

(1) Les tensiomètres placés sur chaque site à - 20 et - 40cm n'ont fonctionné qu'en ces trois points (Pg1, Pg2 et PA). Leur utilisation est très délicate tout comme l'établissement des courbes d'étalonnage.
(2) Nous ne disposons malheureusement pas des données limnimétriques sur la retenue d'Imiga au-delà du 18 août 1982.

- *La crue du 27 août 1982* conduit aux premières comparaisons précises entre les deux bassins. Il s'agit de l'écoulement le plus important de la saison, supérieur par exemple en S2 au cumul des volumes enregistrés lors des autres crues. Les coefficients de ruissellement sont respectivement de 14,9% sur BV1 et 23,5% sur BV2. Les raisons en sont les caractéristiques de l'averse ; non pas tant la hauteur relativement modérée des pluies moyennes (42,7 et 47,9mm) ni même l'agressivité globale (Tableau 7.9) mais l'extraordinaire intensité instantanée dans la phase initiale du phénomène avec des valeurs de l'ordre de 300 mm/h pendant 2 à 3 minutes sur Pg2 (Fig. 1.22 et 1.23, p. 65-66). L'indice de Kolher donne une idée de l'état d'humectation du bassin en comparant la valeur préalable à la pluie du 27 août à toutes les autres calculées sur cette saison 1982 (Tab. A.7.1 à 3). Cet indice (8,1) arrive au second rang ce qui signifie que la plus forte averse enregistrée s'abat sur un sol qui est pratiquement le plus humide que l'on puisse connaître durant cet hivernage. Dans l'absolu, les taux d'humidité sont en effet de 15% à - 20cm en Pg1, 14,5% en PA, 6,8% sur les sols gravillonnaires de Pg2 (10,8% à - 40cm).

L'importance de l'averse et l'humidité préalable au sol l'emportent donc sur l'effet protecteur du couvert végétal en cette fin de mois d'août pour rendre compte de l'efficacité du ruissellement.

Une fois encore, il faut pourtant distinguer les réponses des deux bassins. Sur BV2, le ruissellement est 1,5 fois plus fort que sur BV1. Le débit global enregistré en S2 (59760m^3) équivaut à 78% du volume passant à l'exutoire principal S1 (76600m^3). *Cela ne signifie pas obligatoirement que le ruissellement issu du sous-bassin occidental n'apporte que la différence (16840m^3).* Des pertes peuvent continuer en effet d'affecter l'écoulement issu de BV2 mais elles sont probablement limitées à cette date. Les participations respectives de chacun des sous-bassins doivent bien se situer autour de 70-75% pour BV2 et 25-30% pour le bassin résiduaire. Cette différence de comportement tient principalement, une fois encore, à la variabilité spatiale des précipitations, soulignée dès le chapitre I (p. 72-73) et mise en évidence encore sur la figure 7.6. Ce 27 août, l'isohyète 45mm coïncide

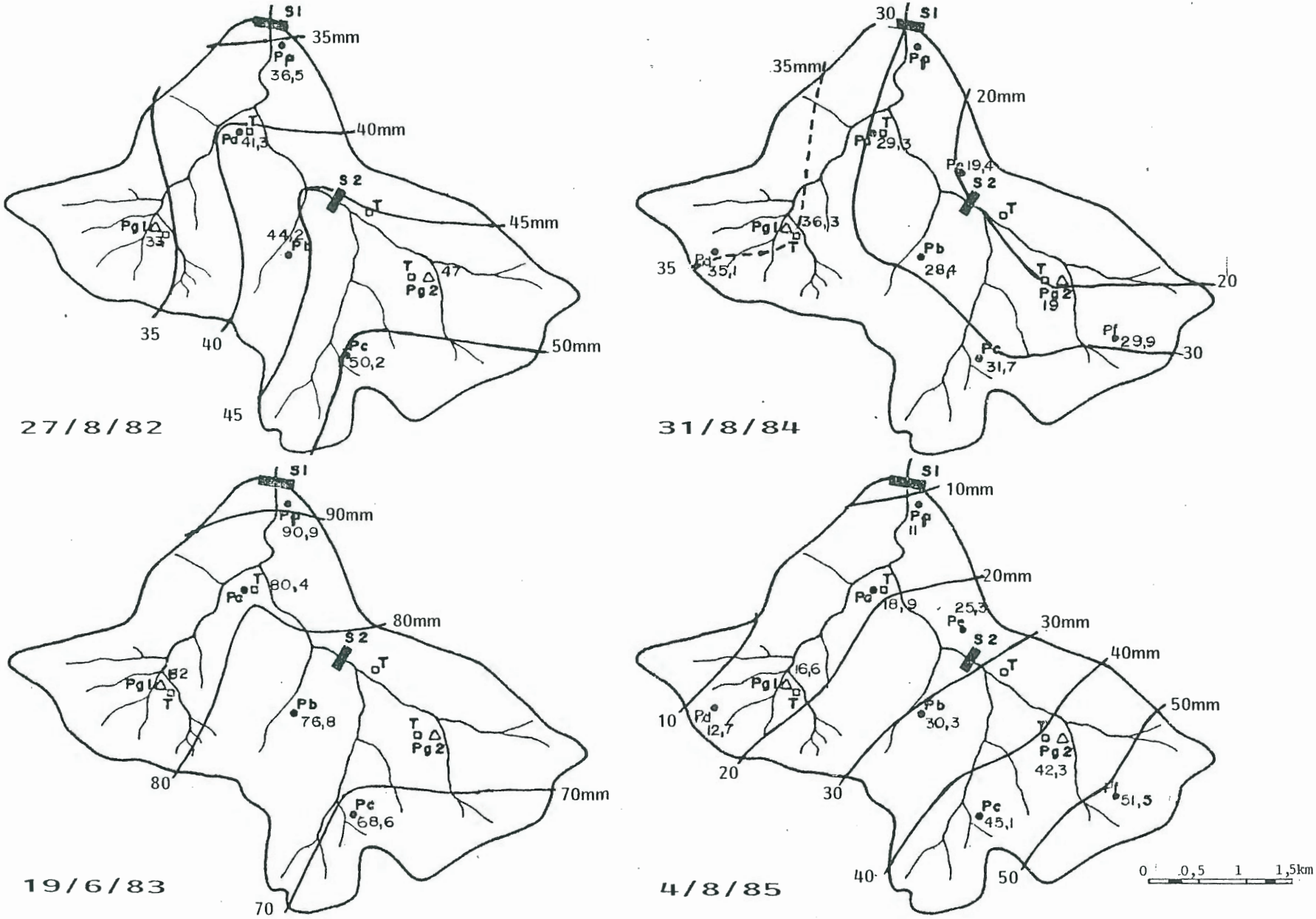


Fig. 7.6 : Variabilité spatiale des précipitations journalières à l'échelle d'un petit bassin versant de 12 km² (Imiga).

assez bien avec la limite aval du bassin BV2. Cette valeur est partout dépassée en amont et apparemment atteinte nulle part sur le reste de BV1. Les intensités instantanées sont plus violentes également en Pg2 (300mm/h pendant 2 minutes) qu'en Pg1 (72 mm/h pendant 5 minutes).

L'existence de nombreuses plaques de sols nus sur BV2 (11,5% - Tableau 4.3, p. 157), ne peut pas être considérée comme un argument décisif dans une optique comparative car leur pourcentage est assez identique sur le bassin résiduaire (9,2%). En revanche, ce facteur permet de mieux comprendre l'importance absolue des ruissellements, y compris en cette fin du mois d'août, où BV2 est en théorie davantage protégé par un couvert végétal plus dense. Si l'on retient un coefficient de ruissellement vraisemblable de 80% sur ces plaques de sols nus et si l'on accepte pour l'instant l'hypothèse d'une continuité dans l'espace de l'écoulement à partir de ces unités(1), le coefficient moyen sous savane est alors de 16,2% ce qui paraît tout à fait cohérent.

Outre la lame d'eau écoulée en chacune des deux stations et les coefficients de ruissellement, d'autres paramètres caractérisent la réponse de ces deux bassins. Ceux-ci sont totalement apparents, sur la figure 7.7, comme le temps de réponse (Tr) et le temps de montée (Tm) ou partiellement comme le temps de base (Tb) qui englobe le ruissellement très retardé ou hypodermique. Le temps de réponse qui sépare la pointe de la crue du maximum d'intensité de l'averse peut être également imprécise lorsque les hyétogrammes sont à pointes multiples et décalées dans le temps entre les postes d'observation.

Pour la station S2, les limnigrammes (L 2) et hydrogrammes (Q ℓ2) présentent deux pics qui sont manifestement en rapport avec les deux pointes d'intensité sur le pluviographe Pg2 le plus proche :

---

(1) L'hypothèse de la continuité du ruissellement dans l'espace n'est pas généralisable, loin s'en faut. En revanche, nous verrons un peu plus loin dans quelle mesure elle peut être invoquée en ce qui concerne les plaques de sols nus.

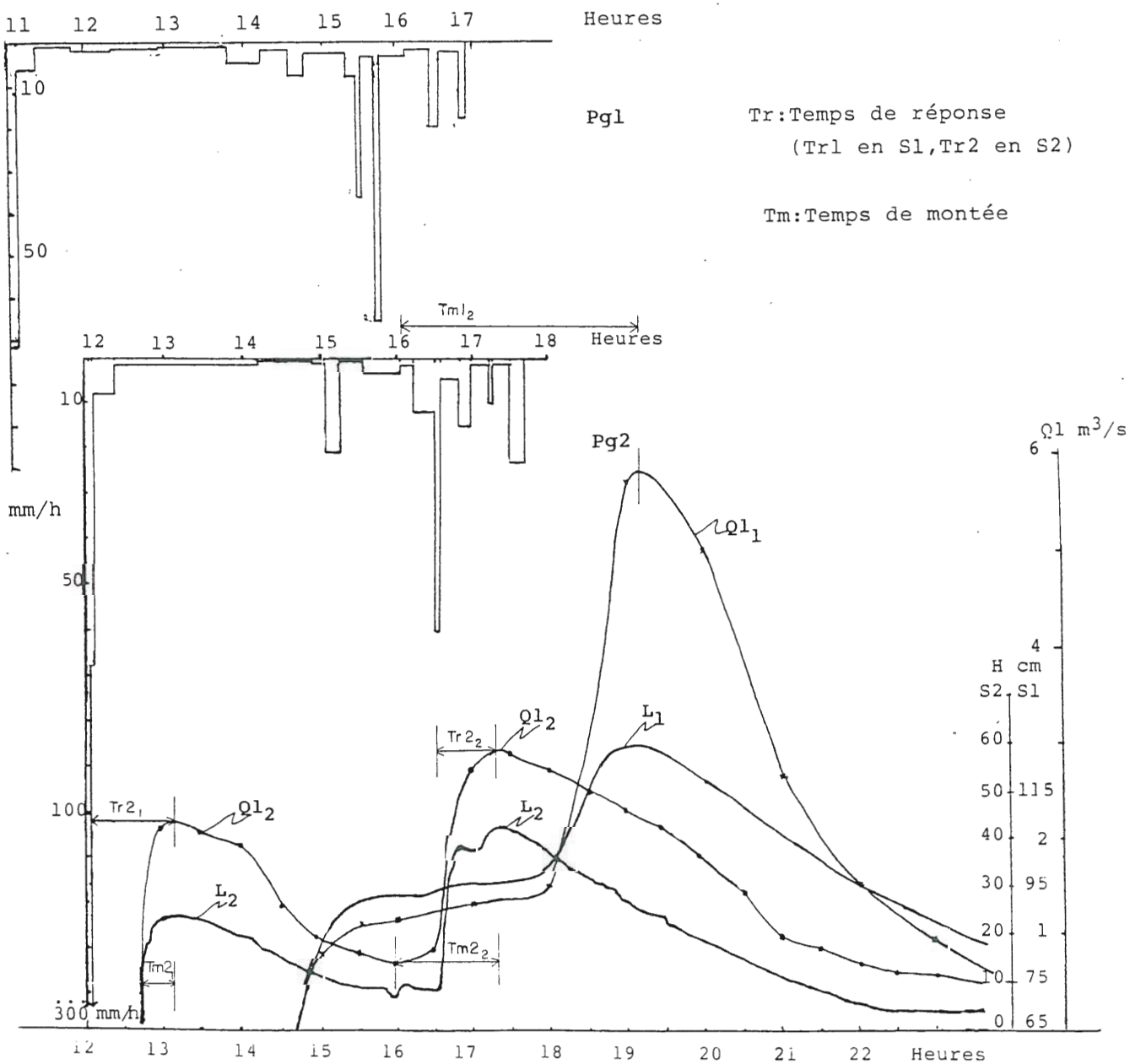


Fig. 7.7 : Variations de hauteurs d'eau (L), de débits (Q1) et de l'intensité de la pluie : la crue du 27 août 1982 aux deux stations S1 et S2 d'Imiga.

$Tr2_1 \simeq 68'$ (apparition du ruissellement après 40')

$Tm2_1 = 25'$

$Tr2_2 = 45'$

$Tm2_2 = 82'$

$Tb = 19$ heures

Pour la station S1, les déterminations sont plus complexes puisqu'il faut rechercher une moyenne horaire pour les phases d'intensité maximale .

$Tr1_1 \simeq 3h\,56'$ (apparition du ruissellement après 3h06).

$Tr1_2 \simeq 3h\,06'$

$Tm1_1 = 45'$

$Tm1_2 = 68'$

Enfin, l'érosion a été évaluée à 43 tonnes à l'exutoire du bassin principal. Les débits solides instantanés passent de 1 kg/s à plus de 4 kg/s pendant la montée des eaux. Il est intéressant de noter que les charges unitaires, généralement voisines de 0,8 à 1 g/l, atteignent, au moment d'une montée brutale des plus hautes eaux (110cm à 18h15, 120cm à 18h20), un maximum de 3,96 g/l à droite du lit et à 10cm du fond (2,26 g/l à - 60cm, 1,95 g/l à - 20cm) (Fig. 7.8).

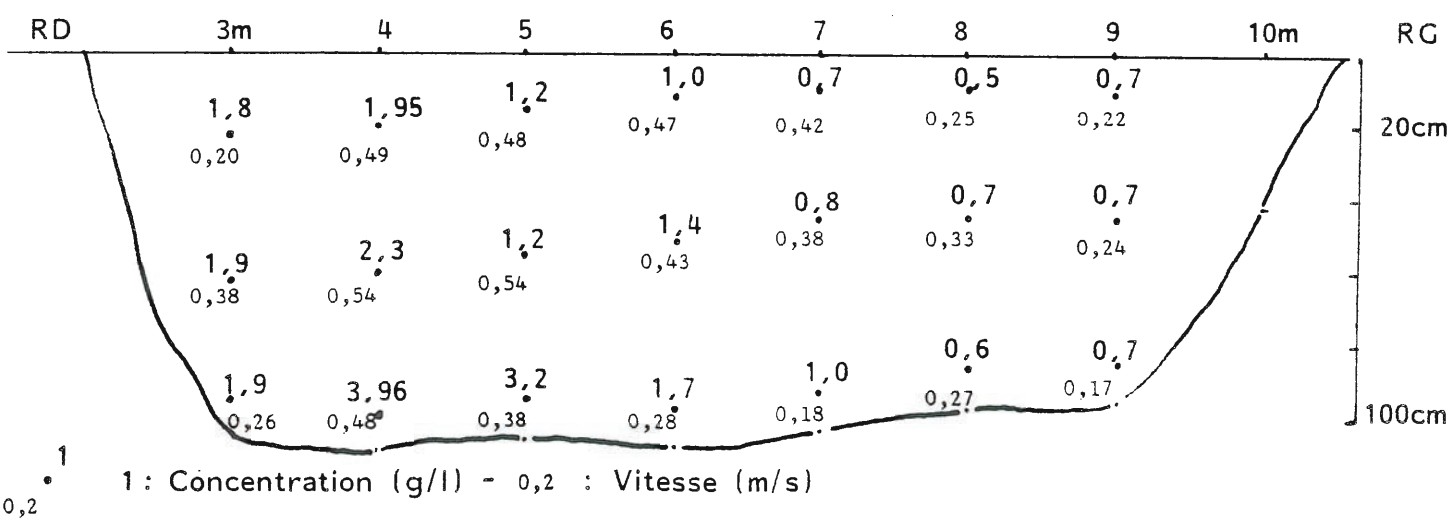


Fig. 7.8 : Répartition des vitesses et des concentrations de matériaux en suspension et saltation dans la section de la station S1 à Imiga le 27/8/82.

L'estimation de l'érosion sur BV2 faite en utilisant l'équation précitée (p. 312) encore incertaine donne une valeur de 87 tonnes ! Si cet ordre de grandeur devait être vérifié, ce résultat serait d'une extrême importance. *La diminution de la charge transportée de l'amont à l'aval attesterait de l'existence d'un dépôt entre nos deux stations*, ce qui paraît tout à fait plausible, en relation avec la diminution de la pente notamment (6,7 m/km en amont, environ 3 m/km entre S2 et S1). Nous verrons que ce premier constat fondamental pourra être confirmé, à propos de l'étude de la dissection linéaire (§ 7.1.3) en mettant en rapport les tonnages exportés sur les ravins et ceux évalués en S1.

b- La campagne 1983.

Dix-huit (18) et dix-sept (17) crues sont enregistrées en S1 et S2 lors de cette campagne peu pluvieuse mais à forte agressivité en début et en fin d'hivernage. Les lames d'eau écoulées sont de 73,5mm sur le bassin BV1 (déficit d'écoulement : 595mm) et 59,2mm sur BV2 (déficit d'écoulement : 636mm). Les modules annuels et spécifiques sont les suivants :

	Module annuel (m^3/s)	Module spécifique ($l/s/km^2$)
BV1	0,03	2,33
BV2	0,01	1,87

Ces modules spécifiques sont tout à fait voisins de ceux obtenus sur des bassins plus méridionaux (Binnde par exemple, p. 291) dans les années soixante. Ils sont même supérieurs à ceux enregistrés à même latitude dans la région de Boulsa (Kognere) ou de Ouagadougou. On rejoint là la conclusion formulée par J. Albergel (1987) : malgré une pluviométrie déficitaire, l'écoulement peut rester comparable à celui observé durant lesannées plus humides.

Les coefficients d'écoulement par rapport aux précipitations totales sont respectivement de 11,1% et 8,5% (Tableau 7.11). *C'est la seule année où ce coefficient est supérieur sur BV1 par rapport à BV2*. La raison tient partiellement aux écarts entre les volumes ruisselés lors de l'averse exceptionnelle du 19 juin, qui frappe

BV2	Pluie moyenne - Thiessen (mm)	Volume écoulé (m^3)	Lame écoulée (mm)	Coefficient d'écoulement (%)
11.05.83	10,1	5 540	1,0	10,3
14.05.83	34,1	21 890	4,1	12,1
20.05.83	25,2	24 100	4,5	18,0
01.06.83	27,7	30 930	5,8	21,1
06.06.83	28,4	26 440	5,0	17,6
11.06.83	27,8	31 100	5,9	21,1
19.06.83	71,3	58 400	11,0	15,5
07.07.83	21,6	2 550*	0,5	2,2
11.08.83	28,0	11 400*	2,2	7,7
14.08.83	13,3	2 040*	0,4	2,9
20.08.83	18,2	2 520*	0,5	2,6
09.09.83	47,4	18 060*	3,4	7,2
10.09.83	15,6	4 200*	0,8	5,1
13.09.83	16,2	6 300*	1,2	7,3
15.09.83	30,9	23 100*	4,4	14,1
17.09.83	15,1	3 000*	0,6	3,7
21.09.83	62,2	41 700*	7,9	12,6
Total : Pluies ruisselantes : 493,1 mm Pluies du 1.5 au 31.10.83 : 695,2mm		313 270m^3	59,2mm	12,0% par rapport aux pluies ruisselantes 8,5% par rapport aux pluies totales
* Données H.E.R. en l'absence de limnigrammes.				

BV1	Pluie moyenne-Thiessen (mm)	Volume écoulé (m^3)	Lame écoulée (mm)	Coefficient d'écoulement (%)	Transport en suspension (kg)
14.05.83	33,1	21 260	1,8	5,3	19 300
20.05.83	24,1	36 915	3,1	12,7	42 200
01.06.83	26,7	55 377	4,6	17,2	69 100
06.06.83	24,9	37 592	3,1	12,5	42 800
11.06.83	25,9	84 701	7,0	27,1	99 800
19.06.83	76,5	308 008	25,6	33,4	425 500
07.07.83	20,2	N			
08.08.83	22,2	12 976	1,1	4,9	4 400
11.08.83	26,5	38 471	3,2	12,0	38 550
14.08.83	14,4	18 002	1,5	10,4	9 000
20.08.83	16,3	N			
21.08.83	14,6	3 220	0,3	1,8	N
09.09.83	46,3	38 725	3,2	6,9	36 900
10.09.83	13,1	9 525	0,8	6,0	650
13.09.83	17,6	33 213	2,8	15,7	27 200
15.09.83	21,8	40 995	3,4	15,6	41 700
17.09.83	15,9	33 050	2,7	17,2	27 100
21.09.83	50,8	111 659	9,3	18,2	143 800
Total : Pluies ruisselantes : 470,7mm Pluies du 1.5 au 31.10.83 : 668,6mm		883 689m^3	73,5mm	15,6% par rapport aux pluies ruisselantes 11,1% par rapport aux pluies totales	1028 000 ≈1028 T
N : écoulement ou transport négligeable					

Tableau 7.11 : Caractéristiques de l'écoulement aux exutoires (S1 et S2) des deux bassins versants (BV1 et BV2) d'Imiga (Burkina Faso) en 1983.

davantage l'aval et la partie occidentale de notre domaine d'étude (Fig. 7.6). Le phénomène correspond surtout aux différences de comportements entre les deux sous-bassins durant le mois de septembre. Ce dernier enregistre, on s'en souvient, une pluviométrie excédentaire, supérieure en BV2 à ce qu'elle est sur le reste du bassin. Pourtant, le coefficient d'écoulement n'est que de 8,7% sur BV2 contre 11,6% pour l'ensemble. C'est, en effet, *en cette fin d'hivernage que la protection herbacée et arbustive*, plus dense sur les hauts de pente, *est la plus efficace, d'autant que la croissance de la végétation a été facilitée par un bon début de saison des pluies*. Sur le sous-bassin occidental, en revanche, les cultures freinent moins le ruissellement et les sols localement vertiques sont probablement saturés(1) ou du moins ne présentent plus les fentes de début d'hivernage. L'indice de Kolher (Ik) suffit à traduire cette originalité du mois de septembre 1983, durant lequel on enregistre un maximum absolu pour nos quatre années de 53,9 et trois autres valeurs supérieures à 20 (Tab. A.7.8).

La variabilité spatiale des averses ne peut donc être invoquée à tout coup (Fig. 7.9). La protection différentielle des couverts végétaux naturels ou cultivés, la saturation probable des sols bruns sur l'une des sous-unités hydrologiques constituent plus sûrement(2), en cette fin d'hivernage, des raisons essentielles pour influencer l'hydraulicité annuelle.

---

(1) Sur le site de Pg1, les teneurs en eau varient entre 13 et 16,8% à moins 20cm entre le 10 et le 20 septembre.

(2) Peut être faut-il ajouter une raison secondaire, d'ordre technique, liée à une sous-estimation des débits calculés par l'H.E.R. et utilisés dans le tableau 7.11. Pour les écoulements où une comparaison est possible, il s'avère en effet que nos débits globaux sont supérieurs à ceux du Service Hydrologie (58400m³ le 19 juin, par exemple, contre 40800m³). Cela tient probablement à des tracés différents de la courbe d'étalonnage de S2.

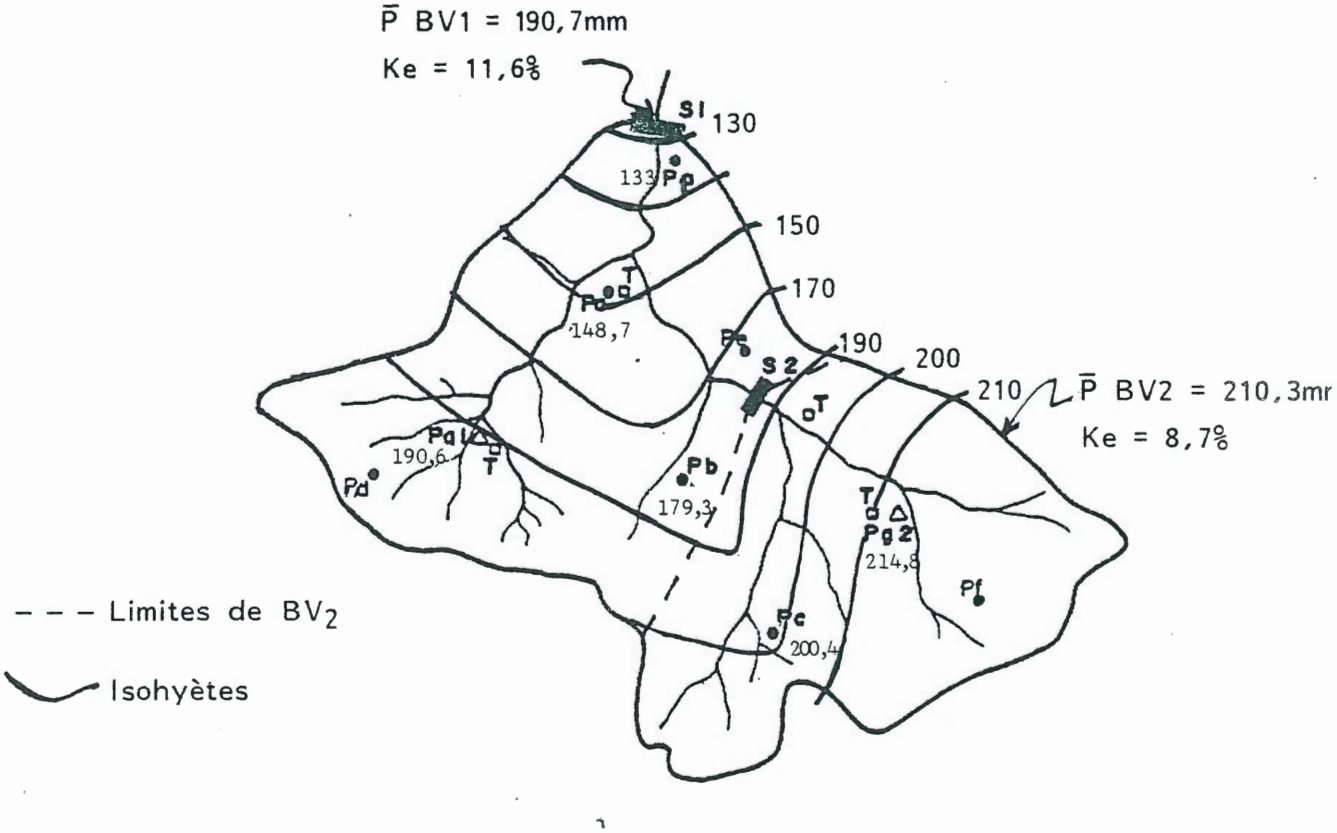


Fig. 7.9 : La variabilité spatiale des précipitations : facteur conditionnel insuffisant pour une explication des écoulements (Septembre 1983, Imiga).

Sans entrer dans l'examen détaillé de chacune des crues, on peut toutefois relever les coefficients d'écoulement unitaires maximums et souligner leur occurrence en début d'hivernage. La valeur de 33,1% (19 juin) sur BV1 constitue un extrême pour les quatre années d'expérimentation, tout à fait comparable à ceux fournis par l'ORSTOM (p. 296). Sur BV2, une valeur inférieure (21,1%) est enregistrée à deux reprises (1er et 11 juin). A la date du 11 juin, pour laquelle le coefficient est encore de 27,1% sur BV1, des intensités instantanées "records" sont perçues : 165mm/h pendant deux minutes puis 228mm/h pendant cinq minutes. Cette dernière phase correspond à une fréquence d'une année sur vingt au moins (Tableau 1.19).

Le coefficient de 15,5% sur BV2, lors de la tornade du 19 juin, paraît modeste(1). L'effet protecteur des herbacées, grâce à un bon début de saison des pluies, est peut-être déjà sensible, plus par leur taux de recouvrement (35 à 70%) que par leur hauteur (les annuelles ont de 3 à 5cm de hauteur tout de même, en moyenne, le 28 juin et les *Andropogon* de 10 à 30cm).

Quelques crues-types en S1 sont illustrées en annexes (Fig. A.7.2 a et b) avec leurs principales caractéristiques hydrométriques. Les temps de montée et de réponse apparaissent assez longs, surtout si on les compare aux caractéristiques de l'hydrogramme-type pour des bassins de même taille (Klein, 1967) mais situés, plus au sud, dans la région de Manga(2). Trois raisons au moins peuvent être avancées : la faiblesse de la compacité et de l'indice global de pente (Tableau 7.5), l'importance des pertes notamment en début d'hivernage.

Les temps de réponse et de concentration sont évidemment beaucoup plus courts sur le bassin BV2 beaucoup plus compact (1,13) et bénéficiant d'une densité de drainage supérieure à celle du bassin résiduaire (4,66 km² contre 3,37 km/km² - Tableau 7.5).

L'érosion est supérieure à 1000 tonnes sur ces 12 km², soit une dégradation spécifique annuelle d'environ 85 tonnes par km² et une turbidité annuelle de 1160 g/m³. *Ces valeurs peuvent être utiles à titre comparatif mais elles n'ont que peu de signification sur des transferts de matières, qui sont très probablement discontinus dans l'espace et dans le temps à l'échelle du bassin. D'autre part, même s'il est tentant de voir dans cette dégradation spécifique une*

---

(1) J.C. Klein (1967, p. 61) enregistre le même phénomène en 1965 sur le bassin de Binnde. Le 7 juin, pour une pluie moyenne de 38,4mm, le coefficient d'écoulement est de 19,7%. Le 15 juin, il n'est plus que de 18% pour une averse de 64,4mm. L'auteur invoque le caractère quasi imperméable de la pellicule superficielle du sol sous les premières averses.

(2) Les temps moyens de montée (1h25) et de base (≃ 8h) sont davantage comparables à ceux observés sur le bassin voisin de Kognere (1h20 et 9h15).

moyenne approximative des décapages pelliculaires sous savane et sous culture, tels qu'ils ont été évalués à l'échelle de la parcelle, une telle interprétation serait erronée. Il faut d'ores et déjà avoir présent à l'esprit l'importance des ravinements dans les bas-fonds et cette contribution ne sera appréciée qu'au paragraphe suivant (§ 7.1.3).

Enfin, on ne peut manquer de souligner l'importance des transports lors de la crue du 19 juin (40% du total) ou pour l'ensemble des mois de mai et juin (près de 70% du total). A titre d'exemple, lors de la première crue du 14 mai, les charges unitaires (36 échantillons) ne s'abaissent pas au-dessous de 1,14 et peuvent atteindre 3,47 g/l.

c- *La campagne 1984* :

Dix (10) crues sont enregistrées en S1 en 1984. Les écoulements sont plus nombreux (16) sur le petit bassin-amont mais il est vrai que, pour moitié, il s'agit de traces (Tableau 7.12). Cette médiocrité de l'hydraulicité est à rattacher bien sûr à une pluviométrie catastrophique, inférieure à 500mm, qui nous situe dans *un contexte sahélien* ! L'extrême indigence des pluies efficaces, supérieures à 20 mm, a immanquablement des conséquences hydrologiques. Les lames d'eau écoulées tombent à 8,4mm sur le bassin BV1 (déficit d'écoulement: 463,7mm) et 29,2 mm sur BV2 (déficit d'écoulement : 431 mm). Les modules annuels et spécifiques sont les suivants :

	Module annuel (m^3/s)	Module spécifique ($l/s/km^2$)
BV1	0,003	0,27
BV2	0,005	0,92

Ces modules se rapprochent très étroitement de ceux obtenus à même latitude sur les bassins de Bazoulé et de Zagtouli lors de l'année 1963 déficitaire (Tableau 7.2).

Les coefficients d'écoulement par rapport aux précipitations totales sont respectivement de 1,8% et 6,2% (Tableau 7.12). Le ruissellement est plus efficace sur le bassin amont, notamment en

BV2	Pluie moyenne - Thiessen (mm)	Volume écoulé (m^3)	Lame écoulée (mm)	Coefficient d'écoulement (%)
24.05.84	16,8	4 100	0,8	4,6
27.05.84	23,4	19 400	3,7	15,6
31.05.84	35,7	32 400	6,1	17,1
02.06.84	12,5	13 600	2,6	20,5
13.06.84	14,0	N		
14.06.84	5,5	N		
23.06.84	13,1	N		
18.07.84	38,4	24 200	4,6	11,9
23.07.84	11,9	N		
27.08.84	11,6	N		
31.08.84	26,4	9 790	1,8	7,0
05.09.84	22,6	25 920	4,9	21,6
14.09.84	17,5	N		
17.09.84	11,1	N		
28.09.84	12,2	N		
30.09.84	26,8	24 900	4,7	17,5
Total : Pluies ruisselantes : 202,6 mm Pluies du 1/5 : 460,2 mm au 31.10.84		154 310m^3	29,2 mm	14,4% par rapport aux pluies ruisselantes 6,2% par rapport aux pluies totales

BV1	Pluie moyenne-Thiessen (mm)	Volume écoulé (m^3)	Lame écoulée (mm)	Coefficient d'écoulement (%)	Transport en suspension (kg)
27.05.84	23,8	6 650	0,6	2,3	1 610
31.05.84	34,5	1 730	0,1	0,4	N
02.06.84	12,6	4 860	0,4	3,2	910
18.07.84	42,8	38 450	3,2	7,5	40 460
23.07.84	16,1	8 350	0,7	4,3	1 840
11.08.84	25,3	2 700	0,2	0,9	N
27.08.84	18,5	4 800	0,4	2,2	N
31.08.84	28,7	11 520	1,0	3,3	15 160
05.09.84	23,3	1 510	0,1	0,5	N
30.09.84	31,5	20 550 *	1,7	5,4	25 000*
Total : Pluies ruisselantes : 257,1mm		101 120m^3	8,4mm	3,3% par rapport aux pluies ruisselantes	84 980 = 85 T
Pluies du 1.5 au 31.10.84 : 472,1mm				1,8% par rapport aux pluies totales	

N : écoulement ou transport négligeable
* : pas de limnigramme (valeur HER pour Ql ; valeur estimée pour Qs).

Tableau 7.12 : Caractéristiques de l'écoulement aux exutoires (S1 et S2) des deux bassins versants (BV1 et BV 2) d'Imiga (Burkina Faso) en 1984.

mai et juin, où les volumes écoulés sont largement supérieurs à ceux enregistrés aux mêmes dates en S1 (27 mai, 31 mai, 2 juin). Une fois encore, les pertes par soutirage dans le mit mineur sableux, le remplissage des mares expliquent pour l'essentiel *cette diminution des débits vers l'aval*. Il faut attendre le 17 juillet pour que cette tendance s'inverse et encore, l'écoulement reste-t-il toujours, de manière relative (sinon absolue, le 5 et le 30 septembre), supérieur en BV2.

Deux explications sont proposées :

- d'une part, la couverture végétale, déjà dégradée par une séries d'années peu pluvieuses, ne bénéficie pas d'un redémarrage en ce début d'hivernage. Bien au contraire, les mois de mai, juin et juillet très déficitaires (Tableau 7.8) gênent la croissance du tapis herbacé et les coefficients de ruissellement dépassent 15 ou 20% sous des pluies moyennes peu à très peu élevées (12,5mm le 2 juin). Ce maximum de 20,5% le 2 juin s'explique aussi par un indice d'humectation (23,5) le plus élevé de l'année ;

- d'autre part, les sols plus rétenteurs du sous-bassin occidental absorbent facilement ces pluies moyennes et éloignées dans le temps.

Pour ces raisons conjuguées, le maximum unitaire enregistré sur BV1 n'est que de 7,5% le 18 juillet. Il faut attendre cette date pour voir se remplir la retenue (44 000m^3) du barrage d'Imiga, qui conditionne la production maraîchère et rizicole dans le bas-fond amélioré. A partir de là, les apports suivants vont juste suffire à combattre l'évapotranspiration et l'infiltration (abaissement du lac d'1cm par jour) et à fournir une petite irrigation d'appoint (10 à 20 000m^3). A ce rythme, compte tenu aussi de l'alimentation en eau du bétail, la retenue est probablement à sec dès la fin novembre ou au début décembre.

L'érosion à l'exutoire principal est plus de 10 fois plus faible (85 tonnes) qu'en 1983 mais il est certain que des dépôts se sont produits entre les deux stations de jaugeages.

d- La campagne 1985 :

Quinze (15) écoulements environ sont enregistrés sur chacun des deux bassins durant cette saison 1985 (Tableau 7.13). Leurs dates d'occurrence sont identiques, hormis pour les quatre journées du 6 juin, 6 juillet, 27 juillet et 22 août sur lesquelles nous reviendrons.

L'hydraulicité des deux unités apparaît d'emblée bien différente de celle de 1984. Il faut se souvenir pourtant qu'il s'agit d'une année très peu pluvieuse, dont le total annuel à Zorgho est même inférieur à celui de 1984 (Tableau 7.8) ! La comparaison des précipitations annuelles de Zorgho et d'Imiga ainsi que la lecture de la pluviométrie de mai à Zorgho (9,7mm en 3 jours) permettent de pallier l'absence d'observations en ce début d'hivernage et d'estimer que le mois de mai a été aussi très déficitaire sur notre domaine d'étude. Le mois de juin est également très peu arrosé avec 53,8mm (64,1mm à Zorgho).

Pourtant, on l'a vu, les trois mois suivants, en dépassant 100 ou même 200mm, apportent un contraste important avec 1984. Près d'un tiers des averses (31,2%) dépassent 20mm ce qui est supérieur à la moyenne de Zorgho (27,1%) et aussi au pourcentage de 1983 à Imiga. Plus qu'en toute autre année, le premier tiers de l'hivernage catastrophique et le coeur de la mousson, bien arrosé, s'opposent totalement.

Les modules annuels et spécifiques présentés ci-dessous confirment le constat déjà formulé à propos de la campagne 1983.

	Module annuel (m^3/s)	Module spécifique ($l/s/km^2$)
BV1	0,022	1,88
BV2	0,021	3,97

Malgré une pluviométrie déficitaire, l'écoulement *peut* rester comparable à celui observé durant les années antérieures plus humides. Cette affirmation doit être cependant nuancée, grâce aux

BV2	Pluie moyenne - Thiessen (mm)	Volume écoulé (m^3)	Lame écoulée (mm)	Coefficient d'écoulement (%)
17.06.85	28,9	?		
06.07.85	19,8	37 440	7,1	35,7
10.07.85	22,6	30 820	5,8	25,7
11.07.85	51,7	49 300*	9,3	18,0
20.07.85	29,5	30 930	5,8	19,8
26.07.85	14,5	10 350	2,0	13,5
29.07.85	41,7	48 530	9,2	22,0
02.08.85	53,5	86 400	16,3	30,5
04.08.85	44,3	107 460	20,3	45,8
13.08.85	48,5	149 580	28,2	58,2
17.08.85	18,0	50 830	9,6	53,3
22.08.85	14,5	12 770	2,4	16,6
26 08 85	29.4	?		
29.08.85	14,5	16 200	3,1	21,1
01.09.85	11,3	*		
03.09.85	15,7	33 480	6,3	40,1
12.09.85	26,4	?		
16.09.85	15,2	?		
Total : Pluies ruisselantes : 388,8mm Pluies du 1.6 au 30.9.85 : 576,5mm		664 090m^3	125,4mm	32,3% par rapport aux pluies ruisselantes 21,8% par rapport aux pluies totales

* Valeur incertaine ou inconnue (limnigramme peu lisible)

? Pas de limnigramme.

BV 1	Pluie moyenne-Thiessen (mm)	Volume écoulé (m^3)	Lame écoulée (mm)	Coefficient d'écoulement (%)	Transport en suspension (kg)
06.06.85	9,4	N			
17.06.85	30,8	?			
10.07.85	23,9	14 540	1,2	5,0	12 100
11.07.85	49,1	123 120	10,2	20,8	165 450
20.07.85	32,5	56 450	4,7	14,4	77 250
27.07.85	17,7	30 530	2,5	14,3	29 850
29.07.85	33,3	62 460	5,2	15,6	78 000
02.08.85	57,2	144 000	11,9	20,9	200 300
04.08.85	30,9	88 560	7,4	23,8	110 200
13.08.85	49,2	136 440	11,3	23,0	187 900
17.08.85	16,3	15 600	1,3	7,9	6 000
26.08.85	26,8	9 360	0,8	2,9	N
29.08.85	10,6	N			
01.09.85	11,6	5 200	0,4	3,7	N
03.09.85	16,6	10 080	0,8	5,0	N
12.09.85	26,9	17 700	1,5	5,5	4 800
16.09.85	18,5	?			
Total : Pluies ruisselantes : 412,0mm Pluies du 1.6 au 30.9.85 : 559,2mm		714 040m^3	59,2mm	14,4% par rapport aux pluies ruisselantes 10,6% par rapport aux pluies totales	871 850 kg ≈ 872 t.

N : écoulement ou transport négligeable

? : pas de limnigramme

Tableau 7.13 : Caractéristiques de l'écoulement aux exutoires (S1 et S2) des deux bassins versants (BV1 et BV2) d'Imiga (Burkina Faso) en 1985.

enseignements de la campagne 1984. En effet, pour des pluviométries tout autant déficitaires à l'échelle de l'année, il semble bien exister des seuils d'agressivité (pluies supérieures à 20mm) et de fréquence des précipitations qui, dépassés ou non, vont entraîner des réponses hydrologiques sensiblement différentes.

Comme en 1984, en revanche, le ruissellement est une nouvelle fois plus efficace sur le sous-bassin BV2, où la lame d'eau écoulée atteint au moins 125,4mm, ce qui représente le maximum sur quatre ans (déficit d'écoulement : 451,1mm). Cette lame est de plus de 59,2mm en S1 mais reste probablement en deçà de la valeur enregistrée en 1983. Le déficit d'écoulement est de l'ordre de 500mm.

Les coefficients d'écoulements annuels par rapport aux précipitations totales sont supérieurs à 10,6% sur BV1 et 21,8% sur le bassin amont (Tableau 7.12).

Les coefficients d'écoulements unitaires sont particulièrement imposants, dépassant même 50% sur BV2 à deux reprises (maximum : 58,2% le 13 août) et 20% sur BV1 (maximum : 23,8% le 4 août).

La variabilité des précipitations dans l'espace joue une fois encore son rôle explicatif à l'échelle de la journée :

- le 6 juin et le 22 août, *le seuil de déclenchement du ruissellement est atteint sur l'un des sous-bassins seulement.* Le 6 juin, la pluie moyenne de 5,3mm (Tab. A.7.15) ne génère pas d'écoulement concentré en S2 tandis que le reste du bassin reçoit une pluie moyenne de *12,7mm* qui est suffisante pour donner quelques *traces* en S1. Le 22 août, le même phénomène se reproduit à "l'avantage" de BV2 : 14,5mm de pluie moyenne suffisent à entraîner plus de 12 000 m^3 (Ke = 2,4%). *La pluie d'imbibition est probablement voisine de 10 mm sur ce bassin amont.* En revanche, le sous-bassin occidental, qui reçoit moins de 8mm, ne ruisselle pas ;

- le 4 août, l'écart se fait encore en faveur de BV2 mais il est d'une tout autre ampleur. La pluie moyenne sur l'unité amont est de 44,3mm (Tab. A.7.17) contre 20,3mm seulement sur l'unité

occidentale. Entre deux postes distants de 4 kilomètres (Pf et Pp), la différence est de 40,5mm (Fig. 7.6) ! Le volume ruisselé en S2est supérieur à celui enregistré à l'exutoire principal, ce qui signifie que *des pertes continuent d'affecter l'écoulement entre les deux stations jusqu'en ce mois d'août* (et même encore le 3 septembre). Ces pertes peuvent être estimées : elles sont supérieures le 4 août à 18 900m^3 (compte-tenu de l'existence d'un écoulement, fût-il limité, provenant du bassin résiduaire), soit *17,6% au moins du volume sorti de BV2*.

Plus généralement, l'humidité préalable des sols, conjuguée à un effet protecteur très limité du couvert végétal naturel (en liaison avec un début d'hivernage extrêmement défavorable) expliquent une nouvelle fois le regroupement des coefficients maximums en août, voire en septembre.

Ainsi, l'indice d'humectation est-il le plus élevé (22,9) avant l'averse du 4 août à laquelle fait suite le coefficient maximum sur BV1. Sur BV2, le lien entre ces indices d'humectation et les écoulements est moins évident. Peut-être faut-il faire valoir la prépondérance sur cette unité des sols peu évolués gravillonnaires, dont le comportement est, semble-t-il, plus constant dans le temps (Fig. A.7.3 - Site Pg2).

Il faut aussi se souvenir de la place importante des plaques de sols nus sur ce bassin amont. Leur contribution au gonflement d'un écoulement concentré dans les bas-fonds ne dépend pas à l'évidence du couvert mais des hauteurs de pluies ou de l'humidité du sol. En outre et surtout, comme nous le pressentions ci-dessus (p. 322), *ces unités participent mieux que toutes autres à une continuité du ruissellement du fait de leur situation géographique, en bas de versant le plus souvent, à proximité immédiate des bas-fonds* (§ 5.3.2.2., p. 204). Le ruissellement très efficace sur ces plaques de sols nus compacts "bascule" ainsi rapidement dans un écoulement concentré, mesuré en S2.

L'érosion évaluée en S1 (870 tonnes) est assez semblable à celle enregistrée lors de la campagne 1983, soit une dégradation spécifique annuelle de 72 tonnes par km^2. Près de 60% de ces

transferts sont assurés par les trois crues successives de la première quinzaine d'août. Si on utilise, malgré son caractère encore très incertain, la corrélation débits liquides - débits solides relative à la station S2, on constate que *l'érosion, à l'exutoire de BV2, est au moins aussi importante, sinon supérieure* (≃ 970 tonnes), *à celle mesurée à l'aval*. Cette constatation, déjà faite lors de la crue du 27 août 1982, est, pardelà le caractère encore approché des données chiffrées, somme toute logique. A la diminution fréquente des débits liquides vers l'aval est associée une diminution de la charge globale transportée.

La journée du *13 août 1985* est intéressante dans la mesure où c'est la seule durant laquelle *des prélèvements ont été faits simultanément sur les deux stations*. Les résultats sont les suivants :

	S1		S2
Jaugeages	n° 57	n° 58	n° 28
Horaires	14h50-15h50	15h50-16h15	16h20-16h45
Hauteur moyenne (cm) pendant le prélèvement	143	143	48
Hauteur maximale pendant la crue (cm)	149	149	180
Charge moyenne (g/l) (16 prises)	1,5	0,8	1,5
Maximum unitaire (g/l)	2,4	1,8	4,4

Tableau 7.14 : Comparaison des concentrations en S1 et S2 lors d'un même écoulement, le 13 août 1985.

Ces données, malheureusement encore trop fragmentaires, semblent bien indiquer, elles aussi, la prééminence des charges transportées au débouché du bassin-amont BV2, d'autant que les prélèvements sont faits à plein débit à l'aval et seulement en fin de décrue à l'amont. Peut-on conclure pour autant que l'érosion aréolaire

est plus importante sur l'ensemble de ce bassin BV2 ? C'est la question de la provenance des matériaux, de la discontinuité ou non de leur transport qui reste posée. Nous allons essayer d'y répondre à travers l'examen détaillé des phénomènes de dissection linéaire dans les bas-fonds. Ensuite seulement, nous regrouperons les principales conclusions, les enseignements les plus probants, relatifs à cette expérimentation d'Imiga.

7.1.3 : La dissection linéaire dans les bas-fonds :

Nos mesures relatives aux ravinements, l'examen des formes correspondantes ont été conduits sur deux sites principalement : à l'est de Pô (Photo 11 et 17, F 5-6) et à Imiga, à proximité de la station S2 (Photo 10). Ces deux études, conduites à des latitudes différentes, se révèlent aussi complémentaires par leurs enseignements, relatifs à la vitesse de recul des ravins dans le premier cas, au rapport entre érosion régressive et dégradation spécifique sur une même unité hydrologique, durant le même intervalle de temps, dans le second cas.

7.1.3.1 : Les ravins de Pô-Est, au sud du domaine soudanien :

a- L'érosion régressive : sa vitesse

L'accélération de la dégradation des bas-fonds dans les années soixante-dix, au sud du pays, a déjà été signalée précédemment (Mietton, 1980). Le recul accéléré de profonds ravins n'est d'ailleurs que l'aspect le plus spectaculaire d'une dilapidation de ce potentiel agronomique non négligeable, dont l'exploitation est à peine entamée. Une autre manière, plus insidieuse et comme telle peu reconnue, est l'envahissement latéral des sables. Ce dernier peut être généralisé au pied d'un versant et constituer une sorte d'auréole blanchâtre, alimentée par le ruissellement diffus des versants. Plus ponctuellement, l'accumulation des sables conduit à la progression de cônes, de dimension métrique à décamétrique, au débouché de rigoles (Photo 8) ou de ravineaux, dont on a vu qu'ils constituent les premières formes d'incision linéaires

rencontrées à l'aval des versants.

L'encaissement des ravins, plus profonds que les ravines et surtout plus difficilement franchissables avec leurs ramifications multiples, est très saisissant pour l'observateur, surtout par contraste avec un environnement apparemment stable, sur lequel le ruissellement diffus ou en nappe ne laisse que très peu de marques.

Que l'on chemine dans le fond de vallée ou sur les versants, c'est ainsi qu'on débouche avec surprise, à l'est de Pô par exemple, sur un de ces modelés de dissection.

Sur ce site, le recul du ravin a pu être daté de trois façons : par examen des photos aériennes, enquête orale et levés topométriques successifs.

- L'observation des vues aériennes nous apprend tout d'abord que ces ravins n'existaient pas en 1950 ou étaient à peine dessinés. Leur repérage est en effet facile lorsque l'entaille laisse affleurer un lit mineur sableux, donnant une plage blanche aisément identifiable (Photo 17).

- L'enquête orale auprès de la population kassena nous a également permis de retrouver une étape intermédiaire dans ce recul (1962 - Fig. 7.10).

Entre 1950 et 1979, en trente (30) années, cette dissection a progressé de près de 500m, soit un ordre de grandeur de 17 mètres par an. Cela peut constituer une valeur maximale, liée aux conditions spécifiques d'un bassin versant particulièrement cultivé autour de la ville de Pô (Photo 17) et comportant une proportion importante d'affleurements rocheux dans ses parties ouest et sud. Dans des secteurs beaucoup moins accessibles et moins défrichés (Songo), des vitesses de recul de neuf à dix mètres en trois ans, sur dix à quinze mètres de large, ont été relevées (enquête orale).

