ACADEMIE DE MONTPELLIER

UNIVERSITE MONTPELLIER II

- SCIENCES ET TECHNIQUES DU LANGUEDOC-

THESE

présentée à l'Université de Montpellier II Sciences et Techniques du Languedoc pour obtenir le diplôme de DOCTORAT

SPECIALITE : MECANIQUE, GENIE MECANIQUE, GENIE CIVIL
Formation Doctorale : HYDROLOGIE « SCIENCES DE L'EAU ET AMENAGEMENT »
Ecole Doctorale : GEOSCIENCES

TYPOLOGIE ET CARACTERISTATION HYDROLOGIQUE DES SYSTEMES ENDOREIQUES EN MILIEU SAHELIEN (NIGER-DEGRE CARRE DE NIAMEY)

par

DESCONNETS Jean christophe

soutenue le 24 novembre 1994 devant le Jury composé de :

M. Claude Bocquillon, Professeur, Montpellier II,	Président
M. Philippe Bois, Professeur, Université de Grenoble,	Rapporteur
M. Gian Maria Zuppi, Professeur, Université de Paris XI,	Rapporteur
M. Thierry Lebel, chargé de recherche, ORSTOM,	Examinateur
M. Fréderic Moniod, Directeur de recherche, ORSTOM,	Directeur de thèse
M. Jean paul Goutorbe, ingénieur de recherche, CNRM, Météo France,	Invité

AVANT PROPOS

Cette étude effectuée au sein de l'ORSTOM, successivement à la mission au Niger puis au Laboratoire d'Hydrologie de Montpellier, s'est toujours déroulée dans d'excellentes conditions scientifiques et matérielles.

La réalisation de cette étude dans le cadre de l'expérience d'HAPEX-Sahel a été bénéfique à tout point de vue. Elle a permis de se confronter à une large communauté de scientifiques et de mettre en place un programme multidisciplinaire. L'obtention d'importants crédits nécessaires aux dispositifs expérimentaux et aux missions aériennes indispensables pour mener à bien cette étude régionale sont pour une grande part dans la réussite de ce travail. C'est tout d'abord à Michel Hoeffpner qui m'a proposé le sujet que je tiens à donner tout ma reconnaissance.

L'accueil au sein de l'UR21 par son responsable Pierre Chevallier et l'animation qu'il a donnée au sein de cette unité de recherche m'ont permis de rédiger dans d'excellentes dispositions. Pour son soutien financier en fin de parcours ainsi que pour les remarques judicieuses qu'il a émises au cours de la phase de rédaction, je le remercie vivement.

J'ai une pensée respectueuse pour le regretté professeur Jean Charles Fontes, qui m'a accueilli avec sympathie et considération au sein du Laboratoire d'Hydrologie et de Géochimie Isotopique. Ce court séjour a permis mon initiation aux techniques d'analyses isotopiques sous l'oeil vigilant de sa responsable technique Annick Filly. Je remercie l'ensemble du personnel et des étudiants du LHGI pour leur gentillesse et leur disponibilité.

Ma reconnaissance va également aux personnes qui ont accepté de participer à mon jury de thèse. Claude Bocquillon, malgré sa charge de travail, m'a fait l'honneur et le plaisir de présider le jury. Mon directeur de thèse, Frédéric Moniod que j'ai submergé de lecture et qui m'a apporté ses conseils et critiques acerbes. Messieurs Gian Maria Zuppi et Philippe Bois, juges de ce travail, auxquels j'ai rendu la tâche bien difficile en les inondant d'innombrables versions du manuscrit. Qu'ils reçoivent ici une marque de ma profonde reconnaissance.

Je tiens également à remercier, Jean Paul Goutorbe qui a été l'un des promoteurs et coordinateurs de l'expérience HAPEX-Sahel et qui a bien voulu participer à mon jury de thèse.

Ma gratitude va tout particulièrement à Thierry Lebel qui durant quatre années a dirigé ce travail. Aussi bien pour son investissement personnel dans le programme de recherche, ses conseils, la dynamique qu'il a imprimée à cette étude, les lectures répétées de mon manuscrit que pour son soutien financier, il a rendu possible l'accomplissement de cette étude et sa valorisation.

Sans les multiples collaborations avec les nombreux chargés de recherches de l'ORSTOM qui ont participé à l'expérience HAPEX-Sahel, ce travail n'aurait jamais vu le jour. Je pense plus particulièrement à Jean Denis Taupin avec lequel cette étude a été initiée. Ensemble, les grandes lignes de ce travail ont été tracées. Il m'a aussi apporté sa passion et ses connaissances en matière de géochimie isotopique. Sans Christian Leduc qui a participé très activement à cette étude, autant par son exceptionnel travail de récolte

de données que par les nombreux conseils qu'il m'a prodigués, l'aboutissement et les conclusions de ce travail auraient été de peu d'intérêt. Qu'ils trouvent tous les deux ici mon immense reconnaissance.

Ma gratitude va aussi à Sylvie Galle qui a assuré avec une efficacité redoutable des mesures qui se sont avérées indispensables dans l'étude de la mare de Wankama.

Je suis loin d'oublier Jean louis Rajot, Mathieu Lamotte, Réné Boulet, Nagumo amis pédologues qui ont apporté une importante contribution à la connaissance du milieu des mares par leurs études de détails.

Leurs compétences et leurs conseils au cours de l'expérience HAPEX-Sahel m'auront été aussi très précieuse et je n'oublierai pas la participation de Franck Timouk, Jean Marc d'Herbés et Bruno Monteny à cette étude. Qu'ils en soient remerciés.

Pour les discussions et rigolades autour d'une sucrerie ou de la machine à café mais aussi pour leur contribution directe à ce travail en tant que membres de l'équipe EPSAT-Niger, je tiens à remercier vivement Frédéric Cazenave, Jean Lecocq et Thierry Valero. Ce dernier a aussi assuré le service assistance-dépannage informatique avec une efficacité qui n'a d'égale que sa rapidité.

Nombreux sont les stagiaires qui ont participé à cette étude. Ils ont contribué pour une grande part à l'avancement des travaux. Ils ont toujours été des compagnons de terrain et sont souvent devenus des amis. A tous et à Anne Boemare, David Blanc et Frédéric Lacrouts en particulier, qu'ils trouvent ici une marque de sympathie et de reconnaissance.

Sans eux, la vie aurait été un enfer. Je pense à tous les techniciens et administratifs travaillant à la mission ORSTOM de Niamey, et en particulier à Charlotte Thuet, Joseph Kong, Michel Gréard, Abdoulaye, Bodi, Bodo, Fati qui ont rendu le séjour agréable et ont facilité le travail de terrain.

Je remercie spécialement, Niandou, grand coursier et secoueur de sucreries en tout genre, qui aux moments les plus difficiles (+40°C pendant les coupures de la Nigelec) a su avec la rapidité de la gazelle limiter ma déshydratation imminente. En revanche, je ne remercie pas la Nigelec (société de distribution de l'éléctricité du Niger) pour les nombreuses coupures qui sont survenues alors qu'il faisait vraiment trop chaud.

Ils ont aussi été nombreux à être sollicités au laboratoire d'hydrologie de Montpellier. Qu'ils m'excusent de l'empressement avec lequel je les sortis de leur travail. Je pense surtout à ceux à qui j'ai mené la vie dure, Patrick Raous, Anne Crespy, François Delclaux, Hélène Lubés, Claudine Dieulin-Picard et les autres. Qu'ils soient remerciés de leur disponibilité. Un Merci spécial, à Jodawouat Touma pour les discussions instructives autour d'un Nes, à Alain Gioda qui a été l'unique compagnon des long week-ends de travail.

Encore plus difficile a été de me supporter pendant la rédaction de ce manuscrit, une seule en a été capable. L'affection et le réconfort que m'a apporté Stéphanie et la patience dont elle a fait preuve n'ont pas été vains.

SOMMAIRE GENERAL

INTRODUCTION 1

1 ERE PARTIE : CONTEXTE ET METHODES D'ETUDES

CHAPITRE 1 : LE MILIEU PHYSIQUE 13

CHAPITRE 2 : CONSIDERATIONS GENERALES SUR LES MARES ET LEUR BASSIN VERSANT 37

CHAPITRE 3 : METHODES D'ETUDES 57

2 ERE PARTIE : FONCTIONNEMENT HYDROLOGIQUE DES MARES DE REFERENCE

CHAPITRE 4 : PRESENTATION DES SITES DE REFERENCE 87

CHAPITRE 5 : ETUDE DE LA VIDANGE 119

CHAPITRE 6 : ESTIMATION DE L'EVAPORATION 163

CHAPITRE 7 : REDISTRIBUTION DE L'EAU SOUS LA MARE ET VERS L'AQUIFERE 189

3 ERE PARTIE : BILAN HYDROLOGIQUE A PARTIR DES MARES

CHAPITRE 8 : ESTIMATION DES ECOULEMENTS VERS LA MARE ET COMPORTEMENT HYDROLOGIQUE DES BASSINS VERSANTS 221

CHAPITRE 9 : L'INFILTRATION DANS LA MARE ET SA VARIABILITE TEMPORELLE 247

CHAPITRE 10 : PARTICIPATION DES MARES A LA RECHARGE DE L'AQUIFERE 273

CONCLUSION ET PERSPECTIVES 295

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES 301

LISTE DES FIGURES 311

LISTE DES TABLEAUX 317

TABLES DES MATIERES 319

INTRODUCTION

LE CADRE EXPERIMENTAL ET SCIENTIFIQUE : L'EXPERIENCE HAPEX-SAHEL

Effectué dans le cadre d'une expérience internationale et multi-disciplinaire, HAPEX-Sahel, le programme "bilan hydrologique régional à partir du suivi des mares temporaires", sur lequel repose la matière scientifique utilisée dans cette étude, fait partie de la composante hydrologie de surface mise en place par l'ORSTOM dans HAPEX-Sahel. Après avoir présenté les objectifs scientifiques généraux d'HAPEX-Sahel ainsi que sa finalité, nous situons le programme "suivi des mares" dans cette expérience en exposant les objectifs propres à ce programme de recherche.

L'aspect particulier de l'hydrologie sahélienne qui sous-tend cette étude hydrologique est soulignée.

1 CADRE EXPERIMENTAL

Le cadre expérimental dans lequel a été développée cette étude est l'expérience HAPEX-Sahel (acronyme de Hydrologic and Atmospheric Pilot EXperiment in the Sahel).

Faisant suite à des expériences d'objectifs scientifiques semblables mais réalisées sous des climats plus tempérés (HAPEX-Mobilhy, FIFE, EFEDA), l'expérience HAPEX-Sahel s'est déroulée en zone tropicale sèche (région de Niamey, Niger) durant une période de suivi à long terme de 3 ans (1991 à 1993) incluant une période de suivi intensif (POI) de 8 semaines (du 17 août au 9 octobre 1992). L'objectif commun à ces différentes expériences est de fournir les données nécessaires à une meilleure modélisation des interactions entre la surface continentale et l'atmosphère, au sein des Modèles de Circulation Générale Atmosphérique (MCGA) (Goutorbe et *al.*, 1992, 1994). La maille élémentaire de la grille sur laquelle opèrent les MCGA est de l'ordre de 100 x 100 km² (la plupart des modèles actuels fonctionnent avec une résolution de 200 x 200 km² , mais dans un avenir proche cette résolution passera en dessous de 100 x 100 km²). Ceci signifie que les processus qui entrent en jeu dans les échanges entre les surfaces continentales et l'atmosphère ne peuvent être décrits aux échelles inférieures à 100 x 100 km². Les simplifications qui en résultent sont souvent trop brutales et limitent les capacités de prédiction des MCGA. Les processus hydrologiques en particulier s'accommodent mal d'une description à l'aide de paramètres fictifs censés représenter les conditions moyennes sur des surfaces de 10 000 km². La démarche qui fonde la famille des expériences HAPEX-Sahel est donc d'installer une instrumentation suffisamment fine pour analyser la variabilité "sous-maille" de tous les paramètres conditionnant les échanges sol-atmosphère afin d'en déduire une

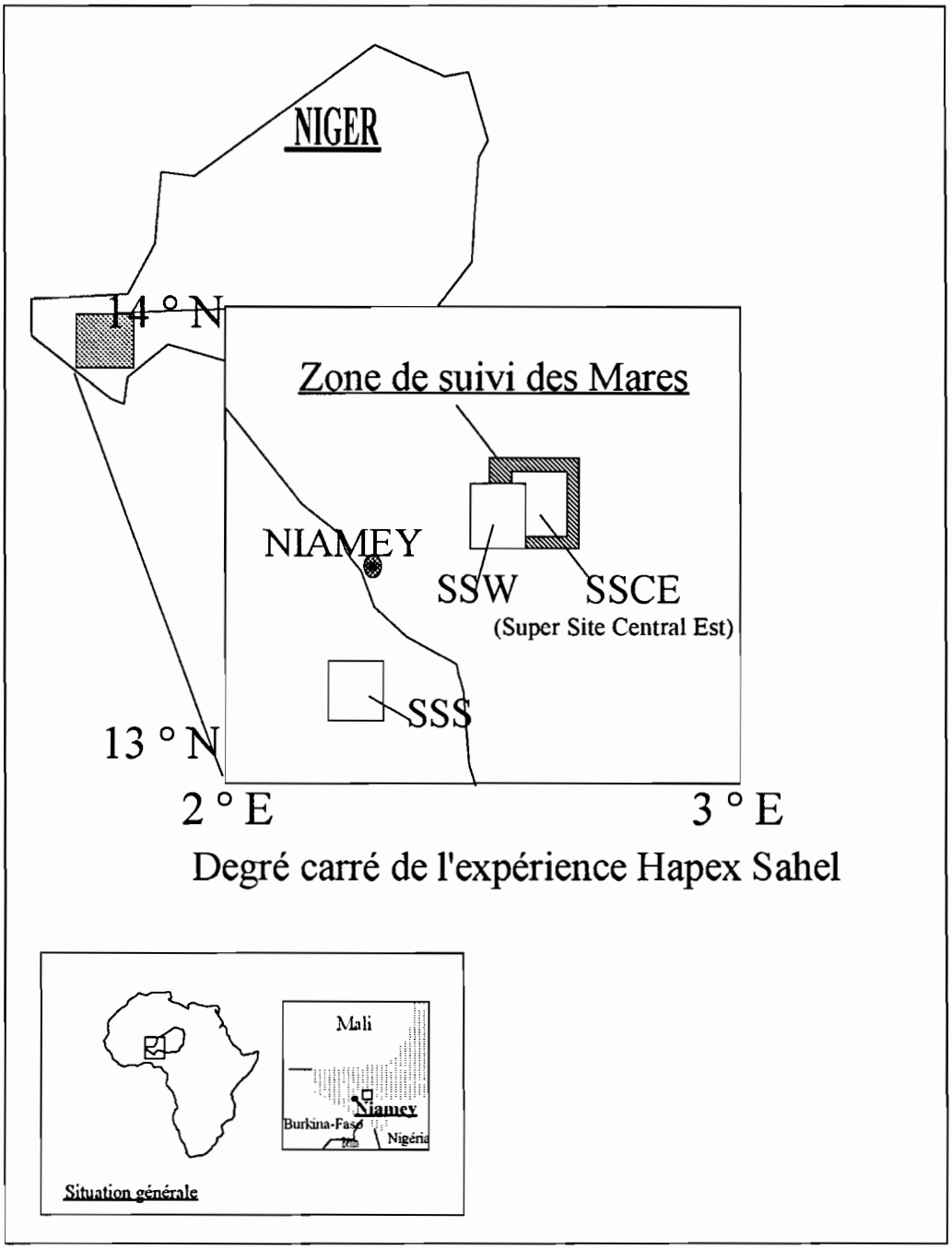


Figure 1 : localisation du degré carré au Niger avec la position des trois Super Sites (SSCE, SSW et SSS) et de la zone d'étude des mares.

paramétrisation plus réaliste à l'échelle de la maille. Ceci implique une stratégie expérimentale multi-échelles.

Dans l'espace, l'échelle de référence est la maille élémentaire des MCGA. Dans le cas particulier d'HAPEX, une surface d'un degré carré a été choisie, soit 110 x 110 km². Le degré carré est délimité par les latitudes 13 et 14° Nord, d'une part, et par les longitudes 2 et 3° Est, d'autre part, la ville de Niamey

(capitale de la république du Niger) se situant dans la partie ouest de la zone (figure 1). Cette échelle correspond à la méso-échelle telle que la définissent généralement les atmosphériciens. Le milieu physique a été caractérisé par télédétection (Kerr, 1992) et par des campagnes d'appui sur le terrain (D'Herbès et *al.*, 1992). Les conditions météorologiques (Bessemoulin et Puech, à paraître), la pluviométrie (Lebel et *al.*, 1992) et les aquifères (Leduc et Lenoir, à paraître ; Bromley et *al.*, à paraître) ont été également suivis à l'échelle du degré carré. Par contre, les processus aux interfaces (évaporation, cycle du carbone, infiltration des eaux de pluie) ont été analysés sur des surfaces plus réduites car leur étude requiert une instrumentation plus longue et complexe qui ne peut couvrir 10 000 km². Elle a donc été concentrée sur trois "super sites" dont la répartition sur le degré carré tient compte à la fois du gradient pluviométrique (1 mm/km du nord vers le sud, Lebel et *al.*, 1992) et de la répartition des états de surface (figure 2, d'après D'Herbès et *al.*, 1992). Les trois super sites couvrent une surface de l'ordre de la centaine de km² (de 100 km² pour le Super Site Sud SSS à 400 km² pour le Super Site Central Est (SSCE). Les super sites sont des zones d'intégration intermédiaire. Cette intégration est réalisée en particulier grâce à des mesures aéroportées (Goutorbe et *al.*, 1994). L'échelle spatiale inférieure est celle de la parcelle de un hectare environ, le WAB (Wind Affected Blob), sur lequel sont instrumentés de façon intensive les processus d'évaporation et d'infiltration. Ce dispositif est complété par une zone d'étude des mares de 600 km² (figure 1) débordant du SSCE.

Dans le temps, deux grandes échelles ont été choisies.

D'une part, une période de suivi à long terme d'une durée de trois ans (1991-1993) destinée à prendre en compte la variabilité interannuelle importante qui caractérise en particulier la pluviométrie au Sahel.

D'autre part, une Période d'Observation Intensive (POI) de 8 semaines sur laquelle ont été concentrées les mesures aéroportées.

Par ailleurs, l'extension vers des échelles plus larges, aussi bien dans le temps que dans l'espace fait également partie des préoccupations d'HAPEX-Sahel. Cette extension sera fondée avant tout sur l'imagerie satellitaire, le suivi au sol de certains paramètres (pluie, aquifère et végétation) étant assuré sur une durée débordant largement la période de suivi à long terme (de 1990 à à) par des équipes ORSTOM.

On notera enfin qu'il existe une certaine correspondance entre les échelles de temps et d'espace auxquelles sont étudiés les phénomènes. D'une façon générale, les études menées sur l'ensemble du degré carré l'ont été sur plusieurs années (pluviométrie, aquifère, végétation) alors que l'instrumentation des WAB n'a été maintenue qu'en 1992.

2 L'HYDROLOGIE DANS HAPEX-SAHEL

L'hydrologie de surface, essentiellement développée au sein de programmes menés par l'ORSTOM, comprenant l'étude des précipitations et de leur redistribution (ruissellement, infiltration, évaporation et stockage vers les nappes), a du s'adapter aux spécificités climatiques et physiques du milieu.

Le climat est marqué par une évapo-transpiration intense et une grande variabilité spatio-temporelle des précipitations. Celle du milieu physique est caractérisée par l'endoréisme des deux tiers du degré carré. A la fois issue de la dégradation des réseaux hydrographiques à l'échelle régionale et locale (échelle du versant) et du régime intermittent des précipitations, l'absence d'écoulement à l'échelle régionale voire à l'échelle du

petit bassin versant (inférieur à 10 km²) n'a pas permis d'envisager l'étude du bilan hydrologique régional (et sa validation) à partir de la mesure des écoulements sur des émissaires drainant tout ou partie du degré carré. La structure hydrologique du degré carré s'est révélée être un arrangement d'une multitude de petits systèmes endoréiques de quelques hectares à quelques kilomètres carrés, chaque bassin endoréique constituant la surface élémentaire hydrologique.

Ceci a conduit à concevoir les opérations de recherches hydrologiques en privilégiant la recherche des variables et des processus dominants à une échelle pertinente plutôt qu'en procédant par intégration spatiale (Lebel, 1990a), puisque les écoulements en rivière ne jouent pas ici le rôle d'intégrateurs qu'ils assument ailleurs. Les discontinuités hydrologiques de surface impliquent que l'aquifère est le seul moyen d'intégrer le bilan hydrologique à l'échelle régionale.

L'hydrologie dans HAPEX-Sahel s'est donc articulée autour de quatre grandes thématiques :

- l'étude des précipitations et de leur variabilité spatio-temporelle pour différentes résolutions d'espace et de temps sur l'ensemble du degré carré (expérience EPSAT-Niger),
- l'étude des processus de redistribution de l'eau à l'échelle de la parcelle, du versant et du bassin versant (inférieur à 10 km²),
- l'étude du bilan hydrologique des zones endoréiques consistant dans le suivi des mares temporaires et de leur bassin endoréique (programme "bilan hydrologique régional à partir du suivi des mares temporaires") et,
- l'étude de la recharge de l'aquifère de l'échelle locale à l'échelle du degré carré (programme "eaux souterraines")

Nous nous attarderons davantage, dans ce mémoire, sur le programme "bilan hydrologique régional à partir du suivi des mares temporaires".

3 LE PROGRAMME "BILAN HYDROLOGIQUE REGIONAL A PARTIR DU SUIVI DES MARES TEMPORAIRES"

Au Sahel, la dégradation du réseau hydrologique, autant à l'échelle du bassin versant qu'à l'échelle sub-régionale, est à l'origine d'un mode particulier de redistribution des eaux d'écoulement. Ceci se traduit par la présence de nombreuses zones de stockage temporaires durant l'hivernage et une courte partie de l'intersaison. On peut ainsi distinguer différents types de milieu de concentration et de stockage des eaux d'écoulement : les zones endoréiques structurales (plateau du Continental Terminal), les bassins versants de vallée sèche en forme de cuvettes "verrouillées" par des dépôts sableux, ou encore, les cours d'eau, actuellement non fonctionnels. Ces zones représentent les deux tiers du système hydrologique de surface du degré carré. Aussi, afin de fournir les éléments pour une quantification et une modélisation du bilan hydrologique régional de surface, un suivi des systèmes endoréiques a été entrepris.

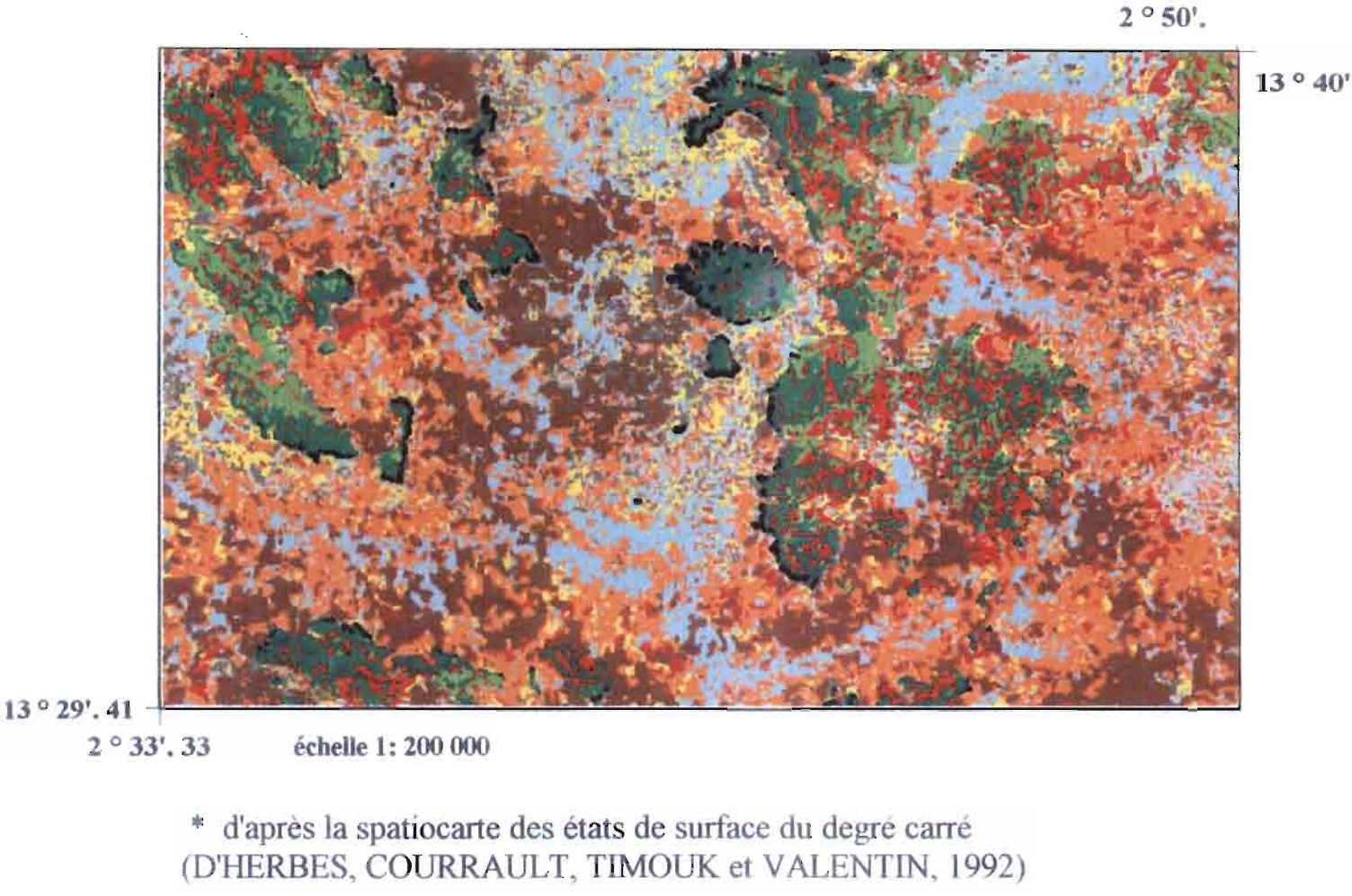


Figure 2 : extrait de la spatio-carte des états de surface du degré carré de Niamey -(D'Herbès et al., 1992)

Le principal objectif de ce programme de recherche est d'établir le bilan hydrologique régional des eaux de surface au sein des systèmes endoréiques, c'est à dire de quantifier la partition des eaux concentrées dans les réservoirs superficiels par évaporation directe vers l'atmosphère, par infiltration dans la zone non saturée et vers les nappes profondes durant la saison des pluies et la saison sèche.

Quatre étapes ont été identifiées :

- la connaissance de l'environnement physique de la zone de stockage et du système endoréique auquel il est associé,
- le fonctionnement hydrologique des zones de stockage c'est à dire la compréhension et la détermination des principaux processus liés au stockage et déstockage des réservoirs,
- le bilan hydrologique du réservoir ou la quantification de la reprise évaporatoire et la redistribution de l'eau dans la zone non saturée et vers les nappes profondes et, accessoirement, les ponctions par le bétail,
- l'extension du bilan hydrologique, quantifié en détail sur quelques sites de référence (mares de référence), vers un ensemble plus grand (mare témoin) puis à l'ensemble de la zone d'étude de 600 km².

L'établissement d'une typologie des systèmes endoréiques et l'utilisation de photos aériennes ont été envisagés comme première approche méthodologique de la spatialisation à partir d'un échantillonnage local.

De ces différentes étapes, les trois premières font l'objet des travaux présentés dans ce mémoire. La dernière étape, concernant l'extension du bilan hydrologique, fera l'objet de travaux ultérieurs.

Ce mémoire s'organise en 10 chapitres qui sont regroupés dans trois grandes parties.

Dans la **première partie**, intitulée **contexte physique et méthodes d'études**, nous soulignons les principaux aspects climatiques de la région de Niamey, puis nous présentons les grands caractères géomorphologiques et pédologiques du paysage de la région puis de la zone d'étude et enfin nous apportons quelques précisions sur le contexte hydrologique et hydrogéologique (chapitre 1).

Le chapitre 2 définit l'objet hydrologique étudié, son environnement, ainsi que ses principales caractéristiques. Enfin, nous présentons dans le chapitre 3 les méthodes d'étude et les dispositifs expérimentaux utilisés.

La **deuxième partie** se propose de **caractériser le fonctionnement hydrologique de trois mares** prises dans cette étude comme la référence des trois principaux milieux géomorphologiques de la région. Après avoir présenté les sites de référence en insistant sur l'aspect pédologique et morphologique des lits des mares (chapitre 4), le chapitre 5 analyse les épisodes de vidange à différentes échelles de temps à partir des chroniques limnimétriques et des informations pédologiques. Dans le chapitre 6, trois méthodes d'estimation de l'évaporation d'une nappe d'eau libre sont comparées dans le but de déterminer le flux évaporatoire au sein d'une mare. Enfin, le chapitre 7 nous donne les premières informations concernant la redistribution de l'eau sous les mares et vers les nappes dans le cas des mares de vallée.

La **troisième partie**, intitulée **bilan hydrologique à partir des mares**, analyse tout d'abord (chapitre 8) le régime des écoulements de surface en liaison avec la variabilité spatio-temporelle des pluies pour établir

temporelle des pluies pour établir ensuite (chapitre 9) le bilan hydrologique des trois systèmes endoréiques et caractériser sa variabilité annuelle et interannuelle.

Dans le chapitre 10, la connaissance quantitative des différents termes du bilan hydrologique au sein des mares de référence et le suivi piézométrique de l'aquifère du Continental Terminal sur l'ensemble du degré carré, nous donnent les éléments pour analyser et quantifier l'importance de la recharge de la nappe à partir des mares.

Après une synthèse générale des caractéristiques de fonctionnement des mares de référence et l'importance de leur régime hydrologique sur la recharge de l'aquifère, nous ébauchons une première typologie des systèmes endoréiques sur le degré carré en nous appuyant à la fois sur les sites de référence, les sites témoins et quelques autres systèmes endoréiques observés dans le degré carré. L'établissement d'une méthode de spatialisation du bilan hydrologique des systèmes endoréiques de référence vers les systèmes endoréiques témoins puis sur l'ensemble de la zone d'étude est évoqué.

1ère PARTIE

CONTEXTE ET METHODES D'ETUDES

- **Chapitre 1 : le milieu physique**
- **Chapitre 2 : considérations générales sur les mares et leur bassin versant**
- **Chapitre 3 : méthodes d'études**

1 er CHAPITRE

LE MILIEU PHYSIQUE

1ER CHAPITRE

LE MILIEU PHYSIQUE : AU PAYS DE L'HORIZONTALITE

La zone d'étude est située au coeur du Sahel. Après avoir présenté les principales caractéristiques climatiques de la région de Niamey (Niger), nous soulignons l'extrême variabilité spatio-temporelle du régime pluviométrique dans cette région et plus particulièrement dans le degré carré d'HAPEX-Sahel durant la période d'étude (1991-1993).

A la lumière des études régionales et locales du milieu géologique et pédologique, réalisées pour certaines dans le cadre d'Hapex-Sahel et sur le Super Site Central Est, il apparaît que le paysage s'organise autour de trois grands ensembles géomorphologiques.

La particularité des structures hydrologiques de surface dans la région d'étude et le caractère très variable du régime saisonnier des écoulements sont évoqués et révèlent la spécificité hydrologique de la zone d'étude.

Enfin, les principaux caractères de l'aquifère du Continental Terminal sur l'ensemble du degré carré nous donnent un aperçu du contexte hydrogéologique actuel.

INTRODUCTION : LE DOMAINE SAHELIEN

Le Sahel est la zone qui borde le Sud Sahara et forme la transition entre l'Afrique désertique et l'Afrique humide. Faute de limites naturelles bien identifiables, la définition et les limites du Sahel varient selon le domaine scientifique auquel on s'intéresse.

D'un point de vue pluviométrique, il peut être défini comme l'espace compris entre les isohyétes 200 et 700 mm (figure 3). Malgré la grande variabilité interannuelle et spatiale, l'isohyéte 200 mm peut être considérée comme la limite Nord de l'espace dans lequel les cultures pluviales sont possibles (Courel, 1984).

D'un point de vue strictement hydrologique (écoulement de surface), Rodier (1964) définit le Sahel comme une région caractérisée par la dégradation hydrographique, conséquence du déficit pluviométrique et des faibles pentes. Ces limites hydrologiques correspondent environ aux isohyètes 300 et 700 mm. Quelles que soient les définitions proposées qui font varier les limites du Sahel vers le Nord ou vers le Sud, la région de Niamey se situe au coeur de cet ensemble semi-aride. Les principales caractéristiques du milieu sont présentées dans les sections qui suivent.

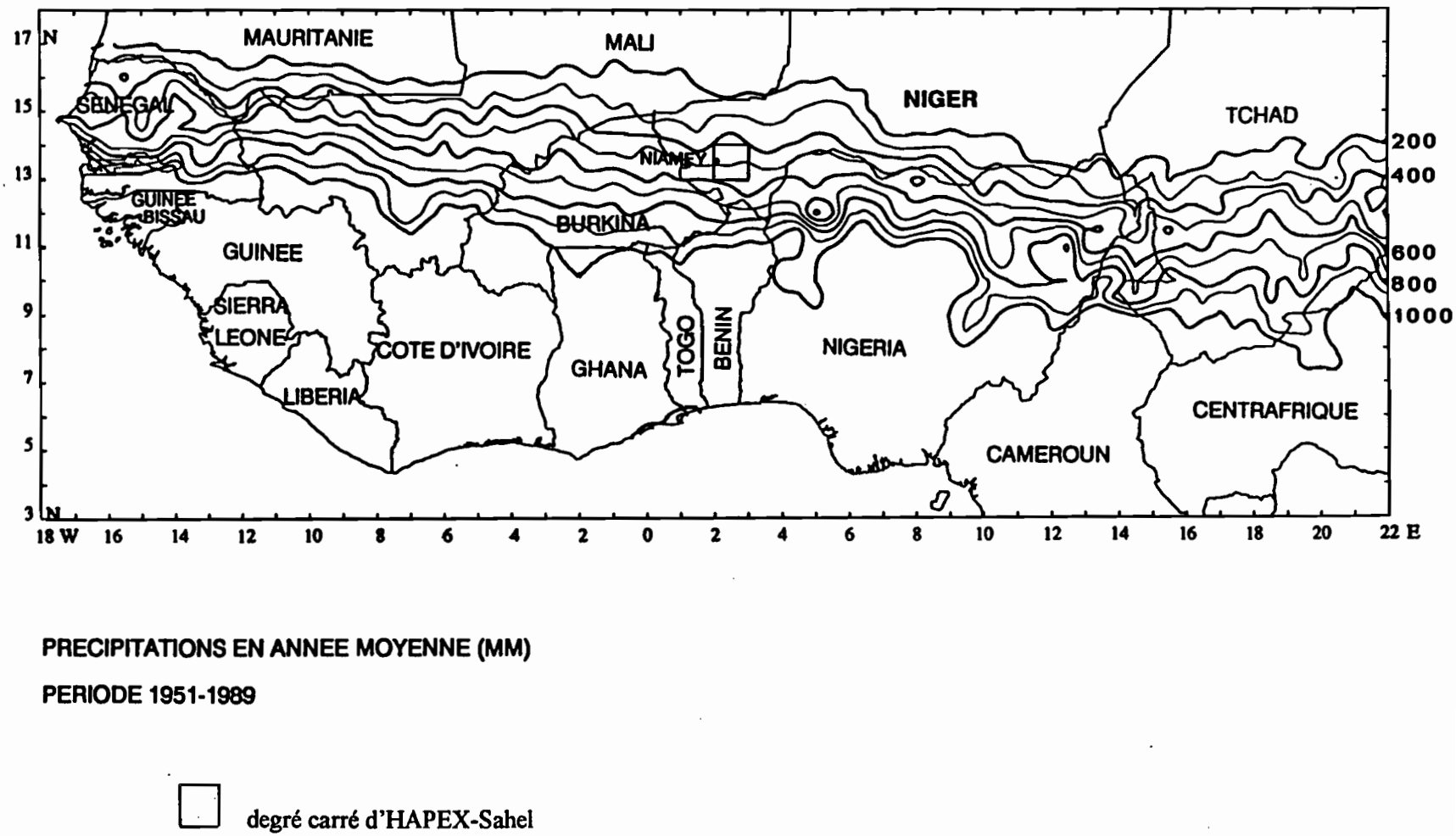


Figure 3 : pluie moyenne annuelle (1951-1989) sur la région sahélienne avec la position du degré carré (carré en trait plein)

1 CONTEXTE CLIMATIQUE GENERAL

Bordée au nord par le domaine sub-désertique et au sud par le domaine soudanien, la région occidentale du Niger est caractérisée par un climat sahélien (Leroux, 1983) ou de type "III semi arid" selon l'African Zonation de Griffith (1972).

Le fait le plus marquant de la circulation atmosphérique dans cette région est le balancement nord-sud de la zone InterTropicale de Convergence (ZITC) au cours de l'année. En effet, au nord de la ZITC la subsidence associée à l'anticyclone du Sahara empêche pratiquement toute précipitation. La ZITC, au contraire et comme son nom l'indique, est une zone de convergence active très favorable à la formation des précipitations. Le front InterTropical (FIT) marque la limite nord de la ZITC sur le continent. Il sépare les masses d'air sec sahariennes (flux d'Harmattan) des masses d'air alimentées en humidité par le flux de mousson qui se forme sur le golfe de Guinée. La position la plus septentrionale du FIT se situe aux alentours de 20° Nord durant l'été boréal. Le climat sahélien est donc caractérisé par l'alternance au cours de l'année d'une saison des pluies et d'une saison sèche.

La remontée plus ou moins rapide du FIT vers le nord à partir du mois de mars et la position finale atteinte (elle varie d'une année sur l'autre) conditionnent l'abondance de la saison des pluies. La remontée du FIT est loin d'être régulière ce qui a pour conséquence une grande intermittence des précipitations durant la première moitié de la saison des pluies et des gradients latitudinaux très marqués. Tous les paramètres météorologiques sont conditionnés avant tout par le balancement du ZITC. Nous présentons ci-dessous les principaux paramètres climatiques enregistrés à la station de Niamey.

L'ennuagement, l'ensoleillement et le rayonnement

Les moyenne mensuelles de l'ensoleillement et du rayonnement sont présentées dans la figure 4. Par rapport à la moyenne annuelle de 8,7 heures d'ensoleillement journalier, la période allant de novembre à février a en moyenne un ensoleillement supérieur entre 9.3 et 9,7 heures. C'est seulement durant les mois pluvieux de juillet, août et septembre que l'ensoleillement est inférieur à la moyenne annuelle.

Le rayonnement solaire est très élevé tout au long de l'année avec une moyenne annuelle de 20,5 MJ/m^2.

La température de l'air

Les températures maximales dépassent la moyenne annuelle de 36 °C de mars à juin et de octobre à novembre (figure 4). Les températures maximales observées peuvent dépasser 45 °C en fin de saison sèche (avril ou mai). La valeur moyenne annuelle de la température minimale est de 22,1°C. Cette valeur moyenne est dépassée d'avril à juin, alors qu'elle n'est pas atteinte de novembre à février.

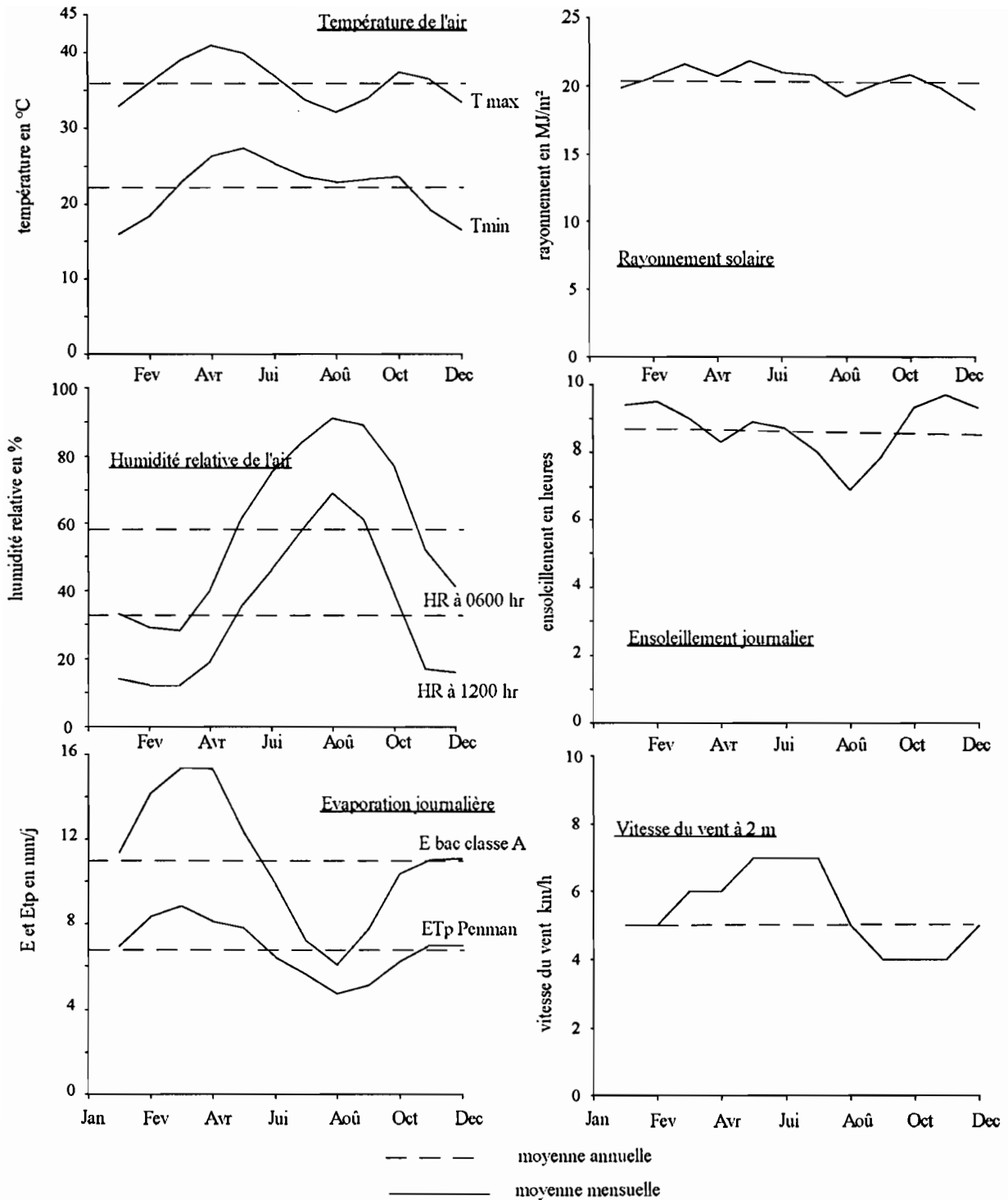


Figure 4 : variations saisonnières des principaux paramètres climatiques à la station météorologique de Niamey

La vitesse et la direction du vent

La vitesse du vent moyenne est de 2 m/s de mai à juillet avec une direction de secteur ouest/sud-ouest. De septembre à novembre, la vitesse du vent est plus faible et le régime plus stable. Au cours de la longue saison sèche (de décembre à avril) le vent dominant est l'harmattan. Il est surtout caractérisé par l'important transport solide qui provoque une très forte baisse de la visibilité.

L'humidité relative

L'humidité relative à 6 heures et à 12 heures sont données dans la figure 4.

Dépendant essentiellement de l'alternance des masses d'air sec (alizés et Harmattan) et humide (mousson) au cours de l'année, l'humidité relative a une variation saisonnière marquée. Elles se traduit par une hausse progressive de février à août (figure 4) avec une valeur minimale de 12 % au mois de février et mars (humidité relative à 12 heures) et une valeur maximale de 91 % au mois d'août. Ce maximum est suivi d'une baisse notable à partir du mois de septembre. La variabilité interannuelle est faible par comparaison à celle de la pluviométrie (Courel, 1984).

L'évaporation

Dans les régions sahéliennes, c'est le terme le plus important du bilan hydrologique. D'après Courel (1984), l'évaporation de la région sahélienne est davantage fonction de l'humidité relative de l'air que de la température et du vent. Découlant, notamment, des paramètres climatiques présentés ci dessus, l'estimation de l'évaporation comme composante hydrologique et édaphique du cycle de l'eau est complexe.

a) L'évaporation d'une nappe d'eau libre

Déterminée à partir des bacs à évaporation soit de classe A (standard OMM) soit de type Colorado (standard U.S.A), elle estime l'évaporation directe d'une nappe d'eau libre sous la seule influence du climat. Cette mesure est très influencée par les conditions climatiques locales et surestime généralement ce que serait l'évaporation d'une grande surface d'eau libre. Malgré tout, les valeurs du bac de classe A sont assez significatives pour démontrer l'importance de la reprise évaporatoire climatique. La lame moyenne annuelle est en effet extrêmement élevée, 4000 mm (station Niamey aéroport période de 1991-1993-figure 4). Les variations saisonnières sont très marquées et s'accordent avec le cycle climatique période sèche - période pluvieuse avec un maximum à 16 mm/j pour les mois de mars et avril et un minimum de 5 mm/j au mois d'août. La détermination de ce terme hydrologique sera plus largement abordée dans le chapitre sur l'estimation de l'évaporation à partir des mares.

b) L'évapotranspiration potentielle et réelle

Nettement inférieure à l'évaporation mésurée sur bac, l'ETp calculée par la formule de Penman (bilan radiatif), est néanmoins élevée. La lame annuelle moyenne est de 2485 mm à la station de Niamey (Griffith, 1972) avec un maximum en mars et un minimum en août (figure 4). Paradoxalement, c'est au cours de la période d'ETp minimale, correspondant à la saison des pluies, que la consommation en eau des végétaux est maximale, donc l'évapo-transpiration réelle maximale. Le reste de l'année c'est à dire une grande partie de la saison sèche, les faibles stocks hydriques du sol empêche le développement de la végétation annuelle.

Le bilan climatique

Le bilan climatique (B = Pluie - Evapotranspiration) traduit la demande climatique en eau (ETp) qui peut être satisfaite par le régime des précipitations. Virmani (1976) considère que la demande climatique, c'est à dire l'évaporation des végétaux, est comblée par les précipitations lorsque le rapport entre les précipitations et l'Etp est supérieur à 0,8. Sur cette base, on peut considerer que c'est entre le mois de juillet et septembre que les conditions d'humidité sont favorables au développement des végétaux et des cultures (figure 5) dans la région de Niamey. D'une manière générale au Sahel, le bilan climatique (ou bilan de l'eau : B = P - E) est largement négatif même si on ajoute aux précipitations l'eau de rosée. Si l'on en juge d'après le rapport de la tranche d'eau évaporée à la hauteur moyenne des précipitations, dans la bande sahélienne, ce rapport varie de 5 à 20 selon la latitude et devient maximal en région centrale sahélienne (Mali, Niger, Tchad d'après Courel, 1984).

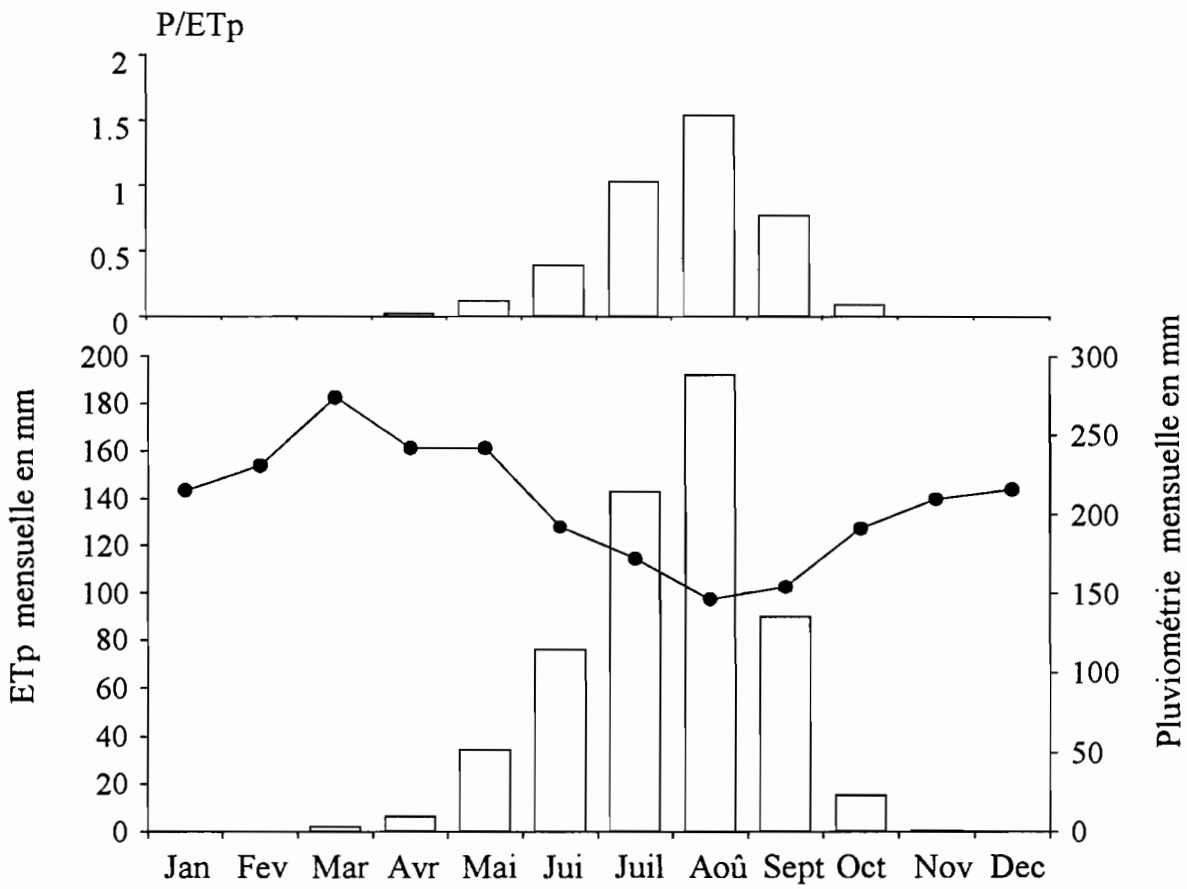


Figure 5 : déficit climatique (pluviométrie mensuelle - Etp mensuelle) et l'indice P/Etp à la station de Niamey

2 LE REGIME PLUVIOMETRIQUE ET SES CARACTERISTIQUES SPATIO-TEMPORELLES

2.1 Considérations générales sur le régime pluviométrique régional

Une des originalités du climat sahélien réside dans la distribution mensuelle des pluies qui permet d'opposer une courte saison des pluies à une longue saison sèche. Pour le météorologue, la saison des pluies couvre la période pendant laquelle la zone sahélienne est sous l'influence effective, continue ou discontinue de la mousson, c'est à dire du mois d'avril au mois d'octobre. Se référant à la formule de Gaussen, les géographes la réduisent aux seuls mois de juillet, août, septembre et parfois octobre[1]. En fait, comme le montre le hyétogramme des lames mensuelles moyennes à Niamey ville (figure 6), la majorité des pluies se concentrent de juillet à septembre.

Mais une des caractéristiques essentielles du régime pluviométrique est son extrême variabilité spatiale et temporelle. A l'échelle des âges géologiques, la paléoclimatologie a pu démontrer l'alternance de périodes sèches et humides. Cette variabilité temporelle est tout aussi remarquable à échelle humaine.

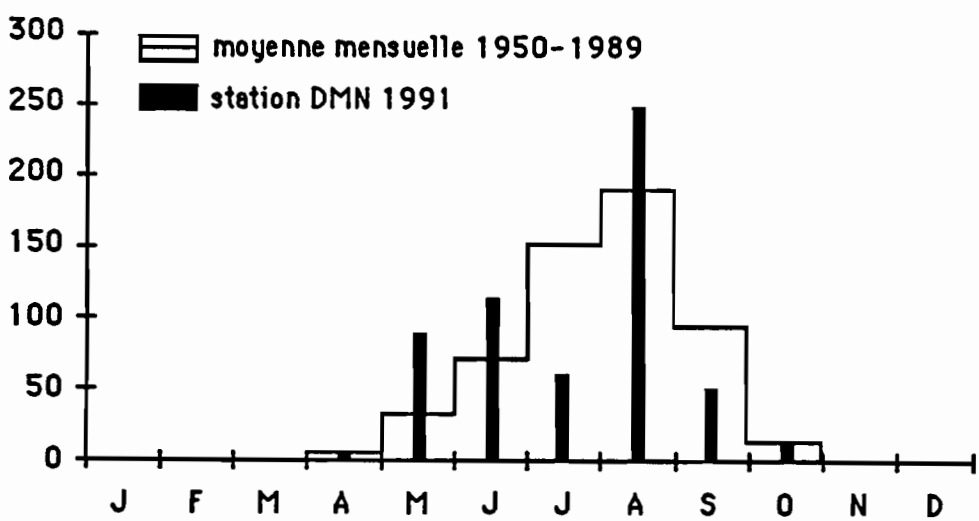


Figure 6 :distribution mensuelle des pluies à Niamey-ville pour la période 1950-1989 (dans Taupin et al., 1992)

[1]tout mois est considéré comme humide lorsque sa hauteur d'eau totale mesurée est égale ou supérieure au double de la température moyenne exprimée en degré celsius.

2.1.1 - Structure des systèmes précipitants régionaux

Mises à part les pluies exceptionnelles de saison sèche liées à la descente d'air polaire, les systèmes précipitants sahéliens sont tous d'origine convective. La convection peut rester confinée à l'échelle locale ou s'organiser et se développer à des échelles de plusieurs centaines de kilomètres formant ainsi des systèmes convectifs de méso-échelle (SCM). Le degré d'organisation le plus achevé des SCM est la ligne de grains qui présente un front de cellules convectives alignées selon une direction N-NE-S-SW, de plusieurs centaines de kilomètres de long. La profondeur de ce front ne dépasse pas 50 kilomètres. A l'arrière, on observe une zone de pluie stratiforme dont la circulation est liée à celle du front convectif (Roux, 1987). Cette zone stratiforme peut s'étendre sur plusieurs centaines de kilomètres de profondeur d'ouest en est. L'ensemble ainsi constitué se déplace d'est en ouest à des vitesses généralement comprises entre 50 et 60 km/h (Roux, 1987). En moyenne, mais cela varie d'une ligne de grains à une autre, deux tiers de la pluie tombant au passage d'une ligne de grains sont associées au front convectif, et un tiers à la traîne stratiforme. Malgré l'étonnante pérennité de la structure d'ensemble de ces systèmes au cours de leur durée de vie (de quelques heures à 3 ou 4 jours), la variabilité spatiale des précipitations qu'ils provoquent est très grande (Taupin et *al.*,1993).

2.1.2 Evolution du régime pluviométrique annuel (1905-1989)

L'évolution de la pluviométrie depuis le début de ce siècle a été marquée par la succession de périodes excédentaires et déficitaires, d'inégale durée et apériodiques. Ce fait est bien illustré par l'évolution des lames annuelles précipitées à la station de Niamey ville pour la période 1905- 1990, présentée en figure 7. Cette série peut être décrite par une loi normale de moyenne 561 mm et d'écart type de 135 mm qui exprime la variabilité interannuelle. D'autre part, il se dégage de la figure 7 que les dernières décennies (fin des années 60) présentent une tendance déficitaire. Radji (1991) a mis en évidence une différence significative de la moyenne entre la période 1950-1967 (moyenne : 631,3 mm ; écart type : 109,6) et la période récente 1968-1989 (moyenne : 508,5 mm ; écart type : 104,4). Ces fluctuations sont comparables à celles observées dans l'ensemble de la zone sahélienne.

2.2 Caractéristiques du régime pluviométrique sur le degré carré de Niamey

Précédant l'expérience HAPEX-Sahel, l'expérience EPSAT-Niger (estimation des pluies par satellite au Niger) mise en place dès 1989 (Lebel et *al*, 1992) a permis l'implantation d'un important réseau de pluviographes à mémoire statique sur la grande zone d'étude d'HAPEX (figure 8). Ce réseau est constitué d'une maille très dense de pluviographes qui étaient au nombre de 81 en 1989 puis 101 en 1990 et 1991 pour arriver à un réseau maximal de109 pluviographes en 1992 soit une maille de base 13 km, avec une densification plus élevée dans la zone du Super Site Central Est (1 station pour moins de 1 km) (Roux, 1989 ; Lebel et *al.*, 1991 ; Taupin et *al.*, 1992, 1993).

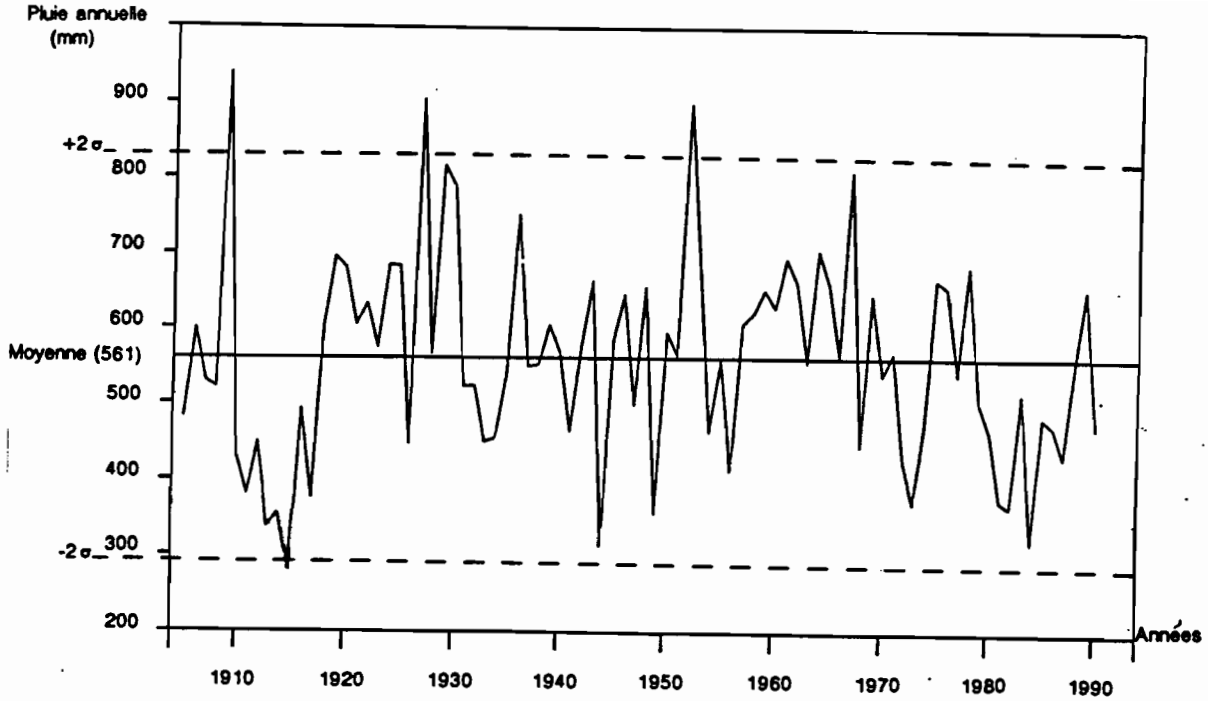
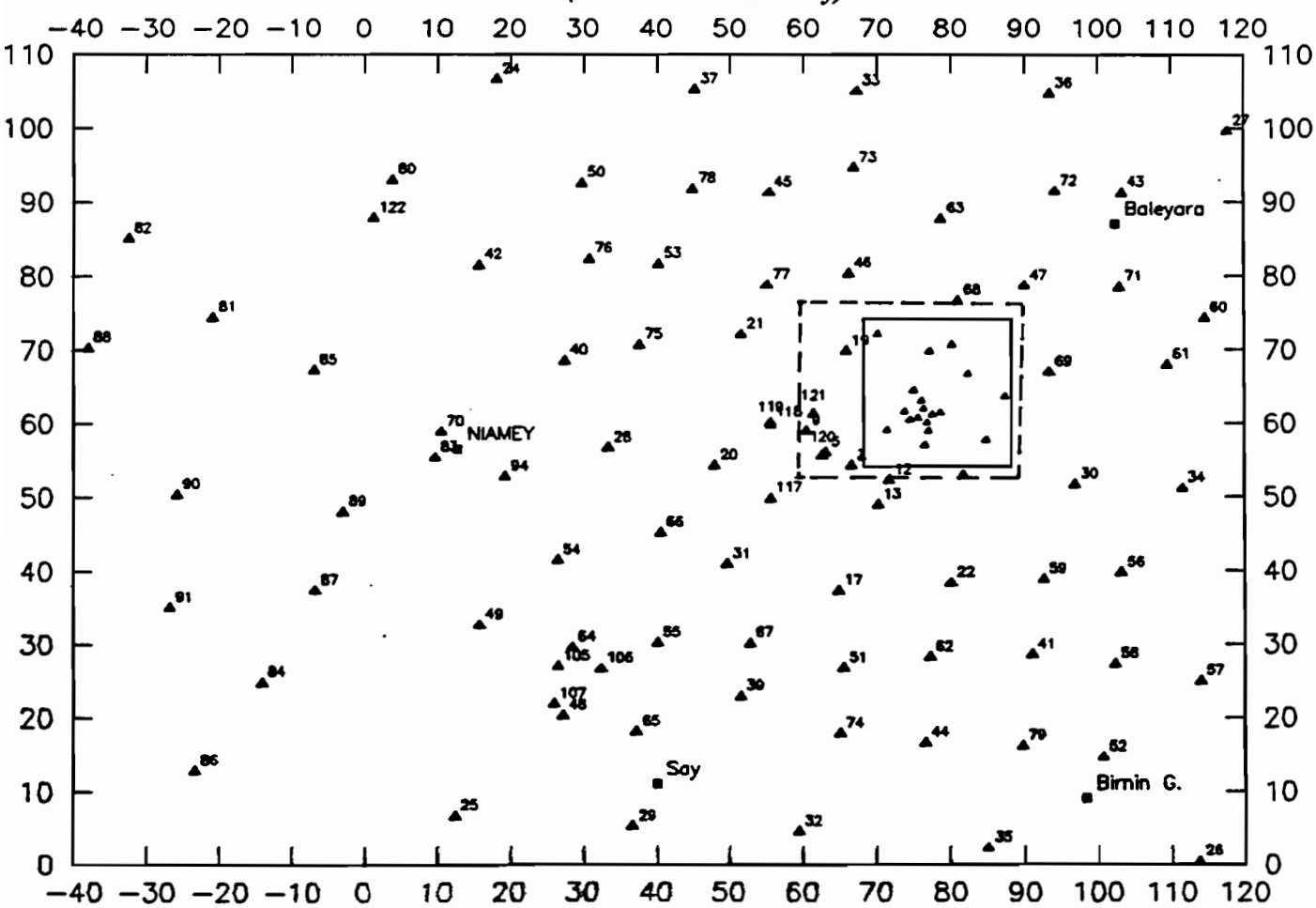


Figure 7 : pluies annuelles à Niamey-ville de 1905 à 1990 avec deux années reconstituées : 1911 et 1920 (source : DMN-Niamey)



Coordonnées en km origine 2°E-13°N

Figure 8 : réseau EPSAT-Niger pour l'année 1992 (extension maximale) avec la position du SSCE (carré en trait plein) et de la zone d'étude des mares (traits pointillés) (Taupin et al., 1993)

Avec une maille de base de 13 km, ce dispositif expérimental a permis, entre autre, de caractériser de manière précise la variabilité spatiale et temporelle des champs pluviométriques autant à l'échelle de la saison que de l'événement.

A partir des données pluviométriques de la période 1990-1993 encadrant notre période d'étude, nous proposons de donner quelques éléments descriptifs de ces quatre saisons et de souligner brièvement les principales caractéristiques spatiales et temporelles des champs pluviométriques observés. Les paragraphes qui suivent sont largement inspirés des résultats et analyses présentés dans Roux (1989) ; Lebel et *al.* (1992) ; Taupin et *al.* (1991, 1992) et Lebel et *al.* (à paraître).

2.2.1 Le cumul saisonnier (saison 1990-1993)

En moyenne, durant la période 1990-1993, 99% des pluies sont tombées entre le 15 avril et le 15 octobre. Le tableau 1 donne quelques paramètres statistiques des pluies saisonnières sur le réseau du degré carré comparés à ceux de la station de Niamey pour trois périodes. Ces résultats sont obtenus sur un nombre variable de pluviographes selon l'année (tableau 1).

La moyenne spatiale, obtenue par krigeage des valeurs ponctuelles (détail de la méthode dans Taupin et al, 1992, 1993), sur l'ensemble du degré carré et sur le Super Site Central Est (SSCE) est donnée dans le tableau 2. Sur la période 1990-1993 elle est légèrement plus faible (472 mm) que pour la période 1968-1989 (508 mm) de la station de Niamey, 1968-1989 étant une période sèche (moyenne inférieure de 25% à la période 1950-1967). L'année 1990 a été spécialement sèche avec une moyenne inférieure à 400 mm. Les années 1991 (522 mm) et 1992 (511 mm) ont été plus humides que la période de référence (1968-1989) et légèrement déficitaire par rapport à la période 1950-1989 (566 mm). Un zoom sur le Super Site Central Est qui correspond approximativement à la zone d'étude des mares montre une valeur moyenne légèrement supérieure à 479 mm pour la période de 1990-1993. Enfin les pluies observées sur le site d'HAPEX Sahel reflètent la tendance observée sur l'ensemble du Niger pour cette période comme le montrent les cartes isohyètes publiées dans Taupin et al (1992, 1993)

2.2.2 Sa variabilité spatiale et temporelle

Comme peuvent l'illustrer les cartes d'isohyètes des cumuls saisonniers des années 1990, 91, 92 et 1993 en figure 9, la variabilité spatiale des pluies saisonnières est très forte. En effet, des gradients de plus de 100 mm sur quelques kilomètres ont été enregistrés : 150 mm sur 6 km en 1990 sur le SSCE; 320 mm sur 27 km en 1991 (Taupin et *al.*, 1993), 275 mm sur 9 km en 1992 sur le Site sud. La dispersion des valeurs des cumuls saisonniers a été analogue sur toute la période avec un coefficient de variation proche de 15% et des valeurs minimales et maximales dans un rapport d'environ 2. D'une façon générale, on constate que la variabilité spatiale pour une année donnée est du même ordre de grandeur que la variabilité interannuelle en un point (115 mm sur la série de Niamey 1950-1989). Enfin, aucune structure répétitive sur une zone donnée n'est remarquable d'une année à l'autre, mais, le cumul sur les quatres années observées fait apparaître le gradient nord-sud (TAUPIN et *al.*, 1993).

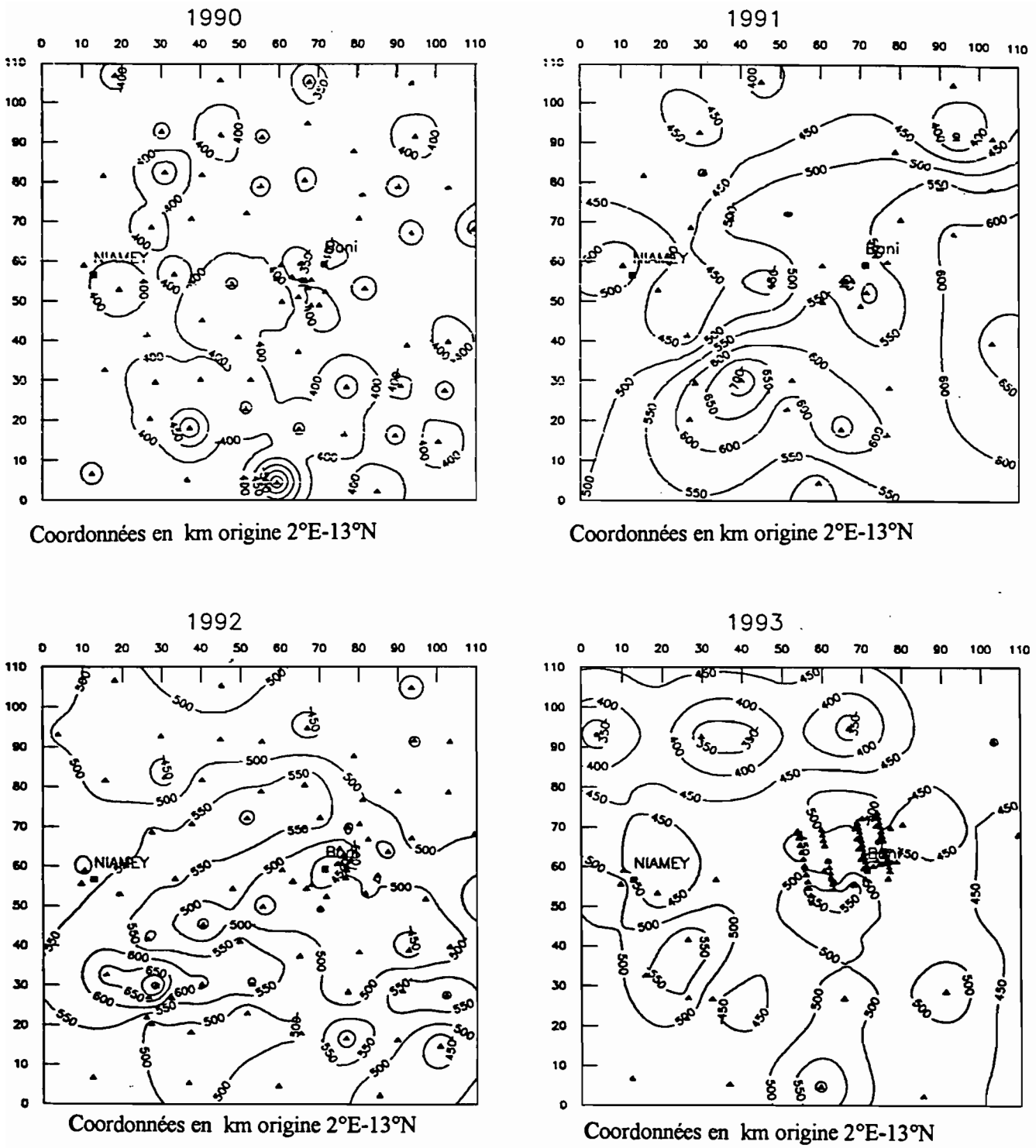


Figure 9 : isohyétes des cumuls saisonniers sur le degré carré pour les années 1990 à 1993 (d'après Lebel et al., à paraître)

Tableau 1 :comparaison des caractéristiques statistiques des pluies ponctuelles enregistrées sur le degré carré sur la période 1990-1993 et à la station de Niamey Aéroport (N.A.). Pluies en mm (d'après Lebel et al., à paraître)

Année	nombre de stations	moyenne (μp)	écart type (s)	minimum (m)	maximum (M)	coefficient de variation (s/μp)	(M-m)/μp (%)	Niamey Orstom	Niamey Aéroport (N.A.)
1990	60	396	63	292	659	16	93	399	474
1991	36	523	95	341	725	18,2	74	541	434
1992	70	513	71	389	782	13,9	77	488	607
1993	30	459	83,9	315	622	18,6	65	447	399
N.A. 50-89	40	566	123	294	980	22	114	médiane : 549	
N.A. 50-67	18	654	145	454	940	22	74	médiane : 627	
N.A. 68-89	22	495	108	294	689	22	80	médiane : 499	

Tableau 2 : moyenne spatiale des cumuls saisonniers (15.04 au 15.10) sur le degré carré et le SSCE calculée par krigeage des valeurs ponctuelles. Les valeurs sont accompagnées de l'écart type de l'estimation d'erreur. Les valeurs à la station de Banizoumbou sont données pour illustrer l'effet de moyenne spatiale (dans Lebel et al., à paraître).

	moyenne (μp tableau 1)	moyenne de toutes les stations	degré carré (12 000 km²)	SSCE (400 km²)	Banizoumbou (SSCE)
1990	396	405 (74)	396 ± 2	385 ± 15	402
1991	523	524 (52)	522 ± 4	560 ± 14	494
1992	513	513 (98)	511 ± 3	500 ± 6	410
1993	459	477 (99)	460	470 ± 3	458
moyenne	473	480	472	479	441

() nombre de postes pluviographiques

3 LE PAYSAGE

3.1 Origine du paysage actuel et géodynamique actuelle

Pays de vieille plate-forme, le Sahel est terre d'horizontalité. S'y succèdent des paysages de glacis, des paysages dunaires entrecoupés de reliefs tabulaires hérités d'une histoire géologique et climatique ancienne.

Le contexte géologique régional est celui du Niger Occidental, à cheval sur deux ensembles, le socle précambrien qui affleure dans le Liptako-Gourma (à l'ouest du fleuve Niger), et les formations sédimentaires du bassin des Iullemeden (à l'est) constituant le grand bassin sédimentaire du Continental Terminal. Mis en place au début de l'ère Tertiaire (Paléocène : 65 à 25 millions d'années BP), cet ensemble sédimentaire est composé de grès argileux et se présente, au Néocène supérieur (entre 5 et 2 millions d'années BP), sous la forme d'une immense cuvette de pente faible (environ 0,6 pour mille) orientée au sud, recouverte d'une cuirasse ferrugineuse (Greigert, 1966).

Relique de la surface originelle, le relief tabulaire ferrugineux qui domine le paysage actuel est né de l'entaillement du Continental Terminal par les cours d'eau durant la période humide Quaternaire. Fruits de l'intense érosion au cours de la période humide, les niveaux inférieurs ont été envahis à plusieurs reprises (Erg ancien 50000 BP et Erg récent : 20 000 et 15000 BP) par des sables éoliens qui composent l'actuelle couverture sableuse des larges vallées sèches. Au relief peu prononcé et au réseau hydrographique indécis, elles constituent avec les plateaux à cuirasse ferrugineuse le paysage de la partie centrale du degré carré et celui de la totalité de la zone d'étude des mares. La partie nord offre de plus larges vallées sableuses où sont installés des systèmes dunaires datant de l'Erg récent. L'actuelle vallée du fleuve Niger se situe dans la partie est tandis que la partie ouest est constituée de la grande vallée fossile du Dallol Bosso, système hydrographique ancien qui prenait naissance dans le massif de l'Aïr et de l'Adrar des Iforas.

La conjonction d'une pluviométrie faible aux caractères très érosifs et d'une évaporation élevée, associée à une action anthropique déséquilibrante, donne la prépondérance à une géodynamique de surface plutôt qu' à celle de profondeur. On retiendra que la tendance actuelle est davantage à la transformation du paysage par une morphogenèse active que par une pédogenèse, qui est cependant existante mais discrète (Riou, 1989).

3.2 Contexte géomorphologique et pédologique régional

Les grands traits de la couverture pédologique régionale (région occidentale du Niger) ont été étudiés par Gavaud (1966, 1975). Cette étude a permis d'identifier différentes associations pédologiques ou séquences de sol en relation avec la géomorphologie régionale. Une grande partie du degré carré (deux tiers) ainsi que la zone d'étude des mares font partie de l'association pédologique caractérisée par deux séquences : "sols ferrugineux de la série de Tanchia" et "toposéquence des vallées". Morphologiquement, ces séquences se distinguent par des vallées à faible pente (0,3 à 0,8 %) creusées dans le Continental Terminal et recouvertes d'un manteau éolien qui a été déposé et remanié à différentes époques. Les sols développés dans ces vallées sont classés "sols ferrugineux peu lessivés". Ils présentent de l'amont vers le

bas-fond des variations de teintes marquées de l'horizon d'accumulation B allant de 2,5 YR à 7,5 YR qui mettent en évidence des conditions d'humidité édaphique croissante. Peu structurés, ils présentent des textures sableuses ayant souvent plus de 90 % de sables, diminuant sensiblement vers la base des profils au contact des grès argileux du Continental Terminal. Par contre, les sols de fond de vallée se différencient par la présence de sables de couleur 10 YR d'origine alluviale et d'un d'horizon temporairement hydromorphe : les sols gris à raies. En amont, les vallées sableuses sont limitées par le relief tabulaire qui est constitué d'une carapace ou cuirasse ferrugineuse : les plateaux sommitaux à cuirasse ferrugineuse. Partiellement recouverts d'un manteau sableux, les sols qui s'y développent sont des lithosols souvent très rubéfiés (souvent inférieur à 1 mètre). Ils reposent directement sur la cuirasse ferrugineuse. De structure polyédrique à massive, ils présentent en général une texture argilo - sableuse associée à une forte charge caillouteuse.

3.3 Contexte géomorphologique et pédologique local : le Super Site Central Est

Dans le cadre d'une étude de milieu préliminaire à l'expérience HAPEX - Sahel, Courrault et *al.* (1990) décrit le système Sol-Plante-Relief à travers l'étude d'une toposéquence jugée représentative de la zone d'étude (SSCE) et appartenant au bassin versant de Sama Dey (site d'étude hydrologique du SSCE). Cette toposéquence représentative est schématisée par une coupe transversale du bassin versant de Sama Dey (figure 10) où l'on retrouve de façon plus détaillée les différentes unités morpho - pédologiques déjà identifiées par Gavaud.

De cette toposéquence, on retiendra les principales unités et quelques éléments essentiels de connaissance en matière de couverture pédologique de surface et subsurface (quelques mètres).

Le milieu écopédologique est décomposé en trois grands ensembles ou neuf sous-ensembles :

- le plateau à cuirasse ferrugineuse où l'on distingue trois domaines : la brousse tigrée, les petits systèmes dunaires (ensablement) et le talus qui est une zone de forte pente faisant la transition avec l'unité aval,
- son piémont sableux encore appelé "jupe sableuse" (Boulet, 1968) peut également se subdiviser en trois sous-ensembles : le piémont dégradé souvent dans la continuité topographique du talus, les cônes d'épandages sableux qui traduisent la disparition de l'écoulement concentré issu des ravines, et les surfaces agricoles : champs et jachères,
- le bas fond que l'on peut décomposer en deux domaines : les bombements ou zones dégradées aussi marquées par des replats ou des contre pentes, le chanfrein qui est la zone de raccord entre l'axe de drainage principal et la zone de bombements.

La figure 10 présente une coupe schématique de la toposéquence du bassin versant de Sama Dey où sont replacés les trois grands ensembles et leurs caractéristiques pédologiques de surface (classe des états de surface) et de profondeur.

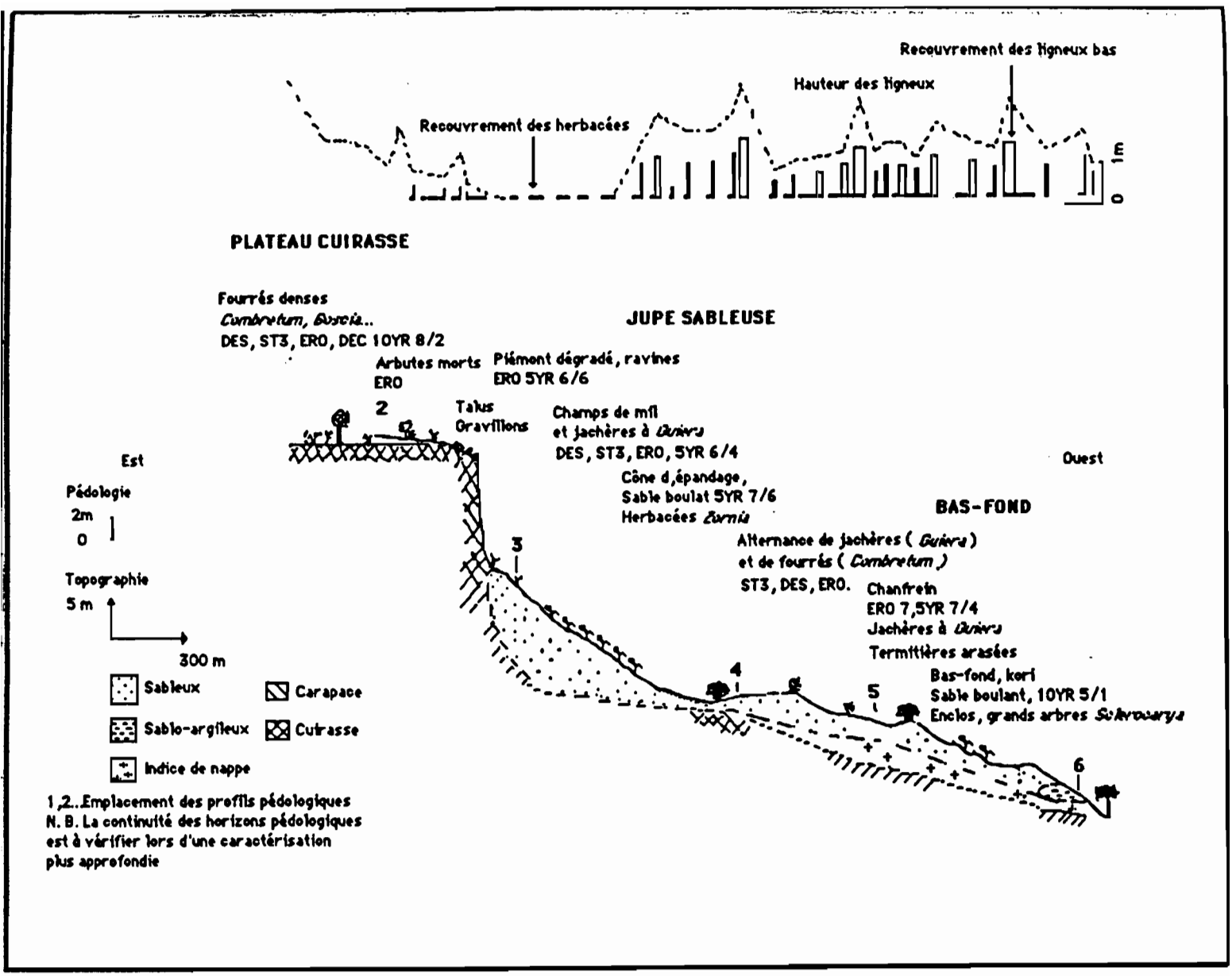


Figure 10 : toposéquence caractéristique du bassin versant de Sama Dey (Courrault et al., 1990)

Dans une étude agro-écologique, Nagumo (1992) étend les observations pédologiques de Courrault et *al.* (1990) à tout le Super Site Central Est soit environ 70 à 80 % du site d'étude des mares. Il procède aussi à un inventaire des ensembles pédologiques dans un souci de déterminer les potentialités agro écologiques de la zone. Pour cela et à partir d'observations systématiques des sols limitées aux horizons de surface (jusqu'à 2 mètres), il a dressé une carte des principales unités de sols et des unités géomorphologiques. Cette carte figure dans le chapitre de présentation des mares de référence sur laquelle a été positionné l'ensemble des mares étudiées.

3.4 La végétation

3.4.1 Caractéristiques générales de la région d'étude

Le contraste pédologique, et le contexte hydrique qui s'en suit, existant entre les reliefs tabulaires ferrugineux et les niveaux inférieurs sableux se traduit par un couvert végétal spécifique à chaque milieu.

Révélée par la photo-aérienne (Clos-Arceduc, 1956) la formation contractée de plateau à cuirasse ferrugineuse, communément appelée "brousse tigrée", se caractérise par l'alternance de bandes de végétation denses et de bandes de sol nu. Les essences ligneuses régionales se retrouvent dans ces arcs de végétation (*Guiera, Combretum, Acacia, Croton* etc).

Les vallées sableuses sont caractérisées par une végétation ligneuse basse, clairsemée, pauvre en espèces et souvent dominée par *Guiera senegalensis* et *Commiphora africana*. Ces dernières peuvent être associées à des espèces ligneuses arborées comme *Acacia* et *Balanites*. Le tapis herbacé est dominant en saison des pluies.

Les lieux privilégiés de concentration des eaux de ruissellement comme les bas fonds de vallée sont peuplés d'une végétation plus dense avec une strate arborée plus développée.

Dans les zones de stagnation temporaire d'eau se développe une végétation plus dense, plus diversifiée dont la composition et la dynamique sont spécifiques à ce milieu humide.

3.4.2 Structure et dynamique de la végétation liée aux mares temporaires

Aux abords des mares situées sur les plateaux à cuirasse ferrugineuse, la strate herbacée s'organise autour de la mare suivant une structure concentrique où les différents domaines colonisés sont déterminés par le cycle inondation-éxondation des eaux lié au régime de la mare, et pour une moindre part dans le substrat où elle se développe (dépôts limono argileux). En liaison avec le niveau de remplissage des mares, sa composition évolue au cours de la saison. En début de saison des pluies (faible taux de remplissage de la mare), la frange humide est colonisée par des espèces appartenant à des catégories transgressives (mésophytes) ou accidentelles. Elles sont caractéristiques des milieux humides telles que *Zornia glochidiata*, *Spermacoce stachydea*, *Triumfeta pentandra* ou encore *Eragrostis pilosa*. La période de remplissage maximal de la mare (mois d'août en année moyenne) est marquée par l'apparition d'espèces hydrophytes strictes et facultatives telles que *Cypérius iria*, *Heteranthera callifolia*, *Borreria filifolia* ou encore *Echinochloa colona*. A l'extérieur de la zone délimitée par la strate herbacée et dans des conditions d'humidité et non d'inondation, la strate arbusto-arborée dense constitue généralement un rideau de végétation où l'on retrouve principalement *Combretum micranthum* et *Guiera senegalensis*. Sa dynamique est moins sujette aux variations du régime de la mare mais atteste, par contre, de la pérennité des conditions édaphiques particulières .

Aux abords des mares situées dans les bas fonds des vallées sableuses, la structure de la végétation est comparable à celle des mares de plateaux. Du fait d'un contexte édaphique plus rude, faible rétention d'eau des sols sableux, les espèces herbacées sont moins nombreuses et leur développement plus limité dans

l'espace est uniquement réglé par les cycles inondation éxondation. La dynamique saisonnière est aussi comparable à celle rencontrée dans les mares de plateau. On retrouve en partie les espèces de type transgressives en début de saison remplacées par des espèces hydrophytes en fin de saison des pluies. Enfin la dégradation de cette strate est précoce. Dans ce contexte pédologique profond et humide, le nombre d'espèces sempervirentes est plus élevé. On note la présence de *Combretum glutinosum*, *Pilostigma reticulum*, *Acacia ataxacantha* et surtout de *Guiera senegalensis*. D'une manière générale, la strate arbustive et arborée est plus développée qu'à proximité des mares de plateaux et se concentre, contrairement au milieu ferrugineux, dans la zone d'inondation temporaire.

Le défrichement pour l'exploitation des sols à proximité des mares (culture de contre saison) ainsi que l'utilisation des ligneux comme bois de chauffe se traduit souvent par une forte dégradation de la strate arbustive et il n'est pas rare de trouver un couvert arbustif réduit à la seule présence de Guiera senegalensis.

4 CONTEXTE HYDROLOGIQUE (DE SURFACE)

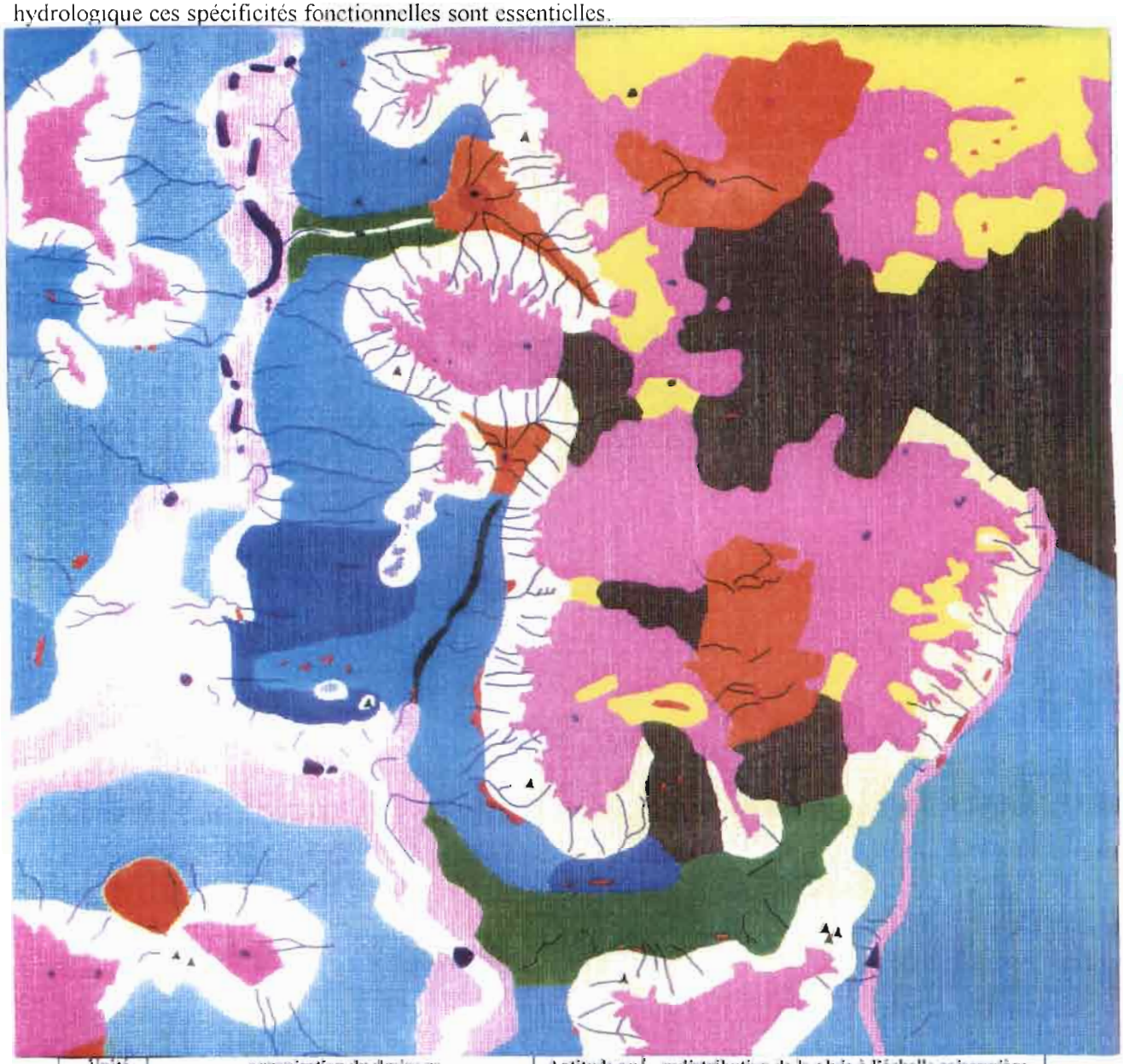
4.1 Structure hydrologique : dégradation du réseau hydrographique

Le domaine sahélien est en grande partie endoréique. Seuls de grands fleuves comme le fleuve Niger présentent des écoulements permanents dont les principales contributions proviennent des régions tropicales humides de la région Guinéenne. L'ensemble du degré carré est parcouru par un réseau hydrographique dégradé autant à l'échelle régionale qu'à l'échelle du petit bassin versant. Les anciens systèmes hydrographiques comme le Dallol Bosso ou Dallol Maouri sont les marques d'une organisation ancienne qui a été fortement oblitérée au moment de la mise en place des dunes et des Ergs (Pléistocène). A une échelle plus fine, cette dégradation est aussi remarquable et amène une désorganisation des réseaux hydrographiques qui a pour conséquence de privilégier le stockage des eaux d'écoulement dans la région même de sa production. Cet état actuel de la structure hydrologique se traduit au cours de la saison des pluies par l'apparition de multiples zones de concentration et de stockage des eaux, formant des mares temporaires, ou plus rarement permanentes.

4.2 Carte des unités hydrologique du SSCE (figure 11)

L' esquisse cartographique des unités hydrologiques présentée dans Estèves (1994) pour la zone du SSCE (figure 11) permet d'une part, de rendre compte de la complexité de l'organisation hydrologique de surface et d'autre part, d'appréhender son influence sur la redistribution des eaux pluviales (légende de la carte). En effet, 12 unités hydrologiques sont mises en évidence. Elles se différencient principalement par les processus hydrologiques dominants, la présence ou la fonctionnalité du système de drainage et la nature des zones de concentration et/ou de stockage. Issue d'une analyse conjointe des éléments physiques du milieu (végétation, sol, relief) et de la structure hydrologique existante, cette classification montre, notamment, que la redistribution des eaux de pluie peut s'orienter soit vers une redistribution où l'évapotranspiration est le processus dominant (unité 4,6,7,8 et 11), soit vers une redistribution où

l'évapotranspiration et le drainage interne sont dominants (unité 1,3, 9 10 et 12). En terme de bilan hydrologique ces spécificités fonctionnelles sont essentielles.



Unité	organisation du drainage	Aptitude au ruissellement	redistribution de la pluie à l'échelle saisonnière
1	pas de réseau apparent, mares dans les petites dépressions	faible	évapotranspiration et drainage interne dans les bandes de végétation
2	réseau divergent de ravines	fort	ruissellement et évaporation
3	quelques ravines	faible	évapotranspiration et drainage interne
4	pas de réseau apparent, les écoulements convergent vers les cuvettes	faible	évapotranspiration
5	ravines parallèles ou sub-parallèles	fort	ruissellement et évapotranspiration
6	cours d'eau secs sub-parallèles	faible à modérée	évapotranspiration
7	quelques ravines	faible	évapotranspiration
8	écoulements convergent vers les dépressions	faible	évapotranspiration
9	réseau convergent de ravines	modérée à fort	drainage interne et évapotranspiration
10	écoulements convergent vers les dépressions	faible	évapotranspiration et drainage interne
11	cours d'eau temporaire	modérée	évapotranspiration
12	mares	faible	évapotranspiration et drainage interne

Ech approx : 1/150 000

thalweg secs

zone de concentration de l'eau

mare

ravines actives

Figure 11 : carte des unités hydrologiques du Super Site Central Est (d'après M.Estèves, 1994)

Outre la densité remarquable de zones de concentration des eaux dans le SSCE, on remarquera qu'elles se rencontrent particulièrement dans les unités 1, 6, 9 et 12.

4.3 Régime annuel

D'une manière générale, le régime hydrologique annuel au Sahel est, à l'image du régime pluviométrique, très variable dans le temps et dans l'espace. Il se caractérise, en effet, par des écoulements sporadiques et intermittents. Le premier caractère est principalement la conséquence d'un réseau hydrographique désorganisé (voir paragraphe précèdent), le second est lié à la forte intermittence des événements pluvieux. Les caractéristiques du milieu récepteur (relief, état de surface et humidité du sol) tendent à accentuer l'action violente des précipitations dans la production du ruissellement.

Généralement, les premiers écoulements de surface sont observés dès le début de la saison des pluies et apparaissent ensuite au rythme des averses. La durée de l'écoulement est courte (quelques heures) et limitée à celle de l'événement pluvieux (de 15 minutes à 12 heures).

4.4 La production du ruissellement

Les nombreuses études visant à étudier la production du ruissellement et ses facteurs sous des conditions expérimentales de reproduction des pluies naturelles (Albergel, 1984, Albergel et *al.*, 1986, Chevallier, 1982, 1985) ont montré, notamment dans la zone sahélienne, le rôle prépondérant des Organisations Pelliculaires de Surface (OPS) associées au couvert végétal dans la détermination du ruissellement. Ces nombreuses études ont permis, notamment, d'établir une liaison entre la production de ruissellement (coefficient de ruissellement moyen) et la nature de l'OPS pour des pluies caractéristiques du climat sahélien (Casenave et Valentin, 1989), pour une surface élémentaire de $1m^2$.

Développé par Casenave et Valentin (1989), le concept d'état de surface, défini pour une surface élémentaire, intègre les éléments du milieu tels que le couvert végétal, la surface du sol et les OPS qui ont subi des transformations sous l'effet des facteurs météorologiques, fauniques ou anthropiques.

Dans une optique plus générale de caractérisation hydrologique du degré carré, une cartographie des états de surface a été réalisée (D'Herbès et *al.*, 1992). Les 42 classes d'états de surface identifiées ont été regroupées en 12 classes principales tenant compte des caractéristiques générales dominantes (situation géomorphologique associée au matériau de couverture), l'OPS ou l'encroûtement superficiel dominant, la densité de la végétation et l'utilisation agricole. Sur la portion de carte présentée en figure 2 (zone d'étude des mares), on retrouve la dissociation faite par les pédologues sensus stricto entre les plateaux ferrugineux (classe 2, 3 et 4) et les vallées sableuses que l'on peut ici décomposer en plusieurs classes selon la nature de l'encroûtement (classe 5, 6, 7 et 8).

Quoique sommaires, les indications données par cette classification permettent déjà d'envisager des réponses hydrologiques très diverses selon la situation géomorphologique des surfaces ruisselantes. En effet, à en juger par rapport à la classification faite par Casenave et Valentin (1989) et la faible densité de

végétation, il apparaît que les classes de 1 à 3 pour les plateaux ferrugineux et les classes 5 à 6 pour les vallées sableuses seront des zones privilégiées de production de ruissellement.

4.5 Les coefficients de ruissellement

Dans son étude de synthèse "évaluation de l'écoulement annuel dans le Sahel tropical Africain", Rodier (1975) analyse les résultats des multiples études hydrologiques de l'Orstom effectuées sur de nombreux bassins représentatifs et expérimentaux de l'Afrique occidentale et centrale. De l'analyse de ces bassins versants (superficie, pente, contexte géologique) il ressort que le coefficient d'écoulement, aussi variable que les précipitations dont il dépend, est d'autant plus faible que la superficie du bassin versant est plus grande. Sous une pluviométrie moyenne annuelle de 500 mm, le coefficient annuel est de l'ordre de 15 à 25% pour un bassin versant de quelques hectares et présente une variabilité interannuelle élevée. Dans la zone centrale du degré carré, les bassins versants de superficie supérieure à la dizaine de kilomètres carrés ont un coefficient de ruissellement nul, aucun exutoire fonctionnel n'existe.

5 CONTEXTE HYDROGEOLOGIQUE

5.1 Contexte régional : La nappe du Continental Terminal

Le bassin des Iullumeden sur lequel reposent les séries sédimentaires du Continental Terminal est le siège de trois réservoirs aquifères qui peuvent être confondus ou en liaison hydraulique. Il est composé d'une accumulation de sédiments détritiques datant de la fin Tertiaire.

Les séries du Continental Terminal peuvent contenir trois nappes superposées séparées par des horizons semi-perméables. Elles se dénomment CT1 pour la plus profonde, CT2 pour l'intermédiaire et CT3 pour la plus récente. Selon les endroits, ces nappes peuvent être bien distinctes ou peuvent se confondre. Ainsi au sud du 13°30 N, il semble que le CT2 et le CT3 forment un seul aquifère. Il en est de même en bordure du fleuve Niger en aval de Say où le CT3 et le CT1 sont difficilement séparables.

5.2 Contexte hydrogéologique du degré carré : la nappe phréatique (CT3)

Si les aquifères CT1 et CT2 semblent hydrauliquement peu actives, la nappe superficielle (CT3): est au contraire régulièrement alimentée par les pluies et les volumes y circulant sont nettement plus importants que dans les niveaux sous-jacents. L'épaisseur de ce réservoir varie de quelques mètres en bordure de l'aquifère à quelques dizaines de mètres.

La limite au degré carré (2°/3° Est- 13°/14° Nord) est arbitraire. Néanmoins, à l'intérieur de cette zone on peut distinguer une limite constituée par le fleuve Niger qui déconnecte hydrauliquement l'aquifère de part et d'autre du fleuve. A l'ouest, le Dallol Bosso apparaît comme une zone singulière dans les circulations du CT3 puisque la nappe et presque affleurante sur une vaste surface. La limite du 2° Est correspond à peu près à la bordure du CT3 reposant en biseau plus ou moins épais sur le socle. Au delà de l'extrémité nord du degré carré, l'aquifère se prolonge continûment.

La surface piézométrique (novembre 92-référence NGN) de cette grande partie de l'aquifère CT3 est donnée dans la figure 12. On y distingue deux grands secteurs : la plus grande partie de la nappe, à l'est et au sud, est homogène alors que l'extrémité nord ouest est beaucoup plus tourmentée.

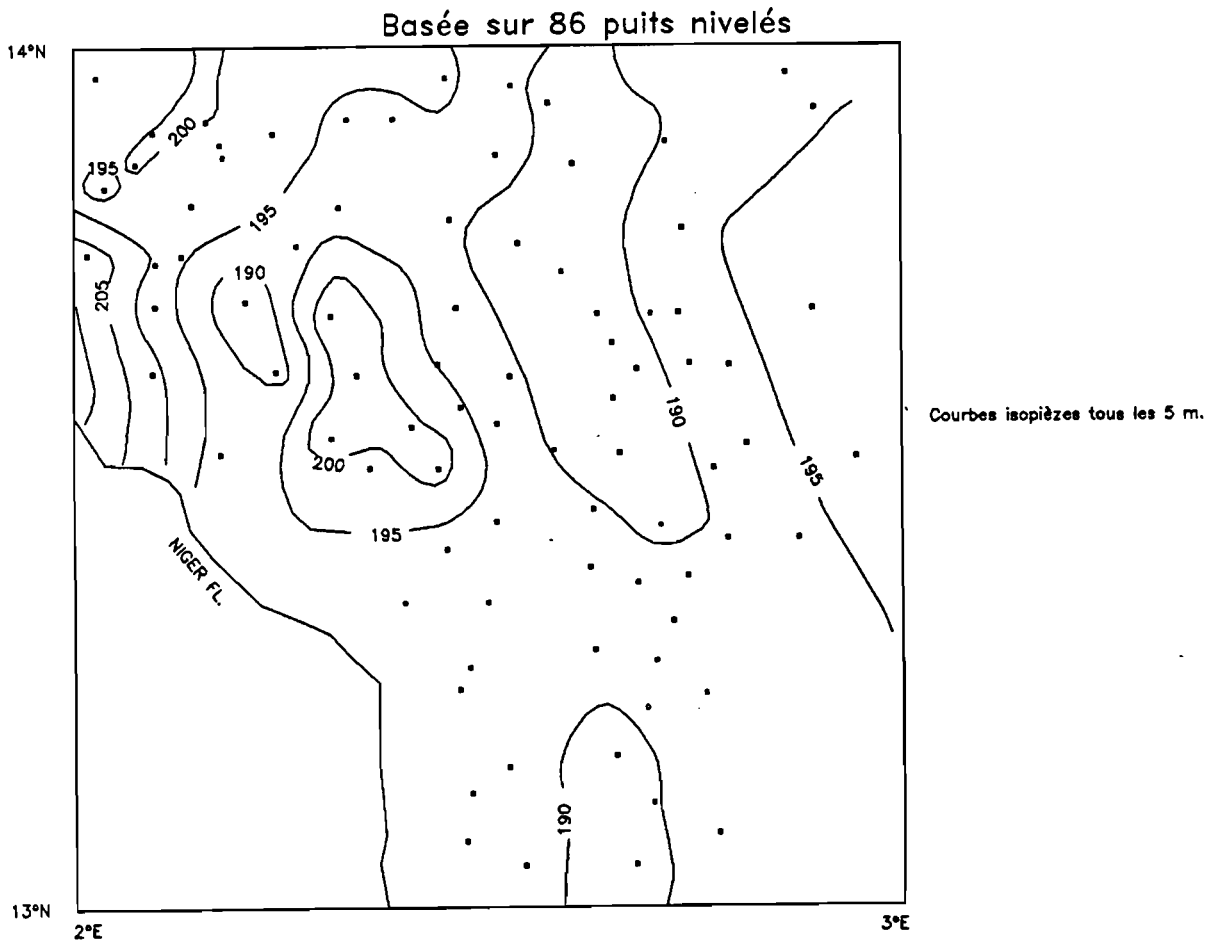


Figure 12 : carte piézométrique du degré carré (Leduc et Lenoir, à paraître). Niveau piézométrique de novembre 1992

La première, dans laquelle est comprise notre secteur d'étude (zone d'étude des mares, voir figure 1), présente des gradients hydrauliques très faibles de l'ordre de $4,10^{-4}$. Les niveaux hauts se situent dans la partie nord du dallol Bosso et les niveaux bas dans une dépression piézométrique apparemment fermée et qui est plus ou moins axée sur le kori de Dantiandou.

La partie nord ouest a une piézométrie très variable. On y trouve les niveaux extrêmes de la nappe (plus de 210 m et moins de 185 m).

Il n'existe pas de direction régionale pour les circulations dans l'aquifère mais un ensemble d'écoulements en tout sens.

CHAPITRE 2

CONSIDERATIONS GENERALES SUR LES MARES ET LEUR BASSIN VERSANT

CHAPITRE 2

CONSIDERATIONS GENERALES SUR LES MARES ET LEUR BASSIN VERSANT

De manière à rendre plus concis les différents exposés présentés dans ce mémoire, nous définissons et caractérisons la mare, l'objet hydrologique sur lequel est basée l'étude. Les notions et les grandeurs qui découlent du système mare-sol-atmosphère sont présentées et définies en détail, quant à leur signification physique et à leur utilisation ultérieure comme descripteur d'un processus.

Nous abordons la notion de bassin endoréique et sa liaison avec celle du bassin versant topographique. A partir des informations bibliographiques et des informations de terrain, une première classification des mares et de leur bassin d'alimentation est proposée. Elle prend principalement en compte leur situation géomorphologique et l'origine présumée de l'endoréisme.

Enfin, les différentes missions aériennes effectuées au cours de cette étude, nous permettent de juger de la diversité des systèmes endoréiques dans le Niger occidental et de comparer les sites sur lesquels s'appuie notre étude.

INTRODUCTION

Mare : (étymologie : marais) petite nappe d'eau peu profonde qui stagne (dictionnaire Robert).

Telle est la définition d'une mare qui peut être rapprochée de celle d'une flaque (petite mare) si l'on ne considère pas un contexte plus large introduisant des notions de durée de stagnation, de superficie, de capacité, d'écologie et de fonctionnement hydrologique. En pays tempéré, la mare est souvent associée à un plan d'eau de faible superficie (en opposition aux étangs et aux lacs) dont les relations avec l'environnement sont réduites à une utilisation domestique : canardière, barbotière (sens voisin de mare). Elle est, en fait, perçue comme un système hydrologique et biologique sans dynamique propre (stagnation de l'eau, peu ou pas de développement de la vie) avec un intérêt limité en gestion de l'eau.

En pays sahélien, elle prend un véritable sens et devient d'un intérêt vital pour les populations rurales et leur bétail au cours de la longue et rude saison sèche. Le terme est généralement utilisé pour désigner des lacs peu profonds et d'étendue réduite qui sont généralement temporaires à l'échelle d'une année. On peut signaler l'ouvrage s'intitulant : Zone humide et lacs peu profonds d'Afrique (Davies and Gasse, 1988), qui fait état des nombreuses études concernant les petits et grands lacs peu profonds en région tropicale africaine, en matière d'hydrologie, d'hydrobiologie et de paléoclimatologie.

Les mares que nous avons étudiées sont le plus facilement repérées par un survol aérien. Immédiatement après un fort événement pluvieux, le survol du paysage à moyenne altitude fait apparaître d'immenses miroirs d'eau qui très rapidement se dissocient en une multitude de petits et grands miroirs pour ne laisser ressortir au bout d'une journée (sans pluie) qu'un ensemble de plans d'eau de superficie suffisamment étendue pour qu'ils soient dissociables du paysage à l'oeil nu (photo 1 planche 1). Ce sont ces nombreux plans d'eau persistants auxquels nous donnerons la dénomination de mare et qui ont, par ailleurs, une signification hydrologique, écologique et sociale dans la région d'étude. En effet, elles ont une forte influence sur la répartition spatiale de la population sédentaire et nomade, et il est courant de constater la présence d'un village à proximité d'un réservoir de stockage naturel. Appelée *bangou* par la population sédentaire Zarma qui l'utilise tout au long de l'année à des fins domestiques et d'alimentation en eau du bétail, la mare devient en saison sèche l'unique ressource superficielle où le bétail vient s'abreuver jusqu'à l'assèchement. Elle peut être aussi utilisée comme support à un élevage piscicole ou à l'implantation de vergers et/ou de culture de contre saison (mare de vallée sableuse uniquement).

1 LA MARE

1.1 Définition de la notion de mare dans notre étude

Sens hydrologique

C'est un réservoir naturel de stockage d'eau. Les eaux qu'il concentre et stocke sont issues de l'écoulement des eaux pluviales d'un bassin d'alimentation ou d'un ensemble de bassins dont la mare est le principal exutoire. Cet apport se fait sous forme d'un écoulement de surface par l'intermédiaire de chenaux de ruissellement et/ou d'un ruissellement diffus de surface. De ce fait, son existence est effective au cours de l'intense saison des pluies (3 à 4 mois en moyenne) et arrive à son terme (assèchement) seulement quelques semaines après l'arrêt des précipitations (novembre ou décembre). La mare est principalement soumise à des pertes engendrées par son environnement naturel (atmosphérique, phytologique et pédologique) et dans une plus forte proportion par le bétail en saison sèche.

Au cours de la saison des pluies, son régime est caractérisé par une alternance rapide de phase de remplissage de faible durée, quelques minutes à quelques heures, et de phase vidange de durée très variable, quelques heures à quelques dizaines de jours (figure 13).

L'origine du réservoir est naturelle ou a été légèrement modifiée par l'homme (fosses à banko). Le site des mares est caractérisé par une pédologie et une écologie propres.

sens pédologique

En terme de pédologie, la mare peut être définie comme la surface sur laquelle s'étendent des dépôts fins issus de la sédimentation des eaux pluviales et qui sont en discordance avec les matériaux autochtones. Leur assimilation au sol autochtone et leur épaisseur verticale fait état de la durée d'existence de cette surface comme lieu de stockage.

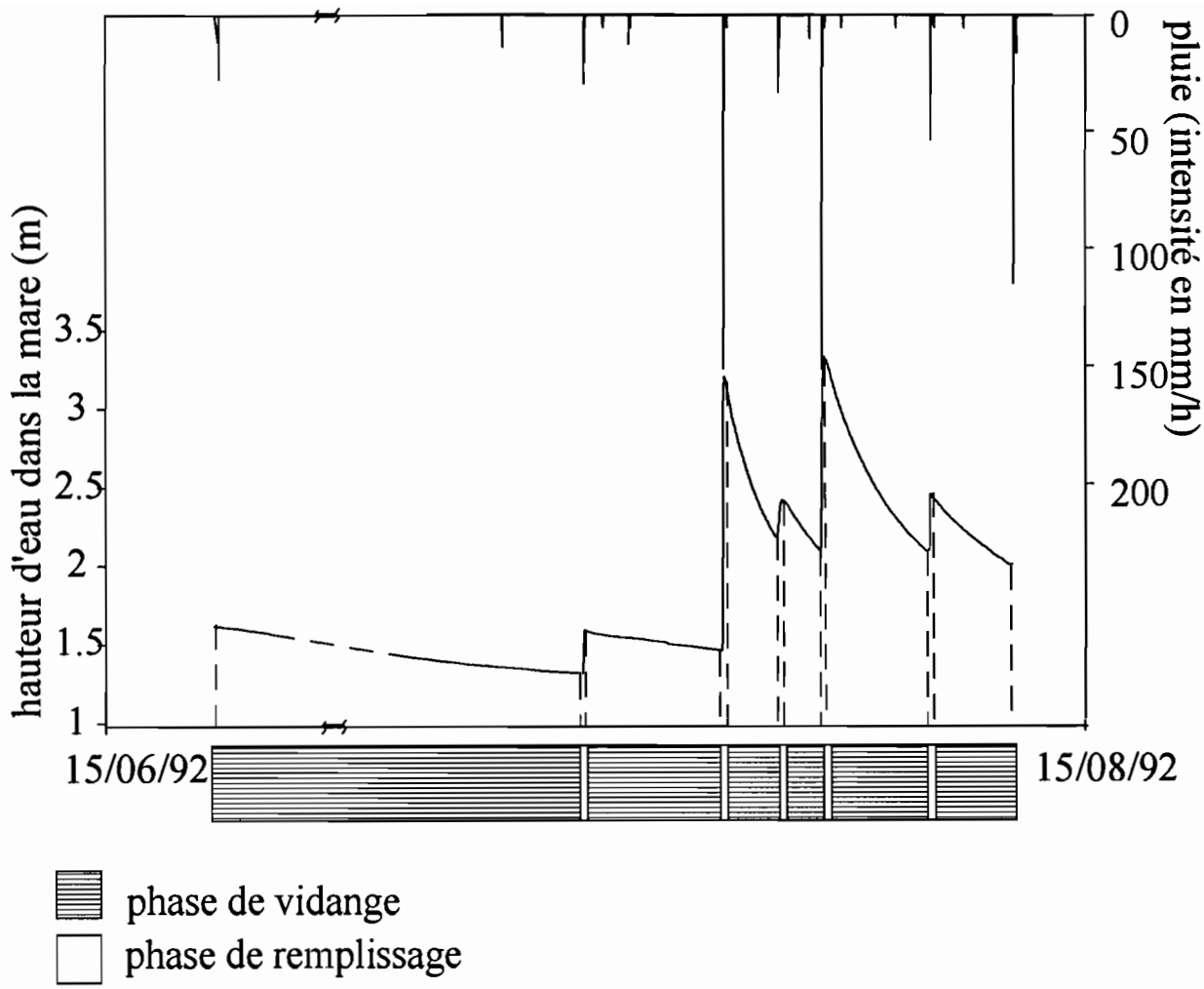


Figure 13 : limnigramme partiel d'une mare, distinction des phases de remplissage et des phases de vidange (intensité de la pluie en mm/h).

sens écologique

La mare peut être définie comme un milieu où les conditions d'humidité et d'inondation ont amené l'apparition d'un écosystème se différenciant de l'écosystème régional par une composition floristique et une dynamique propres à ce milieu. Pour plus de détails, on se reportera au paragraphe 3.4 du premier chapitre traitant de la composition et de la dynamique de la végétation autour de deux mares.

1.2 Caractéristiques générales des mares étudiées

Comme nous le verrons plus précisément dans le chapitre 4 (présentation des sites de référence), les caractéristiques physiques ou morphométriques des mares étudiées sont en étroites relations avec leur environnement. Le tableau 3 récapitule les caractéristiques générales des mares de la région d'étude.

Tableau 3 : caractéristiques générales des mares de la région d'étude selon la situation géomorphologique

situation géomorphologique	contexte pédologique	morphologie	profondeur*	superficie du plan d'eau*	capacité volumique*
plateau à cuirasse ferrugineuse	sol brun argileux ou lithosol	plate peu étendue	< 1.5 m	0.5 à 3 Ha	< 20 000 m^3
bas-fond de vallée (cours d'eau)	sol sableux blanc profond	encaissée et longue	2 et 4 m	2 à 5Ha	< 50 000 m^3
bas fond de vallée fermée	sol sableux brun rouge profond	plate et étendue	< 2m	1 à 30 Ha	5000 à 300 000 m^3

** par rapport à l'inventaire et aux observations effectués sur la zone d'étude au cours des années 1991 à 1993*

1.3 Relation du réservoir avec son environnement naturel

Le contexte hydrologique du système Mare-Sol-Atmosphère est schématisé sur figure 14. L'étude du milieu écologique (Bangré, 1992; Soumana, 1992; D'Herbès, 1992; Boulet et Nascimento, 1991) et l'étude hydrologique (Desconnets et Taupin, 1993; Desconnets et al, 1993; Leduc et Desconnets, 1994a et b) ont montré que quatre composantes sont essentielles :

- l'évaporation directe,
- le stockage d'eau dans la zone non saturée,
- l'infiltration profonde et,
- la consommation en eau par le bétail durant la saison sèche.