- Des levés topographiques et repérages détaillés, effectués entre juillet 1979 et novembre 1981, ont permis de préciser l'évolution de ces formes (Fig. 7.11). Ainsi, entre le 19 juillet et le 13 août 1979, après un certain nombre d'averses totalisant 105mm mais

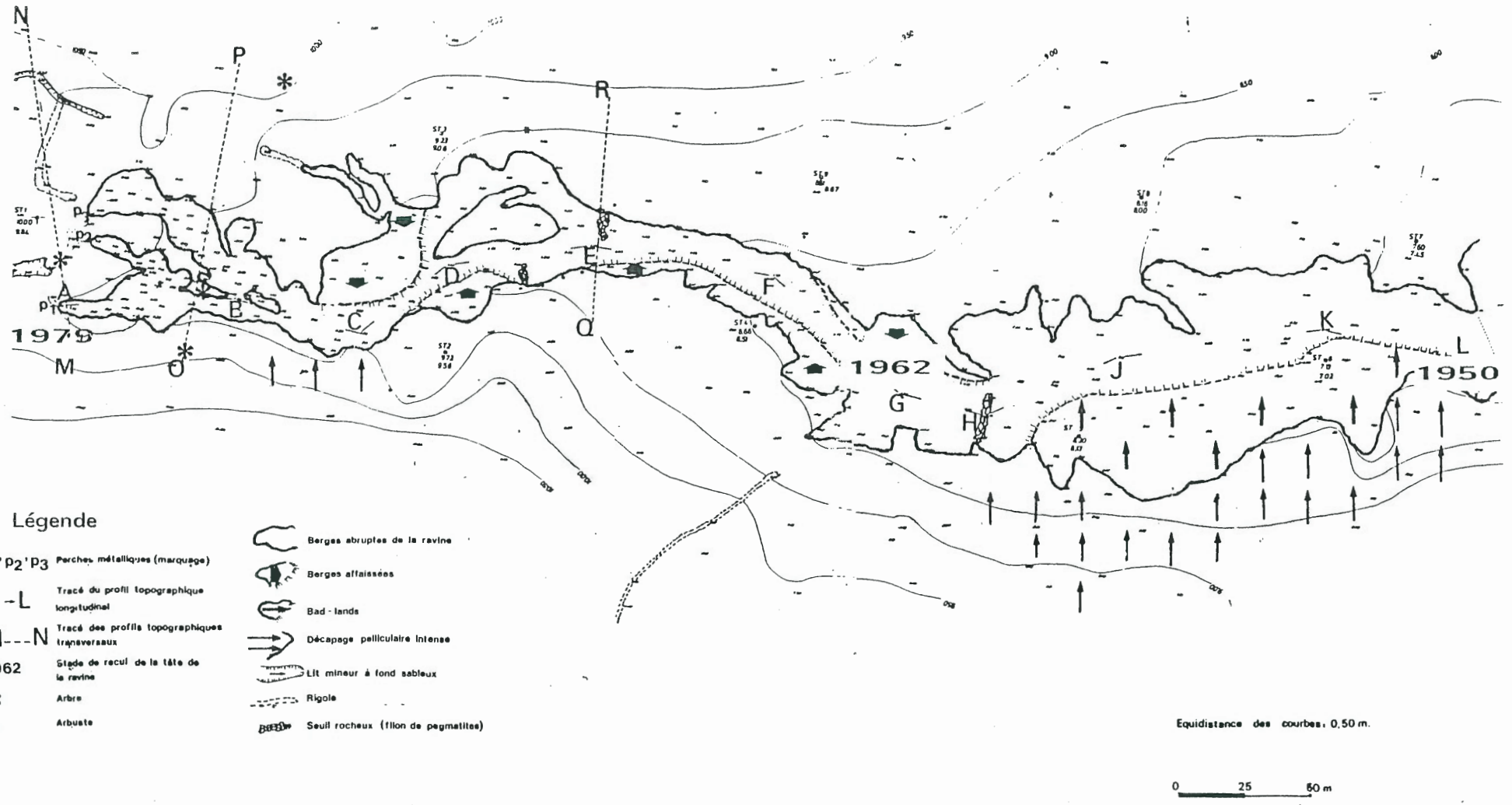


Fig. 7. 10: Les étapes de l'érosion régressive dans le ravin de Pô-Est.

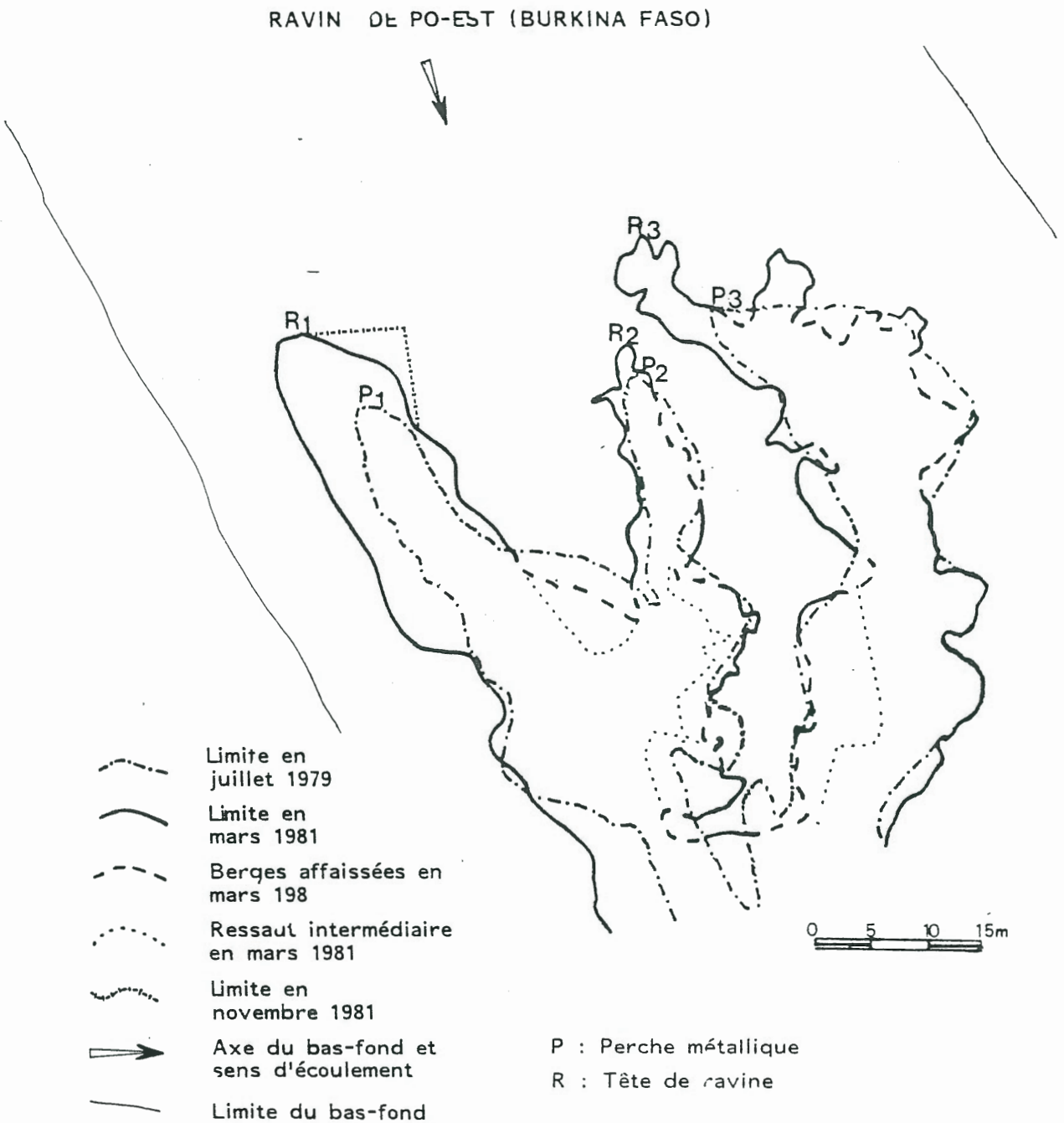
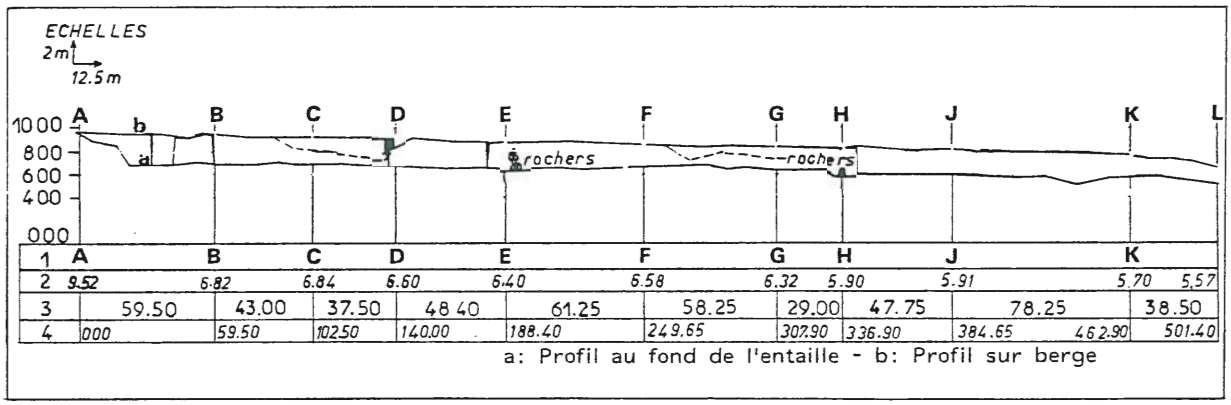
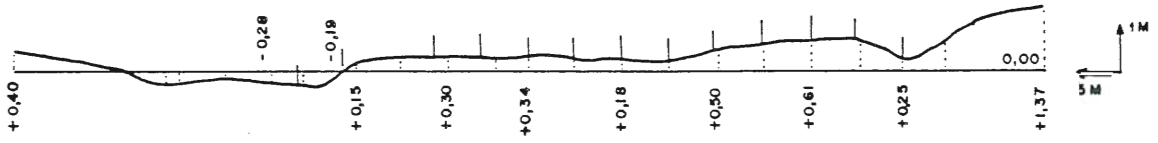


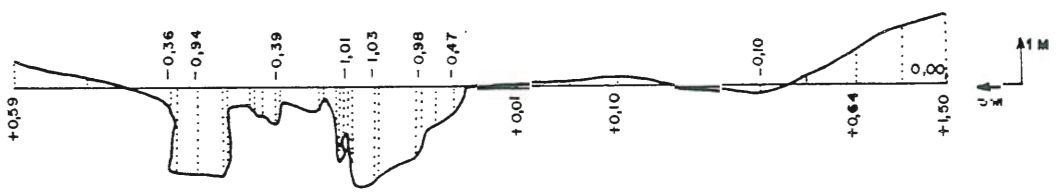
Fig 7.11 : Dissection linéaire et recul de ravin dans le bas-fond de Pô-Est (en aval de la piste Pô-Tiébélé).



1	A		B	C	D	E	F	G	H	J	K
2	9.52		6.82	6.84	6.60	6.40	6.58	6.32	5.90	5.91	5.70	5.57
3		59.50	43.00	37.50	48 40	61.25	58.25	29.00	47.75	78.25	38.50	
4	000		59.50	102.50	140.00	188.40	249.65	307.90	336.90	384.65	462.90	501.40

a: Profil au fond de l'entaille - b: Profil sur berge





LEVE : SOME J. Février 1979
MIETTON M.

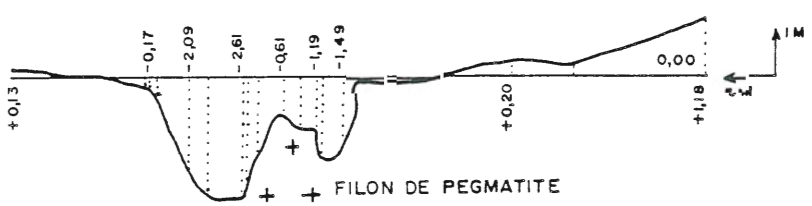


Fig. 7.12 : Profils en travers et en long du ravin de Pô-Est (11°11' N - 01°07' W)

réellement efficaces le 7 août (37,3mm) et le 11 août (23,5mm), le recul est de 1,75m par rapport à la perche P1, de 2,40m par rapport à P2, de 3,65m sur P3. Ceci tend à confirmer qu'une érosion régressive annuelle moyenne de plus de quinze mètres n'est pas impossible. L'expression de cette vitesse moyenne n'a cependant pas d'autre signification, répétons-le, que de fixer un ordre de grandeur. D' une part, en effet, toutes les années n'ont pas la même agressivité climatique et les écoulements, la même efficacité. D'autre part, en amont de l'étranglement (DF-Fig. 7.10) qui ferme ce "bas-fond alvéole", le ravin multiplie désormais ses têtes de recul (R1, R2 et R3). De juillet 1979 à novembre 1980, le recul sur P2 n'a plus été en tout cas que de 10,50m.

La superposition des deux levés de juillet 1979 et mars 1981 (Fig. 7.11) permet de connaître par planimétrie la surface de terrain enlevé durant près de deux saisons des pluies, soit 350m^2. Connaissant la hauteur moyenne (1,80m) du ravin grâce aux profils transversaux (Fig. 7.12), le volume exporté peut être estimé à 630m^3 et le tonnage à 1650 tonnes, soit environ *1000 tonnes par an*. Les mêmes opérations appliquées à la surface enlevée entre 1962 et 1979 ($\simeq$ 5000m^2) donnent une ablation voisine de *1300 tonnes par an*. Enfin, les départs sont de l'ordre de *800 tonnes par an* sur un second secteur de ravins, étudiés entre mars 1981 et février 1982, à deux kilomètres en amont.

b- L'érosion régressive : ses origines.

L'accélération de cette dynamique d'érosion, dans une région méridionale que l'on pourrait croire préservée, est d'origine anthropique. Certes, les pluies auraient pu évoluer ces dernières années dans le sens d'une plus grande agressivité mais cela ne semble pas le cas si l'on s'en tient à une rapide étude de la fréquence des grosses averses, supérieures à 40mm, et à leur évolution en pourcentage du total des précipitations (Tableau 7.15).

Période d'observation à Pô	Nombre d'averses supérieures à 40mm	Pourcentage par rapport au total des précipitations
1942 - 1959	84	27,5%
1960 - 1977(1)	58	19,1%

Tableau 7.15 : L'évolution du pourcentage des très fortes averses par rapport au total des précipitations, avant et après 1960, à Pô.

Seule la multiplication des défrichements sur les versants comme dans les forêts-galeries des bas-fonds permet de comprendre cette érosion exacerbée. Cette extension des surfaces cultivées est bien mise en évidence, dans toute la région de Pô, au sud de la forêt classée, par comparaison des photos aériennes de 1950 et 1979(2).

En 1950, l'auréole des champs de brousse est très discontinue ; les champs temporaires peu nombreux par rapport à l'espace disponible. Les forêts galeries des bas-fonds et leurs marges sont délaissées, non pas tant à cause de leur éloignement mais parce que le paysan redoute la puissance de la végétation, la faune éventuellement et aussi certaines maladies, telles l'onchocercose.

Aujourd'hui le souci de grossir les récoltes en vue de dégager des surplus monétaires et, à un moindre degré, pour nourrir une population plus nombreuse, la diffusion des charrettes, qui permettent d'aller chercher plus loin le bois et les récoltes, ont conduit à la multiplication des champs de brousse et à la mise à nu des bas-fonds (Photo 12).

Sur l'interfluve compris entre les premier et second bas-fonds à l'est de Pô (EF_4-HI_3), le pourcentage des champs temporaires, par rapport à la superficie totale, passe de 3,6% en 1950 à 15,2% en 1979. Au sud de la piste Pô-Tiébélé nettement visible sur ces clichés, la progression est encore plus étonnante puisque ce pourcentage, nul en 1950, s'élève à 33% trente ans plus tard.

---

(1) *Pas de donnée en 1976.*

(2) *Seul le montage stéréoscopique des clichés de 1979 a pu être présenté ici (Photo 17).*

Les forêts-galeries, notamment celle qui est située au sud-ouest de Banon (J_2), encore intacte dans le premier cas, ne subsiste plus qu'en lambeaux de nos jours.

Cette "consommation" de l'espace a des répercussions immédiates sur les modalités de l'écoulement dans les fonds de vallées. D'une part, le ruissellement diffus sur versant devient davantage un phénomène continu, faute d'obstacles, et les volumes écoulés sont, comme on l'a vu précédemment, au moins aussi abondants que lors des périodes humides antérieures. D'autre part, les vitesses d'écoulement sont plus élevées car la rugosité diminue après abattage des arbres et surtout après l'enlèvement des hautes graminées lors de la préparation des champs (Photo 12). On devine le caractère vulnérable de ces sols lorsqu'on sait que les débits instantanés maximums peuvent, à l'aval de ces bassins d'une dizaine de km², dépasser 10 000 l/s/km² et que les vitesses de recul relevées précédemment, déjà impressionnantes, ne correspondent en rien à des phénomènes climatiques ou hydrologiques extrêmes.

Durant l'année 1979, les pluies maximales sur 1 ou 2 jours sont de 50,9 mm (f = 0,195) et en 1980 de 56,5 (f = 0,293) et 85 mm (0,683). En trente jours, ce sont respectivement 254,3mm et 316,6 mm (f = 0,171 et f = 0,537). Dans tous les cas, il s'agit de précipitations très communes, de grande fréquence (au dépassement). Le facteur anthropique est bien le paramètre essentiel qui conditionne l'évolution du modelé ; le climat joue certes un rôle mais indirect, en contribuant par une sécheresse prolongée à l'amaigrissement du tapis végétal.

Cette explication valable à Imiga comme à Pô ne nous dispense pas de rechercher d'autres facteurs, permettant de comprendre non plus seulement l'occurrence des ravinements mais leur localisation. La taille, petite à moyenne (17,4 km² à Pô) de ces unités situées en amont, sur des lignes majeures et relativement marquées de partage des eaux, couplée à une assez bonne compacité (1,19 à Pô), semblent constituer des éléments favorables à une concentration efficace des crues.

A Pô, l'amorce de la dissection se fait aussi, semble-t-il, au niveau d'étranglements qui ferment des "bas-fonds couloirs" comparables à des alvéoles. On reconnaît là d'ailleurs des structures transversales sous la forme de filons de pegmatites qui affleurent dans l'entaille (Fig. 7.10 et 7.12). Dans ces rétrécissements, l'écoulement s'accélère ; la puissance nette libérée permet le creusement. Une fois le processus enclenché, il se développe alors à grande vitesse, de manière régressive, même sur des pentes longitudinales faibles.

Un rôle non négligeable vis-à-vis de l'élargissement des ravins les plus profonds est joué par le bétail. Les bordures de l'entaille sont en effet des passages obligés pour les troupeaux qui longent et piétinent les berges avant de pouvoir rejoindre des mares plus ou moins permanentes. Ces parcours sont d'autant plus utilisés, dans une région comme celle de Pô, que les éleveurs peuls sont rejetés à la périphérie des terroirs centrés, on s'en souvient, sur les têtes d'interfluves. A Imiga, en revanche, ce sont les hauts de versants qui sont réservés aux éleveurs. Mais lorsque ces derniers doivent rejoindre les points d'eau ou le barrage, ils longent bien souvent les bas-fonds principaux, à l'écart des champs durant l'hivernage ou à la recherche d'un supplément de nourriture pour le bétail en saison sèche. Dans tous les cas, ce piétinement ajoute ses effets à ceux d'un ruissellement latéral accéléré, pour décaper ces plaques de bas de versant (Fig. 7.10).

Hormis la nature sablo-limoneuse des alluvions (Tab. A. 5.2. et 5.3) qui limite les fentes de retrait[1] et les déchirures, tout un ensemble de facteurs concoure donc à aggraver l'érosion une fois qu'elle est apparue. En outre, les *rétroactions entre les deux morphodynamiques de versants et de bas-fonds sont évidentes.*

---

(1) Les échantillons BFR 11 et BFR 12 présentent une plasticité modérée avec des indices égaux à 16,5 et 13,5.

7.1.3.2 : Le ravin d'Imiga, au centre du domaine soudanien.

Les formes de dissection qui viennent d'être décrites sont également présentes sur le bassin versant d'Imiga, principalement dans sa moitié orientale. De nombreux ravineaux sont aussi repérables en contrebas de plaques de sols nus, en tête des talwegs (carte 2). Mais l'entaille la plus spectaculaire se situe au niveau de la station de jaugeages S2, à l'exutoire du plus petit bassin.

Nous avons effectué sur ce site, comme à Pô, des levés permettant de suivre le recul du ravin (Fig. 7.13). Ce travail, réalisé malheureusement à deux reprises seulement (29 mars 1982 et 29 juillet 1983) conduit une nouvelle fois à une évaluation des pertes de sol. Les surfaces touchées par un affaissement (estimé à 50cm en moyenne) ou marquées par un recul net des berges sur une hauteur de 1,50m (Fig. 7.13) sont respectivement égales, en amont de la parcelle P2, à 267m^2 et 357m^2. Le volume global exporté est de 670m^3 ; *les pertes en terre sont de 1740 tonnes pendant une saison et demie des pluies*. Cet ordre de grandeur est remarquablement identique à ceux obtenus dans la région de Pô.

L'intérêt désormais est que cette ablation peut être mise en relation avec les transports solides en suspension à l'exutoire du bassin principal (S1). En 1983, cette charge est évaluée, avant le 23 juillet, à 698 700 kg (Tableau 7.11). En 1982, les mesures ne sont pas possibles avant le 27 août (p. 300), date à laquelle on enregistre une perte de 43 tonnes, mais par chance, il existe très peu de crues efficaces entre le 29 mars et le 27 août 1982 (Tableau 7.10). Au total, la charge transportée en suspension au niveau de S1, entre mars 1982 et juillet 1983, est voisine de *800 tonnes*.

Plusieurs constats doivent être dès lors soulignés :

* à l'échelle annuelle, l'ablation par ravinement, en un seul site du bassin d'Imiga, apparaît supérieure à la charge transportée en suspension à son exutoire. Cette dernière étant également alimentée par le bassin résiduaire, la part des matériaux arrachés au ravin et at-

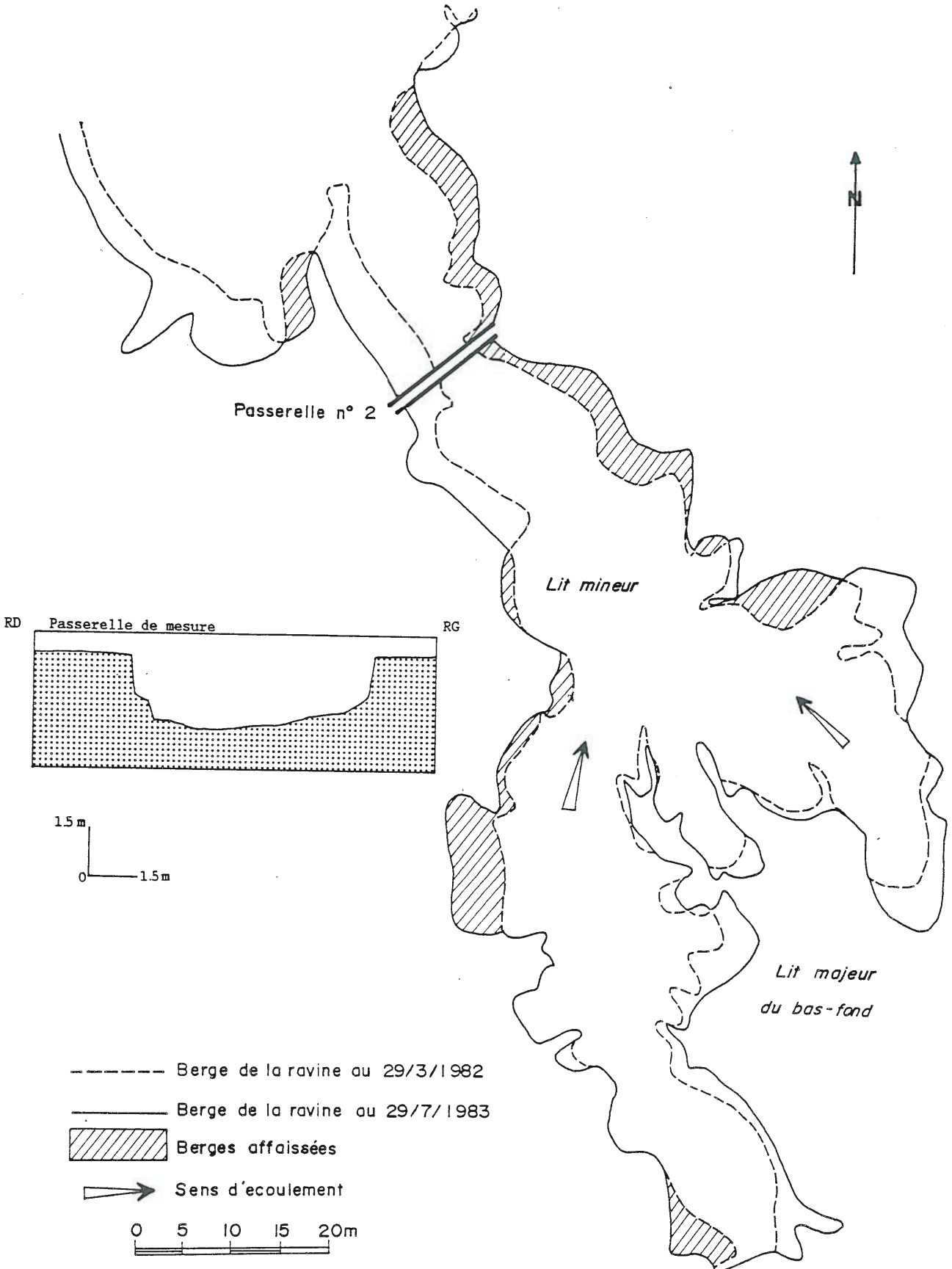


Fig. 7.13 : Dissection linéaire et recul de ravin : l'exemple du bas-fond d'Imiga à la hauteur de la station de jaugeages n° 2.

teignant S1 apparaît, a priori, d'autant plus réduite.

* les deux formes de mesures (suspension, ravinement) ne sont cependant pas totalement comparables. Les pertes en terre dans les ravins sont en effet mobilisées en suspension mais aussi par charriage. D'une manière théorique, on pourrait donc objecter que l'écart relevé ci-dessus correspond en totalité ou partiellement à des transports de fond, non évalués, en S1.

* la comparaison des charges en suspension, mesurées en S1 et estimées en S2, parle elle aussi cependant en faveur d'une diminution des débits solides d'amont en aval. Des dépôts s'effectuent bel et bien, notamment lors des débordements dans le lit majeur.

* la question reste posée quoi qu'il en soit de l'importance des transports de fond. Deux expériences de portée limitée ont été réalisées mais il était hors de question, faute de temps et de moyens, d'envisager une étude approfondie de ce problème très délicat.

- Une coloration de gravillons, effectuée le 25 juin 1983, à 70m en amont de la station S2, dans l'entaille, a permis d'enregistrer quelques vitesses de déplacement regroupées en annexes (Tab. A.7.19).

La récolte de 39 échantillons a été faite après un délai d'un mois mais avec une seule averse dans l'intervalle (21,6mm) et un volume écoulé peu élevé (2550m^3). L'un des gravillons les plus lourds (23,6g) a avancé de plus de 85 mètres. Le charriage semble donc non négligeable mais il est vrai que l'on se place là dans les conditions les plus favorables avec une vitesse élevée à proximité des talus limitant le ravin et surtout sur un lit encore peu encombré de matériaux meubles.

- Un piégeage partiel de ces matériaux a également été réalisé en juin 1984 grâce à un grillage(1) de 10cm de hauteur, tendu en travers du lit sur des piquets métalliques ancrés dans un socle de béton. En fait, le système a été obturé à la suite des deux seules petites averses du 13 et 14 juin. En avant de l'obstacle, deux dépôts

---

(1) *Maillage carré de 6mm de côté.*

nettement différents ont été repérés : des limons à la base, probablement freinés et arrêtés tout au début de l'écoulement, puis une couche beaucoup plus épaisse (8 à 10cm) de sables, principalement grossiers (32,6%), et de gravillons (refus : 23,3%).

Une fois de plus, on ne peut que constater la mobilité de ces particules grossières, mobilité qui caractérise encore le lit mineur sableux à l'aval du bassin, sur la section de la station S1, et que l'on mettra mieux en évidence à l'échelle d'un lit de grande rivière (§ 7.2).

A Imiga, ces transports de fond ne peuvent donc être négligés : continus dans le temps et assez rapides, semble-t-il, à l'amont, ils sont probablement freinés et davantage discontinus vers l'aval du fait de la diminution de la pente longitudinale et de l'encombrement du lit mineur.

* s'il est difficile de déterminer toutes les modalités du transfert des matériaux arrachés par ravinement, il semble bien en tout cas que ces départs fournissent l'essentiel de la charge en suspension. Des prélèvements d'eaux effectués simultanément sous la passerelle P2 et à l'amont du ravin(1) montrent en effet des écarts sensibles de concentration. Le 21 septembre 1983, après une très grosse averse (Pluie moyenne sur BV2 : 62,2mm ; Ke : 12,6%), les charges varient entre 0,59 et 0,77 g/l au niveau de S2 (H = 1m ; $Q\ell \simeq 5$ m^3/s), tandis qu'au même moment, en amont, elles ne sont que de 0,13 à 0,38 g/l. Les pertes en terre provenant du bassin BV2 proprement dit paraissent donc très limitées malgré l'importance de l'orage. A cette date du 22 septembre, la végétation piège probablement l'essentiel des particules même si l'écoulement reste efficace(2). L'enrichissement de la charge se fait en revanche très vite, sur moins de 100 mètres (Fig. 7.13), dans le ravin dépourvu de couvert végétal.

---

(1) *L'eau est collectée au débouché du bas-fond, à l'amorce de la chute le long du talus.*

(2) *Le 9 et le 10 septembre, on retrouve pareillement de faibles concentrations moyennes (0,22 et 0,17 g/ℓ) à l'entrée dans l'entaille.*

7.1.3.3 : Le ravin de Sabouna, au nord du domaine soudanien.

Une cartographie des ravins dans la région de Sabouna, au nord de Ouahigouya (domaine sub-sahélien), a été dressée par les chercheurs de l'I.P.D. (Billaz *et al.*, 1982a). Elle illustre une fois encore, y compris à des latitudes élevées, l'importance du phénomène de dissection entre 1973 et 1981.

Le suivi du grand ravin, situé entre les chaînons birrimiens et le village de Sabouna, a permis notamment de chiffrer la vitesse de l'érosion. L'entaille a progressé en une seule saison de 34m, sur une largeur de 2,5 à 3m et une profondeur de 0,4 à 0,6m. A partir des profils topographiques réalisés sur 234m de longueur, L. Somé (p. 52) estime le volume de terre arrachée à 142m^3, soit environ 0,6m^3 par mètre linéaire.

L'importance de ce ravin, qui se développe sur plusieurs kilomètres, est à mettre en relation ici aussi avec une exploitation intensive des terroirs, notamment dans la dépression birrimienne qui offre des sols profonds. Comme à Pô, des conditions morphologiques plus spécifiques peuvent être invoquées : l'existence d'impluviums rocheux, imperméables, à forte pente dans les collines birrimiennes ; la présence de la dépression périphérique elle-même qui favorise également la concentration des eaux. En effet, le front du glacis ferrugineux, qui ferme la dépression, barre aussi le chemin des eaux de ruissellement qui se concentrent parallèlement au talus et à son pied. Sur le site voisin de Barga, à quelques kilomètres au nord de Sabouna, les mesures hydrologiques faites, sur un ravin identique, par le service de l'Hydrologie de l'H.E.R.(1) montrent que les coefficients d'écoulement peuvent être élevés à l'aval d'un petit bassin (2,1 km^2), y compris sous de faibles averses (20,7% le 5 juillet 1984, sous une pluie de 18,3mm) ; les coefficients mensuels moyens étant de 15% en juillet (P = 56,4mm) et de 7% en août (P = 65,9mm).

---

(1) Ces mesures sont faites à la demande d'une organisation non gouvernementale : Projet Agro-Ecologie (PAE).

Conclusion :

Les quatre campagnes de mesures de l'écoulement sur les deux petits bassins versants d'Imiga ainsi que l'examen de la dynamique de ravinement sur ce même site et à Pô apportent des enseignements nouveaux et des confirmations par rapport à un ensemble de connaissances déjà bien fourni grâce aux travaux des hydrologues de l'ORSTOM.

A Imiga, l'ensemble de l'expérimentation s'est déroulé dans un contexte de "sahélisation", déjà relevée au niveau du paysage dans un chapitre précédent et confirmée entre 1982 et 1985 par des pluviométries dont le caractère déficitaire est sans égal jusque là, à cette latitude.

Ce total pluviométrique ne constitue pas pour autant un facteur explicatif suffisant vis-à-vis d'écoulements marqués par de grandes différences interannuelles. Le coefficient d'écoulement moyen varie en effet entre 1,8% et 11,1% à l'échelle du bassin de 12 km^2 ; entre 6,2 % et 21,8% sur l'unité emboîtée de 5 km^2. L'irrégularité interannuelle se traduit par des écarts importants mais signifie aussi une absence de tendance : l'année 1984 est de faible hydraulicité, encadrée par deux saisons beaucoup plus ruisselantes et semblables. La persistance de la sécheresse et son corollaire, la dégradation de la végétation, ne peuvent être perçues qu'à une échelle de temps plus longue : un début d'hivernage suffisamment pluvieux suffit par exemple à une croissance rapide du tapis végétal, notamment herbacé, le plus efficace à contrarier les écoulements.

A l'échelle de la saison, cette distribution préférentielle en début (1984) ou en fin d'hivernage (1985), la proximité surtout des averses dans le temps (août-septembre 1985) et, à travers elle, l'humectation plus ou moins marquée des sols représentent les paramètres les plus décisifs.

Les écarts relevés entre les coefficients moyens des deux bassins se retrouvent au niveau des extrêmes journaliers (33,4% sur la plus grande unité et 58,2%). Le ruissellement perd d'ailleurs,

très fréquemment, de son efficacité relative, sinon absolue, d'amont en aval. Différentes explications sont avancées :

- l'existence d'un lit mineur discontinu, à fond sableux, fonctionnant par remplissage de mares et débordement, provoque de multiples pertes par infiltration, soutirage et évaporation entre les deux stations de jaugeages ;

- l'efficacité, en revanche, du ruissellement d'amont est exacerbée en particulier par les plaques de sols nus qui, du fait de leur situation privilégiée en bas de versant, à proximité immédiate des talwegs, participent à un écoulement remarquablement continu dans l'espace et aussi dans le temps. Cet écart entre amont et aval peut être occasionnellement renforcé par une variabilité spatiale de l'averse, dont on a vérifié, ici aussi, qu'elle s'exerce à l'échelle kilométrique ;

- enfin, le bassin résiduaire (ou sous-bassin occidental) d'Imiga est caractérisé localement par des sols bruns, vertiques qui provoquent eux aussi, au moins en début de saison des pluies et plus durablement si les pluies sont espacées (1984), des déficits d'écoulement à l'exutoire principal.

Les taux de dégradation spécifique , mesurés à l'exutoire du bassin principal d'Imiga sont eux aussi très irréguliers et compris entre 7 et 85 tonnes/km^2/an. Ces valeurs n'intègrent pas les transports de fond dont on peut penser, d'après la mobilité des lits et le suivi de gravillons colorés, qu'ils sont loin d'être négligeables.

La tendance à l'alluvionnement, communément décrite sur ce type de réseau, est mise en évidence de manière quantifiée entre les deux stations de jaugeages. D'une part, il semble bien, malgré le caractère encore très incertain des courbes d'étalonnage, que les transports en suspension diminuent d'amont en aval. D'autre part et plus sûrement, l'ablation par ravinement en un seul site entraîne, à l'échelle annuelle, des pertes supérieures à la charge globale en suspension mesurée à l'exutoire principal.

Ces pertes sont en outre remarquablement semblables

sur chacun des sites, de l'ordre de 1000 tonnes/an. Le recul très impressionnant de ces ravins est évidemment lié à un cumul de facteurs parmi lesquels la pression anthropique s'associe à la sécheresse pour fragiliser le couvert végétal. Mais certains modelés (bas-fonds en alvéoles dépressions périphériques) favorisant la concentration des eaux et leur vitesse d'écoulement, sont probablement plus vulnérables.

7.2 : ECOULEMENT ET EROSION A L'ECHELLE DES GRANDS ET TRES GRANDS BASSINS VERSANTS.

7.2.1 : Les enseignements au niveau des barrages.

7.2.1.1 : Le remplissage en eau des barrages.

Les études réalisées par l'ORSTOM au début des années soixante ont porté également sur de grandes ou très grandes unités hydrologiques (supérieures à 100 et 1000 km^2). Certains des résultats obtenus à cette échelle ont d'ailleurs été présentés ci-dessus : c'est le cas du grand bassin de Niarba (572 km^2) dans la région de Manga (Tableau 7.1) et de celui de Niegha (1010 km^2) dans le secteur de Boulsa (Tableau 7.3).

Les données les plus nombreuses ont été obtenues toutefois par observation du remplissage des divers barrages situés à la périphérie de Ouagadougou (Fig. 7.14). L'essentiel de cette information est regroupé dans le tableau 7.16.

Nous pouvons retenir de ce tableau les enseignements suivants:

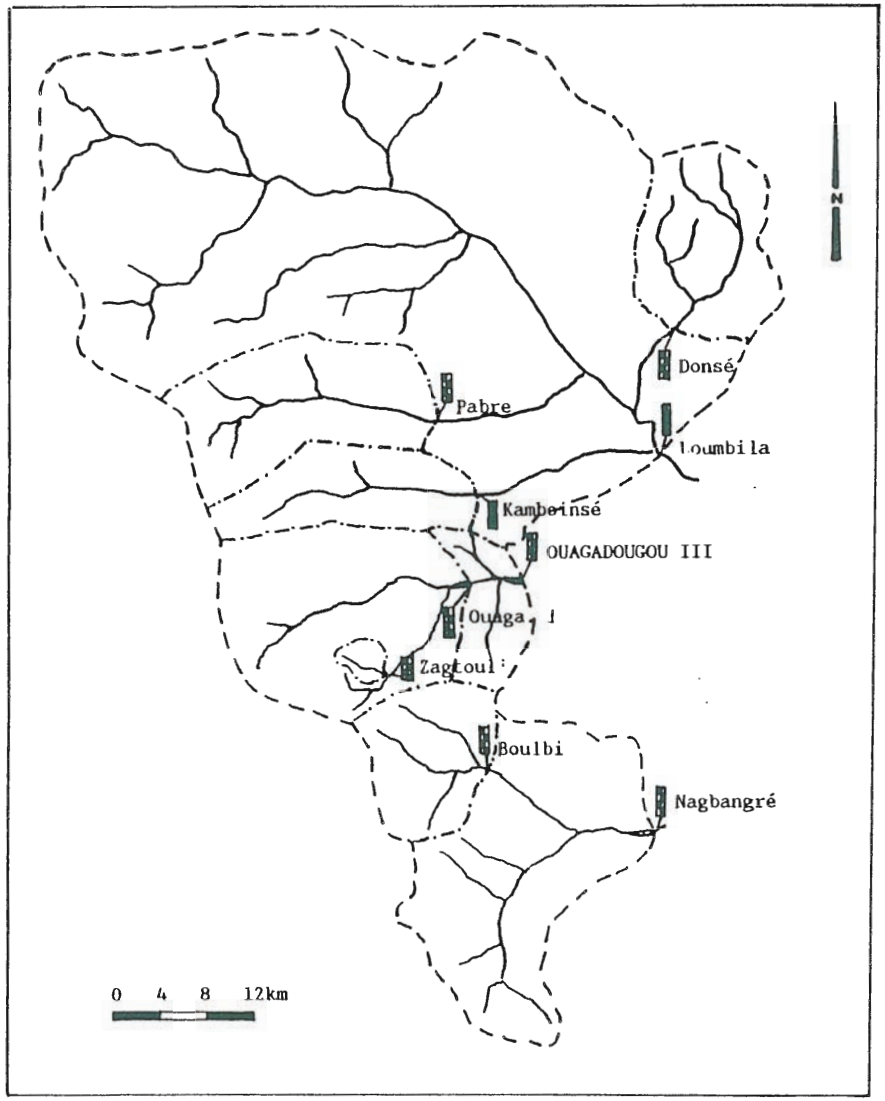
1. Les modules annuels augmentent évidemment avec la taille du bassin mais ils sont également marqués par une grande irrégularité interannuelle. Le rapport, qui est de près de 7 sur le bassin de Niegha (région de Boulsa - Tableau 7.3) entre les années 1960 et 1962, bien différentes par leur pluviosité annuelle (650 et 1150mm), passe à plus de 14 à Loumbila alors même que les totaux de précipitations sont pourtant très voisins (700 et 770mm). La retenue de Loumbila est, il faut le souligner, en aval des trois barrages de Kamboinsé, Pabré et Donsé,

qui eux-mêmes contrôlent des bassins adjacents ou voisins[1].

Bassin	Année	Pluie moyenne annuelle (mm)	Module annuel (m^3/s)	Module spécifique ($l/s/km^2$)	Coefficient d'écoulement (%)
Kamboinsé ($125km^2$)	1961	780	0,164	1,3	5,3
	1962	900	0,124	0,4	3,5
	1963	750	0,022	0,2	0,6
Boulbi ($125km^2$)	1961	830	0,220	1,8	6,6
	1962	1050	0,318	2,5	7,7
	1963	670	0,257	2,1	9,7
Donsé ($175km^2$)	1961	770	0,516	2,9	12,0
	1962	790	0,330	1,9	6,8
	1963	570	0,047	0,3	1,0
Pabré ($210km^2$)	1962	750	0,410	2,0	8,2
	1963	740	0,049	0,2	1,0
Ouagadougou I ($285km^2$)	1961	835	0,538	1,9	7,4
	1962	850	0,942	3,3	11,9
	1963	680	0,144	0,5	2,0
Ouagadougou III ($350 km^2$)	1961	810	0,575	1,6	6,4
	1962	950	1,067	3,0	10,1
Nagbangre ($470km^2$)	1961	820	0,907	1,9	7,4
	1962	1070	1,592	3,4	10,0
	1963	660	0,323	0,7	3,3
Loumbila ($2120km^2$)	1961	770	3,170	1,5	6,2
	1962	800	1,506	0,7	2,8
	1963	700	0,222	0,1	0,4

Tableau 7.16 : Comparaison des écoulements entre 8 grands et très grands bassins versants de la région de Ouagadougou (centre du Burkina Faso). d'après Pieyns et Klein (1964).

(1) *Le bassin versant de Boulbi est emboîté dans celui de Nagbangre (Fig. 7.14) ; celui de Ouagadougou I dans Ouagadougou III.*



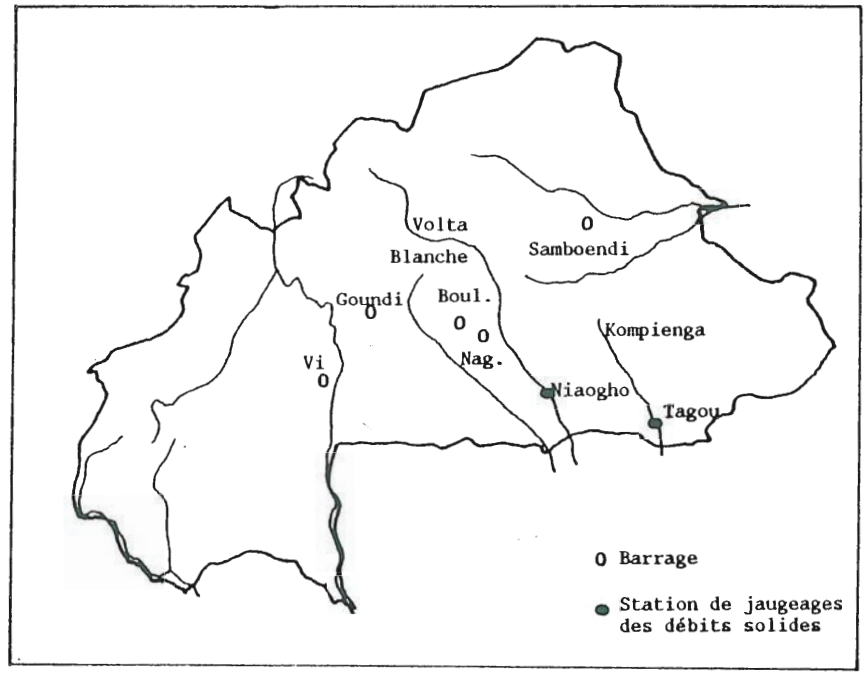


Fig. 7.14 : Localisation des sites d'études (barrages et stations de jaugeages) à travers le Burkina Faso et dans la région de Ouagadougou.

2. Les variations des modules spécifiques et des coefficients d'écoulement en fonction de la superficie des bassins et des précipitations totales sont encore plus difficiles à définir. Même pour une unité donnée, à cette échelle comme à l'échelle précédente des petits et moyens bassins versants, les pluies annuelles ne constituent pas un paramètre suffisant. Le bassin de Kamboinsé représente un bon exemple à cet égard lorsque l'on compare les années 1961 et 1963. Mais ce n'est pas le seul : les corrélations sont également mauvaises sur l'unité plus vaste de Pabré ou plus petite de Selogen (Tableau 7.2).

La répartition mensuelle des averses, leur regroupement dans le temps, leur distribution dans l'espace sont encore des facteurs beaucoup plus significatifs. S. Pieyns et J.C. Klein (1964, p. 59) montrent, à propos de Kamboinsé, comment la différence de comportement, entre 1961 et 1963, est due essentiellement à un mois de septembre 1961 très arrosé et principalement aux deux seules averses du 2 et 11 septembre centrées sur l'aval de l'unité.

3. L'observation sur les barrages peut déterminer en outre des contraintes spécifiques, effaçant pour l'essentiel l'intérêt d'une comparaison entre années, y compris sur une même retenue. C'est le cas à Boulbi, "où les lâchures de vannes sont très fréquentes et où les valeurs de 1961 obtenues en 1961 et 1962 sont certainement sous-estimées" (Pieyns *et al.*, p. 64).

4. Malgré ces difficultés, il est peut être utile de regrouper graphiquement (Fig. 7.15) ces résultats en les ordonnant par classes de précipitations annuelles. Cela met en évidence que, pour les deux bassins de même taille (Boulbi et Kamboinsé = 125 km^2), le premier a des coefficients d'écoulement systématiquement supérieurs, alors même que l'on vient de voir qu'ils sont sous-estimés en 1961 et 1962. La mise en culture intensive de la région de Boulbi, depuis une date ancienne comme on le verra, ne semble pas constituer une explication suffisante car Kamboinsé a la même situation géographique à proximité immédiate de la capitale.

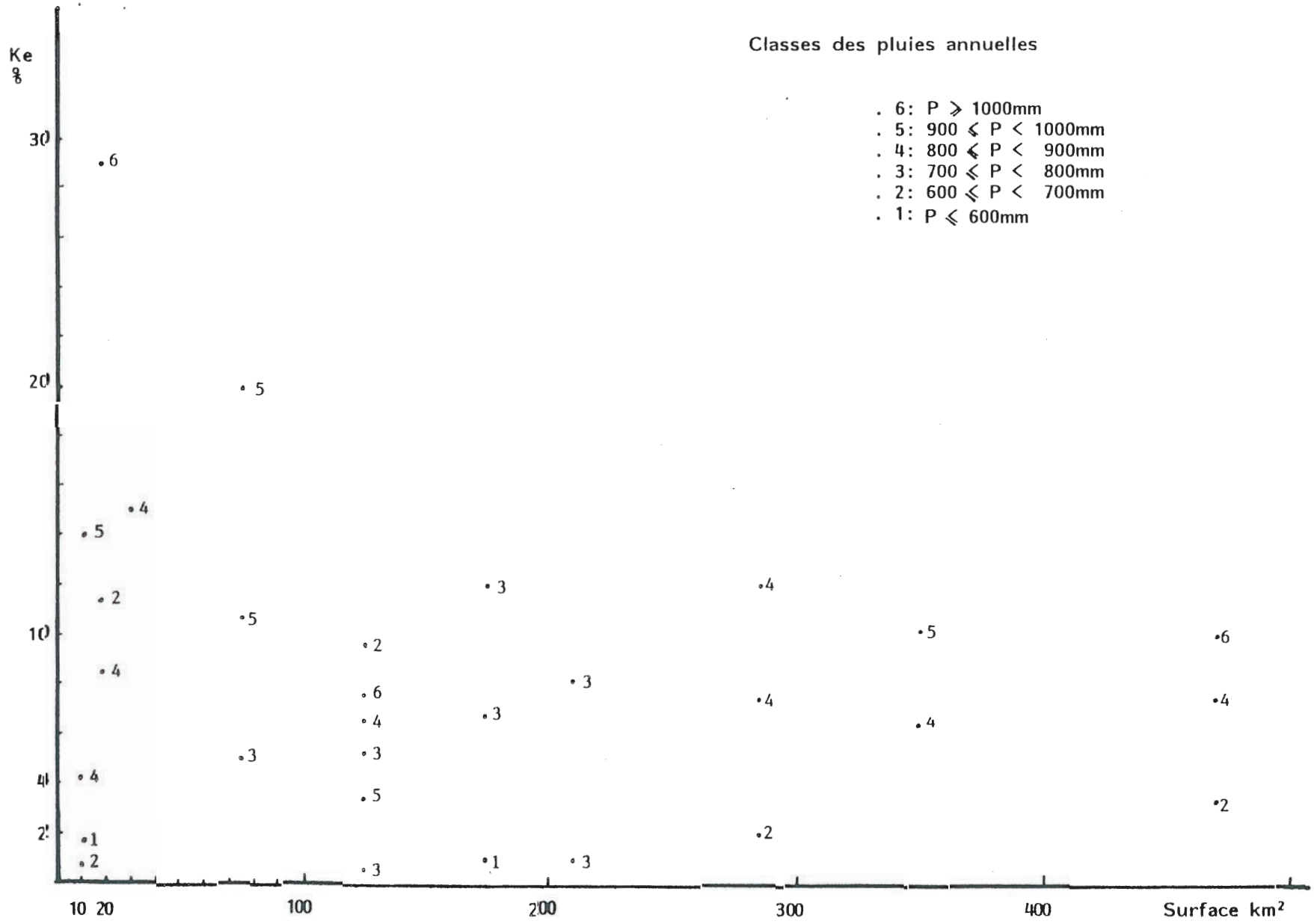


Fig. 7. 15 : Coefficients d'écoulement, classes de pluies annuelles et superficies des bassins versants de la région de Ouagadougou (d'après les tableaux 7.2 et 7.16).

D'autre part, il semble qu'une tendance à la décroissance des coefficients d'écoulement annuels puisse être reconnue à partir des unités de 20 ou 30 km^2 compte-tenu des précipitations annuelles.

7.2.1.2 : L'envasement des barrages.

Les mesures de sédimentation dans les lacs de retenue peuvent être considérées comme de bons indicateurs de la dégradation spécifique des bassins versants. Les transports de fond, qui ne sont pas intégrés lors des jaugeages de débits solides (suspension) sur les grandes rivières, sont ici pris en compte. Il est vrai qu'en revanche une part non quantifiée de fines est évacuée par le déversoir lors des crues les plus importantes.

Du point de vue méthodologique, deux types d'analyses sont distingués : les mesures par levés topographiques comparés et les sondages.

a- Les levés topographiques comparés (Gresillon et Reeb, 1981).

J.M. Gresillon a procédé à la mesure de l'envasement de trois réserves par levés topographiques après un nombre connu d'années de remplissage et comparaison des capacités initiales et actuelles. Le choix des sites a été fixé judicieusement en fonction de leur répartition géographique et climatique. La superficie est celle de petits à grands versants mais ces résultats obtenus par l'auteur suivant une méthode donnée, ont été regroupés dans ce paragraphe (Tableau 7.17). Le calcul des dégradations spécifiques a été fait en supposant une densité moyenne des sédiments égale à 1,2.

La dégradation spécifique ne paraît guère liée à la surface du bassin versant, ni à sa pente. L'auteur relève que la pluviosité annuelle semble en revanche un paramètre à prendre davantage en considération, "dans la mesure où elle conditionne l'importance de la végétation". Un examen des photos aériennes serait cependant nécessaire afin de comparer les taux d'occupation du sol entre bassins ainsi que leur évolution.