Le ruissellement de surface est le principal apport à la mare et se fait essentiellement par le ou les drains du bassin versant. Le ruissellement issu des versants de la mare est négligeable. Les précipitations tombant sur le plan d'eau, elles aussi, ne représentent souvent qu'une participation minime au remplissage de la mare.

Les apports par déversement d'une mare dans une autre sont envisageables pour les mares situées dans les cours d'eau. De manière plus synthétique, le tableau 4 présente le degré d'importance de chacune des composantes hydrologiques du bilan selon la situation géomorphologique de la mare, tel qu'il a pu être évalué à partir des mares sélectionnées pour notre étude.

1.3.1 Nature des processus d'apports et de pertes

Les différents processus d'apports et de pertes identifiés dans le système Mare-Sol-Atmosphère ont des caractéristiques très différentes. L'appréhension quantitative de ces processus est rarement possible par une mesure directe. Lorsqu'elle est possible, elle n'en demeure pas moins une estimation qui devra être critiquée.

Le tableau 5 donne une vue succincte de la nature, la variabilité et l'appréhension possible des différents processus hydrologiques intervenant dans le système.

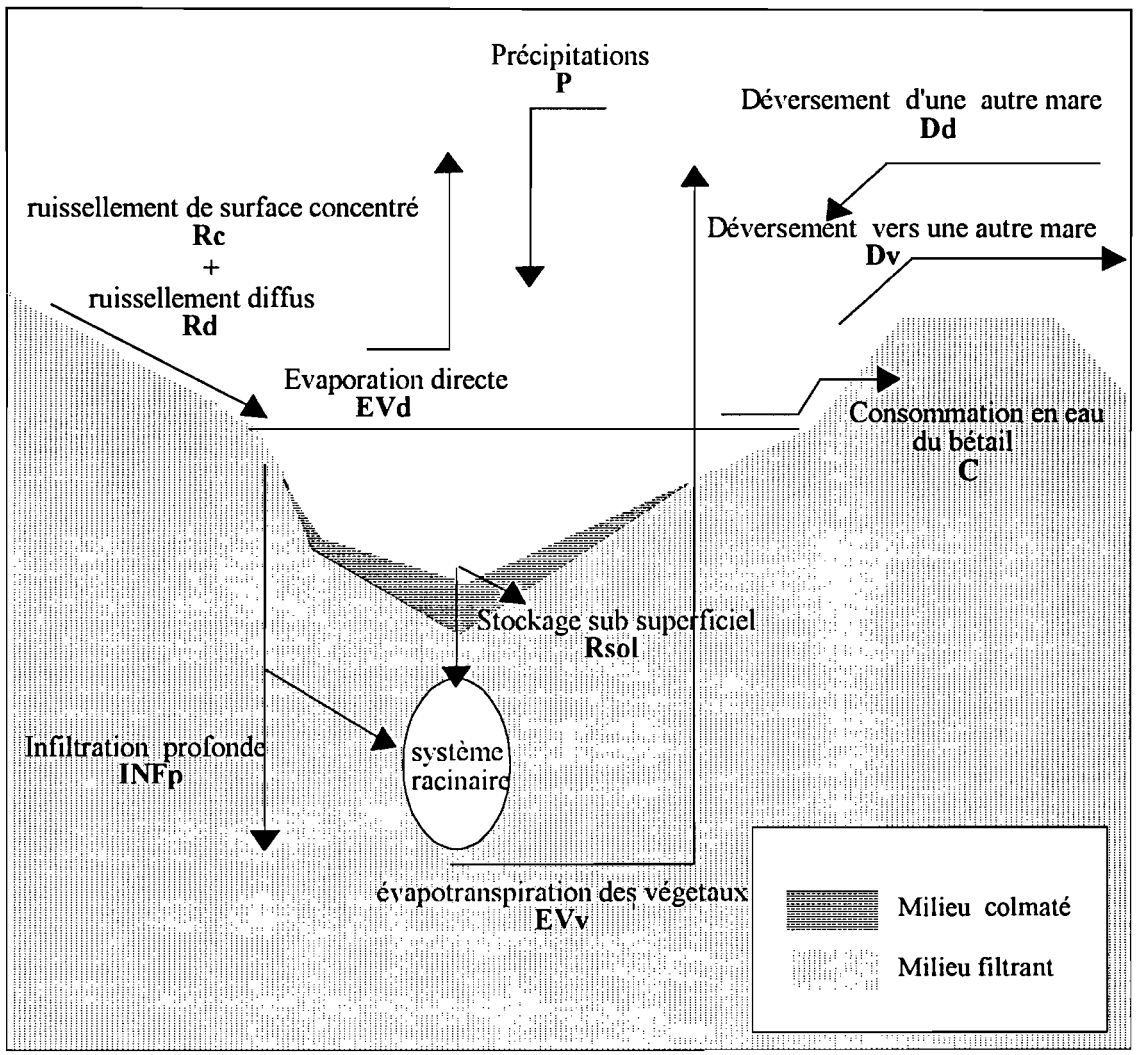


Figure 14 : le système Mare-Sol-Atmosphère et ses principales composantes hydrologiques

Tableau 4 : degré d'importance des composantes du bilan hydrologique de la mare.

		Terme	mare de plateau	mare de cours d'eau	mare de vallée fermée
Apports	Rc	ruissellement concentré			
	Rd	ruissellement diffus			
	P	précipitations directes			
	Dd	déversement dans la mare			
	Infp	infiltration profonde			
Pertes	Evd	évaporation directe			
	St sol	stock d'eau du sol			
	Dv	déversement vers une mare			
	C	consommation en eau du bétail			

principal

non négligable

négligable

Tableau 5 : nature, variabilité et appréhension des processus d'apports et de pertes.

		processus	caractéristique temporelle du processus	appréhension
Apports	R	ruissellement	discontinu	mesure directe
	P	précipitations	discontinu	mesure directe
Pertes	Infp	infiltration profonde	continu	estimation indirecte
	Evd	évaporation directe	continu	estimation indirecte
	St_{sol}	stock d'eau du sol	continu	estimation indirecte
	C	consommation en eau du bétail	discontinu	estimation indirecte

1.3.2 Equation du bilan hydrologique dans le système Mare-Sol-Atmosphère

L'équation du bilan d'un réservoir naturel peut s'écrire :

$$\Delta S = Apports - Pertes \qquad (1)$$

Les apports peuvent être décomposés comme suit :

$$Apports = R_c + R_d + P_r + D_d \qquad (2)$$

avec

R_c : le ruissellement concentré de surface venant d'un ou des drains du bassin versant de la mare,

R_d : le ruissellement diffus de surface provenant de l'impluvium creé par les versants du bassin directement en contact avec le plan d'eau. On prendra R comme le ruissellement total arrivant à la mare,

P_r : les précipitations reçues par le plan d'eau,

D_d : le déversement d'une autre mare ou l'évacuation d'eau de forage,

Les pertes peuvent être décomposées comme suit :

$$Pertes = Evd + Inf + C + Dv \qquad (3)$$

avec

Ev_d :la reprise évaporatoire directe à partir du miroir d'eau

D_v : le déversement de la mare à l'extérieur de sa cuvette (dans un cours d'eau ou vers une autre mare)

C : la consommation en eau du bétail

Inf : l'infiltration verticale et/ou latérale qui peut être elle même décomposer :

$$Inf = Infp + \Delta Stsol \qquad (4)$$

avec

Inf_p : l'infiltration profonde vers la nappe

ΔSt_{sol} : l'alimentation du stock en eau du sol qui pourra être repris soit par les végétaux (évapotranspiration) ou directement évaporé (couches superficielles du sol), ce terme peut s'écrire :

$$\Delta St\ sol = Evv + Evd' + \Delta Rsol \qquad (5)$$

avec :

Ev_v évapotranspiration des végétaux

$Ev_{d'}$: évaporation directe du stock d'eau superficiel

R_{sol} : la réserve en eau du sol.

Le développement de tous les termes donne l'équation finale suivante :

$$DS = [Rc + Rd + Pr + Dd] - [Infp + Evv + Evd' + Rsol + C + Dv] \qquad (6)$$

Adaptation de l'équation du bilan d'après les tableaux 4 et 5

Pour une période remplissage - vidange, nous pouvons exprimer l'équation du bilan de la manière suivante :

$$\Delta S = R - [Evd + Inf] \qquad (7)$$

où le terme Inf au cours du déstockage strict est la perte de volume non expliquée par l'évaporation directe, qui est alors égal à

$$Inf = \Delta S - Evd. \qquad (8)$$

Pour une saison des pluies, le terme $Inf = \Delta S - Ev_d$ peut être explicité de différentes manières suivant le type de mare :

- pour les mares de plateau, il sera explicité par :

$$\Delta S - Evd = \Delta Rsol + C + Evv + Evd' \qquad (9)$$

- pour les mares de cours d'eau :

$$\Delta S - Evd = Infp + \Delta Rsol + Evd' + Evv \qquad (10)$$

- pour les mares de vallée fermée :

$$\Delta S - Evd = Infp + \Delta Rsol \qquad (11)$$

1.3.3 Quelques définitions

Les définitions suivantes sont illustrées par la figure 15.

- Un **épisode de remplissage** correspond à la variation positive du niveau d'eau dans la mare qui est provoquée par l'arrivée du ruissellement de surface des eaux pluviales (2). Sur le limnigramme, il est délimité par les points singuliers Hr_{min} et Hr_{max} du limnigramme (figure 15) aux temps Tr_1 et Tr_2. On peut en déduire :

$$\begin{aligned} \Delta Hr &= Hr_{max} - Hr_{min} \text{ et} \\ \Delta Vr &= V(Hr_{max}) - V(Hr_{min}) \end{aligned} \qquad (12)$$

avec

ΔHr variation totale de niveau de l'épisode de remplissage en mètres
Hr_{min} niveau initial de l'épisode de remplissage en mètres
Hr_{max} niveau final de l'épisode de remplissage en mètres
ΔVr variation totale de volume de l'épisode de remplissage en m^3
$V(Hr_{min})$ volume initial de l'épisode de remplissage en m^3
$V(Hr_{max})$ volume final de l'épisode de remplissage en m^3

- Un **épisode de vidange** correspond à la variation négative du niveau de la mare qui est la résultante de l'ensemble des processus de pertes (x). Sur le limnigramme, il est délimité par les points singuliers Hv_{min} et Hv_{max} du limnigramme (figure 15) aux temps Tv_1 et Tv_2. On peut en déduire :

$$\begin{aligned} \Delta Hv &= Hv_{max} - Hv_{min} \text{ et} \\ \Delta Vv &= V(Hv_{max}) - V(Hv_{min}) \end{aligned} \qquad (13)$$

avec

ΔHv variation totale de niveau de l'épisode de vidange en mètres
Hv_{max} niveau final de l'épisode de vidange en mètres
Hv_{min} niveau initial de l'épisode de vidange en mètres
ΔVv variation totale de volume de l'épisode de vidange en m^3
$V(Hv_{max})$ volume final de l'épisode de vidange en m^3
$V(Hv_{min})$ volume initial de l'épisode de vidange en m^3

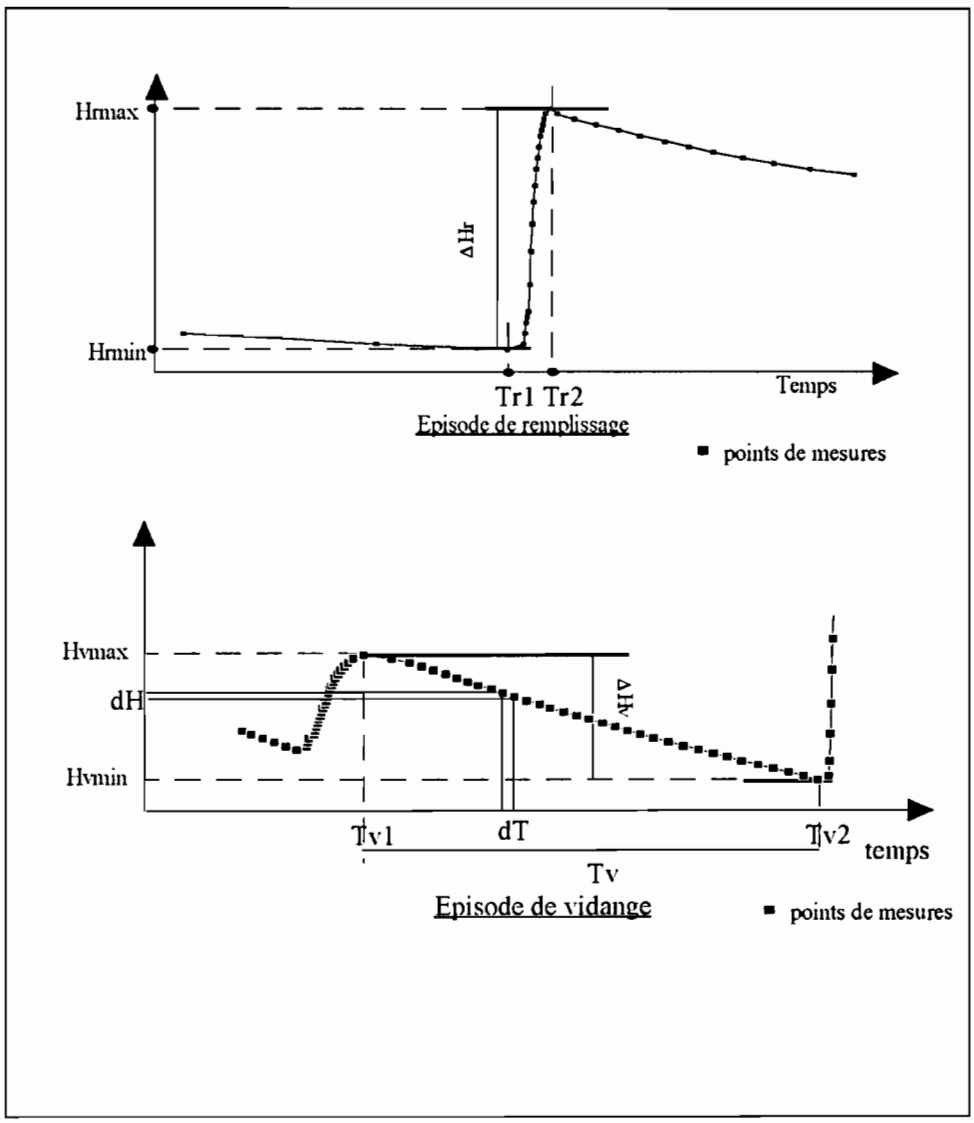


Figure 15 : les variables liées à l'épisode de remplissage et à l'épisode de vidange

- Est appelé **intensité de vidange moyenne** I_{vm} pour un épisode de vidange donné, le rapport entre la variation de niveau ou amplitude totale Hv observée durant cet épisode et la durée de cet épisode Tv (figure 15). Il s'écrit :

$$I_{vm} = \frac{\Delta Hv}{Tv} \qquad (14)$$

avec

I_{vm} l'intensité de vidange moyenne d'un épisode en m/j ou cm/j ou mm/j

Tv durée de l'épisode en jours

Ce rapport peut être assimilé à la capacité d'infiltration moyenne, donnée comme étant le rapport de la lame totale infiltrée F à au temps total T (Singh, 1989).

- **L'intensité de vidange instantanée** I_{vi} est le rapport entre la variation de niveau élémentaire dH et le temps nécessaire à cette variation dT (figure 15). La variation élémentaire dH est égale à 1 cm qui correspond à la plus petite variation enregistrable par le capteur limnimétrique. Il s'écrit :

$$I_{vi} = \frac{dH}{dT} \qquad (15)$$

avec

I_{vi} l'intensité de vidange instantanée en m/j ou cm/j ou mm/j

dH variation du niveau entre deux mesures limnimétriques h1 et h2 en mètres

dT intervalle de temps en jours

Ainsi, l'intensité **de vidange initiale** caractérisera les premières heures d'un épisode de vidange et l'intensité **de vidange finale** les dernières heures.

Signification de l'intensité de vidange instantanée: le terme dH du rapport $\frac{dH}{dT}$ peut être décomposé en deux parties : l'évaporation directe et l'infiltration vers les niveaux inférieurs. Lorsque le terme évaporation est négligeable devant le terme d'infiltration alors I_{vi} pourra être comparé à un taux d'infiltration f ou infiltrabilité.

Le **taux d'évaporation moyen** t_{epm} est le rapport entre une évaporation moyenne journalière d'une surface d'eau libre et l'intensité de vidange moyenne pour un épisode de vidange donné. Il est exprimé en %. Il s'écrit :

$$t_{epm} = \frac{E_m}{t_{vm}} \qquad (16)$$

avec

t_{epm} taux d'évaporation moyen d'un épisode en %

E_m évaporation moyenne journalière en mm/j

t_{vm} intensité de vidange moyenne de l'épisode considéré en mm/j

Remarque : l'évaporation moyenne journalière des mois d'hivernage (juin, juillet, août et septembre) d'une surface d'eau libre est estimée à partir des lames évaporées moyennes journalières du bac de classe A corrigées (voir chapitre 2.4). Elle est égale à 5,6 mm/j (écart type de 0,68).

- De la même manière que l'on a défini une intensité de vidange instantanée, on peut définir un **taux d'évaporation instantané** t_{epi} qui est le rapport de l'évaporation moyenne sur l'intensité de vidange instantanée. Il s'écrit :

$$t_{epi} = \frac{E_m}{t_{vi}} \qquad (17)$$

avec

t_{epi} taux d'évaporation instantané au cours d'un épisode en %

E_m évaporation moyenne journalière en mm/j

t_{vi} intensité de vidange instantanée au cours de l'intervalle de temps considéré en mm/j

Remarque sur la détermination du passage de l'épisode de remplissage à l'épisode de vidange

La détermination du passage d'un épisode de vidange à un épisode de remplissage se fait par une approximation graphique. Elle est estimée par un point singulier du limnigramme (niveau minimal ou maximal d'une séquence remplissage-vidange).

En réalité, le passage d'un épisode de vidange à un épisode de remplissage est le changement de signe de la variation du niveau où la dérivée $\frac{dH}{dT} = 0$, considérant H(t) comme une fonction continue.

En terme de processus, cela signifie qu'aux abords de $\frac{dH}{dT} = 0$ le régime de la mare a une composante de vidange et de remplissage qui s'équilibre à $\frac{dH}{dT} = 0$. Ce point peut être déterminé par la représentation de la fonction H(t) par le limnigramme qui n'est autre qu'un échantillonnage de cette fonction. Pratiquement, cette approximation graphique semble satisfaisante car les écoulements de surface qui induisent le remplissage de la mare sont violents (fort débit) et limités dans le temps à quelques heures. Ainsi l'estimation des apports et des pertes, qui découle de cette détermination, ne sera que faiblement biaisée.

2 LE BASSIN ENDOREIQUE

Comme le montre l'esquisse cartographique des unités hydrologiques (figure11), il est difficile de parler de drainage hierarchisé des surfaces et d'aborder l'hydrologie à l'échelle du bassin versant (Lebel, 1990b). Dans un tel contexte, l'unité hydrologique peut être définie comme une entité spatio-temporelle qui par ses caractéristiques environnementales et leur évolution (état de surface, contexte pédologique de sub surface, relief et végétation) donne la prédominance à un type de redistribution de l'eau. Les systèmes hydrologiques fermés qui ont comme exutoire une mare identifiable au sens défini dans le paragraphe 1.3.1 représentent le plus grand nombre de systèmes hydrologiques existants dans cette région.

Il est délicat d'estimer la superficie effectivement drainée par les mares sur notre zone d'étude. Complexe autant par la multitude des petits bassins qui s'imbriquent les uns dans les autres à des fines échelles d'espace (de l'ordre de l'hectare) que par l'évolution temporelle de la structure hydrologique (rapide, discontinue), cette estimation ne peut être que grossière. De plus, elle ne serait valable qu'à un instant donné.

Dans une première approche, le bassin endoréique correspond au bassin topographique d'alimentation de la mare ou bassin versant. Les caractérisations et considérations liées aux analyses du milieu et aux interprétations des bilans seront faites à partir de cette entité spatiale et altimétrique. En réalité, et nous l'aborderons par quelques exemples, l'entité topographique peut ne pas être dans certain cas l'entité hydrologique en liaison avec la mare. La déconnexion des réseaux de drainage à l'échelle des versants et la présence d'un fort micro relief dunaire par exemple empêchent de retrouver selon les conditions de pluies et

d'humidité, les mêmes conditions de redistribution et/ou de stockage de surface. Elles ont souvent pour effet la multiplication des lieux de stockage et/ou la création d'un exutoire intermédiaire entre l'impluvium et l'exutoire principal. La mare n'est alors qu'un des exutoires de son bassin versant (notion topographique).

2.1 La structure hydrologique actuelle de la zone d'étude

En rapport avec la structure morphologique actuelle du paysage (héritée d'une évolution climatique ancienne) et les considérations sur la géodynamique énoncées brièvement dans le paragraphe 3.1 du premier chapitre, la division de la structure hydrologique en une multitude de bassins endoréiques a deux grandes origines.

Origine ancienne et structurale : les plateaux à cuirasse ferrugineuse

Concernant les bassins endoréiques situés sur les plateaux à cuirasse ferrugineuse, on pourra parler d'un héritage de la transformation ancienne du paysage. Leur position sommitale fait de ces reliefs tabulaires un ensemble hydrologiquement déconnecté du reste du paysage. Au sein de cet ensemble et accentué par la distribution particulière de la végétation (brousse tigrée), le faible relief (pente générale inférieure à 1 ‰) est à l'origine de l'absence d'organisation hydrologique en réseau qui individualise ainsi les sous-ensembles hydrologiques (photo 2 planche 1). Cette organisation hydrologique en petits bassins endoréiques de quelques hectares semble figée à l'échelle d'une vie d'homme.

Origine récente : la dégradation du réseau hydrographique

Concernant les bassins endoréiques situés dans les vallées sableuses, leur origine est à mettre en parallèle avec ce qui est communément appelé dans la littérature la dégradation du réseau hydrographique. Nous considérerons ici deux niveaux de dégradation du réseau hydrographique.

Le premier niveau correspond à la dégradation hydrographique interne d'un petit bassin versant (plusieurs dizaines de kilomètres carrés) qui a pour conséquence la division de cette entité en plusieurs réseaux de drainage déconnectés les uns des autres. Ainsi, il apparaît dans le paysage des entités morphologiques bien individualisées et caractéristiques que l'on peut appeler "vallée fermée" ou "cuvette" (photo 3 planche 1).

L'examen de quelques unes de ces cuvettes semblerait indiquer que cette individualisation est souvent liée à des comblements sableux du réseau principal de drainage qui auraient des origines diverses, éoliennes et colluviales (Courel, 1974). Par contre, de tels bassins au coeur même du relief tabulaire (bassin endoréique de Massi Koubou et quelques bassins au nord de la zone d'étude) ne peuvent pas être produits par de telles transformations. Lenoir (communication personnelle) interprètre cela comme le résultat d'une intense érosion géochimique locale.

Le deuxième niveau correspond à la dégradation partielle de l'ancien réseau hydrographique régional (drainant des superficies de plusieurs centaines kilomètres carrés à quelques milliers de kilomètres carrés : Kori de Ouallam, Kori de Dantiandou photo 4 et 5 planche 1). Cette dégradation qui peut être schématisée par l'ensablement localisé (dépôts des transports solides à la jonction du drain et du collecteur photo 6 planche 1) ou/et généralisé (effacement de la pente du lit par apports sableux éoliens et colluviaux) des

principaux collecteurs, a pour conséquence de rendre inefficace la fonction de transfert de ces collecteurs et de les réduire à un chapelet de mares au cours de la saison des pluies.

A l'inverse des autres endoréismes, ils peuvent paraître réversibles si l'on imagine des conditions pluviométriques exceptionnelles provoquant le débordement des mares au delà des seuils sableux et réunifiant ainsi le collecteur. Enfin les observations faites à l'échelle d'une année montre que cet état des lits de rivière est un équilibre morphologique fragile et peut être transformé localement et rapidement suite à des pluies très érosives.

Autant par l'origine de leur formation que par leurs caractéristiques morphologiques, hydrographiques (compacité, dénivelée totale, présence et nature du réseau hydrographique interne) et pédologiques (que nous détaillerons ultérieurement), il semble opportun de distinguer trois grands types de bassins endoréiques associés aux mares précédemment définies :

- des bassins endoréiques structuraux ou **bassins endoréiques de plateau à cuirasse ferrugineuse** (bassin de plateau)
- **des bassins endoréiques de vallées sableuses "verrouillées"** et en forme de "cuvette" (bassin de vallée type 1)
- **des bassins endoréiques de vallées sableuses issus de la dégradation des collecteurs** (bassin de vallée type 2)

2.2 Caractéristiques générales des bassins endoréiques

Les tableaux 6 et 7 récapitulent le contexte général et donnent quelques caractéristiques physiques des trois types de bassins identifiés dans notre région d'étude. La description détaillée de ces bassins sera présentée dans le chapitre 4.

Tableau 6 : quelques caractéristiques générales des trois grands types de bassins endoréiques

type d'endoréisme	dénivelée totale	compacité	superficie	réseau hydrographique
système de plateau	faible < 2 m	compact	dizaines Ha	inexistant ou peu développé
système de vallée 1	élevée >10 m	compact	centaines d'Ha	existant et moy. développé, dégradé
système de vallée 2	élevée >10 m	allongé	centaines d'Ha à plusieurs Km²	existant et moy. développé, dégradé

Tableau 7 : contexte général des trois types d'endoréismes

type d'endoréisme	situation géomorphologique (d'après Nagumo, 1992)	principale organisation pédologique (d'après Nagumo, 1992)	occupation des sols (d'après Courrault et *al.*, 1990)	OPS dominant (d'après d'Herbes et *al.*, 1992)
système de plateau	plateau Tertiaire	sol brun argileux ou lithosol	brousse tigrée	croûte grossière et érosion décantation
système de vallée 1	piémont/glacis sableux	sol sableux brun rouge profond	jachères/cultures mil	croûte structurale et érosion
système de vallée 2	piémont/glacis/bas fond alluvial	sol sableux brun rouge et sol sableux blanc profond	jachères/culture mil	croûte structurale et érosion

2.3 Les systèmes rencontrés au nord et à l'ouest de la zone d'étude

La zone d'étude des mares se situe dans la partie centrale du degré carré qui se caractérise par des vallées sableuses relativement étroites, peu étendues et délimitées par les plateaux à cuirasse ferrugineuse. Le nord du degré carré diffère légèrement de cette dernière par la présence de systèmes dunaires nettement plus étendus et des vallées plus vastes. Cet environnement à dominante sableuse et qui reste faiblement pentu, est organisé en système endoréique de superficie nettement plus élevée dont les exutoires, proportionnellement à leur bassin d'alimentation, ne sont plus du même ordre de grandeur que les mares étudiées dans l'expérience HAPEX-Sahel. Par contre, le fonctionnement hydrologique de ces systèmes reste équivalent, tout au moins en surface où la mare reste l'exutoire principal des eaux pluviales. On pourra citer notamment les mares dans la région de Tillabéry (environ 100 km au nord de Niamey), présentée en photo 7 planche 2, qui ont été notamment étudiées par Monier (1991) et Puech (1993).

Nous présentons en photo 8, 9 planche 2, une vue partielle de deux systèmes endoréiques et de leur exutoire principal situé prés de la limite nord du degré carré.

La deuxième grande région hydrologique et géomorphologique du degré carré est celle du Dallol Bosso, ancienne vallée fossile, s'étendant de l'Aïr jusqu'au sud du Niger. Se distinguant par son étendue géographique et ses spécificités structurales morphologiques, géologiques et hydrogéologiques, la vallée du Dallol Bosso est une zone peu comparable à notre zone d'étude. C'est aussi un milieu où l'hydrologie de surface s'organise autour des mares. Comme le fait remarquer Chaperon (1970) l'affleurement de la nappe en saison des pluies et le fonctionnement hydrologique des zones de stockage sont ici sous la dépendance du niveau de l'aquifère. D'autre part et comme on peut le distinguer sur les photos 10 et 11 planche 2, ces mares sont organisées parallèlement à l'axe de la vallée profitant des discontinuités géologiques présentes. Plus au nord, on retrouve des mares semblables à celles étudiées dans HAPEX-Sahel mais dont la superficie est souvent plus proche de la centaine d'hectares que de l'hectare.

Photo1 : Panorama d'une partie de la zone d'étude

Photo 2 : vue aérienne d'un système endoréique situé sur un plateau à cuirasse ferrugineuse .

Photo 3 : ***vue aérienne d'un système endoréique de vallée sableuse issu de la dégradation des collecteurs régionaux***

Photo 4 : ***vue aérienne d'un système endoréique de vallée sableuse "verrouillée". On distingue au centre de la photo le lit assèché de la mare***

Photo 5 : *vue aérienne de deux collecteurs dégradés présentant une succession de mare dans le Kori de Ouallam*

Photo 6 : *vue partielle d'un système endoréique au nord de la zone d'étude.*

CHAPITRE 3

METHODES D'ETUDES

CHAPITRE 3

LES METHODES D'ETUDES

Nous avons choisi de limiter notre étude à une zone de 600 km², appelée "zone d'étude des mares" et qui inclut le Super Site Central Est. Encadrant largement la période d'observation intense de l'expérience HAPEX-Sahel, cette étude a consisté en un suivi d'une dizaine de mares localisées dans les différentes unités géomorphologiques du paysage. Sur cet ensemble de mares suivies, trois d'entre elles sont prises comme référence géomorphologique. Le deuxième ensemble, les mares témoins, serviront à la validation et l'extension spatiale du bilan hydrologique.

Basé sur le suivi limnimétrique des plans d'eau, le dispositif expérimental est complété par un suivi chimique, isotopique et des mesures d'évaporation sur bac Colorado. L'ensemble des mares étudiées, et en particulier les mares de référence ont fait l'objet d'une caractérisation pédologique et écologique. Enfin, des collaborations au sein de l'expérience HAPEX-Sahel ont conduit à mettre en place des dispositifs permettant le suivi de la redistribution de l'eau à partir de la mare ainsi que l'étude de la recharge locale de la nappe. .

1 APPROCHE METHODOLOGIQUE

Deux échelles d'étude ont été choisies.

Le premier niveau d'étude est celui de la mare et du bassin endoréique où l'on a particulièrement privilégié l'étude détaillée du fonctionnement hydrologique de la zone de stockage et de son environnement. Cette première approche a nécessité le choix de plusieurs mares "échantillons", regroupées en deux ensembles : les mares de référence et les mares témoins (Ces termes seront explicités dans la section 1.3).

Le deuxième niveau d'étude correspond à une zone géographique de 600 km², choisie au préalable pour ses caractères géomorphologiques et pour inclure le SSCE, et appelée "zone de suivi des mares". Elle doit être le support de l'extension spatiale des observations effectuées au premier niveau d'étude pour permettre l'estimation du bilan hydrologique de l'ensemble des bassins endoréiques.

1.1 Zone d'étude

La connaissance des milieux de stockage temporaire dans cette région et, plus généralement dans l'ensemble du Sahel n'a suscité jusqu'à ce jour qu'un faible intérêt. Notre étude, initiée en 1991, revêt de

ce fait un caractère exploratoire et il a fallu l'adapter progressivement, notamment en ce qui concerne le choix et le nombre des sites d'étude.

Nous avons choisi dans un premier temps un secteur nettement moins étendu que l'ensemble du degré carré mais respectant néanmoins, d'un point de vue géomorphologique, l'homogénéité et la représentativité des deux tiers du degré carré.

Ce secteur couvre une surface de 20 kilomètres par 30 kilomètres (13°29.21' - 13°40.0' N en latitude et 2°33.33' - 2°50.0 E en longitude), incluant le SuperSite Central Est et une partie du SuperSite Central Ouest (figure 16). Un site d'étude est extérieur à ce secteur : la mare de Massi Koubou ayant les coordonnées suivantes : 13°50.31' N - 2°24.56' (NW du secteur de suivi des mares)

Des vols de reconnaissance ont permis de repérer et d'identifier la plupart des bassins endoréiques et leur zone de stockage. A posteriori, il s'est avéré qu'un grand nombre de zones de stockage temporaire n'ont pu être inventoriées par ces vols de reconnaissance, leur vidange presque totale s'effectuant en quelques jours. Des observations répétées sur le terrain ont permis de repérer ces sites. Au total c'est une soixantaine de mares qui ont été inventoriées à l'intérieur du secteur d'étude. Cet inventaire est présenté en annexe 1, tableau A11.

1.2 Période de l'étude

L'étude précise des mécanismes qui régissent le remplissage et la vidange des différents types de zone de stockage nous a amenés à sélectionner des sites "échantillons".

Par le caractère sporadique et concentré sur une courte période de l'année des écoulements de surface dans cette région, leur analyse nécessite des observations intensives. En outre, la forte variabilité annuelle des précipitations pourrait donner un sens aléatoire à des observations faites sur une seule saison des pluies. Aussi, la réalisation de plusieurs campagnes d'observations pour évaluer de manière satisfaisante les phénomènes de surface et leur variabilité s'est avérée nécessaire.

L'étude s'est déroulée sur trois années (1991-1993). Les observations se concentrent du mois de juin au mois d'octobre. La première année de mesures a été ciblée sur les mesures de variations de niveaux par limnigraphie dans quatre mares "échantillons" et sur le suivi géochimique de trois d'entre elles à partir du mois d'août jusqu'à l'assèchement des mares. Des observations du milieu telle que l'étude des sols du bassin versant et de la végétation, ont été menées en parallèle. Ces observations visaient essentiellement à mettre en rapport les caractéristiques écologiques de chaque site choisi avec leur comportement hydrologique.

1.3 Mare de référence et mare témoin

Les mares instrumentées au cours de la période d'étude sont au nombre de 15, mais trois d'entre elles n'ont été suivies que partiellement pour diverses raisons. Parmi les 12 mares restant, on distingue 3 mares de référence et 9 mares témoins.

<u>Les mares de référence</u>. Au nombre de trois, elles représentent la variété des mares identifiées dans le secteur d'étude, et d'une manière générale dans le degré carré (Dallol Bosso mis à part).

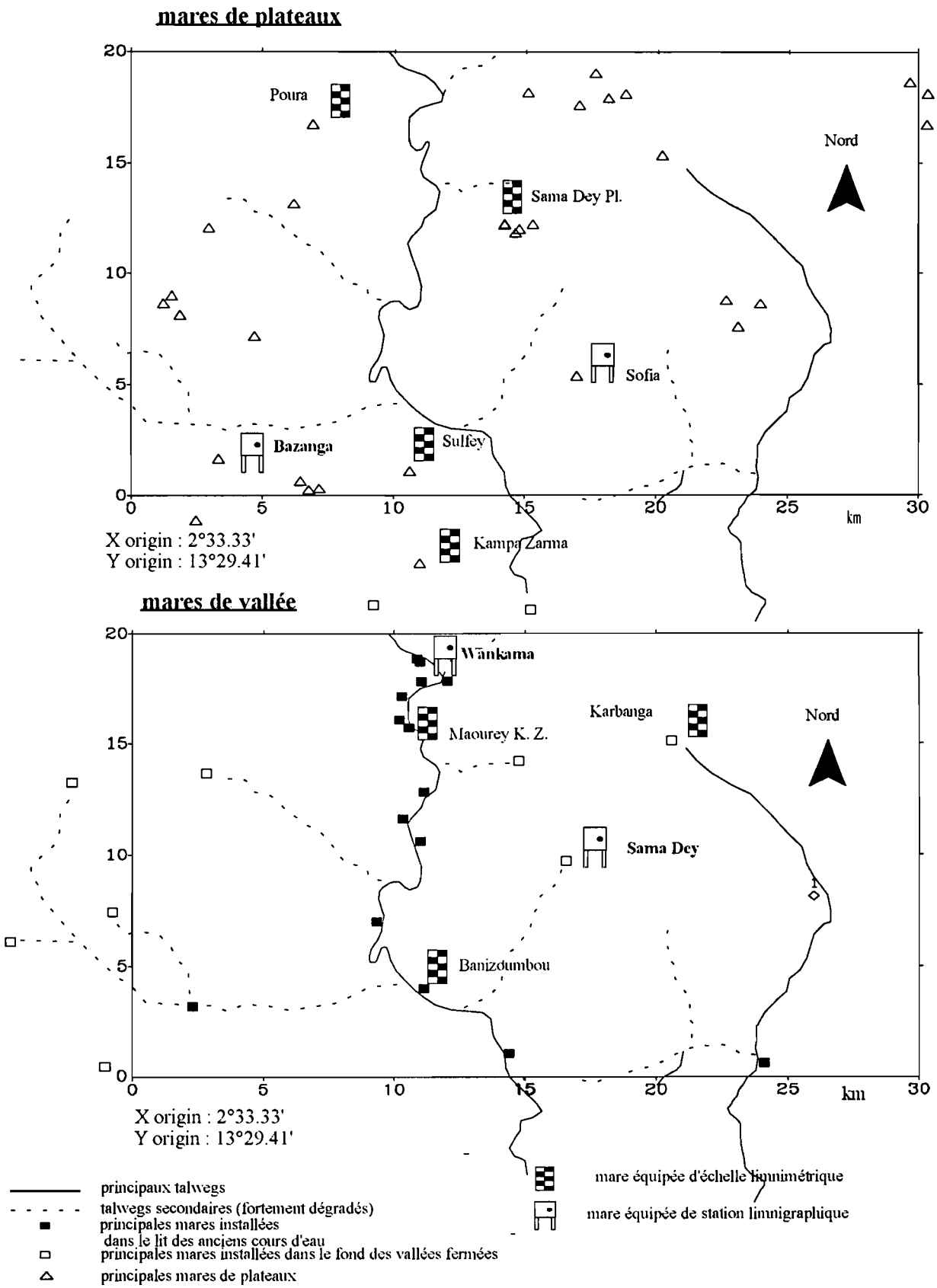


Figure 16 : localisation des mares suivies en limnimétrie dans la zone d'étude

Elles correspondent à trois mares en situation géomorphologique distincte et comme nous le verrons dans la partie 2, elles présentent des comportements hydrologiques tout aussi spécifiques que leur milieu. Ces trois mares ont bénéficié d'une étude aussi complète que possible de leur environnement et d'un suivi rapproché des principales composantes du bilan hydrologique. Aussi, leur comportement hydrologique peut-il être pris pour référence. Ces mares sont les suivantes :

- **la mare de Bazanga** comme référence du milieu **"plateau à cuirasse ferrugineuse"**
- **la mare de Wankama** comme référence du milieu **"lit de cours d'eau".**
- **la mare de Sama Dey** comme référence du milieu **"bas-fond de vallée sableuse verrouillée"**

<u>Les mares témoins</u>. Au nombre de 9, elles sont destinées à compléter l'échantillonnage dans un double but. D'une part, valider les comportements observés sur les mares de référence et apprécier ainsi la variabilité existante et, d'autre part, étendre le bilan hydrologique à un plus grand ensemble de mares et de bassins endoréiques. Elles correspondent, en majorité, aux mares qui n'ont pas fait l'objet d'un suivi limnimétrique continu et d'une étude détaillée de leur environnement. Les mares de Yélouma et de Massi koubou ont été l'objet d'un suivi limnimétrique continu et d'une étude environnementale nettement plus détaillée que les autres mares témoins. Comme les mares de référence, l'échantillonnage a été effectué par rapport aux trois situations géomorphologiques possibles. Il s'agit des mares suivantes :

- en situation de **plateau à cuirasse ferrugineuse : Kampa Zarma, Sulfey, Sama Dey plateau et Poura.**
- en situation de bas fond dans une **vallée sableuse "verrouillée" : Yélouma, Massi koubou et Karbanga**
- en situation de **lit de cours d'eau : Maourey Kouara 1, Mourey Kouara 2 et Banizoumbou.**

Les mares de référence et les mares témoins sont positionnées sur la carte de la figure 16 et leurs coordonnées géographiques sont données dans le tableau 8.

2 DISPOSITIF EXPERIMENTAL

En 1991, seules quatre mares ont été instrumentées et analysées. Elles constituaient, *a priori*, un échantillon représentatif des zones de stockage dans le degré carré. Le suivi d'une des quatre mares (Sofia) a été abandonné l'année suivante.

En 1992, le dispositif expérimental a été renforcé : limnimétrie sur 14 mares dont 6 à l'aide de limnigraphes enregistreurs à mémoire statique. Les 14 mares sont réparties sur l'ensemble du secteur d'étude, 6 étant situées sur les plateaux à cuirasse ferrugineuse du Continental Terminal (système plateau) et 8 autres dans des bas-fonds de vallée (système vallée type 1) et anciens cours d'eau (système vallée type 2). L'instrumentation de base pour tous ces plans d'eau a été un système permettant la lecture de la variation de niveau , lecture qui peut être automatique (6 stations limnigraphiques CHLOE) ou manuelle (lecture d'une échelle limnimétrique sur 8 autres sites). Le tableau 8 présente le nom et la localisation des sites instrumentés durant toute l'étude. Le suivi d'une des mares de cours d'eau, Maourey Kouara1, a été abandonné en cours de saison. La crue du 31.7.1992 a provoqué une rupture du "verrou sableux" entraînant le partage de la mare en plusieurs parties, rendant difficile l'estimation des volumes totaux.

En 1993, le dispositif expérimental était identique, mis à part l'arrêt du suivi de la mare de Yélouma.

Tableau 8 : nom et localisation des sites instrumentés. Ce tableau est illustré par la figure16 où sont portés les sites suivis.

nom de la mare	dispositif de mesure des niveaux	latitude Nord *	longitude Est *	situation*
Bazanga	station limnigraphique	**13°30,35'**	**2° 35,11'**	plateau de BT
Kampa Zarma	échelle limnimétrique	13°26,10'	2° 38,33'	plateau non de BT
Poura	échelle limnimétrique	13°38,71'	2° 37,09'	plateau de BT
Sama Dey plateau	échelle limnimétrique	13° 36,09'	2° 41,42'	plateau de BT
Sofia	station limnigraphique	13° 32,42'	2° 42,62'	plateau de BT
Sulfey	échelle limnimétrique	13° 30,03'	2° 39,12'	plateau de BT
Wankama	station limnigraphique	**13° 39,00'**	**2° 38,91'**	cours d'eau
Banizoumbou	échelle limnimétrique	13° 32,00'	2° 39,73'	cours d'eau
Maourey kouara 1	échelle limnimétrique	13° 38,32'	2° 38,96'	cours d'eau
Maourey kouara 2	échelle limnimétrique	13° 38,12'	2° 39,15'	cours d'eau
Sama Dey village	station limnigraphique	**13°35,12'**	**2°42,07'**	vallée fermée
Karbanga	échelle limnimétrique	13° 34,94'	2° 46,73'	vallée fermée
Massi koubou**	station limnigraphique	13°50,31'	2°24,56'	vallée fermée
Yélouma	station limnigraphique	13° 26,97'	2° 30,80'	vallée fermée

*coordonnées en degrés minutes et décimales de minutes

** en dehors du secteur d'étude des mares

Légende de la localisation des mares

Pl. de B.T. : plateau à cuirasse ferrugineuse organisé en brousse tigrée

Pl. non B.T. : plateau à cuirasse ferrugineuse non organisé en brousse tigrée

vallée fermée : bas fond de vallée "vérouillée" par les sables

cours d'eau : cours d'eau actuellement non fonctionnel

Ce schéma d'instrumentation correspond à la démarche générale suivante :

- étude précise du régime de la mare (cycle remplissage-vidange et recharge rapide des nappes) sur les 6 sites équipés de limnigraphes enregistreurs ;
- extension spatiale avec résolution temporelle dégradée sur les 8 mares échantillons équipées uniquement d'échelles limnimétriques et échelles à maximum ;
- extension spatiale du bilan des mares échantillons sur la zone d'étude grâce au suivi aérien de 40 mares représentant les deux tiers en nombre et plus de 90% en capacité de stockage sur cette zone de 600 km².

2.1 Hydrométrie

Dans l'étude des zones de stockage superficiel, le paramètre de base est bien sûr la mesure des volumes d'eau stockés et leur variation dans le temps. L'obtention d'une mesure de qualité est nécessaire autant dans la précision que dans la résolution temporelle et spatiale pour appréhender les événements de crue (remplissage) et la vidange (déstockage) en vue d'établir des bilans à une résolution temporelle la plus fine possible. La mesure réalisée est celle du niveau du plan d'eau, le volume stocké correspondant étant déduit par le biais des relations hauteur volume établies pour chaque mare.

2.1.1 Suivi des niveaux par limnigraphie

Les mares de référence et trois des mares témoins (Sofia en 1991, massi Koubou et Yélouma en 1992) sont équipées de stations limnimétriques (figure 17) constituées :

- d'une sonde piézo-résistive mesurant la hauteur d'eau par différence entre la pression hydrostatique du liquide et la pression atmosphérique,
- d'une centrale d'acquisition reliée à la sonde par un câble enterré, le déclenchement de l'acquisition étant fonction d'un seuil de variation de niveau et d'un intervalle de temps choisis par l'utilisateur. Ces deux paramètres d'acquisition sont réglables jusqu'aux valeurs limites de 1 cm et de 1 minute. La donnée est stockée sur un support électronique amovible (cartouche à mémoire statique).

En saison des pluies, le pas d'échantillonnage intéressant s'est avéré être un seuil de déclenchement de 1cm pour un intervalle d'interrogation de 5 minutes. Il décrit de manière satisfaisante l'événement de crue qui est souvent de courte durée tout comme les premières heures de vidange des stocks. Par contre, en phase de déstockage essentiellement (saison sèche), le seuil d'acquisition est augmenté en temps (15 ou 30 minutes) pour éviter des acquisitions parasites provoquées par le faible volume résidant, le vent et la venue de bétail.

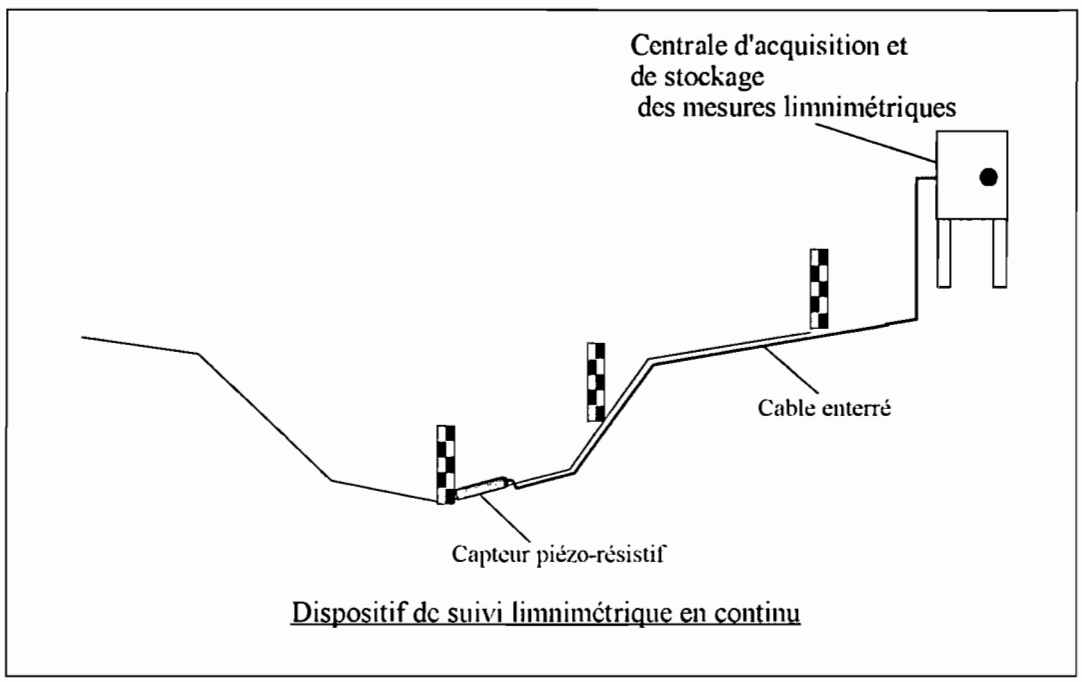
Les périodes de fonctionnement sont consignées dans le tableau 9. On remarquera que deux mares ont eu des interruptions de mesures. Ces interruptions ont été provoquées par une mauvaise étanchéité des sondes (mare de Bazanga - année 1991 et 1993) et par la montée des eaux qui a noyé la station d'acquisition lors d'une crue exceptionnelle (mare de Wankama- année 1992).

2.1.2 Suivi des niveaux par lecture directe de l'échelle limnimétrique

Les mesures limnimétriques concernent un ensemble de 8 mares qui ont été suivies à partir de la saison des pluies de 1992. Ces 8 mares font partie d'un dispositif qui a pour fonction de compléter l'échantillonnage mais surtout sert de site de validation pour la modélisation des mécanismes de vidange et la spatialisation du bilan hydrologique par interprétation de photo-aériennes.

L'équipement est le suivant : une échelle limnimétrique à lecture directe et une échelle à maximum (calée sur le zéro de l'échelle limnimétrique) qui permet grâce à la décoloration d'un papier de mesurer le niveau le plus haut du plan d'eau entre deux visites (figure 17). Ce protocole présente un défaut. Il ne permet pas de connaître la hauteur de deux crues successives. Pour cela, la fréquence des visites doit être la plus

rapprochée possible. Ce suivi a commencé en juin avec une fréquence de une visite par semaine puis est passée à deux par semaine en juillet. Les visites au mois d'août ont presque été quotidiennes mais sont redevenues bihebdomadaires jusqu'à la fin du mois de novembre, période à laquelle les mares se sont asséchées.



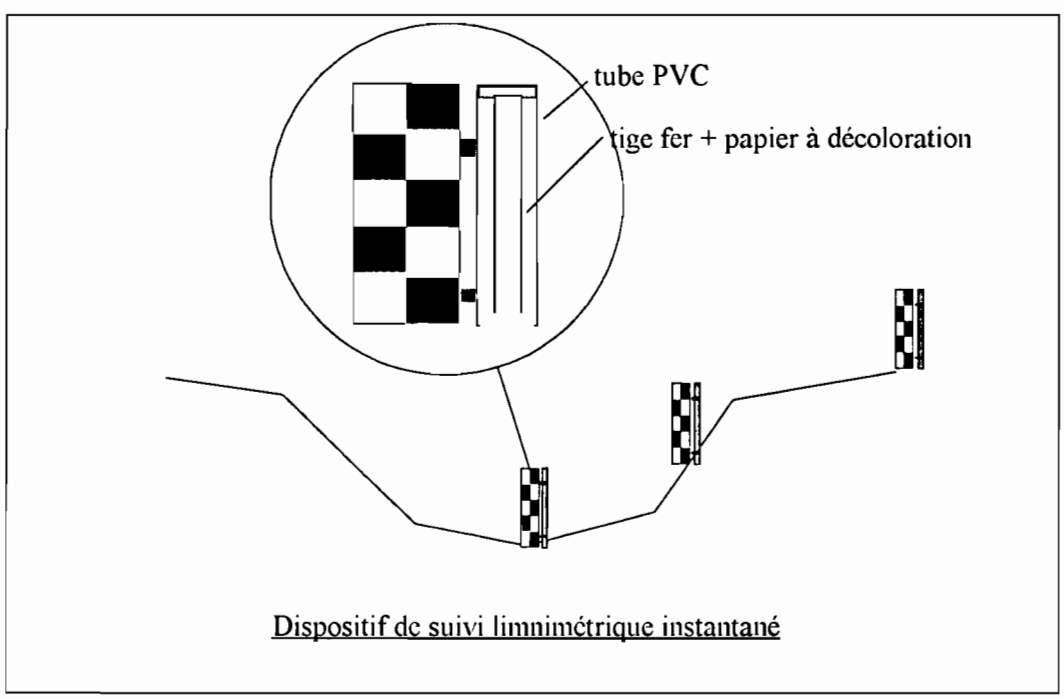


Figure 17 : schéma du dispositif de suivi des niveaux en continu et du dispositif de suivi des niveaux par lecture directe de l'échelle limnimétrique

Tableau 9 : période de fonctionnement des stations limnimétriques

	Période de fonctionnement		
Nom de la mare	année 1991	année 1992	année 1993
Bazanga	12.07 au 28.11	4.06 au 30.11	29.06 au 31.08
Massi koubou	non installée	12.06 au 29.09	06.06 au 20.09
Sama Dey	non installée	31.07 au 16.09	30.05 au 5.09
Sofia	24.04 au 15.10	site abandonné	site abandonné
Wankama	19.07 au 31.12	06.06 au 31.07	07.06 au 09.09
Yélouma	18.06 au 11.11	04.06 au 18.11	site abandonné
	Période en lacunes		
Bazanga	début saison au 14.07 - arrêt 13.8.91 au 28.8.91	pas de lacunes	début de saison au 29.06
Massi koubou	pas de lacunes	pas de lacunes	pas de lacunes
Sama Dey	pas de lacunes	début de saison au 31.07	pas de lacunes
Sofia	pas de lacunes	pas de lacunes	pas de lacunes
Wankama	début de saison au 19.07	arrêt 31.07.92 suivi ensuite par d'échelle	pas de lacunes
Yélouma	début de saison au 18.06	pas de lacunes	pas de lacunes

Pour chaque mare suivie un total de 60 relevés ont été effectués en 25 semaines en 1992 et un total de 53 relevés en 1993. Les périodes de suivi des niveaux sont consignés dans le tableau 10.

Tableau 10 : période de suivi des niveaux des mares équipées d'échelle limnimétrique

Nom de la mare	période fonctionnement	
	année 1992	année 1993
Banizoumbou	10.06 au 19.11	08.06 au 26.11
Kampa Zarma	01.06 au 27.11	02.06 au 26.11
Karbanga	10.06 au 19.11	15.06 au 26.11
Maourey Kouara 1	10.06 au 31.7	abandonnée
Maourey Kouara 2	19.06 au 27.11	13.06 au 26.11
Poura	10.06 au 19.11	
Sama Dey Pl.	10.06 au 23.11	15.06 au 26.11
Sulfey	04.06 au 9.11	08.06 au 8.11
Wankama	31.07 au 30.11	-
	épisode de remplissage en lacunes	
Banizoumbou	06.09	-
Kampa Zarma	-	3, 6, 14.07
Karbanga	-	-
Maourey Kouara 1	-	-
Maourey Kouara 2	04.06 au 19.06	06.06 et 16.07
Poura	-	-
Sama Dey Pl.	-	-
Sulfey	-	3, 6, 14, 16 et 30.07
Wankama	21 et 22.08 : 6, 14 et 15.09	-

2.2 Géochimie

Dans le cadre général de l'étude des zones de stockage et plus particulièrement d'une étude concernant l'estimation de l'évaporation des mares au moyen de traceurs chimiques et isotopiques, un suivi géochimique a été mis en place. Il concerne trois mares : Bazanga, Wankama et Yélouma, présentant des caractères morphologiques et écologiques distincts.

Le protocole a été le suivant : prélèvement d'eau chaque semaine avec mesure in situ du pH, de la température et de la conductivité électrique. La cote à l'échelle est aussi notée à chaque visite. Le stockage de l'eau se fait dans des récipients de 125 ml. Avant d'être analysé (laboratoire de chimie de l'ORSTOM Bondy), l'échantillon est filtré à 0,45 µ puis 0,1 µ car les eaux présentent des M.E.S en quantité importante et de taille très fine. Un titrage rapide à l'acide chlorhydrique avec de l'hélianthine est réalisé pour déterminer la teneur en carbonates. Le laboratoire de chimie analyse les teneurs en cations et anions majeurs ainsi qu'en aluminium, silice et fer.

Nous avons effectué des relevés du mois du juillet 1991 au mois de novembre pour Yélouma, de décembre pour Bazanga et de février pour Wankama. La fréquence hebdomadaire des relevés nous a permis de récolter 24 échantillons pour la mare de Bazanga, 26 pour la mare de Wankama et 18 pour la mare de Yélouma (tableaux A52, A53 et A54 en annexe 5)

2.3 Géochimie isotopique

Conjointement au suivi des teneurs en anions et cations des eaux de trois mares, des prélèvements de 20 ml d'eau aux mêmes dates et dans les mêmes conditions ont été réalisés pour analyse en isotopes stables : oxygène 18 et deutérium. Le suivi des valeurs de ces éléments est une seconde méthode d'estimation de l'évaporation dans les variations de volume de la mare. L'utilisation des isotopes stables comme marqueur de l'évaporation est abordée dans le chapitre 6. Ces analyses ont été poursuivies en 1992 sur seulement deux mares (Wankama et Bazanga) avec un échantillonnage temporel plus serré. Les périodes de suivi et les sites échantillonnés sont donnés dans le tableau A55 et A56 en annexe 5.

2.4 Mesure de l'évaporation sur bac

Pour compléter et recouper les méthodes d'investigation visant à évaluer les variations de stock par évaporation des mares, deux bacs à évaporation de type Colorado ont été mis en place sur les mares de Bazanga et de Wankama en septembre 1992. Les bacs étant remplis avec l'eau de chaque mare, nous avons mesuré les volumes d'eau manquants et rajouté le volume nécessaire pour rétablir le niveau initial. La lecture de la cote du plan d'eau et un prélèvement d'eau de la mare ont aussi été réalisés afin de déterminer l'enrichissement isotopique en fonction de la variation de volume. Ainsi, à chaque visite, nous obtenons un jeu de trois données : lame d'eau évaporée dans le bac, volume d'eau de la mare et teneur en isotope. L'intervalle de temps entre deux visites était généralement inférieur à trois jours. Toutes les variables mesurées au cours de ce suivi sont données dans les tableaux A55 et A56 en annexe 5.