Site (Région-Année de construction)	Précipitations moyennes annuelles (mm)	Surface du bassin versant (km^2)	Pente moyenne (%)	Envasement moyen annuel (m^3)	Dégradation spécifique	
					$m^3/km^2/an$	$t/km^2/an$
Samboendi (Bogandé-1962)	724	148	0,11	38 500	260	312
Goundi (Tenado-1964)	900	38	1,2	6 000	160	192
Vi (Boromo-1964)	1 000	92	0,3	4 800	52	62,4

Tableau 7.17 : Envasements évalués par levés topographiques comparés (d'après Grésillon et Reeb, 1981).

b- Les sondages.

Le recours à une autre technique de mesures provient d'un certain nombre de constats critiques relatifs à la méthode des levés :

- d'une part, cette dernière suppose une recherche de documents (quelquefois introuvables !) dans les archives et le repérage sur le terrain des bornes topographiques *d'origine*, pouvant être confondues avec d'autres plus récentes liées à de nouveaux travaux (rehaussement de digue par exemple) ;
- d'autre part, elle ne peut être conduite que sur des réserves de petite capacité s'asséchant totalement avant l'hivernage. Certes, la plupart des cuvettes sont dans ce cas au Burkina mais quelques ouvrages, justement représentatifs des bassins versants de taille moyenne ou grande, restent toujours en eau et ne peuvent être étudiés ;
- enfin, sur les cuvettes qui s'assèchent, une pratique largement répandue consiste pour les populations locales à récupérer des argiles servant alors de matériaux de construction (banco). Ces prélèvements, que nous n'avons pu quantifier, ne nous semblent pas négligeables sur certains sites et peuvent échapper à l'observation au moment du levé.

L'ensemble de ces difficultés nous a conduit à opérer différemment en 1982 sur le site du barrage de Boulbi à une dizaine de kilomètres au sud-ouest de Ouagadougou. Après avoir matérialisé sur le plan d'eau un maillage (fils munis de flotteurs de liège) de 10 mètres par 5 mètres, nous avons, à partir d'une barque ou à pied, sondé la vase en enfonçant une perche sous faible pression. Après son retrait, il suffit de mesurer la trace du dépôt laissé sur la perche pour avoir son épaisseur. Trois mille deux cent quatre vingt dix (3 290) valeurs ont été ainsi recueillies. La cartographie automatique (Fig. 7.16 et Fig. A.7.4) réalisée au CIEH avec l'aide de C. Puech, montre la distribution spatiale des vases et leur concentration maximale le long de l'ancien talweg. Le tableau 7.18 regroupe les données relatives à ce bassin versant de Boulbi.

Site (Année de construction)	Précipitations moyennes annuelles (mm)	Surface du bassin versant (km^2)	Pente moyenne (%)	Envasement moyen annuel (m^3)	Dégradation spécifique	
					$m^3/km^2/an$	$t/km^2/an$
Boulbi (1959)	896	102	0,2	>6 800	> 68	> 81,6

Tableau 7.18 : L'envasement du barrage de Boulbi.

Il ne faut cependant pas attendre une grande précision de cette campagne de mesures, conduite avec trop peu de moyens et de temps. Les incertitudes relatives à cette première approche sont en effet nombreuses :

- d'une part, seul l'aval de la retenue (20 hectares environ), toujours en eau en fin de saison sèche, a été sondé. Les reconnaissances faites en amont nous font penser que les dépôts y sont généralement de faible épaisseur mais notre estimation est globalement faite par défaut(1).

(1) *La dégradation spécifique s'élève à 110 ou 150 $t/km^2/an$ si l'on admet un dépôt de 5 ou 10 cm d'épaisseur seulement sur le reste de la cuvette (130 ha à l'origine), ennoyé temporairement.*

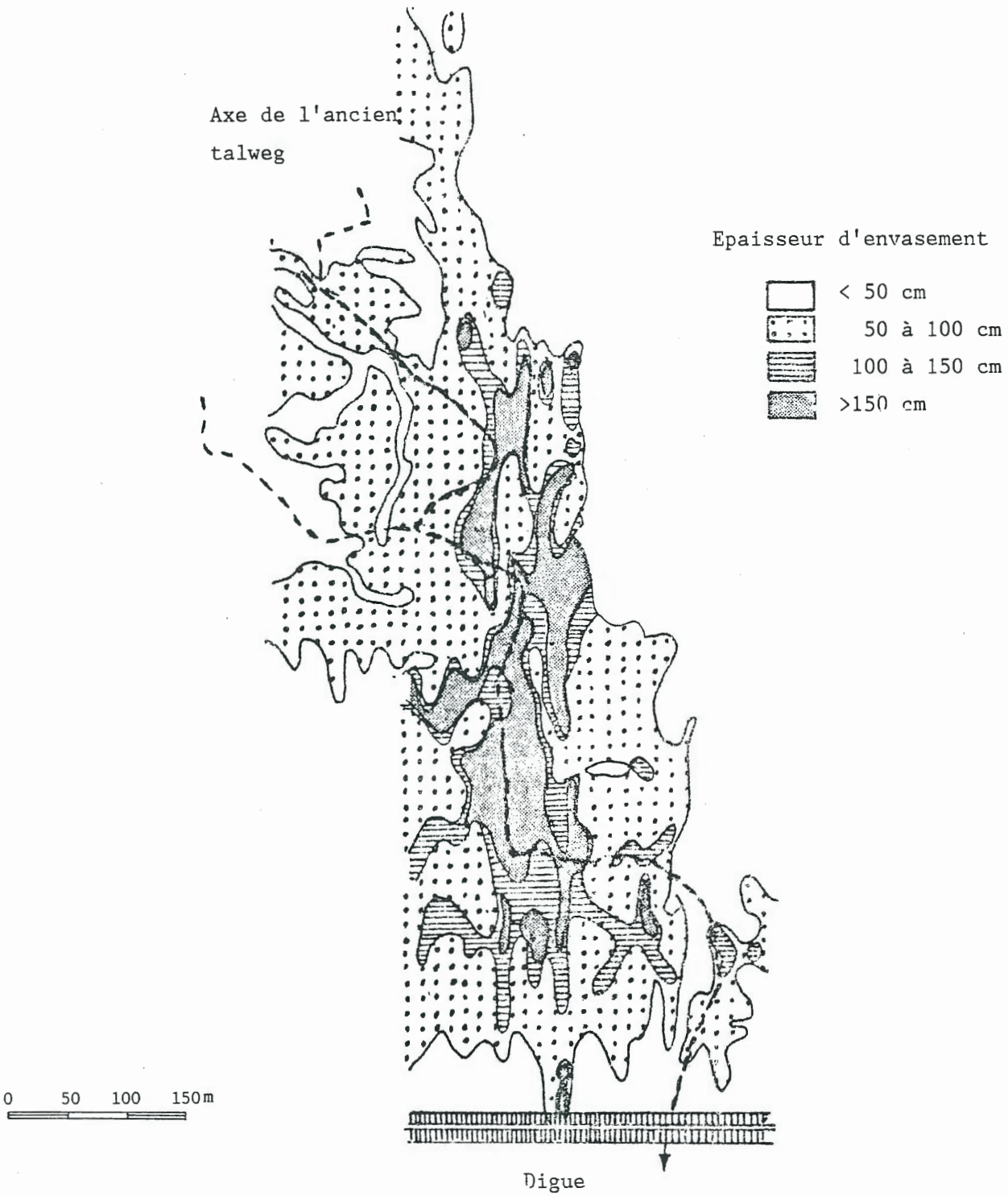


Fig. 7.16 : L'envasement du barrage de Boulbi évalué par sondages.

- d'autre part, la détermination de la densité apparente des boues immergées, qui représente un problème même pour les spécialistes (Claude *et al.*, 1977), n'a pas été faite sur le terrain. Pour la transformation des mètres cubes d'envasement(1) en tonnes de sédiments, nous avons adopté les valeurs généralement admises de densité réelle égale à 2,4 (argiles) et de densité apparente égale à 1,7. Le poids de matières solides par m^3 de boue ($\rho s = \frac{dr\ (da-1)}{dr - 1}$) est alors estimé à 1,2 t/m^3. Ce chiffre très imprécis demande évidemment confirmation mais peut être utilisé raisonnablement dans un premier temps ;

- enfin, la méthode présente un handicap évident dans la mesure où ces sondages manuels ne s'arrêtent pas forcément sur une ligne séparant le sol (préexistant à la mise en eau du barrage) et le dépôt supposé plus meuble. La consolidation des boues est évidemment un phénomène complexe et mal connu mais on peut penser que le tassement est peu efficace dans ce type de retenues, dont la tranche d'eau n'excède quelques mètres que temporairement.

Une quinzaine de carottages réalisés à l'aide de tubes P.V.C. avait pour but de rechercher une éventuelle discontinuité à la base des sédiments et de pondérer, si besoin était, les mesures d'épaisseurs de vases. Là encore, de grandes difficultés sont apparues : dans le choix des analyses chimiques, pas forcément discriminantes puisqu'il s'agit d'un même "amont fournisseur" pour le sol ancien comme pour les sédiments ; dans les résultats décevants des recherches biologiques (diatomées, bactéries) peut être en raison de l'échauffement des eaux, en saison sèche, et aussi de nos échantillons, lors de leur rapatriement. Seul l'examen macroscopique et granulométrique fournit à ce jour quelques enseignements.

---

(1) Le calcul du volume des sédiments a été établi suivant la méthode des hauteurs moyennes entre points de mesures (5m), le long de chaque transect puis en considérant les surfaces moyennes d'une ligne à l'autre (intervalle de 10m).

- Les coupes des sédiments "carottés" (Boulbi - Nagbangré).

* Sur la figure 7.17(Doc.h.t.6), l'échantillon BO 13 prélevé en aval de la digue montre nettement, par opposition avec tous les autres, la présence de gravillons ferrugineux sur toute sa hauteur. Cela n'a pas de valeur en soi puisqu'il s'agit de sols travaillés, retournés mais permet au moins d'authentifier les autres témoins comme de véritables dépôts, non perturbés par quelque action anthropique que ce soit, y compris en fin de saison sèche. Cet échantillon BO 13 présente aussi un accroissement du taux d'argile du sommet à sa base.

* Les échantillons de la retenue, situés le plus près du versant (BO 2, BO 1, BO 11), incorporent des gravillons dans la moitié ou le tiers inférieur de la carotte. Ceux situés dans l'axe de l'ancien talweg en sont dépourvus (BO 8, BO 10).

* Le pourcentage d'argile est toujours le plus élevé dans "l'horizon"(1) supérieur et dépasse souvent 50%. Il diminue assez régulièrement vers le bas (y compris celui des limons fins tandis que les limons grossiers augmentent) jusqu'à une profondeur variable, au-dessous ou à hauteur des gravillons ferrugineux. Ce niveau peut être changeant, y compris sur des coupes relativement voisines (BO 1 et BO 2) mais situées à des hauteurs différentes sur le versant et en bordure du lac.

* A partir de ce niveau, où se situe fréquemment une rupture de l'échantillon asséché, la teneur en argile augmente de nouveau.

Cette analyse, même rapide, nous oblige à nous demander si l'horizon sommital, franchement argileux, ne représente pas l'unique dépôt mis en place depuis la construction du barrage. Dans ce cas, les épaisseurs de sédiments seraient minimes et les mesures précé-

---

(1) Ces pseudo-horizons se distinguent essentiellement par leur couleur à sec. Leurs limites s'accompagnent de brisures ou de véritables cassures, parfois obliques (BO 2 par exemple).

ÉTUDE DE L'ENVASEMENT D'UN BARRAGE AU BURKINA FASO. (BOULBI : 12° 14' N - 01° 32' W).

Examens granulométrique et macroscopique des échantillons carottés dans le lac de retenue (BO 1 à 11) ou à l'aval du barrage (BO 13).

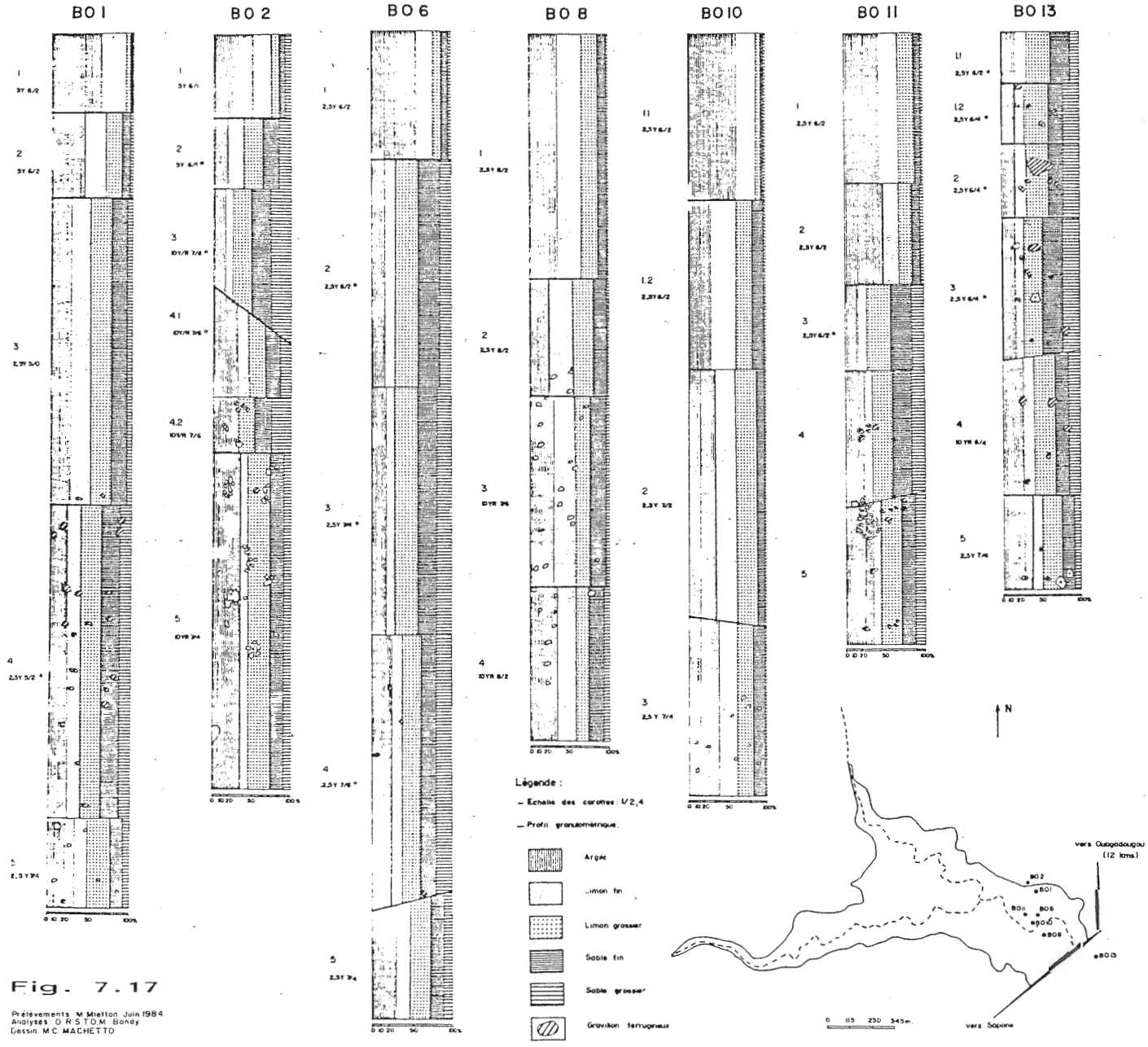


Fig. 7.17

Prélèvements M Mietton Juin 1984
Analyses : O R S T O M Bondy
Dessin. M C MACHETTO

dentes largement surestimées.

En fait, la sédimentation, dans des retenues peu profondes, très largement mises à nu en fin de saison sèche et présentant des dépôts découpés par tout un réseau de fentes polygonales, pourrait s'opérer selon le processus suivant : aux premiers écoulements, souvent violents, venant dans l'axe du bas-fond mais aussi latéralement, à partir des versants, une mobilisation des dépôts antérieurs et une remise en suspension des particules les plus fines permettraient chaque année un *triage granulométrique vertical*. Celui-ci ne serait plus perturbé après le remplissage du lac car sa grande extension modifie alors incontestablement la dynamique d'écoulement à l'aval et reporte en amont la possibilité de dépôts, du moins pour les matériaux les plus grossiers.

L'examen morphoscopique des échantillons carottés à Boulbi montre que les grains de quartz usés et arrondis sont extrêmement peu représentés : quelques-uns seulement sont visibles dans la classe des sables fins (inférieurs à 200 µ). Les quartz non usés présentent un émoussé anguleux et sont fréquemment oxydés, principalement dans les horizons inférieurs. Il semble que ces matériaux proviennent essentiellement des versants voisins ce qui expliquerait leur faible degré d'usure. Ce constat s'accorde également avec l'hypothèse précédente d'un dépôt préférentiel, pour les sables issus du bassin, à l'amont de la réserve. Sur l'échantillon BO 1, le sédiment semble s'arrêter à la base de l'horizon 4, dans lequel les grains de quartz sont très visibles macroscopiquement, tandis qu'ils disparaissent au-dessous, en même temps que les gravillons ferrugineux. La teneur en argile augmente de nouveau dans ce qui peut être le sol ancien. Les hauteurs d'envasement mesurées dans l'environnement de BO 1, voisines de 50 cm, sont conformes à la hauteur mesurée sur la carotte. Il en est de même pour BO 2 : la base du dépôt peut être reconnue au niveau des horizons 4.1 ou 4.2, ce qui correspond à la diminution de l'envasement, en amont sur le versant (épaisseur inférieure à 50 cm - Fig. 7.16). Inversement, la limite du dépôt est plus profonde (horizon 4) dans l'échantillon BO 6 situé en aval. Cette épaisseur, supérieure à 50 cm se retrouve sur la figure 7.16.

Les échantillons BO 8 et BO 10 sont plus difficiles à interpréter dans la mesure où, du fait de leur extrême liquidité, la base de la "carotte" a été perdue au moment de l'extraction. L'ensemble du dépôt n'est peut être pas apparent sur chacune de ces deux coupes. Les épaisseurs d'envasement notées en ces deux points sont de 50 et 55 cm.

Les premiers carottages effectués dans la retenue du lac de Nagbangré, en aval de Boulbi, sont présentés à titre comparatif (Fig. 7.18-Doc. h.t. 7). Ils confirment certaines tendances :

- le classement granulométrique vertical, du moins pour les échantillons situés (comme à Boulbi) à l'aval de la retenue (NAG 7, NAG 9, NAG 12) ;

- l'abondance relative des sables grossiers dès le sommet de l'échantillon prélevé en amont de la retenue (NAG 16).

En revanche, les coupes NAG 15 et NAG 11 doivent être interprétées en relation avec des écoulements latéraux et peut être même des perturbations d'origine anthropique puisque la seconde est située à proximité immédiate des habitations. Les hypothèses précédentes relatives aux processus de sédimentation sont beaucoup plus difficilement applicables à ce lac plus profond et surtout plus allongé, à moins d'admettre que les écoulements latéraux, concentrés ou en nappe, issus de versants plus pentus qu'à Boulbi, soient suffisamment efficaces pour expliquer une remise en suspension partielle des sédiments.

Ces données et hypothèses relatives aux envasements constituent une première approche, qui a pour seul objectif d'apporter quelques informations à propos d'une sédimentation méconnue, peut être parce que sous-estimée, délicate en tout cas à analyser.

Ces résultats, même fragmentaires, n'ont de sens toutefois que si l'on connaît les principales caractéristiques du bassin versant, morphométriques (Tableau 7.18), pédologiques et biogéographiques. Cette unité se situe en totalité sur des granito-gneiss calco-alcalins, riches en quartz. Les sols de versants sont des sols ferrugineux tropicaux lessivés avec un début de concrétionnement en profondeur

ETUDE DE L'ENVASEMENT D'UN BARRAGE AU BURKINA FASO. (NAGBANGRE: 12° 12' N - 01° 25' W).

Examen granulométrique des échantillons carottés dans le lac de retenue (NAG 7 à 12)
ou à l'amont du lac (NAG 15 et 16)

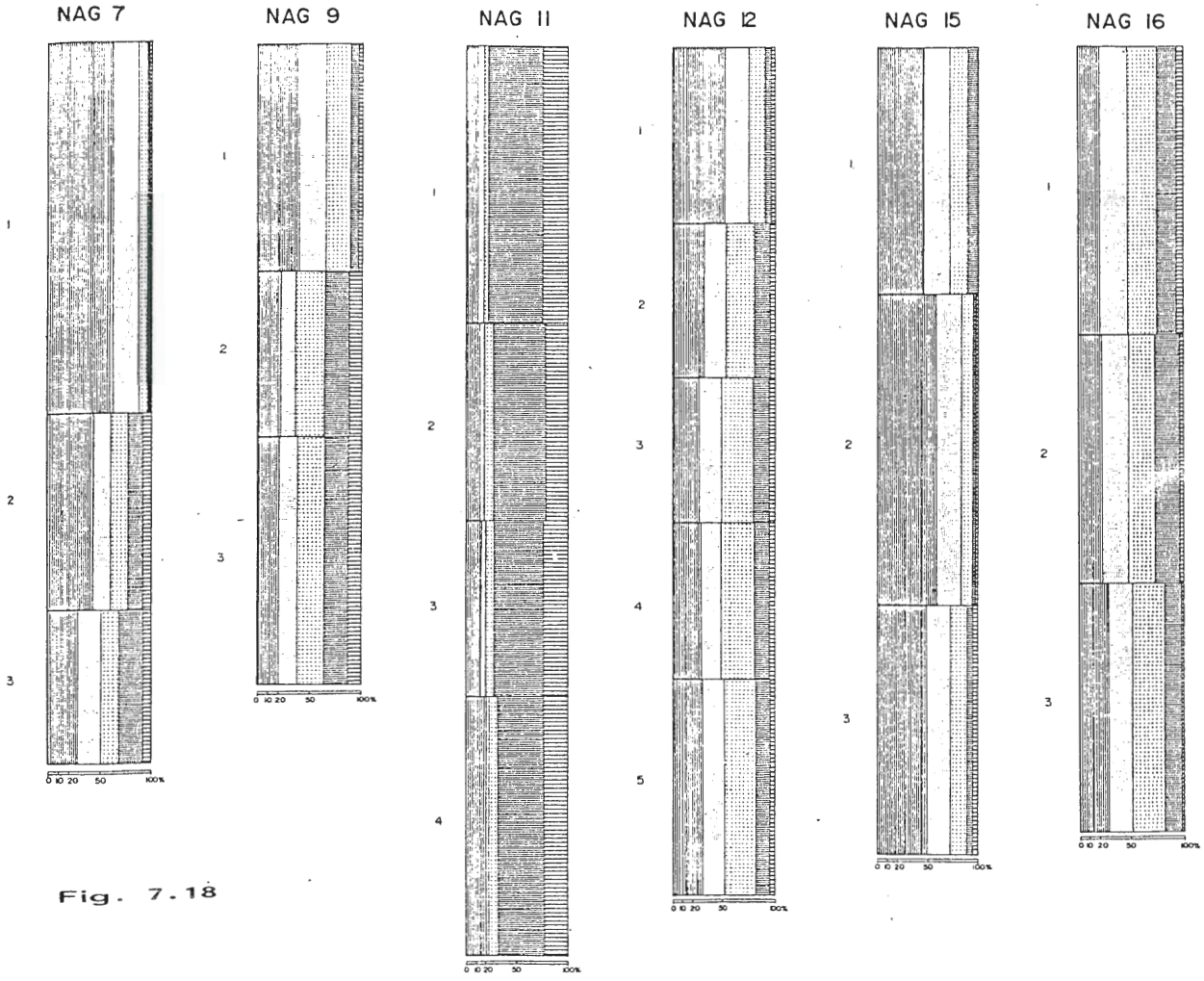
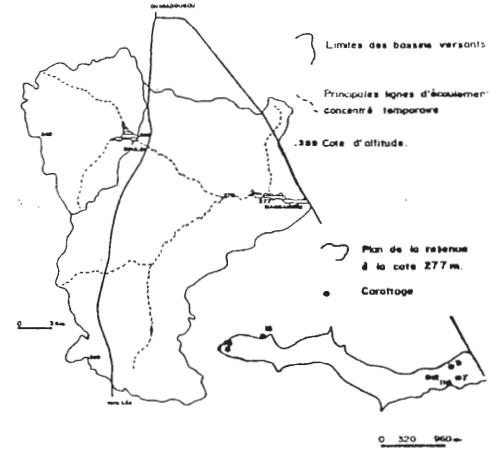


Fig. 7.18

Barrage de Nagbangre :

Situation et localisation des carottes dans le lac de retenue.



Légende :

- Echelle des carottes : 1/2
- Profil granulométrique : (Pourcentage de chaque classe en abscisse)

Argile
Limon fin
Limon grossier
Sable fin
Sable grossier

Prélèvements : M METTON Juin 1984.
Analyses : Institut de Géographie Alpine
Dessin : M.C. MACHETTO

(Maignien *et al.*, 1960). La cuirasse affleure à l'ouest du bassin et donne naissance à des buttes, faiblement perchées. L'utilisation faite par les hommes de ce milieu est particulièrement importante à définir.

- L'occupation du sol sur le bassin versant de Boulbi et l'érosion :

La culture de base est ici, comme sur tout "le plateau" mossi, celle du mil, pratiquée localement en billons ; l'arachide représentant une spéculation secondaire. Les champs sont permanents autour des cases, plus ou moins groupées autour de quatre ou cinq gros villages (25 lieux-lits). La savane, fortement dégradée (§ 4.3, p. 170) cède la place aux champs "temporaires", dont le temps de jachère est de plus en plus réduit.

L'interprétation des prises de vues aériennes de 1956 et 1979 (Fig. 7.19) permet en effet de mesurer le pourcentage de terres cultivées (champs et jachères très récentes) et d'apprécier son évolution. Ce taux est de 22,7% en 1956 ; il passe à 26,2% en 1979. L'augmentation n'est certes pas négligeable mais, surtout, *cette proportion apparaît importante dès les années cinquante*. C'est la caractéristique d'une région située en plein coeur du pays mossi à proximité immédiate de Ouagadougou. Les terroirs sont quasi "saturés"(1) depuis plus de trente ans avec des jachères de l'ordre de cinq ans seulement, des densités voisines de 100 habitants par km^2 si l'on admet qu'une famille de cinq personnes a besoin d'un hectare pour vivre.

S'il y a une érosion pelliculaire et linéaire sur ce bassin, responsable de l'envasement du barrage, *le phénomène n'est pas forcément nouveau, même s'il a pu se renforcer*. L'examen détaillé des photos met d'ailleurs en évidence que l'incision des lits mineurs dans les bas-fonds est à peu près partout amorcée dès 1956 (Fig. 7.20), c'est-

---

(1) Le pourcentage de 26,2% semble faible par rapport à celui donné par C. Valentin (43%) sur le bassin de Kognere. En fait, il s'agit pour l'auteur de jachères récentes évidemment plus vastes que celles (très récentes) reconnues sur le bassin de Boulbi. D'autre part, l'extension de ces parcelles en 1980 nous paraît un peu surestimée, non pas dans leurs limites mais dans leur planimètrie.

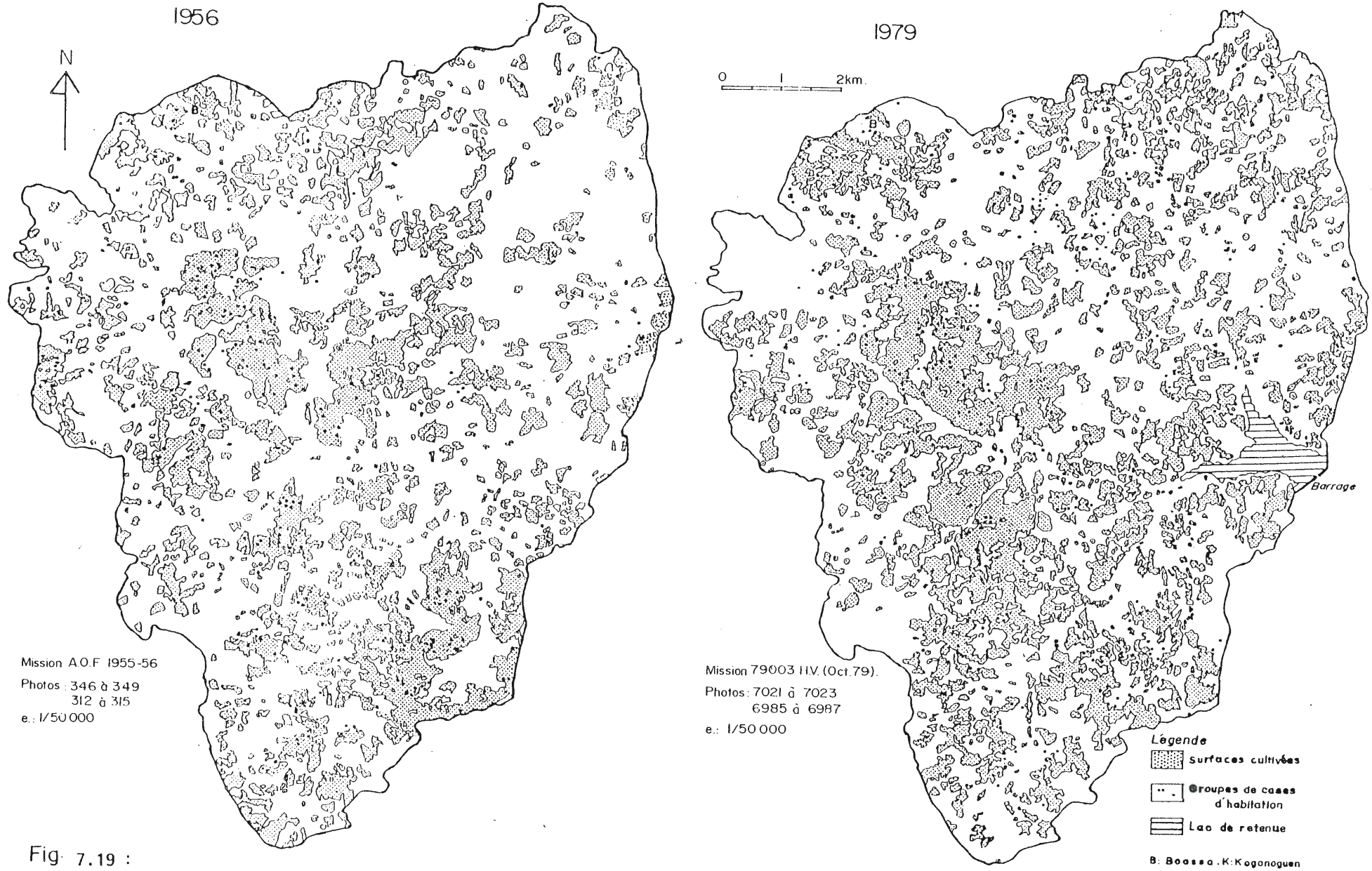


Fig. 7.19 :

Evolution des surfaces cultivées (champs et jachères très récentes) sur le bassin versant de Boulbi entre 1956 et 1979.

à-dire avant la période de sécheresse. Cette entaille ne concerne pas précisément les seuls secteurs étroits des talwegs, où la "galerie" arborée est déjà très clairsemée. Des plaques de sols nus sont également visibles sur les versants, souvent sur les bas de pente. Mais il est vrai aussi que celles-ci se sont multipliées ou plutôt étendues, par exemple au pied des corniches cuirassées, en amont des versants. Le constat nouveau est la présence d'assez nombreuses rigoles le long desquelles transitent des sables et qui sont reconnaissables par leur forme longiligne prolongée par une figure en cône ou en éventail. Celles-ci sont notamment identifiées dans des secteurs non cultivés en 1956 (C 3-4 - Fig. 7.20). L'opposition moins tranchée des grisés sur les clichés de 1979, en fin de saison des pluies pourtant, indique une dégradation généralisée du couvert végétal. L'implantation de périmètres mis en défens (C 11-12), les déclarations des riverains du lac de Boulbi à propos de l'envasement, traduisent, à tous les niveaux, une perception du phénomène.

Conclusion :

L'étude de ce bassin de Boulbi nous paraît intéressante car elle illustre la nécessité d'un jugement nuancé vis-à-vis des facteurs explicatifs de l'érosion et de leur hiérarchisation. La diversité régionale du pays, avec les différences d'ancienneté d'occupation, la plus ou moins grande proximité des villes et bien sûr les types de cultures et de sols, doit être prise en compte. Ici, l'érosion est probablement un phénomène ancien, dont l'origine anthropique est primordiale. Les coefficients d'écoulement moyens sont, répétons-le, compris entre 6,5% et 10% au moins, dès la période de 1961-1963 ; le coefficient maximum est de 23% en 1963.

Le contexte climatique défavorable, surajouté à une pression démographique renforcée, rend évidemment encore plus vulnérable ce milieu depuis une vingtaine d'années.

Ce bassin de Boulbi s'intègre dans le très grand bassin de la Volta Blanche qui représente une autre échelle d'investigations.

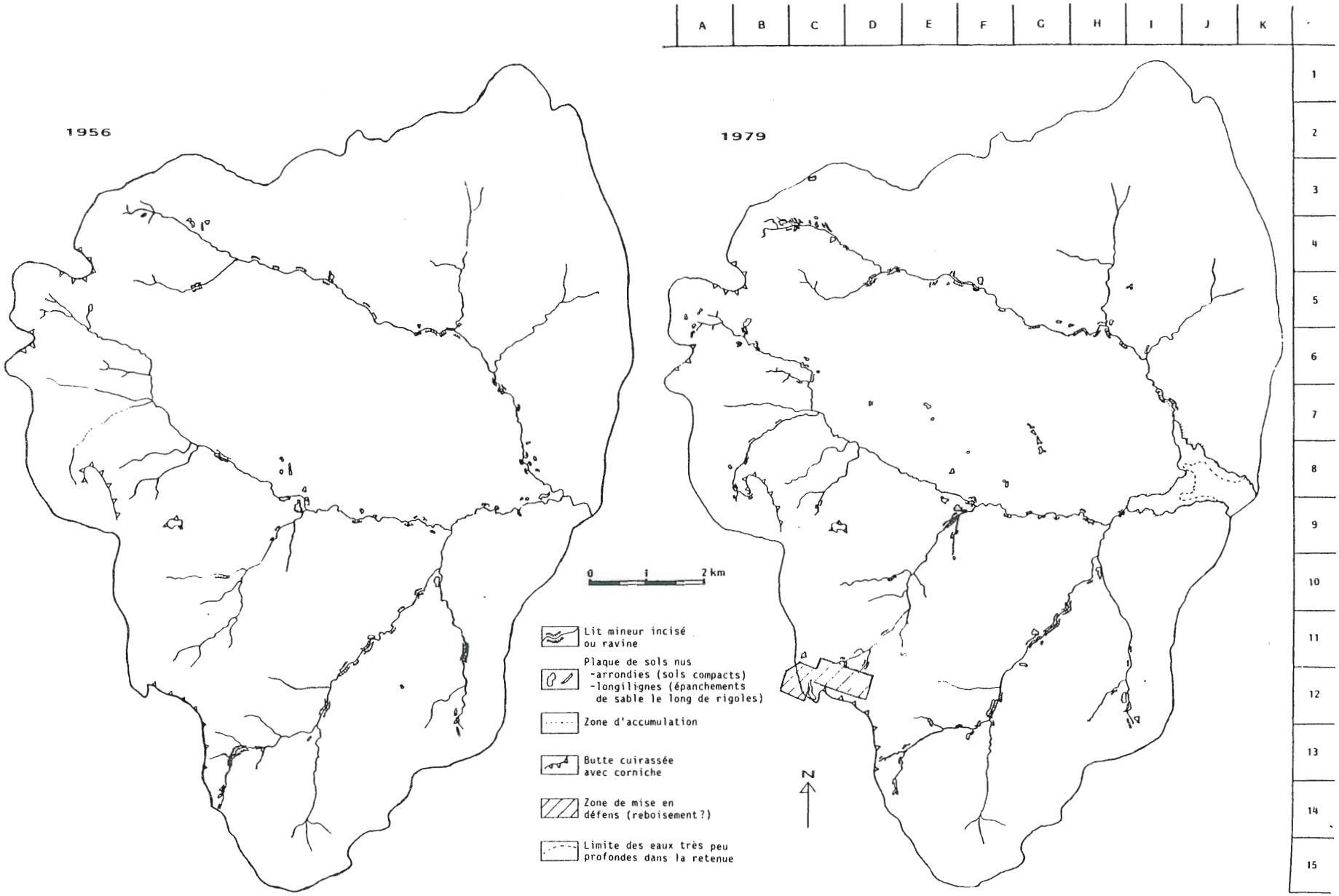


Fig. 7.20 : Les marques de l'érosion sur le bassin versant de Boulbi et leur évolution entre 1956 et 1979.

7.2.2 : Les mesures de transports en suspension sur les grands cours d'eau.

Les jaugeages de débits solides effectués sur les principales rivières sont très précieux puisqu'ils donnent, sinon une idée de la dégradation spécifique sur ces très grands bassins, du moins des données précises sur le transport en suspension. Ces mesures n'ont été réalisées que sur deux sites : à Tagou, sur la Kompienga, dans le sud-est du pays et à Niaogho, sur la Volta Blanche (Fig. 7.14).

7.2.2.1 : Les mesures sur la Kompienga (d'après HER, 1981 a).

Le Service Hydrologie de l'H.E.R. (Direction de l'Hydraulique et de l'Equipement Rural), succédant à l'ORSTOM, a travaillé durant plusieurs années à l'appréciation des débits liquides à la station de Tagou (11° 09' N, 00° 37' E). Il s'agissait d'études préalables à la construction d'un important barrage, à l'aval d'un très grand bassin de 5 500 km², très allongé(1) mais de pente moyenne élevée (0,9‰) compte-tenu de sa superficie. Outre ces paramètres morphométriques, nous avons cherché à définir les caractéristiques pétrographiques et pédologiques de l'unité. Le substratum est relativement homogène puisque les roches volcano-sédimentaires ne représentent que 4,3% de la superficie totale ; le reste étant occupé par des migmatites et des granites. La carte des ressources en sols de la région Est-Sud (Boulet, 1976) nous permet d'identifier quatre grandes catégories de sols : des sols peu épais gravillonnaires (47,9%), des sols à texture contrastée, à horizon A sableux mais horizon B compact (25,8%), des sols gravilonnaires sur substrat meuble (21,2%) et des sols argileux (5,1%).

---

(1) La très faible compacité (Kc = 1,38) n'empêche pas la Kompienga d'avoir des temps de réponse très courts (montée des eaux supérieure à 1m en quelques heures en juillet et décrue aussi rapide).

Durant la campagne 1980, quinze jaugeages de débits solides ont été effectués à la bouteille (à gué) ou à la pompe (sur bateau pneumatique). Ces quinze jaugeages ne suffisent pas à donner précisément les concentrations moyennes mensuelles mais des ordres de grandeur intéressants. Les résultats globaux de l'écoulement, estimés pour les mois de mai et/ou juin, sont regroupés ci-dessous.

Mois	Débit moyen mensuel (m^3/s)	Volume écoulé (10^6 m^3)	Concentration moyenne (kg/m^3)	Transport en suspension (tonnes)	Module annuel (m^3/s)	12,1
Mai	(1,6)	4,2	(4,0)	(16 800)	Module spécifique ($l/s/km^2$)	2,2
Juin	4,6	11,9	(3,0)	(35 700)		
Juillet	8,4	22,4	2,0	44 800	Coefficient d'écoulement (%)	9,4
Août	68,6	183,7	1,0	183 700		
Septembre	61	158,1	0,5	79 000	Turbidité annuelle (kg/m^3)	0,95
Octobre	0,9	2,3	0,02	4 600		
Année		382,6		364 000	Dégradation spécifique ($t/km^2/an$)	66

Tableau 7.19 : Ecoulement et transport en suspension sur la Kompienga (campagne 1980) d'après H.E.R. (1981 a).

Il faut signaler que l'hydraulicité de la Kompienga durant cet hivernage 1980 est médiocre dans l'absolu puisque la lame d'eau écoulée est de 69mm, ce qui ne représente que 56% de la moyenne interannuelle (Moniod *et al.*, 1977). Les précipitations sont également très déficitaires avec une pluviosité moyenne (Thiessen - 3 postes seulement) évaluée à 732mm contre 905mm pour la période 1949-80. Le coefficient d'écoulement annuel est en revanche proche de 10% (9,4%), ce qui est comparable aux ordres de grandeurs obtenus, pour une pluviosité identique, sur les bassins beaucoup plus réduits (100-200 km^2) de la région de Ouagadougou.

Les transports solides sont en revanche tout à fait notables si l'on considère qu'il s'agit uniquement de charges en suspension, donnant une dégradation spécifique égale à celle mesurée à Vi, par envasement du barrage (Tableau 7.17) sur un bassin de moyenne superficie ou près de dix fois plus importante à celle enregistrée sur la Volta Blanche à l'aval d'une unité 5,5 fois plus grande.

Les transports de fond sont probablement imposants si l'on considère une fois encore *l'extraordinaire mobilité des lits*, déjà signalée à Imiga et illustrée ici, à une autre échelle, grâce à une communication de J.P. Triboulet (Fig. 7.21). Sur ces deux exemples de jaugeages exécutés à la même côte (0,61m dans un cas ; 0,46m dans l'autre), on note des différences de section mouillée de plus de 100% et cette mobilité des fonds de lits sableux induit une fois encore, on s'en doute, des modifications permanentes dans le dessin de la courbe d'étalonnage. Mais surtout, quelle part du transport solide total représente ce charriage ? Nous sommes ici dans l'ignorance et ne pouvons citer que de rares données, obtenues à d'autres latitudes : en Tunisie, où J. Claude (Claude *et al.*, 1977) estime le transport de fond à 20% du transport solide total (bassin de 10 300 km^2) ; aux Etats-Unis (Nebraska-Loup River), où S. Leliavsky (cité par J. Claude, p. 34) attribue seulement 53% du transport aux suspensions.

7.2.2.2 : Les mesures sur la Volta Blanche (d'après Dumas R, Claude J., 1977).

Ces mesures ont été effectuées par l'ORSTOM du mois d'août à la fin octobre 1977, à la station de jaugeages de Niaogho (11° 45' N, 00° 45' W) (Fig. 7.14), en aval d'un bassin versant de 32 000 km^2, de forme allongée (Kc = 1,32), de pente moyenne égale à 0,3‰. L'unité est beaucoup moins homogène pétrographiquement que dans le cas précédent puisque les substrats volcano-sédimentaires représentent ici plus du tiers (36%) du territoire. L'occupation du sol est très marquée sur toute cette unité qui se superpose étonnamment bien avec la zone des plus fortes densités du pays (Fig. I.3).

Les précipitations, durant cette année 1977, sont comprises entre 400 et 800mm ; la pluie moyenne annuelle, que nous avons calculée par la méthode de Thiessen (Fig. 7.22)(1) est égale à 606mm.

---

(1) *Ce dessin des polygones est utilisé pour le calcul des pluies moyennes mensuelles ou journalières. A l'échelle de l'année, les données incomplètes de Ouagadougou, Boulbi et Kombissiri sont délaissées.*

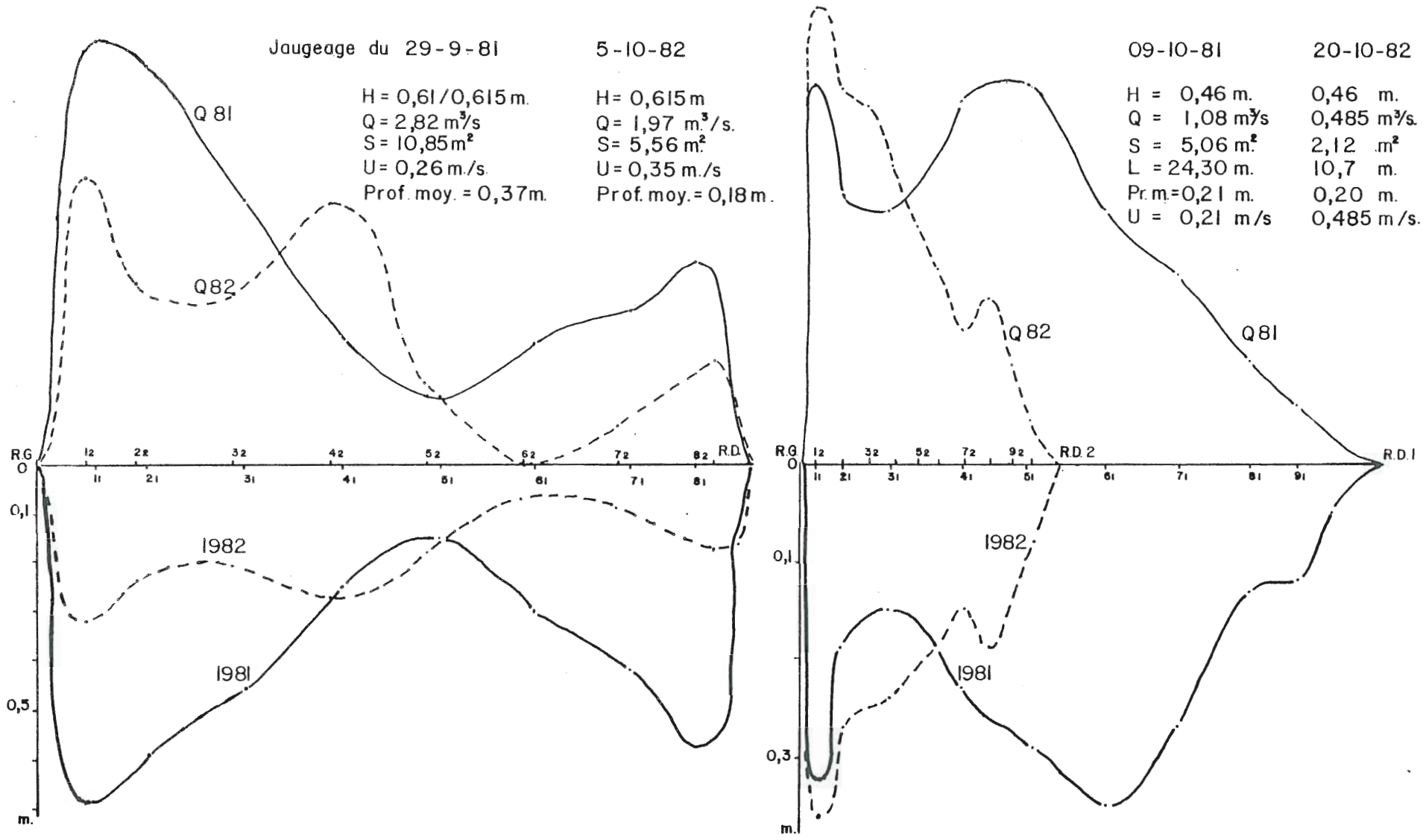


Fig. 7.21 : Exemples de lit fluvial mobile : la Kompienga à Tagou (hauteurs moyennes de jaugeages identiques, sections mouillées et débits très différents).
d'après Service Hydrologie-H.E.R. (J.P. Triboulet, inédit).

L'hydraulicité de cet hivernage 1977 est faible avec un module annuel de 20,6 m^3/s tandis que le module médian est de 26,3 m^3/s et le module décennal sec de 15,2 m^3/s. La durée de retour de ce module 1977 est de trois ans environ. *En revanche, le débit maximal de 1977 est nettement supérieur à la valeur médiane* et aurait une période de retour de 5 ans environ (Dumas *et al.*, p. 20).

Dix sept cents (1700) échantillons de charges en suspension ont été prélevés, correspondant à des prélèvements de surface et surtout à quarante quatre (44) jaugeages complets, en chaque point de mesure de vitesse, à l'aide d'une pompe Japy.

Les résultats principaux sont regroupés dans le tableau ci-dessous.

Mois	Précipitations moyennes (mm)	Débit moyen mensuel (m^3/s)	Volume écoulé (10^6 m^3)	Concentration moyenne (kg/m^3)	Transport en suspension (tonnes)	Module annuel (m^3/s)	20,6
Juin	-	5,4	14	(0,65)*	(9 123)*	Module spécifique ($l/s/km^2$)	0,65
Juillet	130,4	59	158	(0,54)*	(85 033)*		
Août	190,3	107	286.5	0,34	96 627	Coefficient d'écoulement annuel (%)	3,4
Septembre	108,8	62,8	162,8	0,19	31 140		
Octobre	18,5	10,7	28,7	0,08	2 272	Turbidité annuelle (kg/m^3)	0,34
Année	606		650		224 200	Dégradation spécifique ($t/km^2/an$)	7

* Valeurs estimées.

Tableau 7.20 : Ecoulement et transport en suspension sur la Volta Blanche (campagne 1977) d'après Dumas *et al.* (1977).

L'écoulement permanent commence au début de juin (fin mai sur la Kompienga) et se termine fin octobre - début novembre. La lame d'eau écoulée (20mm) et le débit spécifique (inférieur à 1 $l/s/km^2$) sont faibles. Le coefficient d'écoulement annuel est également trois fois moins élevé que sur la Kompienga, dont les caractéristiques apparaissent plus représentatives du domaine tropical contrasté, du moins si l'on se réfère à des unités encore plus vastes (10^6 km^2) (Meybeck, 1979).

Le calcul des précipitations moyennes mensuelles pour-

rait permettre de connaître les coefficients d'écoulement pour chacun des mois. C'est ce qu'ont fait J.C. Klein (1967) sur le bassin de Niarba (572 km²) et J. Sircoulon (1964) sur l'unité de Niegha (1010 km²). A l'échelle du bassin de la Volta Blanche (32 000 km²), ces coefficients ont une signification nouvelle et complexe, difficilement appréciable du fait de délais de transfert mal connus. Disons simplement que la constance de ces coefficients (4,8%) en septembre et octobre par rapport à août (4,7%) traduit l'importance de la recharge des nappes, une meilleure continuité dans le temps et dans l'espace des écoulements, une plus grande efficacité peut-être du ruissellement lui-même, sur des interfluves aux sols plus humectés.

L'examen de l'hydrogramme mensuel d'août semble indiquer également une diminution des temps de réponse : 5 jours pour une pluie moyenne de 45,2mm le 3 août, 2 ou 3 jours pour la pluie moyenne de 34mm le 15 août. Mais, là encore, une grande prudence s'impose en regard de la distribution spatiale de l'averse et de son renforcement à l'aval le 15 (Pluies moyennes : 57mm et 48,5mm à Garango et Kombissiri contre 26,5mm et 34,2mm le 3 août) (Fig. 7.22).