2.5 Pluviographie

Nous avons mis a profit l'existence du réseau pluviographique EPSAT Niger (Lebel et *al.*, 1992) présent dans le degré carré pour estimer la pluviographie sur les bassins versants qui alimentent les mares. Ces appareils sont des pluviographes (bague de 400 cm²) à augets basculeurs fonctionnant avec un pas d'échantillonnage de 0,5 mm. L'acquisition de la donnée est automatique et le stockage se fait sur des mémoires statiques identiques à celles des stations limnimétriques.

On dispose généralement d'au moins un poste pluviographique sur chaque bassin versant des sites étudiés. Le tableau 11 présente l'association site de mare - pluviographe le plus proche avec ses coordonnées géographiques et sa période de fonctionnement. Des compléments d'informations sur le réseau EPSAT Niger et une première analyse des données issues de cette expérience se trouvent dans Lebel et *al.* (à paraître).

Tableau 11 : postes pluviographiques associés aux sites d'études des mares

mares suivies	station du réseau EPSAT	proximité avec le site	n° EPSAT	Longitude Latitude *
Bazanga	Bazanga	dans le BV	5	02°34,99' 13°30,33'
Kampa zarma	Kampa zarma	dans le BV	13	02°38,89' 13°26,48'
Poura	Wankama	proche du BV	116	02°38,91' 13°39,00'
Sama Dey plateau	SD village	proche du BV	102	02°41,66' 13°34,85'
Sulfey	Koma koukou	proche du BV	6	02°37,74' 13°29,89'
Wankama	Wankama	dans le BV	116	02°38,91' 13°39,00'
Banizoumbou	Banizoumbou	dans le BV	11	02°39,62' E 13°31,97' N
Maourey Kouara	Wankama	proche du BV	idem	02°38,91' 13°39,00'
Sama Dey village	SD village	dans le BV	102	02°41,66' 13°34,85'
Massi koubou	Massi koubou	dans le BV	78	02°25,00' 13°49,61'
Karbanga	Darey	dans le BV	18	02°44,53' 13°38,20'
Yélouma	Yélouma village	dans le BV	117	02°30,80' 13°26,97'

Les périodes de fonctionnement des pluviographes ainsi que les cumuls saisonniers sont donnés dans le tableau A61 en annexe 6.

2.6 Photographie aérienne

Le bilan hydrologique à une échelle sub-régionale est l'un des objectifs de cette étude. Compte tenu de la dimension des mares (beaucoup ont un miroir de moins de 5000 m²), l'inventaire et le suivi par satellite sont inopérants du fait de leur faible résolution spatiale et de l'échantillonnage temporel trop irrégulier (surtout en saison des pluies). La photographie aérienne semble donc être le seul moyen actuel fiable d'obtenir une couverture complète, renouvelable régulièrement et à la résolution spatiale souhaitée, de la zone d'étude.

La méthode consiste à faire des passages aériens en fin de saison des pluies et à différentes périodes de la saison sèche afin de photographier toutes les mares inventoriées sur le secteur d'étude. Une bonne définition ainsi qu'une constance des paramètres de vol et de prises de vue autorisent le calcul de la surface des plans d'eau photographiés. Il est malgré tout nécessaire d'effectuer des mesures de distance au sol pour valider les échelles de prises de vues théoriques. A chaque mission aérienne, les mesures de la hauteur du plan d'eau sont faites sur les mares de référence et les mares témoins pour rapporter toutes les séries de photographies dans une même origine altimétrique.

Après la délimitation des contours du plan d'eau et le calcul de sa surface par planimétrage, nous obtenons pour un site donné une série de valeurs de surface dans un intervalle de temps. Une relation tenant compte de la morphologie de la mare permettra le calcul des volumes correspondant et une estimation du déstockage de fin d'année.

Alors que l'année 1991 a servi essentiellement à l'apprentissage et à la mise au point de cet outil de spatialisation, l'année 1992 a vu la réalisation de deux types de missions :

- des missions de couverture aérienne des bassins versants des mares équipées en limnimétrie
- des missions aériennes de suivi de 40 mares sur le secteur d'étude .

La nature et les dates des missions aériennes sont récapitulées dans les tableaux A101 et A102 en annexe 10. La totalité des photographies prises pour les missions de suivi des niveaux des mares a été inventoriée et référencée. Nous présentons dans le tableau A103 en annexe 10 le nom et la localisation des mares suivies.

Le matériel de prise de vue est de type HASSELBLAD 553 ELX monté avec un objectif de 50 mm DISTAGON. Le film utilisé pour les photographies de couverture de bassin versant est de type Ektachrome 64 ASA de format 120 mm (6 cm X 6 cm). Le film utilisé pour le suivi des surfaces des mares est un film panchromatique ILFORD 125 ASA. Le format de ce film est aussi de 120 mm.

Deux types d'aéronefs ont été utilisés: Un CESSNA 185 pour les prises de vue en altitude (couverture des bassins versants) et un ULM WHEEDOPER pour les prises de vue ne nécessitant pas une altitude élevée (suivi des surfaces des mares).

2.7 Mesures annexes

Des études annexes ont été entreprises. Elles visaient à connaître le milieu de stockage dans un premier temps et permettre ainsi une analyse du contexte hydrologique (étude de la vidange et de l'évaporation) dans un deuxième temps. Ces études se sont avérées nécessaires pour affiner la typologie résultant des simples

considérations hydrologiques et géomorphologiques. Il s'agit de l'étude de la composition végétale et de sa dynamique autour des mares "échantillons", l'évaluation du bétail venant s'abreuver et l'étude du milieu pédologique de surface et de profondeur de quelques mares.

2.7.1 Relevés écologiques

Un suivi de la dynamique de la population herbacée sur les pourtours de chaque mare et un inventaire de la végétation de l'ensemble des mares du secteur d'étude ont été effectués dans le cadre général de l'étude hydrologique des mares mais plus particulièrement pour la connaissance du milieu écologique des différentes zones de stockage

Le suivi de la dynamique de la population herbacée s'est déroulé durant la saison des pluies, débordant légèrement sur le mois d'octobre, soit quatre mois de suivi (juillet à octobre) avec une fréquence de visite bimensuelle en début de saison puis hebdomadaire en fin de saison des pluies.

L'inventaire de la végétation de toutes les mares du secteur d'étude s'est déroulé de la fin octobre à la mi-novembre. Il a concerné 40 mares sur lesquelles ont été inventoriées et cartographiées les populations de ligneux.

2.7.2 Inventaire du bétail pour l'estimation de la consommation en eau dans les mares

Afin de connaître l'influence de la consommation en eau du bétail dans le bilan hydrologique des mares, une enquête a été menée sur quelques mares échantillons du secteur d'étude. L'enquête a consisté en une permanence d'une journée sur chaque site intéressé durant laquelle l'enquêteur a questionné les bergers amenant leur troupeau s'abreuver. Ce questionnaire devait éclaircir les points suivants : composition du troupeau (espèces, sexe), nombre de têtes, fréquence de venue sur la mare.

2.7.3 Observations pédologiques

Les observations pédologiques réalisées sur les sites des mares ont essentiellement été orientées vers la connaissance des horizons superficiels et sub-superficiels de la cuvette des mares et leurs versants proches. Elles devaient apporter des éléments pour la compréhension de la dynamique de la vidange des mares et de la redistribution de l'eau dans la zone non saturée et vers les nappes.

Elles ont été réalisées en trois étapes :

- observations sommaires par sondage sur l'ensemble des mares de référence et témoins,
- observations détaillées à partir de fosses pédologiques et sondages superficiels et/ou profonds sur les sites de référence. Ces dernières ont été réalisées avec l'aide de R.Boulet et Nascimento (1991),
- observations plus détaillées sur le site de Bazanga (Desconnets et *al.*, à paraître).

2.7.4 Cubature des mares

Chaque mare suivie en limnimétrie a fait l'objet d'un levé planimétrique et altimétrique permettant de déterminer avec le plus de précision possible la forme de chaque cuvette de mare et ainsi établir sa courbe de capacité volumique. Deux campagnes de levés topographiques ont été organisées pour lever tous les

sites étudiés. La première campagne réalisée en janvier 1992 et effectuée par les services de la topographie nigérienne (IGNN), a levé selon le même protocole les mares de Bazanga, de Wankama et de Yélouma. Ces levés planimétriques et altimétriques couvrent la cuvette de la mare par rapport à la cote la plus haute par un maillage régulier de 10 mètres par 10 mètres. En décembre 1992 et janvier 1993, une deuxième campagne topographique a permis de lever les mares de Kampa Zarma, Sulfey, Banizoumbou, Sama Dey Village, Sama Dey plateau ,Maourey, Karbanga , Poura et Massi Koubou. Le protocole a été adapté à la taille de la mare . Ainsi les mares de faible superficie ont été quadrillées selon un semis de point de 5 mètres par 5 mètres et les deux plus étendues, Sama Dey village et Massi Koubou, ont été levées avec un quadrillage de 20 mètres par 20 mètres. Les représentations planimétriques sont à une échelle de 1/200 (maillage de 5 X 5 m), 1/500 (maillage de 10 X 10 m) et 1/1000 (maillage de 20 X 20 m).

2.7.5 Superficie des bassins endoréiques

La superficie de l'ensemble des bassins versants a été déterminée à l'aide de différents outils. Dans un premier temps, une couverture aérienne de chacun d'entre eux à l'échelle d'environ 1/10 000 (échelle du négatif) a été réalisée. Elle a été suivie d'une observation de terrain détaillée de chaque bassin versant afin de confirmer ou préciser ses limites topographiques.

Les bassins versants des mares de référence ont fait l'objet d'un levé topographique à l'échelle 1/5000. Il a permis de préciser leur limites topographiques surtout dans le cas du bassin endoréique de plateau où la denivellée totale était très faible (de l'ordre de 2 mètres).

Les bassins versants des mares témoins ont fait l'objet d'une caractérisation de leur relief par la réalisation de plusieurs transects altimétriques ayant pour origine la mare, selon différents azimuts. Ces transects ont ainsi permis de valider les limites topographiques préalablement établies grâce aux photos aériennes et aux observations sur le terrain.

2.7.6 Mesures réalisées en collaboration avec d'autres équipes HAPEX Sahel

Les suivis présentés dans ce paragraphe sont issus de la collaboration existante entre les différents programmes s'intéressant à l'étude du cycle de l'eau dans le cadre de l'expérience HAPEX Sahel.

2.7.6.1 Mesures d'humidité

L'instrumentation et les mesures d'humidité neutroniques ont été réalisées par l'équipe en charge de ces mesures sur le SSCE (Goutorbe et *al.*, 1992). Seul, le site de Wankama a été équipé d'un transect de quatre tubes neutroniques. Ce transect long d'une cinquantaine de mètres, démarre dans la cuvette de la mare et remonte un versant sableux (schéma de la figure 18). Ce dispositif a été complété, en 1993, par deux tubes placés respectivement dans la zone d'inondation permanente (zone colmatée) et dans la zone d'inondation temporaire (zone perméable) de la mare. Associé à un dispositif piézométrique, il devait assurer le suivi de la redistribution de l'eau de la mare vers la nappe à l'échelle de l'épisode de vidange dans le but de comprendre et de quantifier ces transferts. Le dispositif de mesure est décrit de manière plus détaillée dans le chapitre 7 traitant de la redistribution de l'eau sous la mare.

La mesure de l'humidité du sol est faite grâce à une sonde à neutrons. Les tubes mis en place permettent la répétition des mesures sans destruction du site.

Les mesures sont faites selon un calendrier établi à partir du jour de l'événement pluvieux :

événement pluvieux : J

le jour suivant : J+1

le deuxième jour suivant : J+2

le quatrième jour suivant : J+4

le septième jour suivant : J+7

le onzième jour suivant : J+11

le quinzième jour suivant : J+15

puis toutes les semaines en saison des pluies,

tous les quinze jours puis tous les mois en saison sèche.

Lorsqu'une pluie s'inscrit à l'intérieur de ce suivi, ce nouvel événement est considéré comme le jour J (est considéré comme événement pluvieux une précipitation de plus de 5 mm sur une station au moins du site central).

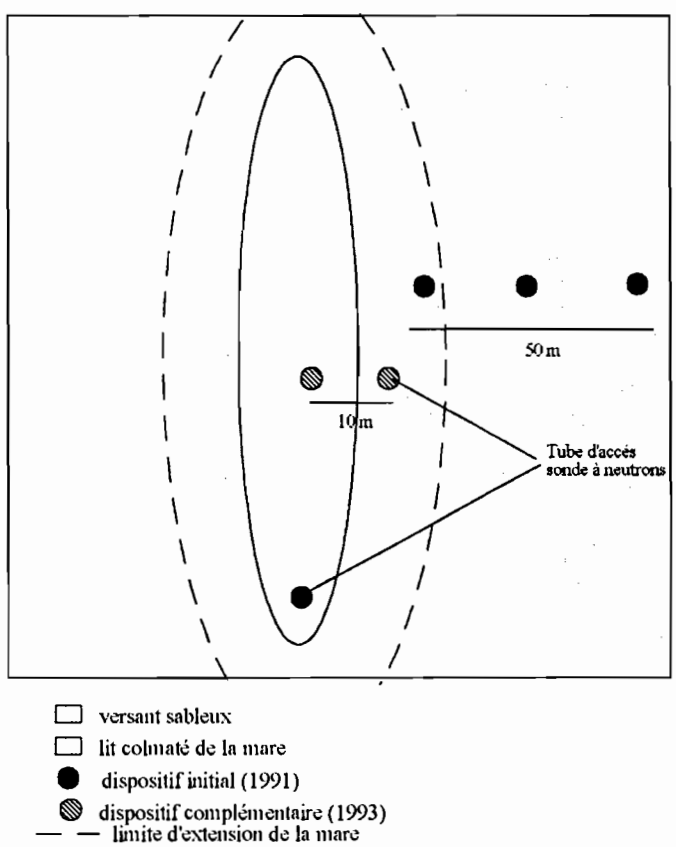


Figure 18 :schéma d'instrumentation du suivi d'humidité à la mare de Wankama

Des détails métrologiques et méthodologiques supplémentaires pourront être trouvés dans le rapport de synthèse des opérations réalisées sur le SSCE.

2.7.6.2 Piézométrie et hydrochimie de la nappe du Continental Terminal 3

Le suivi des niveaux de la nappe phréatique du Continental Terminal (CT3) sur l'ensemble du degré carré est destiné à évaluer la part des précipitations qui s'infiltre au travers du sol et qui contribue ainsi à la recharge de la nappe phréatique. De très nombreux puits ont été sélectionnés et mesurés sur l'ensemble du degré carré. De 118 en août 1991, leur nombre est passé à plus de 200 en 1992 et 1993. D'autres ouvrages étaient exceptionnellement visités. Ils étaient plus de cent. Les relevés piézométriques étaient de deux types:

- des mesures instantanées pour la grande majorité des points suivis avec une fréquence de 3 à 4 visites par an,
- des mesures en continu par des stations piézographiques identiques à aux stations limnigraphiques utilisées pour le suivi des niveaux des mares. Elles étaient au nombre de 6 en 1992 et 1993. Cet important échantillonnage spatial est montré sur la figure 19. La piézométrie de l'aquifère CT3 est accompagnée d'une étude hydrochimique qui vise essentiellement à compléter les informations hydrodynamiques, notamment, pour ce qui concerne l'homogénéité de l'aquifère et son fonctionnement. Ce suivi chimique comporte des prélèvements à intervalles plus ou moins réguliers pour analyse en éléments ioniques majeurs de l'eau (Leduc et Lenoir,à paraître).

2.7.6.3 Piézométrie locale à la mare de Wankama

Mis en place en 1993 et poursuivi en 1994, le suivi des niveaux de la nappe à l'aplomb de la mare de Wankama a pour principal objectif l'étude des mécanismes qui régissent les transferts d'eau de la mare vers l'aquifère et leur quantification dans le cadre d'un système Mare-Sol-Sous sol installé dans un lit de cours d'eau. Une description plus détaillée du dispositif de mesure est faîte au chapitre 7 traitant de la redistribution de l'eau sous la mare.

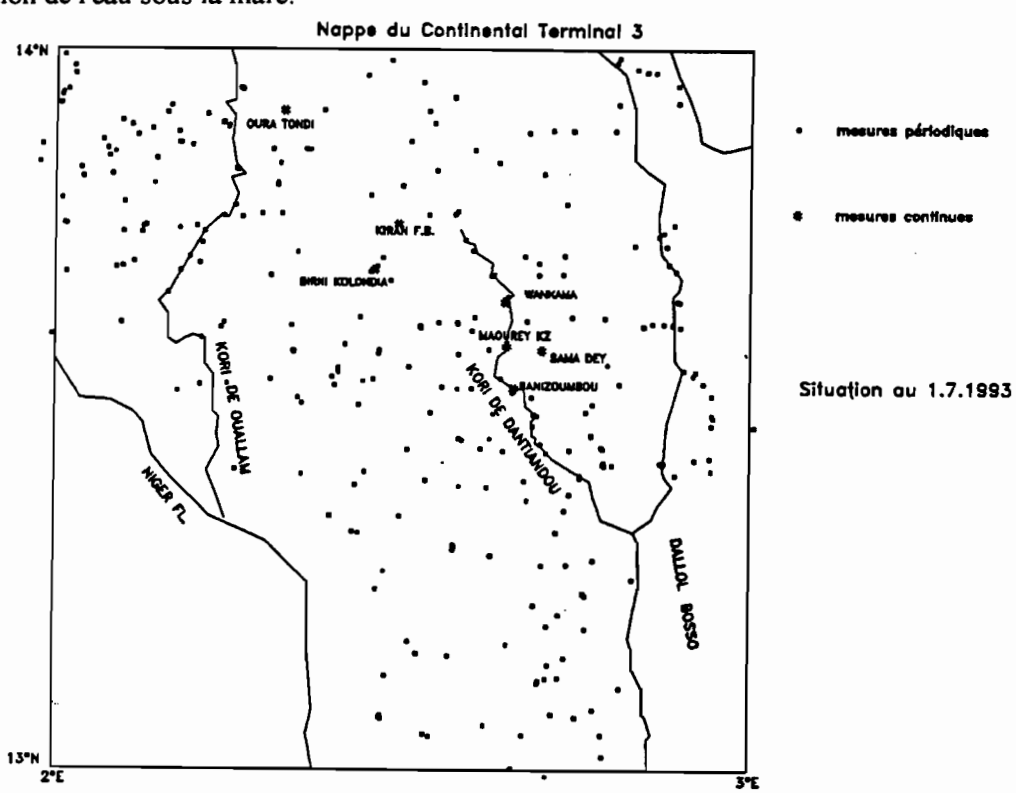


Figure 19 : réseau piézométrique du degré carré (Leduc et Lenoir, à paraître)

3 PRECISION DES MESURES

3.1 Hydrométrie

3.1.1 Mesure par limnigraphie (le capteur piézo-résistif SPI III)

Caractéristiques techniques de la sonde SPI III (données par le constructeur)

Les caractéristiques techniques mentionnées par le constructeur (tableau 12) donnent une précision sur les niveaux de plus ou moins 1 centimètre dans la gamme de profondeur d'immersion (de 0 à 10 mètres). Les niveaux mesurés sur les 6 mares équipées avec le capteur SPI III s'échelonnent de 0 à 4 mètres. A partir de la figure 20, on s'aperçoit que dans la gamme des niveaux observables en saison des pluies, les erreurs relatives de mesures sont significativement différentes selon la mare et la hauteur dans la mare. Les estimations des niveaux par le SPI III dans les mares de bas-fond de vallée (qui s'assèchent plusieurs fois dans la saison) pourront être entachées d'une forte erreur lors de l'assèchement final (10 à 0 cm : 10 à 100% d'erreur relative). Mis à part l'assèchement final qui intervient seulement une fois par année, les mares de plateau et celles installées dans les lits de cours d'eau évoluent dans des gammes de hauteurs où l'erreur relative est assez faible (entre 0,5 et 2%-figure 20).

Tableau 12 : caractéristiques techniques de la sonde piézo-résistive SPI III

profondeur d'immersion (liquide de densité 1)	0 à 10 mètres
profondeur maximum (hauteur valide jusqu'a 12m)	15 mètres
précision des mesures	niveau ± 10 mm
	température ±1°C
température d'utilisation	immergée 0 à +50°C
	emmergée - 20 à +70°C
vitesse de poursuite des niveaux	max de 10 mm par seconde
temps de mesure	3 secondes

b - Test de suivi des niveaux

Réalisé au laboratoire d'Hydrologie de l'Orstom (Montpellier) par l'équipe du service technique, ce test a porté sur le suivi des variations de niveau d'une colonne d'eau pour deux grands types de régime, un régime de vidange lent (figure 21) sur quelques dizaines de jours et un régime de remplissage-vidange violent (figure 21). La réaction du capteur à de rapides variations de niveaux à fortes amplitudes est assez satisfaisante (figure 21) dans la gamme des intensités de vidange qui nous intéressent (de 1 cm/j à 150 cm/j), l'écart relatif (niveau échelle - niveau mesuré par la sonde en %) étant toujours de ± 1%. En ce qui concerne la vidange effectuée sur une trentaine de jours, on observe une dérive significative à partir du 25ème jour. Enfin, on notera le décrochage du capteur (écart relatif de -1 à -6%) lors de vidanges très violentes (intensité entre 200 et 500 cm/j). Ces intensités n'ont jamais été atteintes dans le contexte hydrologique que nous étudions.

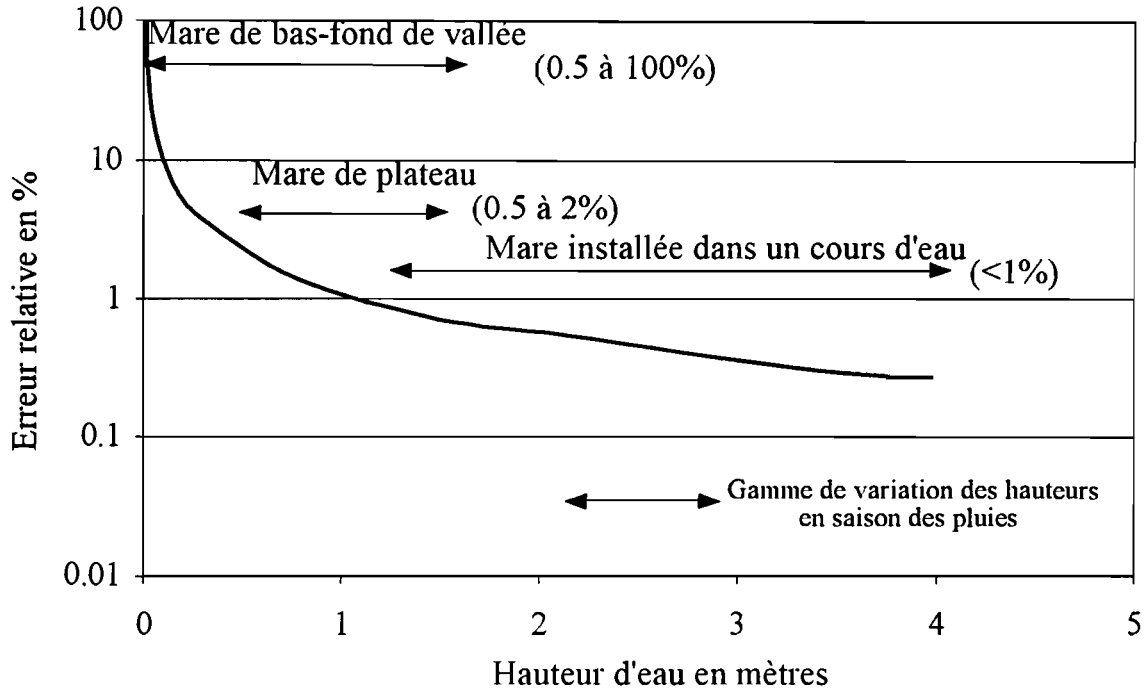


Figure 20 : erreur relative de la mesure de niveau avec la gamme des hauteurs concernées selon le type de mare

c - Observations au cours des suivis sur les mares

Dans la pratique, il peut apparaître après quelques semaines de fonctionnement un léger décalage entre la hauteur enregistrée par le capteur et la hauteur réelle. Ce décalage est imputable à plusieurs causes:

- une dérive électronique de la sonde due à des variations de température
- un affaissement dans la vase du support de la sonde
- un envasement partiel du capteur

Une visite hebdomadaire permet de diminuer significativement les risques de dérive de hauteur. Comme le montrent les tests de suivi des niveaux, il semble que le capteur piézo-résistif soit adapté à de rapides montées et descentes de niveau comme c'est fréquemment le cas dans les mares équipées. Au cours des nombreuses visites de surveillance, aucune dérive de temps significative n'a été observée. Enfin , il faut noter que la phase ultime de l'assèchement est entachée d'erreurs de mesures donc d'appréciation de volume. La cause de ces erreurs est la faible hauteur d'eau (l'erreur relative est importante aux faibles hauteurs) qui reste en mouvement et donne des variations de mesures s'écartant à plus ou moins 3 cm du niveau réel.

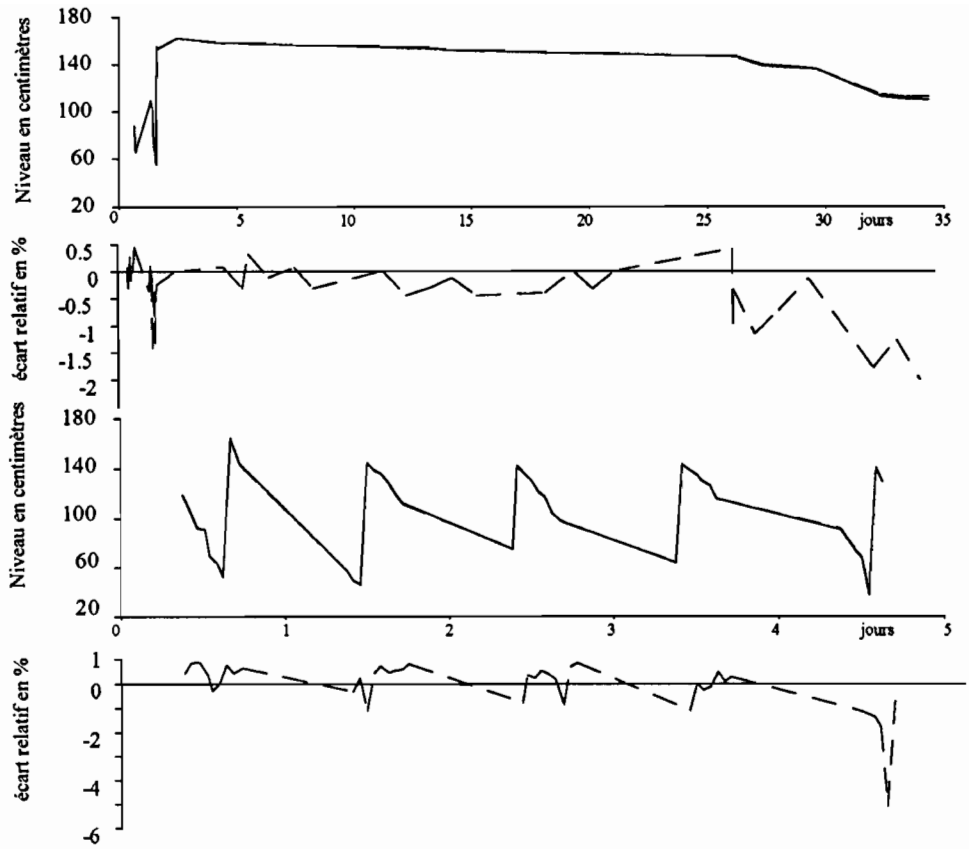


Figure 21 : test de suivi des niveaux de la sonde piézo-résistive SPI III. Cas de deux régimes de vidange.

3.1.2 Mesure par lecture directe de la cote du plan d'eau

La mesure instantanée dans une mare et jusqu'à une périodicité très élevée se révèle insuffisante pour établir des bilans très précis durant la saison des pluies. Elle ne permet pas la description de l'événement hydrologique c'est à dire le début et la fin du ruissellement, ni celle de son l'intensité. Seule la mesure de la cote maximale, présumée être la hauteur du plan d'eau, est donnée par la lecture de l'échelle à maximum.

L'équipement permettant l'estimation de la cote maximale s'est avéré mal adapté à ce type de site et de suivi. En effet, nous avons assisté à un envasement de l'échelle à maximum tout au long de la saison ce qui a eu pour conséquence une augmentation du décalage entre les deux échelles, associé souvent à une lecture peu précise par l'observateur.

La lecture directe de la cote à l'échelle ne présente pas les mêmes problèmes et sa fiabilité est de l'ordre du centimètre.

3.2 Relation Hauteur-Volume

L'obtention des relations Hauteur d'eau-Volume d'une mare demande différentes opérations dont chacune est source d'erreurs.Ces opérations sont les suivantes :

- levé topographique,
- calcul des volumes par la méthode "cuts & fills" (Surfer 4.0, 1989),
- modélisation de la relation Hauteur-Volume par régression.

Il est mathématiquement complexe d'établir des relations entre les opérations effectuées et l'incertitude du volume qui découle de chacune d'entre elles. Nous proposons ici de présenter les différentes opérations réalisées pour obtenir la relation Hauteur-Volume, d'évoquer pour chacune d'entre elles l'incertitude apportée et d'en mesurer l'importance relative dans l'estimation du volume.

3.2.1 Appréhension du relief par un levé topographique

L'erreur qui peut être commise dans l'appréhension du relief est difficilement mesurable car elle est essentiellement humaine. Néanmoins, la régularité du relief, les caractéristiques de surface (rugosité), et la résolution spatiale choisie pour appréhender l'ensemble interviennent. Les échelles de levé topographique choisies ont été de trois types selon la superficie de la surface à représenter : 1/200 (semis de 5 X 5 m), 1/500 (semis de 10 X 10 m) et de 1/1000 (20 X 20 m). L'erreur instrumentale au cours du levé est minime.

L'opération topographique est suivie d'une numérisation des relevés XYZ pour produire une grille XYZ nécessaire au calcul des volumes et surfaces. Lors de la création de la grille XYZ, on conserve la résolution spatiale du levé.

3.2.2 Calcul des volumes par la méthode "cuts & fills" (Surfer 4.0, 1989)

En bref, cette méthode consiste en une estimation des volumes négatifs (fills ou volume de comblement) et volumes positifs (cuts ou volume de chargement) à partir de l'ensemble du relief par rapport à une surface de référence de cote Z donnée (figure 22). L'approximation du volume est alors réalisée par trois méthodes : trapézoïdale, "Simpson Rules" et "Simpson 3/8 Rules".

L'erreur absolue volumique peut être estimée par la différence entre la plus grande et la plus petite approximation. La qualité de l'approximation du volume est principalement fonction de la densité de la grille XYZ et de la régularité du relief. Cette méthode permet aussi d'estimer la surface qui correspond au volume de comblement.

Les relations Hauteur-Volume de chaque mare seront présentées dans le chapitre 4 traitant de la description détaillée des sites de référence.

3.2.3 Modélisation de la relation Hauteur-Volume par régression

De manière à calculer le bilan hydrologique de la mare de façon répétitive et pour chaque variation minimale de niveau de 1 cm, il a été nécessaire de produire une équation empirique de la relation Hauteur Volume de chaque mare.

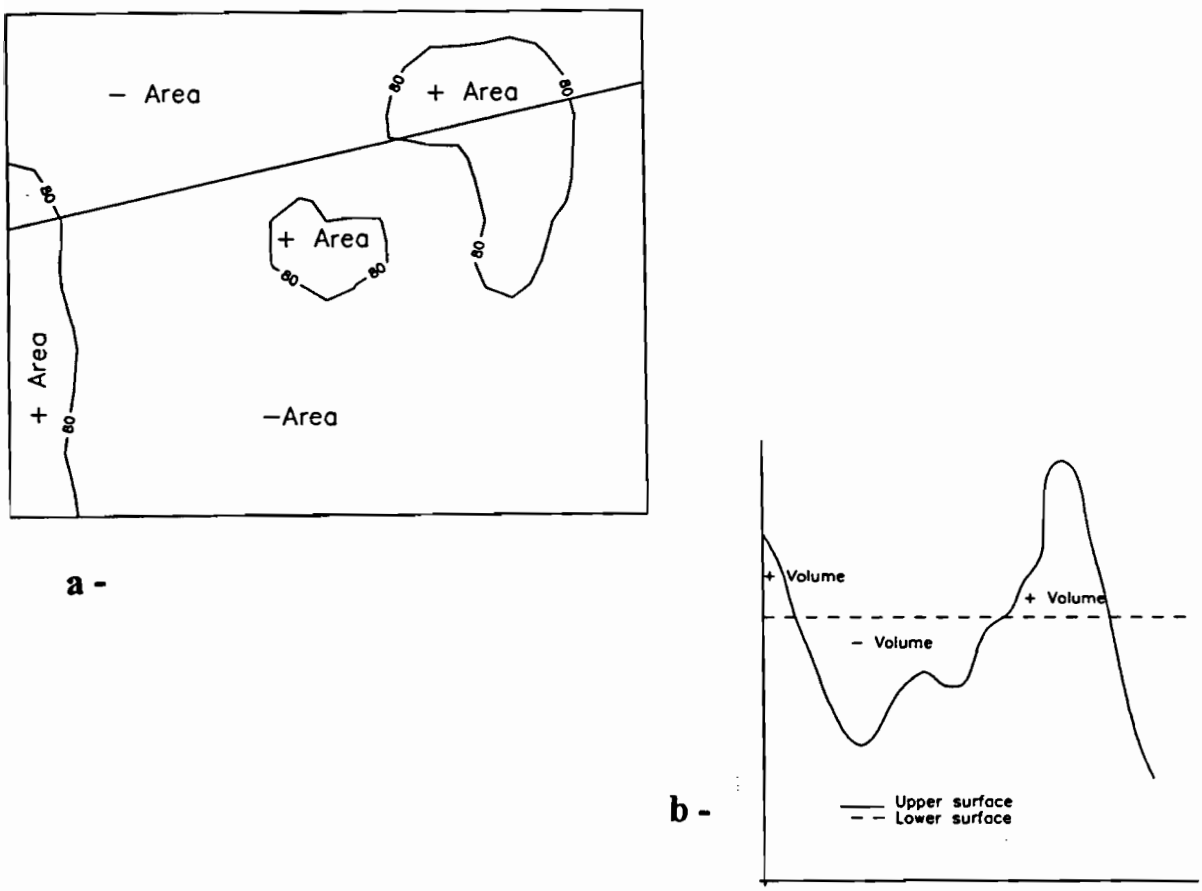


Figure 22 : méthode de calcul des volumes (SURFER 4.0, 1989)

a - vue en plan des aires positives et négatives
b- vue de la section transversale des volumes positifs et négatifs (les volumes négatifs correspondent aux volumes de remplissage

Les relations les mieux adaptées sont de forme polynomiale de degré 2, 3 ou 4 et elles sont calculées pour une gamme de hauteur donnée. Le tableau A21 en annexe 2 donne les coefficients calculés par régression de l'ensemble des relations polynomiales et les erreurs maximales et moyennes par rapport au volume calculé. Comme l'on peut en juger sur la figure 23 (ensemble des mares), l'erreur relative amenée par le modèle polynomial (calculée pour l'ensemble des mares et des hauteurs interpolées) est très faible inférieure à 5% pour 99% de la population. Elle est d'autant plus faible que l'on se situe dans la gamme des variations des hauteurs de la saison des pluies.

Si les levés topographiques réalisés à une résolution spatiale fine pour ces reliefs peu accidentés et ces superficies assez réduites permettent une connaissance du volume à moins de 10% (gamme des hauteurs de

la saison des pluies), il n'en reste pas moins que quelques levés topographiques réalisés en 1991 se sont révélés incomplets. En effet, l'étendue levée a été légèrement inférieure aux surfaces immergées lors de quelques crues exceptionnelles des années suivantes. Ceci est vrai pour les mares de Wankama, Yélouma et de Maourey Kouara 2.

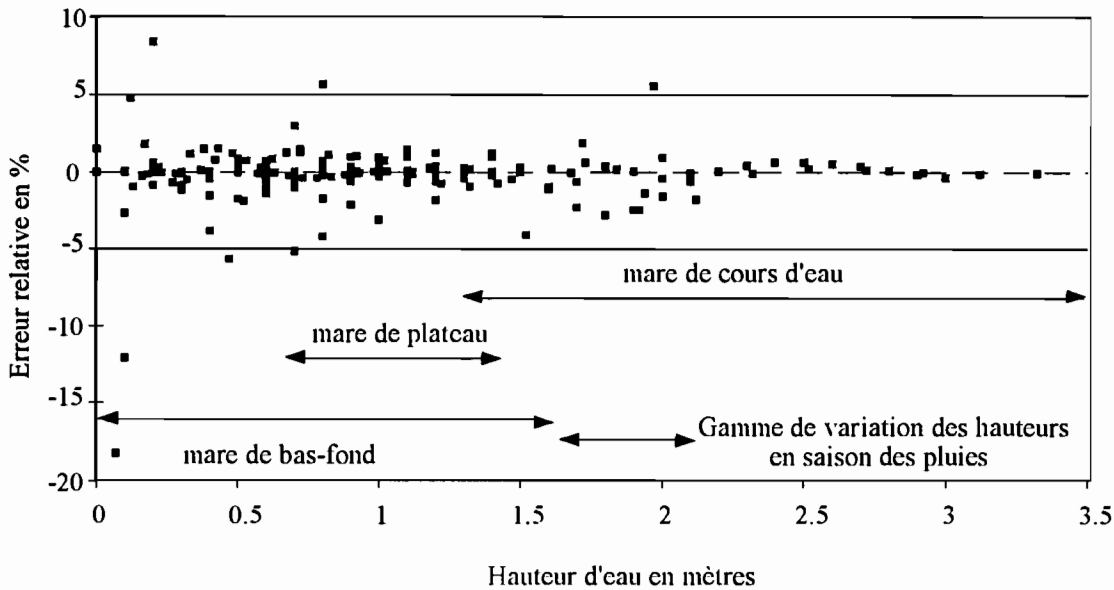


Figure 23 :erreur volumique relative induite par la modélisation des relations Hauteur-Volume pour l'ensemble des mares.

3.3 Pluviographie

3.3.1 Erreur instrumentale

La mesure de la pluie par un pluviographe est soumise à différentes sources d'erreurs :

- déficit de captation dû au vent, pouvant atteindre 20 à 40 % de la pluie mesurée lors de forts vents;
- imperfections techniques comme les frottements mécaniques,
- erreur due au système de mesure : l'auget peut être soit pratiquement plein, soit pratiquement vide à la fin de l'intervalle de temps dt que l'on considère, conduisant à une erreur de ± un basculement.
- détarage et déréglage des augets qui entraînent une mesure de quantité supérieure ou inférieure à la quantité théorique. Toutes ces erreurs sont cumulatives mais leur importance relative devient moindre lorsque le pas de temps augmente. Le pas de temps avec lequel sera calculé la lame précipitée est celui de l'averse.

Deux des erreurs instrumentales peuvent être significativement diminuées par des visites fréquentes au cours desquelles on vérifie le cumul enregistré par les augets et celui présent dans le seau récupérateur.

Les écarts enregistrés entre seau et augets au cours des 1991 à 1993 sont restés inférieurs à 10 %. Les valeurs brutes ont été corrigées par l'application d'un coefficient sur l'ensemble des événements de la saison.

L'installation sur deux sites du réseau EPSAT Niger (poste de Banizoumbou et de Kollo) d'un dispositif comprenant un pluviographe au ras du sol et un poste standard (bague réceptrice à 1,5 m du sol) a permis d'apprécier l'écart de mesure introduit par les effets de turbulence de l'air sur les cumuls au pas de cinq minutes et sur les cumuls au pas de l'averse (Taupin et Lebel, 1994). De l'analyse des cumuls aux deux pas de temps pour la saison 1992, il ressort des différences pluie sol pluie à 1,5 m assez constantes et indépendantes des intensités au pas de 5 minutes (pente de 0,93 et 0,95 - r^2 de 0,99 et 0,98). Au pas de l'averse, la pluie au sol reste inférieure à la pluie à 1,5 m avec des pentes de 0,97 et 0,98. Dans tous les cas, la pluie au sol est légèrement sous-estimée.

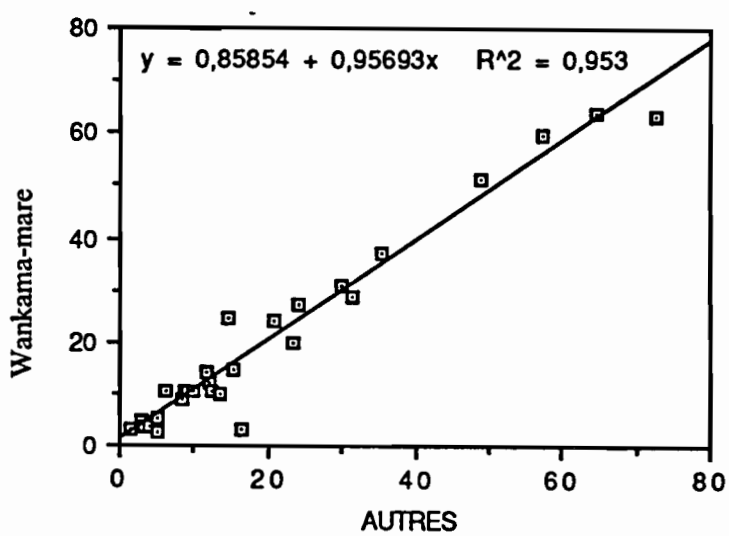


Figure 24 : corrélation entre la pluie au poste Wankama-mare et la moyenne des autres appareils (deux pluviomètres et deux pluviographes)

3.3.2 Représentativité d'un poste pluviographique pour l'ensemble d'un bassin versant

Considérant la variabilité spatiale des averses dans cette région qui peut s'avérer très forte selon la nature du système précipitant, un dispositif comprenant deux pluviomètres et trois pluviographes, complémentaire au dispositif initial du bassin de la mare de Wankama, a été mis en place en 1993. Il a permis d'une part, d'apprécier la distribution spatiale à l'échelle d'un petit bassin versant (2 km²) et, d'autre part, d'estimer l'écart introduit par le calcul de la lame précipitée à partir d'un seul poste.

Il ressort de l'analyse des 30 épisodes pluvieux enregistrés sur le bassin de Wankama une légère sous-estimation de la lame d'eau précipitée par le poste situé à coté de la mare. En effet, la corrélation des lames cumulées moyennes du dispositif complémentaire à celles du poste de Wankama mare donne une relation

linéaire avec une pente de 0,96 (r^2=0,95). A cette échelle spatiale, cette sous-estimation presque systématique (figure 24) peut être, en partie, expliquée par des turbulences liées aux conditions locales du poste de référence (position de versants exposés aux vents). La présence d'au moins un poste pluviographique par bassin étudié peut paraître représentative pour l'extrapolation de la lame d'eau précipitée à des surfaces qui, en majorité, sont inférieures au kilomètre carré.

3.4 Chimie et géochimie

3.4.1 Chimie

La détermination des teneurs en ions majeurs par analyse spectrométrique des eaux des mares est critiquée par le bilan ionique établi à l'issue des résultats de l'ensemble des déterminations. Ces valeurs acompagnent celles des teneurs ioniques présentées dans les tableaux A52, A53 et A54 en annexe 5.

3.4.2 Géochimie isotopique

La détermination des teneurs en oxygène 18 et en deutérium des eaux des mares par rapport à un standard SMOW a été réalisée par spectrométrie au Laboratoire d'Hydrologie et de Géochimie Isotopique de Paris XI.

L'estimation de l'incertitude de la détermination des isotopes stables est basée sur l'écart enregistré sur 10 déterminations réalisées sur le même échantillon. Cet écart est de 0,2 ‰ pour l'oxygène 18 et de 1 ‰ pour le deutérium au LHGI.

CHAPITRE 3

LES METHODES D'ETUDES

SYNTHESE

Les tableaux 13, 14 et 15 récapitulent pour l'ensemble des sites la nature des mesures et leur période de suivi ainsi que les études réalisées sur plusieurs d'entre eux.

Tableau 13 : nature et période de suivi sur les mares de plateau

	mares situées sur les plateaux à cuirasse ferrugineuse					
	mare de référence					
	Bazanga	Kampa Z.	Poura	Sama Dey pl.	Sofia	Sulfey
nature des suivis						
limnimétrie automatique	1991-1993					
limnimétrie par lecture directe		1992-1993	1992-1993	1992-1993		1992-1993
pluviographie	1991-1993	1992-1993	1992-1993	1992-1993		1992-1993
chimie	1991					
géochimie isotopique	1991-1992					
évaporation /bac	1992					
suivi photographique	1992	1992	1992	1992	1992	1992
relevés écologiques	1992	1992	1992	1992	1992	1992
inventaire du bétail	1992	1992	1992	1992	1992	1992
observations pédologiques détaillées	X					
humidimétrie	1992					
suivi piézométrique local						

Tableau 14 : nature et période de suivi sur les mares de cours d'eau.

	mares situées dans le lit des cours d'eau		
	mare de référence		
	Wankama	Banizoumbou	Maourey K.
nature des suivis			
limnimétrie automatique	1991-1993		
limnimétrie par lecture directe		1992-1993	1992-1993
pluviographie	1991-1993	1992-1993	1992-1993
chimie	1991		
géochimie isotopique	1991-1992		
évaporation /bac	1992		
suivi photographique	1992	1992	1992
relevés écologiques	1992	1992	1992
inventaire du bétail	1992	1992	1992
observations pédologiques détaillées	X		
mesure humidimétrique	1991-1993		
suivi piézométrique local	1993-1994		

Légende

	une année
	2 années
	3 années

Tableau 15 : nature et période de suivi sur les mares de vallée fermée.

	mares situées dans le bas fond des vallées fermées			
	mare de référence			
	Sama Dey village	Karbanga	Massi Koubou	Yélouma
nature des suivis				
limnimétrie automatique	1992 - 1993		1992-1993	1991- 1992
limnimétrie par lecture directe		1992-1993		
pluviographie	1992-1993	1992-1993	1992-1993	1991- 1992
chimie				1991
géochimie isotopique				1991
évaporation /bac				
suivi photographique		1992		1992
relevés écologiques		1992		1992
inventaire du bétail		1992		
observations pédologiques détaillées	X			X
humidimétrie				
suivi piézométrique local	1992-1993			

2ème PARTIE

FONCTIONNEMENT HYDROLOGIQUE DES MARES DE REFERENCE

- **Chapitre 4 : présentation des sites de référence**
- **Chapitre 5 : étude de la vidange des mares**
- **Chapitre 6 : estimation de l'évaporation**
- **Chapitre 7 : redistribution de l'eau sous la mare et vers l'aquifère**

CHAPITRE 4

PRESENTATION DES SITES DE REFERENCE

CHAPITRE 4

PRESENTATION DES SITES DE REFERENCE

Les trois mares de référence, Bazanga pour les mares de plateau, Wankama pour les mares installées dans les cours d'eau et Sama Dey village pour les mares de vallée sont resituées dans leur contexte géomorphologique.

Après avoir donné la situation dans le bassin versant, ainsi que quelques caractères généraux liés à leur utilisation et leur dimension, nous étudions de manière détaillée l'organisation pédologique de surface et de profondeur afin d'identifier les différents compartiments pédologiques existants et leur extension spatiale sous la mare. En parallèle, les caractéristiques hydriques et hydrodynamiques de ces compartiments sont soulignées, pour finalement mettre en évidence l'existence d'une zone colmatée et d'une zone perméable.

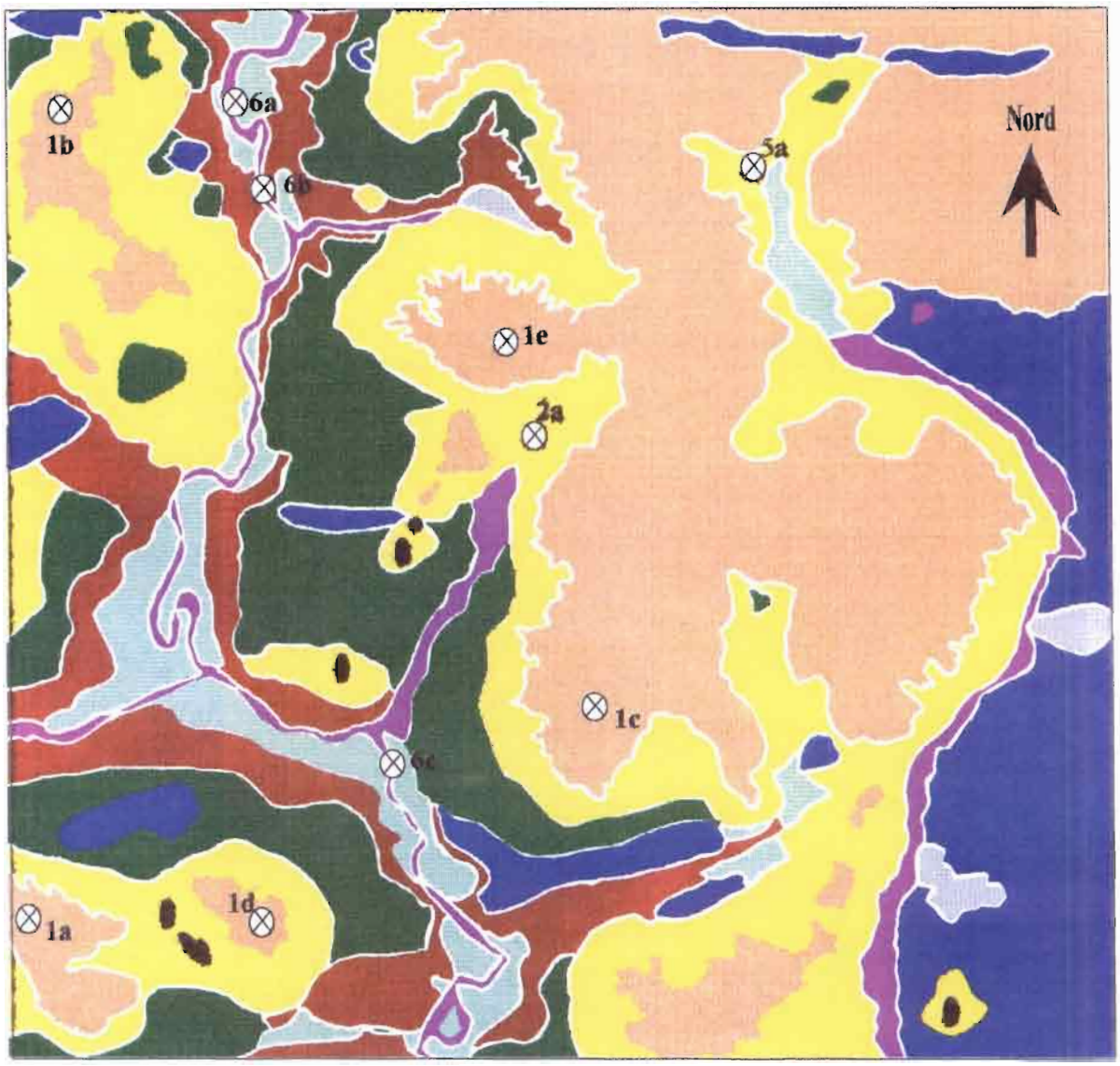
Les vues bidimensionnelles et les diagrammes des pentes nous permettent de distinguer trois morphologies spécifiques des lits de mare correspondant à chacun des milieux géomorphologiques. Enfin, les relations Hauteur-Volume de chacune des mares sont données et critiquées.

1 CARACTERISTIQUES GENERALES ET REPRESENTATIVITE

1.1 Localisation géographique et géomorphologique

Sur la figure 25, nous resituons l'ensemble des mares étudiées sur la carte géomorphologique du SSCE (Nagumo, 1992). Elles sont regroupées au sein de 3 grandes unités géomorphologiques :

- l'unité "plateau résiduel du Tertiaire" pour les mares de Bazanga **(1a)**, Kampa Zarma **(1b)**, Poura **(1c)**, Sofia **(1 d)**, Sulfey **(1e)**, et Sama Dey plateau **(1f)**.
- l'unité "lit de rivière" pour les mares de Wankama **(6a)**, Maourey Kouara **(6b)** et de Banizoumbou **(6c)**
- l'unité "glacis de piémont" pour les mares de Sama Dey village **(2 a)**, de Yélouma (hors carte) et de Massi Koubou (hors carte).



échelle : 1/120 000 (Nagumo, 1992)

Legende

1 plateau cuirassé
2 piémont
3 glacis
4 transition glacis vers les terasses alluviales
5 terrasse alluviale
6 talweg avec cours d'eau temporaire
7 recouvrement sableux récent
8 petite dépression
9 inselberg

Figure 25 : carte géomorphologique du SSCE avec la localisation des mares étudiées : Blazanga (1a), Kampa Zarma (1b), Poura (1c), Sofia (1d), Sulfey (1e), Sama Dey plateau ((1f), Wankama (6a), Maourey Kouara (6b), Banizoumbou(6c), Sama Dey village (2a), Karbanga (5a). La numérotation des mares utilise le numéro de l'unité géomorphologique dans laquelle elle est située

La mare de Karbanga **(5 a)** est localisée dans l'unité appelée "terrasse alluviale" qui est héritée du même contexte géomorphologique que l'unité 6 ("lit de rivière") mais dont la signature morphologique a été effacée.

On rappellera rapidement que la mare pris pour référence des systèmes endoréiques de plateau à cuirasse ferrugineuse, appelée Bazanga, est située au sud-est de la zone d'étude des mares et a pour coordonnées géographiques 13°30,35 N - 2°35,11 E.

La mare de référence des bassins se déversant dans les anciens cours d'eau, appelée Wankama (nom du village proche), est située à l'extrême nord de la zone d'étude et a pour coordonnées 13°39,00 N - 2°38,91 E.

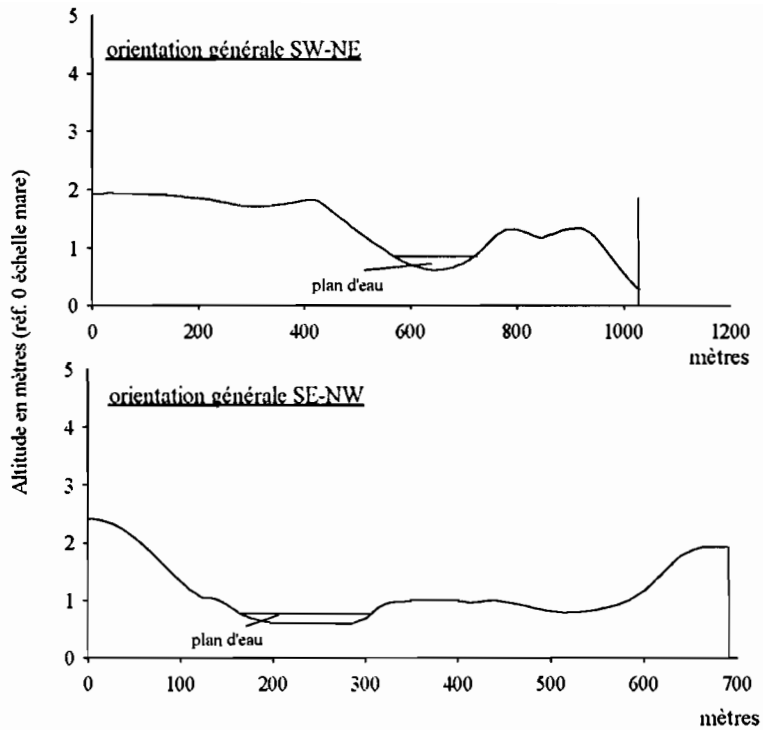
Enfin la mare de référence des systèmes endoréiques issus des vallées sableuses « verouillées » et généralement en forme de cuvette, appelée Sama Dey village (à la périphérie du village de Sama Dey), est située dans la partie centrale de la zone étudiée et a pour coordonnées 13°35,12' N - 2°42,07' E.

1.2 Localisation de la mare dans le bassin versant

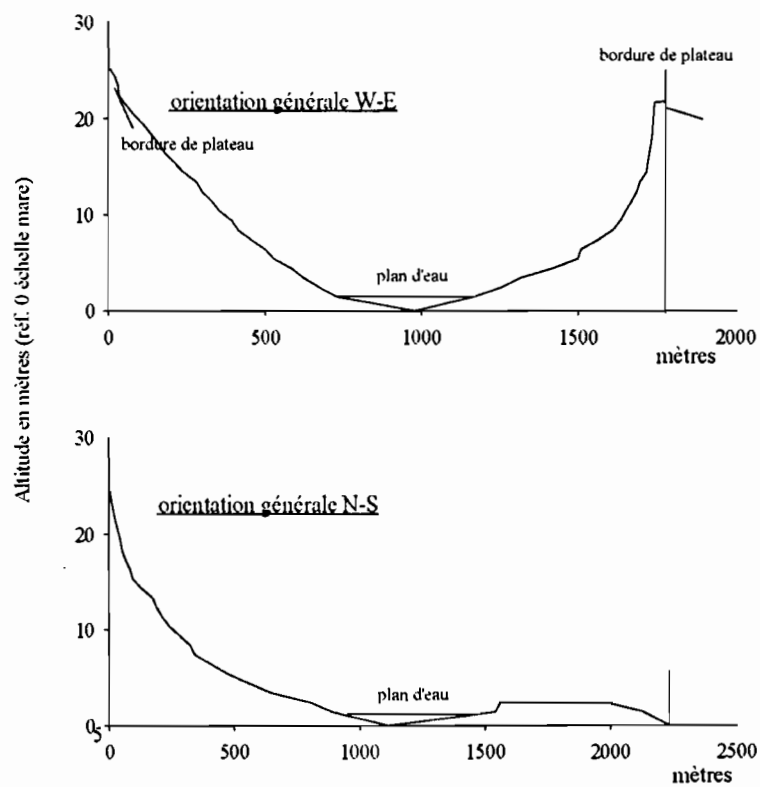
Les profils en long présentés dans la figure 26 permettent de localiser l'emplacement et l'extension de la mare au sein de son bassin d'alimentation. On peut ainsi apprécier la position centrale de la mare du bassin endoréique de Bazanga et l'importance de son extension en rapport avec l'extension de son impluvium.

Une partie du lit dégradé du kori de Dantiandou (profil d'orientation N/NW-S/SE) accumule les eaux d'écoulement de la surface amont qui sont drainées par le collecteur aboutissant à l'actuelle mare de Wankama. Contrairement aux deux autres mares, celle de Wankama est comprise à l'aval d'un impluvium de forme longiligne. De ce fait, la mare de Wankama peut être considerée comme l'exutoire "bouché" d'un bassin versant non endoréique (non fermé par le relief des versants).

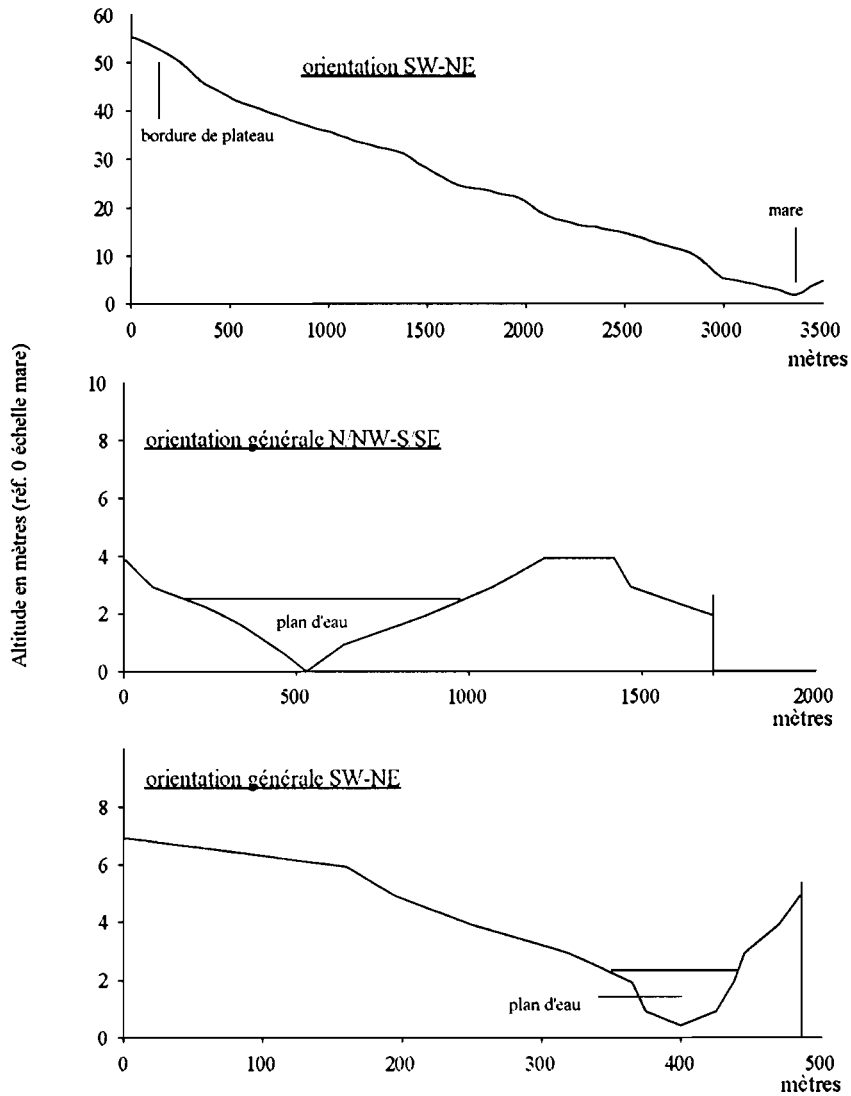
Dans le bassin endoréique de Sama Dey, il est aisé de distinguer la barrière naturelle qui a permis l'installation de la mare (profil d'orientation N-S) en stoppant l'écoulement dans le thalweg. Ce seuil, d'origine colluviale et alluviale, est suffisamment élevé (2,5 mètres au dessus du point bas de la mare) pour empêcher, pour des crues moyennes voire exceptionnelles (niveau maximal observé de la mare de 1,58 mètres-crue exceptionnelle du 31/07/1992), le déversement de la mare à l'aval de la barrière sableuse.



Profil en long du bassin endoréique et localisation de la mare de Bazanga



Profil en long du bassin endoréique et localisation de la mare de Sama Dey village



Profil en long d'une partie du bassin endoréique et localisation de la mare de Wankama

Figure 26 : localisation des mares de référence dans leur bassin versant

1.3 Caractéristique de l'alimentation en eau de la mare

La mare de Bazanga comme l'ensemble des mares de plateau ne reçoit pas les eaux d'écoulement de son bassin par l'intermédiaire d'un drain collecteur. L'alimentation se fait par un écoulement en nappe convergeant vers la mare. L'écoulement concentré reste toujours très faible et se réduit à quelques zones incisées proches de la mare.

La mare de Wankama est principalement alimentée par un collecteur parcourant l'ensemble du bassin versant, interrompu par une zone d'épandage à mi versant. Un autre drain, de dimension réduite, lié à la présence de la route nationale déverse aussi ses eaux dans la mare. Enfin, une partie du versant sud-ouest attenant à la mare (superficie de quelques hectares) présente de nombreuses ravines qui concentrent le ruissellement et se déversent dans la mare. Ce petit réseau ne fait pas partie du réseau traversant le bassin versant. Ces particularités hydrographiques sont communes aux surfaces drainées dans les vallées sableuses, généralement peu pentues, où la caractéristique la plus remarquable est la présence systématique d'une zone d'épandage à mi versant.

La mare de Sama Dey village est alimentée par plusieurs drains terminés par une zone d'épandage.

1.4 Végétation, utilisation humaine et agricole

Comme il a été présenté en section 3.4, la végétation liée à la présence des mares est spécifique de ce micro-écosystème. Il convient de signaler que la végétation naturelle présente à la mare de Bazanga se retrouve dans l'ensemble des mares de plateau étudiées avec des nuances qui résident dans la densité du couvert arboré. Cette variabilité de la couronne arborée est souvent la conséquence de la coupe par les villageois pour le bois de chauffe et la fréquentation des mares par le bétail. Les mares de plateau à proximité des villages et proches des grands chemins de transhumance sont sujettes à une forte dégradation. Elles sont aussi le lieu de bivouac des populations nomades telles que les Peulhs, les Beris et Touaregs.

La végétation à la mare de Wankama et, plus précisément, son absence presque totale, est aussi un trait commum à l'ensemble des mares installées dans les cours d'eau. C'est généralement l'utilisation des abords de la mare et de sa cuvette pour la culture de mil et la culture de contre saison qui est à l'origine du défrichement et d'un repeuplement par des espèces vigoureuses comme Guiera Sénégalensis. D'autre part, le matériau fin tapissant le fond de la cuvette est le matériau de base pour l'habitat traditionnel, appelé le "banko". Ainsi, au cours de la saison sèche, ces mares se transforment en mini-carrières comme c'est le cas à Wankama. C'est la présence des fosses à banko (matériau enlevé) qui dissuadent les bergers d'utiliser ces mares comme point d'eau pour leur troupeau.

La mare de Sama Dey, située à la périphérie du village du même nom, est totalement défrichée et les sols de son lit sont le support de cultures annuelles, telles que le mil et le sorgho en saison des pluies et le niébé en saison sèche, et de jardins fruitiers (manguiers).

1.5 Capacité de stockage

Les trois mares de référence ont des capacités de stockage s'échelonnant de quelques milliers à quelques centaines de milliers de m^3. Les volumes maximaux observés au cours des trois années d'étude sont respectivement de :

- 9000 m^3 (crue du 30/8/1992) pour la mare de plateau (Bazanga),

- 42 000 m^3 (crue du 22/08/1993) pour la mare de cours d'eau (Wankama) et,
- 220 000 m^3 (crue du 31/07/1993) pour la mare de vallée fermée (Sama Dey village)

Le volume moyen de stockage a peu de sens dans les mares temporaires où l'oscillation des stocks est violente et non linéaire.

L'histogramme présenté dans la figure 27 situe les mares de référence parmi l'ensemble de mares étudiées en prenant comme critère de comparaison le volume maximal observé sur la période d'étude. Il apparaît que l'ensemble de mares de plateau étudié est assez homogène, le volume maximal est compris dans une fourchette de 3500 à 10000 m^3. Concernant les mares installées dans les cours d'eau, le faible échantillon comprenant trois mares présentent la même dispersion que l'ensemble précèdent, les volumes maximaux sont compris entre 12 000 et 35 000 m^3.

Le lot des quatre mares de vallée fermée est nettement moins homogène que les deux précédents, les valeurs du critère sont compris dans un intervalle allant de 5000 à 220 000 m^3. Même si la crue du 31/07/1992 n'est pas représentative du régime observé au cours de ces trois années, *a posteriori*, ces valeurs disparates sont significatives de la diversité existant dans l'ensemble des mares situées dans des vallées fermées.

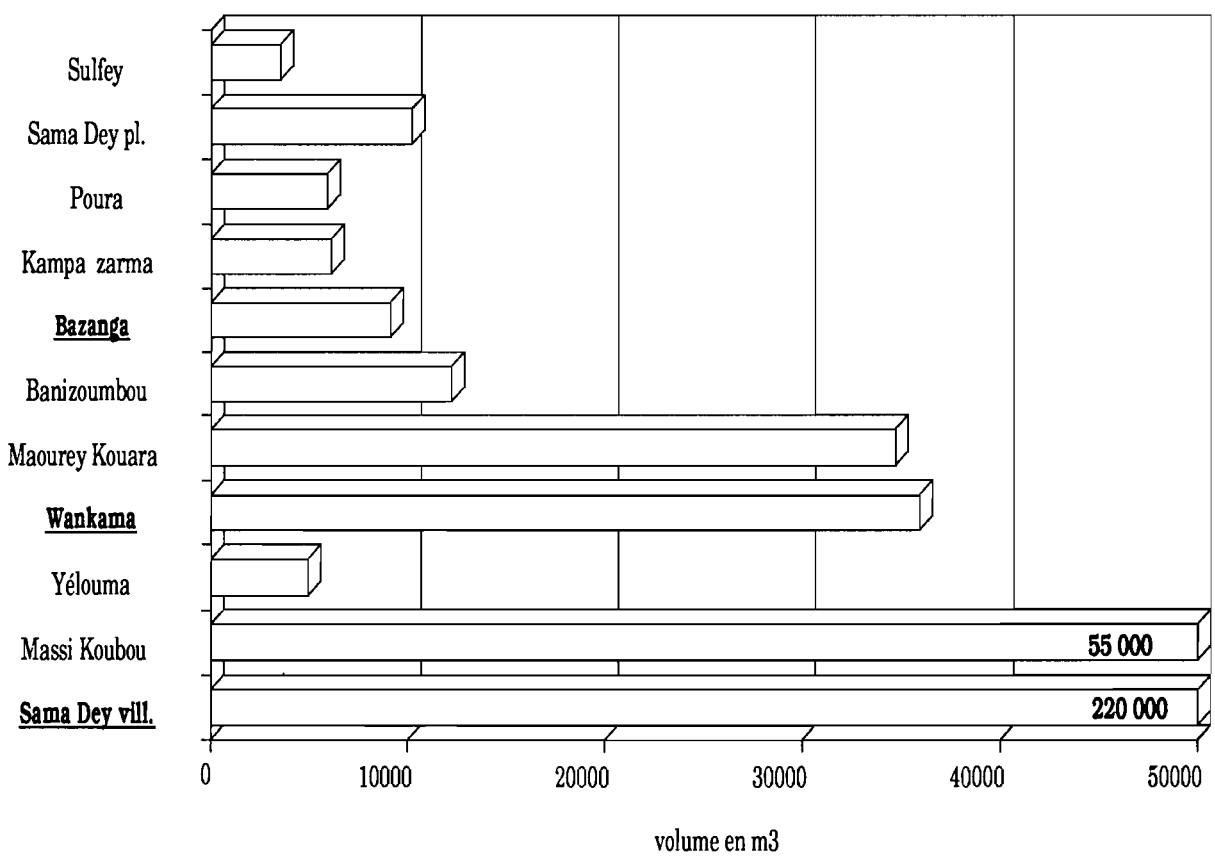


Figure 27 : comparaison des capacités de stockage maximal des mares étudiées

1.6 Indice de forme

Un indice de forme, et plus particulièrement de compacité, comme le rapport de la surface du plan d'eau à son volume maximum est un critère caractéristique de la morphologie de la cuvette de la mare et peut donc être mis en relation avec la classe géomorphologique à laquelle la mare appartient. Un indice inférieur à l'unité caractérise une mare plutôt encaissée et un indice supérieur à 1, une mare plutôt plate.

Les valeurs des indices Surface/volume présentées dans l'histogramme de la figure 28 permettent de distinguer les classes de mare préétablies. Les valeurs de cet indice se concentrent autour de 2 pour les mares de plateau, sont inférieures à 1 pour les mares de cours d'eau et se situent entre 1 et 1,5 (Yélouma mise à part) pour les mares de vallée fermée.

Même si l'échantillonnage par groupe de mare est petit, cet indice est logiquement révélateur du modelé propre à chaque ensemble géomorphologique c'est à dire très plat pour l'ensemble des plateaux à cuirasse ferrugineuse, incisé pour l'ensemble situé dans les cours d'eau, et plat pour l'ensemble situé dans les fonds de vallée fermée. Les mares de référence apparaissent morphologiquement représentatives de leur groupe.

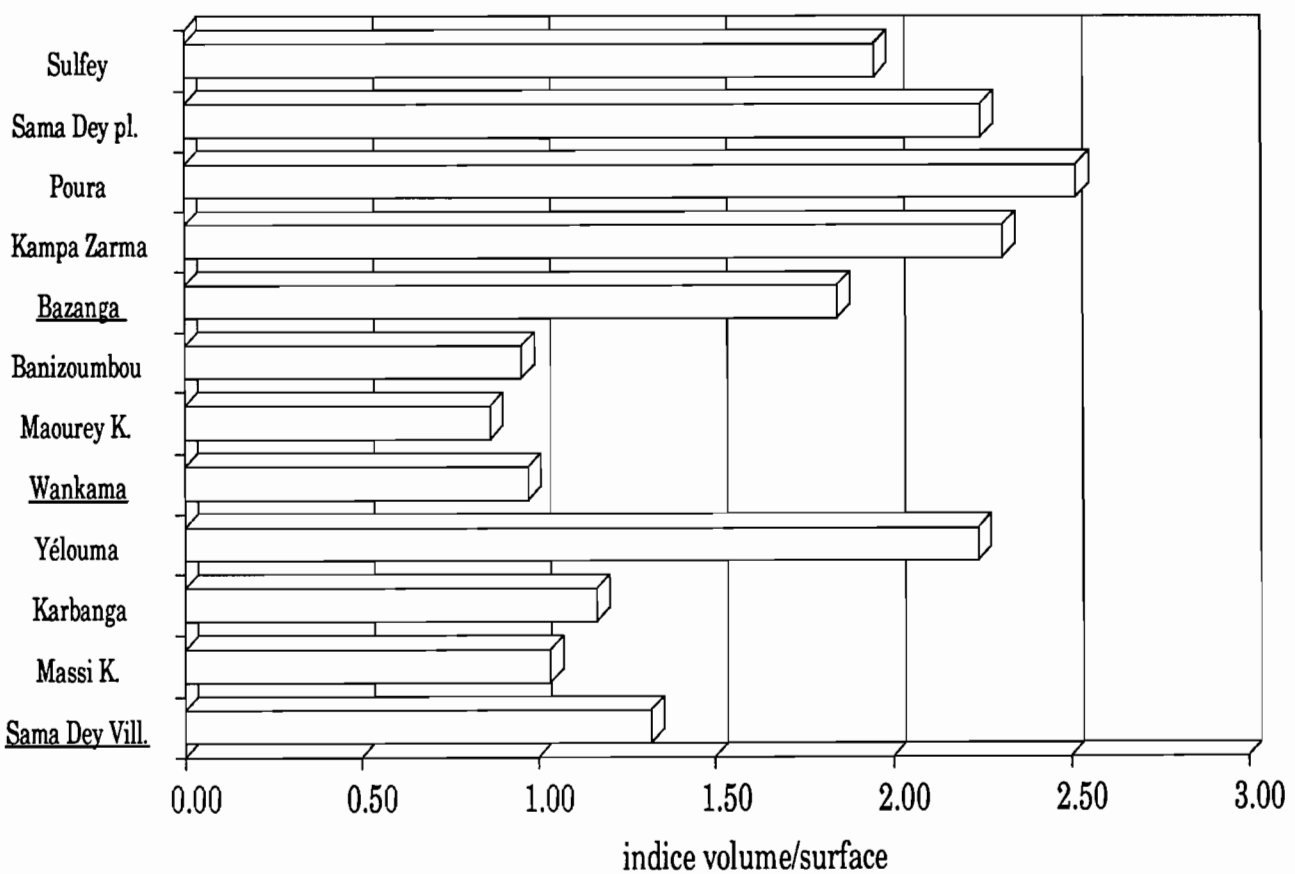


Figure 28 : comparaison des indices de compacité Volume/Surface des mares étudiées

1.7 La pérennité

L'ensemble des mares de la zone d'étude se comportent de manière identique :

- apparition du plan d'eau avec les premières pluies entre avril et juin selon la précocité de la saison des pluies

- assèchement du plan d'eau quelques jours après les écoulements de surface, pour ce qui concerne les mares de vallée fermée (sauf la mare de Yélouma), mais seulement une dizaine de semaines plus tard pour les mares de plateau et de cours d'eau c'est à dire aux environs du mois de décembre selon la date de fin de la saison des pluies. Les trois mares de référence répondent aux mêmes caractéristiques.

2 CONTEXTE PEDOLOGIQUE

Au cours de la saison sèche, l'assèchement progressif de chaque mare découvre une surface luisante de couleur gris clair et ayant un aspect plastique et continu. Au fur et à mesure de la décroissance de l'humidité au sein de ce tapis boueux, apparaissent des prismes généralement de taille décamétrique aux contours nettement délimités par des fentes. Bien développée aux alentours des points bas de la cuvette de la mare, cette organisation de surface s'atténue progressivement en amont de son lit (existence d'un gradient de couleur : du gris vers le brun clair, diminution de taille des prismes et des fentes) pour disparaître totalement et laisser la place à une organisation de surface semblable aux sols des versants proches de la mare.

2.1 Contexte pédologique de la mare de Bazanga

D'après Nagumo (1992), les sols présents sur le site de Bazanga peuvent être définis comme des sols argileux peu profonds de couleur brun rouge avec localement un dépôt éolien de surface. La connaissance des organisations pédologiques de la cuvette de la mare de Bazanga et de ses pourtours s'appuie sur un transect d'orientation SW - NE de 7 profils de sol et un transect d'orientation SE - NW. Ces observations ont été réalisées en saison sèche lorsque l'ensemble de la cuvette est à nu.

Nous avons concentré notre analyse sur trois des profils du transect SW - NE (figure 29) dont la description morphologique est donnée en annexe 3.

<u>Profil 1 (point le plus bas du lit)</u>

Ce profil révèle la présence d'une faible couche de sol constituée, entièrement ou en partie, de dépôts récents de texture fine (limono-argileuse) d'origine sédimentaire (en surface). La texture et la couleur des matériaux, ainsi que la présence d'éléments oxydés qui la composent, semblent indiquer qu'il y règne une hydromorphie importante, autant à la surface qu'au contact de la cuirasse. A la verticale de ce point bas, autant les sédiments de surface que la cuirasse continue et compacte semblent se comporter comme une barrière imperméable à l'évacuation verticale des eaux de la mare ce qui entraîne une altération des matériaux ferrugineux.

Profil 2 (situé dans la zone de transition entre les matériaux de couleur gris clair et les matériaux de couleur brune)

Dans ce profil, les caractères de dépôts sédimentaires ne subsistent qu'en surface par la présence d'une fine couche à texture limono-argileuse qui est posée sur un sol brun sablo-argileux peu profond. Il apparaît ici que l'influence de la mare est nettement moins importante et n'a pas créé un milieu hydromorphe strict similaire au profil précédent. En comparaison des sols typiques présents sur les plateaux à cuirasse ferrugineuse, celui ci se différencie par un démantèlement et une altération chimique plus poussée du matériau ferrugineux (éléments grossiers fragiles et enrobés d'argile).

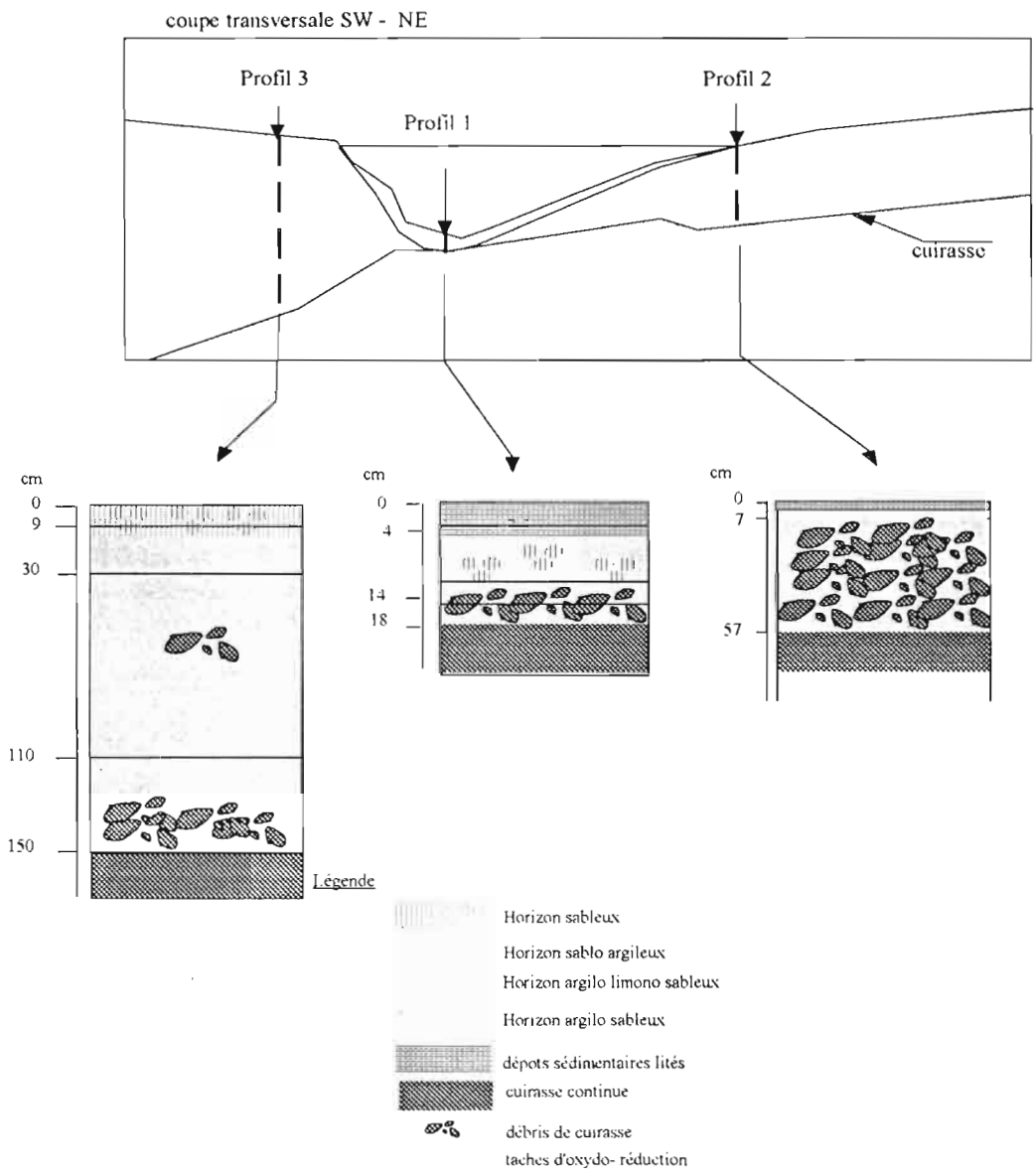


Figure 29 : profil pédologique dans le point bas (profil 1), dans la zone de transition (profil 2) et dans la zone d'inondation temporaire (profil 3) de la mare de Bazanga

Cette évolution plus poussée de ce sol est à mettre en relation avec un important régime hydrique interne provoqué par les inondations temporaires mais fréquentes du terrain.

Profil 3 (situé dans une zone temporairement inondée)

Ses principales caractéristiques sont : une compacité importante, une texture sablo-argileuse passant rapidement à argilo-sableuse en profondeur et la présence, très localisée (profondeur intermédiaire), de taches grises et rouges, indice d'un faible engorgement temporaire. La nature de ce sol et son évolution apparaissent peu influencées par la présence de la mare.

Par sa position topographique par rapport à cette dernière et ses caractéristiques physiques (compacité) et texturales, il fait partie d'un ensemble pédologique étendu à toute la frange sud - est du plan d'eau, qui se comporte comme une barrière latérale à l'extension du plan en surface, et dans une moindre part, à son infiltration latérale.

remarque : La cuirasse qui coiffe le plateau et que l'on retrouve à la base de plusieurs des profils du transect, présente un faciès très caractéristique du relief intermédiaire avec de larges volumes rouge violacé à porosité vacuolaire fine, séparés par des ciments bruns ou ocres souvent en liserés. La présence de faces de cassures à revêtements noir rougeâtre est également caractéristique. En revanche, vers la mare, elle est irrégulièrement coiffée par une autre cuirasse peu épaisse (inférieure à 50 cm), à structure nodulaire demi - centimétrique, dispersée dans un ciment brun, englobant des blocs de la cuirasse du relief intermédiaire (Boulet et Nascimento, 1991).

Extension verticale et latérale des dépôts sédimentaires

Le matériau sédimentaire limono-argileux est en discordance avec le matériau autochtone ancien (sol issu du démantèlement de la cuirasse). Son épaisseur et l'expression de ces caractères (couleur grisâtre, texture argilo-limoneuse, structure litée bien marquée dans les points bas) s'effacent progressivement du point bas de la cuvette au point haut où la fréquence des inondations a été suffisante pour marquer sa surface d'un dépôt sédimentaire. La disparition progressive des caractères sédimentaires laissent la place au sol autochtone. La transition d'un sol franchement sédimentaire à un sol franchement lithosolique se distingue par le passage à des sols qui présentent un démantèlement des matériaux ferrugineux et une altération chimique plus poussée. De manière plus précise, nous pouvons donner une vue de la superposition des dépôts sédimentaires sur le matériau autochtone et le niveau de la cuirasse, en extrapolant les profils observés sur les deux transects réalisés à cette mare. La géométrie des différentes organisations pédologiques est présentée dans la figure 30, qui comprend un transect d'orientation NW - NE composé de 5 profils, un sondage ; un transect d'orientation SE- NW composéd'un profil et de deux sondages.

Ces deux transects permettent de mettre en évidence l'assise des dépôts sédimentaires sur la cuirasse dans les points bas et la discordance existant entre les sols hérités du démantèlement de la cuirasse à la limite d'inondation des eaux de la mare. D'autre part, on remarquera une dissymétrie des dépôts entre le versant SW de la cuvette et son versant opposé. Au même niveau topographique, cette épaisseur varie de 10 (versant NE) à 40 cm (versant SW).

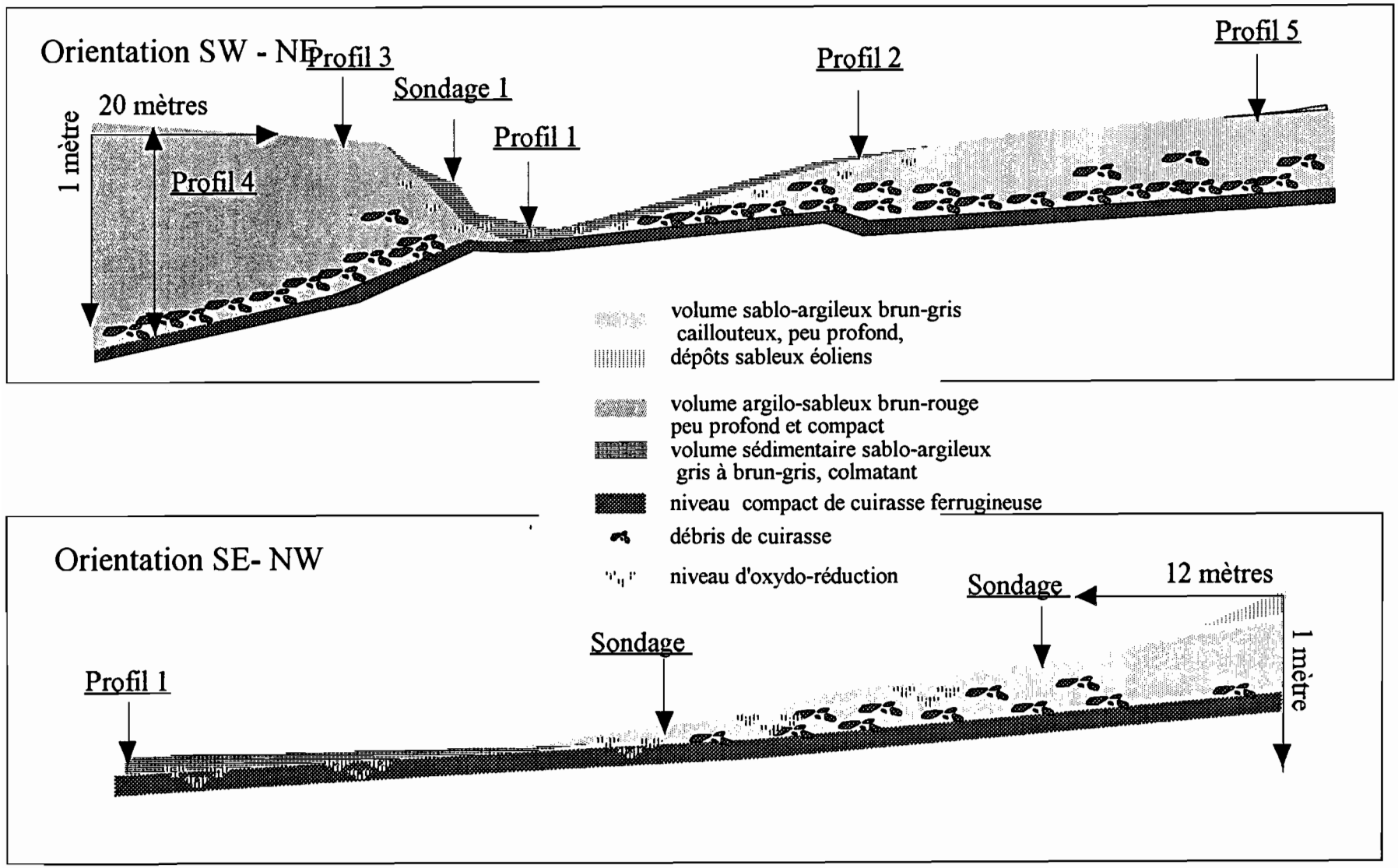


Figure 30 : vues transversale et longitudinale schématiques des principales organisations pédologiques à la mare de Bazanga

Avec un léger pendage NE SW, la cuirasse ferrugineuse s'enfonce notablement à la verticale du bourrelet de sol (profil 3). Ce bourrelet est d'ailleurs un lieu largement colonisé par une végétation herbacée et ligneuse anormalement développée pour une situation identique (D'Herbès, communication personnelle).

Si par les multiples sondages et profils effectués le long de ces transects, on découvre un matériau ferrugineux compact et continu, il est bien entendu difficile d'affirmer sa totale continuité et imperméabilité entre les niveaux de surface et inférieurs à celle ci. Malgré tout, les indices d'hydromorphie constatés dans le plancher des dépôts semblent confirmer l'hypothèse d'une forte imperméabilité, tout au moins, sous la mare de Bazanga.

2.2 Contexte pédologique de la mare de Wankama

D'après Nagumo (1992), le site de la mare de Wankama est compris dans une unité de sol appelée : sols profonds à sables blancs associés à des sols sableux brun rouge vif . Cette unité de sol est associée à l'unité géomorphologique "lit de rivière".

La connaissance des organisations pédologiques de la cuvette de la mare de Wankama et de ses pourtours s'appuie sur deux fosses de 3 mètres de profondeur : l'une, située au centre de la cuvette et proche du point le plus bas, l'autre à sa périphérie, située à l'extérieur de la zone à matériaux fins de couleur grise. Ces fosses d'observations ont été complétées par des sondages à la tarière sur deux transects d'orientation SW-NE et NO-SE (figure 32). Ces observations ont été réalisées en saison sèche qui laisse à nu l'ensemble de la cuvette. Egalement situé dans la zone à matériau gris, un sondage jusqu'à 9 mètres de profondeur a été réalisé à l'aide d'un pénétromètre.

Nous avons basé notre analyse du milieu pédologique lié à la mare sur les deux fosses pédologiques (figure 31) dont la description morphologique est présentée en annexe 3.

Profil 1 (situé au centre de la mare)

Cette succession d'horizons s'interprète, à première vue, comme une superposition de dépôts sédimentaires. Le niveau supérieur (0 - 30 cm) argilo-limoneux correspondrait au dépôt actuel, sa base se composant de petits dépôts de sable fin déformés par la pédoturbation. Les dépôts plus grossiers (30 - 60 cm) pourraient correspondre à des dépôts fluviatiles avant la formation de la mare. Par leur épaisseur (au moins 60 cm), leur texture très fine et leur propriétés gonflantes (fentes à la dessiccation), ces deux niveaux peuvent être considérés comme le plancher peu perméable ou imperméable, selon les conditions d'humidité de la mare.

Cependant, il est intéressant de noter que ce milieu peu filtrant semble être le siège d'une évolution pédologique verticale (Boulet et Nascimento, 1991). En effet, l'observation détaillée du profil montre qu'il y a une modification de la disposition sédimentaire des niveaux de surface. D'une part, la base de l'horizon 30 - 60 cm extrêmement contournée dans le détail, ne peut évoquer une limite sédimentaire mais une limite de transformation. D'autre part, la présence d'îlots à sables beiges dans l'horizon argilo-limoneux et la

présence d'îlots argilo-limoneux dans l'horizon argilo-sableux pourraient aussi être interprétées comme l'existence d'un front de transformation pédologique.

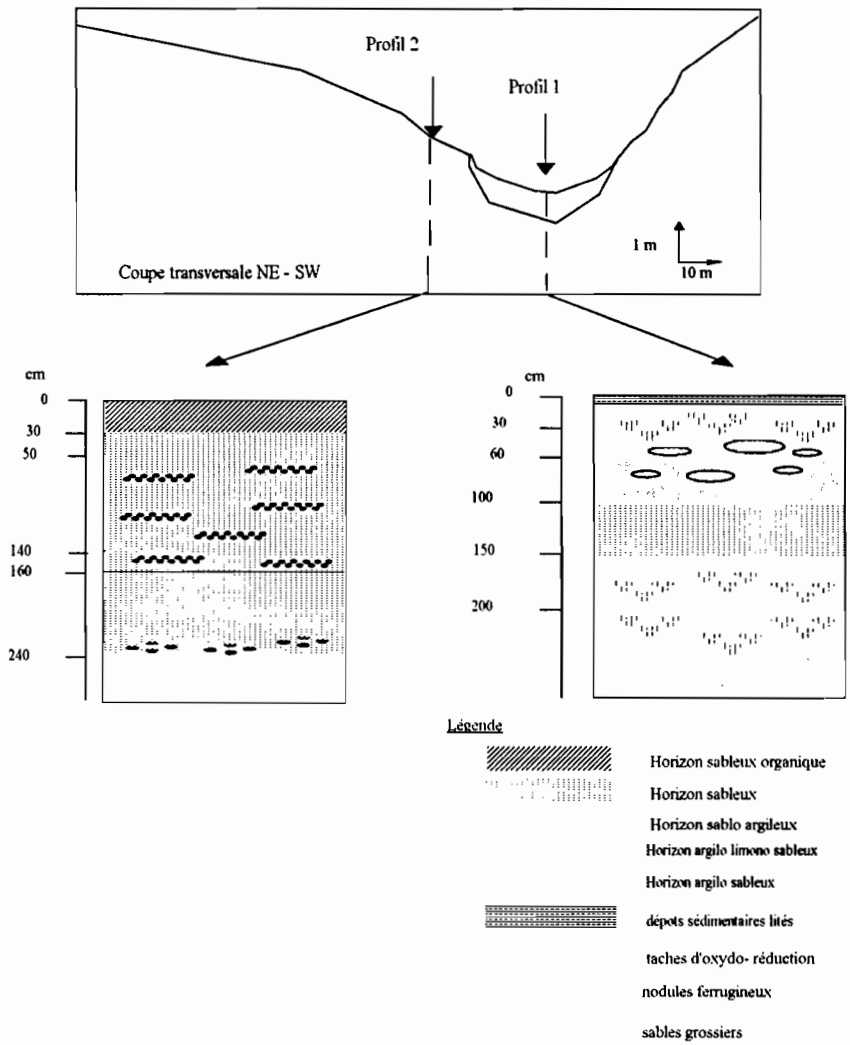


Figure 31 : profil pédologique dans le point bas (profil 1) et dans la zone temporairement inondée (profil 2) de la mare de Wankama

Profil 2 (situé dans la zone temporairement inondée)

Nous sommes en présence d'un sol sableux ferrugineux peu lessivé typique des bas - fond : horizon B à 10 YR (Gavaud, 1965). Malgré sa proximité, on ne retrouve pas les caractères du domaine sédimentaire lié à la mare, que ce soit en surface ou en profondeur. Même si ce sol est souvent submergé temporairement par les hautes crues, l'importance du régime hydrique interne que pourrait induire cette submersion et la percolation de l'eau à travers ce profil ne sont pas très perceptibles par l'observation morphologique. Seule la teinte pâle des sables dénote l'éxistence passée ou actuelle d'un drainage vertical marqué. Mis à part l'horizon présentant une phase indurée mais non imperméable, les niveaux inférieurs (200 cm et plus) de

sables existant dans ces sols paraissent filtrants (forte macroporosité liée à la texture sableuse). L'absence de traces d'hydromorphie à ces niveaux, même temporaire, va dans ce sens.

Sondage profond à la verticale de la zone de dépôts sédimentaires

Les observations qui suivent sont issues d'un sondage réalisé à l'aide d'un pénétromètre. Muni d'un cylindre de prélèvement de un mètre de long ayant un diamètre d'environ 10 cm, ce type d'outil présente l'inconvénient de soumettre le sol prélevé à des déformations mécaniques. De ce fait, nous retiendrons de ce profil uniquement les variations des principaux caractères physiques tels que : la granulométrie, la couleur, la présence et nature d'éléments grossiers et les indicateurs du régime hydrique.

Le sondage est localisé dans la zone à dépôts sédimentaires, à 1,85 m au dessus du point le plus bas de la mare.

En surface, on retrouve une organisation sédimentaire moins exprimée que dans le profil 1. Verticalement, cette organisation a une épaisseur de quelques centimètres (<10 cm). Atteints à une profondeur d'environ 900 cm, les sédiments argileux du Continental Terminal sont surmontés de différents niveaux , le passage de l'un à l'autre se faisant souvent par de brusques variations des caractères.

D'un point de vue textural et fonctionnel, deux principaux niveaux peuvent être mis en évidence : un premier niveau de la surface à environ 600 cm. Il présente une granulométrie orientée vers le pôle sableux avec quelques variations localisées sur de faibles épaisseurs :

- légèrement limoneux en surface
- à tendance sablo-argileux au niveau 130 cm et sur une épaisseur de 70 cm
- incorporée à un domaine induré composé d 'éléments grossiers : niveau 480 - 530 cm

L'autre moitié du profil (niveau 600 à 900 cm) évolue avec un net gradient vers le pôle argileux à 900 cm. Dans ce dernier, il est à noter que la couleur de la matrice, fort hétérogène, est composée de deux domaines distincts : un domaine jaune vif à jaune beige et un domaine rouge. Ces deux domaines sont organisés en marbrures dans le haut du niveau argileux. Ils sont souvent associés à des tâches rouges de plus en plus grandes et sont généralisés à la base du niveau argileux (plafond du Continental Terminal). On retrouve ces deux domaines avec des caractères moins exprimés au dessus de la zone indurée à fort chargement caillouteux (480 - 530 cm) et au dessus du niveau sablo-argileux (niveau 130 cm). Un niveau caillouteux semblable se retrouve dans les autres sondages faits dans le kori de Dantiandou. Les associations de sol sableux à couleur beige à jaune et de domaines marbrés souvent situées en amont de niveau induré ou lors de brusques changements de texture tendent à prouver, d'une part, que les sols situés sous la mare sont le siège d'un fort drainage vertical et, d'autre part, qu'il existe de fortes variations des conditions d'aération de certains niveaux sans doute dues à des engorgements temporaires (niveau supérieur sableux) et à la fluctuation du niveau de la nappe (niveau inférieur argileux).

Extension verticale et latérale des dépôts sédimentaires

Le milieu pédologique sous la mare de Wankama et ses pourtours est beaucoup plus complexe que celui de Bazanga. En effet, dans l'axe de drainage ancien où se trouve la mare, les sols sableux autochtones sont l'assise de niveaux sédimentaires, d'origines diverses, récents et anciens : dépôts sédimentaires fluviatiles (avant l'existence de la mare) et dépôts sédimentaires récents (dépôts de la mare). Cette superposition de surfaces de type sédimentaire est associée par endroit à un remaniement des matériaux autochtones et sédimentaires (pédoturbation), d'une part, et à des zones de transformation pédologique (néoformation argileuse), d'autre part. De par son origine, elle présente des caractéristiques très variables (texture, couleur, épaisseur). Pour cela, l'extension proposée doit être considérée comme schématique.

Par une coupe transversale (orientation SW- NE) et longitudinale (orientation NW-SE), nous avons représenté l'extension du niveau sédimentaire (figure 32) de la mare de Wankama. Les niveaux pédologiques sous jacents sont simplifiés.

De la même manière qu'à Bazanga, l'expression des caractères texturaux et srtucturaux sédimentaires s'atténue progressivement à la périphérie de la zone sédimentaire. Tout autant marqués par leur couleur et leurs fentes de dessiccation, en surface, au cours de la saison sèche, les dépôts sont verticalement plus développés. Ils peuvent atteindre une épaisseur d'environ un mètre. Cette épaisseur est visible dans les fosses creusées pour l'exportation de ce matériau servant à la construction de l'habitat traditionnel (matériau appelé *banko*). Les fosses à *banko* et du profil 1, par sa situation basse et sa surface plane est le lieu où l'eau stagne le plus longtemps tout au long de l'année. Les sondages réalisés montrent qu'en dehors de cette zone, l'épaisseur du niveau sédimentaire est nettement moins importante. Très rapidement, elle devient inférieure à 30 cm et ne mesure seulement que 10 cm (sondage 4) à la périphérie SE.

En franche opposition aux niveaux sous-jacents de la mare de Bazanga, les organisations pédologiques inférieures au niveau sédimentaire sont sableuses avec quelques phases argilo-sableuses et une tendance à l'engorgement temporaire à différents niveaux (taches d'oxydo-réduction : profil 1, 2 ; et marmorisation : sondage 4 bis).

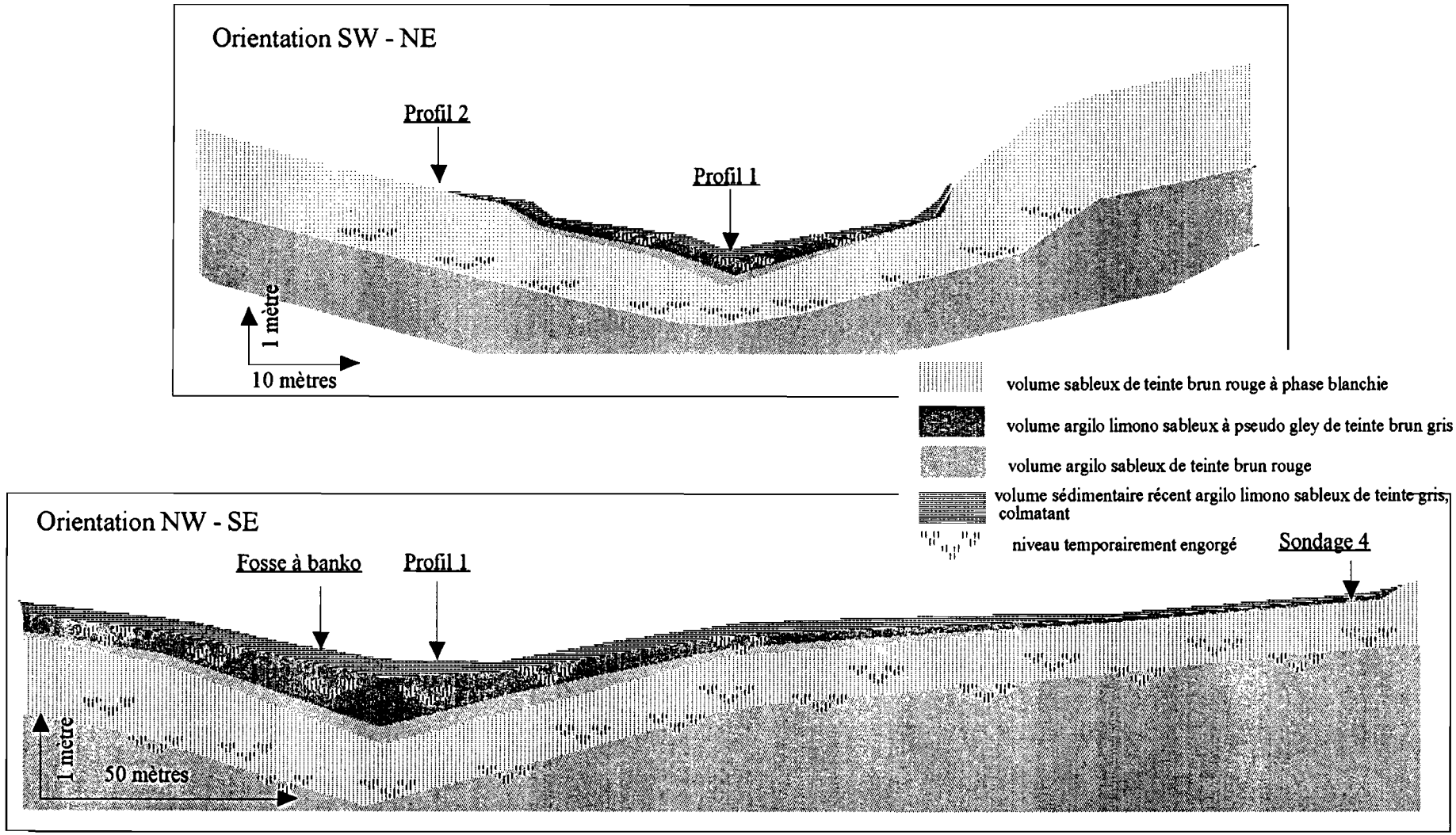


Figure 32 : vues transversale et longitudinale schématiques des principales organisations pédologiques à la mare de Wankama

2.3 Contexte pédologique à la mare de Sama Dey

D'après Nagumo (1992), le site de la mare de Sama Dey, comme la majorité de son bassin d'alimentation, est localisé dans une unité de sol caractérisée par l'association "sols sableux profonds de couleur brun rouge".

Extrait d'un transect effectué au sud du Bassin versant de Sama Dey (5 km au sud de la mare), le profil type (présenté en annexe 3) de l'association de sol est décomposé en quatre horizons de texture proche limono-sableux en surface à sablo-limoneux en profondeur (à 270 cm). La fraction argileuse est inférieure à 5% en surface. La fraction sableuse est toujours supérieure à 70% et elle se répartit également entre les sables fins et les sables grossiers. La couleur des horizons évolue du brun rouge à brun rouge vif en surface (5YR et 2.5 YR) au brun jaune à blanchâtre en profondeur (7,5 YR à 10YR).

Les ensembles pédologiques de surface paraissent faiblement sédimentés. En effet, comparativement aux mares précédentes, il est difficile de distinguer une zone de dépôts sédimentaires franche et une zone non sédimentée. L'observation de la surface et de quelques centimètres en profondeur le long d'un transect point bas - périphérie montre que le matériau évolue d'une texture fine (argilo-limoneuse) vers une texture moyennement fine limono-argilo-sableuse avec un passage progressif d'un pôle à un autre. La structure et la teinte de la couche de surface met en évidence un fort pourcentage de matière organique. Aucune discordance verticale nette ne se distingue quelle que soit la position par rapport au point le plus bas. A la différence des deux mares précédentes, celle ci est un lieu de culture (plantations de sorgho, niebé et mil) et aussi un verger où les villageois par leur travail du sol (binage et bêchage) ont assimilé les fines couches argilo-limoneuse déposées après chaque crue à la couche organique inférieure.

Une description sommaire, effectuée sur les parois de l'un des puits du village de Sama Dey, donne un aperçu de la pédologie en profondeur. Le profil est très homogène sur toute l'épaisseur avec un ensemble invariablement limono-sableux à sablo-limoneux évoluant suivant les niveaux vers des teintes grisâtres (niveaux inférieurs et supérieurs) à une teinte ocre (sur une faible épaisseur aux niveaux intermédiaires). Un niveau induré (faible épaisseur) ferrugineux s'intercale à une profondeur d'environ 12 mètres ainsi qu'un niveau induré composé d'oolithes ferrugineuses à une profondeur de 25 mètres. Enfin, il est à noter la présence de cavités de diamètre 0,5 cm que l'on rencontre à partir de 15 mètres de profondeur jusqu'à 20 mètres. On observe aussi une forte humidité sur les parois du puits. La description est présentée en annexe 3.

2.4 Caractéristiques physiques et hydriques des principales organisations pédologiques

2.4.1 Distribution granulométrique comparée de la zone sédimentaire et du versant des mares (horizon de surface)

Sont portées sur la figure 33, les distributions granulométriques de l'horizon de surface de la zone sédimentaire (point le plus bas de la mare) de chacune des mares et celles des horizons de surface des sols

correspondant à la zone d'inondation temporaire et/ou à la zone rarement inondée. Les distributions granulométriques des zones sédimentaires présentent une fraction inférieure à 50 µ entre 25,7 % (Bazanga) et 56,9 % (Sama Dey) de la matrice. Le contraste de texture est très net entre les horizons de surface des différentes zones (figure 33), surtout pour la mare de Wankama où l'on passe sans transition d'un horizon de surface à texture argilo-limoneuse (fraction < 50 µ de 30 %) à un horizon à texture sableuse (fraction < 50 µ de 5,5%). Le tableau A31 en annexe 3 donne la granulométrie des horizons de surface et de profondeur des sols des mares de référence.

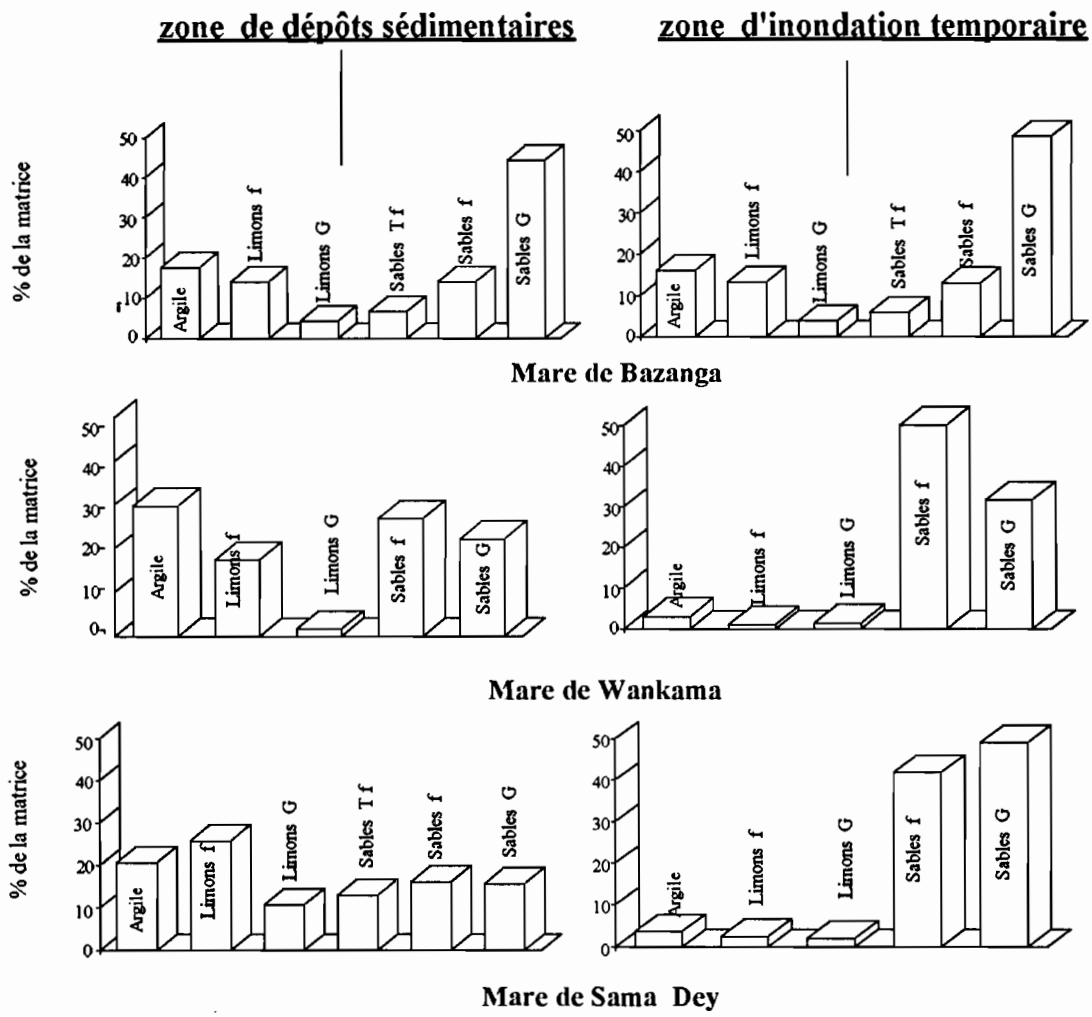


Figure 33 : distributons granulométriques de la surface du lit des mares

2.4.2 Discontinuité de texture en profondeur : les profils granulométriques

La discontinuité texturale des volumes pédologiques identifiés dans les trois mares de référence peut s'apprécier par les profils des distributions granulométriques dans la figure 34. Ils mettent bien en évidence

la localisation en surface d'un horizon de texture fine à très fine qui se limite verticalement à une épaisseur d'environ 30 cm dans la zone sédimentaire de Wankama et d'au moins 10 cm à la mare de Bazanga. Les profils non localisés dans la zone sédimentaire présentent des distributions granulométriques verticalement plus homogènes.

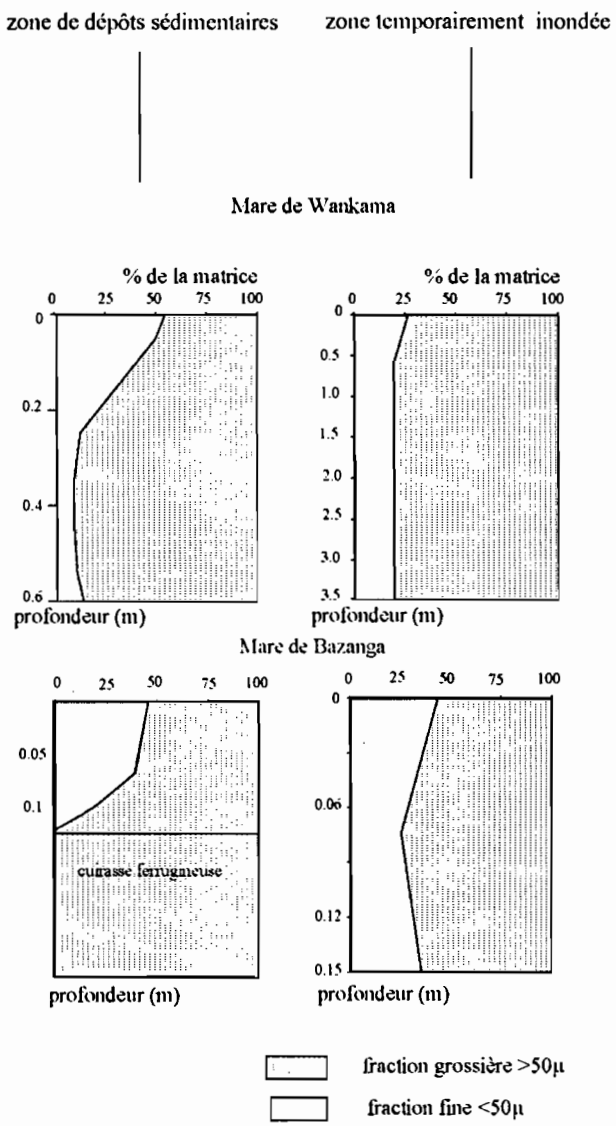


Figure 34 : discontinuité verticale de la distribution granulométrique du lit des mares

2.4.3 Apport du suivi chimique des eaux des mares à la connaissance des dépôts sédimentaires fins

Les eaux des mares de la région en fin de saison des pluies ont une très faible minéralisation (entre 20 et 30 µS.cm-1) avec en revanche une forte charge en M.E.S. constituée principalement de particules

argileuses inférieures à 1µ. Au cours de l'assèchement de la mare, le pH reste près de la neutralité (6,5 à 7,5), le faciès chimique fortement bicarbonaté alcalin en début de saison sèche, évolue vers un faciès chloruré alcalin en fin de saison sèche. A partir des données de pH, température et teneur en éléments, on a calculé, par le programme WATEQF (Plummer et *al.*, 1976), la distribution thermodynamique des différents minéraux en équilibre avec la solution au cours de la diminution de volume. Les diagrammes d'équilibre des silicates montrent que l'on est dans le domaine de stabilité de la kaolinite ce qui est le cas le plus courant pour des eaux de surface, mais on peut noter que l'évolution de la solution par évaporation tend à mener vers le pôle montmorillonitique. Les sédiments fins seraient composés, d'une part, par un apport allochtone d'argile et, d'autre part, par néogenèse de kaolinite et de smectite.