La variabilité dans le temps des concentrations, suivant un rythme identique sur chacune des deux rivières (Volta Blanche et Kompienga), est un enseignement plus sûr fourni par ces études :

- à l'échelle de la crue, la valeur maximale se place toujours avant la pointe de débit liquide ; la capacité de transport n'étant jamais atteinte. Les débits en début de crue entraînent en effet un maximum de particules arrachées lors de la montée des eaux ou déposées lors de la crue précédente (Dumas *et al.*, p. 12) ;

- à l'échelle de l'hivernage, les plus fortes concentrations sont mesurées en début ou au milieu de la saison pluvieuse. Le maximum est ainsi de *2,08 kg/m³* le 8 août à Niaogho lors d'une crue pourtant modérée (débit moyen : 54 m³/s). Pour un écoulement quasi équivalent (60m³/s), la charge moyenne n'est plus que de 135 g/m³

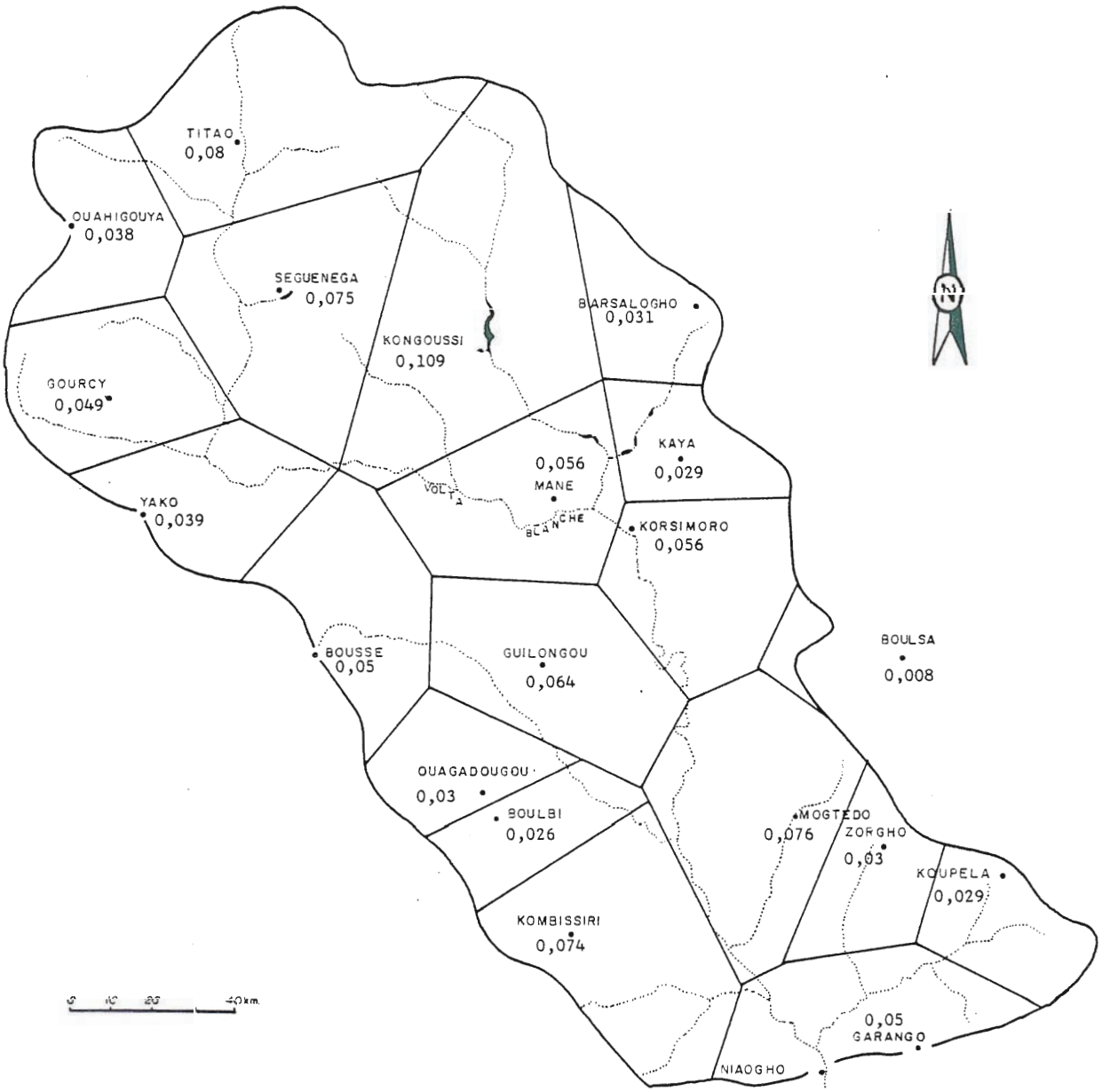


Fig. 7.22: Bassin versant de la Volta Blanche à Niaogho, polygones de Thiessen et coefficients.

le 18 septembre. Sur la Kompienga, la concentration maximale est observée le 21 juillet[1] : 2,68 kg/m³.

L'écart remarquable entre les tonnages annuels transportés en suspension par la Kompienga (+ 62%) et la Volta Blanche et plus encore le rapport des dégradations spécifiques (proche de 10) posent cependant un redoutable problème, d'autant que les méthodes de mesures sont les mêmes dans les deux cas. Différents facteurs explicatifs, qui conjuguent probablement leurs effets, peuvent être proposés selon nous :

1- Les pentes moyennes des deux bassins sont très sensiblement différentes, ce qu'illustrent bien les tracés des profils en long aux mêmes échelles (Fig. 7.23). La Kompienga représente en l'occurrence un cas d'espèce si l'on en croît la corrélation, établie par J.M. Grésillon et T. Métro[2], entre pentes moyennes et superficies des bassins versants ($Im = \frac{0,026}{\sqrt{S}}$), donnant une pente de 1‰ pour des bassins de l'ordre de 700 km². Cette pente relativement marquée et *régulière* serait susceptible d'assurer une meilleure continuité des transferts.

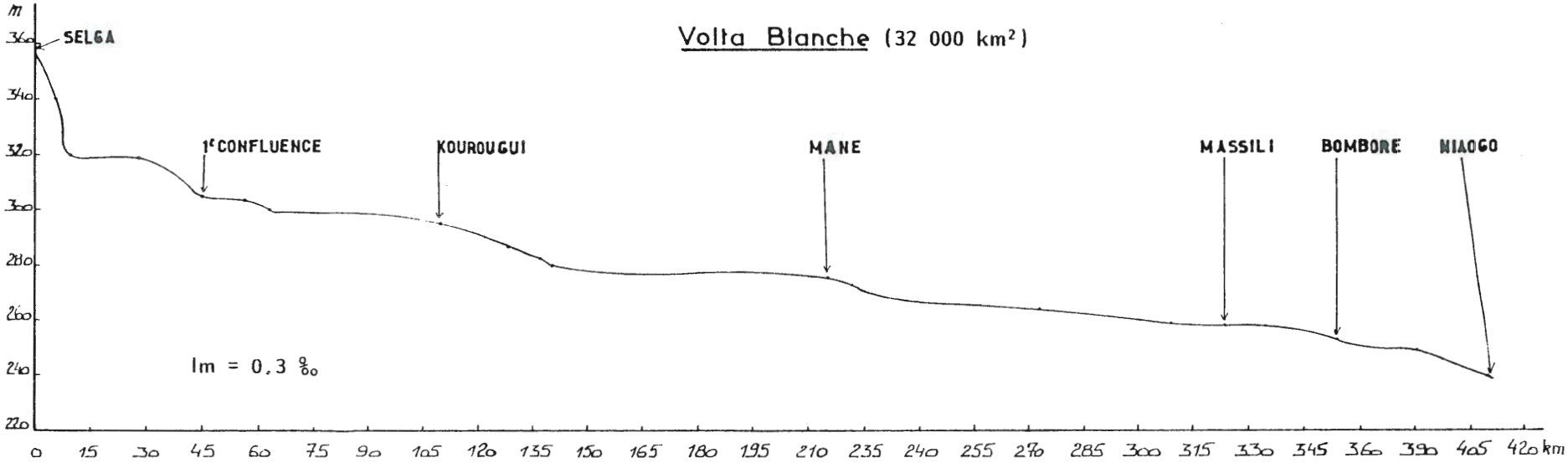
2- Dans le même ordre d'idées, il faut souligner l'existence de nombreuses retenues (près de vingt dans la seule région de Ouagadougou, dans un rayon de 25 kilomètres), voire de lacs naturels (à la traversée des collines birrimiennes), qui jalonnent le réseau de la Volta Blanche et provoquent incontestablement une sédimentation des particules, au moins les plus grossières (§ 7.2.1.2).

3-La couverture végétale dans son action de piégeage des matériaux - action déjà mise en évidence à l'échelle des parcelles ou des petits bassins - explique certes la baisse régulière des concentrations moyennes mensuelles sur chacune des deux unités mais pas l'écart constaté. La dégradation davantage marquée du bassin de la Volta du fait de son occupation plus dense, d'une position latitudinale plus vulnérable climatiquement, devrait conduire là, au contraire, à un

---

(1) *Les jaugeages n'ont d'ailleurs commencé que le 2 juillet à Tagou et le 3 août sur la Volta Blanche.*

(2) *Quelques aspects de l'hydraulique des barrages. Ministère de la Coopération. 1979, 74 p.*



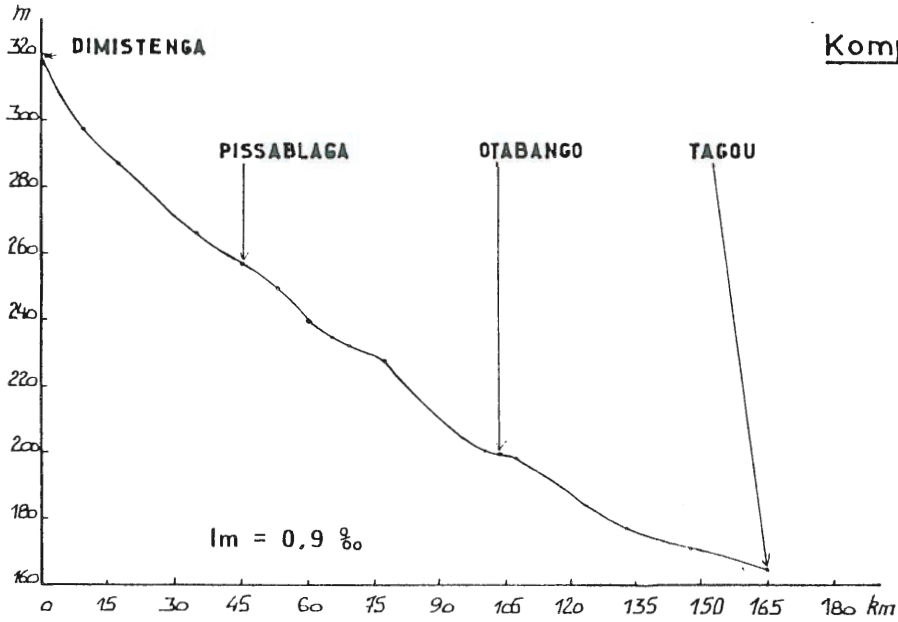


Fig. 7.23 : Profils en long de la Volta Blanche et de la Kompienga.

renforcement de l'érosion hydrique mécanique.

En fait, n'est-ce pas le "stock" de particules fines (argiles, limons fins), *les plus susceptibles de migrer sur de longues distances*, qui s'y trouverait réduit, au moins de manière relative ? La nature plus sableuse des sols, au moins sur la marge sub-sahélienne, joue incontestablement dans ce sens. L'ancienneté de l'érosion, son caractère sélectif entraînant l'apparition de mulchs de sables, pourraient renforcer cette opposition.

4- Les pluviométries relatives à chacune des deux années de mesures (1977 sur la Volta, 1980 sur la Kompienga) ne sont pas plus facilement comparables. En effet, le réseau d'observations est beaucoup trop lâche au sud-est du pays (3 postes). Tout au plus peut-on remarquer que le mois d'août est plus pluvieux sur la Kompienga (263,8 mm) que sur la Volta (190,3 mm).

7.3 : LA DEGRADATION DES SOLS A L'ECHELLE DES IMAGES SATELLITES.

En essayant d'évaluer l'impact de l'érosion à l'échelle des clichés satellitaires, il s'agissait pour nous de tirer parti, avec l'aide de spécialistes de la télédétection(1), de notre connaissance du terrain, capitale lors du choix de zones-test, et de suppléer à une étude stéréoscopique de photos aériennes, peut être plus sûre, mais très longue et inenvisageable en l'absence des prises de vues elles-mêmes. La télédétection devait nous permettre "de voir plus, plus vite" comme l'a écrit J. Pouquet, dès 1971. En fait, ce travail s'est heurté à une multitude de difficultés et nos résultats, présentés ci-dessous, sont critiqués du point de vue méthodologique. Les informations recueillies lors des campagnes de simu-

---

(1) Le traitement de deux images Landsat devait être effectué à Chambéry par la Société SFERES. Cet organisme ayant fermé ses portes alors que nous venions d'obtenir un financement local, il a fallu nous replier sur le CICG de Grenoble, où, malgré les efforts de J.P. Dedieu, chercheur au Laboratoire de la Montagne Alpine, le travail n'a pu être réalisé dans d'aussi bonnes conditions.

lation Spot et traitées par M. Dosso, J. Kilian et G. Savary (1983) sont beaucoup plus satisfaisantes, tout en ne couvrant qu'un secteur de 212 km² au sud de Bagré et de Tenkodogo, à proximité de la Volta Blanche.

7.3.1 : Les données de la simulation Spot dans la région de Bagré (Dosso *et al.*, 1983).

L'étude d'IBM-France avait pour but de situer graphiquement l'étendue des régions atteintes par les processus de dégradation et d'évaluer la circulation superficielle des eaux par le biais d'une analyse de la hiérarchie du réseau hydrographique. Ce travail a été précédé d'une mission sur le terrain en mars 1982, en pleine saison sèche tandis que le vol de simulation correspondait à la fin de la saison des pluies. Dix classes ou unités de paysages ont été distinguées selon les principes d'une classification supervisée et interactive. Deux autres ont été adjointes : celle des cultures diverses dont la nature n'a pu être précisée et une seconde correspondant à des intergrades entre cultures et sols nus.

La classe des sols nus et dégradés dominants est évidemment celle qui retient notre attention. Son extension est maximale derrière celle de la savane arbustive : 4830 hectares (contre 5210 ha), soit *22,8 % de la superficie de l'image*, tandis que *les cultures et jachères* (autres que le coton : 0,2%) n'en représentent que *2,2%*. A priori, ce pourcentage, qui doit faire une place aux cultures de mil et de sorgho largement dominantes, semble faible même si l'on tient compte de l'existence d'une classe dite "bas-fonds cultivés" et de l'intégration possible de cultures dans l'unité dite "savane arbustive" (cultures sous parc). En revanche, la proportion de terrains nus (dominants) paraît élevée compte-tenu de ce que nous savons sur les petits ou moyens bassins du centre du pays mossi. Ces sols nus sont situés largement en position de tête d'interfluves (Planche V, p. 22) beaucoup plus, en tout cas, qu'à proximité des grands axes du réseau hydrographique. Ce constat est inhabituel à la latitude de Ouagadougou ou plus au nord : à petite échelle, les images Landsat RBV[1] (17 janvier 1981 par exemple)[2]

(1) *Cameras video (Return Beam Vidicon), peu utilisées sur le Landsat 2.*
(2) *Vue n° 31049-09320.*

montrent bien l'occurrence des plus beaux couloirs de sols nus tout au long des principales vallées. Mais il est vrai que dans une région comme celle de Pô, plus comparable à celle de Bagré, nous n'avons pas retrouvé ce phénomène.

Les auteurs identifient en outre deux domaines (p. 22) : "au nord de l'image de Bagré, l'érosion est très liée aux cultures qui modifient la circulation superficielle ; la morphodynamique est généralisée et pelliculaire. Dans le sud, les processus de morphogenèse sont plus concentrés linéairement ; l'impact des cultures est moindre mais celui de l'élevage est probablement plus grand".

7.3.2 : Un essai d'estimation de l'extension des sols nus sur une image Landsat et le rôle du vent.

Les documents qui ont servi de base à l'analyse visuelle et statistique, conduite en collaboration avec J. P. Dedieu, résultent du traitement informatique de la scène 209-051, enregistrée le 6 novembre 1975 (début de saison sèche) par le radiomètre multi-spectral du satellite Landsat 2. Cette scène correspond au sol à un parallèlogramme de 185 x 185 km^2 (34 225 km^2), au nord-est de Ouagadougou(1). L'unité de résolution est de 79m x 56m : c'est le pixel, pour lequel le radiomètre fournit quatre valeurs moyennes du rayonnement solaire réfléchi, suivant quatre bandes de longueur d'ondes différentes.

En fait, une bonne partie des difficultés de l'analyse est venue de la possibilité d'utiliser un seul canal : MSS 7, dans le spectre du proche infra-rouge. Les trois autres (MSS 4 et 5 de la lumière visible, MSS 6) présentaient en effet un très important lignage et les corrections spectrales (de même que les corrections géométriques), prévues à la SFERES, n'étaient pas réalisables au C.I.C.G. Dès lors, la démarche classique d'une *véritable classification supervisée*, s'appuyant sur des combinaisons entre canaux, de même que l'utilisation d'index (index de brillance par exemple), étaient rendues impossibles.

La procédure a donc été la suivante : après une mise sur disque et un formatage permettant une visualisation des canaux bruts

(1) *Les limites sont approximativement : à l'est, le méridien origine ; à l'ouest, celui du lac de Bam ; au nord, les parallèles 13°40' N et 12°N.*

(M. Barret - C.I.C.G.), quatre sous-fichiers égaux (2340 lignes, 822 colonnes), codés f1 à f4, d'ouest en est, sont créés dans le canal MSS 7. Ces fichiers sont alors visibles sous forme compressée (1 pixel sur 16) sur un écran Tektronix 4 207, ce qui permet de repérer géographiquement des zones-test. Six régions en moyenne, d'une centaine de km^2 chacune, ont été retenues dans chacun des quatre fichiers (25 au total), constituant autant de fichiers-images mémorisés. Dans chacune de ces images de travail, la requête de visualisation interactive permet ensuite, toujours au moyen d'un réticule, de délimiter, dans les secteurs les mieux connus, des parcelles de sols nus, dont on peut vérifier l'intensité radiométrique à l'échelle du pixel. Ces sites représentatifs des sols nus sont alors extraits de chaque image de travail. La validité radiométrique de ces taxons est vérifiée par comparaison entre images, comme le montre la figure ci-dessous.

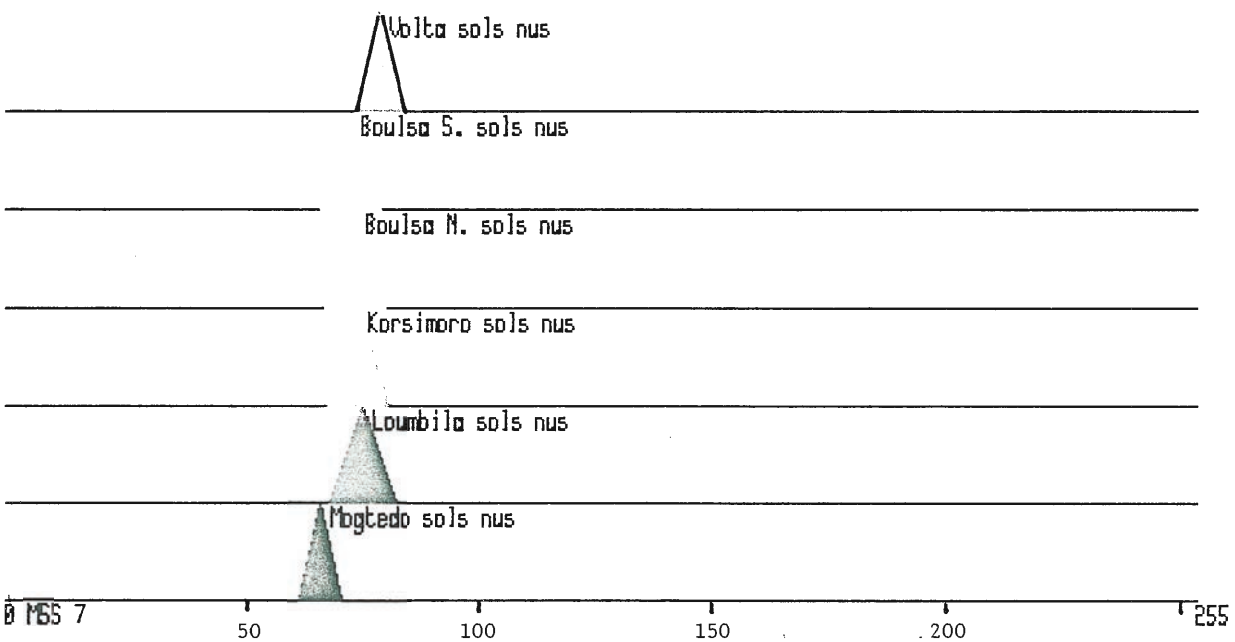


Fig. 7.24 : Comparaison radiométrique des taxons "sols nus" entre eux.

Le "taxon-type" le plus représentatif de l'état de surface "sols nus" présente les caractéristiques suivantes sur l'image traitée numériquement. Sa moyenne radiométrique est de 75 sur les 256 niveaux d'intensité de rayonnement électro-magnétique pouvant être perçus par le radiomètre, soit une réflectance de 29,4%. Le minimum est de 24,7% (niveau 62) ; le maximum de 34,1% (niveau 87).

Sur la base de ce qui peut être considéré comme une *analyse supervisée* (Bardinet, 1981) dans la mesure où elle intègre à l'examen des données de satellite la connaissance d'échantillons représentatifs, une classification (partielle) est tentée sur les sous-images (Loumbila, Mogtedo, etc...). Les résultats sont comparés à ceux obtenus par filtrage de l'histogramme des données brutes recentrées sur les fortes réflectances. Le pourcentage de sols nus sur l'unité de Loumbila (203 km²) est ainsi de *10,1%* d'après la classification et *10,4%* selon le filtrage automatique.

Les résultats généraux, relatifs à chacun des fichiers f1 à f4, sont les suivants :

Fichier	Pixels "sols nus"	Pourcentage de l'image (%)	Superficie (km²)
f1	238 511	12,4	1 062
f2	188 501	9,8	838
f3	251 975	13,1	1 123
f4	242 358	12,6	1 082
Scène entière	921 345	12,0	4 105

Tableau 7.21 : Estimation du pourcentage des sols nus sur une scène Landsat.

A l'échelle de l'image (34 225 km²), les sols nus couvriraient donc 12% du territoire. Il est à souligner que l'on retrouve là les pourcentages, perçus à une autre échelle, sur le bassin d'Imiga (10,2 à 11,5%). En revanche, la proportion est nettement inférieure à celle calculée dans la région de Bagré (Dosso *et al.*, 1983) ; nous reviendrons sur ce point.

L'écart est également peu important si l'on considère les différentes bandes longitudinales (f1 à f4). Seule, la bande f2, axée dans sa partie-sud sur la vallée de la Volta Blanche, moins occupée, présente un pourcentage de terres dégradées inférieur à 10%. En fait, les principales différences seraient à rechercher entre la moitié nord (ou le tiers septentrional, au moins à partir de la latitude du lac de Bam) beaucoup plus vulnérable et le reste de la région. Les contrastes de réflectance en ce sens sont très parlants sur la figure 7.25 encore que les tâches de sols nus forment de gros noyaux dans le sud, dans les zones de forte densité (région de Ouagadougou-sud de f1), ou des lignes le long des vallées et des principales retenues (rôle du bétail).

Il nous faut revenir à propos de cette opposition nord-sud sur le rôle du *vent* comme agent d'érosion et comme indicateur d'une sahélisation progressive du domaine des savanes. Cette action du vent est difficilement quantifiable, nous l'avons vu (§ 6.3.2), mais *son efficacité au sol, y compris dans la zone soudanienne, est évidente désormais* pour l'homme de terrain. Celle-ci se marque, au moins jusqu'à la latitude de Kaya (13°06' N), par une mobilisation des sables fins et des limons sous forme de *rides* que l'on est beaucoup plus habitué à voir en milieu aride ou semi-aride (Photo 15) !

Peut-être plus généralisable encore est l'arrachement de fines particules à la verticale des plaques de sols nus. La photo 16 illustre bien ce phénomène de déflation, qui ne peut être confondue avec le simple passage d'un tourbillon ponctuel et momentané dans le temps. Il existe peut-être même un lien entre cette érosion éolienne et des "topoclimats" sur lesquels on ne sait que peu de choses. Ainsi, la *direction* des dépressions birrimiennes, plus encore celles des plus grandes vallées[1] peuvent intervenir en canalisant les vents forts de saison sèche.

---

(1) L'orientation du réseau hydrographique joue un rôle peut-être plus important encore vis-à-vis des précipitations et notamment des lignes de grains, qui cheminent grosso-modo d'Est en Ouest. Toutes choses égales par ailleurs, c'est sur de courtes vallées orientées dans ce sens que le cumul des volumes ruisselés a le plus de chance de se produire.

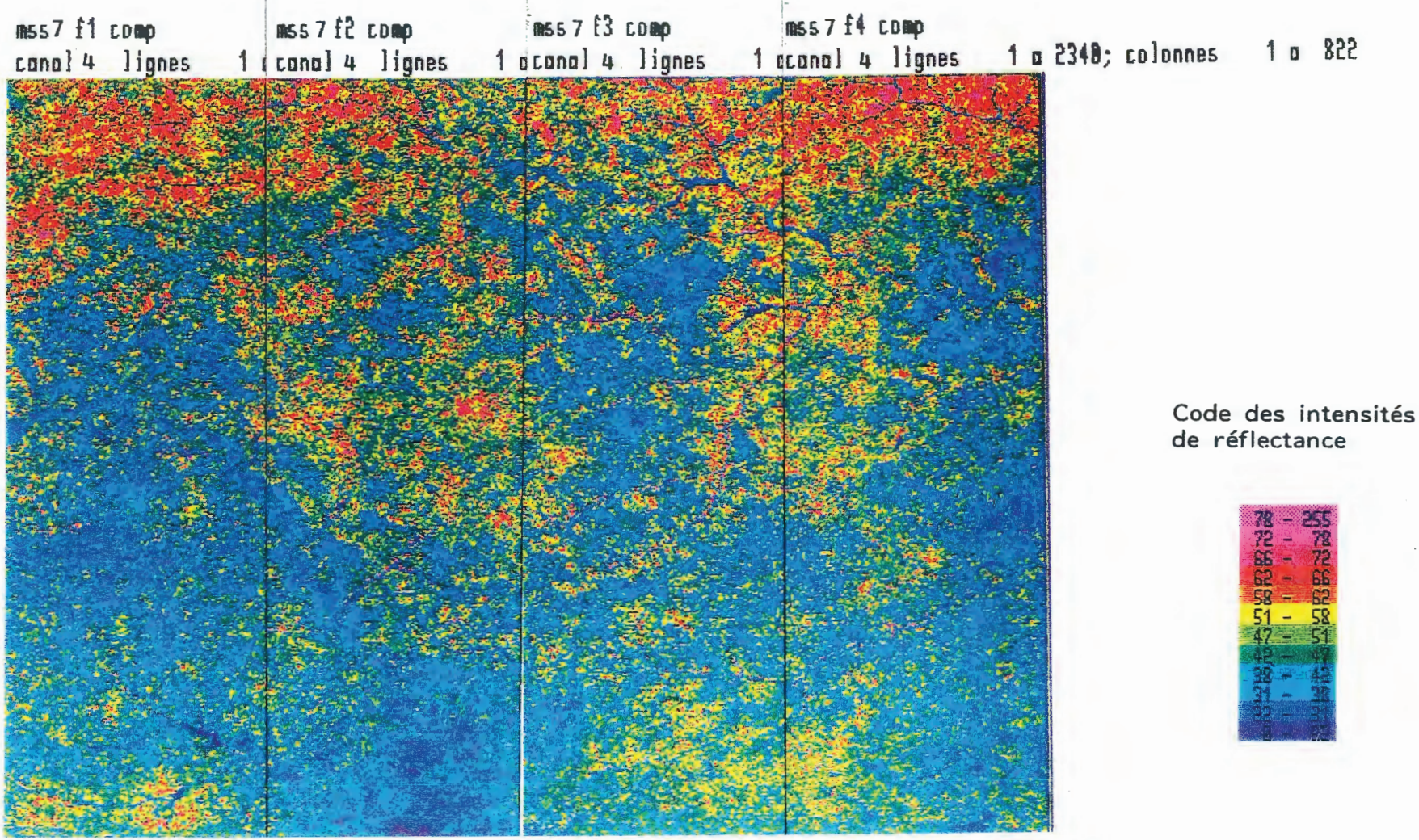


Fig. 7.25 : Les différentes intensités de réflectance sur les quatre fichiers (f1 à f4) de l'image Landsat

Cette action nous paraît d'autant plus possible que les plaques de sols nus, du moins celles qui sont en bas de versant, forment, du fait même de leur position, des *couloirs quasi continus*, visibles à grande (bassin d'Imiga) et surtout petite échelles (images MSS et RBV), sur lesquels le souffle du vent n'est pas entravé.

Conclusion :

L'extension des sols nus dans le domaine soudanien peut être raisonnablement fixée entre 10 et 20% du territoire. L'écart notable relevé entre les deux études peut tenir à des différences d'interprétation dans les limites de classe. M. Dosso *et al.* (1983) soulignent justement qu'en fait les intermédiaires existent et qu'on passe insensiblement des sols nus par exemple à une maigre savane arbustive ou herbacée. "C'est la caractéristique ... et la difficulté de ces paysages soudaniens". D'autre part, *la probabilité d'avoir un état de surface homogène diminue quand la résolution au sol augmente*. Il est en conséquence évident que bien des petites plaques de terrains dégradés sont prises en compte comme telles dans les pixels de Spot (20 x 20m^2) tandis qu'elles sont amalgamées avec d'autres couvertures sur l'image Landsat (60 x 80m^2).

Notons enfin à propos des régions birrimiennes (Kaya - Kongoussi), où les cuirasses affleurantes peuvent être estimées à 20% de la surface par analogie avec ce que l'on a calculé dans le secteur de Gaoua-Houndé (§ 5.2.3, p. 196), que les terrains à fortes contraintes représentent au moins 40% du paysage.

CONCLUSION.

Les recherches effectuées au Burkina Faso à l'échelle des bassins versants ne donnent qu'une estimation par défaut de l'érosion mécanique : le transport par charriage dans les rivières, le déversement occasionnel des fines aux déversoirs des barrages, les dépôts intermédiaires échappent aux mesures. Le regroupement des données antérieures et la collecte d'informations nouvelles à Imiga permettent toutefois de mieux cerner une dégradation spécifique relativement méconnue en milieu centre ou nord-soudanien.

Avec des valeurs généralement comprises, quelle que soit la taille du bassin versant, entre 50 et 100 tonnes/km^2/an, mais susceptibles de variabilité interannuelle (Imiga : 7 à 85 tonnes/km^2/an) ou spatiale, d'origine climatique ou anthropique, cette dégradation spécifique s'inscrit logiquement dans l'intervalle des données relatives aux contrées plus humides (sud-soudaniennes ou guinéennes) et sahéliennes (Frecaut, 1981 ; Lô, 1984). C'est au Cameroun, largement développé en latitude, que J.C. Olivry (1977) a le mieux illustré cette tendance croissante : entre la Sanaga moyenne à Nachtigal (4° 30' N) et le Tsanaga à Bogo (10°44' N), la dégradation passe en effet de 28 à 201 tonnes/km^2/an. L'exemple du Mbam, bassin similaire à celui de la Sanaga mais largement cultivé (67 tonnes/km^2/an) par les Bamilékés, rappelle ici aussi le poids du facteur anthropique. L'existence de variations parfois plus difficilement explicables (Volta Blanche) doit nous garder de tout esprit de systématisation.

La comparaison avec les données du continent asiatique (Fournier, 1969) n'est possible que sur la Thaïlande du Nord-Est peu montagneuse où la forêt claire est très dégradée(1), les sols cuirassés. Sur les bassins de la Mune ou de la Nam Chi, l'érosion est comprise entre 27 et 124 tonnes/km^2/an pour des unités variant de 800 à 5400 km^2.

---

(1) J. Boulbet (1982) : Evolution des paysages végétaux en Thaïlande du Nord-Est. Ecole Française d'Extrême-Orient. Vol. CXXXVI, 36 p.

La traduction de ces dégradations en tranche de terrain enlevé par an ou par siècle n'a pas de signification physique réelle puisqu'il s'agit d'un phénomène discontinu, notamment dans l'espace. L'importance absolue du ravinement a été soulignée en effet à toute latitude et aussi de manière relative, par rapport au décapage aréolaire, du moins sur le petit bassin d'Imiga. Elle concorde bien avec la corrélation linéaire simple observée, dans ce cas, entre débits liquides et débits solides puisque, sur les ravins, le rôle d'écran joué par la végétation est occulté.

En ce qui concerne les grands bassins, un bilan plus complet de l'érosion est proposé au niveau de la Kompienga plus représentative, en dépit de sa pente moyenne élevée, que la Volta Blanche barrée par de nombreuses retenues. Ce bilan reste hypothétique. On suppose en effet que :

1- Le transport de fond est égal à 25% du transport en suspension. Cela paraît un seuil minimum compte-tenu des proportions généralement admises (25 à 33%) et de l'extrême mobilité du fond du lit. Dans ce cas, le transport mécanique total s'élèverait à 455 000 tonnes pour l'année 1980.

2- Les bilans chimiques établis à l'échelle du bassin de la Volta (Meybeck, 1979, p. 238) sont transposables. Pour vérifier la validité de cette opération, on ne dispose en tout et pour tout que de *quatre* analyses chimiques partielles effectuées sur des eaux de la Kompienga (HER, 1980 a). Les moyennes pondérées des concentrations en ions Ca^{++} (6,6 mg/l), Mg^{++} (4,75 mg/l), HCO_3^- (39,3 mg/l) montrent une grande identité avec les valeurs avancées par M. Meybeck (Ca^{++}: 6,8 mg/l ; Mg^{++}: 4,1 ; HCO_3^-: 49 mg/l). Seul l'ion Cl^- présente une moyenne plus élevée (14,1 contre 3,2 mg/l). Les concentrations ionique (71,6 mg/l) et minérale (SiO_2: 14,4 mg/l) globales de l'auteur semblent donc utilisables. La charge dissoute est alors de 33 000 tonnes environ et le taux de dissolution spécifique de 6 tonnes/km²/an.

Le taux d'érosion (ou de dénudation) est égal à environ 90 tonnes/km^2/an ; la dissolution chimique ne représentant que moins de 7% de l'érosion globale à cette échelle, soit le double tout de même de ce qui est évalué à l'échelle des parcelles.

CHAPITRE VIII

LES TENTATIVES DE LUTTE ANTIEROSIVE

Les chapitres précédents ont mis en évidence la "sahélisation" progressive du domaine savanien, marqué par la persistance de la sécheresse jusqu'aux latitudes sud-soudaniennes et sa vulnérabilité croissante vis-à-vis d'un climat, dont l'agressivité demeure potentiellement élevée par ses précipitations extrêmes ou est même renforcée dans sa dynamique éolienne. La surexploitation inéluctable des terres par un système agraire extensif, chargé de nourrir une population beaucoup plus nombreuse qu'au Sahel proprement dit et en accroissement permanent, fragilise plus encore la couverture végétale, arborée et surtout herbacée, qui conditionne la stabilité de ce milieu.

La protection du potentiel agricole doit être ainsi considérée comme une urgence pour enrayer un déficit alimentaire devenu chronique dans les pays soudano-sahéliens. Pour cela, une politique en faveur de l'agriculture doit être conduite en associant une recherche de caractère technique, à finalité agronomique ou écologique, et des incitations ou réformes sociales, économiques, foncières au moins aussi importantes. Certaines caractéristiques humaines ou économiques de ce monde rural, dont l'examen ne relève pas fondamentalement de notre sujet, sont cependant évoquées parce qu'indissociables des contraintes techniques.

C'est dans une optique chronologique que nous verrons comment les acteurs de la lutte antiérosive, *paysans et aménageurs, agissant de manière séparée puis plus ou moins concertée* ont abouti à des méthodes de conservation de l'eau et des sols relativement variées[1].

(1) *Ce chapitre reprend et complète un exposé fait à Bondy, en septembre 1985, publié en 1986 dans les Cahiers de l'ORSTOM (n° 2).*

8.1 INITIATIVES PAYSANNES ET METHODES TRADITIONNELLES.

Ces méthodes traduisent là, comme sous d'autres latitudes, le fait que la lutte antiérosive a été tout d'abord le fruit d'une perception, par les paysans eux-mêmes, de la dynamique du milieu naturel. La très grande majorité des dispositifs observables aujourd'hui témoigne ainsi de la volonté d'un individu ou d'un groupe de mieux maîtriser, à un moment donné, cette dynamique.

Par ailleurs, quelques réalisations, plus ponctuelles et récentes mais faisant appel aux mêmes techniques, sont le fruit d'une initiative extérieure, d'une organisation non gouvernementale le plus souvent, qui tente de perfectionner des procédés déjà connus.

Les pratiques de conservation des agricultures traditionnelles peuvent être de deux types : mécaniques ou biologiques. Les premières sont suffisamment diffuses à travers le territoire pour avoir été citées par bon nombre d'auteurs (Kaboré, 1982).

8.1.1 : Les procédés mécaniques.

Ils correspondent à des techniques simples, basées sur l'utilisation de matériaux locaux, disposés en petits barrages et destinés à dissiper l'énergie des eaux de ruissellement. Il s'agit de :

- *La mise en place d'alignements de blocs de cuirasse ou rocheux*, grossièrement perpendiculaires à la pente, sur les champs eux-mêmes le plus souvent, ou bien, hors des terres de culture, sur des rigoles d'écoulement concentré ou des plaques de ruissellement intense. Ces aménagements se rencontrent à proximité d'affleurements cuirassés, principalement dans les régions birrimiennes, plus rarement dans des secteurs à substratum granitique, sur des hauts de versants ou des convexités de bas de pente.

A ce souci de protection des sols peut se superposer celui d'une extension des terres de cultures notamment sur les pentes fortes des reliefs résiduels birrimiens ou granitiques. Dans ce cas, la mise en

place des cordons de pierres va de pair avec la constitution d'une terrasse d'épierrement ; leur occupation répondant soit à "une expansion pionnière récente" (Billaz, 1980), à la périphérie de terroirs saturés, soit à un repli ancien sur des sites de défense. Ainsi, dans les collines migmatitiques de Tiébélé (Mietton, 1980, p. 60 et 1981), au sud du pays, les terrasses remodèlent l'ensemble du versant comme elles le font dans cet autre bastion qu'est le pays Kabré, au nord du Togo (Enjalbert, 1956). Près de Tiébélé, dans un milieu apparemment ingrat, les murettes (pissina) sont encore reconsolidées chaque année et le paysan a le souci de boucher les orifices entre les pierres avec les fanes d'arachides ou les herbes sarclées.

La multiplication des alignements de blocs de cuirasse est liée à trois atouts : leur facilité d'édification, d'implantation et leur efficacité.

Facilité d'édification : les blocs épars sont ramassés comme tels plus qu'ils ne sont cassés dans la masse, puis transportés sur de courtes distances sans trop de dépense d'énergie, d'autant que l'aménagement d'un versant peut se faire sans contrainte sur plusieurs années.

Facilité d'implantation : d'une part, la matérialisation au sol d'une courbe de niveau n'est pas nécessaire et, d'autre part, l'alignement peut être de longueur limitée, à l'échelle de la parcelle, à l'inverse des banquettes de diversion qui se superposent à un parcellaire foncier que l'aménageur ne voit pas.

Efficacité : les objectifs du paysan sont en effet atteints dans la mesure où les écoulements ne sont pas stoppés, ni même détournés, mais ralentis. Le barrage conserve une grande porosité qui évite les ruptures brutales et assure une alimentation en eau complémentaire, à partir des impluviums-amont, lors des années sèches. En cas de débordements, les blocs dépassent généralement la compétence du ruissellement, hormis au pied des reliefs résiduels (collines birrimiennes, buttes cuirassées). L'entretien de ces diguettes en pierre n'exige en conséquence que peu de temps : 3 ou 4 jours/ha/an (Reij, 1986) qui s'insèrent facilement dans le calendrier agricole de la saison des pluies ou, sans fatigue excessive, durant la saison chaude et sèche. Cette fa-

cilité d'entretien, dans un monde rural qui dispose de peu de moyens matériels, détermine à son tour une durée de vie prolongée. Les alignements observés à Imiga, au pied de la butte cuirasse occidentale, ont 50 ans d'âge environ ; des atterrissements de sable et de limon se sont constitués en amont. Une végétation spontanée du cordon s'est produite par piégeage des graines entre les cailloux (Photo 1).

- *Le clayonnage et le fascinage*, à base de branchages et surtout de tiges de mil, plus ou moins liées en fagots et s'appuyant sur des piquets fichés en terre ou des cailloux, conservent les mêmes qualités techniques de facilité d'implantation et de porosité. Ces matériaux peuvent se substituer aux pierres là où elles font défaut (Savonnet, 1960, p. 39). Toutefois, à l'inverse des blocs, il s'agit de matériaux peu durables, largement consommés par les termites. C'est probablement la raison d'une diffusion bien plus faible de ce procédé à travers le pays. Da (1984, p. 182) la signale en pays lobi où les paysans apprécient peu la monoculture du coton qui, après récolte, ne laisse rien pour assurer la protection du sol.

- *Les plantations d'espèces locales* comme les euphorbes (*Euphorbia balsamifera*) ou les andropogonées (*Andropogon gayanus*) font également partie de l'arsenal des techniques paysannes. Mais les premières sont rares hormis quelques points en régions subsahéliennes où elles s'opposent également à la déflation éolienne. Les paysans estiment que l'euphorbe est nocif pour les plants de mil (Marchal, 1983, p. 837) ; ses boutures ne résistent pas toujours aux termites. En revanche, les haies d'andropogonées sont au moins localement très nombreuses, mais utilisées, il est vrai, dans une optique de démarcation foncière. Elles n'en constituent pas moins un réseau serré de lignes contrariant le ruissellement et bien visibles sur photos aériennes (région de Zorgho par exemple).

La transplantation d'espèces à fort enracinement telles que *Vetiveria nigritana*, dont les grosses touffes poussent spontanément dans les bas-fonds, correspond à une pratique, semble-t-il peu courante, observée dans le sud du pays (Mietton, 1981, p. 59). Ces espèces

hygrophiles, transplantées à partir de juillet, sont disposées sur les ravineaux de bas de versant (Photo 2) où elles freinent l'érosion régressive tout en réduisant les apports de sable et de graines dans les bas-fonds cultivés.

Les bas-fonds eux-mêmes peuvent être l'objet de tentatives d'aménagement, en pays lobi par exemple (Da, 1984, p. 183). Mais les contraintes hydrauliques sont évidemment plus fortes et les réalisations plus rares que sur versant. L'ingéniosité de certains mérite d'autant plus d'être soulignée : ainsi à Tampinko (Kombissiri)[1] dans le centre-sud du pays mossi, un paysan et sa proche famille ont transformé une plaine inondable en un terroir rizicole de 5 hectares environ où la maîtrise de l'eau est assurée par une série de bourrelets et surtout une digue principale avec un système de buses remarquablement implantées, veritablement inventées dans leur géométrie, leur système de protection contre l'affouillement (parpaings et grillage à l'aval de la prise d'eau) et d'ouverture graduelle à l'aide de deux pierres plates seulement. La précision de l'implantation réalisée par ce paysan, qui n'avait jamais observé auparavant pareil dispositif, a été confirmée a postériori par un levé topométrique des services de l'Hydraulique (HER) qui a apporté son aide pour la réalisation d'un bas-fond dit amélioré (Fig. 8.4). Cet exemple d'ingéniosité illustre la nécessité pour l'aménageur d'être toujours à l'écoute du monde paysan.

8.1.2 : Les pratiques biologiques et les façons culturales.

Ce ne sont pas à proprement parler des aménagements mais ces pratiques doivent être rajoutées à la gamme des techniques traditionnelles du fait de leur aspect tout aussi bénéfique, sinon davantage, que les procédés mécaniques. Elles ne traduisent toutefois pas forcément une perception nouvelle, une volonté supplémentaire d'enrayer une dégradation chimique des sols mais correspondent plus sûrement à une tradition agricole, d'ailleurs changeante d'un groupe ethnique à un autre, aux avantages multiples et inégalement perçus par le paysan.

- *Les cultures associées* sont significatives à cet égard et re-

(1) *Les noms de lieux cités dans ce chapitre* VIII *sont localisés sur la figure 8.1.*

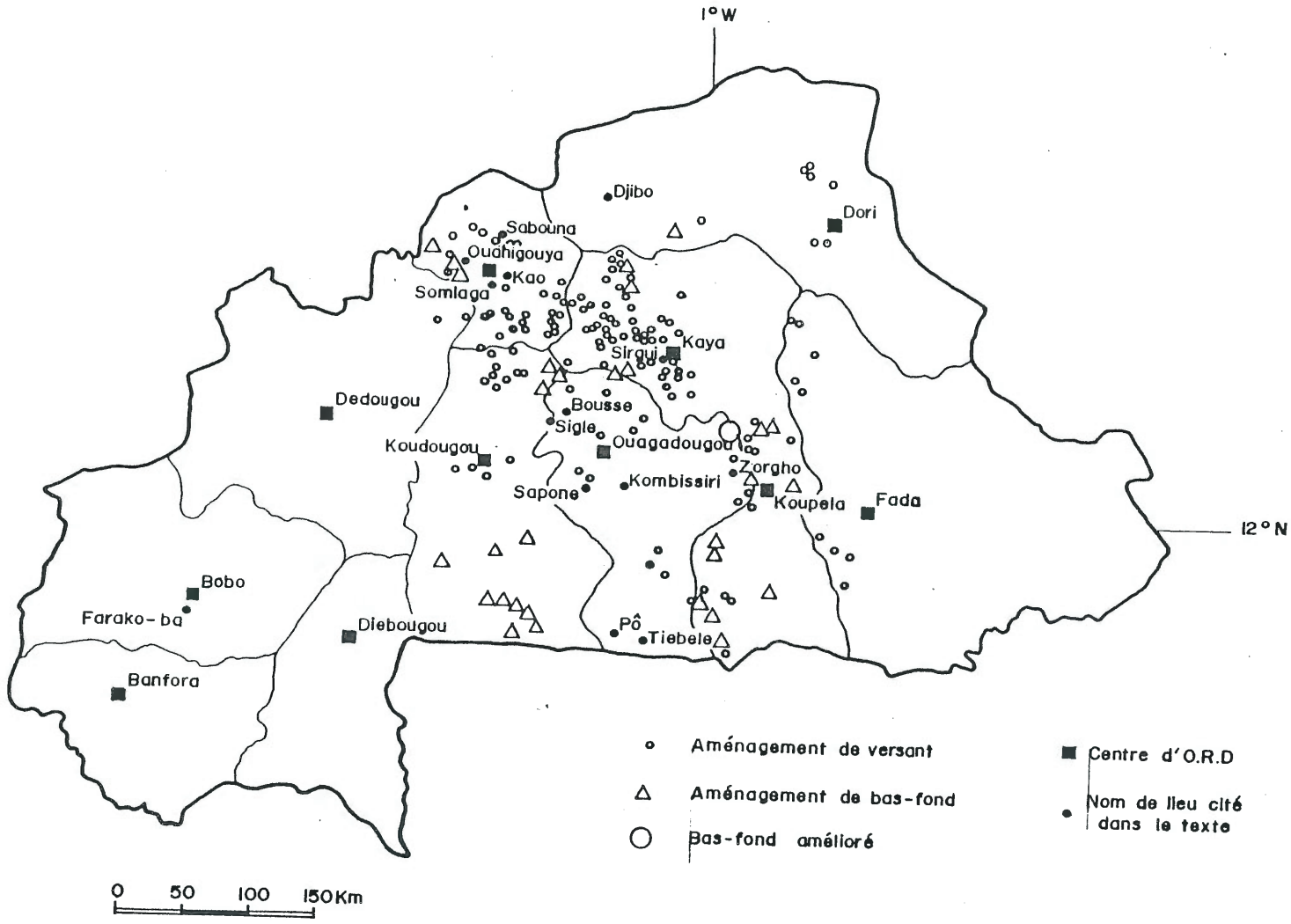


Fig. 8.1 : Carte de localisation et exemple de distribution des aménagements antiérosifs (Campagne F.D.R. : 1979-1980).

présentent le type même de pratique positive due aux seuls agriculteurs, qui ont largement devancé les aménageurs. Ce n'est que depuis une date relativement récente que des instituts, comme l'ICRISAT, ont reconnu les avantages des cultures associées, combattues du temps de la colonisation parce que soupçonnées d'entraîner une baisse des rendements. Ces avantages, dont les paysans n'ont pas eu conscience d'emblée dans leur totalité, sont en effet multiples :

. sur le plan agronomique, l'association mil-niébé, prise à titre d'exemple très largement répandu au Burkina Faso, se traduit par une hausse des rendements de haricots, liée à une diminution de l'évaporation sous les céréales. Au niveau des enracinements, il n'y a pas compétition car celui du mil est potentiellement plus profond. Le niébé est en outre un bon fixateur d'azote. Mais surtout, pour le paysan, l'association de cultures offre une meilleure protection contre un échec complet des récoltes pendant les années sèches et une augmentation des rendements pendant les bonnes saisons.

. sur le plan morphodynamique, l'effet bénéfique est indéniable. Le niébé est une plante rampante qui couvre bien le sol(1), freine le ruissellement et piège les particules transportées. Da (1984, p. 180) estime à 50%, sur des parcelles témoins de $4m^2$, le taux de couverture du sol dans le cas d'une association sorgho-niébé, 75 jours après le semis, contre 30% seulement sous sorgho seul. Sur notre parcelle cultivée de Pô-Banon, nous avons vu que cette même association est l'une des explications à la faiblesse du ruissellement et de l'érosion pendant quatre années (Chap. VI, p. 246).

- *Le recours au paillage* - qu'il s'agisse de graminées ou de résidus de cultures - représente également une pratique bénéfique (Roose, 1971, p. 9) puisqu'elle diminue la déflation en saison sèche, l'érosion pluviale sous les premières lignes de grains redoutables, piège

---

(1) Cet effet de couverture lié à la nature de la plante cultivée est mis en évidence par R. Christoï (1966, p. 532) à propos des mesures d'érosion faites à Niangoloko entre 1956 et 1961. L'auteur note que, pour des volumes ruisselés équivalents, l'érosion sur parcelle d'arachide ne représente que 75% de la valeur sous culture de mil.

l'eau de ruissellement et limite son évaporation, favorise enfin la vie microbienne dans le sol et sa nutrition minérale et organique. Une telle gamme de bénéfices fait d'ailleurs du *paillage l'arme antiérosive (au sens le plus large) la plus efficace en même temps que relativement accessible*. Cette pratique apparaît en effet inégale suivant les régions et plus encore à l'intérieur d'un même terroir. A l'échelle des régions, l'enlèvement des tiges de mil après récolte est d'autant plus impératif que la période de soudure est plus difficile pour le bétail. C'est le cas actuellement dans la région sub-sahélienne du Yatenga, où P. Dugue (1984) a montré que cette pratique du ramassage des pailles, voire leur stockage, est assez récente et liée à l'insuffisance des fourrages arbustifs et de la vaine pâture.

A l'échelle du terroir, le ramassage commence sur les champs permanents, à proximité de l'habitat. Les tiges de mil, de sorgho ou de maïs sont utilisés à des fins domestiques, comme matériau de construction (nattes pour la toiture, les clôtures) ou comme source d'énergie (1 kg/jour en moyenne d'après Dugue) pour la cuisine mais aussi le chauffage, ce qui renforce le caractère précoce et néfaste du ramassage. Le paillage peut être davantage pratiqué sur les champs de brousse, dont la distance conditionne, au moins partiellement, les possibilités de transport des tiges. Dans la région de Zorgho (Imiga), des paysans coupent des graminées sèches pour les déposer en un tapis serré, notamment sur des champs de bas de versant (Photo 3). A proximité de Kombissiri, T. Zoungrana (1985, p. 72) note que c'est une pratique courante de couvrir de branchages les plaques de sols dénudés afin de les ameublir. Dans tous les cas, le souci principal paraît être la conservation de l'eau, secondairement l'apport organique.

La fumure représente une préoccupation comparable, à travers différents procédés liés notamment à la nature des rapports entre éleveurs et cultivateurs, mais son emploi reste aléatoire dans l'espace et dans le temps.

Il faut souligner enfin les interractions entre ces différentes pratiques qui aboutissent, au moins dans certains cas, à un cumul des effets négatifs. C'est ainsi que dans les régions où le milieu est le plus

dégradé, le bois faisant défaut, le ramassage des pailles est tout à fait nécessaire. Dès lors, le parcage des animaux sur ces mêmes champs devient de peu d'intérêt pour l'éleveur.