2.4.4 Nature et propriétés des sédiments fins.

L'observation en surface de la zone de dépôts sédimentaires à plusieurs états d'humectation nous a donné des informations quant à sa nature et ses propriétés mécaniques et hydriques. La présence de matériau argileux explique en partie la transformation structurale de surface entre l'état sec (fentes de retrait en surface : retrait des argiles) et l'état saturé (matériau continu, aspect luisant : gonflement des argiles) et met ainsi en évidence la sensibilité du matériau à la teneur en eau. D'autre part, les diagrammes d'équilibre des silicates (Desconnets et *al.*, 1993) ont montré que les eaux des mares, par évaporation, tendaient vers le pôle montmorillonitique. L'association d'argile de type smectite, kaolinite avec un fort pourcentage de limons fins a pour résultat de créer à l'état saturé une couche de surface colmatée où la structure continue de surface et la diminution de l'espace poral de par le gonflement des matériaux argileux, vont fortement limiter la conductivité hydraulique de part et d'autre du matériau sédimentaire fin de surface.

2.4.5 Notion de zone colmatée et de zone non colmatée

A partir de critères morphologiques et texturaux, et des propriétés mécaniques et hydriques, nous pouvons distinguer deux zones dans l'horizon superficiel sur lesquelles s'étendent, temporairement ou en permanence, les eaux d'une mare :

- **une zone colmatée** qui sera caractérisée par un **matériau à texture fine d'origine sédimentaire et de couleur gris à brun gris** avec une structure continue et un aspect luisant à l'état saturé lui conférant une **conductivité hydraulique réduite,**

-**une zone non colmatée** qui sera caractérisée par la **disparition des caractéres morphologiques** de la zone colmatée, d'une part, et le rapprochement des caractéristiques morphologiques et texturaux des sols autochtones hors de l'influence hydrique de la mare, d'autre part.

3 CONTEXTE MORPHOLOGIQUE

3.1 Morphologie de la cuvette réceptrice

3.1.1 Vue bidimensionnelle du relief de la cuvette réceptrice

La figure 35 présente une vue synthétique de type bidimensionnel de la cuvette de chaque mare. Elle est accompagnée d'un profil moyen (trait gras). Elle est le résultat du découpage du relief en plusieurs profils d'orientation NW-SE (coupe transversale) et d'orientation NE-SW (coupe longitudinale). Ainsi, nous pouvons facilement distinguer la forme générale de la cuvette, les singularités du relief et l'évolution de la coupe des faibles altitudes vers les fortes.

La mare de Bazanga peut se caractériser par une coupe transversale moyenne de type convexe, très peu encaissée, dont la dénivelée moyenne est de 0,6 mètres pour une ouverture de 120 mètres. L'ensemble des profils met en évidence une cuvette au relief très régulier (peu de singularités). Le rapport des distances entre les profils transversaux et longitudinaux est inférieur à 2. La coupe longitudinale est de type concave avec le même encaissement et une dénivelée moyenne de 0,88 mètres. On pourra caractériser la mare de Bazanga par une forme ovale avec un très faible encaissement et des versants de type convexe.

Assise dans un bas-fond de vallée, faisant anciennement office de cours d'eau, la cuvette de la mare de Wankama a une section transversale très encaissée en comparaison de celle des deux autres mares. Elle a une ouverture de 80 mètres pour une dénivelée maximale de 4 m avec un versant ouest légèrement plus abrupt que le versant est. Les différents profils montrent de fortes irrégularités sur le plancher de la cuvette (nombreuses fosses à *banko*). Le profil de la section longitudinale, qui est à l'origine le fond de l'ancien drain, est évidemment moins encaissé et s'étend sur plus de 300 mètres. La mare de Wankama a un plan d'eau de forme très allongée et très étroite.

Au centre d'une vallée sèche ayant un profil transversal de quelques kilomètres pour une dénivelée d'une cinquantaine de mètres, la mare de Sama Dey village est caractérisée par une coupe transversale moyenne de type concave, très peu encaissé présentant une dénivelée moyenne de 1,4 mètres pour une ouverture de 430 mètres. Les profils mettent en évidence une section plus encaissée en amont s'élargissant progressivement vers les points bas. Le rapport des distances entre les deux sections est proche de 2. Les profils de la section longitudinale sont aussi de type concave avec quelques ruptures de pente dans les points bas. Pour une même altitude, cette cuvette a une forme triangulaire légèrement allongée.

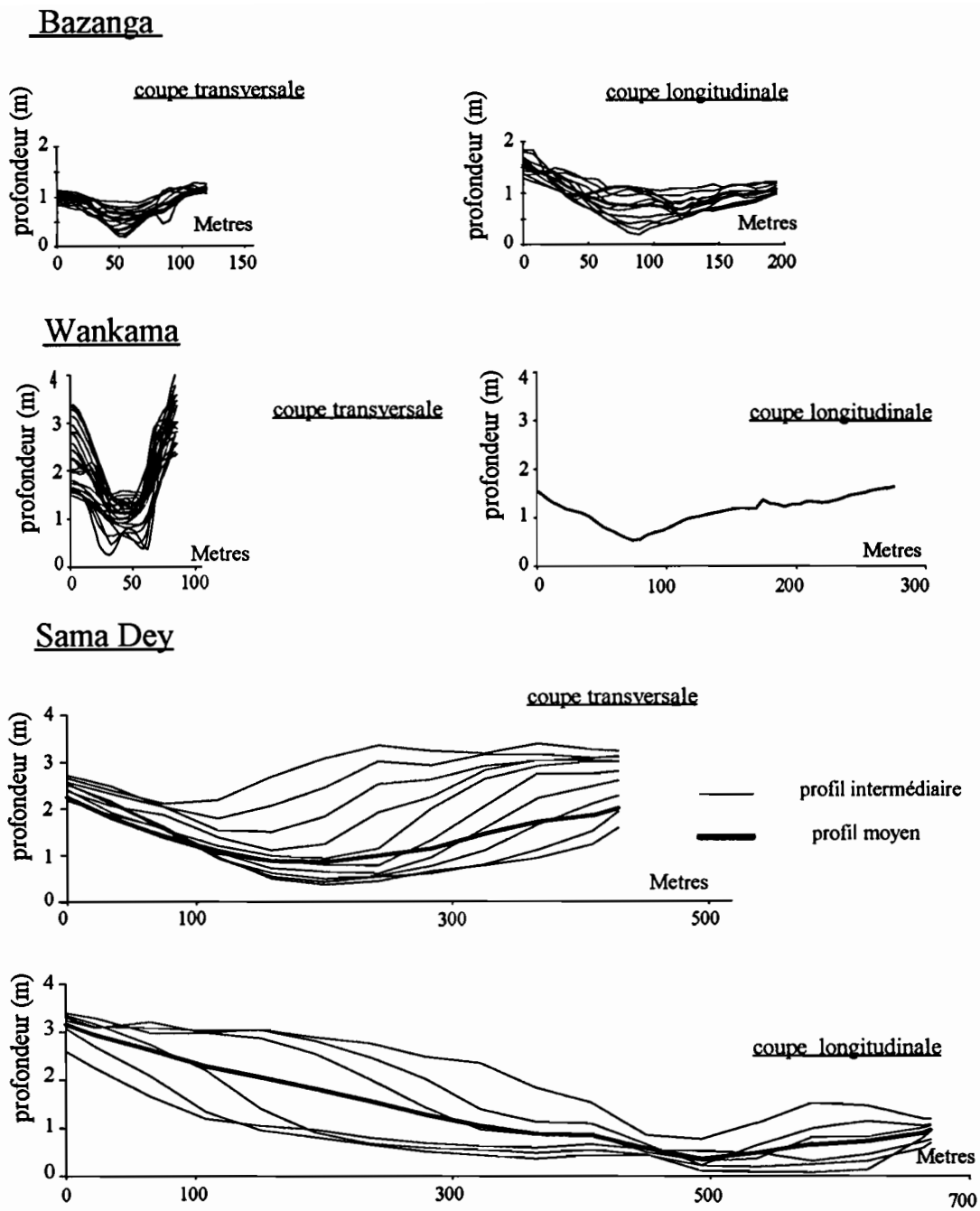


Figure 35 : coupe transversale et longitudinale du lit des mares de référence

3.1.2 Diagramme des pentes

Les diagrammes des pentes des trois mares de références, présentés dans la figure 36, complètent l'aperçu de leur morphologie donné dans le paragraphe précédent. De ces représentations, on retiendra des

pentes moyennes allant de 0,05 à 0,88%, donnant pour la mare de plateau et la mare de vallée fermée des diagrammes similaires. Ils mettent en évidence le faible encaissement de ces cuvettes ainsi qu'une symétrie entre les profils transversaux et longitudinaux. Le diagramme des pentes de la mare de Wankama souligne l'encaissement très marqué de sa cuvette avec une pente moyenne des versants égale à 4%. Mis à part les fortes pentes localement dues aux fosses à *banko*, le diagramme du profil longitudinal est plus monotone avec des pentes inférieures à 0,01%.

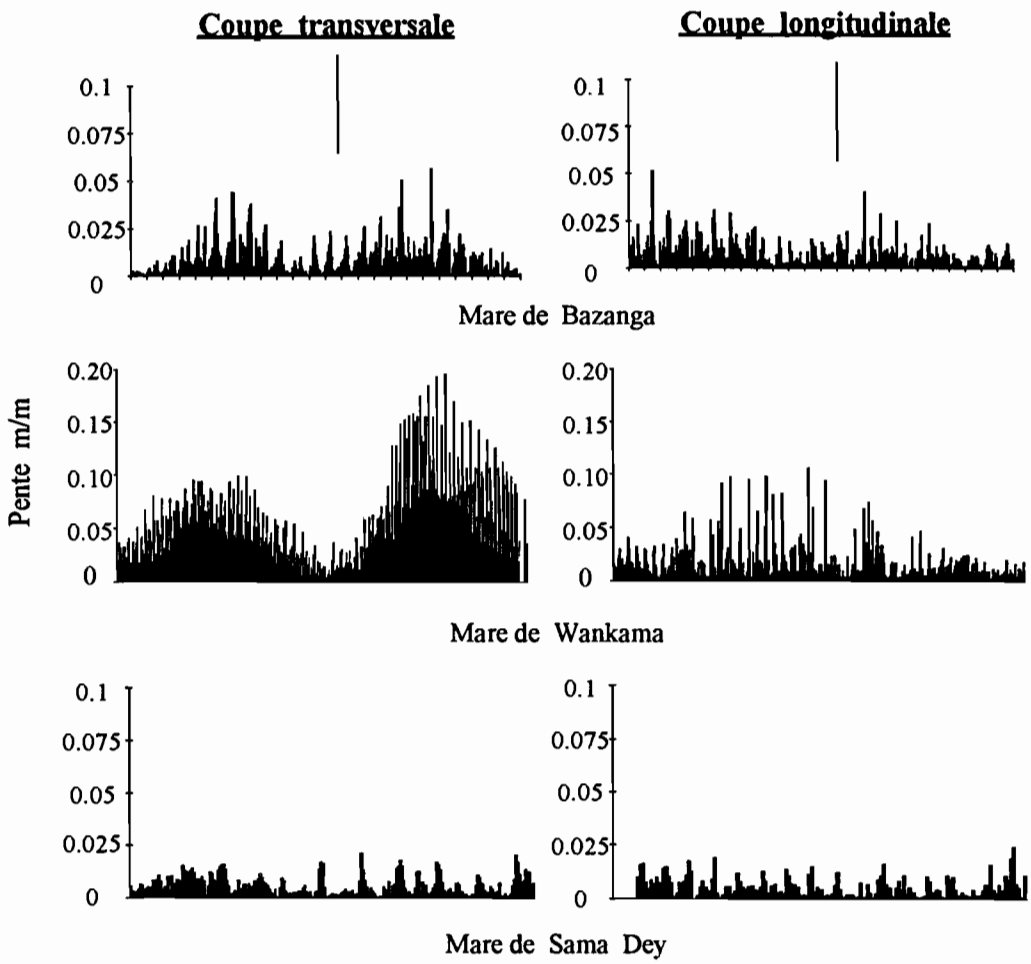


Figure 36 : diagramme des pentes du lit des mares de référence

3.2 Influence de la morphologie de la cuvette sur l'extension spatiale du domaine sédimentaire

Il est intéressant de mettre en relation les connaissances acquises lors de l'analyse détaillée de quelques mares (géométrie, morphologie et pédologie) avec nos autres observations dans la région d'étude.

La première relation que l'on peut établir concerne les mares situées sur les plateaux à cuirasse ferrugineuse. Pour une grande majorité de forme arrondie avec une section très ouverte, on constate la présence d'une extension homogène en profondeur, de faible épaisseur et couvrant dans la majorité des cas la superficie de la cuvette inondable et fréquemment inondée. D'autre part, il est à noter que la transition des dépôts sédimentaires vers le matériau autochtone est très graduelle.

A l'inverse, et d'une manière assez générale, le domaine sédimentaire ne recouvre qu'une faible partie du lit des mares installées dans les cours d'eau anciens. En effet, on observe une sédimentation durable et épaisse uniquement dans le fond des cuvettes, anciennement le fond du cours d'eau. De nature et en partie d'origine différentes, le domaine sédimentaire est d'épaisseur très variable et sa transition latérale vers les versants sableux très abrupte.

En ce qui concerne les mares situées dans les bas fonds de vallée fermée, il est difficile de donner une règle générale quant à l'extension des dépôts sédimentaires dans le cas où ils existent.

S'il est vrai que les eaux régionales de surface arrivant aux différentes mares ont des caractéristiques physico-chimiques tout à fait semblables et évoluent vers les mêmes pôles chimiques de minéralisation (Desconnets et *al.*,1993), l'épaisseur des dépôts et leur extension selon la mare restent très différentes. Les informations obtenues au cours de cette étude et l'analyse qui en est issue, se révèlent trop limitées dans le temps pour appréhender des modifications de comportement à la sédimentation. Il est ainsi difficile de savoir par là si chacun des systèmes récepteurs d'eau est en équilibre avec le régime hydrologique actuel.

Néanmoins, en se basant sur l'analyse détaillée des quelques mares témoins et une observation plus succincte des autres mares régionales, on retiendra que, comparativement à la surface maximale d'inondation de la cuvette, la zone colmatée correspond à une surface négligeable dans le cas des mares de vallée fermée[1] (< 10 %), à une surface moyennement étendue (<10-40%) dans le cas des mares installées dans les anciens cours d'eau et à une surface très étendue (>40%) dans le cas des mares de plateau.

Le tableau 16 donne plus précisément le pourcentage des surfaces colmatées par rapport aux surfaces inondées maximales observées entre 1991 et 1993 pour les mares étudiées. La zone sédimentaire est délimitée essentiellement par le passage à un matériau de couleur brun rouge pour les matériaux issus des cuirasses latéritiques et à un matériau de couleur brun clair à texture sableuse pour les matériaux de vallée. A posteriori, cette délimitation spatiale stricte, au sens pédologique, a été validée par l'analyse limnimétrique des épisodes de vidange présentée dans l'étude de la vidange (chapitre 5).

---

[1]La mare de Yélouma (coordonnées : 13° 26 97 N -2° 30 80 E) présente un pourcentage de 49 % de la zone colmatée. Il semblerait que dans cette mare, les niveaux observés les années précedentes étaient nettement supérieurs (souvenirs de villageois). Le rapport entre surface colmatée et surface maximale aurait été donc moins elevé.

Tableau 16 : surface de la zone colmatée dans les cuvettes des mares témoins

		surface de la zone colmatée	surface à la hauteur maximale observée	% surface colmatée
		m²		%
		mares de plateau		
mare de référence	**Bazanga**	11700	20600	57
	Kampa zarma	17800	21400	83
	Sama Dey pl.	9100	27900	32
	Sulfey	8000	11900	67
	Poura	12700	17000	75
		mares installées dans un cours d'eau		
mare de référence	**Wankama**	4600	36700	13
	Banizoumbou	4300	12400	34
	Maourey Kouara	5100	47200	11
		mares de vallée		
mare de référence	**Sama Dey village.**	0	135300	0
	Massi Koubou	4700	126500	4
	Yélouma	1900	3850	49

3.3 Relation cote à l'échelle-Volume-Surface

3.3.1 Limites et précision

La relation cote à l'échelle-volume, que l'on appelera courbe de tarage par analogie avec les courbes hauteur débit des cours d'eau, est une relation clef pour l'estimation des lames ruisselées sur l'impluvium de la mare (volumes ruisselés arrivant à la mare) et pour l'estimation des différents termes du bilan hydrique de la mare.

Calculées à partir de levés topographiques à l'échelle 1/500, les relations cote à l'échelle-volume-surface ont été établies pour les trois mares. Elles sont présentées dans la figure 37. Elles sont critiquées sur la figure 38 qui présente l'erreur d'estimation en fonction du volume (calcul de l'erreur précisé en section 3.2, chapitre 3). L'erreur relative est élevée (entre 100 et 1000 %) aux faibles volumes. Toutefois, elle est rarement supérieure à 10 % pour l'intervalle dans lequel oscille la mare au cours de la saison des pluies. Les points essentiels des relations cote à l'échelle-volume et surface sont donnés dans le tableau 17.

Remarque : pour la mare de Wankama, la réalisation des levés topographiques nécessaires à l'élaboration de la courbe de tarage n'a été faite que partiellement, ne couvrant pas l'ensemble des surfaces submergées durant des crues exceptionnelles. Pour les hauteurs supérieures à 3,3 mètres, la courbe de tarage a été extrapolée.

3.3.2 Modèle d'interpolation

Le calcul des variations de volume à une échelle de temps identique à celle de l'acquisition, de 5 minutes à quelques heures, nécessite l'utilisation d'un modèle d'interpolation des volumes en fonction de la cote à l'échelle. Les relations des trois mares de référence ont été calées sur un modèle d'interpolation de type polynomial. Sa forme et les coefficients ajustés sont donnés dans le tableau 17 ainsi que l'erreur moyenne d'estimation.

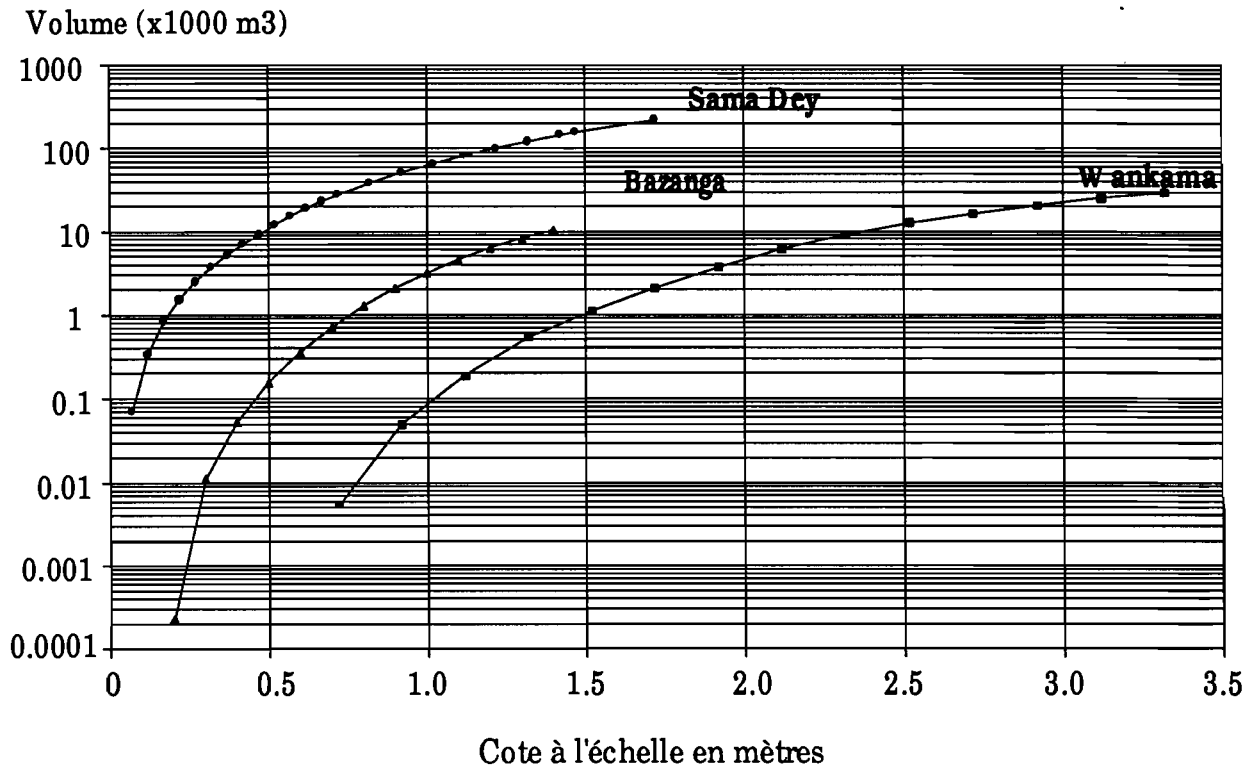


Figure 37 : relation cote à l'échelle-volume des mares de référence

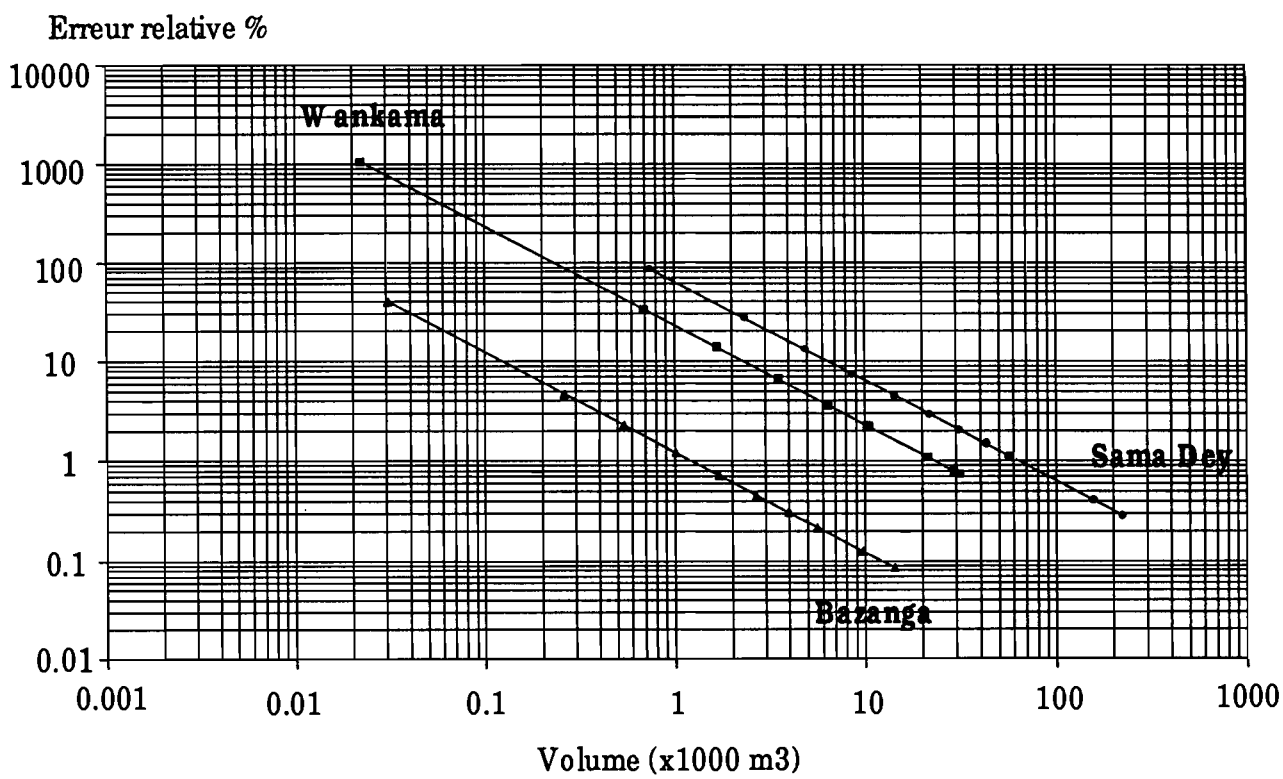


Figure 38 : erreur relative d'estimation volumique

Tableau 17 : Relation cote à l'échelle-Volume-Surface des mares de référence : Bazanga (plateau), Wankama (lit de cours d'eau) et Sama Dey village (vallée fermée).

Mare de Bazanga			Mare de Wankama			Mare de Sama Dey village		
cote à l'échelle	volume	surface	**cote à l'échelle**	volume	surface	**cote à l'échelle**	volume	surface
m	m^3	m^2	**m**	m^3	m^2	**m**	m^3	m^2
0,2	0	0	**0,5**	0	0	**0,08**	72	3 215
0,3	11	217	**0,7**	5	95	**0,12**	335	7 516
0,4	52	665	**0,9**	50	370	**0,22**	1 535	16 860
0,5	155	1 427	**1,1**	186	1 214	**0,32**	3 713	26 763
0,6	351	2 613	**1,3**	530	2 211	**0,42**	6 955	39 144
0,7	697	4 516	**1,5**	1 101	3 500	**0,52**	11 944	60 402
0,8	1 264	6 801	**1,7**	2 055	6 293	**0,62**	18 917	79 026
0,9	2 070	9 418	**1,9**	3 685	9 992	**0,72**	27 793	98 698
1,0	3 155	12 451	**2,1**	6 049	13 630	**0,82**	38 573	116 724
1,1	4 573	15 987	**2,3**	9 073	16 273	**0,92**	51 162	135 321
1,2	6 327	18 967	**2,5**	12 514	18 112	**1,02**	65 816	158 805
1,3	8 294	20 268	**2,7**	16 318	19 862	**1,12**	82 970	182 927
1,4	10 374	21 388	**2,9**	20 441	21 308	**1,22**	102 253	202 219
			3,1	24 820	22 474	**1,32**	123 372	219 979
			3,3	29 434	23 699	**1,42**	146 178	235 706
						1,72	223 305	275 973
						1,97	296 284	313 164

CHAPITRE 4

PRESENTATION DES SITES DE REFERENCE

SYNTHESE

Choisies de manière à concentrer les dispositifs de mesures et la connaissance de l'environnement des zones de stockage temporaire sur un minimum de sites, les trois mares de référence des principales unités géomorphologiques de la zone d'étude sont un échantillonnage satisfaisant des mares de la région d'étude et mettent en évidence les contrastes qui peuvent exister dans un paysage caractérisé, en première approche, par l'uniformité.

La mare de Bazanga, référence des mares situées sur les plateaux à cuirasse ferrugineuse, se distingue par :

- un lit plat et peu profond (inférieur à 1,5 m) où la superficie maximale du plan d'eau atteint 1,5 ha pour une capacité d'environ 10 000 m^3,
- la présence d'une zone colmatée d'origine sédimentaire dont l'extension dépasse 50 % de la surface maximum du plan d'eau et d'une zone périphérique nettement plus perméable,
- la présence d'une cuirasse ferrugineuse compacte mais présentant des discontinuités très localisées,
- un bassin d'alimentation de faible superficie (environ 35 ha) et de faible dénivelée.

La mare de Wankama, référence des mares installées dans les cours d'eau, se distingue par :

- un lit encaissé et profond (supérieur 3 mètres), de forme allongée, dont la superficie maximale est d'environ 4 ha pour une capacité de stockage de 40 000 m^3,
- la présence d'une zone colmatée d'origine sédimentaire dont l'extension est inférieure à 15 % de la surface maximale du plan d'eau et d'une zone périphérique sableuse très perméable,
- un sous-sol constitué de sables alluviaux assez homogène reposant sur les grés du Continental Terminal,
- un bassin d'alimentation d'environ 2 km^2 avec une dénivelée totale de 50 mètres.

La mare de Sama Dey village, référence des mares situées dans le bas-fond de vallée fermée ("verrouillée" par les sables), se distingue par :

- un lit plat et peu profond (inférieur à 2 m) où la superficie maximum du plan d'eau atteint 20 ha pour une capacité d'environ 300 000 m^3,
- un contexte pédologique de sub-surface marqué par une forte discontinuité granulométrique,
- un sous-sol d'une épaisseur d'environ 45 m (niveau statique de l'aquifère) relativement homogène dans l'ensemble, composé d'une colonne de sables avec quelques intercalations de matériaux plus fins,
- un bassin d'alimentation d'environ 6 km^2 en forme de cuvette avec une dénivelée totale de 30 mètres.

CHAPITRE 5

ETUDE DE LA VIDANGE

CHAPITRE 5

ETUDE DE LA VIDANGE DE LA MARE

On étudie ici la dynamique de vidange des mares, à partir de trois années de mesures (1991-1993) en s'appuyant sur la connaissance de l'environnement pédologique.

L'analyse du régime de la mare à l'échelle saisonnière puis à l'échelle de l'épisode révèle des intensités de vidange souvent très élevées où l'infiltration s'avère être le processus prépondérant, tout au moins dans les mares de vallée.

A partir des intensités de vidange initiales et finales des épisodes observés, nous établissons une loi de vidange empirique pour chacune des mares qui nous donne le moyen de reconstituer correctement la dynamique de vidange des épisodes de décrue.

Finalement, un schéma de fonctionnemenent hydrologique des mares est mis en évidence où l'on distingue une cinétique de vidange rapide et une cinétique de vidange lente.

1 CONSIDERATIONS GENERALES

1.1 Introduction : comparaison de la vidange des mares à deux vidanges type

De manière illustrative, nous avons choisi de comparer quelques séquences de vidange observées à deux vidanges type. La première est la résultante d'une évaporation directe stricte que l'on fixe à 10 mm/j. La seconde est une vidange induite par un processus d'infiltration stricte que l'on simule grâce à un modèle d'infiltration simple (Philip, 1969)

$$F = s.\sqrt{t} + At \qquad (18)$$

avec

F : lame infiltrée cumulée en m

s : la sorptivité en m/j½

t : temps écoulé depuis le début de l'infiltration en jours

A : paramètre s'exprimant en m/j

trois conductivités hydrauliques à saturation K_S correspondant à des sols caractéristiques (Rawls et *al.*, 1983) sont considérées :

- pour un sol filtrant (sablo-limoneux) : 0,26 m/j,
- pour un sol moyennement filtrant (sol argilo-limoneux) : 0,036 m/j,
- pour un sol peu filtrant (sol limono-argileux) : 0,012 m/j,

considérant le paramètre A égal à la conductivité à saturation Ks.

Chacune de ces simulations (quatre au total) est appliquée à une séquence de remplissage-vidange observée sur chacune des trois mares. Elle concerne la période du 09/08/1992 au 31/08/1992 pour la mare de Bazanga, la période du 13/06/1992 au 20/07/1992 pour la mare de Wankama et la période du 30/07/1992 au 19/08/1992 pour la mare de Sama Dey.

Nous représentons dans la figure 39 les vidanges observées et simulées des trois mares.

Commentaires

Mare de Bazanga

La vidange observée est soit caractérisée par une pente similaire au régime d'évaporation stricte (remplissage 1), soit par une décroissance ayant une double composante. En effet, elle est proche du régime d'infiltration simulé par une conductivité K_S = 0,15 cm/h juste après le remplissage (3

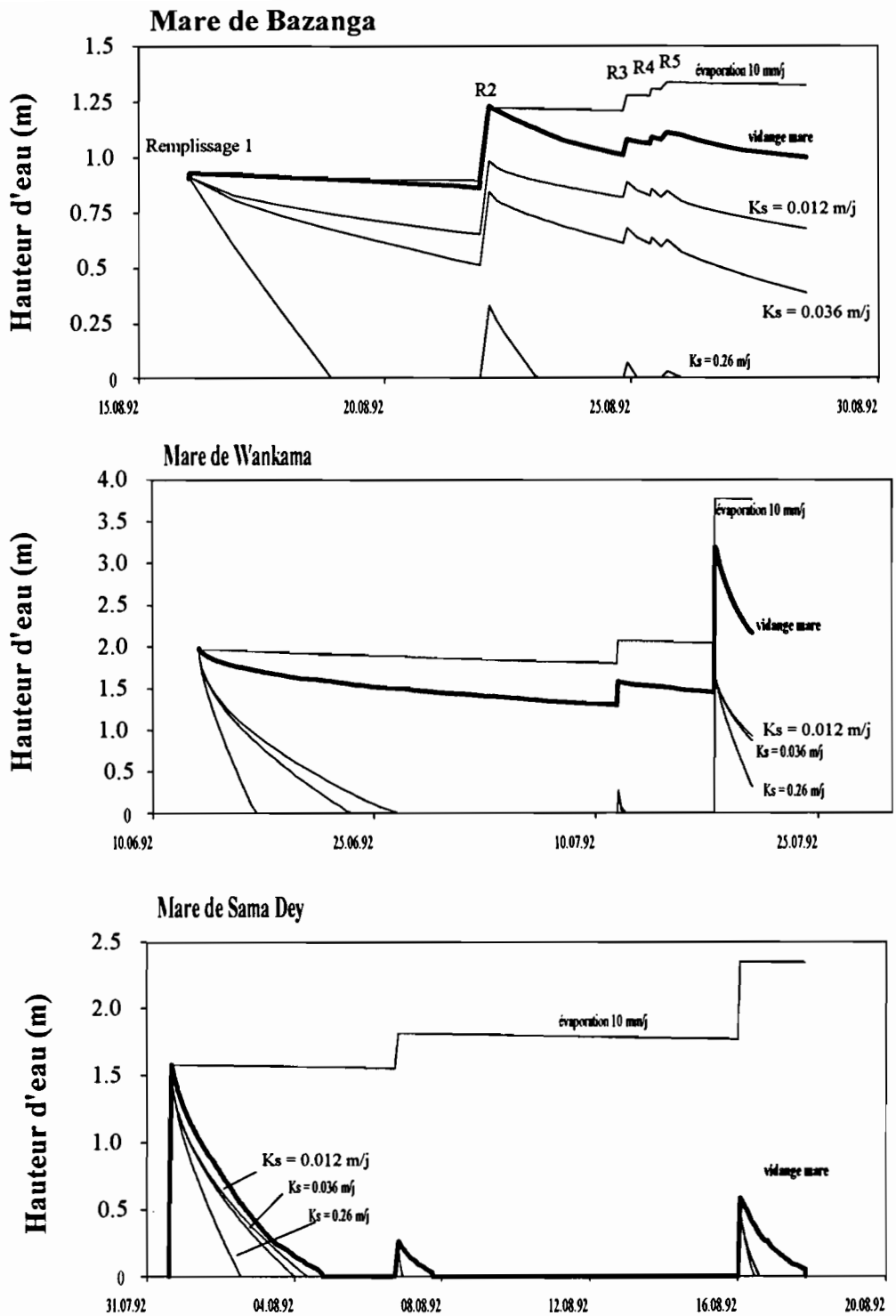


Figure 39 :comparaison de la vidange des mares avec deux vidanges types (évaporation stricte et infiltration stricte simulée avec le modèle de Philip (1969) pour trois valeurs Ks)

1.2 Les facteurs de l'infiltration au cours de la vidange

1.2.1 Généralités

En hydrologie, les études de l'infiltration sont le plus souvent destinées à prédire, suite à une pluie, le moment d'apparition du ruissellement sur un sol et les quantités ruisselées. Les études d'infiltration sous charge sont plus rares. Les travaux de Philip (1969, 1992a et 1992b), d'une part, ou Green et Ampt (1911), d'autre part, ont inspiré de nombreux auteurs pour modéliser l'infiltration sous charge. Brakensiek, Gill, Philip, Fok-Hansen et Li-Stevens (dans Singh, 1989) proposent des adaptations du modèle de Green et Ampt, soit pour le simplifier, soit pour prendre en compte des conditions plus réalistes.

1.2.2 L'infiltration comme processus physique : le mouvement de l'eau dans le sol

En considérant le cas idéal d'un sol homogène ayant des pores connectés entre eux et une infiltration de type unidimensionnel, le processus physique de l'infiltration alimenté par une pluie peut être décrit de la manière suivante. L'entrée de l'eau dans le sol est à la fois gouvernée par les forces capillaires et les forces gravitaires qui constituent le potentiel total. Elles évoluent en sens contraire au cours de l'infiltration.

Les forces de capillarité sont dominantes dans un profil non saturé. Elles sont déterminées par le taux d'humidité. Comme le montre la figure 42, pour une même humidité, le potentiel capillaire peut être très différent selon la texture du sol.

Les forces de gravité deviennent dominantes au fur et à mesure que le profil d'infiltration tend vers la saturation. En effet, la conductivité hydraulique tend vers sa valeur maximale lorsque l'humidité est proche de la saturation (figure 41).

Ainsi, au cours du temps, l'infiltrabilité forte en début d'infiltration diminue rapidement pour tendre vers une infiltrabilité finale, constante, qui sera proche de la valeur de la conductivité hydraulique du sol (figure 41). La décroissance du régime d'infiltration est due à la fois à l'humidité initiale du sol et à la relation caractéristique d'un sol qui lie le taux d'humidité à son potentiel capillaire (figure 42).

1.2.3 Prise en compte d'une lame d'eau submergeante dans l'expression de l'infiltrabilité (cas d'un sol homogène)

Dans le cas d'une infiltration sous charge d'eau, la lame d'eau submergeante augmente le potentiel total de l'eau de la manière suivante :

si le potentiel total ou la charge potentielle est égale à :

$$\phi_t = \phi_g + \phi_p \quad (Hillel, 1975) \qquad (19)$$

avec une charge d'eau le potentiel de pression devient :

$$\phi_p = \phi_m + \phi_{ls} \qquad (20)$$

avec

ϕ_t : potentiel total de l'eau

ϕ_g : potentiel gravitaire

ϕ_p : potentiel de pression

ϕ_m : potentiel matriciel ou succion matricielle (pression négative)

ϕ_{ls} : lame d'eau submergeante (pression positive)

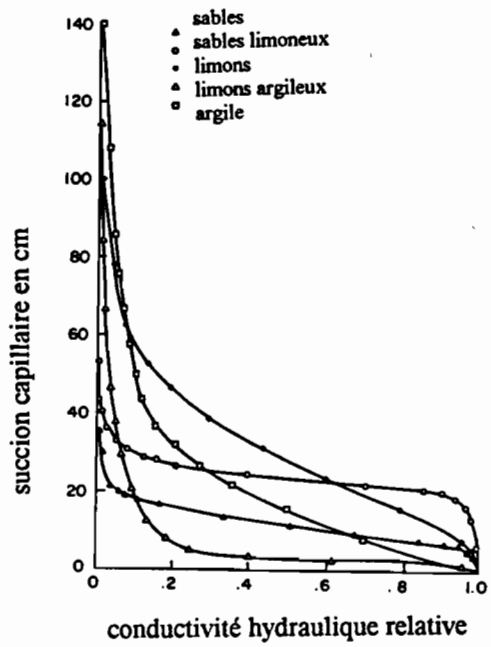


Figure 40 : la succion capillaire en fonction de la conductivité hydraulique pour quelques sols (dans Sing., 1989).

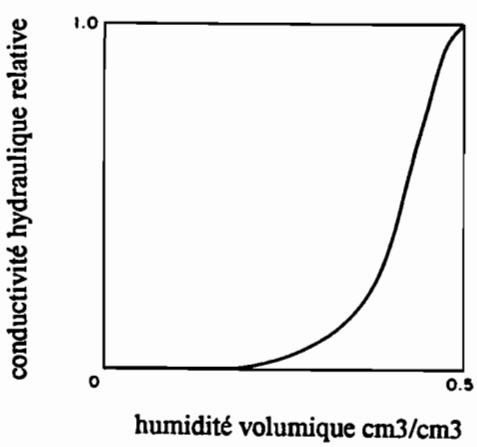


Figure 41 : la conductivité hydraulique relative en fonction de l'humidité d'un sol (taux de saturation égal à 0.5) (dans Singh, 1989)

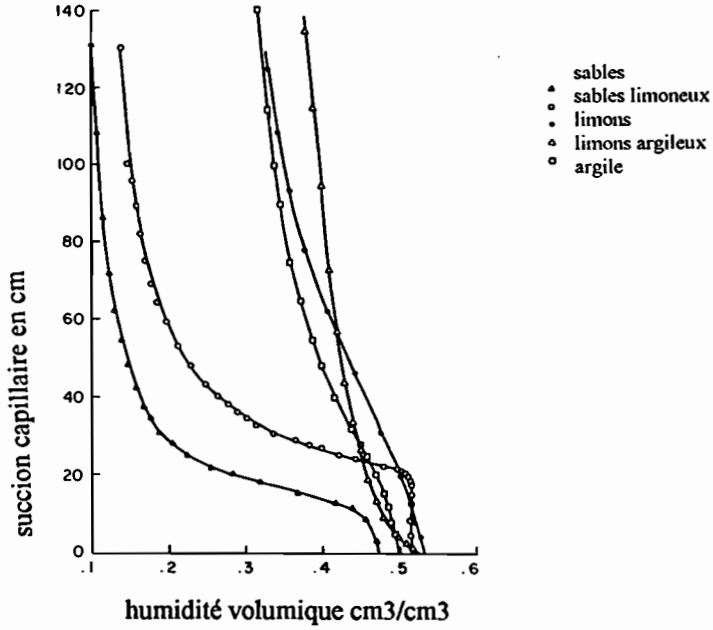


Figure 42 :succion capillaire en fonction de l'humidité (dans Singh, 1989)

Ces deux termes sont de signe contraire et la lame submergeante devient un terme non négligeable dans le potentiel de pression lorsqu'elle est du même ordre de grandeur que la succion matricielle (annulation des pressions) ou lorsqu'elle devient plus grande. Dans ce cas, le potentiel de pression devient positif. Pour des conditions d'humidité proches de la saturation et pour une mare ayant des versants sableux ou argilo-sableux encaissés, ϕ_{ls} sera généralement un terme non négligeable.

Le processus d'infiltration qui nous intéresse dans cette étude doit prendre en considération :

- une lame d'eau submergeante supérieure ou proche de la succion capillaire du sol, décroissante au cours de l'infiltration.
- une surface d'eau libre variable en fonction de la lame d'eau
- un milieu latéralement et verticalement non homogène

Plutôt que de vouloir analyser l'influence des différents facteurs un par un et leur variabilité au cours de l'infiltration, nous avons choisi de chercher des modèles conceptuels calculant le taux d'infiltration ou la lame cumulée infiltrée dans des conditions se rapprochant le plus de celle d'une mare.

A la suite des travaux de Green et Ampt (1911) et Philip (1969), basés sur l'hypothèse d'une lame d'eau constante et négligeable devant la succion, Philip (1992a) propose une expression de l'infiltration sous une lame d'eau submergeante variable et supérieure à la succion capillaire (conditions saturantes). La prise en compte d'une évaporation constante au cours de l'infiltration est également proposée (Philip, 1992b).

Considérant une infiltration stricte, le taux d'infiltration est de la forme :

$$v(t) = (\theta_1 - \theta_0)\frac{dz}{dt} = K\left[1 - (\theta_1 - \theta_0) + \frac{C+D}{z}\right](Philip, 1992a) \qquad (21)$$

Avec la prise en compte d'une évaporation constante, le taux d'infiltration devient :

$$v(t) = (\theta_1 - \theta_0)\frac{dz}{dt} = K\left[1 - (\theta_1 - \theta_0) + \frac{C+D-\varepsilon * t}{z}\right](Philip, 1992b) \qquad (22)$$

avec

v : vitesse d'infiltration

K : conductivité hydraulique de la zone mouillée (considérée constante)

$(\theta_1 - \theta_0)$: différence entre le taux d'humidité initial et le taux d'humidité à saturation de la zone mouillée avec θ_1 considérée constante sur le profil.

ε : taux d'évaporation considéré constant

z : profondeur du front d'humectation

C : succion capillaire au front d'humectation (considérée constante)

D : hauteur initiale de la lame submergeante

Après intégration la solution trouvée montre ainsi que les trois paramètres K (perméabilité à saturation), C (succion capillaire) et D (hauteur d'eau initiale submergeante) ou K (conductivité hydraulique), S (succion au front d'humectation) et H (la lame d'eau submergeante) dans l'expression de Green et Ampt, ont des valeurs qui changent dans le cas d'une infiltration sous charge variable (Philip, 1992a). La forme de l'expression reste néanmoins identique à celle d'une expression sous charge constante (Philip, 1969). Enfin, on remarquera que l'influence du paramètre K est atténuée dans l'expression 21 et 22 par le terme $1 - (\theta_1 - \theta_0)$. La solution de Philip sous charge variable se rapproche des conditions d'infiltration sous une mare mais plusieurs hypothèses en sont encore éloignées. En effet, elle ne prend pas en compte la forte hétérogénéité du sol, la non homogénéité de la hauteur de la lame d'eau au dessus de la surface infiltrante (parois non verticales) ainsi que l'hétérogénéité des conditions d'humectation des horizons de surface. Néanmoins, elle nous permet d'en pressentir les principaux facteurs.

Ainsi, l'infiltrabilité initiale sous charge variable est la résultante, d'une part, de la lame submergeante et, d'autre part, de la succion capillaire. Par contre, l'infiltrabilité finale (quelques heures avant le remplissage) sera essentiellement réglée par la conductivité hydraulique du matériau et, dans une moindre part, par la lame d'eau submergeante (cas des mares encaissée).

Il apparaît donc que la vidange d'une mare induite par un processus d'infiltration prépondérant est fortement liée à la conductivité hydraulique du sol submergé d'une part, à la hauteur initiale de la lame submergeante et à sa hauteur au cours de l'infiltration d'autre part. Ceci sera d'autant plus vrai que le sol est sableux et les conditions d'humidité initiales sont proches de la saturation (succion capillaire faible).

1.3 Discontinuité hydrodynamique du substrat des mares

1.3.1 Notion de seuil de perméabilité

Loin de pouvoir caractériser les sols des cuvettes des mares comme homogènes, l'étude des organisations pédologiques a montré une forte discontinuité latérale et verticale de celles ci : la succession d'un matériau à texture très fine (fond de la mare) de porosité fermée assez développée (porosité vacuolaire et structure micro litée) à un matériau, soit macro-poreux à texture grossière (cas des mares installées dans les lits de rivières), soit à texture moyenne avec une porosité plus ouverte et une structure polyédrique (cas des mares de plateaux). Dans le cas de la mare de Sama Dey (mare de vallée fermée de référence) la variation texturale et celle de son espace poral sont nettement moins marquées : passage progressif d'une texture sableuse à une texture sablo-argilo-limoneuse dans le fond de la mare. La discontinuité pédologique existant sur les mares de Bazanga et Wankama se traduit par des caractéristiques hydriques et hydrodynamiques fortement contrastées où le rapport des conductivités hydrauliques des zones colmatée et non colmatée peut être de 8×10^{-2} pour Bazanga et de $\times 10^{-3}$ pour Wankama, et minime dans le cas de la mare de Sama Dey ($1,5 \times 10^{-1}$) (valeurs moyennes des classes texturales utilisées dans le modèle Green et Ampt dans Rawls, 1983).

Aussi, d'un point de vue fonctionnel, il semble légitime de parler d'une zone fortement imperméable et d'une zone perméable à très perméable avec une transition très rapide que l'on assimilera à un seuil de perméabilité. D'un point de vue morphologique, il est très difficile d'établir latéralement une limite "au centimètre près" entre deux organisations pédologiques, même fortement contrastées comme c'est ici le cas. Il est donc nécessaire d'établir le plus objectivement possible une limite spatiale à l'aide, par exemple, de critères de couleur, d'état de surface, de structure, d'épaisseur verticale...

Nous avons choisi de délimiter un seuil de perméabilité correspondant à une discontinuité pédologique par l'expression des caractères de la décantation du matériau à texture fine :

- micro - litage et fentes de retrait,
- rapidité et qualité de la transition entre le dépôt sédimentaire et le matériau autochtone.

Cette dernière traduit la cohésion et la tenue du dépôt sur le sol autochtone, et par là, sa pérennité. Par ailleurs, elle est fortement en relation avec son épaisseur et par conséquent son âge.

On peut ainsi différencier les dépôts récents datant de la saison actuelle ou dernière de ceux nettement plus anciens, dont l'assise sur le matériau autochtone est pérenne. En effet, les fines sédimentations saisonnières développées directement sur le matériau sableux des versants ne sont pas, à l'état observé, suffisamment incorporées au matériau pour être pérennes et constituer le front d'avancement de la zone colmatée.

A l'aide d'un niveau topographique, nous avons pu déterminer la position moyenne du passage entre les deux zones. Recalé par rapport à la cote zéro de l'échelle limnimétrique de la mare, ce seuil est situé entre la hauteur 0,90 et 1,05 mètre (position moyenne : 0,97 mètre) dans la mare de Bazanga et entre la hauteur 1,55 et 1,70 mètre (position moyenne : 1,60 mètre) dans la mare de Wankama.

Par la définition d'un seuil et de sa position altimétrique moyenne, il est possible d'apprécier l'importance de la zone de colmatage sur toute la surface inondée en fonction de la hauteur d'eau dans la mare. La figure 43 donne le pourcentage de la surface colmatée (par rapport à la surface inondée pour la hauteur d'eau maximale observée) en fonction de la hauteur d'eau dans les mares de Bazanga et de Wankama.

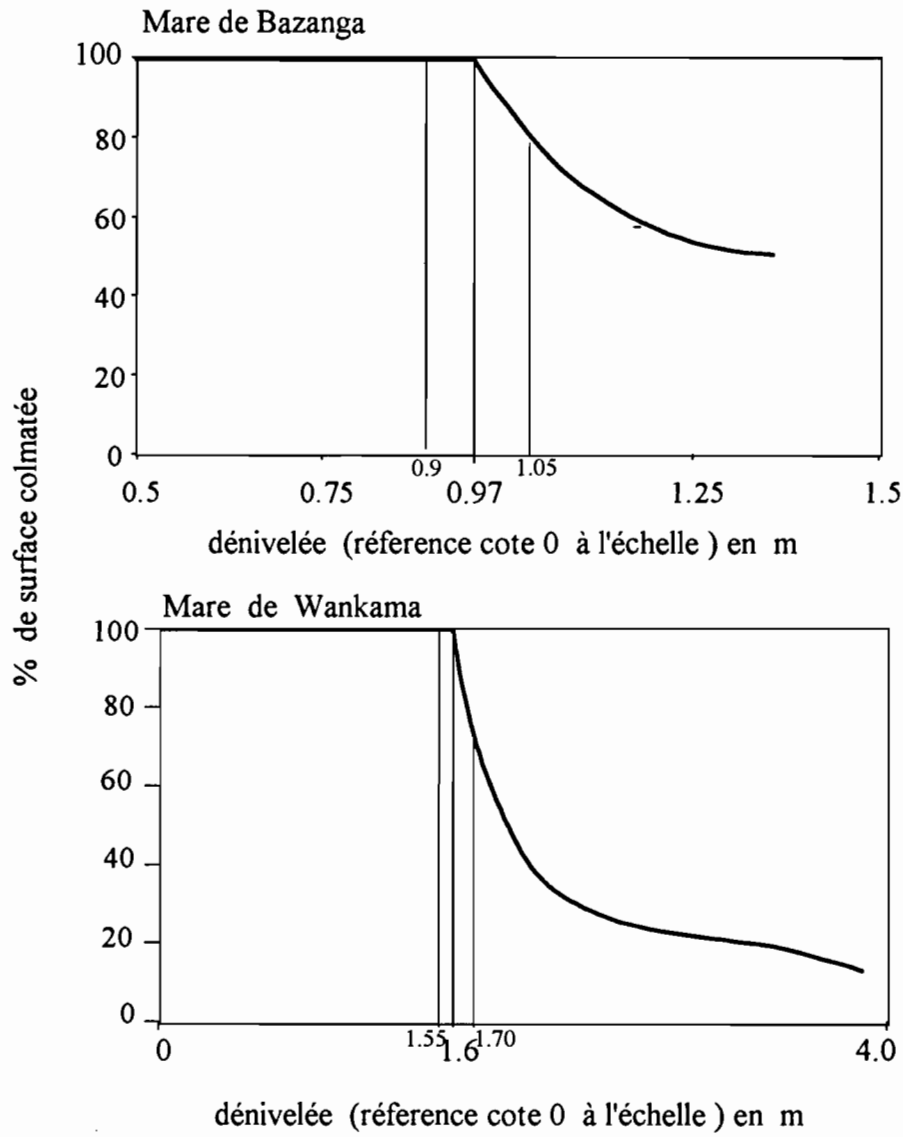


Figure 43 : pourcentage de la surface colmatée (% de la surface à la hauteur d'eau maximale observée)

1.3.2 Calcul d'une perméabilité équivalente théorique en fonction de la surface inondée ou de la hauteur d'eau dans la mare

Considérant le schéma présenté en figures 30 et 32, le lit de la mare et ses horizons sous-jacents sont constitués de deux compartiments pédologiques homogènes (caractéristiques physiques peu variables).

Soit k_1 la perméabilité de l'horizon peu perméable et k_2, celle de l'horizon perméable, à l'aplomb de la zone colmatée, la perméabilité k_e du milieu est :

$$\frac{1}{k_e} = \frac{1}{k_1} \times \frac{1}{k_2} \qquad (23)$$

ou :

$$k_e = \frac{k_1 . k_2}{k_1 + k_2} \qquad (24)$$

Pour une surface inondée comprenant à la fois la zone colmatée centrale surmontant l'horizon perméable, de perméabilité k_e, et une zone périphérique verticalement homogène de perméabilité k_2, la perméabilité s'écrit :

$$k_{e'} = \frac{S_1 . ke + S_2 . k_2}{S_1 + S_2} \qquad (25)$$

avec

S_1 : surface de la zone centrale colmatée

S_2 : surface de la zone périphérique inondée

On verra plus loin que la surface S_1 est pratiquement submergée en permanence en saison des pluies, alors que la valeur de S_2 varie beaucoup d'un événement pluvieux à l'autre.

En développant k_e dans (25), on obtient :

$$k_{e'} = \left[\frac{(\frac{k_1 . k_2}{k_1 + k_2}) . S_1 + k_2 . S_2}{S_1 + S_2} \right] \qquad (26)$$

Nous prendrons comme valeur de k_1 et k_2 les valeurs des paramètres K_s mesurés expérimentalement (Rawls et *al.*, 1983) pour des sols à texture proche des sols de nos mares de référence. Ces valeurs sont de :

- k_1 = 1.2 cm/h et k_2 = 3.6 cm/h pour la mare de Bazanga, en émettant l'hypothèse que la surface colmatée repose entièrement sur une surface non imperméable (hypothèse que l'on n'a pas pu vérifier).
- k_1 = 1.2 cm/h et k_2 = 26.16 cm/h pour la mare de Wankama
- k constante égale à 26.16 cm/h dans le cas de la mare de Sama Dey.

Pour une mare, le calcul de la perméabilité équivalente théorique est réalisé sur l'ensemble des surfaces inondées correspondant à différentes hauteurs d'eau observées.

La figure 44 met bien en évidence d'une part l'augmentation de la perméabilité avec le pourcentage de surface inondée vis à vis de la zone colmatée et, d'autre part, l'influence de la morphologie de la mare sur les variations du gradient de perméabilité de l'aval vers l'amont. Enfin, il apparaît clairement, même si les valeurs choisies sont approximatives, que la perméabilité du substrat de la mare de Wankama évolue vers des valeurs nettement plus fortes au sortir de la zone colmatée.