- *Les techniques de sarclage*, quant à elles, s'opposent plutôt d'une région à l'autre ou, à l'intérieur d'une même région, suivant l'appartenance ethnique ou la force de travail de l'unité de production.

Dans le centre-nord du Yatenga, seuls les Têngbïïse et les Saaba pratiquent, au moins ponctuellement, le buttage intercalaire (débuttage) le plus apte à enrayer la dégradation des sols. Les Mossi, dans le même secteur (Marchal, 1983, p. 440) ou dans d'autres provinces (Kohler, 1971, p. 90 ; Lahuec, 1980, p. 47) se contentent de sarclages à plat et éventuellement d'un buttage sommaire en fin de cycle afin d'éviter la verse.

Bien souvent, les paysans doivent d'abord prendre en compte leur force de travail et son corollaire le temps de travail. Ainsi, à Komsilga, dans la région de Saponé au sud-ouest de Ouagadougou, les travaux se succèdent de la manière suivante : aux premières pluies, des lignes sont tracées dans le sens de la pente, perpendiculairement aux anciens billons, encore visibles et parallèles aux courbes de niveau. Le semis s'opère aussitôt suivant ces lignes et, plus précisément, sur chaque billon recoupé. L'avantage, selon les cultivateurs, est la conservation d'une dénivellation entre l'herbe, qui pousse dans les creux plus humides, et le mil, qui ne risque pas d'être étouffé sur la butte. Dès que ce dernier a atteint une certaine hauteur, un premier labour, toujours dans le même sens, permet d'égaliser le sol. Ce n'est que dans un deuxième temps (août) qu'un nouveau labour, perpendiculaire à la pente, est effectué, reconstituant les anciens billons. Cette façon d'opérer permet aux villageois d'éliminer deux ou trois opérations par rapport à la méthode préconisée par les encadreurs de l'O.R.D.(1) : un labour, parfois possible, de fin d'hivernage, en grosses mottes pour lutter contre la déflation éolienne ; un hersage puis un rayonnage.

---

(1) *Organisme régional de développement.*

Cette volonté[1] ou cette nécessité de limiter les travaux place les cultivateurs sous la menace des ruissellements fréquents en début d'hivernage, sous de fortes intensités instantanées, et exacerbés par ces façons culturales conduites dans le sens de la pente. Interrogés à ce sujet, les paysans de Komsilga nous répondent que ces premières averses, sur un sol non engorgé, ne sont pas les plus redoutables. Ceci ne nous paraît vrai, malheureusement, qu'en deçà d'un seuil d'agressivité qui est souvent dépassé.

En résumé, ces techniques conservatoires, mécaniques ou biologiques, méritent d'être bien connues et encouragées par les cadres du développement rural (Debazac *et al.*, 1983). Elles apparaissent en effet variées dans leur simplicité et *surtout bien adaptées aux contextes physique et socio-économique*. Elles expriment en outre la capacité et la volonté d'une partie au moins du paysannat de résoudre par lui-même ses problèmes.

Cette volonté est cependant plus ou moins marquée dans l'espace et dans le temps. L'hypothèse faite par Kohler (1971, p. 75), pour l'Ouest-mossi, d'une relation entre l'extension de ces aménagements et le manque de terres ne peut être étendue à l'ensemble du pays. C'est en effet, dans le Sud-Ouest, en pays Bwa notamment, où l'espace ne fait pas défaut aux cultivateurs, que ces derniers combattent le plus efficacement les méfaits du ruissellement (Savonnet, 1960). Dans l'ensemble du pays Mossi et à l'heure actuelle, il ne nous semble pas que les initiatives spontanées d'aménagement soient plus perceptibles comme si, au-delà d'un certain seuil de pression dans l'occupation d'un espace dégradé en outre par la sécheresse, les paysans avaient opté définitivement pour d'autres solutions économiques, l'émigration en particulier.

---

(1) *Communication orale de M. Z. Zongo à l'O.R.D. de Ouagadougou (octobre 1981).*

8.2 : INITIATIVES EXTERIEURES ET PARTICIPATION PAYSANNE.

Les pouvoirs publics ont été instruits dans leur démarche par l'expérience malheureuse de l'opération Geres-Volta, conduite dans la région de Ouahigouya entre 1962 et 1965. L'histoire de ce périmètre a été retracée dans le détail par J.Y. Marchal (1979). L'intervention, totalement imposée de l'extérieur et ne prévoyant que trop tardivement une sensibilisation auprès des populations locales, s'est soldée par un échec technique et psychologique, malgré ou plutôt à cause des moyens énormes mis en oeuvre (1500 manoeuvres recrutés localement mais attirés par les seuls salaires, 85 topographes, 15 bulldozers), pour traiter 120 000 hectares en banquettes et fossés antiérosifs. De cette opération coûteuse ne subsistent aujourd'hui que les retenues ou bien, de manière significative, que les seuls ouvrages modestes comme des murets de pierre (dont la durée de vie sur plus de 20 ans est ainsi confirmée) ou des "demi-lunes", sortes de cuvettes de 2 mètres de rayon, limitées par des bourrelets de 40 centimètres de hauteur, ouvertes à l'amont aux eaux de ruissellement donnant au mil une meilleure croissance. On remarquera à propos de ce dispositif, qui a survécu à Somiaga par exemple (Sud-Yatenga), qu'il traduit une fois encore la nécessité et le souci pour le paysan d'améliorer l'alimentation en eau en tirant parti du ruissellement.

A partir du début des années 1970, bénéficiant de l'expérience acquise dans le cadre d'expérimentations ponctuelles ("Opération Terroirs"), les pouvoirs publics inscrivent la lutte antiérosive dans le cadre de programmes plus vastes conduits par deux organismes, le Fonds de Développement Rural (F.D.R.)[1] et l'Autorité pour l'Aménagement des Vallées des Voltas (A.V.V.), dont les objectifs et les méthodes d'intervention sont bien différents. L'A.V.V. a en effet pour tâche la mise en valeur de terres nouvelles réputées fertiles et libérées de l'onchocercose tandis que le F.D.R. est chargé du financement de projets

---

(1) Depuis 1984, le F.D.R. a pris le nom de Fonds de l'Eau et de l'Equipement Rural (F.E.E.R.).

agricoles plus modestes, susceptibles d'améliorer les conditions de vie dans les terroirs traditionnels. Tandis que, dans le premier cas, la lutte antiérosive ne représente qu'un élément d'une politique d'aménagement global du territoire que nous ne pouvons étudier ici, elle constitue, dans le second, le domaine d'activité le plus préoccupant, le plus important par la mobilisation de la population et son implication financière.

8.2.1 : Les réalisations des organismes publics.

8.2.1.1 : Les types d'aménagements.

a- Les aménagements de versants :

Dans les périmètres de l'A.V.V., l'aménagement s'effectue en bandes de cultures de 100 mètres, disposées perpendiculairement à la pente et séparées par des bandes de végétation intercalaires de 10 mètres. Cette méthode des bandes d'arrêt, testée avec succès en Côte d'Ivoire, au Niger (Allokoto) ou au Burkina (Farako-Ba) réduit les pertes en terre au dixième et le ruissellement au tiers environ des valeurs correspondantes sur parcelle témoin (Roose et Bertrand, 1971 ; Delwaulle, 1973 ; Roose, 1974 et 1975). Elle apparaît en outre bien adaptée à cette volonté de modeler un espace nouveau dans lequel il est possible de fixer un premier cadre cadastral. Les réalisations portent sur 24 500 hectares aménagés entre 1974 et 1983.

Les aménagements de versants du F.E.E.R. consistent en une édification, le long des courbes de niveau, de banquettes de terre, de section trapézoïdale, hautes de 50 centimètres, distantes de 25 mètres sur une pente de 2% et dont la trace au sol (3,5 mètres environ) n'est pas excessivement contraignante mais non négligeable. Cette emprise est par exemple de 6,2 à 10,2% de la superficie totale sur les quatre aménagements étudiés ci-dessous (Tableau 8.3).

Cette méthode des terrasses de diversion, mise au point par Bennet (1939) aux Etats-Unis, est utilisée ici dans une double perspective : freiner l'eau et favoriser l'infiltration (Reeb, 1979).

La vitesse de ruissellement est évidemment diminuée par les bourrelets construits le long de courbes de niveau ou caractérisés par une faible pente transversale (0,2%). Le tracé au sol de ces ouvrages doit donc être préalablement piqueté par une équipe de topographes, dont le travail conditionne, on le conçoit, le devenir de l'aménagement mais le "sans-faute" n'est pas évident sur un tracé dont la longueur cumulée est de l'ordre de la dizaine de kilomètres. Une deuxième intervention extérieure correspond à la matérialisation de ces lignes par une unité motorisée (tracteur et charrue à disque). Les diguettes peuvent être alors élevées par les paysans eux-mêmes, avec du matériel fourni par l'office, servant à compacter la terre en couches successives.

L'ensemble de ces banquettes réalise des systèmes dits de diversion, car les eaux en excès sont évacuées vers des exutoires naturels préexistants ou artificiels et mis en place tous les 100 à 200 mètres. Les ouvrages à absorption totale, avec diguette de ceinture, ont été en effet délaissés dès 1976-1977 du fait de leur fonctionnement défectueux, y compris sur des parcelles de taille limitée comme on l'a vu précédemment (Chap. VI, p. 239). Dès 1980, préoccupé d'établir un premier diagnostic(1), alors même que les aménagements se multipliaient, nous avons cherché à quantifier, de manière directe et indirecte, les gains à l'infiltration :

- l'amélioration de la recharge en eau d'un puits situé sur un site aménagé (Komsilga) ne constitue qu'un premier indice ;

- une augmentation des rendements en paille (Tableau 8.1) et en grain (rapport de 1,42) est observée par D. Sanou (1981) à Sirgui, près de Kaya, durant l'hivernage 1980 (540mm de pluies).

---

(1) *Nos enquêtes, conduites avec l'aide de D. Sanou (1981) mais limitées dans le temps et naturellement très perfectibles, ont été les premières à notre connaissance, avec celles de B. Dabiré (1980), à tenter d'évaluer, par comparaison entre parcelles, les bénéfices éventuels des terrasses construites par le F.D.R.*

Parcelles	P.P.	C.T.	P.P.	C.T.	P.P.	C.T.	P.P.	C.T.
Date	22.07.1980		22.08.1980		26.09.1980		10.10.1980	
Hauteur moyenne en cm	1,0	2,8	21,4	14,8	156,1	70,5	175	101
Nombre de pieds de mil (sur $4m^2$)	26	16	25	14	21	10	21	6

Tableau 8.1 : Croissances comparées des mils sur parcelle protégée (P. P.) et champ traditionnel (C.T.) à Sirgui (1980) *in* D. Sanou (1981).

- une augmentation des taux d'humidité, quelles que soient la profondeur ou la position entre les deux diguettes (Tableau 8.2), est également enregistrée à Sirgui (11 journées de mesures entre le 5 juillet et le 10 octobre) tout comme à Sabouna (Dabiré, 1980, p.50).

Localisation / Profondeur	A	B	C	C.T.
0 - 10 cm	10,6	9,4	9,6	8,6
10 - 20 cm	13,6	11,7	11,8	10,3
20 - 30 cm	14,3	12	13,7	11,1

Tableau 8.2 : Moyennes des teneurs en eau (en %) comparées sur champ traditionnel (CT) et aménagement antiérosif (A,B,C, avec A à 3m du bourrelet-amont, C à 3m du bourrelet-aval et B au milieu), à Sirgui, en 1980.

Sur les deux sites, on constate que l'humidité du sol est toujours la plus forte en amont (A) ; ceci est confirmé neuf fois sur dix si l'on considère les valeurs journalières et non plus les seules moyennes. La partie supérieure de l'intervalle entre deux bourrelets ne souffre donc pas d'un déficit relatif en eau mais bénéficie au contraire,

selon nous, d'une infiltration différée sous la banquette amont. De ce point de vue, l'intérêt serait donc de rapprocher les terrasses (Roose, 1986) mais ceci poserait d'autres problèmes : humains, économiques et fonciers (Mietton, 1981, p. 65).

Deux éléments d'information permettent une meilleure appréciation des résultats obtenus à Sirgui : l'aménagement, de deux ans d'âge au moment des mesures, est relativement bien entretenu et fonctionne bien durant les années sèches d'observation (Photo 4) ; en revanche, les façons culturales ne sont pas conduites parallèlement aux courbes de niveaux.

Si l'on s'en tient aux demandes d'intervention émanant des groupements villageois auprès des organismes régionaux de développement (O.R.D.) et du F.D.R., le succès semble en tout cas acquis. Plus de 47 000 hectares sont aménagés entre 1977 et 1985 ; le rythme des réalisations passant de 450 à 9300 hectares par an. L'examen détaillé de ces données permet toutefois de relever un plafonnement à 7500 hectares entre 1982 et 1984 et, d'autre part, un déplacement du centre de gravité de cette politique d'aménagement à l'échelle territoriale. En effet, alors que le Yatenga bénéficie jusqu'en 1983 du plus grand nombre de réalisations (Fig. 8.1), la majorité (42,8% en 1984 puis 34,3% en 1985) des aménagements antiérosifs de versants est implantée depuis lors dans l'O.R.D. de Koudougou. Ces modifications sont peut-être les indices de certaines difficultés rencontrées par le F.D.R. et sur lesquelles nous aurons à revenir.

Le coût de ces réalisations est heureusement peu élevé et diminue même dans le temps, passant de 160 000 CFA par hectare en 1979-80 à 22 000 CFA par hectare en 1984-85. Le travail des villageois n'est en effet pas rémunéré.

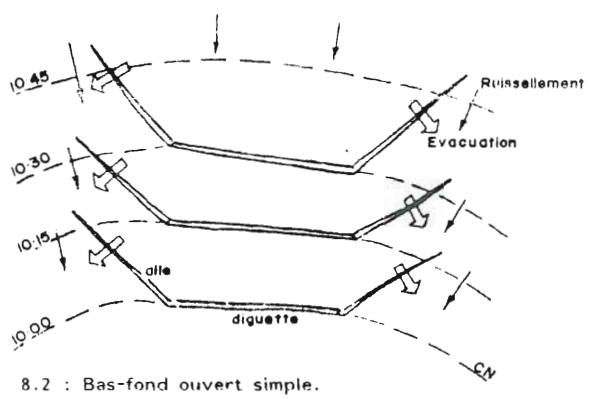
b- Les aménagements de bas-fonds.

Différents types d'ouvrages ont été réalisés, marquant une tentative d'adaptation progressive aux contraintes hydrauliques :

- Aménagements fermés puis aménagements ouverts simples (Fig. 8.2) permettant, à l'inverse des précédents, une admission d'eau latérale pendant les plus petits ruissellements, le déversement s'opérant sur les extrémités des ailes des diguettes préalablement "taillées" (Fig. 8.3) ;

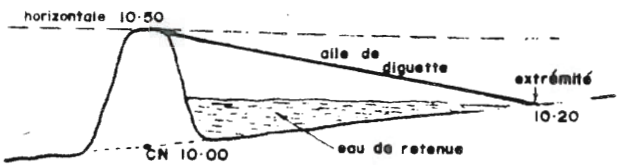
- Aménagements avec chenal central ou semi-ouverts, protégés par un cavalier des débordements du lit mineur ;

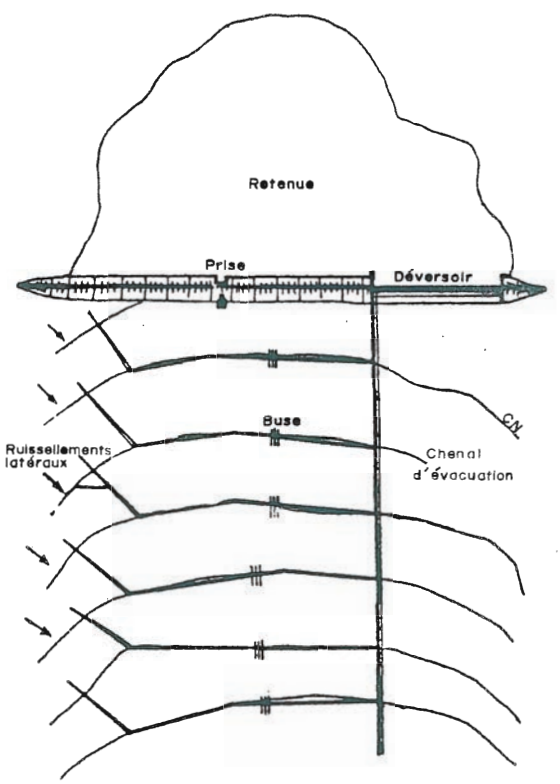
- Enfin, quelques bas-fonds, dits améliorés, ont été réalisés à partir de 1977 à l'abri cette fois d'une digue en terre (empierrée à l'amont), créant un petit lac de retenue (40 à 50 000m^3), d'un déversoir maçonné et d'un chenal d'évacuation (Fig. 8.4). Cette conception vise à résoudre les problèmes techniques fondamentaux des aménagements classiques, à savoir les dégâts aux diguettes causés par les crues et les sécheresses intercalaires ou de fin de cycle du riz. Une irrigation d'appoint est désormais possible en effet à partir d'une ou deux prises à batardeaux ; l'alimentation des casiers se faisant alors soit en cascade (système semi-ouvert) par les ailes, soit par les buses des diguettes.



8.2 : Bas-fond ouvert simple.

8.3 : Taille des ailes de diguettes





8.4 : Bas-fond amélioré

d'après J REEB

Tous ces ouvrages sont évidemment plus onéreux, particulièrement pour les bas-fonds améliorés (300 000 francs CFA/ha), malgré le maintien d'une participation paysanne. Ils le sont cependant cinq fois moins que les avals de barrages. Près de 3 500 hectares ont été ainsi réalisés durant les projets F.D.R. 1 (1972-1976) et F.D.R. 2 (1976-1981) ; le rythme des réalisations (620 hectares entre 1982 et 1985) ayant chuté depuis lors en raison de diverses difficultés.

En résumé, la participation paysanne représente un acquis précieux durant la phase de mise en place des aménagements : les paysans ou du moins les groupements villageois demandent l'intervention du F.D.R. puis réalisent eux-mêmes, sans salariat, des dispositifs relativement peu coûteux. Ce moindre coût n'exclut pas une certaine qualité technique, garantie par la matérialisation des courbes de niveau et un contrôle final par les services centraux permettant ou non le remboursement des frais engagés par l'organisme régional de développement.

Toutefois, l'intérêt d'une telle politique d'intervention, sa réussite ou son échec, ne peuvent être appréciés qu'avec un peu de recul dans le temps, en fonction de la durée de vie des dispositifs. Or leur manque d'entretien nous apparaît comme un point faible et d'autant plus préoccupant que les causes en sont variées.

8.2.1.2. Les difficultés d'entretien des aménagements.

a- Les constats de dégradation.

Dès 1980, un examen rapide à travers plusieurs régions (Sapone, Boussé, Kaya, Ouahigouya) nous permet d'affirmer qu'une dégradation, certes inégale mais trop rapide en moyenne, de ces aménagements est indéniable (Mietton, 1981). Au Yatênga, Marchal dresse à la même époque un bilan plus inquiétant (1983, p. 830), corroboré par les travaux des chercheurs de l'I.P.D.[1] sur le site de Sabouna où 15% seulement des diguettes sont en bon état au bout d'un an et 7% seulement après deux années (Billaz *et al.*, 1982, p. 14). Les banquettes en terre sont souvent recoupées par les sentiers (Fig. 8.6., point C) et

(1) I.P.D. : *Institut Panafricain de Développement.*

les pistes de bétail, dont le tracé reste attaché à un parcellaire foncier inchangé. Leur enherbement est très limité, y compris sur des sites où la sensibilisation relative à d'autres pratiques est pourtant bien perçue. Les bourrelets sont même localement semés et sarclés pour quelques cultures dérobées sur les ados plus humides.

Des enquêtes plus détaillées, conduites en 1981 dans les secteurs de Siglé au nord-ouest de Ouagadougou (Fig. 8.5) et de Sapone au sud-ouest (Sakandé)(1), confirment cette évolution. Sur quatre aménagements de versants proches de Sapone (Komsilga, Guisma, Ipelce, Singdin) représentatifs par leur différence de taille (Tableau 8.3), les brèches ouvertes ou colmatées, les tronçons de diguettes abaissées ou même totalement laminées sont comptabilisés (Tableau 8.4).

Site	Année d'implantation	Superficie (ha)	Longueur cumulée des diguettes (m)	Longueur/ha (m/ha)
Komsilga-Guipo	1978	33	6 112	186
Ipelce	1978	63	11 157	177
Guisma	1979	45	10 812	243
Singdin	1979	95	27 682	291

Tableau 8.3 : Caractéristiques de 4 aménagements antiérosifs de la région de Sapone.

De 2 à 9% (en longueur) des terrasses sont donc détruites en 3 ans. Encore la longueur moyenne des diguettes totalement effacées a-t-elle été estimée à 20 mètres ; en fait, l'entaille peut aller jusqu'à 100 mètres ! Si l'on ajoute ce qui est vulnérabilisé, c'est 10% au moins du dispositif qui a perdu son efficacité. Le cas de Komsilga est particulier : il s'agit en fait d'un groupement villageois dont le dynamisme se traduit par le nombre élevé de colmatages de brèches (apport de terre, de cailloux, de troncs d'arbre). Le cumul des pourcentages ne serait pas ici significatif. On peut noter enfin que c'est le dispositif le

(1) *Communication personnelle des résultats préliminaires d'une thèse de 3ème cycle.*

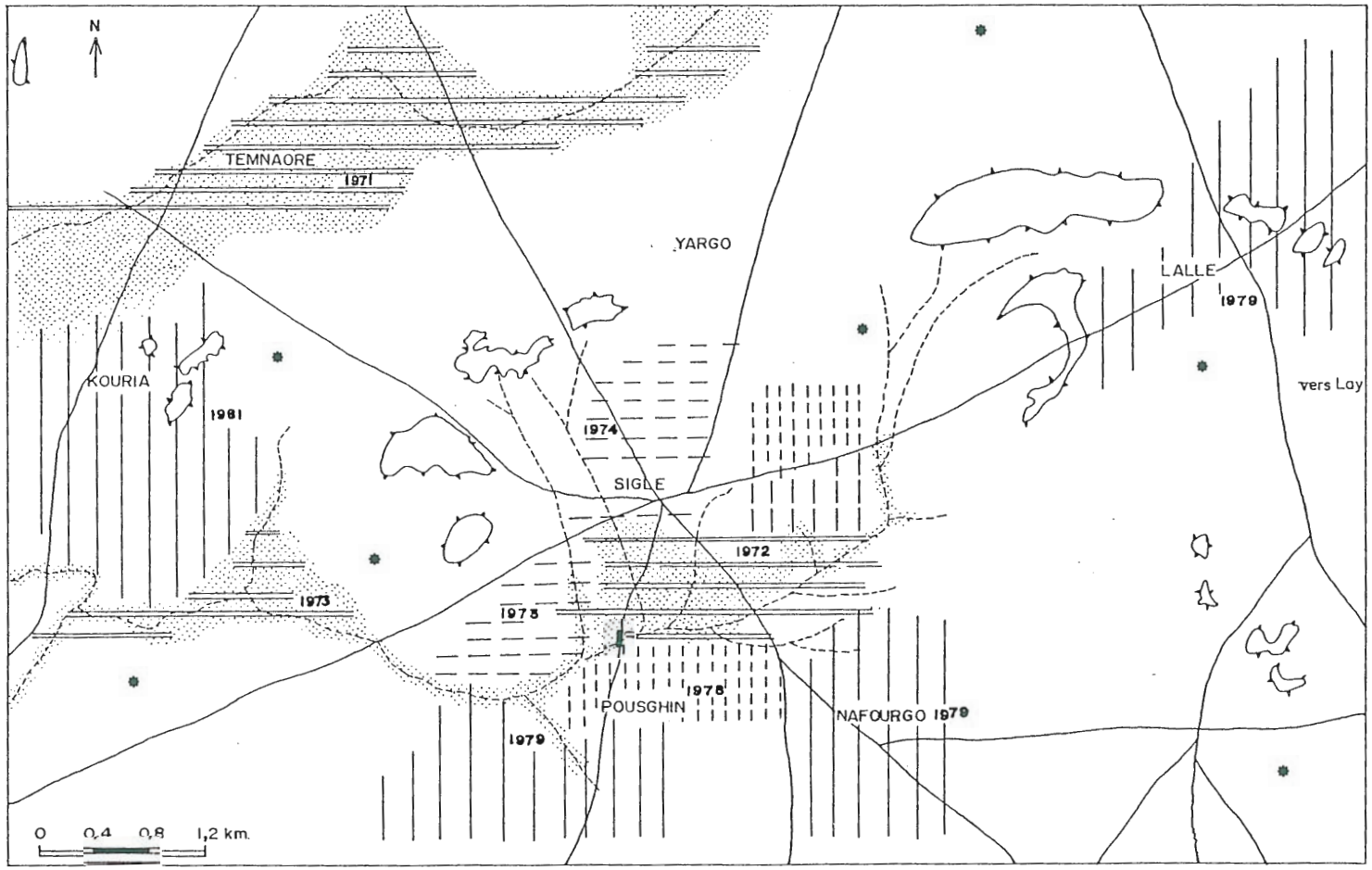


Fig. 8.5 : Exemple d'aménagement régional - Le cas de la région de Siglé au nord-ouest de Ouagadougou. d'après A. Sinaré (1982)

plus vaste qui est le plus endommagé.

Ces pourcentages, qui concordent avec ceux donnés par le F.D.R. (Capo-Chichi et Samreth, 1983), ne sont pas trop alarmants pris comme tels. Toutefois, il faut considérer qu'on se trouve, sur ce secteur proche de Ouagadougou, dans des conditions optimales de sensibilisation et aussi de résistance d'un matériau moins sableux que dans les régions septentrionales (Yatênga, Sahel). Enfin, cette vitesse de dégradation n'est probablement pas linéaire mais exponentielle : chaque brèche nouvellement ouverte ayant des répercussions en chaîne sur les bourrelets à l'aval et fragilisant l'ensemble du système.

Sites	Nombre de brèches (long.moyenne 4m)		Sections diguettes (long.moyenne 20m)		Tronçons vulnérables	Tronçons disparus
	ouvertes (1)	comblées (2)	abaissées (3)	laminées (4)	(2)+(3)	(1)+(4)
Komsilga	29	72	65	0	1 580m (25,9%)	120m (1,9%)
Ipelce	169	20	14	0	360m (3,2%)	680m (6,1%)
Guisma	126	40	20	9	560m (5,1%)	680m (6,3%)
Singdin	253	26	64	72	1 400m (5,1%)	2 450m (8,9%)

Tableau 8.4 : Dégradation des aménagements en 3 ou 4 ans (1981).

D'après une enquête de P.J. Matlon (cité par Reij, 1986), en cas de dégradation de l'aménagement, les rendements diminuent par rapport aux parcelles-témoins (- 220 kg/ha). L'auteur indique que les terrasses de diversion, économiquement rentables dans les régions Centre et Sud-Ouest, ne le sont pas dans le Nord.

La vulnérabilité des aménagements de bas-fonds est évidemment plus grande encore. Les services évaluation-suivi du F.D.R. ne manquent d'ailleurs pas de le signaler dès 1979. Les bas-fonds améliorés eux-mêmes peuvent être endommagés comme celui de Guesna, en 1978, dans la région de Boussé, à l'aval d'un bassin-versant de 100 km^2. Mais même sur un bassin plus petit comme celui d'Imiga (12 km^2), la crue du 19 juin 1983 consécutive à une pluie moyenne de 76,9

mm[1] entraîne le débordement, heureusement momentané, d'une tranche d'eau d'une dizaine de centimètres par-dessus la digue sans entraîner sa rupture (Mietton, 1984). Cet exemple suffit à prouver que *tout, du seul point de vue technique, n'est pas résolu pour l'aménageur.*

b- La diversité des contraintes.

Les contraintes auxquelles est confronté l'aménageur sont nombreuses, de nature variée : technique, sociologique, économique ou foncière, générales au pays ou parfois régionales, jouant de manière isolée ou plus souvent conjuguée même si nous les envisageons séparément par souci de clarté.

* *Les difficultés spécifiquement techniques* et notamment le problème du dimensionnement des ouvrages élémentaires continuent de peser sur les aménagements de bas-fonds. Les durées de retour des averses exceptionnelles ainsi que les débits de crues instantanés maximaux sont encore méconnus et les abaques utilisés (Grésillon, 1977 ; Puech, 1983) ne permettent d'obtenir que des ordres de grandeur. Dans les aménagements de bas-fonds les plus simples, les débits maximums peuvent également dépasser les capacités de déversoirs représentés par les ailes de diguettes, d'autant que leur taille constitue une opération délicate (Fig. 8.3), souvent mal exécutée, les encadreurs eux-mêmes n'en comprenant pas toujours la nécessité. Dans tous les cas, l'eau en excès crée des brèches dans les bourrelets centraux, ce qui entraîne une vidange brutale des casiers et compromet les récoltes de riz.

La méconnaissance des averses de fréquence rare hypothèque d'ailleurs aussi le devenir des terrasses de diversion sur les versants eux-mêmes, même si le sous-dimensionnement n'a pas d'effets aussi spectaculaires et évidents que sur une digue de barrage dans un bas-fond. Le surdimensionnement étant trop coûteux, ces ouvrages de versant sont en effet adaptés au mieux à des averses journalières décennales, dont les coefficients de ruissellement sont méconnus ou mésestimés, notamment en début d'hivernage, et peuvent dépasser en termes de débits instantanés un seuil critique de 150 l/s/ha. Les limites de sécurité sont

(1) *La durée de retour d'une telle averse en juin est comprise, nous l'avons vu, entre 20 et 50 ans.*

donc occasionnellement franchies, entraînant une rupture sans que la faute en incombe forcément aux topographes ou aux paysans responsables de l'implantation et de l'édification de ces terrasses (Heusch, 1986, p. 156).

La *résistance* de ces bourrelets doit être appréciée en outre de manière différentielle, *à l'échelle régionale*. Ainsi, dans les contrées sahéliennes ou subsahéliennes (Yatênga), la nature sableuse du matériau rend le compactage de la diguette plus aléatoire. En outre, la déflation éolienne relaie activement des pluies plus rares pour "raboter" les terrasses (Photo 5). L'enherbement, enfin, est une consigne encore plus difficile à respecter qu'ailleurs en raison du manque d'eau et du bétail plus nombreux pour piétiner ces édifices fragiles. C'est donc *toute une série d'interactions qui conditionne de manière négative* l'évolution de ces dispositifs dans les régions septentrionales du Burkina Faso. Le bilan dressé en 1982 par les chercheurs de l'I.P.D. sur deux sites du Yatênga (Billaz *et al.*, 1982a, p. 51) est lourd : à Sabouna, aménagé en 1979, sur 129 diguettes recensées, 7 sont en bon état, 40 en état moyen, 77 jugées inefficaces ; à Bamba (1980), sur 80 diguettes, 13 sont encore en bon état, 27 en état moyen, 40 ne jouent plus aucun rôle ! Lors de la mission d'évaluation conduite par C. Reij, en 1986, entre Kaya et Kongoussi, deux sites seulement, sur les trente choisis au hasard, sont dans un état jugé "raisonnable". La durée de vie de ces aménagements ne dépasse pas trois à quatre ans (Reij, 1986, p. 16).

Cette *vulnérabilité* des ouvrages peut être appréciée également, selon nous, *à l'échelle du versant*. Les aménagements anti-érosifs sont en effet particulièrement menacés lorsqu'ils sont situés à l'aval d'impluviums non aménagés, où les ruissellements les plus efficaces se concentrent avant de frapper la partie haute du dispositif (Fig. 8.6 - Point A). Les eaux en excès sont évidemment évacuées par les exutoires mais ceux-ci deviennent le siège d'une érosion régressive en ravineaux, érosion linéaire mais aussi latérale aux dépens des banquettes elles-mêmes (Fig. 8.6 - Point B). Il faut alors dégager des moyens supplémentaires pour enrayer ce nouveau type d'érosion (Van Dijk, 1981). La consolidation de la première terrasse en amont peut être envisagée mais on

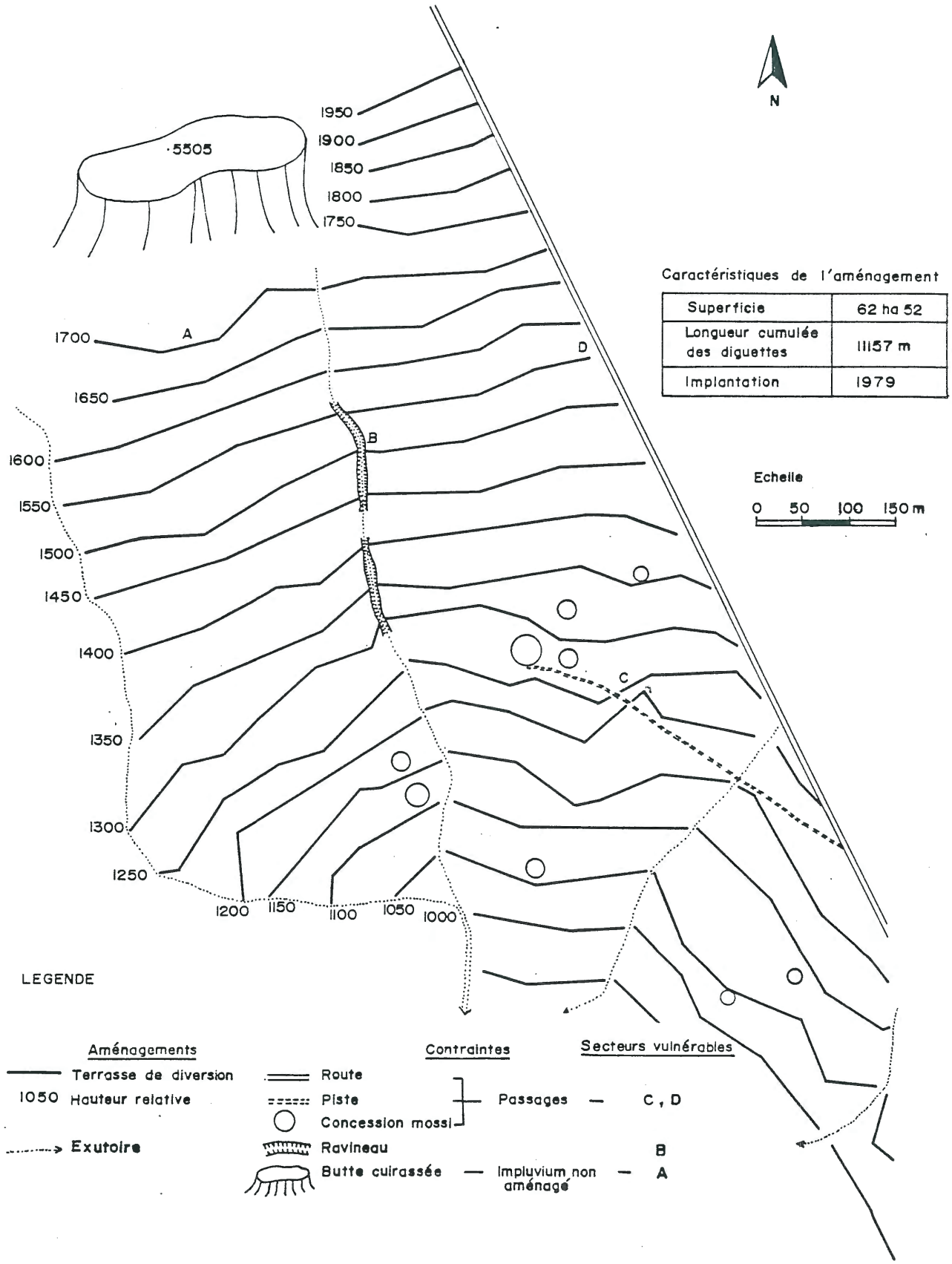


Fig. 8.6 : Exemple d'aménagement antiérosif de versant (Ipelce. Région de Saponé).

renforce le caractère imperméable du dispositif qui peut être préjudiciable notamment en saison sèche, plus particulièrement dans les régions septentrionales une fois encore. C'est ce qui est pressenti par C. Reij (1986, p. 17) et confirmé par G. Serpantie (1986). Ce dernier montre la nécessité qu'il y a pour le paysan de conserver un ruissellement allogène qui sert en quelque sorte d'irrigation complémentaire. Dans ces conditions, ces réalisations deviennent dès lors totalement injustifiables.

Enfin, force est de constater que la défense contre l'érosion éolienne, préoccupante à nos yeux, n'est pas envisagée dans le cadre de ces dispositifs. On rejoint là un aspect de l'aménagement, qui n'a d'ailleurs pas que des implications d'ordre technique : celui de la place de l'arbre dans le paysage agraire. Le maintien d'un taux minimum de boisement (Baldy *et al.*, 1982) sur l'ensemble des terrains de culture, y compris les champs permanents, représenterait en tout cas un instrument efficace de lutte contre la déflation. Au lieu de cela, la dynamique éolienne est facilitée par le non enherbement des terrasses, voire leur mise en culture sur les ados humides excluant les graminées pérennes. Sans aller jusqu'aux brise-vents arborés, de réalisation fort douteuse et dont l'efficacité serait au demeurant relative par rapport à des vents forts de direction variable comme on l'a vu (Fig. A.2.20 à 43), les arbustes et les graminées, dont la pousse spontanée serait acceptée par les paysans dans l'intervalle étroit des cordons de pierre, représenteraient une "rugosité" supplémentaire, apte à contrarier la composante horizontale du vent.

Les problèmes techniques, déjà complexes, ne jouent malheureusement pas seuls. *L'interaction entre facteurs naturels et facteurs humains* est étroite. Différentes contraintes ou obstacles peuvent être révélés tout au long des étapes de l'aménagement :

- Dès la demande de réalisation, une ambiguïté apparaît qu'Y. Marchal, instruit par l'expérience de certain village du Yatênga, est le premier à dénoncer (1983, p. 829). Cette demande est en effet formulée par un groupement villageois. Celui-ci est donc la structure de base sur laquelle s'appuient l'O.R.D. et le F.E.E.R., dont les projets ont pour corollaire la participation paysanne. Mais la question

reste posée de la représentativité réelle du groupement par rapport à la communauté villageoise toute entière. Si le premier s'identifie aux seuls paysans influents, les autres ne se sentiront évidemment pas longtemps concernés. L'entretien en groupe d'un réseau où l'on n'a pas de parcelles à soi, alors que le travail presse sur ses propres terres, va apparaître immanquablement comme une corvée. En revanche, le ou les responsables du groupement obéissent probablement à des motivations qui ne sont pas seulement d'ordre agronomique (prestige, aide alimentaire, etc...) : la question se pose en tout cas quand on constate en particulier la permanence des demandes dans une région limitée, où l'échec des dispositifs antérieurs est patent . C'est le cas du secteur de Siglé, au nord-ouest de Ouagadougou, où les dispositifs se succèdent depuis les premières réalisations de la SATEC(1) et de l'opération Terroirs (Fig. 8.5).

1. L'implantation du dispositif, sa place dans le versant, n'obéissent pas à la seule rationalité technique pour d'autres raisons encore, plus simples à discerner mais tout aussi difficiles à contourner. Ces ouvrages sont en effet réalisés à plus de 80% sur des champs permanents, proches des cases. Dès lors, leur site est étroitement dépendant des sites d'habitat eux-mêmes ; lesquels ne se distribuent pas au hasard. Deux exemples : en pays Kassena, au sud du pays, les villages sont en tête d'interfluves ; en pays Mossi, en revanche, les concessions sont généralement placées à mi-versant (ou au tiers à partir de l'amont), délaissant la partie supérieure du glacis où la cuirasse est affleurante, l'aménagement impossible. Dans ce cas, les effets d'impluviums déjà énoncés sont fréquemment redoutables.

Choisir préférentiellement les champs permanents se concoit aisément : l'éloignement compromettrait encore davantage la réalisation (et théoriquement l'entretien) du dispositif. Mais ce choix a d'autres implications défavorables. D'une part, les terrasses sont obligatoirement recoupées, plus que partout ailleurs, par le réseau des pistes et sentiers qui convergent vers les cases (Fig. 8.5 et 8.6). L'incompatibili-

---

(1) *Société d'Assistance Technique et de Conseil qui est intervenue à la fin des années soixante en Haute-Volta.*

té entre le cloisonnement foncier traditionnel et le cloisonnement technique surimposé est toujours sans solution depuis les travaux du GERES. D'autre part, l'organisation du régime foncier et de la production, au moins en pays Mossi, étant l'apanage des anciens, l'accès à la terre des jeunes ménages et des célibataires se trouve limité. La difficulté pour ces derniers d'accéder en pleine propriété aux terres proches des habitations semble même voulue par la communauté, pour des raisons sociologiques et économiques (Zoungrana, 1985). Les vieux sont de ce fait privilégiés alors que le pouvoir de mise en valeur est évidemment possédé par les jeunes. Même l'enthousiasme du travail collectif, réalisé à l'initiative du chef de yiri ou de lignage, lors de la construction des diguettes, ne doit pas masquer cette hypothèque de départ.

2. Lors de l'édification, les imperfections relatives à la hauteur et surtout au compactage des bourrelets sont à la mesure des efforts à fournir. La mise en place du dispositif représente un effort considérable que nous soulignions dès 1981(1).

Plusieurs kilomètres de diguettes sont à confectionner : de 2 ou 3 pour les plus petits jusqu'à plus de 25 (Tableau 8.3) pour les aménagements les plus vastes ; plus de 100m^3 de terre par hectare à remuer et à damer. D'après une enquête F.D.R. (Tableau 8.5), la durée d'aménagement est en moyenne supérieure à 100 heures.hommes /hectare, soit 20 jours environ pour un groupe de 10 personnes, travaillant 5 heures par jour sur 10 hectares. Encore s'agit-il là d'une moyenne relative à des sites de petite taille.

Au-delà, le groupe se fatigue, malgré les vivres distribuées gratuitement ; le rendement décline et le groupe se disperse, prolongeant le temps de travail. La mise en place peut demander un ou deux mois supplémentaires, voire n'être terminée qu'en une deuxième campagne après l'hivernage. La date de passage des topographes et de l'unité motorisée est à cet égard capitale pour laisser suffisamment de temps aux

---

(1) *Dès cette date (Mietton, 1981, p. 67), dans un contexte de réussite pour ces projets F.D.R., nous insistons sur cette difficulté, précisant que la responsabilité paysanne n'est donc pas totale (et non pas l'inverse comme nous le fait dire Marchal (1983, p. 829)) dans le devenir de ces ouvrages.*

paysans avant les premières pluies qui les accaparent (et qui dégradent les diguettes non achevées !). A Tangsega, dans la région de Sapone, une dizaine d'enfants confectionnaient ainsi, en avril 1980, sous le regard de quelques anciens, les premières terrasses d'un réseau qui ne pourrait être terminé à temps.

SITES	Durée d'aménagement (en heures) pour un groupe non dénombré	Superficie aménagée (ha)	Hommes-heures par hectare
Tamporé	2058	13	158
Silmidougou	2313	7	330
Lallé	2694	15	180
Temnaoré	726	9	81
Loagha	1094	8	137
Sakou	972	12	81
Napalgue	290	8	36
Tampelga	617	6	103
Kambinga	1375	9	153
Killou	965	11	88
Rilogo	1148	13	88
Samtaba	685	12	57
Toyendé	1866	18	104
Wayalguin	856	9	95
Napoughin	1391	11	126
Amidin	1109	14	79
Niega	1297	8	162
Kongoussablaga	1138	13	88
Sarfo	1998	25	80
Ouampéga	701	7	100
TOTAL	25293	228	111
MOYENNE	1265 heures/Site	11,4	

Tableau 8.5 : Durée moyenne de travail pour un aménagement antiérosif de versant, d'après une enquête FDR, sur 20 sites de l'ORD de Kaya.

3. Les difficultés sont bien plus grandes encore lors de la phase suivante, d'entretien. L'effort accompli lors de l'édification ne peut être en effet renouvelé, pour des raisons relatives à la force de travail et au calendrier agricole.

* La force de travail, tout d'abord, est privée de bon nombre de jeunes hommes pour lesquels, nous l'avons vu, l'accès à la terre est bloqué. Leur migration, saisonnière ou définitive, représente d'ailleurs une stratégie voulue par le groupe familial, qui attend des migrants un complément de ressources. Au Yatênga, la moitié des hommes sont absents dans la classe d'âge 20-30 ans, le tiers dans celle des 30-40 ans (Billaz, 1982). Le recensement effectué sur le bassin-versant d'Imiga, où les conditions de vie sont moins difficiles, permet de dénombrer encore 67 hommes émigrés pour 78 présents (Tableau 4.4, p. 159). Ce groupe d'hommes, potentiellement motivés, fait défaut pour l'entretien du dispositif. Les femmes, dont on sait bien qu'elles sont les plus efficaces au moment de l'édification, sont trop prises ensuite par leurs multiples tâches, y compris en saison sèche.

* Durant ces mois où il y a moins d'activités, l'entretien des terrasses pourrait se traduire par leur enherbement(1). Mais cela supposerait en réalité la création de pépinières pour le repiquage des graminées pérennes ou d'arbustes. Qui peut se consacrer à cette activité ? Où trouver l'eau nécessaire ? Même le recompactage de la terre suppose qu'on attende les premières pluies.

Durant l'hivernage, la nécessité d'entretien devient plus pressante lorsqu'il y a rupture de diguettes sur les versants ou dans les bas-fonds. Mais, dans le même temps, le calendrier agricole n'autorise plus à être distrait des activités essentielles, vitales, de semis et de sarclages des mils. Même une culture comme celle du riz dans les bas-fonds est négligée, surtout par les paysannes. On comprend mieux dès lors que la priorité ne soit pas à la préservation d'un aménagement antiérosif.

Ces constats successifs sont donc redoutables et nous situent bien loin des seules contraintes techniques. Le problème de la force et du temps de travail nous paraît être la principale pierre d'achoppement de toute cette stratégie du F.E.E.R. En ce sens, le tra-

(1) *Des entretiens non directifs, conduits en langue moré, par nos étudiants avec les vieux d'un village de la région de Saponé nous ont révélé que pour certains d'entre eux, le maintien de hautes graminées, disposées en bandes à travers le champ, confère à ce dernier un caractère impropre inacceptable. Pareil jugement, dont nous n'avons pas pu vérifier s'il a une valeur généralisable, est inquiétant, non pas seulement pour des aménagements en terrasses mais aussi en bandes alternées.*

vail complémentaire de quelques organisations non gouvernementales ou instituts de recherches peut avoir des enseignements significatifs.

8.2.2 : Les expérimentations des organisations non gouvernementales et des instituts de recherches.

Depuis le début des années 1980, la philosophie d'intervention des organisations étrangères consiste à aider le monde rural dans la recherche de son autosuffisance alimentaire. Différentes sources de financement sont ainsi conduites à s'intéresser au domaine de la conservation des eaux et des sols. Leurs interventions sont menées à titre expérimental et à une échelle très ponctuelle, en relation avec quelques paysans seulement, tout en espérant un effet d'entraînement ultérieur. Parmi ces organismes, on peut citer :

- "*Euro-Action-Accord*" et "*Agro-Ecologie*" qui conduisent depuis 1981 des programmes expérimentaux dans les régions de Kaya pour le premier, de Djibo et Ouahigouya pour le second. L'un et l'autre ont adopté la technique des bourrelets antiérosifs réalisés par les paysans eux-mêmes, y compris le piquetage des courbes grâce à l'utilisation du niveau à eau. Sur le projet allemand (Agro-Ecologie), la confection des bourrelets fait également appel à une traction animale pour un labour de début de saison des pluies ; les diguettes sont renforcées à l'amont par des pierres. Dans les deux cas, la hauteur de ces terrasses est de l'ordre de 20 centimètres seulement, ce qui nécessite une densité plus grande d'ouvrages et détermine une emprise au sol non négligeable. Quelques hectares seulement ont été traités, le nombre de paysans ayant imité le système étant très limité.

- *Caritas* fait réaliser également des bourrelets de terre damée mais aussi des cordons de pierres, après piquetage au niveau à eau. Ce retour partiel aux techniques traditionnelles est intéressant à suivre ; en revanche, la rémunération de la main-d'oeuvre (75 F CFA le mètre de bourrelet, 100 F CFA le mètre de parpaings) nous semble critiquable dans ses effets vis-à-vis des autres organismes.

Dans le village de Rissiam, situé entre Kongoussi et Ti-

karé, Caritas finance aussi depuis 1982 la construction de barrages filtrants, en travers des ravines, par la population locale avec l'appui technique des volontaires français (AFVP). Le transport des matériaux est fait par des camions. Ces digues en pierres sèches sont construites sans déversoir, avec des ailes de quelques dizaines de mètres de longueur sur chaque berge (Reij, 1986). Les dépôts comblent les ravines en un ou deux ans, créant ainsi des terrasses où les rendements seraient d'environ 1000 kg/ha.

Cette technique apparaît assez facilement vulgarisable et le programme du FEER prévoyait d'ailleurs la construction de six barrages de ce type dans le secteur de Kongoussi dans son programme 1985-86.

- L'opération *Agro-Foresterie*, commencée en 1980 sous financement OXFAM, apparaît plus instructive encore (Wright, 1985). Les quelques hectares traités à l'est de Ouahigouya ont été en effet véritablement reconquis sur les sites apparemment les plus ingrats, correspondant à des plaques de ruissellement intense aux sols très compacts. Ces plaques avaient été d'ailleurs aménagées par le GERES dont les ouvrages sont aujourd'hui totalement effacés. Les seules techniques utilisées sont traditionnelles (clayonnage, alignements de blocs, plantations d'arbustes). Aucune aide en matériel n'est accordée aux paysans volontaires : seule l'utilisation du niveau à eau ou de l'équerre, d'un maniement moins compliqué mais moins précise, est enseignée par un animateur. Plusieurs modèles de terrasses, plus ou moins perméables, sont ainsi mises en place, liées dans leur conception à la disponibilité en matériaux et à l'appréciation par le paysan des volumes ruisselés, des besoins en eau, des capacités de rétention. Certaines terrasses perméables dérivent d'une opération de clayonnage, limitant des parcelles de 50 mètres de côté, ouvertes à l'amont du dispositif. Des bandes d'arrêt de 50 centimètres à 2 mètres de large, constituées d'herbes annuelles ou plantées préférentiellement de graminées pérennes ou encore d'euphorbes, accompagnent ce cloisonnement. Le travail initial des sols encroûtés consiste en un ameublement avec un pic : des poches d'eau ("zay") sont réalisées en entassant une partie de la terre en aval du

trou : la partie meuble restante assurant un bon enracinement. Des terrasses perméables peuvent aussi être construites avec de cailloux de moyen calibre, sur une largeur de 20 à 30 centimètres et une hauteur variable suivant l'importance des écoulements. L'ouvrage est légèrement ancré au sol pour éviter l'affouillement.

Les terrasses imperméables sont faites de pierres et de terre ou de terre seule s'il y a peu de chances de submersion et si le compactage peut être assuré (sols limoneux ou argilo-limoneux). Là où il y a insuffisance de pierres, les banquettes de terre sont placées en bas de versant, à la suite des alignements de blocs qui assurent une protection.

Toutes ces terrasses peuvent être équipées de déversoirs en pierres, alignés ou disposés en quinconce et assurant l'écoulement des eaux en excès (Fig. 8.7 et 8.8). Enfin, l'espacement entre terrasses est laissé au libre arbitre de l'exploitant qui fait d'abord son choix en fonction de la disponibilité en matériaux.

En résumé, cette expérience de l'OXFAM est intéressante à double titre :

d'une part, elle conduit à un perfectionnement de méthodes traditionnelles et met en valeur la capacité des agriculteurs à prendre en main leurs propres problèmes économiques (Wright, 1985, p. 32) ;

d'autre part, elle assure une extension des terroirs par reconquête d'un espace qu'on pouvait croire stérile. Même si cette reconquête ne devait être que momentanée du fait d'un nouvel appauvrissement des sols, les productions gagnées dans l'intervalle bénéficient de rendements surprenants, de l'ordre de 800 kg à 1 tonne par hectare de sorgho ou même de riz cultivé ici sur versant ! (Photo 6).

- La démarche conduite par une équipe de l'ORSTOM, dans le village de Bidi, au Yatenga doit retenir également notre attention. Elle est en effet véritablement multidisciplinaire, associant une recherche technique et hydrologique à une série d'enquêtes conduites par des agronomes ou des sociologues. L'objectif est d'évaluer précisément l'effet d'un aménagement isohypse en cordons pierreux *cloisonnés* tous les 25 mètres et d'une combinaison labour-aménagement (Serpantie *et al.*,

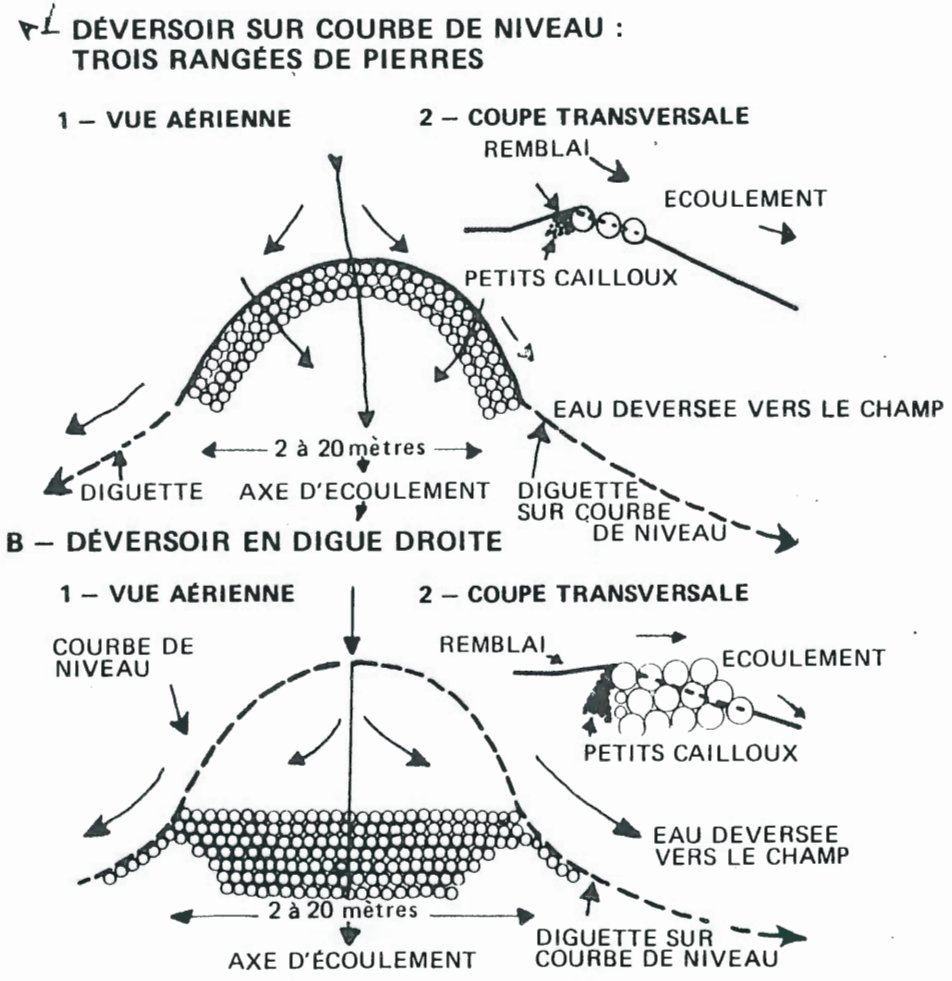


Fig. 8.7 : Ouvrages de répartition d'eau d'après P. Wright (1985)

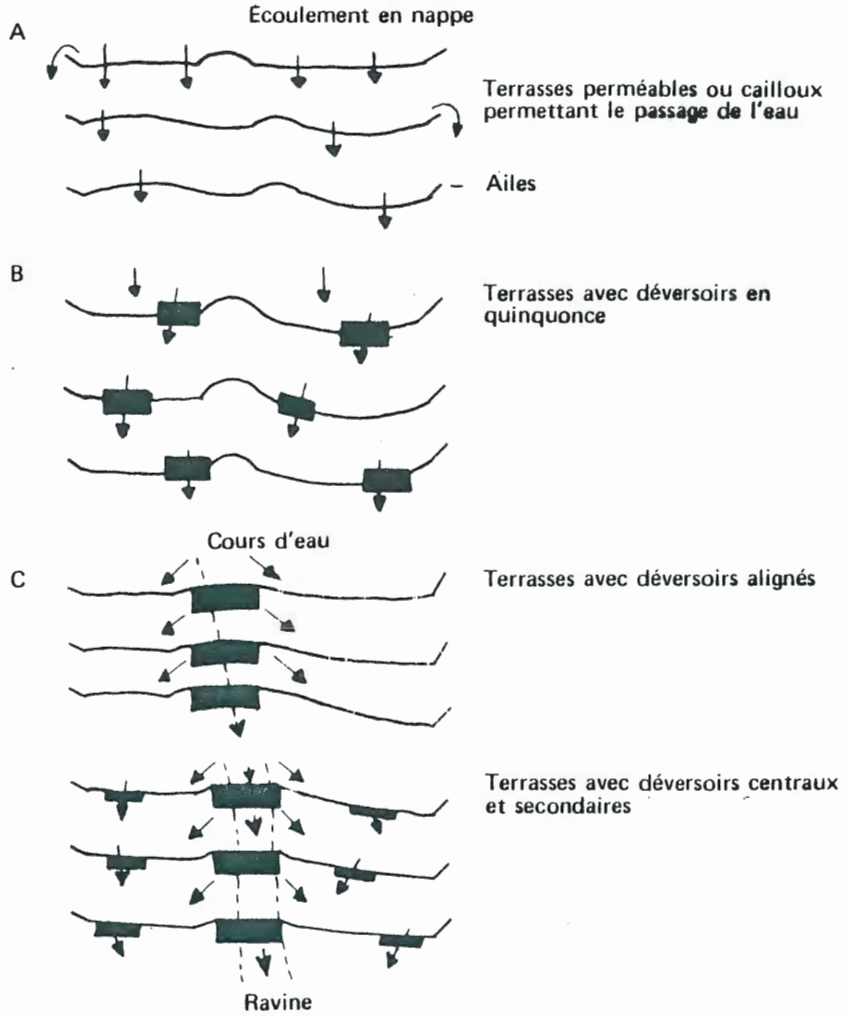


Fig. 8.8 : Déversoirs de captage des eaux d'après P. Wright (1985)

1986). Pour cela, plusieurs parcelles, identiques en tous points et juxtaposées, isolées de l'extérieur, sont comparées (Fig. 8.9). Les premiers résultats (1985 et 1986) montrent que la quantité de matière sèche produite par m^2 sur la parcelle aménagée est systématiquement supérieure à celle du témoin, en haut ou en bas de parcelle. Dans la parcelle labourée, testée en 1986, ce rendement s'accroît de 55%. Pour ce qui concerne le grain, les conclusions sont différentes chacune des deux années :

* en 1985, on observe une forte baisse du rendement en haut de pente sur la parcelle labourée et un faible accroissement à l'aval.

* en 1986, l'accroissement est très important (60 à 87%) et double dans la parcelle labourée par rapport au témoin aménagé mais non labouré. Ces résultats, apparemment contradictoires, sont expliqués ainsi par G. Serpantie (1986, p. 24) : la sècheresse de septembre 1985 a entraîné un échaudage du mil sur les stations de haut de versant qui avaient le plus profité de l'aménagement et de l'alimentation en eau complémentaire à partir de l'impluvium (Fig. 8.9). "Ces peuplements très exigeants pour leur biomasse et leur densité se sont trouvés incapables de satisfaire la demande au moment de la fructification". L'auteur en conclut qu'en cas de pluviométrie déficitaire en fin de cycle, c'est la gestion paysanne extensive classique qui réduit le mieux ce risque. En ce qui concerne l'érosion, l'existence des cloisons empêche les circulations d'eau latérales et la genèse des rigoles. L'eau de ruissellement est mieux redistribuée à travers le cordon filtrant.

Les résultats intéressants de cette expérimentation demandent évidemment à être multipliés mais, d'ores et déjà, ils fournissent une preuve supplémentaire, s'il en était besoin, de la nécessité d'établir un bilan hydrique précis, avant d'envisager une généralisation de quelque expérimentation que ce soit.

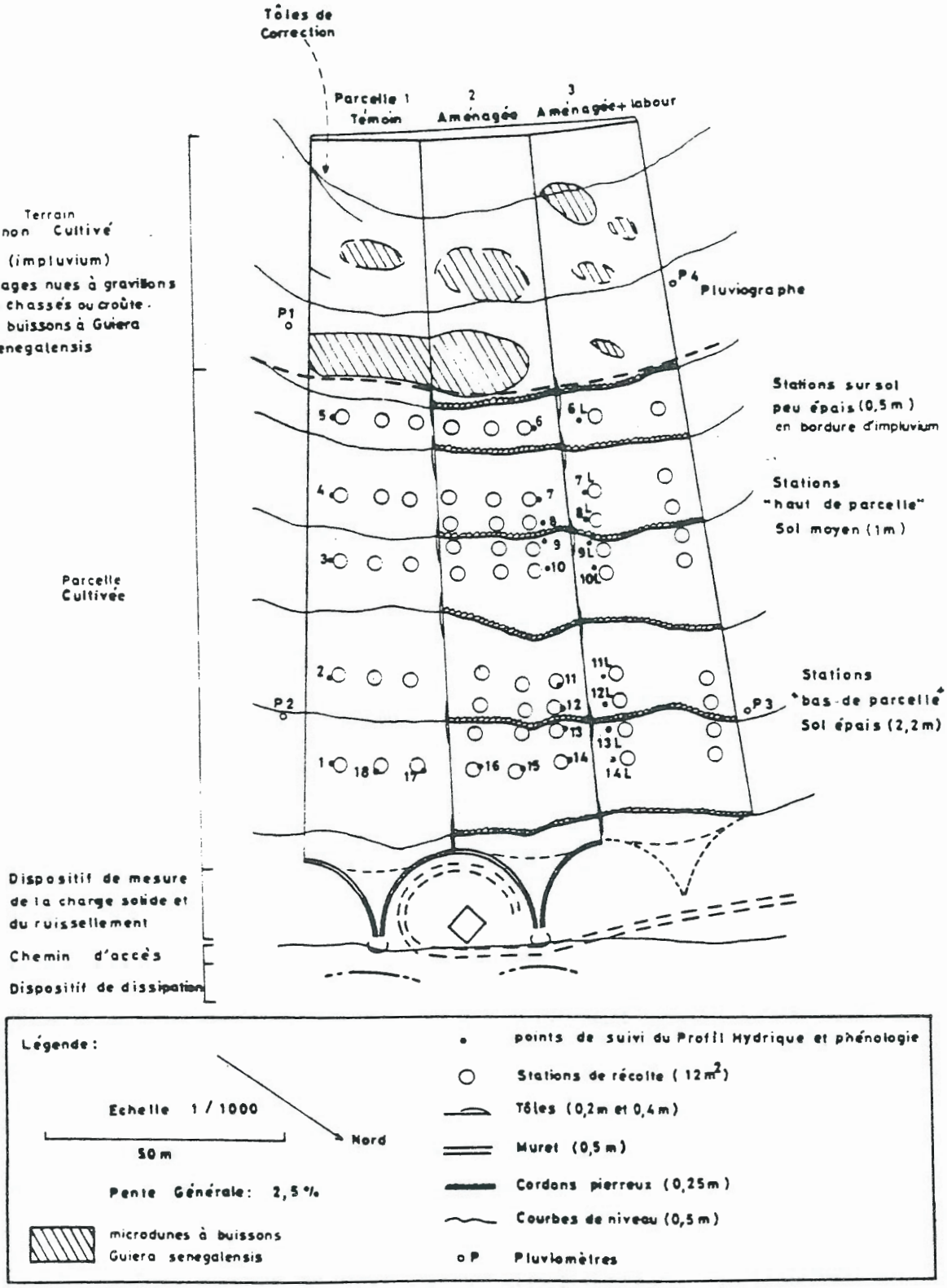


Fig. 8.9 : Plan d'ensemble de l'essai "ruissellement" à Bidi (Yatenga).

in Serpantie et Martinelli, 1986

CONCLUSION.

L'examen des méthodes de lutte antiérosive et des réalisations récentes au Burkina Faso conduit en premier lieu à un double constat qualitatif et quantitatif, et à une interrogation.

Qualitativement, le projet du F.E.E.R. voit sa réussite compromise par l'absence d'entretien durable des terrasses de diversion tandis que certaines expérimentations, comme celles de l'OXFAM, favorisant un retour à des procédés traditionnels à peine perfectionnés, obtiennent des succès ponctuels mais encourageants. L'office public semble d'ailleurs s'en inspirer en s'orientant vers une diversification de ses pratiques, notamment à l'échelle régionale. C'est une proposition que nous formulions pour notre part dès 1985 (Mietton, 1986, p. 195).

Quantitativement, seule l'opération conduite par le F.E.E.R. est importante mais elle reste insuffisante, au rythme actuel, eu égard aux besoins du pays. Là encore la recherche d'une plus grande efficacité n'implique-t-elle pas le recours, au moins partiel, à des dispositifs plus simples ?

Ce constat doit être dépassé : il ne faut pas se cacher en effet qu'une révision des modalités d'intervention ne représente qu'une solution technique, probablement insuffisante. A propos de l'expérimentation de l'OXFAM elle-même, on doit se demander pourquoi ces méthodes connues des paysans avaient été abandonnées ; pourquoi, après avoir montré une nouvelle fois leur efficacité, elles n'ont pas d'effet d'entraînement sur les communautés voisines. A ce propos, l'étude réalisée par l'ORSTOM montre bien comment les communautés paysannes d'un même village peuvent adopter des stratégies différentes vis-à-vis de l'expérimentation proposée, en fonction de considérations sous-économiques principalement.

C'est un des mérites de ce travail que de souligner, dans l'instant et pas seulement a postériori, les limites ou les risques, physiques et humains, liés à une alternative apparemment séduisante (Serpantie, 1986, p. 13).

Pour notre part, nous sommes toujours convaincu qu'il faut proposer autre chose aux paysans pour les fixer au pays, notamment des revenus plus décents, c'est-à-dire des prix à la production plus rémunérateurs (Pélissier, 1979). Au-delà, le paysan n'a pas besoin, pas plus qu'ailleurs qu'on lui apprenne son métier mais qu'on l'aide à perfectionner ses outils (au sens le plus large) pour valoriser une terre rendue difficile dans le contexte climatique actuel.

CONCLUSION GENERALE

Au terme de cette recherche reposant sur une longue pratique de terrain, une collecte de données originales et un effort de synthèse interdisciplinaire, il convient de préciser les grandes lignes d'un bilan regroupant les acquis mais aussi les problèmes encore en suspens.

1°/- Dans le domaine de la dynamique climatique au sol, *le haut potentiel d'agressivité érosive*, caractéristique essentielle de ce régime à saisons très contrastées, est confirmée et précisée, compte-tenu de la sécheresse affectant le Burkina Faso depuis la fin des années soixante.

Agressivité des précipitations tout d'abord :

- à l'échelle de l'année, la tendance à la sécheresse se marque, il est vrai, par une diminution (de l'ordre de 5% du total pluvique) des plus fortes averses, supérieures à 40 mm. Cette baisse pourrait toutefois affecter principalement le corps de la mousson, davantage que les lignes de grains ou les orages locaux. L'indice d'agressivité annuelle de Wischmeïer demeure, quoi qu'il en soit, durant les années soixante-dix, dans une fourchette de 250 à 700 unités ; la violence des averses tropicales n'étant dépassée qu'en zone équatoriale et sub-équatoriale ;

- à l'échelle quotidienne, la pluie maximale de récurrence décennale, calculée sur 49 stations, demeure toujours comprise entre 65 et 115 mm, même si l'on considère 1970-1984 comme période de référence.

La pluie journalière maximale de même fréquence, pour les seuls mois d'*avril, mai ou juin* plus "sensibles" du point de vue des risques d'érosion, est évaluée à 50-70mm pour quinze stations souda-

niennes (11°N à 13°N). Mais les évènements qualifiés d'exceptionnels, dont la probabilité est centennale, peuvent être eux-mêmes (1 fois sur 4) inférieurs aux valeurs déjà observées. Durant ce début de saison des pluies, l'agressivité pluviale est largement le fait des lignes de grains, dont on a pu estimer qu'elles représentent annuellement environ 40% des averses.

Enfin, l'intensité instantanée maximale durant cinq minutes, si importante vis-à-vis des phénomènes d'infiltration et de saturation, est évaluée à 135 mm/h, en fréquence annuelle, à Pô (11°10'N) ;

- à l'échelle d'un épisode de n jours, les maximums pluviométriques annuels, qui se placent davantage au coeur de la mousson, accusent un déficit sensible (jusqu'à 20-25%) sur la période 1970-1984, par rapport à la phase antérieure.

Si l'on considère l'ensemble des données de l'origine des stations à 1984, le territoire du Burkina Faso enregistre des pluies maximales décennales comprises, du nord au sud du pays, entre 80 et 140 mm pour deux jours consécutifs ; entre 250 et 550mm pour 30 jours.

Le tracé des isohyètes maximales tend à confirmer le rôle des reliefs, comme la falaise de Banfora, dans la distribution régionale de ces phénomènes pluvieux. Ces derniers sont évidemment essentiels par leurs conséquences hydrologiques et la genèse des crues exceptionnelles, tant du point de vue des débits de pointe instantanés que des volumes globaux écoulés. En ce sens, ces données fréquentielles ont un intérêt appliqué indéniable vis-à-vis des aménagements hydro-agricoles en particulier. Leur grande efficacité morphogénique permet aussi au naturaliste de mieux cerner, aux différentes échelles spatiales, la vitesse d'évolution des modelés en fonction de la durée de retour de ces évènements.

Agressivité du vent également :

- à l'échelle annuelle, les vents instantanés quotidiens maximums, supérieurs à 9 noeuds (4,85 m/s) affectent en effet un tiers des journées sur les deux stations de Bobo-Dioulasso et de Ouagadougou où l'on totalise respectivement 3000 et 3600 journées d'observations, entre

1968 et 1976 (ou 1977), c'est-à-dire durant la seule période sèche.

Les mois les plus fréquemment touchés sont encore *mai* et *juin*, pour lesquels on relève une *convergence des agressivités pluviale et éolienne*, un cumul des facteurs défavorables avec la vulnérabilité des sols peu ou pas couverts en fin de saison sèche ou mis en culture. Les coups de vents supérieurs à 10 noeuds (5,5 m/s) se produisent d'ailleurs dans 60% des cas lors des phénomènes orageux accompagnés de précipitations. Il s'agit principalement des lignes de grains, qui ont une double efficacité morphogénique, en entretenant des transports de particules grâce à leur vitesse de déplacement horizontal mais aussi en alimentant ce transport grâce à une force d'arrachement redoutable, liée à leur composante verticale ;

- cette dynamique érosive éolienne s'exerce suivant deux orientations privilégiées. L'une est E-NE à W-SW, la plus fréquemment empruntée et balayée par les pointes les plus violentes : 30 noeuds (16,2 m/s) par exemple, le 14 mai 1976, à Ouagadougou, avec une direction N.60°E. L'autre, du Sud au Nord, est révélée par le dessin des roses des vents efficaces ;

- l'analyse systématique des vitesses maximales instantanées, heure par heure, reste cependant à faire pour préciser ce travail.

Agressivité thermique enfin :

- les maximums enregistrés au premier passage du soleil au zénith (fin *avril*) sont supérieurs à 50°C au contact des roches cristallines et dépassent 60°C au-dessus des sols à cuirasses affleurantes. Ces très hautes températures constituent un puissant catalyseur pour les processus d'altération chimique. Elles représentent aussi un des facteurs favorables à l'évapotranspiration, terme essentiel du bilan hydrique dans ces régions, et expliquent partiellement les variations rapides des teneurs en eau dans les sols filtrants. Les extrêmes de mai sont enfin particulièrement défavorables à la germination des plantes.

- les écarts de températures, entre niveaux ou bien à une même profondeur dans la roche ou un sol, s'apparentent à de véritables chocs, dont le caractère brutal et répété est sans équivalent dans toute autre zone, y compris désertique, du fait de l'occurrence des pluies sur des surfaces surchauffées. Les abaissements maximums sont perçus en effet

en *mai* : ils sont de l'ordre de 10°C en 15 minutes dans un granite, de 18°C dans la cuirasse, à 2 cm de profondeur dans les deux cas.

L'examen des agents d'érosion atmosphériques tropicaux met en lumière l'étroitesse, au demeurant non spécifique à ce domaine, de leurs interactions. Il souligne en revanche peut être mieux qu'ailleurs, leur efficacité morphogénique potentielle durant la période de *contraste climatique, plus que de transition*, représentée par les premiers mois de l'hivernage.

Ces interrelations se compliquent cependant avec l'influence d'autres facteurs naturels, végétation et sols, ou anthropiques.

La végétation peut être analysée en tant que facteur explicatif de la dynamique actuelle. Son influence est alors relativement simple à cerner puisqu'elle va dans le sens d'un renforcement constant de la stabilité du milieu tout au long de la saison des pluies, ce qui est confirmé par les mesures expérimentales de ruissellement et d'érosion, au moins à l'échelle des parcelles, ou encore par la baisse des concentrations dans l'eau des rivières durant la seconde moitié de l'hivernage.

L'efficacité est liée à un étagement de la couverture avec trois niveaux d'interception bien souvent ; les herbacées hautes et basses jouant un rôle décisif qui n'est perturbé que par la mise en culture ou les feux de brousse.

Elle peut être également interprétée comme un témoin, un indicateur des variations climatiques latitudinales ou accidentelles, pédologiques et locales, anthropiques. Soumise à tant d'influences, la végétation ne présente plus sur l'ensemble du territoire qu'un dispositif zonal largement perturbé. A l'échelle d'un petit bassin versant comme celui d'Imiga (12°20' N), le paysage n'est qu'une mosaïque de formations ligneuses, herbacées ou cultivées, juxtaposées et étagées. La seule zonation reconnaissable est ici le fruit d'une occupation, par les hommes, de sols nettement différenciés du haut vers le bas des versants.

Du point de vue pédologique, la cartographie du bassin

d'Imiga et l'examen de la toposéquence de Pô-Banon nous ont permis de reconnaître une partie de la classification dressée par J.C. Leprun avec notamment les sols sur cuirasse ferrugineuse (nue, à dégradation de surface ou plus profonde) prééminents, mais aussi les sols sur cuirasse démantelée et matériaux d'altération à smectite largement prédominante.

Plus que la nature pédologique proprement dite, les structures de surface, masquant plus ou moins le sol, conditionnent son comportement hydrodynamique et les modalités de l'érosion. Par leur caractère peu perméable, elles limitent en effet l'infiltration et exacerbent le ruissellement. En revanche, leur rigidité, leur cohésion peuvent dans le même temps, par un paradoxe apparent, limiter l'érosion. Ces organismes pelliculaires sont d'une origine physique complexe, que le terme de battance recouvre mal, ou biologiques. Les examens microscopiques réalisés sur nos échantillons de Pô révèlent en effet le rôle des hyphes mycéliens et d'une algue dans le processus d'agglomération des grains de sables.

Enfin, l'existence des plaques de sols nus, d'origine physique, biotique et/ou anthropique, milite par leur compacité et aussi, nous y reviendrons, par leur situation, en faveur d'une continuité entre le ruissellement de versants et l'écoulement concentré dans les bas-fonds.

2°/- Des mesures expérimentales du ruissellement et de l'érosion, on retiendra tout d'abord les nombreux enseignements fournis *à l'échelle des parcelles*, suivies à Pô pendant cinq ans (1978-1982) ou, plus généralement, par l'ensemble des chercheurs, sur huit sites différents entre 11°11'N et 14°34'N :

- dans un contexte de précipitations pourtant déficitaires et sur des versants représentatifs par leurs pentes inférieures à 3%, la savane, analysée à travers ces témoins, est *une terre de contrastes* morphodynamiques, soumise à une sorte de "loi du tout ou rien". Protégeant presqu'aussi bien le sol qu'une forêt (E. Roose) lorsqu'elle est encore dense, la savane "naturelle" peut être considérée comme *un domaine pénéstable*, caractérisé par un ruissellement moyen annuel de l'ordre de 1% et une érosion mécanique insignifiante.

En revanche, *la rupture d'équilibre est totale avec les*

pratiques anthropiques des feux de brousse précoces ou tardifs et bien sûr la mise en culture. Les coefficients de ruissellements annuels moyens dépassent 20% sous une monoculture conduite à plat et 40% sur sols nus peu travaillés, avec des écoulements unitaires maximums de plus de 50%, voire 75% de l'averse.

L'érosion mécanique varie dans les mêmes conditions : déjà très préoccupante sur sols cultivés (1 tonne/ha/an au moins), elle dépasse 10 tonnes sur les sols nus.

Les régressions linéaires multiples pas à pas, relatives aux données de Pô, montrent par défaut que les facteurs climatiques et l'indice d'humectation n'expliquent que très partiellement cette hydrodynamique. La couverture végétale ainsi que l'état de surface des sols, l'un et l'autre pouvant être modifiés par l'homme, conditionnent davantage la morphogenèse, tout du moins à cette échelle.

Le ruissellement et l'érosion ne sont pas pour autant totalement assimilables. En effet, le piégeage des particules solides par la couverture herbacée bloque leur transport, tandis que le ruissellement n'est que ralenti ; mieux, l'ablation est rendue difficile ou impossible sur les croûtes superficielles à forte cohésion qui, dans le même temps, exacerbent l'écoulement ;

- du point de vue de la dégradation chimique, la charge des eaux de ruissellement varie dans le temps et surtout dans l'espace, notamment sur les parcelles situées au pied des collines birrimiennes où les pertes en matières dissoutes peuvent approcher 100 kg/ha/an. Mais les départs paraissent relativement très minimes par rapport à l'érosion mécanique, particulièrement sur les parcelles cultivées (1 à 3% de l'érosion totale). Le drainage, même à faible profondeur, très réduit selon les bilans hydriques établis à Pô, peut être occasionnellement important du moins sous des sols gravillonnaires situés en aval de versant.

La confrontation des données relatives à l'écoulement sur *les bassins versants* montrent :

- une grande variabilité interannuelle des coefficients, quelle que soit la taille de l'unité considérée. A Imiga par exemple, ce coefficient varie entre 1,8% et 11,1% sur le bassin de 12 km^2, entre 6,2% et

21,8% sur l'unité emboîtée de 5 km².

Dans aucun des cas, le total pluviométrique annuel constitue un facteur explicatif suffisant. La distribution préférentielle des pluies en début d'hivernage (favorisant la croissance rapide du tapis herbacé apte à contrarier les ruissellements ultérieurs) ou en fin de saison, leur rapprochement dans le temps et, à travers lui, l'humectation plus ou moins marquée des sols, leur distribution dans l'espace représentent des paramètres décisifs ;

- une diminution de l'efficacité relative des écoulements au-delà d'un seuil de surface difficile à définir dans la classe des petits à moyens bassins versants. A Imiga, le ruissellement perd de son efficacité relative, voire absolue , d'amont en aval. La multiplication des pertes par soutirage, dans un lit mineur discontinu, et par débordement, en est l'une des raisons. En revanche, *la continuité* du ruissellement, si difficile à appréhender, nous semble applicable à toutes les plaques de sols nus du fait de leur situation préférentielle à proximité immédiate des talwegs. Le phénomène est d'autant moins négligeable que ces unités peuvent représenter, comme à Imiga, 10% au moins du territoire. Le calcul des récurrences des débits extrêmes doit impérativement prendre en compte l'existence de ces unités à très fort coefficient de ruissellement en vue d'un meilleur dimensionnement des barrages à l'aval des petits bassins versants.

-Les taux de dégradation spécifique sont eux aussi très irréguliers (7 à 85 tonnes/km²/an à Imiga) mais sensiblement plus comparables entre bassins, quelle que soit la taille. Généralement, ces valeurs sont comprises entre 50 et 100 tonnes/km²/an, compte non tenu des transports de fond probablement importants si l'on en juge par l'extrême mobilité du fond des lits fluviaux. La traduction de ces dégradations en tranche de terrain enlevé par an ou par siècle n'a plus, à cette échelle, de signification physique réelle. *Le phénomène d'érosion est fréquemment discontinu dans l'espace*. L'importance absolue des ravinements ponctuels a été soulignée en effet à toute latitude et aussi, de manière relative, par rapport au décapage aréolaire, sur le petit bassin d'Imiga. Cette discontinuité du transport des particules est renforcée par les pièges de la végétation (hormis dans les ravins mis à nu) ou

des variations de pente, par les phénomènes d'alluvionnement dans les bas-fonds lors des débordements. La comparaison des transports sur versant (0,1 à 10 voire 50 tonnes/ha/an à l'échelle de la parcelle) et dans les cours d'eau (0,1 à 1 tonne/ha/an) paraît dès lors peu significative. Il est vrai que la distorsion souvent soulignée peut être liée à la méconnaissance des transports de fond ou même largement effacée si l'on n'oublie pas la diversité du bassin, la part prise par chaque unité paysagique (savane, champ, sols nus, etc...) et les taux d'érosion correspondants. Mais, même dans ce cas, l'analogie éventuelle des valeurs peut être illusoire et ne signifie pas forcément qu'une charge solide dérive simplement de l'autre.

Plus que les mesures simultanées de charges effectuées sur les bassins emboîtés d'Imiga, mesures encore trop peu nombreuses et réalisées en fin de saison des pluies, ce sont les observations, au demeurant délicates, relatives au phénomène d'accumulation qui nous permettent de retenir cette hypothèse d'une discontinuité des transports. A l'inverse de l'ablation qui conduit bien souvent à la mise à jour progressive d'un horizon-repère, l'horizon induré, l'accumulation est difficilement perceptible. L'accumulation des sables eux-mêmes n'est aisément repérable qu'à travers les petits cônes édifiés au débouché des incisions linéaires de bas de versant (Photo 8). Elle est encore visible lorsque le ruissellement balayant le versant conduit à la mise en place d'auréoles blanchâtres bordant le talweg. Mais cette accumulation est généralement très diffuse. Elle n'en est pas moins sensible, à notre avis, jusque dans les bas-fonds élémentaires, en tête de bassin, qui ne sont pas exploités et conservent, même en fin de saison sèche, un tapis herbacé serré. Même à la suite d'une pluie exceptionnelle en début d'hivernage comme celle du 19 juin 1983 à Imiga (pluie moyenne : 76,5mm ; durée de retour en juin voisine de 50 ans), on constate que les sables s'accumulent en petits bancs dans un réseau d'ordre 2 ou 3 dont la pente longitudinale devient inférieure à 1%.

Peut-être le "hiatus" existant entre les nombreuses recherches sur parcelles (généralement petites et où l'on a pour seul objectif une mesure d'ablation) et celles conduites par les hydrologues à l'aval des grands bassins versants, explique-t-il que cette accumulation ait été très peu reconnue ? Elle semble bien se développer, au moins pour

les sables, à partir d'un seuil de superficie de l'ordre de la dizaine d'hectares ou du km² et conduit localement à une péjoration agronomique non négligeable des bas-fonds. Les débits liquides, quant à eux, ne sont affectés par ces phénomènes de discontinuité que plus en aval lorsque les écoulements débouchent dans des bas-fonds plus amples (réseau d'ordre 5).

- La diversité des milieux, la variabilité temporelle d'une érosion liée essentiellement et de manière aléatoire à la conjonction des pluies les plus agressives et du travail du sol, doivent inciter cependant à la prudence avant de généraliser ces premières conclusions.

Seule la dégradation chimique paraît davantage comparable entre unités de tailles différentes, les taux de dissolution montrant une remarquable identité de la parcelle au grand bassin avec des valeurs de l'ordre de 5 à 10 tonnes/km²/an.

Les différentes dégradations enregistrées, principalement mécaniques par l'eau et par le vent mais aussi chimiques ou biologiques, jointes à la persistance de la sécheresse, participent toutes d'une "sahélisation" des savanes, justement nommée dans la mesure où elles se marque de la manière la plus évidente par une réduction en densité et en hauteur du couvert végétal. Mais l'analogie s'arrête là : il s'agit en effet d'un domaine beaucoup plus peuplé que le Sahel proprement dit et où l'agressivité climatique reste potentiellement plus forte que sur les marges septentrionales du pays. L'absence d'une politique de lutte antiérosive, intégrée dans des projets de développement rural réalistes, serait ici d'autant plus catastrophique.

Cette "sahélisation" n'est pas liée à un simple déterminisme physique. L'homme, par des activités préjudiciables mais presque toujours compréhensibles dans leur contexte socio-économique, a ouvert la voie aux excès climatiques si l'on en croît les évolutions reconnues à Imiga, à Boulbi et à Pô. A cette occupation de l'espace rural et notamment à l'extension des superficies cultivées est ainsi reliée une évolution géomorphologique récente dont les témoins ne sont pas toujours manifestes. Processus et formes d'érosion s'enchaînent pourtant dans l'espace depuis les versants où prédomine le ruissellement diffus jusqu'aux ravins

dans les bas-fonds en passant par les bas de pente et leurs rigoles ou leurs micro-marches d'escalier sur plaques de sols nus.

S'il est acquis que le poids du facteur anthropique est considérable dans la dynamique des paysages de savane et la dégradation des sols, il n'en est pas moins évident aujourd'hui que rien ne peut aboutir en matière de lutte antiérosive sans une participation *durable* des paysans eux-mêmes.

L'examen critique des moyens de lutte antiérosive développés par des organismes officiels ou des organisations non gouvernementales montre en effet que les contraintes auxquelles est confronté l'aménageur sont nombreuses, de nature très variée : technique, sociologique, économique ou foncière et jouent souvent de manière combinée. L'approche de ces problèmes doit être désormais multidisciplinaire et concertée avec le paysan qui conçoît, mieux que quiconque, sa société comme un tout.

La responsabilité des pouvoirs publics est d'abord de fixer les ruraux à leurs terres par une politique de prix à la production plus rémunérateurs. Celle de l'aménageur est d'établir des projets réalistes, de rechercher notamment une meilleure gestion des ressources *disponibles* : l'arbre, l'herbe, les résidus de culture, tous efficaces à plusieurs niveaux (érosion pluviale, érosion mécanique, infiltration, nutrition minérale). Cet aménagement rural est inséparable en conséquence d'une meilleure association de l'élevage et de l'agriculture.

La connaissance de la structure et du fonctionnement du milieu rural tropical, de son exploitation par les hommes, suppose encore un bon nombre de recherches patientes. Puisse cette approche naturaliste, que nous avons souhaitée la plus globale possible, apporter aux aménaneurs quelques outils supplémentaires dans leur combat pour offrir de meilleures conditions de vie aux hommes et femmes de la "brousse".

BIBLIOGRAPHIE

ALBERGEL J., CARBONNEL J.P., GROUZIS M. (1984): Pluies, eaux de surface. Productions végétales en Haute-Volta. ORSTOM. 58 p.

ALBERGEL J.(1986 a): Evolution de la pluviométrie en Afrique soudano-sahélienne. Exemple du Burkina Faso. ORSTOM. 19 p. inédit.

ALBERGEL J., GIODA A. (1986 b): Extension des surfaces agricoles et modification de l'écoulement. Analyse sur deux bassins de la savane africaine. XIXème Journées de l'Hydraulique. Paris. Tome 1, p. 191-196.

ALBERGEL J. (1987): Genèse et prédétermination des crues au Burkina Faso. Du m^2 au km^2 : étude des paramètres hydrologiques et de leur évolution. Thèse d'Université. Paris VI. 341p.

ASECNA - Bureau d'études (1976): Analyses des lignes de grains dans la boucle du Niger. La Météorologie. VI série. N°6. p. 183-189.

AUBREVILLE A. (1949): Climats, forêts et désertification de l'Afrique tropicale. Société d'Editions géographiques, maritimes et coloniales. Paris. 351 p.

AUDRY P., COMBEAU A., HUMBEL F.X., ROOSE E., VIZIER J.F. (1973) : Essai sur les études de dynamique actuelle des sols. Définition, méthodologie, techniques, limitations actuelles, quelques voies de recherche possible (suite) ; in : Bulletin du groupe de travail sur la dynamique actuelle des sols, n° 2.

AVENARD J.M., ROOSE E. (1972) : Quelques aspects de la dynamique actuelle sur versants en Côte d'Ivoire et en Haute-Volta. ORSTOM. Centre d'Adiopodoumé. 25 p.

AVENARD J.M., MICHEL P. (1982): Aspects de la dynamique actuelle dans la zone tropicale à saison sèche de l'Afrique de l'Ouest. ULP Strasbourg. 42 p.

AVENARD J.M., MICHEL P. (1985) : Aspects of present-day processes in the seasonally wet tropics of West Africa. p.75-92 ; in: Environmental Change and Tropical Geomorphology. Editors I.Douglas & T.Spencer. B.G.R.G.; G.Allen & Unwin. London.

BAILLY C., BENOIT DE COIGNAC G., MALVOS C., NINGRE J.M., SARRAILH J.M. (1974): Etude de l'influence du couvert naturel et de ses modifications à Madagascar. Expérimentations en bassins versants élémentaires ; in: Cahiers scientifiques, n°4, 114 p.

BALDY C., OUEDRAOGO J.P. (1976 a) : Etude agrométéorologique de la région de Bobo-Dioulasso. Agrhymet. Dir. Météo. Haute-Volta. 90 p.

BALDY C., OUEDRAOGO J.P. (1976 b) : Etude agrométéorologique : note préliminaire concernant l'évapotranspiration potentielle en Haute-Volta et son calcul par la méthode du bilan d'énergie de Penman. Dir. Météo. Haute-Volta. 16 p.

BALDY C. (1978) : Etude du régime d'établissement des pluies en Haute-Volta. Dir. Météo. Haute-Volta. 18 p.

BALDY C. (1980): Cours d'agrométéorologie et de bioclimatologie . Institut Supérieur Polytechnique. Ouagadougou. 90 p.

BALDY C., DELECOLLE R., GUINOT J.P., KONTONGOMDE H. (1982) : Etude agrométéorologique des vents au sol en Haute-Volta. p.325-333; in: Proceedings of the technical conference on climate in Africa. Arusha. 535 p.

BALDY C. (1985) : Contribution à l'étude des applications de la bioclimatologie végétale à l'agrométéorologie des zones arides et semi-arides en climats méditerranéen et tropical. Thèse Dr.es.Sc. Marseille. 85 fig., 26 tabl., 8 cartes. 213 p.

BALLIF J.L, HERRE C.H. (1985) : Ruissellement et érosion dans le vignoble champenois. Synthèse des mesures effectuées entre 1981 1984; in:Le vigneron champenois, n°11, p. 573-581.

BARAT C. (1957): Pluviologie et aquidimétrie dans la zone intertropicale. Mém. Inst. fr. Afr. noire, Sénégal, n° 49, 80 p.

BARDINET C. (1981) : Télédétection des paysages africains par Landsat et Météosat. Ann. de Géogr, n° 499, p. 354-380.

BAYO OMOTOSHO J. (1985) : The separate contributions of line psqualls, thunderstorms and the monsoon to the total rainfall in Nigeria. Journal of Climatology, vol. 5, p. 543-552.

BEAUDET G. (1976) : Essai sur la zonation et la signification géomorphologique des cuirasses ferrugineuses en Afrique occidentale. p.35-52; in: Travaux et Documents de Geographie Tropicale, n°33, Géomorphologie des reliefs cuirassés dans les pays tropicaux chauds et humides. Table Ronde CEGET. 414 p.

BEAUDET G., COQUE R. (1986) : Les modelés cuirassés des savanes du Burkina Faso. Rev. Géol. Dyn. Géo Phys., vol. 27, fasc. 3-4, p. 213-224.

BEDU L. (1986) : Contribution à la mise en valeur des sols du Yatenga. Aspects techniques et projet d'aménagement. Le cas de Ziga. Mémoire CIRAD. 90 p.

BENNET H.H. (1939): Elements of soil conservation. 2nd. edition New York, Mac Graw Hill.

BENOIT M. (1977) : Introduction à la géographie des aires pastorales soudaniennes de Haute-Volta. Travaux et Documents de l'ORSTOM, n° 69, 95 p.

BILLAZ R. et al. (1982a) : Recherches et développement au Yatenga. Acquis 1980-1981. IPDAOS-IFARC. 70 p.

BILLAZ R. (1982b) : Problèmes posés par l'évaluation d'un programme de culture attelée. Exemple du Yatenga. Economie rurale, n°147-148, p.136-138.

BIROT P. (1959): Précis de géographie physique générale. A.Colin. 403 p.

BIROT P. (1981) : Les processus d'érosion à la surface des continents. Masson. 607 p.

BIROT Y., GALABERT J. (1969-1970) : Economie de l'eau et travail du sol dans les plantations forestières de zone sèche. Application à la zone sahélo-soudanienne. Bois et forêts des tropiques, n°127: p.29-44 ;n° 128: p.23-37; n°129: p. 3-20; n°130: p. 12-22.

BIZE J. (1966) : Application d'observations géomorphologiques et hydrodynamiques à la prospection des nappes des terrains d'altération en Côte d'Ivoire et en Haute-Volta. BURGEAP, R. 413.

BLACKWELDER E. (1933): The insolation hypothesis of rock weathering. American Journal of Science, 5e série, vol. 26, n° 152, p. 97-113.

BLOT A., PION J.C., WACKERMANN J.M. (1973) : Un exemple de corrélation de rang en géochimie : les altérations du socle birrimien en zone tropicale sèche (Sénégal oriental et Haute-Volta). Cah. ORSTOM, sér. Géol., vol. V, n°1, p. 25-34.

BONKOUNGOU G.E., BORTOLI L., OUADBA J.M., POUSSI M. (1985) : Projet d'étude et actions intégrées de reboisements villageois et familiaux (Projet UNSO/DES/BKF/80/X02). Rapport d'activité du volet recherche durant la 1ère phase (1983-1984) du projet. 87 p.

BONVALLOT J., BOULANGE B. (1970) : Note sur le relief et son évolution dans la région de Bongouanou (Côte d'Ivoire). Cah. ORSTOM, sér. Géol., vol.II, n°2, p. 171-183.

BONVALLOT J. (1972) : Utilisation des courbes granulométriques pour la cartographie des phénomènes de dynamique actuelle. Cah. ORSTOM, sér. Sci. Hum., vol. IX, n°2.

BORTOLI L. (1984): Caractéristiques structurales de la végétation ligneuse et herbacée d'une mise en défens de 10 ans dans une savane soudanienne de la région de Sapone. Burkina Faso. (Contrat UNESCO-DGRST). IRBET. Ouagadougou. 22 p.

BOUDET G. (1972) : Désertification de l'Afrique tropicale sèche. Adansonia, sér. 2 , 12, (4), p. 505-524.

BOUGERE J. (1976): Recherches sur les paysages soudano-birrimiens de la région de Kaya (Haute-Volta). Thèse 3ème cycle. Paris VII. 84 p.

BOUGERE J. (1978) : Saison sèche, saison humide: approche méthodologique pour les régions à longue saison sèche. Bulletin Ecologie, t. 9, 4, p. 301-305.

BOUGERE J., HUGOT G. (1979) : Le piétinement par le bétail : facteur de dégradation des pâturages. L'exemple de la dune de Tin Ejar (Haute-Volta). Revue Photo Interprétation, n°1, fasc. 5-6 a, p. 33-46.

BOULET R. (1968) : Etude pédologique de la Haute-Volta. Région Centre-Nord. ORSTOM. Centre de Dakar-Hann. 349 p. Carte au 1/500.000.

BOULET R., LEPRUN J.C. (1970): Etude pédologique de la Haute-Volta. Région Est. ORSTOM. Centre de Dakar-Hann. 331 p. Carte au 1/500.000.

BOULET R. et al. (1970) : Etude pédologique de la Haute-Volta. Rapport général de synthèse. 30 p.

BOULET R. (1976) : Notice des cartes de ressources en sols de la Haute-Volta. ORSTOM. Paris. 97 p.

BOULET R. (1978): Toposéquences de sols tropicaux en Haute-Volta. Equilibre et déséquilibre pédobioclimatique. Mémoires ORSTOM. n°85. 272 p.

BRUNET Y. (1984) : Modélisation des échanges sol nu-atmosphère. Essai de validation locale et influence de la variabilité spatiale du sol. Thèse Grenoble. INPG, 189 p.

BRUNET-MORET Y. (1963) : Etude générale des averses exceptionnelles en Afrique occidentale. République de Haute-Volta. ORSTOM-CIEH. 23 p.

BRUNET-MORET Y. (1968): Etude générale des averses exceptionnelles en Afrique occidentale. Rapport de synthèse. ORSTOM-CIEH.

BRUNET-MORET Y., ROCHE M. (1975) : Persistance dans les suites chronologiques de précipitations annuelles. Cah. ORSTOM, sér. Hydrol., vol. XII, n°3, p. 147-165.

CAPO-CHICHI M., SAMRETH L. (1983) : Aspects socio-économiques des aménagements de lutte antiérosive. Programme F.D.R. Haute-Volta. Séminaire E.I.E.R. (31 Mai - 12 Juin 1983). 7 p.

CARBON (1964): Périmètre de restauration des sols de Ouahigouya. Projet d'aménagement et de mise en valeur agricole. Tome 1: Etude du milieu. G.E.R.E.S. 60 p.

CARBONNEL J.P., HUBERT P. (1985) : Sur la sécheresse au Sahel d'Afrique de l'Ouest. Une rupture climatique dans les séries pluviométriques du Burkina Faso (ex. Haute-Volta) C.R. Acad. Sci., Paris, t. 301, Série II, n°13, p. 941-944.

CARRE P.: Quelques aspects du régime des apports fluviatiles de matériaux solides en suspension vers le lac Tchad. Cah. ORSTOM, sér. Hydrol., vol. IX, n° 1, p. 19-45.

CASENAVE A. (1982): Le mini-simulateur de pluie. Conditions d'utilisation et principes de l'interprétation des mesures. Cah. ORSTOM, sér. Hydrol., vol. XIX, n°4. p. 207-227.

CHARREAU C. (1968) : Pluie et érosion. Séminaire de météorologie et de climatologie à Dakar. p. 245-255.

CHAUVEL A. (1977) : Recherches sur la transformation des sols ferrallitiques dans la zone tropicale à saisons contrastées. Travaux et Documents de l'ORSTOM, n° 62, 532 p.

CHEVALLIER P. (1982) : Simulation de pluie sur deux bassins-versants sahéliens (Mare d'Oursi , Haute-Volta). Cah. ORSTOM, sér. Hydrol., vol. XIX, n°4. p. 253-297.

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, 251 p.

CHOURET A. (1977) : Régime des apports fluviatiles de matériaux solides en suspension vers le lac Tchad : synthèse des études de l'ORSTOM en République du Tchad. A.I.H.S. n°122, p. 126-133.

CHRISTOI R. (1966): Mesure de l'érosion en Haute-Volta. Oléagineux. 21, 8-9, p. 531-534.

C.I.E.H. (1965) : République de Haute-Volta. Précipitations journalières de l'origine des stations à 1965. 686 p.

C.I.E.H. et U.S.A.I.D. (1979) : L'utilisation des ressources en eau et des terres des régions de savane. Rapport 1979, vol. 1.

CLANET J.C. (1986): Système pastoraux et sécheresses (Burkina Faso-Tchad ; 1965-1985). Colloque Sécheresses comparées Nordeste Sahel. IHEAL. Paris.

CLAUDE J., CHARTIER R. (1975): Mesures de l'envasement dans les retenues de six barrages en Tunisie. Campagne de 1975. Cah. ORSTOM, sér. Hydrol., vol. XIV, n°1, p. 3-35.

CLAUZON G., VAUDOUR J. (1971) : Ruissellement, transports solides et transports en solution aux environs d'Aix en Provence. Rev. Géol. Dyn. Géo. Phys., vol. XIII, fasc. 5, p. 489-504.

COLLINET J., VALENTIN C. (1979) : Analyse des différents facteurs intervenant sur l'hydrodynamique superficielle. Nouvelles perspectives. Applications agronomiques. Cah. ORSTOM, sér. Pédol., vol. XVII, n°4, p. 283-328.

COLLINET J., VALENTIN C., ASSELINE J., CHEVALLIER P. et SICOT M. (1980) : Etude LAT/03. Ruissellement, infiltration et érosion en zones sahélienne et subdésertique. Rapp. de terrain sur la première opération "Mare d'Oursi".DGRST-ORSTOM. multigr.

COQUE R. (1977) : Géomorphologie. A. Colin. Coll. U. 430 p.

COUTARD J.P., BENOIST J.P., GUILLEMET G. (1974) : Pénétration de la chaleur dans des échantillons de calcaire et de granite. Bulletin du Centre de Géomorphologie du CNRS, Caen, n°18, p. 21-29

COUREL M.F. (1976) : Etude géomorphologique des dunes du Sahel. Niger nord occidental - Haute Volta septentrionale. Thèse 3ème cycle, Paris VII, 284 p.

COUREL M.F. (1984) : Etude de l'évolution récente des milieux sahéliens à partir des mesures fournies par les satellites. Thèse Dr. Etat, Paris I, 407 p.

C.T.F.T. (1977): Etudes CES-DRS à Linoghin et à Bané. Campagne 1976, 21 p.

C.T.F.T. (1980): Conservation des sols au sud Sahara. Ministère de la Coopération-CTFT. Paris, 2ème édit., 296 p.

C.T.F.T. (1981): Etude du ruissellement et de l'érosion à Bané (campagne 1980) et essais forestiers. 30 p.

DA E.C.(1984) : Recherches géomorphologiques dans le sud de la Haute-Volta. La dynamique actuelle en pays Lobi. Thèse 3ème cycle ULP. Strasbourg. 309 p.

DABIRE A.B. (1980): Techniques de conservation des eaux et du sol et incidences sur le bilan hydrique des cultures pluviales. Mémoire I.S.P. Ouagadougou. 95 p.

DAVEAU S. (1960) : Les plateaux du sud-ouest de la Haute-Volta : Dakar. 64 p.

DAVEAU S. (1962) : Principaux types de paysages morphologiques des plaines et plateaux soudanais dans l'Afrique de l'Ouest. Information Géogr., 2, p. 61-72.

DAVEAU S., LAMOTTE M., ROUGERIE G. (1962) : Cuirasses et chaînes birrimiennes en Haute-Volta. Ann. de Géogr., n°387, p. 460-482.

DEBAZAC E.F. et al. (1983) : Rapport de synthèse. Séminaire E.I.E.R. Conservation des sols et des eaux au sud du Sahara (31 Mai - 12 Juin 1983). 22 p.

DEGOULET A. (1984) : Etude des pluies journalières de fréquence rare au Mali, en Mauritanie et au Sénégal. CIEH. Série Hydrologie. 129 p.

DELWAULLE J.C. (1973): Résultats de six années d'observations sur l'érosion au Niger. Bois et Forêts des Tropiques, 150, p.15-37.

DEMANGEOT J. (1976):Les espaces naturels tropicaux. Masson. 190 p.

DENNET M., ELSTON J., RODGERS J. (1985): A reappraisal of rainfall trends in the Sahel. Journal of Climatology, vol. 5, p. 353-361.

DE NONI G., TRUJILLO G., VIENNOT M. (1986): L'érosion et la conservation des sols en Equateur. Cah. ORSTOM, sér. Pédol., vol. XXII, n° 2, p. 235-245.