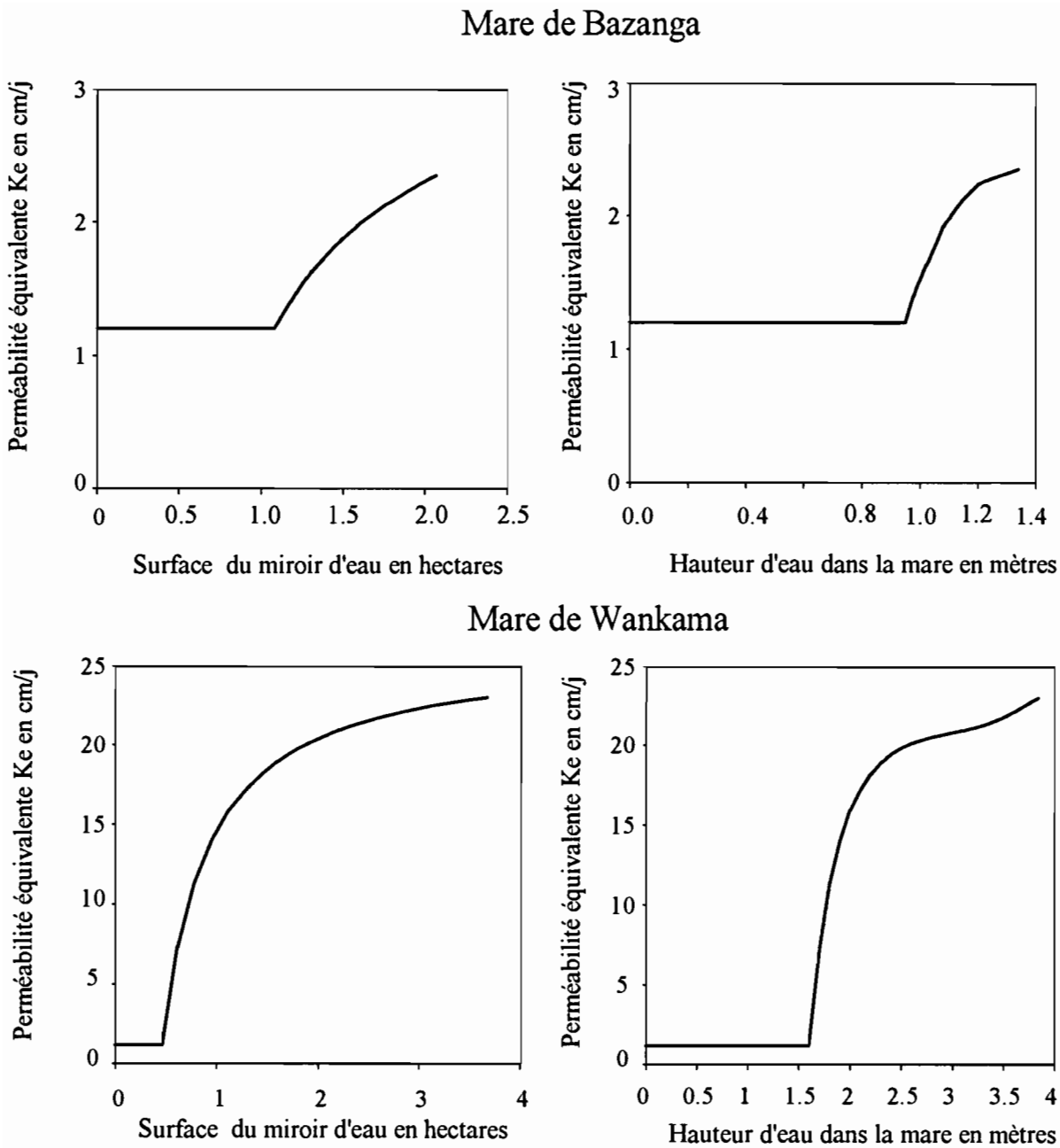


Figure 44 : perméabilité équivalente théorique en fonction de la surface inondée et de la hauteur d'eau .

2 CARACTERISTIQUES DE LA VIDANGE A L'ECHELLE DE LA SAISON

La connaissance des caractéristiques de la vidange pour chacune des trois mares est basée sur une trentaine d'épisodes de vidange observés de l'année 1991 à l'année 1993. Pour cet ensemble d'épisodes, le tableau 18 donne les valeurs moyennes caractéristiques.

Afin de fixer leur échelle temporelle, la durée moyenne des épisodes est donnée dans le tableau 18. Elle devrait coïncider avec l'intervalle de temps entre les événements pluvieux ayant provoqué un ruissellement de surface suffisant pour qu'il se concentre dans la mare. Cela se vérifie pour la mare de Bazanga et la mare de Wankama. Pour ces mares et selon le rythme des pluies, la durée de l'épisode est très variable allant d'un jour ou moins, à un mois (maximum observé en saison des pluies). Aussi, les valeurs moyennes de 6 et 7 jours pour les mares de Wankama et Bazanga ont peu de signification (écart type de 6,8 et 7,6). Par contre, la durée maximale observée d'un épisode à Sama Dey n'a pas dépassé 5 jours. Comparativement, sa durée moyenne est significative de son régime et fait apparaître sa rapidité d'assèchement qui dépasse souvent la fréquence d'apparition du ruissellement, exception faite de quelques événements du mois d'août. .

Tableau 18 : valeurs saisonnières des caractéristiques des épisodes de vidange (1991 - 1993).

	durée de l'épisode	amplitude de la vidange	intensité moyenne de vidange	intensité moyenne de vidange	taux d'évaporation moyen *
	jours	m	mm/j	m3/j	%
	nb = 35		Bazanga		
moyenne	6,0	0,14	34	500	16
écart type	6,8	0,11	23	400	24
mini	0,3	0,01	6	20	90
max	32,9	0,41	98	1 700	6
	nb = 28		Wankama		
moyenne	6,9	0,44	86	1 400	6
écart type	7,6	0,44	85	1 750	7
mini	0,6	0,04	13	40	44
max	35,1	1,70	418	8 000	1
	nb = 28		Sama Dey village		
moyenne	1,7	0,43	257	8 400	2
écart type	0,9	0,32	99	10 700	6
mini	0,2	0,06	70	150	8
max	4,1	1,58	456	45000	1

* calculé en prenant comme évaporation la moyenne journalière calculée des mois de juin, juillet, août et septembre des années 1991, 1992 et 1993 : 5,6 mm/j (écart type de 0,68)

L'intensité moyenne saisonniere de vidange est significativement variable selon la mare et selon l'épisode (valeurs des écarts types tableau 18). De 34 mm/j (débit moyen de pertes 500m^3/j) à la mare de Bazanga, il est de 86 mm/j (débit moyen de pertes 1400m^3/j) à la mare de Wankama et de 257,5 mm/j (8400m^3/j) à la mare de Sama Dey. Les valeurs maximales vont dans le même sens : 98 mm/j (soit un débit de pertes de 1700m^3/j) à Bazanga, 418,4 mm/j (débit de pertes de 8000m^3/j) à Wankama et 456 mm/j (débit de pertes de 45000m^3/j) à Sama Dey.

Dans le tableau 18, le taux d'évaporation a été calculé à la suite d'une étude comparative de plusieurs méthodes (Desconnets et Taupin, 1993). Cette étude sera présentée en section 3. Comme le soulignent certains travaux (Harbeck, Konstantinov, Golubev et Pokudov dans Riou, 1975 ; Araujo de Moura, 1992), l'évaluation de l'évaporation des petites nappes d'eau libre soumises à un fort effet d'oasis est assez délicate, et on peut penser que les chiffres donnés dans le tableau 18 sont entachés d'une erreur non négligeable. Néanmoins, même si l'évaporation était sous-estimée de 50 %, on voit qu'en moyenne elle ne représenterait pas plus de 25% de la vidange de la mare de Bazanga, mare pour laquelle l'évaporation est la plus forte. Pour certains épisodes, (on verra plus loin que cela correspond aux épisodes où le niveau de remplissage de la mare est le plus faible), l'évaporation peut représenter le principal processus sur la mare de plateau (Bazanga). Cela n'est jamais le cas à Sama Dey (taux d'évaporation maximum de 8%). Pour Wankama, une contribution supérieure à 30% n'a été observée que lors de quelques épisodes.

L'infiltration apparaît donc, en général, comme le processus dominant dans la vidange des mares durant la saison des pluies. Ce fait est d'ailleurs bien illustré par la comparaison entre les intensités moyennes de vidange mesurées sur nos trois mares de référence et celles données par différents auteurs pour des réservoirs allant de la dizaine d'hectares à la centaine de kilomètres carrés.

Pour le lac Tchad et pour la période de 1955 à 1973, Vuillaume (1981) estime le déstockage total annuel moyen à 2340 mm, soit approximativement 6,5 mm/j avec un maximum mensuel de 337 mm soit 11 mm/j (mois de Novembre). A la mare d'Oursi (Burkina Faso), la lame annuelle moyenne perdue (période de 1976 à 1983) est considérée égale à l'évaporation du lac ; elle est estimée par la formule de Penmam (Chevallier et *al.*, 1986) malgré le déstockage par infiltration probable en hautes eaux. Néanmoins, les mesures limnimétriques, lorsque c'est possible (mois sans pluies), donnent une estimation des variations totales par infiltration. Sur la période d'étude (1976 à 1983), on retiendra les valeurs moyennes journalières minimales entre 4,2 et 5,3 mm/j au mois de décembre et janvier et des valeurs maximales moyennes journalières entre 14,7 et 24,2 mm/j au mois d'avril et mai. Dans l'étude du bilan hydrique du lac de Bam (Burkina Faso), Ibiza (1972) estime la lame totale moyenne journalière perdue (hormis les pertes par pompage) entre 4,0 et 5,5 mm/j pour les mois de décembre et janvier et la lame maximale journalière entre 7 et 9,4 mm/j pour les mois d'avril et juin (période d'observation : 1966 à 1971). Concernant des lacs de superficie et de capacité volumique nettement plus faibles, Monier (1991) dans son étude de la gestion des ressources en eau de la région de Tillabéry, étudie le bilan hydrologique de plusieurs mares dont la superficie va de la dizaine d'hectares à la centaine d'hectares. Il met en évidence deux types de mare, celles dont les variations saisonnières sont

proches de l'ETp Penman et dont les variations moyennes journalières de niveaux sont de 6,7 à 9,3 mm/j, et celles dont les variations de niveaux sont nettement supérieures à l'ETp Penman (moyennes journalières estimées entre 10,8 et 11,9 mm/j). Les études de petits lacs menés sous les mêmes climats, notamment dans le Nordeste brésilien (Girard, 1966 ; Cadier, 1981 ; Molle, 1991), donnent des estimations des lames moyennes journalières perdues qui sont très comparables aux estimations faites pour les lacs sahéliens.

Toutes ces valeurs sont faibles en regard de celles enregistrées sur les sites d'HAPEX-Sahel, ce qui conduit à étudier plus en détail les facteurs conditionnant l'infiltration. En effet, cette dernière varie fortement d'un épisode à l'autre, comme l'attestent les coefficients de variation proche de 1 pour les mares de Bazanga et Wankama, et égal à 0,4 pour la mare de Sama Dey.

3 CARACTERISTIQUES DE LA VIDANGE A L'ECHELLE DE L'EPISODE

3.1 Choix de plusieurs épisodes

Parmi les 28 ou 35 épisodes mesurés, nous avons choisi d'étudier la vidange de 6 d'entre eux pour chacune des mares. Le choix a été guidé par deux critères:

- principalement, la hauteur initiale de l'épisode qui semble être un des principaux facteurs déterminant l'intensité de la vidange (Desconnets et *al.*, 1993) et,
- la durée de l'épisode qui doit être suffisante pour observer des variations de niveau et d'intensité significatives.

Les épisodes de vidange finale (assèchement de la mare) ont été délibérément écartés pour les mares de Wankama et de Bazanga. D'une durée allant jusqu'à 6 mois, ils représentent de faibles variations de niveau et la qualité des enregistrements limnimétriques ne permet pas une approche fine du phénomène de vidange. Par ailleurs, ils représentent moins de 10 % du volume total transitant par les mares au cours de la saison des pluies.

3.2 Variables caractéristiques de l'épisode

Les caractéristiques des épisodes choisis sont données dans le tableau 19. La comparaison des intensités moyennes de vidange de l'épisode et des intensités initiales et finales de vidange met en évidence, qu'au sein d'un même épisode de vidange le taux de vidange varie très fortement..

Tableau 19 : les caractéristiques des épisodes étudiés

	hauteur de début épisode	hauteur de fin épisode	intensité moyenne de vidange	intensité initiale de vidange	intensité finale de vidange
	m	m	m/j	m/j	m/j
			Bazanga		
30/08/1992	1,34	0,95	0,055	0,13	0,021
31/07/1992	1,25	0,91	0,035	0,12	0,015
13/08/1993	1,17	0,98	0,05	0,09	0,02
18/07/1992	1,06	0,93	0,03	0,06	0,02
21/07/1993	0,99	0,88	0,015	0,015	0,015
30/06/1992	0,67	0,59	0,007	0,007	0,007
			Wankama		
22/08/1993	3,84	2,14	0,76	0,88	0,04
22/07/1992	3,32	2,07	0,25	0,37	0,13
20/08/1991	2,53	1,63	0,095,	0,25	0,03
13/06/1992	1,98	1,30	0,02	0,115	0,01
10/08/1991	1,75	1,57	0,03	0,05	0,02
08/07/1993	1,57	1,44	0,015	0,04	0,01
			Sama Dey vill.		
31/08/1992	1,58	0,06	0,38	1,5	0,12
30/08/1992	1,05	0,07	0,29	0,62	0,12
22/08/1993	0,85	0,04	0,29	1,0	0,08
03/09/1993	0,65	0,03	0,26	0,76	0,08
19/07/1993	0,45	0,04	0,23	0,62	0,1
13/08/1993	0,23	0,04	0,135	0,54	0,13

3.3 Aperçu sur l'évolution de l'humidité sous la mare

Les conditions d'humidité en début de vidange

Hormis le premier épisode de vidange de la saison des pluies (état initial de la figure 45), les conditions d'humidité à la surface du lit de la mare et immédiatement au dessous (une dizaine de centimètres) peuvent être considérées comme proches de la saturation dès le début de l'épisode en ce qui concerne les sols filtrants. En effet, le remplissage de la mare par le ruissellement de surface a une durée souvent supérieure à une heure durant laquelle le dépassement de la zone colmatée par le remplissage entraîne immédiatement l'humectation des couches superficielles et sub-superficielles.

En cours de saison, la zone colmatée offre une humidité proche de la saturation, et cela sur toute son épaisseur. Les profils d'humidité réalisés dans la zone colmatée de Wankama mettent bien en évidence la forte rétention d'eau du domaine sédimentaire qui se stabilise à un taux d'humidité volumique de 45 % à 10 cm de profondeur et évolue du haut vers le bas de la zone colmatée entre 45 et 25 % d'humidité volumique.

Les conditions d'humidité au cours de la vidange

Dans les sols filtrants submergés, l'évolution des profils d'humidité montrent une avancée rapide du front d'humectation vers les horizons inférieurs avec des conditions d'humidité, en surface, proches de la saturation : de 35 à 45% d'humidité volumique (figure 45). Dans la zone colmatée (profil de gauche en figure 45), le profil d'humidité, au cours de la saison, semble peu évoluer dans le temps, conservant une humidité saturante sur toute l'épaisseur du domaine sédimentaire soit de 0 à 50 cm (figure 45).

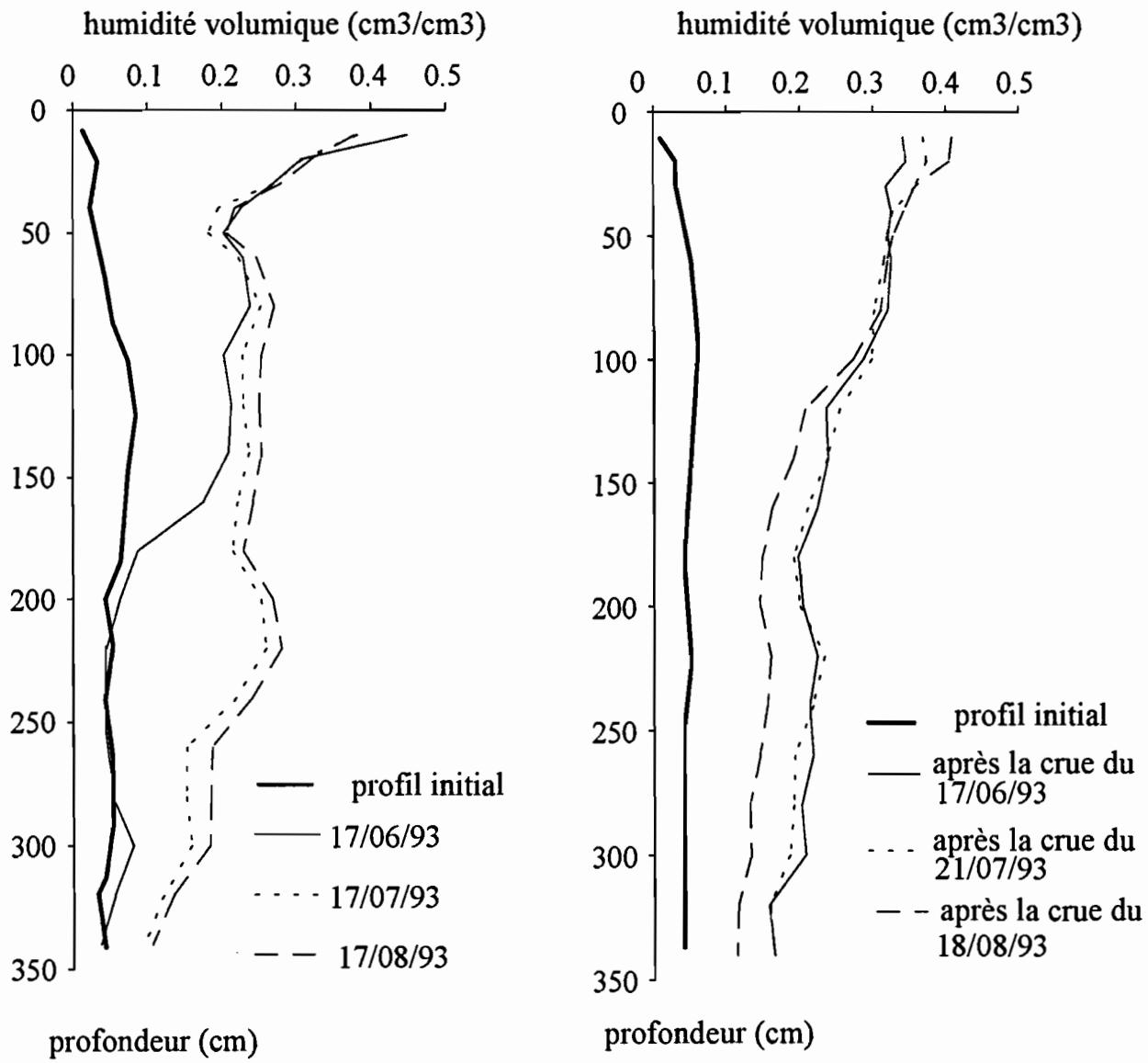


Figure 45 : évolution des profils d'humidité de la zone colmatée(à gauche) et de la zone perméable (à droite) au cours de la saison (mare de Wankama)

3.4 Variation de l'intensité instantanée de vidange au cours du temps et en fonction de la hauteur d'eau

Chaque épisode étudié est échantillonné dans le temps par plusieurs points pour lesquels nous calculons l'intensité instantanée de vidange et le taux d'évaporation instantané.

Ces points descriptifs de l'épisode et leur intensité respective sont présentés dans les tableaux A41, A42 et A43 en annexe 4.

Mare de Bazanga (figure 46)

La présence d'une zone colmatée nettement plus étendue se traduit par des intensités de vidanges maximales (0,13 m/j) jusqu'à dix fois inférieures à celles des mares sur matériaux sableux. On peut alors décomposer le régime en fonction de la hauteur d'eau initiale de l'épisode c'est à dire son commencement dans la zone colmatée ou dans la zone non colmatée:

- un régime d'infiltration au delà du niveau 1 m (zone non colmatée)
- un régime de vidange à dynamique linéaire avec une décroissance proche de celle d'un régime d'évaporation en deçà de 1 m (zone colmatée).

La variabilité interépisode est moins marquée que pour les deux autres mares. L'analyse multivariable met en évidence une faible diminution de la variabilité interépisode lorsque l'on associe l'indice IK à la hauteur d'eau.

remarque :

L'indice pluviométrique IK (Kolher et Linsley, 1951) permet d'évaluer l'évolution de l'état d'humectation de la couche superficielle d'un sol au cours d'une saison des pluies. Il tient compte de la hauteur des pluies et de leur répartition dans le temps. Nous avons adopté un indice de forme exponentielle donnée par l'équation:

$$IK_n = (IK_{n-1} + P_{n-1})e^{-\alpha t}$$

avec

IK_n: valeur de l'indice avant la pluie n en mm

IK_{n-1}: valeur de l'indice avant la pluie n-1en mm

P_{n-1}: hauteur de la pluie n-en mm

t : temps, en jours, séparant la fin de la pluie n-1 du début de la pluie n

α : coefficient ajusté à 0,15 pour nos sites (Boemare, 1992).

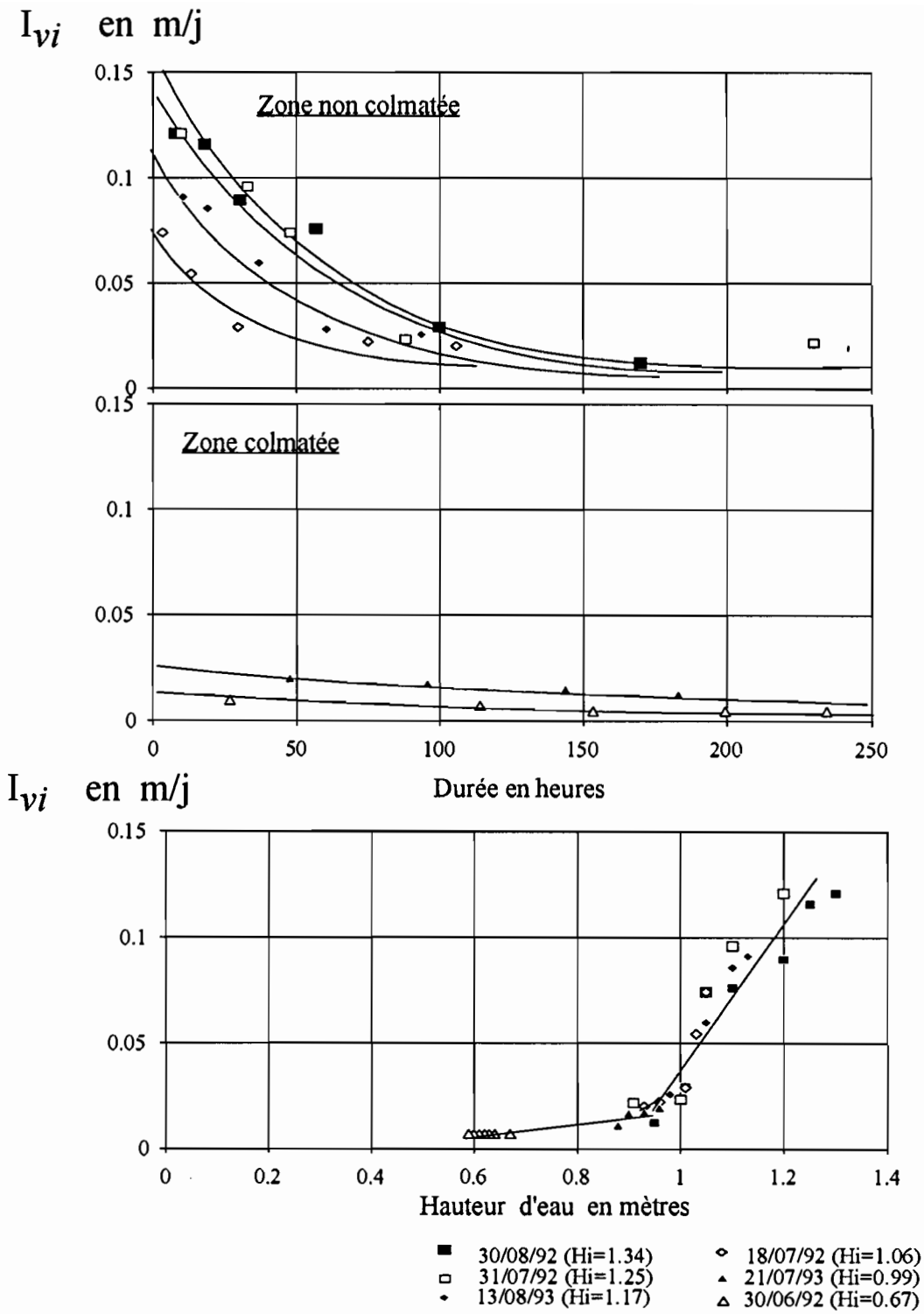


Figure 46 :évolution du taux de vidange instantané I_v en fonction du temps et de la hauteur d'eau dans la mare de Bazanga. Avec Hi, la Hauteur initiale de l'épisode de vidange.

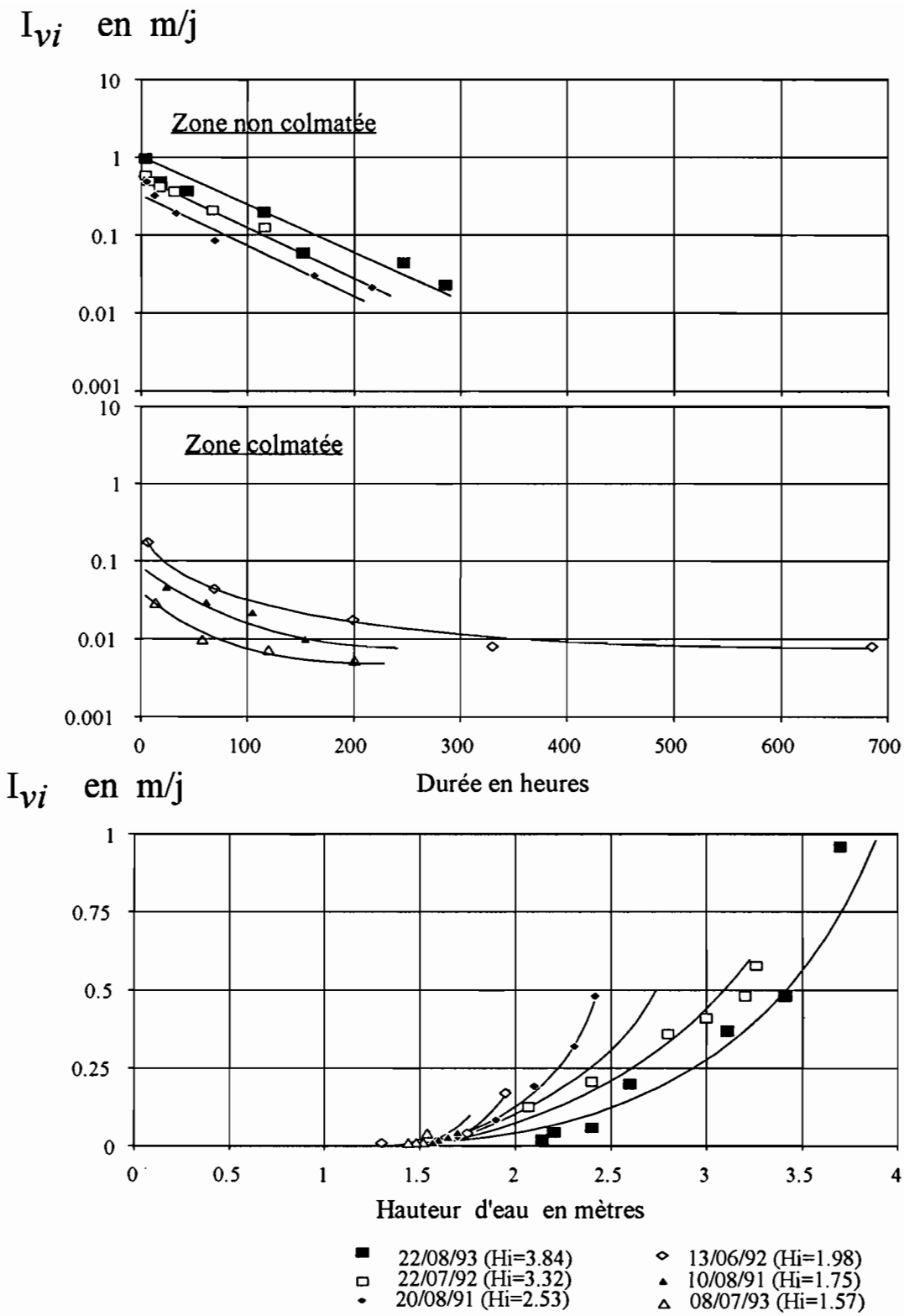


Figure 47 :évolution du taux de vidange instantané I_v en fonction du temps et de la hauteur d'eau dans la mare de Wankama. Avec Hi, la Hauteur initiale de l'épisode de vidange.

Mare de Wankama (figure 47)

Les valeurs maximales des intensités instantanées de vidange sont comparables à celles de la mare de Sama Dey. La présence d'une zone imperméable est mise en évidence par des intensités initiales et finales de vidange souvent très faibles (quelques centimètres par jour au maximum). Les épisodes débutant dans les niveaux colmatés sont caractérisés par de faibles valeurs de I_{vi}.

La corrélation de l'intensité de vidange avec la hauteur d'eau est établie jusqu'à un niveau situé aux environs de 2 mètres. Cette relation met ainsi en évidence le niveau où l'infiltration est essentiellement contrôlée par la conductivité hydraulique : niveau à perméabilité équivalente très faible (hauteur inférieure à 2 mètres). Entre les niveaux colmatés et non colmatés, la transition de régime est progressive (figure 47) et les intensités finales de vidange s'établissent entre 1,2 et 2,1cm/j (10/08/1991 et 08/07/1993) selon l'épisode considéré. D'autre part, on constate que la décroissance du régime est d'autant plus faible que la hauteur initiale est forte : événements du 22/08/1993 et 22/07/1992 à comparer avec les événements du 20/08/1991 et 13/06/1992 (figure 47). La forte variabilité interépisode n'est que faiblement expliquée par le niveau initial de la vidange. Aux niveaux inférieurs, la variabilité observée est nettement plus faible et par là, traduit la faible influence de la charge et des conditions initiales sur la dynamique de vidange à l'intérieur de la zone colmatée.

Mare de Sama Dey (figure 48)

Les intensités instantanées de vidange révèlent une forte potentialité d'infiltration verticale. L'évolution de l'intensité instantanée de vidange est assimilable à une infiltration stricte sous charge variable où l'on observe une stabilisation à une valeur minimale élevée.

Les conditions d'humidité initiales ne semblent pas être un facteur explicatif essentiel de cette variabilité. Par contre, la prise en compte de la hauteur d'eau initiale par un modèle à plusieurs variables met en évidence un faible effacement de la variabilité interépisode. L'existence d'hétérogénéités dans la couverture pédologique de surface reste une hypothèse admissible pour expliquer la différence de comportement marquée entre les événements du 31/07/1992 et du 30/08/1992 (respectivement de hauteur initiale égale à 1,58 et 1,05 mètre) et ceux qui leur sont inférieurs. L'étude de la recharge de la nappe à la verticale de cette mare nous amènera à compléter la connaissance de son fonctionnement qui s'avère être la combinaison d'un système micro-poreux de surface (horizon de surface) avec un système macro-poreux en profondeur avec des voies préférentielles d'évacuation des eaux (Estèves et Lenoir, 1994).

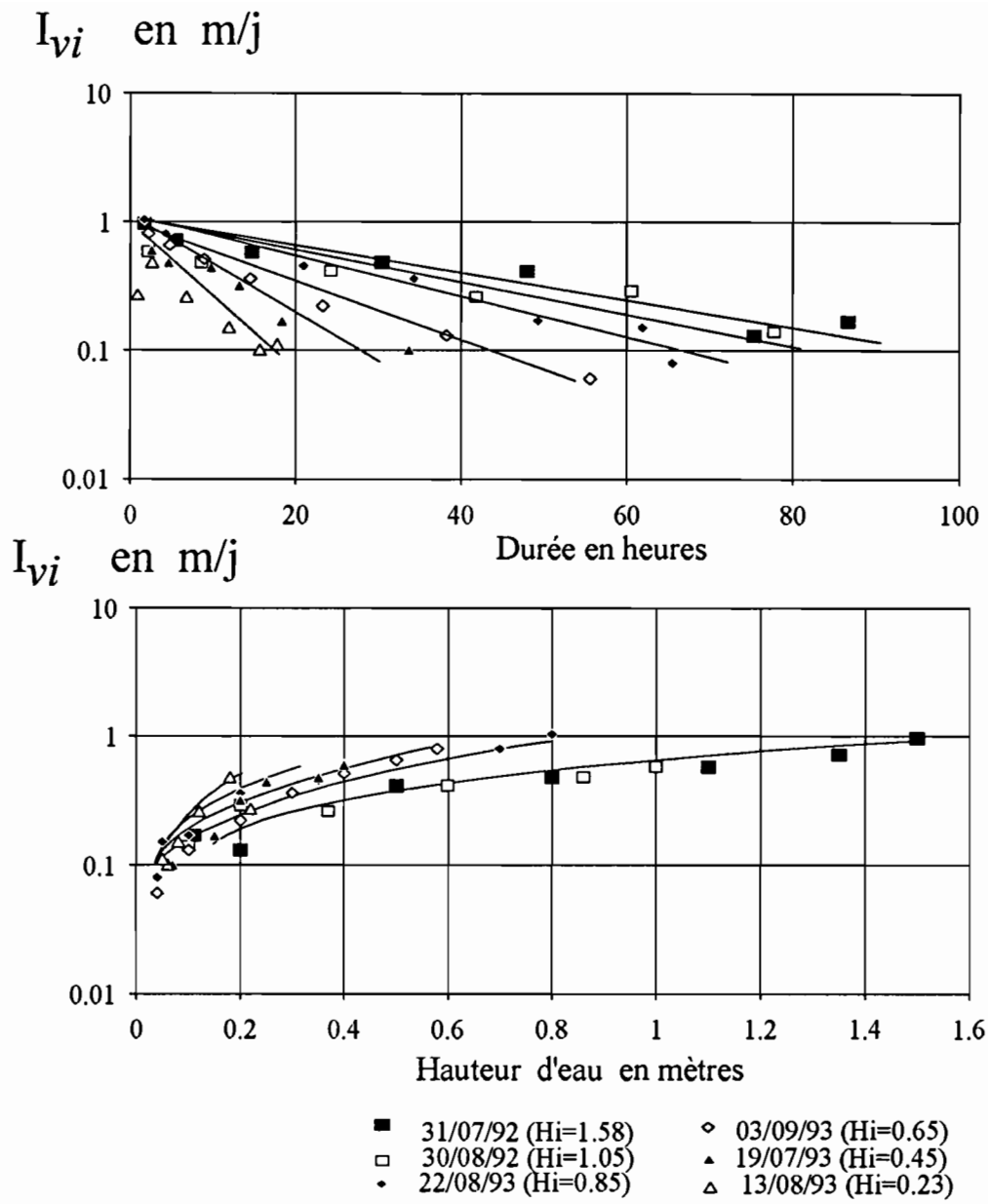


Figure 48 : évolution du taux de vidange instantané I_v en fonction du temps et de la hauteur d'eau dans la mare de Sama Dey. Avec Hi, la Hauteur initiale de l'épisode de vidange.

Analyse par régression simple et multiple

Une analyse statistique des variables échantillonnées de chacun des épisodes de vidange a été entreprise. Elle avait pour but, dans un premier temps, de préciser la relation entre l'intensité instantanée de vidange et la hauteur d'eau H. Dans un deuxième temps, elle devait expliquer la variabilité interépisode observée par agrégation, à la relation précédente, d'autres variables telles que la hauteur initiale et les conditions d'humidité initiales (indice IK). Les régressions sont calculées sur l'ensemble des épisodes observés

Deux modèles servent à cette analyse :

- un modèle linéaire qui s'écrit :

$$I_{vi} = AH + C \text{ pour la mare de plateau} \qquad (27)$$

et un modèle logarithmique :

$$\log(I_{vi}) = A\log(H) + C \text{ pour les mares de vallée} \qquad (28)$$

avec

I_{vi} : intensité instantanée de vidange en cm/j

H : hauteur d'eau à l'instant t en cm

A et C : coefficients de régression

- un modèle a plusieurs variables explicatives :

$$I_{vi} = AH + A_1IK + C \text{ pour la mare de plateau} \qquad (29)$$

ou

$$\log(I_{vi}) = A\log(H) + A_2\log(Hi) + C \text{ pour les mares de vallée} \qquad (30)$$

avec

Hi : hauteur initiale de l'épisode de vidange en cm

IK : indice pluviométrique

A et C : coefficients de régression

On remarquera que l'utilisation d'un modèle linéaire dans le cas des mares de vallée a nécessité la transformation des valeurs sous une forme logarithmique. Par la suite, nous tiendrons compte de cette transformation pour la comparaison des différents modèles testés. Les coefficients ajustés pour les différents modèles sont donnés dans les tableaux 20 et 21.

Tableau 20 : coefficients du modèle simple Iv(H)

	coefficients ajustés		
	Bazanga	Wankama	Sama Dey
C	-27,7 (2,44)	-9,88 (0,88)	0,55 (0,07)
A	0,32 (0,02)	4,64 (0,38)	0,66 (0,05)

() écart type

Tableau 21 : coefficients du modèle multi-variables Iv(H, Hi, IK)

	coefficients ajustés		
	Bazanga	Wankama	Sama Dey
C	-30,45 (2,45)	-9,58 (0,83)	0,95 (0,132)
A	0,35 (0,024)	5,95 (0,65)	0,747 (0,049
A1	-0,022 (0,008)		
A2		-1,38 (0,58)	-0,28 (0,08)

() écart type

Résultats

Un récapitulatif des paramètres statistiques des différents modèles testés est présenté dans le tableau 22.

L'ajustement d'un modèle simple (27) et (28) permet d'obtenir un pourcentage de variance expliquée moyennement satisfaisant pour les deux mares de vallée (0,83 et 0,84) et légèrement plus satisfaisant pour la mare de plateau (0,89). D'autre part, les coefficients ajustés sont entachés d'un fort écart type (tableau 20), notamment pour la mare de Wankama. L'utilisation d'une méthode de régression multiple progressive ascendante a permis de tester l'agrégation d'une autre variable au modèle linéaire précèdent. Dans les trois cas, l'amélioration n'est pas significativement importante (tableau 22). Une légère amélioration est apportée par l'agrégation de l'indice IK pour la mare de Bazanga et par l'agrégation de la hauteur initiale pour les deux autres mares. Ce choix statistique coïncide avec l'analyse faite à partir des graphiques 46, 47 et 48 où l'on observe, en effet, des intensités de vidange d'autant plus faibles que Hi est élevée.

Tableau 22 : qualité de l'estimation des Iv(H) et Iv(H, Hi, IK) modèles testés

	modèle simple			modèle multi-variable		
	variable explicative	% variance expliquée η^2	écart type résiduel	variable supplémentaire	% variance expliquée η^2	écart type résiduel
Bazanga	H	89	1,27	indice IK	91	1,14
Wankama	log(H)	84	1,81*	log(Hi)	86	1,73*
Sama Dey	log(H)	83	1,34*	log(Hi)	87	1,28*

* écart type des vraies valeurs $\sigma = e^{\sigma}$

Discussion

1.Quelle que soit la mare, les valeurs maximales des intensités de vidange sont comparables à un régime de vidange sous infiltration. Les conditions d'humidité jouent un rôle négligeable dans le cas de matériaux sableux : succion capillaire faible quelles que soient les conditions d'humidité. Quoique restant peu significatif, leur rôle est mis en évidence pour les sols à texture fine de la mare de Bazanga. En ce qui concerne la stabilisation à une intensité de vidange minimale (mare de Wankama et Bazanga),

elle semble être déterminée par le rapport de la perméabilité de la surface concernée à l'épaisseur de la lame d'eau restante.

Dans le cas de la mare de Sama Dey, l'intensité de vidange finale semble uniquement dûe à la perméabilité de la surface concernée, la lame d'eau étant négligeable devant la forte perméabilité offerte par le système poreux de surface et de profondeur.

La recherche *in situ* des caractéristiques hydrodynamiques des matériaux sous la mare et des mesures de niveau d'une meilleure précision pourraient sans doute permettre une approche plus fine du phénomène.

4 RECONSTITUTION DES LAMES VIDANGEES

Les relations mises à jour entre l'intensité instantanée de vidange et la hauteur d'eau dans la mare peuvent être utiliseés pour prédire la lame vidangée au cours d'un épisode. Pour cela, nous proposons de tester différents modèles empiriques, basés sur l'ajustement d'une loi de vidange (intensité de vidange - hauteur d'eau) tenant compte de tous les épisodes observés. Ils seront comparés à deux modèles d'infiltration élaborés pour modéliser l'infiltration dans des conditions idéales : le modèle simplifié de Philip (1969) et le modèle de Green et Ampt (1911).

Il faudra considérer cette approche plus comme un moyen de valider les hypothèses de fonctionnement que comme une modélisation à proprement parler.

4.1 Ajustement d'une loi de vidange empirique

Les données utilisées

Une loi de vidange spécifique à chaque mare peut être empiriquement déterminée en étudiant la relation entre les intensités de vidange initiales et finales observées sur l'ensemble des épisodes mesurés et la hauteur d'eau dans la mare. Les valeurs des I_{vi} utilisées pour ajuster une loi de vidange sont données dans le tableau A44 en annexe 4.

Ajustements testés

Selon la forme des relations hauteur d'eau - I_{vi} initial et final (figure 49), plusieurs types d'ajustement peuvent être envisagés.

Mare de Bazanga

La vidange de la mare a deux cinétiques distinctes. Cela apparaît nettement dans la relation présentée en figure 49. L'ajustement de deux relations linéaires peut être envisagé. La rupture existant entre les niveaux 0,9 et 1 m peut être mise en relation avec le seuil de perméabilité déterminé à 0,95 m (position moyenne) dans la section 1.3 de ce chapitre. Ce niveau peut donc servir de point charnière entre les deux relations de la loi de vidange. Par simplification, nous avons adopté l'application d'une constante de vidange pour les niveaux inférieurs à 0,95 m.

Pour les hauteurs comprises entre 0,5 et 0,94 m, la loi de vidange s'écrit :

$$I_{vi} = A \text{ en } m/j \qquad (31)$$

avec

I_{vi} l'intensité instantanée de vidange en m/j

A constante de vidange en m/j

pour les hauteurs comprises entre 0,95 et 1,34 m, elle s'écrit :

$$I_{vi} = AH + B \text{ en } m/j \qquad (32)$$

avec

H la hauteur d'eau dans la mare en m

A et B les coefficients ajustés par régression

La détermination de la constante de vidange (31) est faite à partir de la moyenne des valeurs de I_{vi} mesurées au cours des deux périodes d'assèchement observées (1991 et 1992). Le tableau 23 donne les valeurs des coefficients ajustés de la loi de vidange (31) et (32) accompagnés des paramètres statistiques.

Tableau 23 : valeurs des coefficients ajustés de la loi de vidange (mare de Bazanga)

modèle ajusté	nombre de valeurs	domaine de validité	A	B	r^2	erreur type d'estimation	valeurs calculées aux bornes
		m					m/j
I_{vi} = cte = A	97	0,5 - 0,94	0,01 (0,001)				0,01
I_{vi} = AH + B	49	0,95 - 1,34	0,33 (0,015)	-0,295 (0,02)	0,905	0,011	0,015 - 0,15

() écart type

Mare de Wankama

Malgré la présence d'un seuil de perméabilité bien marqué (en surface), la séparation des deux cinétiques est moins évidente que pour la mare précédente. D'autre part, l'allure de la relation et la dispersion des valeurs I_{vi} maximales rendent l'utilisation d'une relation linéaire plus délicate. Aussi, avons nous testé trois types d'ajustement pour choisir une expression empirique de la vidange la mieux adaptée.

L'ajustement linéaire est de la même forme que celui appliqué pour la mare de Bazanga (31 et 32), c'est à dire constitué par deux demi-droites. Le point charnière est déterminé par la position maximale du seuil de perméabilité (1,7 m). La constante A (31) est calculée de la même façon que pour la mare de Bazanga.

Par ailleurs, nous avons choisi de tester l'ajustement de la loi de vidange sur un modèle de type puissance et un autre de type polynomial de degré 2. Ces modèles d'ajustement s'écrivent respectivement :

$$I_{vi} = AH^B \text{ en } m/j \qquad (33)$$

$$\text{et } I_{vi} = AH^2+BH+C \text{ en } m/j \qquad (34)$$

avec A, B et C les coefficients ajustés par régression

Les coefficients ajustés pour les trois modèles sont présentés dans le tableau 24. La figure 49 permet d'apprécier la qualité de chacun des modèles. La forme polynomiale paraît la mieux adaptée à la représentation de la relation.

Tableau 24 : valeurs des coefficients ajustés de la loi de vidange (mare de Wankama)

modèle ajusté	nombre de valeurs	domaine de validité	A	B	C	r^2	erreur type d'estimation	valeurs calculées aux bornes
		m						m/j
$I_{vi} = cte = A$	147	1,3 - 1,69	0,015 (0,006)					0,015
$I_{vi} = AH + B$	37	1,7 - 3,84	0,285 (0,02)	-0,46 (0,05)		0,83	0,068	0,02 - 0,63
$I_{vi} = AH^B$	50	1,3 - 3,84	0,45 (0,19)	4,12 (0,27)		0,82	0,47	0,015 - 1,18
$I_{vi} = AH^2 + BH + C$	50	1,3 - 3,84	0,09 (*)	-0,17 (*)	0,092 (*)	0,9	(*)	0,015 - 0,73

() écart type

(*) écart type non calculé

Mare de Sama Dey

Sur l'ensemble des hauteurs d'eau. une seule loi de vidange est nécessaire (pas de seuil de perméabilité marqué). L'ajustement de la loi de vidange est faite par un modèle linéaire identique à celui utilisé pour les deux autres mares (32) et par un modèle de type puissance (33). Les valeurs des coefficients ajustés sont données dans le tableau 25. La qualité des deux ajustements est proche (r^2 de 0.81 et 0.82). Le manque de valeurs observées aux hauteurs maximales ne permet pas de conclure sur la meilleure adaptation de l'un ou l'autre. Les estimations de ces deux modèles divergent aux valeurs extrêmes (figure 49).

Tableau 25 : valeurs des coefficients ajustés de la loi de vidange (mare de Sama Dey)

modèle ajusté	nombre de valeurs	domaine de validité	A	B	r^2	erreur type d'estimation	valeurs calculées aux bornes
		m	m/j				m/j
$I_{vi} = AH + B$	52	0,01 - 1,58	0,795 (0,05)	0,11 (0,02)	0,81	0,125	0,12 - 1,35
$I_{vi} = AH^B$	52	0,01 - 1,59	0,84 (0,09)	0,68 (0,04)	0,825	0,395	0,04- 1,21

() écart type

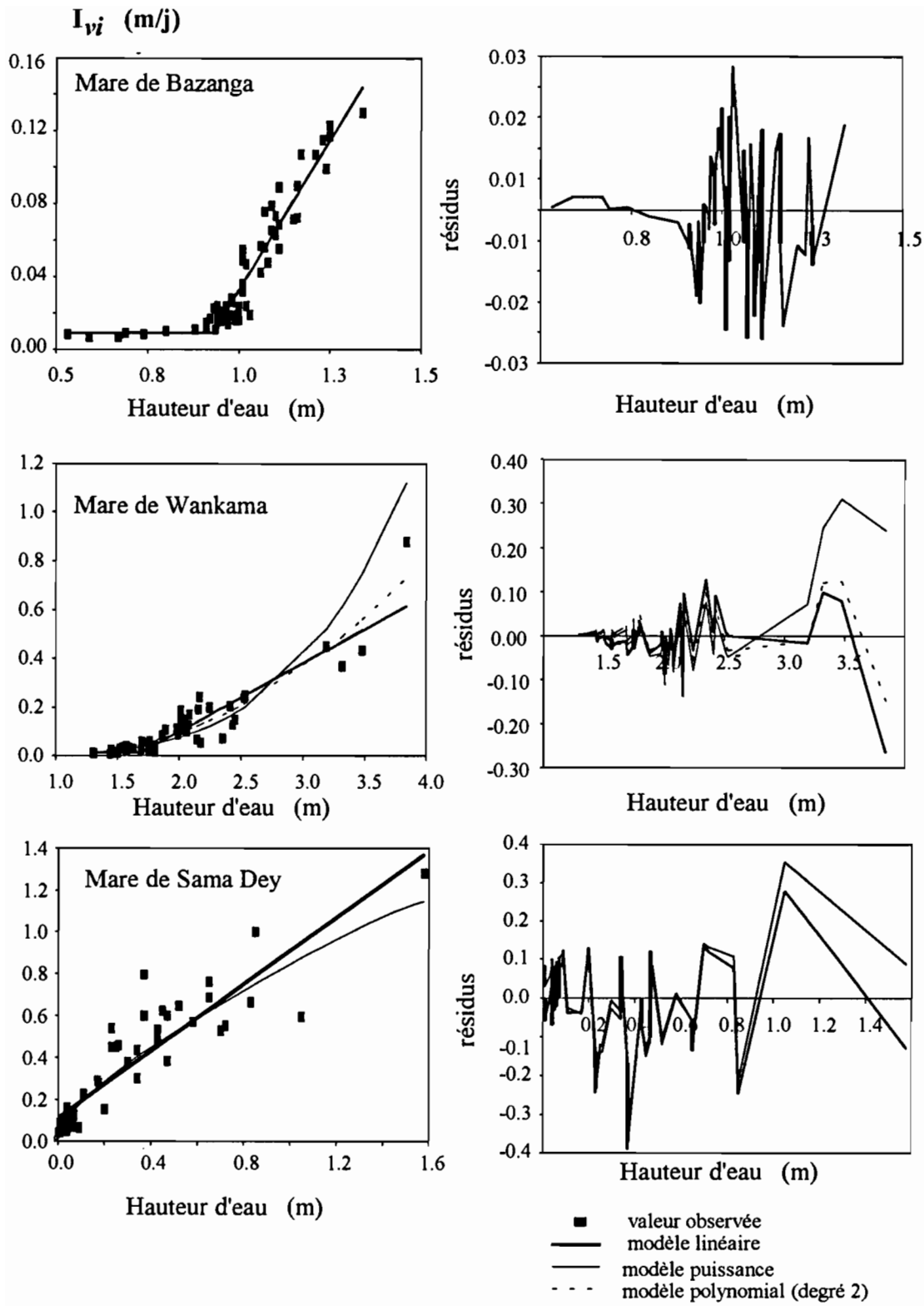


Figure 49: ajustements des lois de vidange à différents modèles

4.2 Présentation des modèles de vidange utilisés

4.2.1 Les modèles empiriques : utilisation des lois de vidange ajustées

La loi de vidange ajustée par les différents modèles statistiques présentés dans le paragraphe précèdent peut être utilisée pour calculer l'évolution du niveau de la mare au cours d'un épisode, en écrivant :

$$I_{vi} = \frac{-dH}{dt} = f(H) \qquad (35)$$

Cette égalité est développée en fonction du modèle de représentation de la loi de vidange choisie. Elle est ensuite intégrée dans le temps afin calculer le niveau H à un instant t de l'épisode de vidange considéré. Les notations sont les suivantes :

H : la hauteur à l'instant t,

H_i : la hauteur initiale de l'épisode et,

A, B et C : coefficients ajustés des modèles statistiques,

c : constante d'intégration dont on calcule la valeur pour $H = H_i$

Le modèle constant :

$$I_{vi} = \frac{-dH}{dt} = A(cte) \qquad (36)$$

après intégration on a :

$$H = A(-t + c) \text{ avec}$$
$$\text{à } t = 0 \text{ ; } H = H_i \qquad (37)$$
$$d'\text{où } H = -At + H_i$$

Le modèle linéaire :

$$I_{vi} = \frac{-dH}{dt} = AH + B \qquad (38)$$

après intégration on a :

$$H = \frac{1}{A} e^{A(-t+c)} - \frac{B}{A} \text{ avec}$$
$$\text{à } t = 0 \text{ ; } H = H_i \text{ alors } c = \frac{1}{A} \ln\left|AH_i + B\right|$$
$$\text{d'où } H = \frac{1}{A}\left[e^{-At}.AH_i + B - B\right] = H_i.e^{-At} \qquad (39)$$

Le modèle puissance :

$$I_{vi} = \frac{-dH}{dt} = AH^B \qquad (40)$$

après intégration on a :

$$H = \left[\frac{1}{A(-B+1)(-t+c)}\right]^{\frac{1}{B-1}} \text{ avec}$$

$$\text{à } t = 0 \text{ ; } H = H_i \text{ alors } c = \frac{1}{A(-B+1).H_i^{(B-1)}}$$

$$\text{d'où } H = H_i + \left[A(B-1)t\right]^{\frac{1}{1-B}} \qquad (41)$$

Le modèle polynomial de degré 2[3]*:*

$$Ivi = \frac{-dH}{dt} = AH^2 + BH + C \qquad (43)$$

après intégration on a :

$$H = \sqrt{\frac{A}{K}} tg\left[\sqrt{AK(-t+\beta)}\right] - \frac{B}{2A} \qquad (44)$$

avec

$K = C - \frac{B^2}{4A}$ et,

$\beta = \frac{\alpha}{A} Arctg(\alpha Hi + \frac{\alpha B}{2A})$

4.3 Les modèles d'infiltration de Philip et Green-Ampt

Le modèle Philip simplifié (1969)

Il s'agit du modèle d'infiltration de Philip simplifié ou appelé aussi le "modèle PTT" (Philip Two Term). Dans une série de publications, Philip (1969) présente une analyse de l'infiltration basée sur l'équation de Fokker-Plank. Pour un sol homogène avec une humidité initiale uniforme et une humidité constante en surface, Philip trouve une solution de l'équation d'écoulement ayant la forme d'une série infinie mais avec une rapide convergence :

$$F = s.\sqrt{t} + At \ldots \qquad (45)$$

où F est la lame cumulée infiltrée

s, la sorptivité,

A et les autres paramètres sont fonction à la fois de la diffusivité de l'eau dans le sol et de l'humidité initiale du sol en surface. Pour une infiltration dans les deux dimensions, tous les termes de la solution doivent être employés. Par contre, pour une infiltration verticale, seuls les deux premiers termes sont nécessaires. On a ainsi :

$$F = s.\sqrt{t} + At + \varepsilon(t) \qquad (46)$$

avec dF/dt qui tend vers ½ $st^{-1/2}$ lorsque t tend vers zéro et dF/dt qui tend vers A lorsque t tend vers l'infini. Dans ce cas, A peut être comparé à la conductivité hydraulique à saturation K_S.

Le modèle Green et Ampt (1911)

Un modèle simple, basé sur la loi de Darcy, a été proposé par Green et Ampt (1911). Ce modèle (47) est basé sur les hypothèses suivantes :

---

[3]le détail de l'intégration est donnée en annexe 4.

- le front d'humectation est uniforme dans l'espace,

- la séparation des zones humide et sèche à proximité du front est nette,

- le sol est mouillé et la teneur en eau dans la zone mouillée est constante tout au long de l'infiltration, Cela implique que la conductivité K dans la zone mouillée soit toujours la même,

- la pression capillaire est négative juste au dessous du front d'humectation.

Dans le cas où l'on considère une lame d'eau submergeante non négligeable et constante, l'équation du modèle de Green et Ampt devient :

$$Kt = F - \eta(H+S).\ln\left[\frac{F+\eta(\mathrm{H+S})}{\eta(H+S)}\right] \text{ (Singh, 1989)} \qquad (47)$$

avec

K la conductivité hydraulique en m/j

F la lame infiltrée au temps t en jours

H la lame d'eau submergeante en m

S la succion capillaire au front d'humectation en m,

η est une fraction de volume de sol ou la porosité mouillable du sol,

Les valeurs des paramètres utilisés pour la reconstitution des lames vidangées sont données dans le tableau 26. Elles sont empruntées aux travaux réalisés par Rawls et *al.* (1983) et Clapp et Hornberger (1978) qui les ont calculées pour différentes classes de texture de sol. Pour la mare de Bazanga, nous avons choisi les valeurs d'un sol peu filtrant (texture limono-argileuse), d'un sol moyennement filtrant (texture argilo-limoneuse) pour la mare de Wankama, et d'un sol filtrant (texture sablo-limoneuse) pour la mare de Sama Dey.

Tableau 26 : valeurs des paramètres choisis (Ralws et al, 1983 ; Clapp et Hornberger, 1978)

	Philip		Green - Ampt		
	A m/j	s m, j -½	**η** %	**S** m	**K** m/j
Bazanga	0,0012	0,02	0,4	0,3	0,0012
Wankama	0,036	0,01	0,3	0,2	0,036
Sama Dey	0,26	0,05	0,4	0,1	0,26

4.4 Calcul des lames vidangées

Episodes testés

Ce sont les 18 épisodes ayant servi à l'analyse des intensités instantanées de vidange (section 3.1) que l'on utilise dans ce test de reconstitution. Leurs caractéristiques sont présentées dans le tableau 19 au paragraphe 3.1.2.

Comparaison des lames cumulées vidangées

En première approche, la qualité de la reconstitution des lames cumulées vidangées par les différents modèles peut être jugée par l'écart type aux lames cumulées observées. Il s'agit de l'écart type à l'ensemble des valeurs observées au cours de la vidange. Il s'écrit :

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{n}(\text{lame obs} - \text{lame calc})^2} \qquad (47)$$

avec

lame obs : la lame observée à l'instant t

lame calc : lame calculée par le modèle à l'instant t

Pour chacun des épisodes reconstitués, les valeurs de l'écart type sont données dans le tableau 27. Une analyse plus précise peut être faite par la comparaison des lames cumulées pour trois épisodes caractéristiques du fonctionnement de chacune des mares.

Tableau 27 : valeurs des écarts types des épisodes reconstitués

	modèles testés				
hauteur initiale de l'épisode	linéaire	puissance	polynomial (degré 2)	Philip	Green - Ampt
en cm			écart type en cm		
			Bazanga		
67	0,6	non testé	non testé	0,5	1,1
99	0,6			1,5	1,4
106	0,2			2,6	1,7
117	0,5			4,4	2,4
125	1,0			8,2	4,4
134	0,3			9,6	4,7
			Wankama		
157	0,6	1,5	1,3	6,2	7,2
175	0,7	0,6	1,2	1,9	4,1
198	1,7	2,0	1,6	8,9	20,3
253	5,1	6,5	5,8	17,9	4,2
332	3,2	2,2	2,4	30,6	6,9
384	12,7	12,7	14,2	39,0	4,0
			Sama Dey		
23	1,2	1,3	non testé	2,0	1,1
45	1,3	1,0		3,0	3,2
65	1,5	1,4		4,8	3,4
85	1,7	1,3		7,6	3,8
105	6,0	6,9		5,3	7,0
158	10,1	10,5		14,8	2,5

Mare de Bazanga

L'utilisation du modèle empirique à deux cinétiques (constant puis linéaire) est assez satisfaisante pour la reconstitution des 6 épisodes. Les écarts types aux lames cumulées observées restent faibles (< 0,01). Par contre, les deux modèles pris dans la littérature se comportent de façon moins satisfaisante. La comparaison des lames cumulées de trois épisodes (figure 50) met en évidence une sous-estimation croissante des lames pour les modèles Philip et Green -Ampt en fonction de la hauteur d'eau. Le choix d'une perméabilité représentative de la zone colmatée et non évolutive en fonction de la hauteur d'eau peut expliquer ce biais systématique.