DE PLOEY J., SAVAT J. (1968) : Contribution à l'étude de l'érosion par le splash. Zeitschrift für Geomorphologie. Suppl. Bd. 12, p. 174-193.

DE PLOEY J. (1969) : L'érosion pluviale : expériences à l'aide de sables traceurs et bilans morphogéniques. Acta géogr. Lovaniensia, vol. 7, p. 1-28.

DERRUAU M. (1965): Précis de Géomorphologie. Masson. 415 p.

DE WISPELAERE G., TOUTAIN B. (1976): Estimation de l'évolution du couvert végétal en 20 ans consécutivement à la sécheresse dans le Sahel voltaïque. Revue Photo Interprétation, n°3, fasc. 2, p.8-18.

DHONNEUR G. (1973) : Circulation générale et types de temps sur l'Afrique occidentale et centrale. Agrometeorology in the semi-arid areas south of the Sahara. Dakar. WMO 340. 254 p.

DOORENBOS J., PRUITT W. (1975) : Les besoins en eau des cultures. Bulletin d'irrigation et de drainage. F.A.O. n°24, 198p.

DOSSO M., KILIAN J., SAVARY G. (1983): Campagne de simulation des données SPOT: évaluations des sols dégradés et étude du réseau hydrographique (Bagré, Haute-Volta). IBM France. Etude F-059. 34 p.

DRESCH J. (1953): Plaines soudaniennes. Rev. Géom. Dyn., VI, n°1, p. 39-44.

DRESCH J. (1966) : Les paysages tropicaux humides; in: Géographie générale. Encyclopédie de la Pléïade. Gallimard. Paris. p. 609-708.

DUBREUIL P. (1960): Etude hydrologique de petits bassins versants en Côte d'Ivoire. Rapport général. Tome II. Zone de savane. ORSTOM. 141 p.

DUBREUIL P., CHAPERON P., GUISCAFRE J., HERBAUD J. (1972) : Recueil des données de base des bassins représentatifs et expéri mentaux. Années 1951-1969. ORSTOM. 916 p.

DUBUCQ M. (1986) : Télédétection spatiale et érosion des sols. Etude bibliographique. Cah. ORSTOM, sér. Pédol., vol. XXII, n° 2, p. 247-258.

DUCHAUFOUR P. (1977) : Pédologie. Vol.1: Pédogénèse et classification. Masson. 477 p.

DUGUE P. (1984): Quelques observations sur l'utilisation des résidus de récolte au Centre Yatenga. Enquête au niveau de cinq exploitations du village de Sabouna durant la saison sèche 1982-1983. IVRAZ-IRAT. 21 p.

DUGUE P. (1986): Appropriation des techniques de lutte contre l'érosion et le ruissellement par les paysans du Yatenga; in: Aménagements hydro-agricoles et systèmes de production. III ème Séminaire du Département Systèmes Agraires du CIRAD. 18 p.

DUMAS J. (1965) : Relation entre l'érodibilité des sols et leurs caractèristiques analytiques. Cah. ORSTOM, sér. Pédol., vol. III, n°4, p. 307-333.

DUMAS R., CLAUDE J. (1977): Mesures des transports solides de la Volta Blanche au site de Niaogho. Campagne 1977. ORSTOM. 20 p.

DUMONT R. (1986): Pour l'Afrique, j'accuse. Coll. Terre Humaine. Plon. 462 p.

DUNNE T. (1979) : Sediment yield and land use in tropical catchments. Journal of Hydrology, 42, p. 281-300.

ENJALBERT H. (1956): Paysans noirs: Kabré du Nord-Togo. Cah.Outre. Mer., 9, p. 137-180.

ERHART H. (1955) : Biostasie et rhexistasie. Esquisse d'une théorie sur le rôle de la pédogénèse en tant que phénomène géologique. C. R. Acad. Sci. Paris, 241, p. 1218-1220.

ESCHENBRENNER S., GRANDIN G. (1970) : La séquence de cuirasses et ses différenciations entre Agnibilékrou (Côte d'Ivoire) et Diébougou (Haute-Volta). Cah. ORSTOM, sér. Géol., vol. II, n°2, p. 205-246.

ESCHENBRENNER S., BADARELLO L. (1975) : Notice explicative de la carte des paysages morpho-pédologiques. Feuille Odienné à 1/200 000 . ORSTOM. Centre d'Adiopodoumé. Côte d'Ivoire. 95 p.

FACIBENI P. , PION J.C. (1976) : Recherches géologiques et minières. Boromo-Houndé. UPV.74-004. Nations Unies. Etude géomorphologique. 43 p. (77 cartes GEOMAP).

FAHO T. (1986) : Expérience de l'organisme régional de développement (ORD) Yatenga en matière de lutte contre l'érosion et de gestion des eaux de surface ; in : Aménagements hydro-agricoles et systèmes de production. IIIème Séminaire du Département des Systèmes Agraires du CIRAD. 15 p.

F.D.R. (1983) : Aménagement des sites antiérosifs. Programme complémentaire au F.D.R. 3. Etude de factibilité. Ouagadougou. 27 p.

FEODOROFF A. (1965) : Mécanismes de l'érosion par la pluie. Rev. Géol. Dyn. Geo. Phys., 2, p. 149-163.

FONTES J.(1983): Essais cartographiques de la végétation par la télédétection: quelques exemples pris en Haute-Volta. Thèse 3ème cycle. Université de Toulouse. 175 p.

FOREST F. (1974): Bilan hydrique efficace et prospective des besoins en eau des cultures pluviales en zone soudano-sahélienne. Cahier pédagogique. CIEH - Ministère de la Coopération. Paris.

FOURNIER F. (1954) : La parcelle expérimentale. Méthode d'étude expérimentale de la conservation du sol, de l'érosion et du ruissellement. Extrait du rapport de la mission O.E.C.E. "Etude des sols" aux Etats-Unis (T.A. 38-63). ORSTOM. Bondy.

FOURNIER F. (1960) : Climat et érosion. PUF. Paris. 201 p.

FOURNIER F. (1962): Carte du danger d'érosion en Afrique au sud du Sahara fondée sur l'agressivité climatique et la topographie. Notice explicative. CEE - CCTA, Paris, 11 p.

FOURNIER F. (1967) : La recherche en érosion et conservation des sols sur le continent africain. Sols africains, 12, 1, p. 5-53.

FOURNIER F. (1969): Transports solides effectuées par les cours d'eau. Résultats au 1.8.1967 de l'enquête sur les données acquises avant la Décennie Hydrologique Internationale. AIHS, 14, 3, p. 7-49.

FRANQUIN P. (1969): Analyse agroclimatique en régions tropicales. Saison pluvieuse et saison humide. Applications. Cah. ORSTOM, sér. Biol., n°9, p. 65-95.

FRECAUT R. (1981): Les transports solides fluviaux en suspension dans les bassins tropicaux humides; p. 215-225; in: Eaux et climats. Mélanges géographiques offerts en hommage à C.P. PEGUY. CNRS. Grenoble.

FRECAUT R. (1982) : Eléments d'hydrologie et de dynamique fluviales. Tome 1: Hydrologie et dynamique fluviales des régions chaudes et humides des basses latitudes. Publications Université Nancy II. 147 p .

FRITSCH J.M., SARRAILH J.M. (1986): Les transports solides dans l'écosystème forestier tropical humide guyanais: effets du défrichement et de l'aménagement des pâturages. Cah. ORSTOM, sér. Pédol., vol. XXII, n° 2, p. 209-222.

GALABERT J., MILLOGO E. (1972) : Indice d'érosion par la pluie en Haute-Volta. C.T.F.T. Ministère de l'Agriculture, de l'Elevage et des Eaux et Forêts. 57 p.

GEERLING C. (1982) : Guide de terrain des ligneux sahéliens et soudano-guinéens. Meded. Landbouwhogeschool. Wageningen 82-3. 340 p.

GEIGER R. (1966): The climate near the ground. 4th Ed. Harvard Press, Cambridge, Mass. 611 p.

GEORGE B. (1968) : Rôle de l'analyse du modelé latéritique dans la prospection des nappes d'eau des terrains d'altération en Afrique occidentale. Bulletin B.R.G.M. (2° série), Section III, n°2, p. 53-65.

GIROD M. (1978) : Les roches volcaniques. Pétrologie et cadre structural. Doin. 239 p.

GODARD A. (1977) : Pays et paysages du granite. P.U.F. 232 p.

GODARD A., RAPP A. (1987) - Processus et mesure de l'érosion. Editions du CNRS. 573 p.

GOUJON P., BAILLY C. (1974) : Aménagements antiérosifs et économie de l'eau. XIIIème Journées de l'Hydraulique. Paris. 7 p.

GOUROU P. (1982): Terres de bonne espérance. Le monde tropical. Coll. Terre Humaine. Plon. 456 p.

GRANDIN G. (1976) : Aplanissements cuirassés et enrichissement des gisements de manganèse dans quelques régions d'Afrique de l'Ouest. Thèse Sciences. Strasbourg, 410 p.

GREGORY K.J., WALLING D.E. (1978): Drainage Basin. Form and Process. A geomorphological approach. London. Arnold. 458 p.

GRESILLON J.M.,HERTER P., LAHAYE J.P.(1977): Note sur le dimensionnement des ouvrages évacuateurs de crues en Afrique de l'Ouest sahélienne ou tropicale. Bull. liaison du CIEH, n°28-29, p. 17-48.

GRESILLON J.M., REEB J. (1981) : Eléments pour l'appréciation des dépôts solides dans les barrages de Haute-Volta. Bull. E.I.E.R., n° 5, 6 p.

GRIGGS D.T. (1936) : The factor of fatigue in rock exfoliation. Journal of Geology, 44, p. 783-796.

GROUPE CHADULE (1974) : Initiation aux méthodes statistiques en géographie. Masson. Coll. Géographie. 192 p.

GUIGO M. (1979) : Hydrologie et érosion dans l'Apennin septentrional Thèse de Doctorat d'Etat. Université d'Aix-Marseille II, 2 vol. 501 p.

GUILLOBEZ S. (1975-1976-1977) : Etudes morphopédologiques. Projet Bagré. Rapport général. (Campagnes 1975-1976-1977).

GUILLOBEZ S. (1985) : L'analyse en composantes principales et le traitement de l'imagerie Landsat. Cas d'une région tropicale. L'Agronomie Tropicale, 40, 2, p. 81-88.

GUINKO S. (1984) : Végétation de la Haute-Volta. Thèse de Doctorat ès Sc. Université de Bordeaux III. 2 tomes. 394 p.

GUISCAFRE M. (1961): Influence des aménagements anti-érosifs sur l'écoulement des Mayos des Kapsiki. Bassins versants de Mogode. ORSTOM. 40 p.

GUYOT B. (1980): L'érosion éolienne. Techniques agricoles, 1380, (12-1980). INRA. 12 p.

HENIN S. (1976) : Cours de physique du sol (Vol.I). Initiations-Documentations techniques n°28. ORSTOM. EDITEST. 159 p.

H.E.R. (1981 a) : Etude hydrologique de la Kompienga. Campagne de mesures 1980. Direction de l'Hydraulique et de l'Equipement Rural. Section Hydrologie. Ouagadougou. 50 p.

H.E.R. (1981 b) : Etude de ruissellement et d'érosion à Sirgui. Campagne 1980. Direction de l'Hydraulique et de l'Equipement Rural. Section Hydrologie. Ouagadougou. 38 p.

H.E.R. (1982) : Etude de ruissellement et d'érosion à Sirgui. Campagne 1981. Direction de l'Hydraulique et de l'Equipement Rural. Section Hydrologie. Ouagadougou. 32 p.

H.E.R. (1983): Etude hydrologique de la Kompienga. Campagne de mesures 1982. Direction de l'Hydraulique et de l'Equipement rural. Ouagadougou. 56 p.

HERVOUET J.P.(1978): La mise en valeur des vallées des Volta Blanche et Rouge: un accident historique. Cah. ORSTOM, sér.Sci. Hum., vol. XV, n°1, p. 81-97.

HEUSCH B. (1970) : L'érosion du Pré-Rif. Une étude quantitative de l'érosion hydraulique dans les collines marneuses du Pré-Rif occidental; in : Annales de la Recherche Forestière au Maroc. Rabat. Tome 12, p. 9-176.

HEUSCH B. (1980) : Erosion in the Ader Dutchi Massif (Niger). An example of mapping applied to water and soil conservation. Assessment of erosion, Gand, Belgique (1978). Ed. J. Wiley and Sons. p. 521-529.

HEUSCH B. (1986) : Cinquante ans de banquettes de D.R.S.- C.E.S. en Afrique du Nord: un bilan. Cah. ORSTOM, sér. Pédol., vol.XXII, n° 2, p. 153-162.

HOTTIN G., OUEDRAOGO O.F. (1975) : Notice explicative de la carte géologique au 1/1.000.000 de la République de Haute-Volta. DGM Haute-Volta. 58 p.

HUDSON N.W. (1973): Soil conservation. B.T. Badsford. L.T.D. London. 320 p.

IBIZA D. (1986) : Effets d'échelle et dispositifs des mesures. Groupe transfert d'échelles et hétérogénéité. U.R.B 12. Bulletin n°1. ORSTOM. p. 53-61.

I.N.S.D. (1986): Recensement général de la population du Burkina Faso (10 - 20 décembre 1985). Résultats provisoires. 47 p.

JACQUES-FELIX H., CHEZEAU M. (1957) : Sur une relation entre le climat, le type de végétation et l'évolution du sol en zone intertropicale. L'Agronomie Tropicale, 12, 5, p. 599-609.

JAKEL D., DRONIA H. (1976) : Ergebnisse von Boden und Gesteintemperaturmessungen in der Sahara. Berliner Geographische Abhandlungen, Heft. 24, p. 55-64.

JOURNAUX A., COUTARD J.P. (1974) : Expérience de thermoclastie sur les roches siliceuses. Bulletin du Centre de Géomorphologie du CNRS. Caen, n°18, p. 7-20.

KABORE M. (1982) : Communication au séminaire CIEPAC-IPD. Lutte antiérosive. Ouahigouya.

KABRE T. (1980): Historique des feux de brousse.Centre régional de Télédétection de Ouagadougou. 14 p.

KALOGA B. (1966) : Etude pédologique des bassins versants des Volta blanche et rouge en Haute-Volta. 1ère partie : Le milieu naturel. Cah. ORSTOM, sér. Pédol., vol. IV, n°1, p. 23-61.

KALOGA B. (1968) : Etude pédologique de la Haute-Volta. Région Centre-Sud ORSTOM, Dakar-Hann, 247 p. Carte au 1/500.000.

KALOGA B. (1983) : Le manteau kaolinique des plaines du Centre-Sud de la Haute-Volta. Dynamique et relation avec le manteau smectitique. ORSTOM. U.L.P. Strasbourg, 346 p. multi.

KI F. (1982): Etude de quelques caractéristiques hydriques et hydrodynamiques des sols du bas-fond amélioré d'Imiga. Campagne 1981. H.E.R. 27 p.

KILIAN J. (1974): Etude du milieu physique en vue de son aménagement. Conceptions de travail. Méthodes cartographiques. L'Agronomie tropicale, 29, 2, p. 141-155.

KIRKBY M.J., MORGAN P.P.C. (1980): Soil erosion. Chichester. Wiley. 312 p.

KLEIN J.C. (1967): Etude hydrologique de bassins représentatifs dans le sud-est de la Haute-Volta (Région de Manga). Rapport définitif (1963-1965). ORSTOM. 138 p.

KOHLER J.M. (1971) : Activités agricoles et changements sociaux dans l'Ouest-Mossi (Haute-Volta). Mémoires ORSTOM, n°46. 246 p.

LABEYRIE J. (1985) : L'homme et le climat. Denoël. 281 p.

LAFFORGUE A., NAAH E. (1976) : Exemple d'analyse expérimentale des facteurs de ruissellement sous pluies simulées. Cah. ORSTOM, sér. Hydrol., vol. XIII, n°3, p. 195-237.

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, p. 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.

LAGARDE de Y.(1983): Initiation à l'analyse des données. Dunod.158 p.

LAHAYE J.P. (1977) : Etude des hauteurs de pluie exceptionnelles en un et plusieurs jours consécutifs. Bull. liaison du C.I.E.H., n°30-31. p. 1-11.

LAHAYE J.P. (1979) : Cours d'hydrologie statistique E.I.E.R., Ouagadougou. 119 p.

LAHAYE J.P. (1980 a) : Etude des pluies journalières de fréquence rare dans les états membres du C.I.E.H. Synthèse régionale des valeurs réduites des pluies maximales annuelles. Aspects théoriques. C.I.E.H. 65 p.

LAHAYE J.P. (1980 b) : Etude des pluies journalières de fréquence rare en Haute-Volta. C.I.E.H. 30 p.

LAHUEC J.P. (1980 a): Le terroir de Zaongho. Les Mossi de Koupéla (Haute-Volta). Atlas des structures agraires au sud du Sahara, 15, 111 p.

LAHUEC J.P. (1980 b) : Le parc d'un village mossi (Zaongho) du traditionnel au moderne; in: L'arbre en Afrique tropicale, la fonction et le signe. Cah. ORSTOM, sér. Sci. Hum., vol. XVII, n° 3-4, p. 151-154

LAMACHERE J.M. (1984): Etude hydrologique des plaines de Niena Dionkele et Foulasso Lelasso. ORSTOM. 2 tomes. 387 p.

LAMEYRE J. (1975) : Roches et minéraux. Vol.1 et 2. Doin. 352 p.

LAMOTTE M., ROUGERIE G. (1962) : Les apports allochtones dans la genèse des cuirasses ferrugineuses. Rev. de Géom. Dyn., XIII, n°10-12, p. 145-160.

LANGBEIN W.B., SCHUMM S.A. (1958) : Yield of sediment in relation to mean annual precipitation. Am. Geophys. Union Trans., 39, n°6, p. 1076-1084.

LE BARBE L. (1982): Etude du ruissellement urbain à Ouagadougou. Essai d'interprétation théorique. Recherche d'une méthode d'évaluation de la distribution des débits de pointes de crues à l'exutoire des bassins urbains. Cah. ORSTOM, sér. Hydrol., vol. XIX, n°3. p. 135-204.

LEMAITRE Y. (1981) : Etude thermodynamique et dynamique des lignes de grains tropicales observées à Korhogo (Côte d'Ivoire) pendant l'expérience COPT 79. Thèse 3ème cycle, Paris VII. 198 p.

LEPRUN J.C., MOREAU R. (1968): Etude pédologique de la région Ouest Nord. ORSTOM. Centre de Dakar-Hann, 341 p. Carte au 1/500.000.

LEPRUN J.C. (1979) : Les cuirasses ferrugineuses des pays cristallins de l'Afrique occidentale sèche. Genèse. Transformations. Dégradation. Thèse ULP. Strasbourg, Sciences géologiques. Mémoire n°58, 224 p.

LEPRUN J.C., SILVEIRA da C.O., SOBRAL FILHO R.M. (1986): Efficacité des pratiques culturales antiérosives testées sous différents climats brésiliens. Cah. ORSTOM, sér. Pédol., vol XXII, n° 2, p. 223-233.

LEROUX M. (1983) : Le climat de l'Afrique tropicale. Ed. Champion. Paris, 633 p., Atlas 247 cartes et 3 pl.

LIDON B., MORANT P., SEDOGO M., SOLA G. (1978) : Etude du ruissellement à la parcelle et de ses conséquences sur le bilan hydrique des cultures pluviales en sol peu profond. Rapport 1978. CIEH-IRAT. 43 p.

LIDON B., MORANT P., QUIDEAU P., SEDOGO M., SOLA G. (1983): Etude du ruissellement sur sol ferrugineux de la région Centre Haute-Volta. Résultats de quatre années de mesures à la station de Saria. C.I.E.H. 66 p.

LIS B. (1979) : Etude de nappe sur les bas-fonds améliorés de Tampinko et Imiga. Résultats provisoires. Campagne 1979. H.E.R. 43 p.

LO H.M. (1984) : Le bassin de la Gambie en amont de Gouloumbou. Contribution à l'hydrologie et à la dynamique fluviales en milieu tropical humide africain. Thèse de 3ème cycle. Nancy II. Travaux du Laboratoire de Géographie Physique. Vol. VI. 396 p.

LOUP J. (1974): Les eaux terrestres. Masson. 174 p.

MAIGNIEN R., GAVAUD M., GOFFRE M., DUVERGER M. (1960): Etude pédologique du Boulbi d'Ouagadougou (Haute-Volta). ORSTOM, Centre de Dakar-Hann, 22 p. 1 carte au 1/20 000.

MAINGUET M., COSSUS L. (1980) : Recherches sur des indicateurs géomorphologiques de désertification (érosion éolienne et hydrique) dans le nord de la Haute-Volta. Rapport interne. Projet DGRST-LAT. Laboratoire de géographie physique zonale. Université de Reims. 40 p. et cartes.

MALEY J. (1980) : Etudes palynologiques dans le bassin du Tchad et paléoclimatologie de l'Afrique nord-tropicale de 30.000 ans à l'époque actuelle. Thèse Sc. Trav. et Doc. ORSTOM, n° 129, 586 pages.

MARCELIN J. (1971) : Notice explicative de la carte géologique au 1/200.000 de Gaoua-Batié. B.R.G.M., 31 p.

MARCHAL J.Y. (1979) : L'espace des techniciens et celui des paysans. Histoire d'un périmètre antiérosif en Haute-Volta; in: Maîtrise de l'espace agraire et développement en Afrique tropicale. CNRST-ORSTOM. Mémoires ORSTOM, n°89, p. 245-252.

MARCHAL J.Y. (1980) : Arbres et brousses du paysage soudano-sahélien. Dynamique des formations végétales au nord de la Haute-Volta; in: L'arbre en Afrique tropicale, la fonction et le signe. Cah. ORSTOM, sér. Sci. Hum., vol. XVII, n°3-4, p. 137-149.

MARCHAL J.Y. (1983) : Yatenga. Nord Haute-Volta. La dynamique d'un espace rural soudano-sahélien. Travaux et documents de l'ORSTOM, n°167, 873 p.

MARCHAL J.Y. (1986) : Vingt ans de lutte antiérosive au nord du Burkina Faso. Cah. ORSTOM, sér. Pédol., Vol. XXII, n°2, p. 173-180.

MARCHAL M. (1983) : Les paysages agraires de Haute-Volta. Analyse structurale par la méthode graphique. Atlas des structures agraires au sud du Sahara 18. ORSTOM. 115 p.

MARTIN P. (1986): Conditions et premiers résultats de la prise en charge des aménagements de conservation des eaux et du sol au Niger; in: Aménagements hydro-agricoles et systèmes de production. III ème Séminaire du Département des Systèmes Agraires du CIRAD. 14 p.

MASSON J.M. (1980) : Mesure de l'agressivité des pluies en rapport avec l'érosion des sols. La Météorologie VIe série, n° 20-21, p. 327-334.

MATHIEU P., MONNET C. (1971): Physico-chimie des eaux de pluie en savane et sous forêt en milieu tropical. Cah. ORSTOM, sér. Géol.,vol. III,n° 2, p. 93-114.

MEYBECK M. (1979): Concentrations des eaux fluviales en éléments majeurs et apports en solution aux océans. Rev. Geol. Dyn. Geo. Phys., vol.21, fasc. 3, p. 215-246.

MICHEL P. (1968): Morphogenèse et pédogénèse. Exemples d'Afrique occidentale. Sols afric.,vol.13, n°2, p. 171-194

MICHEL P. (1973) : Les bassins des fleuves Sénégal et Gambie. Etude géomorphologique. Mémoires ORSTOM, n°63, 3 tomes, 752 p.

MICHEL P. (1975) : Les glacis cuirassés d'Afrique occidentale et centrale; in: Colloque Géomorphologie des glacis, Tours, 23-25 Novembre 1974, p.70-80.

MICHEL P. (1975) : La dynamique actuelle de la géomorphologie dans le domaine soudanien de l'Ouest Africain : exemples du Mali occidental et du Sénégal oriental; in: Géomorphologie dynamique dans les régions intertropicales, coordonné par J. Alexandre. Colloque de Lubumbashi. p. 1-20.

MICHEL P. (1977) : Recherches sur le Quaternaire en Afrique occidentale. I.N.Q.U.A.. Supplément au Bulletin AFEQ, n°50.

MICHEL P. (1986): Sécheresse, dégradation du milieu et désertisation au Sénégal. Geoökodynamik, VII, 1/2, p. 63-88.

MIETTON M. (1980) : Recherches géomorphologiques au sud de la Haute-Volta. La dynamique actuelle dans la région de Pô-Tiébélé. Thèse 3ème cycle. Grenoble I. 264 p.

MIETTON M. (1981) : Lutte antiérosive et participation paysanne en Haute-Volta. Géo-Eco-Trop. Liège. 5 (1), p. 57-72.

MIETTON M. (1984) : Ruissellement et érosion sur petits bassins versants (Imiga - Province de Ganzourgou). Rapport de fin de campagne 1983. 34 p.

MIETTON M. (1985): Alvéoles et reliefs résiduels associés (Sud de la Haute-Volta, région de Tiébélé). Physio-Géo, n°13, p. 67-78.

MIETTON M. (1986 a): Tentatives de maîtrise de l'eau de surface au Burkina Faso: l'action du F.D.R. Colloque Sécheresses comparées Nordeste Sahel. IHEAL. Paris (18 janvier).

MIETTON M. (1986 b): L'érosion des sols de bas-fonds au Burkina Faso. Repères dans l'évolution historique, actuelle et future; p. 309-313; in: Travaux et Documents de l'ORSTOM, n° 197: Changements globaux en Afrique durant le Quaternaire. Passé-Present- Futur. Symposium international INQUA-ASEQUA. Dakar (21-28 Avril 1986).

MIETTON M. (1986 c) : Les données de l'érosion sur bassins versants au Burkina Faso (ex Haute-Volta). Rev. de Géogr. alpine. Mélanges J. LOUP. Tome LXXIV, 1/2, p. 119-127.

MIETTON M.(1986 d) : Ruissellement et érosion sur petits bassins versants au Burkina Faso. (Résultats préliminaires). Zeitschrift für Geomorphologie. Suppl. Bd. 60. p. 187-204.

MIETTON M. (1986 e) : Méthodes et efficacité de la lutte contre l'érosion hydrique au Burkina Faso. Cah. ORSTOM, sér. Pédol., vol.XXII, n°2, p. 181-196.

MIETTON M. (1988 a)· Pluies de fréquence rare au Burkina Faso. Risques de crues et d'érosion; in: Actes du Colloque Climats et risques naturels. Paris. (6 Juin 1986). Sous presse. 300 p.

MIETTON M. (1988 b): Mesures continues des températures dans le socle granitique en région soudanienne (Février 1982-Juin 1983 ; Ouagadougou - Burkina Faso). Communication au Symposium international de Barcelone (4 septembre 1986): Processus géomorphologiques dans les environnements à forts contrastes saisonniers. Catena supplément 12, p. 77-93. Braunschweig 1988.

MINISTERE DE L'AGRICULTURE ET DE L'ELEVAGE (1974): Opération Terroirs. Rapport d'activité 1973. Direction du Développement Rural. Ouagadougou. 42 p.

MOEYERSONS J. (1975) : L'érosion pluviale sur des sols caillouteux du nord-est du Nigéria; in: Géomorphologie dynamique des régions tropicales, 67-80, coordonné par J. Alexandre. Presses Universitaires du Zaïre. Colloque de Lubumbashi.

MONIOD F., POUYAUD B., SECHET P. (1977) : Le bassin du fleuve Volta. Coll. Monographies hydrologiques, n° 5, ORSTOM, 513 p.

MONNIER Y. (1968): Les effets des feux de brousse sur une savane préforestière de Côte d'Ivoire. Etudes éburnéennes,n° IX, Abidjan, 260 p.

MONNIER Y. (1981) : La poussière et la cendre. Paysages, dynamique des formations végétales et stratégies des sociétés en Afrique de l'Ouest. Agence de Coopération culturelle et technique. 252 p.

NAHAL I. (1975): Principes de conservation du sol. Masson. 143 p.

NEBOIT R.(1979): Les facteurs naturels et les facteurs humains de la morphogenèse. Essai de mise au point. Ann. de Géogr., n°490, p. 649-668.

NEBOIT R. (1983) : L'homme et l'érosion. Fac. Lettres et Sciences humaines. Clermont-Ferrand II. Fasc. 17. 183 p.

NOUVELOT J.F. (1972) : Le régime des transports solides en suspension dans divers cours d'eau du Cameroun, de 1969 à 1971. Cah. ORSTOM, sér. Hydrol., vol. IX, n°1, p. 47-74.

OBERLIN G., BAUDUIN D., CHAPERON P. (1966) : Etude hydrologique en Haute-Volta. Région de Tikaré. Campagne 1965 et conclusions générales, 82 p.

OLIVRY J.C. (1977) : Transports solides en suspension au Cameroun. Symposium de Paris, A.I.H.S. n°122, p. 134-141.

OLIVRY J.C. (1983) : Le point en 1982 sur l'évolution de la sécheresse en Sénégambie et aux îles du Cap-Vert. Examen de quelques séries de longue durée (débits et précipitations). Cah. ORSTOM, sér Hydrol., vol. XX, n°1, p. 47-69.

OLLIER C.D. (1984) : Weathering. Second edition. Geomorphology Texts, n°2. Longman. London. 270 p.

OUATTARA F.N. et al. (1981) : Evaluation des caractéristiques climatiques sur le 13 ème parallèle nord en Haute-Volta. La Météorologie. VI série, n°26, p. 111-122.

OUATTARA F., GNOUMOU F. (1982) : Etude des dates favorables aux semis des céréales (mil, sorgho) en Haute-Volta. Direction Météo n°12. Ouagadougou. Ronéotypé 20 p.

OUEDRAOGO J.P., OUEDRAOGO J.B.G., BALDY C. (1981) : Prémières données sur le rayonnement global et la durée d'insolation en Haute-Volta. La Météorologie, VIe série, n° 25, p.123-134.

OUEDRAOGO M. (1984) : Esquisses cartographiques de la région de Markoye à partir des prises de vues aériennes de 1955, 1974, 1981 et de la simulation Spot de 1981 (La région du C.E.F.O.) Mémoire de Maîtrise. Université de Ouagadougou. 54 p.

OUEDRAOGO M.M. (1974): L'approvisionnement de Ouagadougou en produits vivriers, en eau et en bois. Thèse de 3ème cycle. Université de Bordeaux. 359 p.

PALLIER G. (1978): Géographie générale de la Haute-Volta. Université de Limoges. 241 p.

PASCUAL J.F. (1980) : Exemples d'accumulations de fer et d'aluminium en Afrique tropicale. Contribution des techniques d'analyse à la recherche géomorphologique. Thèse d'Université. Bordeaux III. 364 p.

PEEL R.F. (1974) : Insolation weathering. Some measurements of diurnal temperature changes in exposed rocks in the Tibesti region, central Sahara. Zeitschrift für Geomorphologie, Suppl. 21, p. 19-28.

PELISSIER P. (1979) : Le paysan et les techniciens: quelques aspects d'un difficile face à face; in: Maîtrise de l'espace agraire et développement en Afrique tropicale. CNRST-ORSTOM. Mémoires ORSTOM, n° 89, p. 1-8.

PELISSIER P. (1980): L'arbre dans les paysages agraires de l'Afrique noire; in: L'arbre en Afrique tropicale, la fonction et le signe. Cah. ORSTOM, sér. Sci. Hum., vol. XVII, n° 3-4, p. 131-136.

PENNING DE VRIES F.W.T., DJITEYE M.A. (1982): La productivité des pâturages sahéliens. Pudoc. Wageningen. 520 p.

PIEYNS S., KLEIN J.C. (1964): Etude hydrologique des bassins versants dans la région de Ouagadougou. Campagne 1963 et conclusions générales. 95 p.

PIHAN J. (1978) : Risques climatiques d'érosion hydrique des sols en France; in : Colloque sur l'érosion agricole des sols en milieu tempéré non méditerranéen. Strasbourg. p. 13-18.

PION J.C. (1979) : Altération des massifs cristallins basiques en zone tropicale sèche. Etude de quelques toposéquences en Haute-Volta. Thèse ULP, Strasbourg, Sciences géologiques. Mémoire n° 57, 215 p.

PIOT J., MILLOGO E. (1980 a): Lutte contre l'aridité dans l'Oudalan. Etude du ruissellement et de l'érosion à Oursi-Kolel. Synthèse de 3 années (1977, 1978, 1979). DGRST-CTFT. Ouagadougou. 17 p., 19 annexes.

PIOT J., MILLOGO E. (1980 b) : Rapport de synthèse de 6 années du ruissellement et de l'érosion à Linoghin (Haute-Volta). CTFT. Ouagadougou. 47 p.

PIOT J., NEBOUT J.P., NANOT R., TOUTAIN B. (1980) : Utilisation des ligneux sahéliens par les herbivores domestiques. Etude quantitative dans la zone sud de la mare d'Oursi. CTFT-IEMVT. 216 p.

PIOT J. (1981) : La protection des sols en zone sahélienne. Le cas de la Haute-Volta. XVIIe Congrès mondial de l'IUFRO. Kyoto, 10 p.

POUYAUD B. (1979) : Etude de l'évaporation d'un lac en climat soudano-sahélien : le lac de Bam (Haute-Volta). Cah. ORSTOM, sér. Hydrol., vol. XVI, n° 2, p. 89-143.

PUECH C. (1983) : Persistance de la sécheresse au Sahel. Conséquences sur les normes hydrologiques et pluviométriques. CIEH. Série Hydrologie. 24 p.

PUECH C., CHABI-GONNI D. (1983) : Méthode de calcul des débits de crue décennale pour les petits et moyens bassins versants en Afrique de l'ouest et centrale. CIEH. Série Hydrologie. 80 p.

PUECH C. (1984) : Opération de pluie provoquée. Ouagadougou 1983. Rapport de synthèse. CIEH. Série Hydrologie. 161 p.

PUECH C., CHABI-GONNI D. (1984) : Courbes Hauteur de pluies - Durée - Fréquence (Afrique de l'ouest et centrale).Pour des pluies de durée 5 minutes à 24 heures. C.I.E.H. Série Hydrologie 155 p.

QUILFEN J.P., MILLEVILLE P. (1984): Résidus de culture et fumure animale: un aspect des relations agriculture - élevage dans le nord de la Haute-Volta. L'Agronomie Tropicale, 38, 3, p. 206-212.

RAUNET M. (1985 a): Bas-fonds et riziculture en Afrique. Approche structurale comparative. L'Agronomie Tropicale, 40, 3, p. 181-201.

RAUNET M. (1985 b): Les bas-fonds en Afrique et à Madagascar: géomorphologie, géochimie, pédologie, hydrologie. Zeitschrift für Geomorphologie. Suppl. Bd. 52, p. 25-62.

REEB J. (1978) : F.D.R.2. La formation des encadreurs. 1) La lutte contre l'érosion. 2) Les aménagements des bas-fonds. République de Haute-Volta, Ministère du Développement rural.

REEB J. (1979) : FDR 2 - Aménagements. Service HAER. Haute-Volta. 29 p.

REIJ C. (1983): L'évolution de la lutte antiérosive en Haute-Volta depuis l'indépendance: vers une plus grande participation de la population. Université libre d'Amsterdam. 84 p.

RENARD J. (1966) : Aperçu sur le climat de la Haute-Volta. ASCENA-Météorologie nationale de Haute-Volta. 135 p.

RIEFFEL J.M, MOREAU R. (1969) : Etude pédologique de la Haute-Volta. Région Ouest-Sud. ORSTOM. Centre de Dakar-Hann, 221 p. Carte au 1/500.000.

RIST G., SABELLI F. (1986) : Il était une fois le développement. Editions d'en bas. Lausanne. 153 p.

ROCHE M. (1963): Hydrologie de surface. Gauthiers-Villars. 383 p.

ROCHE M. (1965): Détermination des caractéristiques hydrologiques pour 28 barrages de Haute-Volta financés par le Fonds Européen de Développement. 56 p.

RODIER J., AUVRAY C. (1965) : Estimation des débits de crues décennales pour les bassins versants de superficie inférieure à 200 km2 en Afrique occidentale. CIEH-ORSTOM. 37 p.

RODIER J. (1971) : L'analyse de l'eau. Eaux naturelles, eaux résiduaires, eau de mer. 4 ème éd. Dunod. 700 p.

ROOSE E.J. (1967) : Dix années de mesure de l'érosion et du ruissellement au Sénégal. L'Agronomie Tropicale, 22, 2, p.123-152.

ROOSE E.J. (1968): Mesure de l'érodibilité d'un sol (facteur K) sur la parcelle de référence de Wischmeïer. Deuxième projet de protocole et sa discussion. ORSTOM. Abidjan. 10 p.

ROOSE E.J. (1971) : Projet de lutte contre l'érosion hydrique sur le plateau mossi (Haute-Volta). ORSTOM. Adiopodoumé. 22 p.

ROOSE E.J., BERTRAND R. (1971) : Etude de la méthode des bandes d'arrêt pour lutter contre l'érosion hydrique en Afrique de l'Ouest. L'Agronomie tropicale, 26, 11, p. 1270-1283.

ROOSE E.J. (1973) : Dix-sept années de mesures expérimentales de l'érosion et du ruissellement sur un sol ferrallitique sableux de basse Côte d'Ivoire. Contribution à l'étude de l'érosion hydrique en milieu intertropical. ORSTOM. Thèse Doct. Ing. Abidjan. n°20, 125 p.

ROOSE E.J. (1973) : Dix-sept années de mesures expérimentales de du drainage et de l'érosion sur deux sols ferrugineux de la région Centre Haute-Volta. Bilan de trois années d'observation à la station de Saria. ORSTOM-IRAT. 83 p.

ROOSE E.J. (1974): Conséquences hydrologiques des aménagements antiérosifs. XIIIe Journées de l'Hydraulique. Société Hydrotechnique de France. Paris. 6 p.

ROOSE E., ARRIVETS J., POULAIN J.F. (1974): Etude du ruissellement, du drainage et de l'érosion sur deux sols ferrugineux de la région Centre Haute-Volta. Bilan de trois années d'opbservation à la station de Saria, ORSTOM Abidjan, IRAT/HV. 83 p.

ROOSE E.J. (1975): Quelques techniques antiérosives appropriées aux régions tropicales. Communication au Colloque sur la conservation et l'aménagement du sol dans les Tropiques humides I.I.T.A. Ibadan. 7 p.

ROOSE E.J., LELONG F. (1976): Les facteurs de l'érosion hydrique en Afrique tropicale. Etudes sur petites parcelles expérimentales. Rev. Géol. Dyn. Géo. Phys., vol. 18, fasc. 4., p. 365-374.

ROOSE E.J. (1977) : Erosion et ruissellement en Afrique de l'Ouest. Vingt années de mesures en petites parcelles expérimentales. Travaux et Documents de l'ORSTOM, n°78, 108 p.

ROOSE E.J. (1978): Pédogénèse actuelle d'un sol ferrugineux issu de granite sous une savane arborée du plateau mossi. Haute-Volta. Gonsé : campagnes 1968 à 1974. Rapport ORSTOM. Paris. 121 p. multigr.

ROOSE E.J., ARRIVETS J., POULAIN J.F. (1979): Dynamique actuelle de deux sols ferrugineux tropicaux indurés sous sorgho et sous savane soudano-sahélienne. Saria (Haute-Volta) : synthèse des campagnes 1971-1974. 123 p.

ROOSE E.J. (1980): Quelques conclusions de recherches françaises sur la dynamique actuelle des sols en Afrique occidentale. ORSTOM Paris, 15 p. dactyl ; in Cah. ORSTOM, sér. Pédol., vol. 18, n° 3, p. 285-296.

ROOSE E.J. (1981): Dynamique actuelle de sols ferrallitiques et ferrugineux tropicaux d'Afrique occidentale. Etude expérimentale des transferts hydrologiques et biologiques de matières sous végétations naturelles ou cultivées. Thèse Dr. es. Sc. Travaux de l'ORSTOM, n° 130, 569 p.

ROOSE E.J., PIOT J. (1984): Runoff, erosion and soil fertility restoration on the Mossi Plateau (Central zone of Upper-Volta). Symp. Intern. Challenge in African hydrology and water ressources. Harare Symposium. IAHS Publ. n° 144, p. 485-498.

ROOSE E.J. (1984): Impact du défrichement sur la dégradation des sols tropicaux. Machinisme Agricole Trop., 87, p. 24-36.

ROOSE E.J. (1984): Causes et facteurs de l'érosion hydrique sous climat tropical. Conséquences sur les méthodes antiérosives. Machinisme Agric. Trop., 87, p. 4-18.

ROOSE E.J. (1985): Terrasses de diversion ou microbarrages perméables ? Analyse de leur efficacité en milieu paysan ouest africain pour la conservation de l'eau et des sols dans la zone soudano-sahélienne. IVème Conférence Internationale de Conservation des Sols. ISCO. Maracay (Vénézuela) 3-9 novembre 1985, 15 p.; in Cah. ORSTOM, sér. Pédol., vol. XXII, n° 2,p. 197-208.

ROUGERIE G. (1978): Erosion du sol et couverts végétaux. Hérodote, n° 12, p. 52-64.

ROTH S.G. (1965): Temperature and water content as factors in desert weathering. Journal of Geology, 73, p. 454-468.

S.A. AGRER. N.V. Belgique (1983): Etude de préfactibilité des cultures de décrues dans la zone de la retenue du barrage de la Kompienga. Département de Pama. HER. Ouagadougou. p. 74-89.

SAMRETH L. (1985): Technique de lutte antiérosive des versants du plateau central du Burkina Faso. Cahiers Recherche-Développement. p. 25-29.

SANOU D. (1981): Etude comparative entre une parcelle pourvue de bourrelets antiérosifs et de parcelles traditionnelles à Sirgui (Kaya). Mémoire de maîtrise. Université de Ouagadougou. 102 p.

SAVADOGO A. (1984): Géologie et hydrogéologie du socle cristallin de Haute-Volta. Etude régionale du bassin versant de la Sissili. Thèse Dr. es Sc. Grenoble. 351 p.

SAVAT J. (1975): L'hydraulique du ruissellement en nappe mince sur un loess nu et sous couverture steppique, simulée au laboratoire ; in : Géomorphologie dynamique dans les régions tropicales ; coordonné par J. Alexandre. Colloque de Lubumbashi. p. 131-142.

SAVONNET G. (1960): Un système de culture perfectionnée, pratiqué par les Bwaba-Oulé de la région de Houndé (Haute-Volta). Etudes voltaïques, 1, p. 19-52.

SAVONNET G. (1980): L'arbre, le fruit et le petit berger lobi ; in: L'arbre en Afrique tropicale, la fonction et le signe. Cah. ORSTOM, sér. Sci. Hum., vol. XVII, n° 3-4, p. 227-234.

SCHNELL R. (1970,1971): Introduction à la phytogéographie des pays tropicaux. Tome 1: Les problèmes généraux. 499 p. Tome2: Les milieux. Les groupements végétaux. p 500-951. Gauthiers-Villars.

SEGUIN B., GIGNOUX N. (1974): Etude expérimentale de l'influence d'un réseau de brise-vent sur le profil vertical de vitesse du vent. Agric. meteorol., 13, p. 15-23.

SERPANTIE G., MARTINELLI B. (1986): La confrontation paysans-aménageurs au Yatenga. Analyses d'un agronome et d'un ethnologue; in: Aménagements hydro-agricoles et systèmes de production. IIIème Séminaire du Département des Systèmes agraires du CIRAD. 14 p.

SINARE A. (1982): Bénéfices et limites d'un aménagement dans le Centre-Ouest du plateau mossi. Région de Siglé. Mémoire de Maîtrise. Université de Ouagadougou. 97 p.

SIRCOULON J., KLEIN J. (1964): Etude hydrologique de bassins expérimentaux dans l'Est-Volta. Bassins de Boulsa. Campagne 1962, 77 p.

SIRCOULON J. (1976): Les données hydropluviométriques de la sécheresse récente en Afrique intertropicale. Comparaison avec les sécheresses "1913" et "1940". Cah. ORSTOM, sér. Hydrol., vol. XIII, n°2, p. 75-174.

SMITH B.J. (1977): Rock temperature measurements from the northwest Sahara and their implications for rock weathering. Catena, vol. 4, p. 41-63.

SMITH D.I., STOPP P. (1978): The river basin. An introduction to the study of hydrology. Cambridge University Press. 120 p.

SNIJDERS T.A.B. (1986): Interstation correlations and non stationarity of Burkina Faso rainfall. Journal of Climate and applied Meteorology, vol. 25, p. 524-531.

SORDOILLET M. (1957): Une opération de développement rural en pays mossi (Haute-Volta). L'Agronomie Tropicale, 12, 5, p. 599-609.

SOW A.A. (1984): Pluie et écoulement fluvial dans le bassin du fleuve Sénégal. Thèse de 3ème cycle. Nancy II. Travaux du Laboratoire de Géographie Physique, vol. V, 442 p.

STROMQUIST L., JOHANSSON D. (1978) : Studies of soil erosion and sediment transport in the Mtera Reservoir Region, Central Tanzania. Zeitschrift für Geomorphologie, Suppl. Bd. 29, p. 43-51

SUCHEL J.B. (1978): La répartition des pluies et les régimes pluviométriques au Cameroun. Trav. et Doc. de Géo. Tropicale, CEGET, n°5, 287 p.

TERRIBLE M. (1973): Eléments de dynamique des populations de graminées en savane soudanienne de Haute-Volta. Notes et Documents Voltaïques, p. 48-67.

TERRIBLE M. (1978): Végétation de la Haute-Volta au millionième. Carte et notice provisoire. Bobo-Dioulasso. 40 p.

TERRIBLE M. (1980): Utilisation des images Landsat en Haute-Volta évolution de la végétation, extension des cultures, approche de l'environnement. (Itinéraire Pissila-Oursi et région de Yaromoko). Centre régional de télédétection. Ouagadougou. 15 p.

TERRIBLE M. (1982) : Occupation du sol en Haute-Volta. Son évolution entre 1952-56 et 1975. Centre régional de Télédétection. Ouagadougou. 31 p.

TESSIER J. (1974): Terroir de Mogtedo (Haute-Volta). Etude morpho-pédologique en vue de la mise en valeur des terres. L'Agronomie Tropicale, 29, n° 2/3, p. 312-369.

TODOROV A.V. (1985): Sahel : the changing rainfall regime and the "normals" used for its assessment. Journal of Climate and Applied Meteorology, vol. 24, n° 2, p. 97-107.

TOMASSONE R., LESQUOY E., MILLIER C. (1983): La régression, nouveaux regards sur une ancienne méthode statistique. INRA. Actualités scientifiques et agronomiques, 13. Masson. 180 p.

TOUTAIN B. (1974): Implantation d'un ranch d'embouche en Haute-Volta. Région de Léo. Etude agrostologique préalable. Cartographie. 2 cartes au 1/100 000 et au 1/50 000. 195 p.

TRICART J. (1962): Les discontinuités dans les phénomènes d'érosion. A.I.H.S. Colloque de Bari. Publ. 59, p. 233-243.

TRICART J. (1972): La Terre, planète vivante. PUF. Coll. Sup. (le Géographe), 263 p.

TRICART J. (1973): La géomorphologie dans les études intégrées d'aménagement du milieu naturel. Ann. de Géogr., LXXXII, p. 421-453.

TRICART J. (1974): Le modelé des régions chaudes. Forêts et savanes. 2ème édition. SEDES. 337 p.

TRICART J. (1978): Géomorphologie applicable. Masson. 204 p.

TRICART J. (1981): Précis de géomorphologie. Tome 2 : Géomorphologie dynamique générale. 345 p., Tome 3 : Géomorphologie climatique. 313 p. SEDES.

TRINQUARD R. (1971): Notice explicative de la carte géologique au 1/200 000 de Tenkodogo. 37 p.

VALENTIN C. (1978): Problèmes méthodologiques de la simulation des pluies. Application à l'étude de l'érodibilité des sols; in: Colloque sur l'érosion agricole des sols en milieu tempéré non méditerranéen. Strasbourg. p. 117-122.

VALENTIN C. (1985 a): Organisations pelliculaires superficielles de quelques sols de région subdésertique (Agadez-République du Niger). Dynamique de formation et conséquences sur l'économie en eau. ORSTOM. Etudes et thèses. 259 p.

VALENTIN C. (1985 b): Le bassin versant de Boulsa-Koghnere (Burkina Faso). Organisations superficielles. Interprétation des photographies aériennes de 1956 et de 1980. ORSTOM. Abidjan. 15 p.

VALENTIN C. (1985 c): Différencier les milieux selon leur aptitude au ruissellement : une cartographie adaptée aux besoins hydrologiques. Journées hydrologiques. Montpellier. 24 p.

VALET S. (1985): Action-test d'aménagement de la parcelle pour l'amélioration du bilan hydrique et de la lutte contre l'érosion. Essais en milieu paysan en 1984. ISRA-IRAT. 74 p.

VAN DE STEEN J. (1983): Données sur la pétrologie et la genèse des minéralisations du Birrimien dans le sud-ouest de la Haute-Volta. BUVOGMI. Haute-Volta. 22 p.

VAN DIJK G. (1981): La lutte contre l'érosion dans la région Centre-Nord (Kaya). Expériences et propositions. FDR 2. 28 p.

VOGT H. (1986): Une méthode cartographique d'évaluation de processus physiogéographiques appliquée à l'érosion hydrique des sols. L'Espace géographique, n° 3, p. 204-210.

VOGT J. (1959): Aspects de l'évolution morphologique récente de l'Ouest africain. Ann. de Géogr., n° 367, p. 193-206.

VOGT J. (1968): Etude de l'alluvionnement en Haute-Volta. D.G.M. Ouagadougou.

VUILLAUME G. (1969): Analyse quantitative du rôle du milieu physico-climatique sur le ruissellement et l'érosion à l'issue de bassins de quelques hectares en zone sahélienne (Bassin de Kountkouzout, Niger). Cah. ORSTOM, sér. Hydrol., vol. VI, n°4, p. 87-131.

WISCHMEIER W.H. (1959): A rainfall erosion index for an universal soil-loss equation. Soil Sc. Soc. Amer. Proc., vol. 23, p. 246-249.

WISCHMEIER W.H., SMITH D.D. (1960): A universal soil-loss equation to guide conservation farm planning. 7th Inter. Congr. Soil Science, I, p. 418-425.

WISCHMEIER W.H., SMITH D.D. (1978): Predicting rainfall erosion losses. A guide to conservation planning. Washington USDA, Agriculture Handbook, n° 537, 58 p.

WRIGHT P. (1985): La gestion des eaux de ruissellement. OXFAM. Projet agro/forestier. Province du Yatenga. Burkina Faso. 38 p.

YAIR A., LAVEE H. (1976): Runoff generative process and runoff yield from arid talus mantled slopes. Earth Surface Processes, 1, p. 235-247.

ZOUNGRANA T. (1985): Dynamique du changement et pesanteurs sociétales en pays mossi. Mémoire de D.E.A. Université de Lyon II, 116 p.

LISTE DES FIGURES

Introduction — Pages

Fig. I. 1 : Itinéraires et sites de recherches 7

Fig. I. 2 : La mousson au-dessus du Burkina Faso (situation en juin-juillet) et déplacement des lignes de grains 12

Fig. I. 3 : Densités de population par arrondissement au Burkina Faso 14

Fig. I. 4 : Pourcentages de population masculine émigrée à l'étranger depuis 6 mois et plus (par arrondissement) 14

Chapitre I

Fig. 1. 1 : Les régions climatiques en 1970 et les accidents climatiques récents (1972 et 1983) 19

Fig. 1. 2 : Variations des isohyètes 500 et 900mm au cours des 6 dernières décennies d'après Albergel et al., 1984 21

Fig. 1. 3 : Tendance des précipitations annuelles. Moyennes mobiles annuelles à Dori et Ouahigouya .. 22

Fig. 1. 4 : Moyennes mobiles des précipitations annuelles à Koupela et Zorgho 23

Fig. 1. 5 : Moyennes mobiles annuelles et mensuelles à Pô et Tiébélé 24

Fig. 1. 6 : Nombre moyen de jours de pluies (d'après C. Baldy, 1980 - Légèrement modifiée) 27

Fig. 1. 7 : Isohyètes des pluies journalières maximales annuelles (en mm), de fréquence décennale, d'après J.P. Lahaye (1980 b) 38

Fig. 1. 8 : Isohyètes des pluies journalières maximales annuelles (en mm), de fréquence centennale, d'après J.P. Lahaye (1980 b)..... 38

Fig. 1. 9 : Ajustements des pluies mensuelles (juin) à Pô suivant les lois de Gumbel et de Galton 41

Fig. 1.10 : Isohyètes des pluies maximales annuelles pour un épisode de 2 jours consécutifs et une durée de retour de 100 ans (Période:origine 1984) 55

Fig. 1.11 : Isohyètes des pluies maximales annuelles pour un épisode de 30 jours consécutifs et une durée de retour de 100 ans (Période:origine 1984) 55

Fig. 1.12 : Isohyètes des pluies maximales annuelles pour un épisode de 2 jours consécutifs et une durée de retour de 100 ans(Période:origine 1969) 56

Pages

Fig. 1.13 : Isohyètes des pluies maximales annuelles pour un épisode de 30 jours consécutifs et une durée de retour de 100 ans (Période:origine 1969) 56

Fig. 1.14 : Isohyètes des pluies maximales annuelles pour un épisode de 2 jours consécutifs et une durée de retour de 100 ans (Période : 1970-1984) 57

Fig. 1.15 : Isohyètes des pluies maximales annuelles pour un épisode de 30 jours consécutifs et une durée de retour de 100 ans (Période : 1970-1984) 57

Fig. 1.16 : Isohyètes des pluies maximales annuelles pour un épisode de 2 jours consécutifs et une durée de retour de 100 ans (Période : 1955-1984) 58

Fig. 1.17 : Isohyètes des pluies maximales annuelles pour un épisode de 30 jours consécutifs et une durée de retour de 100 ans (Période : 1955-1984) 58

Fig. 1.18 : Type de pluies n° 1. Les lignes de grains sans traîne 60

Fig. 1.19 : Hyétogrammes, courbes intensité-durée (C1) et courbes des intensités maximales (C2) pour deux averses du type des lignes de grains sans traîne (Type 1) 61

Fig. 1.20 : Type de pluies n° 2. Les lignes de grains avec traîne 62

Fig. 1.21 : Hyétogrammes, courbes intensités-durées (C1) et courbes des intensités maximales (C2) pour deux averses du type des lignes de grains avec traîne 63

Fig. 1.22 : Type de pluies n° 3 - Pluies composites avec plusieurs maximums d'intensité (Comparaison entre averses, pour un même orage, à 3 kilomètres de distance) 65

Fig. 1.23 : Hyétogramme, courbe intensité-durée (C1) et courbe des intensités maximales (C2) pour une pluie de mousson à plusieurs maximums 66

Fig. 1.24 : Type de pluies n° 4 - Les tornades exceptionnelles 67

Fig. 1.25 : Hyétogramme, courbe intensité-durée (C1) et courbe des intensités maximales (C2) pour une tornade exceptionnelle 68

Fig. 1.26 : Variabilité des pluies dans l'espace (Distance Po-Banon 5 km) 73

Fig. 1.27 : Ajustement des pluies les plus intenses à une loi exponentielle - Pô 1978-1982 75

Fig. 1.28 : Courbes intensités-durées-fréquences à Pô (1978-1982) 76

Pages

Chapitre II

Fig. 2. 1 : Fréquence des vents instantanés efficaces (> 5m/s), par mois, pour 3 heures d'observation en pourcentage des cas 87

Fig. 2. 2 : Fréquence des vents passés horaires efficaces (> 4 ou 5m/s), par mois, à Markoye 89

Fig. 2. 3 : Fréquence des vents passés horaires efficaces (> 4 ou 5m/s), par mois, à Di-Sourou 90

Fig. 2. 4 : Fréquence des vents passés horaires efficaces (> 4 ou 5m/s), par mois, à Saria 91

Fig. 2. 5 : Fréquence des vents passés horaires efficaces (> 4 ou 5m/s), par mois, à Mogtedo 92

Fig. 2. 6 : Fréquences mensuelles des vents instantanés quotidiens maximums (> 9 noeuds) à Ouagadougou (1968-1977) et Bobo (1968-1976) 95

Fig. 2. 7 : Fréquence annuelle des vents quotidiens maximums instantanés à Bobo-Dioulasso 97

Fig. 2. 8 : Fréquence annuelle des vents quotidiens maximums instantanés à Ouagadougou 97

Fig. 2. 9 : Roses des vents au sol pour six stations du Burkina Faso (1) Saison sèche - (2) Saison des pluies (*in Renard, 1966*) 99

Fig. 2.10 : Rose des vents journaliers maximums. Bobo - 1968-1976 (en pourcentage du total des journées d'observations) 101

Fig. 2.11 : Rose des vents journaliers maximums. Ouagadougou - 1968-1977 (en pourcentage du total des journées d'observations) 102

Fig. 2.12 : Rose des vents journaliers maximums. Bobo - 1968-1976. Mois de mai (en nombre de cas où $V \geqslant 5m/s$ et en pourcentage des jours d'observation du mois) 105

Fig. 2.13 : Rose des vents journaliers maximums. Bobo - 1968-1976. Mois de juin (en nombre de cas où $V \geqslant 5m/s$ et en pourcentage des jours d'observation du mois) .....

Fig. 2.14 : Rose des vents journaliers maximums. Ouagadougou - 1968-1976. Mois de mai (en nombre de cas où $V \geqslant 5m/s$ et en pourcentage des jours d'observation du mois) 107

Fig. 2.15 : Rose des vents journaliers maximums. Ouagadougou - 1968-1976. Mois de juin (en nombre de cas où $V \geqslant 5m/s$ et en pourcentage des jours d'observation du mois) 108

Pages

Chapitre III

Fig. 3. 1 : Dispositif expérimental de mesures des températures dans le granite 113

Fig. 3. 2 : Amplitudes thermiques maximales annuelles et diurnes dans le granite en fonction de la profondeur 118

Fig. 3. 3 : Variations annuelles des températures maximales (Tx) et minimales (Tn), journalières, à trois niveaux de profondeur (-2, -10 et -50 cm) : en grisé, les journées les plus remarquables 120

Fig. 3. 4 : Variations thermiques modérées par temps couvert (30.5.1982) ou brutales sous-averses (30. 5 et 17.6.1982) 123

Fig. 3. 5 : Variations thermiques habituelles sous ensoleillement 124

Fig. 3. 6 : Exemple de variations du taux d'himidité, à - 25cm, sur trois parcelles d'érosion à Pô-Banon 138

Chapitre IV

Fig. 4. 1 : Les types de paysages végétaux 144

Fig. 4. 2 : Evolution de l'occupation de l'espace entre Volta Rouge et Volta Blanche en pays Bissa .. 147

Fig. 4. 3 : Taux de recouvrement sur les parcelles-témoins du bassin BV2 156

Fig. 4. 4 : Végétation et occupation du sol. Bassin versant d'Imiga 163

Fig. 4. 5 : La parcelle P1 sous savane arbustive : examens floristique, physionomique et taux de recouvrement (Pô - Burkina Faso) 165

Chapitre V

Fig. 5. 1 : Répartition schématique des principaux types de sols en milieu de savanes, au Burkina Faso (*in* Boulet *et al.*, 1970) 176

Fig. 5. 2 : Toposéquence de la parcelle P_1 à Pô-Banon ... 180

Fig. 5. 3 : Les parcelles d'érosion de Pô-Banon (Burkina Faso). Carte morpho-pédologique 181

Pages

Fig. 5. 4 : Exemple de toposéquence sur le bassin d'Imiga (Profil A.B.C, Fig. 5.6) 184

Fig. 5. 5 : Géofaciès et contraintes. Bassin versant d' Imiga 185

Fig. 5. 6 : Mesures et échantillons. Bassin versant d'Imiga 187

Fig. 5. 7 : Densité du réseau hydrographique et substratum géologique. Région de Pô - Tiébélé 191

Fig. 5. 8 : Topographie et réseau hydrographique. Bassin versant d'Imiga 193

Fig. 5. 9 : Les sillons birrimiens de Boromo et Houndé. Pourcentages totaux de cuirasses affleurantes par rapport à la superficie de chaque coupure au 1/50 000 197

Fig. 5.10 : Les sillons birrimiens de Boromo et Houndé. Pourcentages de cuirasses affleurantes perchées par rapport à la superficie de chaque coupure au 1/50 000 198

Chapitre VI

Fig. 6. 1 : Erosion pluviale en fonction du nombre et du diamètre des gouttes de pluie. *In C. Barat (1957)* 223

Fig. 6. 2 : Les résidus en fonction du coefficient de ruissellement dans l'équation de régression linéaire multiple à deux variables explicatives (indice d'humectation et indice d'agressivité) 255

Fig. 6. 3 : Variations des concentrations à l'aval des 4 parcelles de Linoghin, sous une pluie de 40 mm, d'indice R égal à 34,7 (5 juillet 1974). *In Piot et Millogo, 1980b* 264

Fig. 6. 4 : La dynamique érosive sur versant : sa variabilité dans l'espace et dans le temps 267

Fig. 6. 5 : Les ravines de versants : le rôle de la pente et des pistes 268

Chapitre VII — Pages

Fig. 7. 1 : La station de jaugeages S1 du bassin versant d'Imiga 301

Fig. 7. 2 : Un exemple de jaugeage des débits liquide et solide en S1 lors de l'écoulement du 11 août 1983 à Imiga (Burkina Faso) 303

Fig. 7. 3 : Les courbes de tarage de la station S1 et leur incertitude aux hautes eaux 306

Fig. 7. 4 : La courbe de tarage de la station S2 aux basses et hautes eaux (Imiga - Burkina Faso).... 309

Fig. 7. 5 : Courbe de corrélation débits liquides-débits solides à la station S1 à l'aval du bassin versant BV1 d'Imiga 311

Fig. 7. 6 : Variabilité spatiale des précipitations journalières à l'échelle d'un petit bassin versant de 12 km^2 (Imiga)..... 321

Fig. 7. 7 : Variations de hauteurs d'eau (L), de débits (Ql) et de l'intensité de la pluie : la crue du 27 août 1982 aux deux stations S1 et S2 d'Imiga 323

Fig. 7. 8 : Répartition des vitesses et des concentrations de matériaux en suspension et saltation dans la section de la station S1 à Imiga le 27/8/82 . 324

Fig. 7. 9 : La variabilité spatiale des précipitations : facteur conditionnel insuffisant pour une explication des écoulements (Septembre 1983, Imiga). 328

Fig. 7.10 : Les étapes de l'érosion régressive dans le ravin de Pô-Est 340

Fig. 7.11 : Dissection linéaire et recul de ravin dans le bas-fond de Pô-Est (en aval de la piste Pô-Tiébélé) 341

Fig. 7.12 : Profils en travers et en long du ravin de Pô-Est (11°11' N - 01°07' W) 342

Fig. 7.13 : Dissection linéaire et recul de ravin : l'exemple du bas-fond d'Imiga à la hauteur de la station de jaugeages n° 2 348

Fig. 7.14 : Localisation des sites d'études (barrages et stations de jaugeages) à travers le Burkina Faso et dans la région de Ouagadougou 356

Fig. 7.15 : Coefficients d'écoulement, classes de pluies annuelles et superficies des bassins versants de la région de Ouagadougou 358

Fig. 7.16 : L'envasement du barrage de Boulbi évalué par sondages 362

Pages

Fig. 7.17 : Etude de l'envasement d'un barrage au Burkina Faso (Boulbi). Examens granulométrique et macroscopique des échantillons carottés dans le lac de retenue ou à l'aval du barrage 365

Fig. 7.18 : Etude de l'envasement d'un barrage au Burkina Faso (Nagbangré). Examen granulométrique des échantillons carottés dans le lac de retenue ou à l'amont du lac 368

Fig. 7.19 : Evolution des surfaces cultivées (champs et jachères très récentes) sur le bassin versant de Boulbi entre 1956 et 1979 370

Fig. 7.20 : Les marques de l'érosion sur le bassin versant de Boulbi et leur évolution entre 1956 et 1979 372

Fig. 7.21 : Exemples de lit fluvial mobile : la Kompienga à Tagou, d'après Service Hydrologie H.E.R. 376

Fig. 7.22 : Bassin versant de la Volta Blanche à Niaogho, polygones de Thiessen et coefficients . 379

Fig. 7.23 : Profils en long de la Volta Blanche et de la Kompienga 381

Fig. 7.24 : Comparaison radiométrique des taxons "sols nus" entre eux 385

Fig. 7.25 : Les différentes intensités de réflectance sur les quatre fichiers (f1 à f4) de l'image Landsat (MSS 7) 388

Chapitre VIII

Fig. 8. 1 : Carte de localisation et exemple de distribution des aménagements antiérosifs (Campagne F.D.R. : 1979-1980) 398

Fig. 8. 2 : Bas-fond ouvert simple 408

Fig. 8. 3 : Taille des ailes de diguettes 408

Fig. 8. 4 : Bas-fond amélioré 408

Fig. 8. 5 : Exemple d'aménagement régional - Le cas de la région de Siglé au nord-ouest de Ouagadougou, d'après A. Sinaré (1982)..... 411

Fig. 8. 6 : Exemple d'aménagement antiérosif de versant (Ipelce, Région de Saponé)..... 415

Pages

Fig. 8. 7 : Ouvrages de répartition d'eau d'après P. Wright 424

Fig. 8. 8 : Déversoirs de captage des eaux d'après P. Wright 424

Fig. 8. 9 : Plan d'ensemble de l'essai "ruissellement" à Bidi (Yatenga) 426

DOCUMENTS HORS-TEXTE

Certaines cartes et figures ayant été réduites pour une utilisation immédiate dans le mémoire sont présentées aussi en documents hors-texte, à leur échelle originelle.

Carte 1 : Végétation et occupation du sol sur le bassin versant d'Imiga (1/10.000ème).

Carte 2 : Géofaciès et contraintes sur le bassin versant d'Imiga (1/10.000ème).

Carte 3 : Les parcelles d'érosion de Pô-Banon. Carte morpho-pédologique (1/1660ème).

Carte 4 : Etude de l'envasement d'un barrage au Burkina Faso (Boulbi).

LISTE DES TABLEAUX

Chapitre I		Pages
Tab. 1. 1	: Répartition des classes de hauteur de pluie à Léo et à Dori	26
Tab. 1. 2	: Fréquence (en %) des classes de hauteurs de pluie en différentes stations du nord au sud du Burkina Faso	28
Tab. 1. 3	: Diminution de la classe des pluies supérieures à 40mm en liaison avec la sécheresse actuelle .	30
Tab. 1. 4	: Récurrence des précipitations annuelles à Zorgho. Estimation des quantiles et des paramètres pour différentes lois d'ajustement	33
Tab. 1. 5	: Récurrence des précipitations mensuelles, en août, à Pô. Estimation des quantiles et des paramètres pour différentes lois d'ajustement .	34
Tab. 1. 6	: Analyse fréquentielle des précipitations annuelles et mensuelles à Pô (Loi normale)	35
Tab. 1. 7	: Analyse fréquentielle des précipitations annuelles et mensuelles à Zorgho (Loi normale)	35
Tab. 1. 8	: Fréquences des pluies maximales journalières à Ouagadougou	37
Tab. 1. 9	: Estimation des paramètres et des quantiles suivant différentes lois d'ajustement. Exemple de la station de Pô en juin	40
Tab. 1.10	: Pluies journalières maximales mensuelles en début d'hivernage sur 15 stations du Burkina (Loi de Gumbel-Moindres carrés)	43
Tab. 1.11	: Fréquences des pluies journalières maximales en avril, mai ou juin dans le centre et le sud du Burkina Faso	44
Tab. 1.12	: Quantiles des pluies maximales annuelles de fréquence rare en n jours consécutifs sur 49 stations du Burkina (Période de référence : origine-1984)	47
Tab. 1.13	: Fréquence des pluies maximales annuelles en n jours à Dori, Koupela et Banfora	50
Tab. 1.14	: Ecarts (en %) entre pluies (en mm) maximales sur 2 jours et pluies maximales quotidiennes pour des fréquences décennales et centennales	51

Pages

Tab. 1.15 : Pluies (en mm) maximales en 30 jours consécutifs et pluies d'août comparées sur les stations de Pô et de Zorgho 52

Tab. 1.16 : Répartition mensuelle des types de pluies sur cinq ans à Pô-Banon 70

Tab. 1.17 : Distribution spatiale des averses sur quatre stations voisines du sud du Burkina Faso et identification des pluies locales ou régionales (Tiébélé, Banon, Pô climato. et synopt.) ... 71

Tab. 1.18 : Coefficients de corrélation entre les précipitations annuelles de quatre stations au sud du Burkina Faso 72

Tab. 1.19 : Les quantiles estimés sur les courbes intensités - durées - fréquences de Pô (1978-1982). 77

Tab. 1.20 : Les coefficients de Montana des droites d'ajustement 77

Tab. 1.21 : Intensités maximales durant 30 minutes à Ouagadougou et Pô suivant différentes périodes de référence 78

Tab. 1.22 : Fréquences des indices d'agressivité annuels à Saria 80

Tab. 1.23 : Répartition mensuelle de l'indice d'érosivité dans 4 stations du Burkina Faso 81

Chapitre II

Tab. 2. 1 : Fréquences mensuelles et annuelles d'un vent instantané quotidien maximum à Ouagadougou (1968-1977) 93

Tab. 2. 2 : Fréquences mensuelles et annuelles d'un vent instantané quotidien maximum à Bobo-Dioulasso (1968-1976) 94

Tab. 2. 3 : Variations, entre saisons sèches, des vents forts quotidiens en pourcentage du total annuel 98

Tab. 2. 4 : Variations interannuelles des directions des vents forts à Bobo-Dioulasso (1968-1976) (> 10 noeuds) 103

Tab. 2. 5 : Variations interannuelles des directions de vents instantanés quotidiens efficaces (> 10 noeuds) à Ouagadougou 103

Chapitre III

Tab. 3. 1 : Composition minéralogique du granite de la carrière de Ouagadougou (Analyses modales - Institut Dolomieu - Grenoble) 112

Tab. 3. 2 : Minimums et maximums absolus annuels à différentes profondeurs dans le granite (Ouagadougou) 117

Tab. 3. 3 : Différences de durées d'insolation de janvier à avril, en 1982 et 1983 121

Tab. 3. 4 : Amplitudes journalières maximales dans le granite et à l'air libre 122

Tab. 3. 5 : Variations de température à la surface de la roche (-2 cm) sous averses 125

Tab. 3. 6 : Amplitudes (A) maximales enregistrées en 15 minutes et horaires (H) correspondants 127

Tab. 3. 7 : Contrastes thermiques maximums entre l'air libre (T_N : + 0,5 cm) et la roche (T_V : - 50cm) à un instant donné 129

Tab. 3. 8 : Contrastes thermiques maximums (A) à l'intérieur de la roche à un instant donné 130

Tab. 3. 9 : Minimums et maximums thermiques dans une cuirasse en avril-mai 1984 132

Tab. 3.10 : Amplitudes journalières maximales dans la cuirasse et en surface 133

Tab. 3.11 : Horaires des minimums et maximums thermiques quotidiens dans la cuirasse 133

Tab. 3.12 : Amplitudes "instantanées" maximales dans la cuirasse et en surface 134

Tab. 3.13 : Contrastes thermiques maximums entre l'air libre et la cuirasse 135

Tab. 3.14 : Contrastes thermiques maximums à l'intérieur d'une cuirasse 135

Chapitre IV

Tab. 4. 1 : Définition des formations végétales par combinaison des recouvrements (*in* Terrible, 1978) 143

Tab. 4. 2 : Biomasse foliaire produite au "standing-crop" dans la région de la mare d'Oursi (*in* Piot *et al*, 1980) 153

Tab. 4. 3 : Les types de recouvrements végétaux sur le bassin versant d'Imiga (BV_1: bassin versant total ; BV_2: sous-bassin en amont de la station de jaugeages S2)..... 157

Pages

Tab. 4. 4 : Recensement de population à Imiga (juillet 1983) 159

Tab. 4. 5 : La strate ligneuse sur les 5 placeaux du bassin versant d'Imiga 163

Tab. 4. 6 : Evolution de la couverture du sol (en % de la surface) par *Andropogon gayanus* (graminée) non brûlé ou brûlé (environs de Ouagadougou) (*in* Terrible, 1973) 167

Tab. 4. 7 : Evolution du couvert végétal dans le ranch de Markoye, à partir des images Landsat (*in* Courel, 1984) 169

Chapitre V

Tab. 5. 1 : Corrélation de rangs entre les pourcentages de cuirasses affleurantes et de substratum birrimien dans 8 provinces du sud-ouest du Burkina Faso 196

Tab. 5. 2 : Corrélations de rangs entre les pourcentages de cuirasses affleurantes perchées et de substratum birrimien (schisteux et andésito-basaltique) sur chaque coupure du degré-carré de Houndé 199

Chapitre VI

Tab. 6. 1 : Déplacement d'une boule de granite sous l'action des racines d'un arbuste 211

Tab. 6. 2 : Etude de battage du sol à Niangoloko (Haute-Volta). Poids de terre recueillie par les "bouteilles-pièges" en grammes par 314cm^2, en provenance de différentes surfaces et pour trois classes de pluie. *In* CTFT (1979) 218

Tab. 6. 3 : Saltation pluviale sur sol travaillé 219

Tab. 6. 4 : Saltation pluviale sur sol non travaillé ou partiellement protégé 220

Tab. 6. 5a: Synthèse des résultats des 8 stations expérimentales du Burkina Faso 231

Tab. 6. 5b: Synthèse des résultats des 8 stations expérimentales du Burkina Faso 232

Tab. 6. 6 : Schéma de bilan hydrique sur la parcelle sous savane (P1) de Pô-Banon (1978-1982) 243

Tab. 6. 7 : Schéma de bilan hydrique sur la parcelle cultivée de Pô-Banon (1978-1982) 244

Pages

Tab. 6. 8 : Ruissellement et érosion sur les quatre parcelles expérimentales de Pô-Banon, de 1978 à 1982 248

Tab. 6. 9 : Déplacement de gravillons colorés sous une pluie exceptionnelle (121mm) d'une durée de retour de 25 ans à Pô-Banon (3 août 1978)... 262

Tab. 6.10 : Dosages d'eaux de pluie prélevées à Pô et à Sirgui, moyennes pondérées en fonction des hauteurs de pluies unitaires et apports moyens annuels à Sirgui 271

Tab. 6.11 : Dosages effectués sur la phase liquide des échantillons d'eaux de ruissellement prélevés sur les parcelles expérimentales de Pô-Banon en 1980 et moyennes pondérées en fonction du volume des écoulements 274

Tab. 6.12 : Dosages effectués sur la phase liquide des échantillons d'eaux de ruissellement prélevés sur les parcelles expérimentales de Sirgui (SIR) en 1980 et 1981 ou à l'aval du bassin versant d'Imiga (IMI) en 1984. Résultats unitaires et moyennes pondérées en fonction du volume des écoulements 275

Tab. 6.13 : Pertes en charges solubles (kg/ha/an) sur les parcelles expérimentales de Pô (1980) et de Sirgui (1980 et 1981) 276

Tab. 6.14 : Estimation de la minéralisation et des pertes globales en charges dissoutes, durant l'année 1980, sur les parcelles de Pô et de Sirgui 278

Tab. 6.15 : Teneurs en solubles (en p.p.m) et résistivité dans un échantillon de lessivage oblique, prélevé à l'aval de la parcelle P4 à Pô-Banon, au lendemain d'une pluie exceptionnelle (121mm). 280

Tab. 6.16 : Résultats ponctuels de transports éoliens à Oursi (Piot et Millogo, 1980a) 282

Tab. 6.17 : Résultats de transports éoliens à Oursi, pour différentes averses, durant l'hivernage 1979 (Piot et Millogo, 1980a) 283

Chapitre VII

Tab. 7. 1 : Comparaison des écoulements entre cinq bassins versants de la région de Manga (sud du domaine soudanien du Burkina Faso) d'après Klein (1967) et Albergel (1987) 291

Pages

Tab. 7. 2 : Comparaison des écoulements entre cinq petits et moyens bassins versants de la région de Ouagadougou (centre du domaine soudanien du Burkina Faso) d'après Pieyns et Klein (1964) 292

Tab. 7. 3 : Comparaison des écoulements entre trois bassins versants de la région de Boulsa (centre du domaine soudanien du Burkina Faso) d'après Sircoulon et Klein (1964), Albergel (1987) 293

Tab. 7. 4 : Comparaison des écoulements entre trois bassins versants de la région de Tikaré (nord du domaine soudanien du Burkina Faso) d'après Oberlin *et al.*, 1967 295

Tab. 7. 5 : Caractéristiques morphométriques et hydrographiques des bassins versants d'Imiga (Burkina Faso) 299

Tab. 7. 6 : Les jaugeages de 1982, 1983, 1984 et 1985 sur la passerelle n° 1 (S1) en aval de BV1 (Imiga - Burkina Faso) 304

Tab. 7. 7 : Les jaugeages de 1983 à 1985 sur la passerelle n° 2 (S2) en aval de BV2 (Imiga - Burkina Faso) 308

Tabl. 7. 8 : Précipitations mensuelles et annuelles à Imiga et Zorgho entre 1982 et 1985 312

Tab. 7. 9 : Indices d'agressivité des pluies à Imiga en 1982 (période 1er juillet - 2 septembre), 1983 et 1984 (R: Indice de Wischmeïer ; R': Indice de Galabert) 314

Tab. 7.10 : Caractéristiques de l'écoulement aux exutoires (S1 et S2) des deux bassins versants (BV1 et BV2) d'Imiga (Burkina Faso) en 1982 317

Tab. 7.11 : Caractéristiques de l'écoulement aux exutoires (S1 et S2) des deux bassins versants (BV1 et BV2) d'Imiga (Burkina Faso) en 1983 326

Tab. 7.12 : Caractéristiques de l'écoulement aux exutoires (S1 et S2) des deux bassins versants (BV1 et BV2) d'Imiga (Burkina Faso) en 1984 331

Tab. 7.13 : Caractéristiques de l'écoulement aux exutoires (S1 et S2) des deux bassins versants (BV1 et BV2) d'Imiga (Burkina Faso) en 1985 334

Tab. 7.14 : Comparaison des concentrations en S1 et S2 lors d'un même écoulement, le 13 août 1985 ... 337

Tab. 7.15 : L'évolution du pourcentage des très fortes averses par rapport au total des précipitations avant et après 1960, à Pô 344

Pages

Tab. 7.16 : Comparaison des écoulements entre 8 grands et très grands bassins versants de la région de Ouagadougou (centre du Burkina Faso) d'après Pieyns et Klein (1964) 355

Tab. 7.17 : Envasements évalués par levés topographiques comparés, d'après Grésillon et Reeb, (1981) 360

Tab. 7.18 : L'envasement du barrage de Boulbi 361

Tab. 7.19 : Ecoulement et transport en suspension sur la Kompienga (campagne 1980) d'après H.E.R. (1981 a) 374

Tab. 7.20 : Ecoulement et transport en suspension sur la Volta Blanche (campagne 1977) d'après Dumas *et al.* (1977) 377

Tab. 7.21 : Estimation du pourcentage des sols nus sur une scène Landsat 386

Chapitre VIII

Tab. 8. 1 : Croissances comparées des mils sur parcelle protégée (P.P.) et champ traditionnel (C.T.) à Sirgui (1980) *in* D. Sanou (1981)..... 406

Tab. 8. 2 : Moyennes des teneurs en eau (en %) comparées sur champ traditionnel (CT) et aménagement antiérosif (A,B,C, avec A à 3m du bourrelet-amont, C à 3m du bourrelet-aval et B au milieu), à Sirgui, en 1980 406

Tab. 8. 3 : Caractéristiques de 4 aménagements antiérosifs de la région de Sapone 410

Tab. 8. 4 : Dégradation des aménagements en 3 ou 4 ans (1981) 412

Tab. 8. 5 : Durée moyenne de travail pour un aménagement antiérosif de versant, d'après une enquête FDR, sur 20 sites de l'ORD de Kaya.. 419

LISTE DES PLANCHES

		Pages
PLANCHE I	: Aménagements spontanés	
Photo 1	: Ancien cordon de pierres (50 ans d'âge) et atterrissement de sables (à gauche). (Imiga - nord-ouest de Zorgho)	487
Photo 2	: Transplantation de *Vetiveria nigritana* dans les rigoles de bas de versant. (Songo - sud-est de Pô)	487
Photo 3	: Pratique du paillage sur champ de bas de versant. (Imiga - nord-ouest de Zorgho)	487
PLANCHE II	: Aménagements dirigés	
Photo 4	: Mise en charge d'une terrasse de diversion. Hauteur juste suffisante et faible enherbement. (Sirgui - sud-ouest de Kaya)	489
Photo 5	: Dégradation d'un aménagement antiérosif de versant. (Sabouna - nord de Ouahigouya). Matériau sableux poussé à l'ouest (à gauche) du bourrelet	489
Photo 6	: Terrasse perméable sur site aménagé par l'OXFAM et riziculture sur versant. (Kao - est de Ouahigouya)	489
PLANCHE III		
Photo 7	: Nappe déferlante dans le premier bas-fond à l'est de Pô (mai 1977 - pluie de 35mm à Pô)	491
Photo 8	: Envahissement latéral des sables dans un bas-fond, au débouché d'une rigole. (Site des parcelles expérimentales de Pô-Banon)	491
PLANCHE IV		
Photo 9	: La parcelle de Wischmeïer (Pw) de Pô-Banon (Burkina Faso)	493
Photo 10	: La station de jaugeages S2 à l'aval du petit bassin versant (BV2) d'Imiga (Burkina Faso)	493

Pages

PLANCHE V

Photo 11 : Dissection linéaire dans les bas-fonds. Le ravin de Pô-Est (mars 1981)..... 495

Photo 12 : Destruction d'une forêt-galerie au sud-est de Langouerou (région de Pô) 495

PLANCHE VI

Photo 13 : Le bassin versant d'Imiga dans sa partie occidentale, en fin de saison sèche (mars 1984) : Savane herbeuse piquetée d'arbustes et butte cuirassée (géofaciès G3)..... 497

Photo 14 : Un feu de brousse dans la région de Dandé (nord-ouest de Bobo-Dioulasso)... 497

PLANCHE VII

Photo 15 : La dynamique éolienne en savane : mobilisation des sables limoneux sous forme de rides (région de Kaya : 13°06' N - 01°05' W) 499

Photo 16 : La dynamique éolienne en savane : déflation de saison sèche (février 1982) et transport de fines suspensions à la verticale des plaques de sols nus. (Imiga : 12°20' N - 00°41' W) 499

PLANCHE VIII

Photo 17 : Montage stéréoscopique des photos aériennes de la région de Pô-Est (Mission 79003 HV - n° 7087, 7088, 7089 - e : 1/50.000) 501

PLANCHE IX

Photo 18 : Montage stéréoscopique des photos aériennes de la région d'Imiga (Mission 79005 HV, novembre 1979 - n° 7903, 7904, 7905 - e : 1/50.000) 503

PLANCHES PHOTOGRAPHIQUES

Aménagements spontanés

Photo 1 — Ancien cordon de pierres (50 ans d'âge)
et atterrissement de sables (à gauche). (Imiga — nord-ouest de Zorgho).

Photo 2 — Transplantation de *Vetiveria nigritana* dans les rigoles
de bas de versant. (Songo — sud-est de Pô).

Photo 3 — Pratique du paillage sur champ de bas de versant.
(Imiga — nord-ouest de Zorgho).

Aménagements dirigés

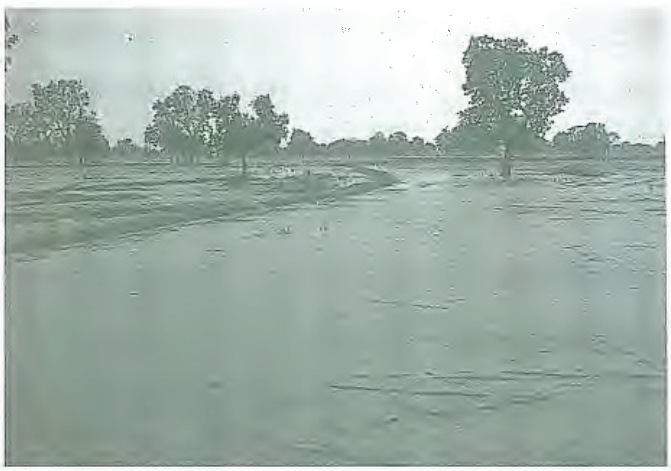


Photo 4 — Mise en charge d'une terrasse de diversion.
Hauteur juste suffisante et faible enherbement. (Sirgui — sud-ouest de Kaya).

Photo 5 — Dégradation d'un aménagement antiérosif de versant.
(Sabouna — nord de Ouahigouya).
Matériau sableux poussé à l'ouest (à gauche) du bourrelet.

Photo 6 — Terrasse perméable sur site aménagé par l'OXFAM et riziculture sur versant. (Kao — est de Ouahigouya).

Photo 7 — Nappe déferlante dans le premier bas-fond à l'est de Pô
(mai 1977 — pluie de 35 mm à Pô).

Photo 8 — Envahissement latéral des sables dans un bas-fond, au débouché d'une rigole.
(Site des parcelles expérimentales de Pô-Banon).

Photo 9 — La parcelle de Wischmeïer (Pw) de Pô-Banon (Burkina Faso).

Photo 10 — La station de jaujeages S2 à l'aval du petit bassin versant (BV2) d'Imiga (Burkina Faso).

Photo 11 — Dissection linéaire dans les bas-fonds. Le ravin de Pô-Est (mars 1981).

Photo 12 — Destruction d'une forêt-galerie au sud-est de Langouerou (région de Pô).

Photo 13 — Le bassin versant d'Imiga dans sa partie occidentale,
en fin de saison sèche (mars 1984) :
Savane herbeuse piquetée d'arbustes et butte cuirassée (géosystème G3).

Photo 14 — Un feu de brousse dans la région de Dandé
(nord-ouest de Bobo-Dioulasso).

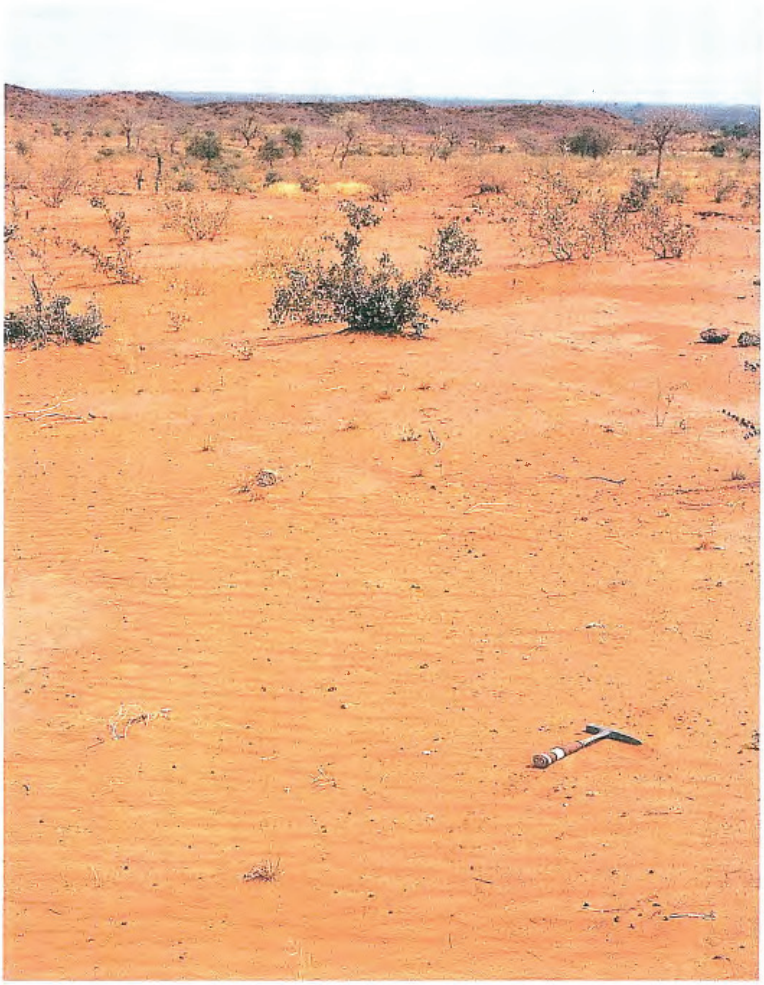


Photo 15 — La dynamique éolienne en savane :
mobilisation des sables limoneux sous forme de rides (région de Kaya : 13°06' N - 01°05' W).

Photo 16 — La dynamique éolienne en savane :
déflation de saison sèche (février 1982) et transport de fines suspensions
à la verticale des plaques de sols nus. (Imiga : 12°20' N - 00°41' W).

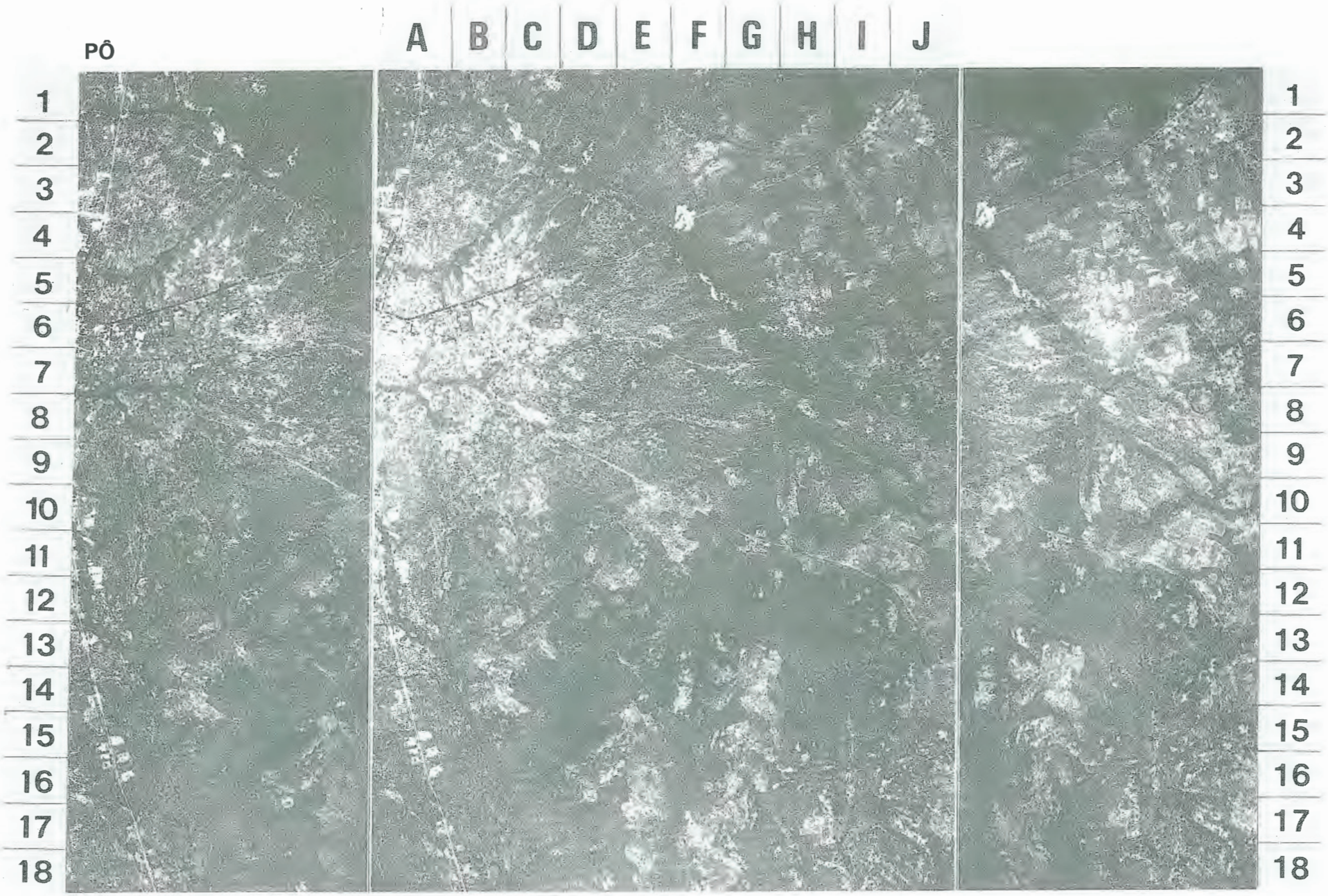


Photo 17 — Montage stéréoscopique des photos aériennes de la région de Pô-Est
(Mission 79003 HV — n° 7087, 7088, 7089 — e : 1/50.000).

PLANCHE VIII

Photo 18 — Montage stéréoscopique des photos aériennes de la région d'Imiga
(Mission 79005 HV, novembre 1979 — n° 7903, 7904, 7905 — e : 1/50.000).

TABLE DES MATIERES

	Pages
Avant-Propos	I
Introduction générale	1
LIVRE I : LES AGENTS D'EROSION	5
Introduction : Les grands traits géographiques du pays.	6
1ère Partie : Les agents directs de l'érosion : extrêmes atmosphériques et variations microclimatiques .	17
Chapitre I : Les précipitations	18
1.1 : Les hauteurs de pluies : totaux et classes de pluies, leur tendance actuelle	18
1.1.1 : Les totaux annuels	18
1.1.2 : Les classes de hauteurs de pluies..	25
1.2 : Les fréquences de précipitations.....	31
1.2.1 : Récurrences des précipitations annuelles et mensuelles	32
1.2.2 : Récurrences des précipitations maximales journalières	36
1.2.2.1 : Les précipitations maximales journalières en tout mois	36
1.2.2.2 : Les précipitations maximales journalières en début d'hivernage	39
1.2.3 : Récurrences des précipitations maximales annuelles sur plusieurs jours..	45
1.3 : Intensités et durées des précipitations.....	59
1.3.1 : Typologies des pluies	59
1.3.2 : Les courbes intensités - durées - fréquences	74
1.3.3 : Les indices d'érosivité.....	78
Conclusion	82
Chapitre II : Le vent	84
2.1 : Les mesures anémométriques	84
2.2 : Les caractéristiques des vents maximums ..	86

Pages

2.2.1 : Fréquences aux différentes échelles de temps 86
2.2.2 : Fréquences, vitesses et directions associées 98

Conclusion 104

Chapitre III : Les facteurs microclimatiques : amplitudes thermiques et variations d'humidité dans la roche et les sols 110

3.1 : Les caractéristiques des expérimentations: sites, dispositif et méthode de mesures des amplitudes thermiques 111

3.1.1 : Les sites 111
3.1.2 : Le dispositif 112
3.1.3 : La méthode - Choix et limites 114

3.2 : Les résultats 115

3.2.1 : Les résultats sur substratum granitique 115

3.2.1.1 : Le traitement des données 115
3.2.1.2 : Les variations de températures à une même profondeur 116

a- à l'échelle de l'année 116
b- à l'échelle de la journée 121
c- à l'échelle du quart d'heure 125

3.2.1.3 : Les écarts de températures entre niveaux au même instant .. 129

a- Les contrastes thermiques roche - air libre 129
b- Les contrastes thermiques à l'intérieur de la roche 130

3.2.2 : Les résultats sur cuirasse ferrugineuse 131

3.2.2.1 : Les variations de température à même profondeur 131

a- à l'échelle mensuelle 131
b- à l'échelle journalière 132
c- à l'échelle d'un quart d'heure 133

3.2.2.2 : Les écarts de températures entre niveaux au même instant... 134

a- Les contrastes thermiques cuirasse - air libre 134
b- Les contrastes thermiques à l'intérieur d'une cuirasse 135

Conclusion 136

Pages

3.3 : Les variations d'humidité dans le sol 137

2ème Partie : Les facteurs indirects de l'érosion. Végétation et sols entre influences climatiques et anthropiques 140

Chapitre IV : La végétation : une couverture de savanes discontinues dans l'espace et dans le temps 142

4.1 : A l'échelle du territoire : une zonalité encore reconnaissable mais perturbée 142

4.2 : A grande échelle : une mosaïque de formations ligneuses et herbacées, juxtaposées et étagées 153

4.2.1 : Le grand bassin versant de la mare d'Oursi (zone sahélienne)..... 153

4.2.2 : Le petit bassin versant d'Imiga (zone centre-soudanienne) 155

4.2.3 : La parcelle expérimentale sous savane arbustive de Pô-Banon (zone sud-soudanienne) 164

4.3 : Le rôle de l'homme : défrichement et mise en défens 168

Conclusion 171

Chapitre V : Les sols de savane 174

5.1 : Typologie des sols 175

5.1.1 : Rappel des caractères généraux 175

5.1.2 : Deux exemples de toposéquences 179

5.1.2.1 · La toposéquence de Pô-Banon .. 179

5.1.2.2 : La marqueterie des sols sur le bassin versant d'Imiga 182

5.2 : Texture et écoulement de surface : la prise en compte des horizons indurés..... 189

5.2.1 : Les relations roche-mère - densité du réseau hydrographique 189

5.2.2 : Les horizons indurés et la genèse du ruissellement 192

5.2.3 : Les relations roche-mère - cuirasses affleurantes : l'exemple du sud-ouest du Burkina Faso 195

5.3 : Les structures de surface à forte cohésion. 200

5.3.1 : La genèse des organisations pelliculaires superficielles 200

Pages

5.3.1.1 : Les organisations superficielles d'origine physique 200
5.3.1.2 : Les organisations superficielles d'origine biologique 201
5.3.2 : Les plaques de sols nus compacts ... 203
5.3.2.1 : Les chappes imperméables autour des termitières dégradées 203
5.3.2.2 : Les sols nus compacts de bas de versant 204
Conclusion 206

LIVRE II : LES MESURES, LES PROCESSUS ET LES FORMES AUX DIFFERENTES ECHELLES SPATIALES.

Chapitre VI : La météorisation à l'échelle ponctuelle et l'érosion sur parcelles expérimentales ou sur versant 209
6.1 : La météorisation 209
6.1.1 : Les processus peu perceptibles sur versants rocheux 210
6.1.1.1 : L'altération chimique : un exemple d'impact sur les versants schisteux..... 210
6.1.1.2 : L'action biologique végétale.... 211
6.1.1.3 : Une attaque mécanique très probable : le thermoclastisme 212
6.1.2 : L'efficacité de l'érosion pluviale sur les sols 215
6.1.2.1 : L'érodibilité du sol 216
6.1.2.2 : L'érosion pluviale et l'agressivité climatique 217
6.2 : L'érosion hydrique mécanique sur parcelles expérimentales 222
6.2.1 : Analyse critique des méthodes de mesures sous pluies naturelles : choix et limites 222
6.2.1.1 : L'intérêt des parcelles expérimentales et leurs limites 224
6.2.1.2 : Les choix techniques : parcelles et systèmes collecteurs 225

Pages

6.2.2 : Synthèse des résultats de huit stations expérimentales 230

6.2.2.1 : Le ruissellement et l'érosion des parcelles sous savane 230

6.2.2.2 : Le ruissellement et l'érosion sur jachères récentes et parcelles cultivées 234

6.2.2.3 : Les essais de bilans hydriques 240

6.2.3 : Processus hydrodynamiques et facteurs conditionnels du ruissellement. 247

6.2.3.1 : Le ruissellement et l'érosion sous pluies naturelles à Pô-Banon : essai de hiérarchisation des facteurs 247

6.2.3.2 : L'enseignement des simulations de pluies conduites par l'ORSTOM 256

6.2.3.3 : De la parcelle au versant : les types de ruissellement et les caractéristiques de l'érosion 258

6.3 . Les érosions difficilement quantifiées 270

6.3.1 : La dégradation chimique des sols ... 270

6.3.1.1 : Les apports par les précipitations 270

6.3.1.2 : Le départ des substances dissoutes dans les eaux de surface 271

a- Le pH et la résistivité 272

b- La composition des solutions 273

c- Tentative de détermination de la minéralisation globale 277

Conclusion 279

6.3.2 : Les transports éoliens 281

Conclusion 285

Chapitre VII : L'écoulement et l'érosion sur les bassins versants aux différentes échelles 288

7.1 : Ecoulement et érosion hydrique à l'échelle des petits et moyens bassins versants 289

7.1.1 : Les bassins versants représentatifs et expérimentaux de l'ORSTOM 289

Pages

7.1.1.1 : Les écoulements dans le sud du domaine soudanien (région de Manga) 290
7.1.1.2 : Les écoulements au centre du domaine soudanien (régions de Ouagadougou et de Boulsa).... 291
7.1.1.3 : Les écoulements au nord du domaine soudanien (région de Tikaré) 294
7.1.2 : L'expérimentation sur les petits bassins versants d'Imiga 297
7.1.2.1 : Les objectifs de l'expérimentation, l'équipement du bassin et ses difficultés 297
7.1.2.2 : Les jaugeages 302
a- Les jaugeages des débits liquides. 302
b- Les jaugeages des débits solides . 308
7.1.2.3 : L'écoulement et l'érosion hydrique sur les deux petits bassins versants d'Imiga (1982-1985) 312
a- Les observations pluviométriques.. 312
b- Les caractéristiques des crues au cours des quatre campagnes 316
7.1.3 : La dissection linéaire dans les bas-fonds 338
7.1.3.1 : Les ravins de Pô-Est, au sud du domaine soudanien 338
a- L'érosion régressive : sa vitesse.. 338
b- L'érosion régressive : ses origines 343
7.1.3.2 : Le ravin d'Imiga, au centre du domaine soudanien 347
7.1.3.3 : Le ravin de Sabouna, au nord du domaine soudanien 351
Conclusion 352
7.2 : Ecoulement et érosion à l'échelle des grands et très grands bassins versants .. 354
7.2.1 : Les enseignements au niveau des barrages 354
7.2.1.1 : Le remplissage en eau des barrages 354
7.2.1.2 : L'envasement des barrages 359
a- Les levés topographiques comparés 359
b- Les sondages 360
7.2.2 : Les mesures de transports en suspension sur les grands cours d'eau..... 373

Pages

7.2.2.1 : Les mesures sur la Kompienga . 373
7.2.2.2 : Les mesures sur la Volta Blanche 375

7.3 : La dégradation des sols à l'échelle des images-satellites 382

7.3.1 : Les données de la simulation Spot dans la région de Bagré 383

7.3.2 : Un essai d'estimation de l'extension des sols nus sur une image Landsat et le rôle du vent 384

Conclusion 389

Conclusion 390

Chapitre VIII : Les tentatives de lutte antiérosive .. 393

8.1 : Initiatives paysannes et méthodes traditionnelles 394

8.1.1 : Les procédés mécaniques 394

8.1.2 : Les pratiques biologiques et les façons culturales 397

8.2 : Initiatives extérieures et participation paysanne 403

8.2.1 : Les réalisations des organismes publics 404

8.2.1.1 : Les types d'aménagements 404
a- Les aménagements de versants..... 404
b- Les aménagements de bas-fonds 407
8.2.1.2 : Les difficultés d'entretien des aménagements 409
a- Les constats de dégradation 409
b- La diversité des contraintes 413

8.2.2 : Les expérimentations des organisations non gouvernementales et des instituts de recherches 421

Conclusion 427

Conclusion générale 429

Bibliographie 439

Liste des figures 467

Liste des documents hors-texte 474

Liste des tableaux 475

Liste des planches photographiques 485

Table des matières 505

Achevé d'imprimer le 24 novembre 1988
par EDITEC 14 à Caen.

Dépôt légal : novembre 1988.