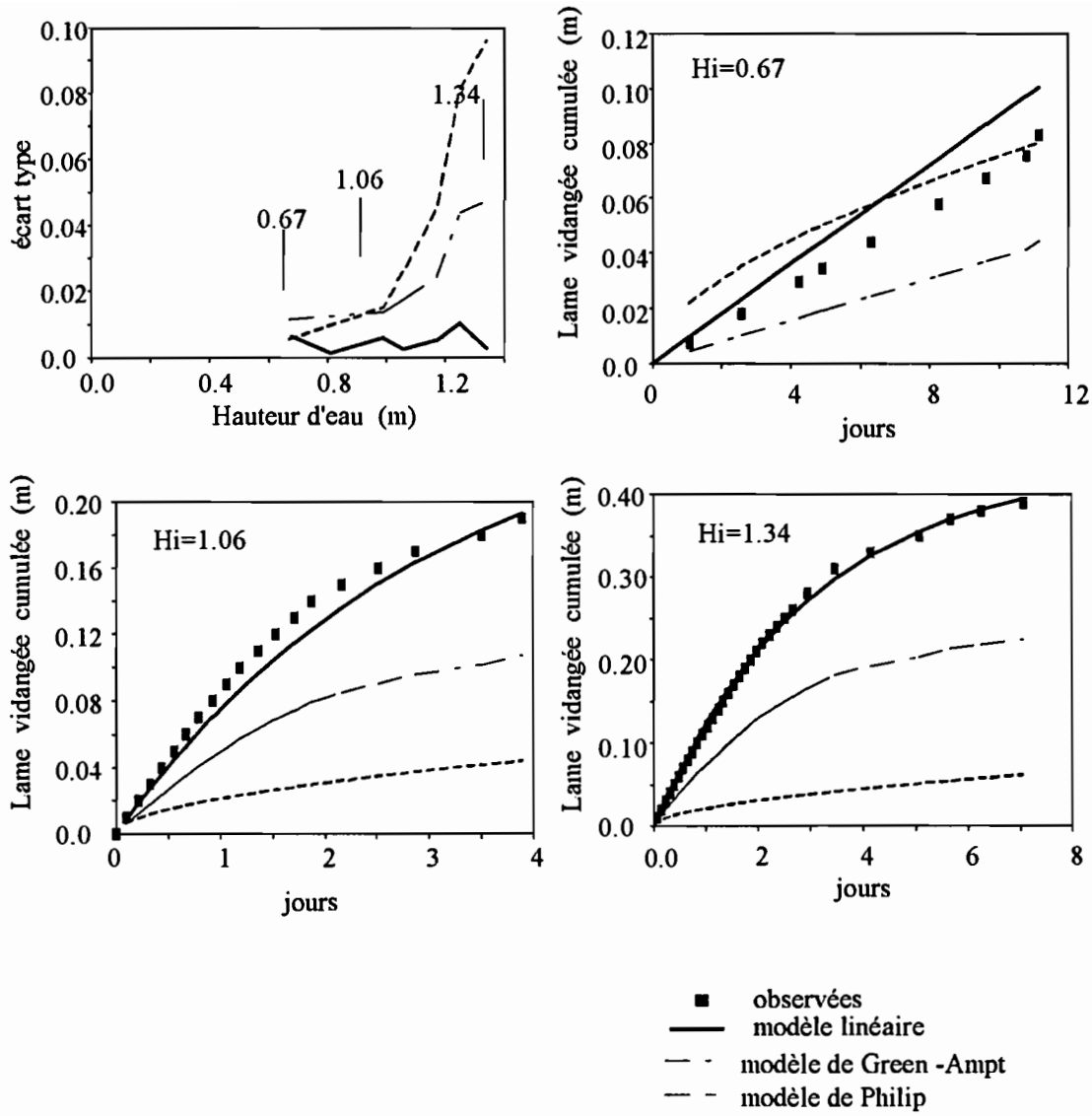


Figure 50 : comparaison des lames cumulées vidangées pour les différents modèles de vidange sur la mare de Bazanga pour les épisodes du 30/06/1992 (Hauteur Initiale=0.67 m), du 18/07/1992 (Hi=1.06 m) et du 30/08/1992 (Hi=1.34 m)

<u>*Mare de Wankama*</u>

Les trois modèles empiriques ont des réactions assez semblables et permettent une reconstitution des lames cumulées satisfaisantes mis à part l'épisode du 22/08/1993 (Hi = 3,84 m) (figure 51). Le modèle de Philip a une réaction differente selon l'évènement. Il sous-estime fortement les lames vidangées pour les épisodes ayant débuté hors de la zone colmatée. De la même façon que le modèle de Green-Ampt, le modèle de Philip surestime les lames vidangées pour les épisodes ayant commencés dans la zone colmatée (10/08/1991- 07/07/1993) ou ayant une durée de vidange exceptionnelle pour la saison des pluies (épisode du 13/06/1992 Hi=1,98 m). La prise en compte de paramètres uniques quelle que soit la surface inondée peut apparaître comme l'un des principaux facteurs de divergence de ces deux modèles.

Le modèle de Green-Ampt semble le mieux adapté pour décrire les épisodes aux hauteurs maximales (figure 51 Hi =3,84 m).

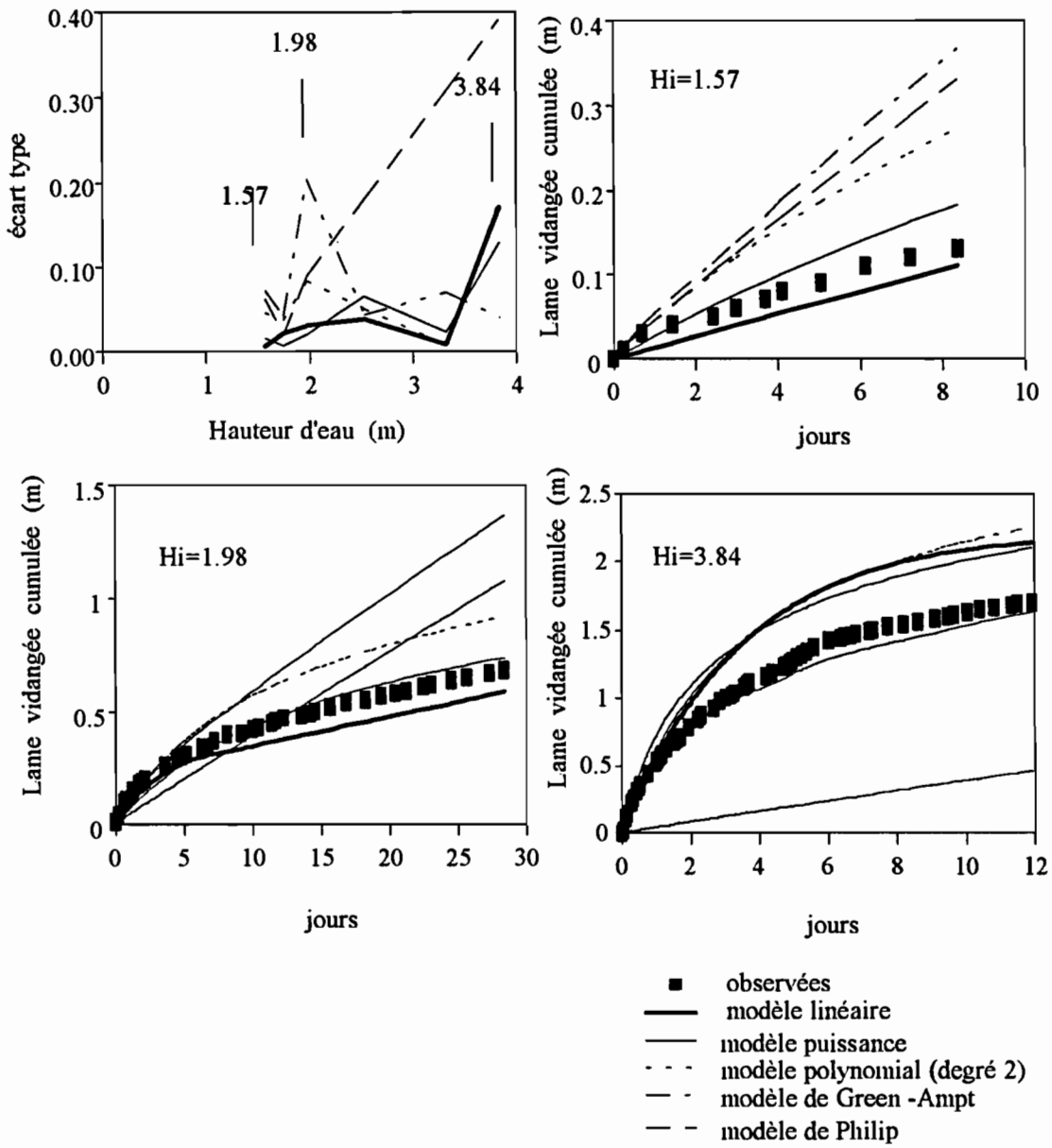


Figure 51 : comparaison des lames cumulées vidangées pour les différents modèles de vidange sur la mare de Wankama pour les épisodes du 08/07/1993 (Hauteur initiale=1.57 m), du 13/06/1992 (Hi=1.98 m) et du 22/08/1993 (Hi=3.84 m)

Mare de Sama Dey

Les comportements des deux modèles empiriques sont très voisins (figure 52) pour les six épisodes testés et assez satisfaisants mis à part pour l'épisode du 31/07/1992 (Hi = 1,58 m) dont la description est biaisée par une surestimation continue de la lame cumulée. Même si l'écart type reste acceptable, le modèle de Philip et Green-Ampt ne s'ajuste pas à la dynamique de la vidange (sauf pour l'événement du

31/07/1992). Comme nous l'avons souligné dans le section 3.1 (analyse des intensités de vidange), les événements du 31/07/1992 et 30/08/1992 (Hi=1,05 m) sont aussi dissociés par leur comportement singulier vis à vis de l'ensemble analysé (figure 52).

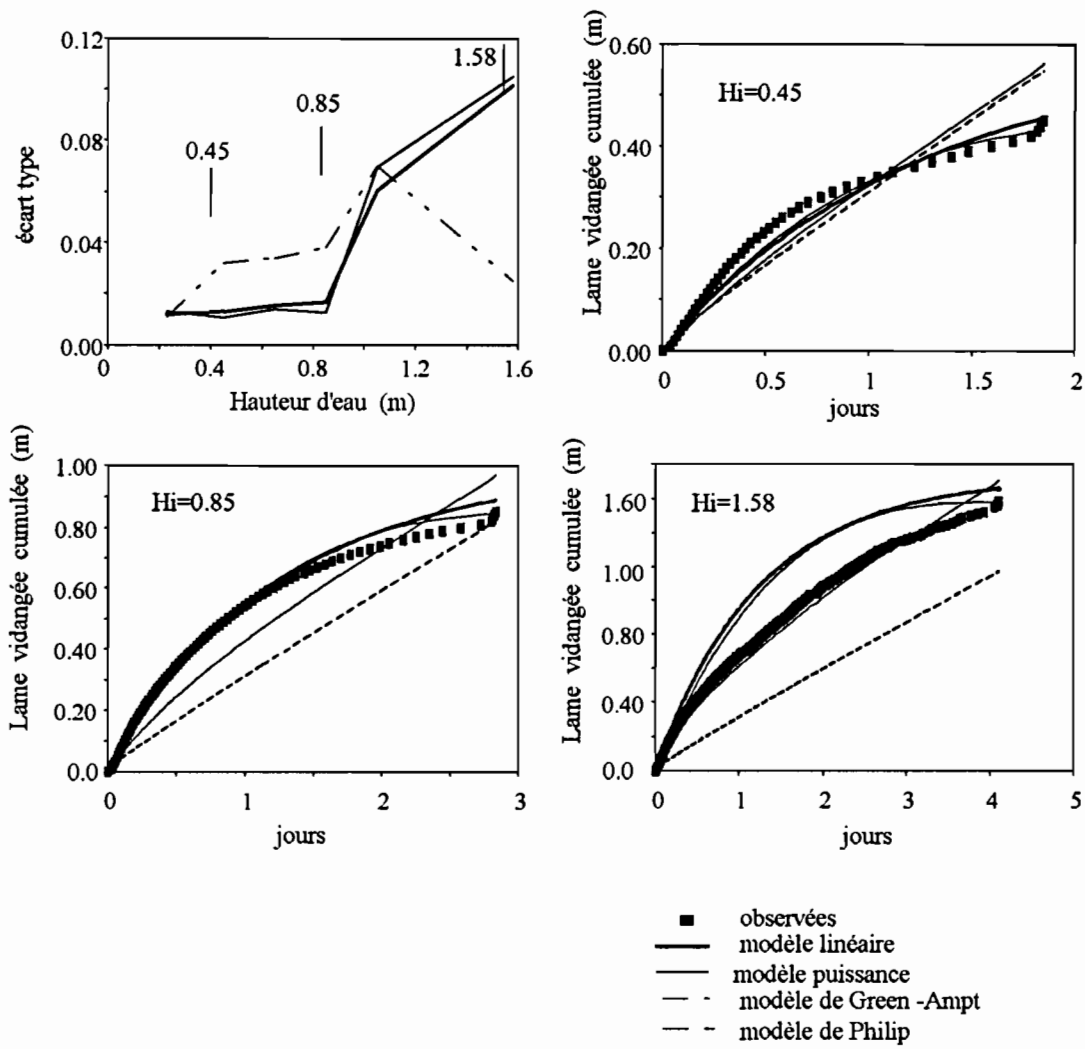


Figure 52 : comparaison des lames cumulées vidangées pour les différents modèles de vidanges sur la mare de Sama Dey et pour les épisodes du 19/07/1993 (Hauteur initiale=0.45 m), du 22/08/1993 (Hi=0.85 m) et du 31/07/1992 (Hi=1.58 m)

Discussion

Même si l'échantillon sur lequel a été réalisé le test de reconstitution peut paraître faible, il rassemble des événements dont les différentes durées et conditions initiales choisies englobent l'éventail de comportements possibles. Dans le cas des mares ayant une forte discontinuité hydrodynamique (mare de Bazanga et de Wankama), ce test est très démonstratif en mettant bien en évidence la divergence de description par un modèle prenant en compte les caractéristiques d'une seule zone. Dans le cas de la mare de Sama Dey, la reconstitution de la dynamique des événements est rarement

respectée par les deux modèles issus de la littérature. De manière générale, les modèles empiriques reconstitue de manière satisfaisante la dynamique des événements.

Le choix d'une relation empirique $f(H)$ paraît judicieux et montre la nécessité de prendre en compte les hétérogénéités du substrat de la mare pour comprendre et déterminer l'intensité de la vidange. Loin d'être suffisante, cette analyse a mis à jour des singularités de fonctionnement. Une étude plus détaillée, d'une part, de la dynamique d'état de surface au cours de la saison des pluies (mare de Wankama) et, d'autre part, de la structure des horizons profonds (mare de Sama Dey) apportera les compléments de connaissance nécessaires pour une modélisation réaliste du système mare - sol - sous-sol.

5 CARACTERISATION DU FONCTIONNEMENT HYDROLOGIQUE

Le schéma de fonctionnement des trois mares de référence peut s'exprimer par une relation entre la hauteur d'eau initiale et finale des épisodes de vidange et leur taux d'évaporation[4] respectifs. A une hauteur donnée et un instant d'un épisode de vidange quelconque correspond un taux d'évaporation instantané qui a une valeur située entre le taux d'évaporation minimal (taux d'évaporation initial) et maximal (taux d'évaporation final) à cette même hauteur. Ceci traduit les potentialités du système concerné à la vidange par infiltration. Les valeurs des t_{epi} initiaux et finaux sont fournies dans les tableaux A45, A46 et A47 en annexe 4.

5.1 Analyse des relations hauteur d'eau - taux d'évaporation

On a porté en figure 53 les valeurs du taux d'évaporation en début et fin de chacun des épisodes de vidange, en fonction de la hauteur d'eau de la mare. Si l'on excepte les quelques points de la partie supérieure du graphe pour la mare de Bazanga, on distingue très bien pour chacune des trois mares de référence une transition brutale entre deux zones : une zone où le taux d'évaporation reste faible (inférieur à 15 % pour Wankama et Bazanga ; inférieur à 3 % pour Sama Dey) et n'augmente que très lentement lorsque le niveau de la mare diminue ; une zone où le taux d'évaporation croît très rapidement lorsque le niveau de la mare décroît (dans quelques cas l'évaporation devient prédominante sur l'infiltration). Sur les mares de Bazanga et Wankama, cette transition rapide correspond au passage du seuil de perméabilité, identifié en section 1.3.

[4] Rappel : les taux d'évaporation (initial et final) t_{epi} correspondent au rapport du flux d'évaporation moyen journalier au flux de vidange total (infiltration +évaporation). Pour plus de précision , on peut se reporter à la section 1.3.4 en partie 1.

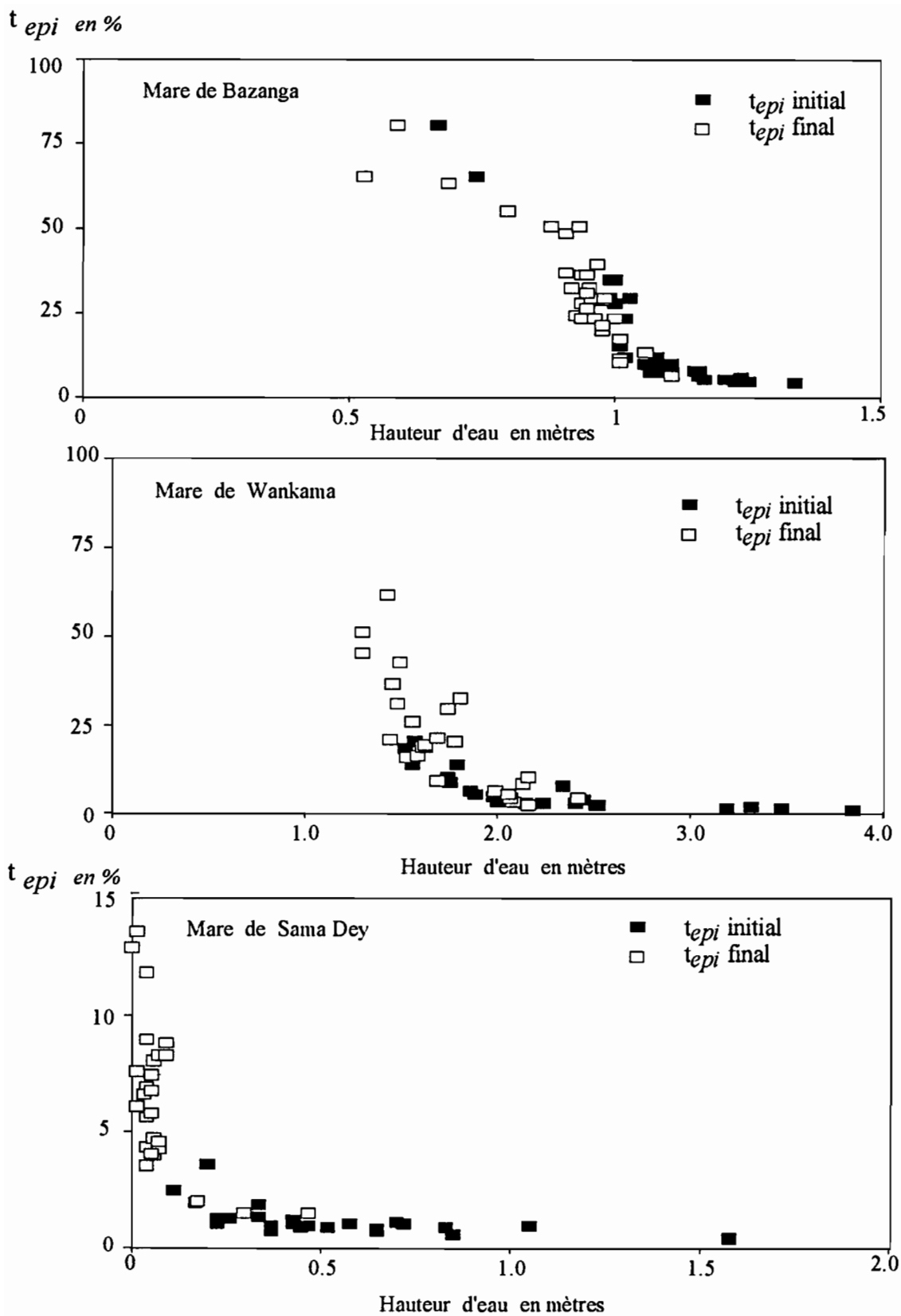


Figure 53 : relation hauteur d'eau - taux d'évaporation t_{epi} des mares de référence

Les valeurs de t_{epi} calculées pour chacune des zones doivent être interprétées avec prudence car on considère ici une évaporation moyenne dont l'évaporation journalière peut s'écarter significativement. De plus, pour les faibles hauteurs de la mare, l'incertitude sur le flux de vidange est assez forte, comme cela a été mentionné en section 3.1 chapitre 3. Ceci explique la forte dispersion verticale des points dans la partie gauche des graphes de la figure 53. Par contre, les ordres de grandeur restent valables.

En moyenne, on retiendra qu'en régime de vidange rapide, c'est à dire lorsque le niveau de la mare est au dessus du seuil de perméabilité, le taux d'évaporation reste inférieur à 15 % (mare de Bazanga et Wankama), voire inférieur à 5 % (mare de Sama Dey). Au cours de ce régime, une estimation même grossière du flux d'évaporation aura peu d'influence sur l'estimation du flux d'infiltration (une erreur de 100 % sur le flux d'évaporation se traduira par une erreur de moins de 10 % sur le flux d'infiltration).

Dans la zone de transition, une évaluation précise des deux flux est assez délicate car ils sont du même ordre de grandeur. La fréquence de passage du plan d'eau dans cette zone aura donc une certaine importance pour évaluer la précision des calculs des bilans. Enfin, le régime de vidange lent, lorsque le taux d'évaporation devient supérieur à 50 % , n'est observé que lors de longues périodes sèches entre deux épisodes pluvieux ou en fin de saison des pluies, au cours de l'assèchement total. Nous allons donc chercher à apprécier la fréquence de fonctionnement dans chacun des deux régimes dominants.

5.2 Occurrence du régime à vidange rapide et à vidange lente

Les diagrammes des vidanges présentés dans la figure 55 donnent une vue rapide et simplifiée de chacun des épisodes de vidange : chronologie, amplitude, niveau initial, et niveau final. Le seuil hydrologique moyen est positionné sur chacun des diagrammes et permet ainsi de matérialiser la limite théorique d'un régime rapide à un régime lent.

On peut aussi évaluer quantitativement l'occurrence du régime rapide et du régime lent au cours d'un épisode, d'une année, d'un ensemble d'années. Le tableau 28 donne l'occurrence saisonnière de chacune des phases du régime qui est le rapport du volume perdu au cours de la phase de vidange rapide au volume perdu total saisonnier (48). De la même manière, on peut calculer l'occurrence pour un épisode (49) ou à un instant de la saison (50) pour suivre l'évolution des régimes et connaître ainsi approximativement la principale composante de la vidange à cet instant.

L'occurrence saisonnière est calculée comme suit :

$$Fvr = \frac{\sum (V_{Hi} - V_{Hs})}{V_{tot}} \text{ et } F_{vl} = 1 - F_{vr} \qquad (48)$$

L'occurrence à l'épisode est calculée de la façon suivante :

$$si\ H_i > H_s\ f_{vr} = \frac{V_{Hi} - V_{Hs}}{V_{tots}} \ et\ f_{vl} = 1 - f_{vr} \qquad (49)$$

$$si\ H_i < H_s\ \ F_{vl} = 1$$

L'évolution de l'occurrence au cours de la saison est calculée avec :

$$\text{à un instant t de la saison} \quad f_{vr'} = \frac{\sum (V_{Hi} - V_{Hs})}{\sum V_{tots}} \ et\ f_{vl'} = 1 - f_{vr} \qquad (50)$$

avec

H_i : hauteur initiale de l'épisode

H_s : hauteur du seuil hydrologique

V_{Hi} : volume à la hauteur initiale en m^3

V_{Hs}: volume au seuil hydrologique en m^3

V_{tot} : variation de volume total au cours de l'épisode en m^3

V_{tots} : variation de volume total au cours de la saison en m^3

F_{vr} ou F_{vl} : occurence saisonnière de la phase de vidange rapide (F_{vr}) ou de la phase à vidange lente (F_{vl})

f_{vr} ou f_{vl} : occurence de la phase de vidange rapide (f_{vr}) ou de la phase à vidange lente (f_{vl}) pour un épisode donné.

$f_{vr'}$ ou $f_{vl'}$: occurrence de la phase de vidange rapide ($f_{vr'}$) ou de la phase à vidange lente ($f_{vl'}$) à un instant t de la saison.

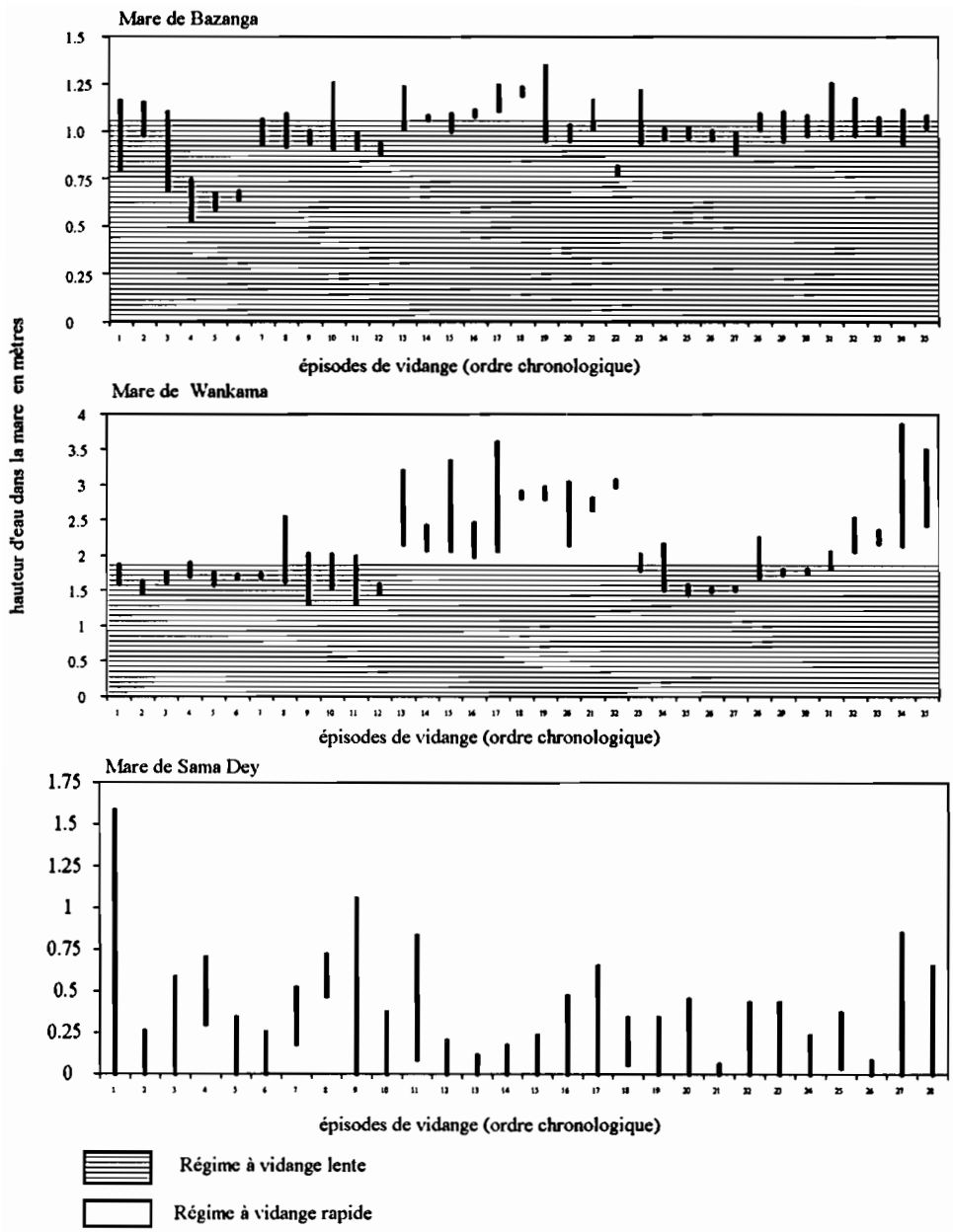


Figure 55 : diagrammes des épisodes de vidange - saison 1991, 1992 et 1993

Tableau 28 : occurrence saisonnière de la phase à vidange rapide et de la phase à vidange lente.

	phase à vidange rapide	phase à vidange lente	total pluviométrique	indice de distribution pluviométrique[5]
	%	%	mm	mm/j/j
		Bazanga		
1991	33	67	577	32
1992	47	53	511	69
1993	26	74		
		Wankama		
1991	41	59	532	38
1992	94	6	507	75
1993	88	12		

Commentaires

Bien que les deux mares aient un fonctionnement hydrologique semblable (figure 53), l'occurrence de la phase à vidange rapide est privilégiée dans la mare de Wankama (tableau 28). En effet, avec un cumul pluviométrique similaire en 1991, 1992 et 1993 (tableau 28) ainsi qu'un indice de distribution saisonnier assez proche, les bilans hydrologiques des deux mares sont très différentes et l'on constate, en 1992 par exemple, que l'occurrence de la phase de vidange lente (évaporation prédominante) est de 0,53 pour la mare de Bazanga alors qu'elle est seulement de 0,06 pour la mare de Wankama.

Face à un même régime pluviométrique, et pour une même configuration pédologique, la réponse hydrologique d'une mare à déstocker rapidement semble être à la fois déterminée par la morphologie de sa cuvette et par la superficie de la zone colmatée en regard des surfaces inondées par les crues.

Enfin, on remarquera aussi dans le tableau 28 que la variabilité interannuelle de l'occurrence de l'une des deux phases est élevée et va dans le même sens pour les deux mares. Il est d'ores et déjà intéressant de noter que cette variabilité est en étroite relation avec celle de la distribution des pluies au cours de la saison (indice de distribution tableau 28). Cet aspect sera largement développé dans le chapitre 8 concernant la variabilité du bilan hydrologique.

[5]La notion d'indice de distribution pluviométrique ou indice d'intermittence pluviométrique ainsi que son calcul sont présentés en annexe 6. Il compare la distribution intra saisonnière des pluies observées à une distribution saisonnière régulière.

CHAPITRE 5

ETUDE DE LA VIDANGE

SYNTHESE

Même si, *a posteriori*, l'analyse de la vidange à l'échelle annuelle est insuffisante pour caractériser correctement la dynamique de vidange des mares, elle permet de rendre compte de la spécificité hydrologique des mares temporaires du degré carré, comparativement à des réservoirs de surface étudiés auparavant en zone sahélienne.

En effet, l'analyse des chroniques limnimétriques à l'échelle de l'épisode en liaison avec les informations pédologiques et hydrodynamiques des sols des cuvettes montre qu'en général et durant la saison des pluies, la vidange des mares temporaires est essentiellement induite par un processus d'infiltration.

L'intensité du processus d'infiltration est variable. Sa dynamique dépend, d'une part, de la présence d'une zone colmatée et de son extension verticale et latérale et, d'autre part, de la hauteur du plan d'eau de la mare en début d'épisode, hauteur d'eau induite par les apports en écoulement de surface.

Ainsi, la mare Bazanga (mare de plateau) a une vidange qui est réduite à des intensités maximales de l'ordre de 15 cm/j avec des intensités minimales proches de 1 cm/j. Par contre, les mares Wankama et Sama Dey village(mare de vallée), ont des intensités de vidange nettement plus élevées pouvant atteindre jusqu'à 100 cm/j. Les faibles intensités proche de 1 cm/j ne sont atteintes que lors d'épisodes de vidange de durée prolongée, essentiellement en saison sèche.

L'ajustement de lois de vidange, pour chacune des mares, en tenant compte de la présence ou non d'une zone colmatée, permet de reconstituer correctement quelques épisodes caractéristiques de leur régime et ainsi de valider les hypothèses de fonctionnement avancées. Enfin, l'analyse des relations hauteur d'eau-taux d'évaporation permet, en terme de bilan, d'identifier deux phases de vidange :

- une phase à cinétique rapide, où l'infiltration est le terme principal, correspondant au déstockage dans les zones perméables,
- une phase à cinétique lente, où l'évaporation est le terme principal, correspondant au déstockage dans la zone colmatée.

Par contre, pour un même régime de précipitations (ou d'écoulement), l'occurrence d'une des deux phases est fortement variable selon que l'on considère les mares de plateau ou les mares de vallée fermée. Elle apparaît très dépendante de la distribution intra-saisonnière des précipitations. Ainsi, la forte variabilité interannuelle de la distribution des préciptations a un fort impact sur le bilan hydrologique annuel de la mare.

CHAPITRE 6

ESTIMATION DE L'EVAPORATION

CHAPITRE 6

ESTIMATION DE L'EVAPORATION

Après un bref rappel des différents facteurs agissant sur l'évaporation d'une petite nappe d'eau libre en milieu tropical sec, nous comparons trois méthodes d'estimation de l'évaporation sur deux des mares de référence (Bazanga et Wankama). L'estimation de l'évaporation est réalisée à partir :
- des bacs évaporatoires (in situ et classe A),
- d' un suivi ionique des eaux,
- d'un suivi isotopique des eaux, notamment, de l'oxygène 18 et du deutérium. Ces méthodes d'estimations s'appuient sur deux suivis réalisés au cours de la saison sèche 1991-1992 et celle de 1992-1993.

La méthode isotopique s'avère la mieux adaptée et sert pour étendre les résultats à l'ensemble des mares étudiées et à la période de la saison des pluies grâce au calcul d'un coefficient de transpostion K. Nous comparons nos résultats à ceux provenant d'études similaires .

1 L'EVAPORATION D'UNE NAPPE D'EAU LIBRE

1.1 Généralités

L'évaporation, passage de l'eau liquide à la vapeur d'eau est consommatrice d'énergie. La façon dont elle diffuse dans l'atmosphère a été l'objet de nombreuses études depuis Dalton. Les voies d'approche de la mesure de l'évaporation se résument essentiellement à la mesure de la consommation liquide, l'évaluation de l'énergie utilisée par l'évaporation et l'estimation du transfert de vapeur d'eau. Laissant de côté les aspects théoriques du processus d'évaporation, nous nous concentrerons ici sur les principaux facteurs de l'évaporation des surfaces d'eau libre de lacs peu profonds sous climat sahélien et sur les méthodes actuelles d'estimation. Quelques ouvrages de synthèse traitant de l'évaporation et développant l'aspect théorique de ce phénomène (Brutsaert, 1982) et plus particulièrement pour les surfaces d'eau libres (Riou, 1975; Pouyaud, 1986) peuvent être consultés.

Facteur d'énergie de l'évaporation d'une surface d'eau libre

Si l'on s'intéresse à la quantification du bilan d'énergie pour un volume de référence défini comme suit : "une part élémentaire de l'interface eau - atmosphère, pellicule infiniment mince contenant à la fois les plus basses couches de l'atmosphère et les plus superficielles de l'eau"(Pouyaud, 1986), on peut écrire une forme très générale de l'équation du bilan énergétique :

$$Rn + LE + H + G + A = \frac{Zw}{Zt} \qquad (51)$$

où

Rn est le rayonnement net, résultante du bilan radiatif **[Rn = (1-a)Rg +Ra -Rs]** composé de trois termes : le rayonnement atmosphérique **Ra**, le rayonnement de la surface évaporante **Rs** et le rayonnement global **Rg** en facteur avec l'albédo **a** de la surface évaporante.

LE et **H** sont les flux de chaleur latente (flux de vapeur d'eau) et de chaleur sensible émis par la face supérieure dans l'atmosphère.

G est le flux calorifique transmis par la face inférieure à l'eau sous-jacente. C'est un terme qui peut être important dans le cas de lacs ou mares peu profonds car il sera d'autant plus influencé par les variations des conditions atmosphériques que la profondeur du réservoir sera faible.

A représente le flux d'énergie advective. Dans le cas des surfaces évaporantes de faibles superficies, entourées de surfaces aux caractéristiques (température, humidité de l'air, rugosité...) très différentes, il existe un important transfert latéral d'énergie advective qui doit être pris en compte. Ce phénomène de transfert latéral est communément appelé "effet oasis". On imagine facilement que cet effet sera non négligeable pour les mares que nous étudions et fortement variable selon leur situation géomorphologique.

Zw/Zt est la variation d'énergie stockée dans la mince couche de référence qui est négligeable dans le cas de l'interface eau atmosphère. Elle devra être prise en compte dans le bilan énergétique d'un lac dans son ensemble.

Facteurs du transfert de vapeur d'eau

Le flux de vapeur d'eau est déterminé par l'existence d'un gradient vertical d'humidité. L'approche la plus ancienne pour déterminer ce flux est celle proposée par Dalton (1802) qui donne une relation approchée entre l'évaporation et la tension de vapeur d'eau. Elle s'écrit sous sa forme la plus générale :

$$E = f(u)(e_s - e_d) \qquad (52)$$

$$ou\ E = (b_o + bu)(e_s - e_d)\ simplifiée\ à\ E = bu(e_s - e_d)$$

avec

e_s, tension de vapeur saturante à la température de la surface évaporante,

e_d, pression de vapeur d'eau atmosphérique mesurée sous abri. Ce terme, aussi appelé déficit de vapeur saturante traduit le gradient vertical d'humidité existant.

u la vitesse du vent au dessus de surface évaporante.

f(u) une fonction linéaire du vent où $\mathbf{b_0}$ et **b** sont les coefficients d'ajustement, souvent simplifiée à **bu**. Harbeck (1962) a mis en évidence expérimentalement la variation de la constante b en fonction de la surface du réservoir. En effet, l'augmentation de la surface entraine une diminution de l'évaporation. Cette variation est peu sensible pour de faibles superficies, ce qui est notre cas puisque la surface de nos mares est de l'ordre de l'hectare. Cet aspect est d'autant plus intéressant que la superficie des mares étudiées ici est souvent plus proche de 5 ha que de 1000 Ha. La comparaison des résultats de réservoirs étudiés auparavant dans la zone sahélienne (Ibiza, 1972; Cogels et al, 1991 ; Pouyaud, 1986 ; Vuillaume, 1981) avec les mares de la région de Niamey semble donc délicate. Dans une simulation numérique pour des conditions d'advection locale, de température, d'humidité, de vent proches de celles de la région sèche Nordestine du Brésil, G. Araujo de Moura (1992) calcule l'évaporation d'un plan d'eau pour des superficies variant de 1,2 à 8,5 Ha et des capacités volumiques allant de 8000 m^3 à 150000 m^3. Sous certaines conditions (pas d'écoulement turbulent à l'interface Eau-Atmosphère), il estime la variation de l'évaporation journalière de 8,6 mm/j (S= 8,5 Ha) à 13,5 mm/j (S= 1,2 Ha).

1.2 Les différentes méthodes d'estimation de l'évaporation d'une surface d'eau libre

Nous distinguerons deux grandes familles de méthodes utilisées pour estimer l'évaporation : les méthodes dites "directes" et les méthodes dites "indirectes".

1.2.1 La méthode directe

Sous le terme de méthode directe, on entendra étude qui consiste à l'estimation de l'évaporation d'un plan d'eau par la mesure directe sur un bac à évaporation placé à proximité du plan d'eau. On considère alors l'évaporation de la surface élémentaire comme représentative de celle du lac. Malgré, la standardisation des surfaces élémentaires : bac classe A (bac de référence de l'OMM), bac Colorado (standard américain), la multiplicité des études sous de nombreux climats pour des surfaces évaporantes de superficies variables a montré la difficulté d'extrapolation à l'évaporation réelle d'un lac. On citera, entre autre, les travaux de Roche (1958), Riou (1966), Pouyaud (1986) pour l'Afrique Occidentale, et les travaux d'anglophones tel que Webb (1966), Stewart (1976) et. Morton (1983). Ces différents travaux ont montré la nécessité de prendre en compte les biais introduits par la méthodologie (échange de chaleur avec les parois, inertie thermique de la masse d'eau, effet de bord et de surface, Riou, 1975) en appliquant un coefficient de transposition entre l'évaporation mesurée sur bac et l'évaporation réelle du lac. Ils mettent aussi en évidence la nécessité de prendre en compte les conditions climatiques locales et les caractères de la surface évaporante (profondeur, superficie, encaissement) dans la détermination du coefficient de transposition.

Par exemple, dans l'étude des açudes du Nordeste brésilien, Molle (1991) montre, notamment, la sensibilité du coefficient de transposition (bac de classe A) en fonction de la surface évaporante (figure 56). La relation expérimentale établie entre le coefficient de transposition et la superficie du plan d'eau montre une variation de 0.7 (> à 30 Ha) à 1,0 (entre 1 et 5Ha). Outre le contexte physique pris en compte dans la transposition, l'imprécision de la mesure des niveaux relevés sur le bac s'ajoute à la difficulté d'estimer

l'évaporation réelle d'un lac. Enfin, cette méthodologie repose sur des considérations difficilement mesurables qui sont celles d'un déstockage par évaporation uniquement.

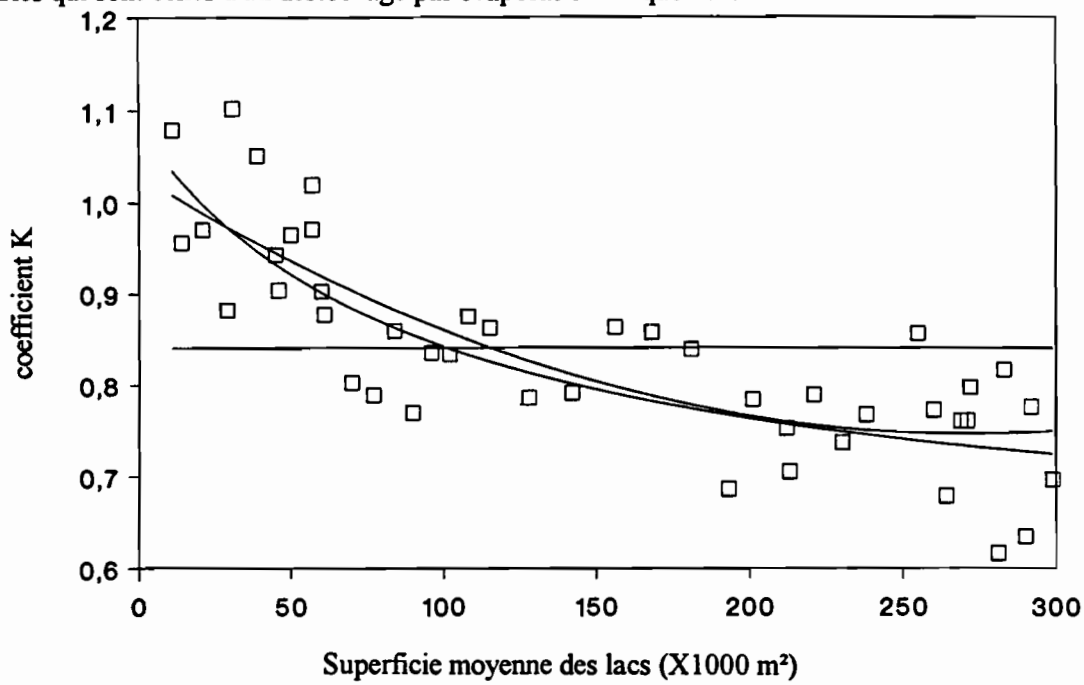


Figure 56 : variation du coefficient de transposition K (rapport évaporation mare/évaporation sur bac de classe A) a en fonction de la superficie évaporante (Molle, 1991)

1.2.2 Les méthodes indirectes

Les méthodes indirectes sont très diverses. Ce sont des méthodes utilisant, soit :

- le bilan d'énergie (méthodes de Bowen, Penman, Priestley-Taylor)

- soit l'adaptation de la formule de Dalton pour les lacs ou des dérivées de l'expression de Dalton par ajustement des paramètres aux conditions locales observées.

- soit le bilan hydrologique qui consiste à calculer le terme évaporation par différence dans l'équation du bilan hydrologique du réservoir considéré. Appliquée pour quelques grands réservoirs d'eau de la région sahélienne, entre autre, au lac de Guiers-Sénégal (Cogels et *al.*, 1991), lac Tchad (Toucheboeuf de Lussigny, 1969 ; Vuillaume, 1981), lac de Bam - Burkina - Faso (Ibiza, 1972; Pouyaud, 1986), cette méthode a montré ses limites du fait de l'imprécision cumulée sur l'ensemble des termes du bilan.

- soit l'établissement de relations empiriques entre l'évaporation et les éléments du climat tels que la température et le rayonnement. De telles relations ont été établies par Riou (1972) pour le lac Tchad avec les températures moyennes maximales sous abri, ou bien avec les valeurs mensuelles interannuelles sous abri (lac de Bam), ou encore avec le rayonnement global par Makkink (1957) utilisé par Stewart et Rouse (1976) pour les lacs peu profonds.

- soit la méthode chimique. Utilisée à plusieurs reprises (Carmouze, 1976 ; Cogels et Gac, 1986 ; Laraque, 1991) pour des études similaires sur des petits ou grands réservoirs de stockage, elle consiste à calculer l'évaporation par comparaison des concentrations initiales et finales d'un élément chimique

conservatif (le chlorure, le sulfate ou le sodium selon le contexte chimique environnant) considérant qu'au cours d'une période sans apport, la masse de cet élément ne peut être perdue que par infiltration. La différence entre la concentration théorique due à l'évaporation et la concentration observée traduit le facteur d'évaporation des variations volumiques observées au cours de la période. Elle nécessite le suivi des teneurs chimiques du réservoir. Cette méthode ne peut s'appliquer qu'à des réservoirs où le processus d'évaporation est fortement marqué donnant des concentrations intermédiaires et finales de l'élément suivi de grandeur supérieure à l'imprécision du bilan ionique.

- soit la méthode isotopique, basée sur un suivi de la composition en isotopes stables : Oxygène 18 et deutérium. En effet, en période d'évaporation stricte, les teneurs en oxygène 18 et deutérium de l'eau des mares vont s'enrichir avec le temps. Cet enrichissement est dû au fractionnement isotopique entre la phase vapeur évaporée et la phase liquide restante. Les phénomènes qui accompagnent le fractionnement isotopique sont complexes mais peuvent se subdiviser en phases simples (Craig and Gordon, 1965). A l'interface eau atmosphère, ces phases sont successivement :

- l'appauvrissement en isotopes lourds de la couche d'air saturée de vapeur (fractionnement isotopique à l'équilibre)
- l'appauvrissement en isotopes lourds dans la couche supérieure non saturée où les diffusivités dans l'air de $^{1}H^{2}H^{16}O$ et $^{1}H_2\,^{18}O$ sont plus faibles que celles de $^{1}H_2\,^{16}O$ (fractionnement cinétique).
- le mélange de la vapeur d'eau évaporée et de la vapeur atmosphérique dans la couche supérieure turbulente. Le fractionnement cinétique n'existe plus.
- le mélange de vapeur de la couche turbulente peut aussi redescendre à la surface du plan d'eau évaporante et se condenser à son contact. Il existe alors un mélange entre la phase gazeuse et la phase liquide.

L'évolution isotopique du réservoir soumis à l'évaporation va dépendre de facteurs climatiques et isotopiques locaux tels que :

- l'humidité relative de l'air **h**
- la teneur isotopique de la vapeur atmosphérique δa
- le facteur de fractionnement à l'équilibre α
- le facteur d'enrichissement à l'équilibre ε
- le facteur d'enrichissement cinétique $\Delta\varepsilon$

Elle permet de suivre le phénomène évaporatoire sans signal interférent comme cela pourrait être le cas avec l'utilisation de la méthode chimique (Fontes, 1976 ; Gonfiantini, 1986).

Ces deux dernières méthodes aboutissent à la mesure des variations volumiques du réservoir par évaporation. Elles nécessitent de ce fait la connaissance précise des relations hauteur - volume du réservoir considéré pour fournir une lame d'eau évaporée.

2 COMPARAISON DE DIFFERENTES METHODES D'ESTIMATION DE L'EVAPORATION

2.1 Méthodologie

2.1.1 Choix des méthodes

Les études, citées dans les paragraphes précédents, sur l'estimation de l'évaporation des surfaces d'eau libre en région sahélienne sont nombreuses mais se sont surtout concentrées sur des réservoirs de stockage dont les capacités volumiques et les superficies n'ont aucune commune mesure avec les petits systèmes de la région de Niamey.

D'autre part, comme nous l'avons montré dans le chapitre précèdent, l'infiltration est le processus dominant pendant toute la phase de vidange rapide, ce qui n'est pas le cas dans les moyens ou grands réservoirs comme la mare d'Oursi, le lac de Guiers ou le lac Tchad. Il serait donc hasardeux d'utiliser les formules empiriques établies sur ces lacs. Une étude spécifique s'impose. Deux mares de référence, dont les régimes de vidange ont été présentés au chapitre 5, ont servi à cette étude : Wankama (mare de bas-fond protégée des vents) et Bazanga (mare de plateau, exposée aux vents).

Trois méthodes d'études ont été comparées : méthodes par bac (bac de classe A, bac enterré in situ), méthode chimique et méthode isotopique. A posteriori, cette comparaison devrait aboutir au choix et à l'utilisation d'une méthode applicable à l'ensemble des mares de la zone d'étude.

2.1.2 Instrumentation et mesures

2.1.2.1 période de mesures

La mise en place de cette étude au cours de la période allant de la fin de la saison des pluies (fin septembre) jusqu'à l'assèchement presque total des mares (fin novembre) a été guidée par deux impératifs :

- un régime des mares avec un processus d'évaporation dominant (meilleure précision des mesures)
- des conditions atmosphériques stables et d'évaporation maximales (comparaison des évaporations bacs de la station régionale (Niamey - Aéroport) avec celles des sites étudiés).

A cela s'ajoute en saison des pluies des difficultés méthodologiques liées aux régimes des mares. En effet, elles présentent alors de grandes variations de volumes (stockage et déstockage) durant des intervalles de temps réduits empêchant un long suivi des teneurs ioniques et isotopiques nécessaire à l'estimation de l'évaporation par ces méthodes.

2.1.2.2 Instrumentation

Placés à proximité de chaque mare, des bacs enterrés (1 mètre sur 1 mètre et 60 cm de profondeur) ont été installés en fin de saison des pluies. Alimentés à chaque visite par l'eau de la mare en mesurant le volume manquant (par rapport au niveau initial de référence), ce suivi était combiné à un prélèvement d'eau

pour les isotopes et à une mesure de la conductivité de l'eau. Les variations de niveau de la mare ont été suivies par limnimétrie automatique au pas du centimètre. Les valeurs d'évaporation du bac de classe A de la station de Niamey - Aéroport (station du réseau météorologique national) sont utilisées afin d'établir une comparaison avec les évaporations mesurées *in situ*.

Un suivi chimique et isotopique avait été entrepris tout au long de l'année 1991. Le tableau 29 récapitule la nature des suivis réalisés par périodes et par sites (Desconnets et *al.*, à paraître).

Tableau 29 : récapitulatif des suivis pour l'estimation de l'évaporation par année et par site (d'après Desconnets et al, à paraître)

	suivi chimique	suivi isotopique	mesure sur bac in situ	suivi limnimétrique
		Bazanga (mare de plateau)		
1991	14/07 au 9/12		-	14/07 au 9/12
1992	23/09 au 30/11*		22/09 au 23/11	toute l'année
		Wankama (mare de vallée)		
1991	20/07 au 16/01/1992		-	20/07 au 16/01/1992
1992	23/09 au 20/01/1993*		23/09 au 30/11	toute l'année

* le suivi chimique a été réduit à la mesure de la conductivité.

2.1.2.3 Présentation des données utilisées

L'évolution annuelle et intra-saisonnière des éléments atmosphériques régionaux (rayonnement, température, humidité relative, station de Niamey-aéroport) est présentée en section 1 chapître 2.

Bac classe A station de Niamey - Aéroport

Mesurées par la Direction de la Météorologie Nigérienne (DMN), les valeurs journalières d'évaporation du bac de classe A (standard OMM) pour la période d'étude (1991 - 1993) ont une moyenne interannuelle de 10,7 mm/j (écart type de 3,7 mm/j). Les variations saisonnières sont bien marquées (figure 57) avec un minimum en saison des pluies (août) et un maximum en saison sèche (octobre - mai) dont les valeurs moyennes journalières sont comprises entre 7,4 et 8,2 mm/j (saison des pluies) et entre 11,3 et 14 mm/j (mars - avril) avec une variabilité interannuelle faible. La représentation en figure 57 des valeurs journalières accompagnée de l'écart type à la valeur moyenne mensuelle permet de remarquer une variabilité journalière plus élevée en saison des pluies (écart type entre 1,6 et 3,8) qui s'explique par la forte variation des conditions atmosphériques entre les jours pluvieux ou fortement nuageux et les jours non pluvieux.

Les valeurs moyennes mensuelles d'évaporation du bac de classe A sont données en annexe 5 dans le tableau A51.

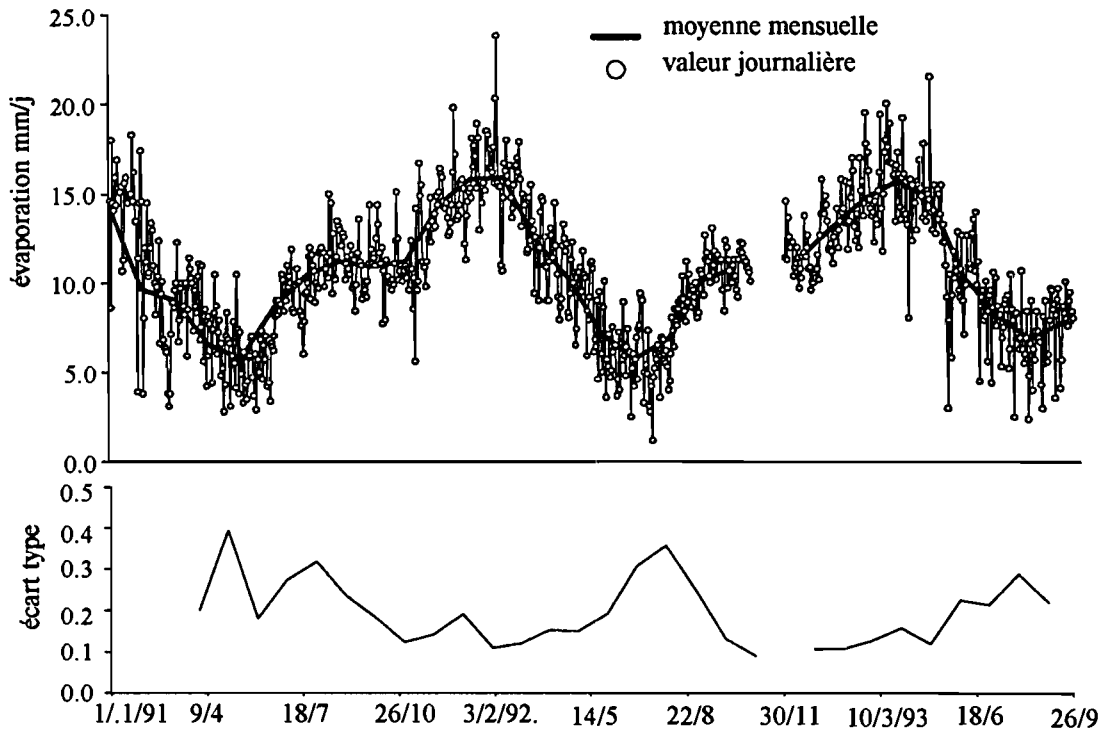


Figure 57 : variation de l'évaporation journalière du bac de classe A (station Niamey - Aéroport) pour la période avril 1991 - septembre 1993

Bac enterré in situ

Au cours de la période de suivi (62 jours à Bazanga et 67 jours à Wankama), le total évaporé mesuré a été de 477 mm à la mare de plateau (Bazanga) et de 428 mm à la mare de vallée (mare de Wankama), soit des valeurs moyennes journalières de 7,7 mm/j et de 6,4 mm/j qui traduisent, en partie, le contraste de conditions locales (encaissement du site - sol et végétation) et atmosphériques (direction et régime des vents) entre les deux sites.

Les valeurs des lames évaporées mesurées sur les deux bacs enterrés sont données en annexe 5 dans les tableaux A55 et A56.

Evolution des teneurs chimiques des eaux des mares

Seulement suivies en 1991, les teneurs en éléments ioniques majeurs des mares de Wankama et Bazanga sont données dans les tableaux A52 et A53 en annexe 5. En fin de saison des pluies, les eaux de ces deux mares ont une très faible minéralisation (entre 20 et 30 µS.cm-1) avec par contre une forte charge en M.E.S. constituée principalement de particules argileuses inférieures à 1µm. Au cours de l'assèchement de la mare, le pH reste près de la neutralité (6,5 à 7,5), le faciès chimique fortement bicarbonaté alcalin en début de saison sèche, évolue vers un faciès chloruré alcalin en fin de saison sèche (figure 58). A également été mesurée au cours de cette année, la composition ionique des pluies (sur les cumuls hebdomadaires) à la station de Yélouma Est (13°26,96N - 02°33,57E). Ces teneurs sont données en annexe 5 tableau A54.

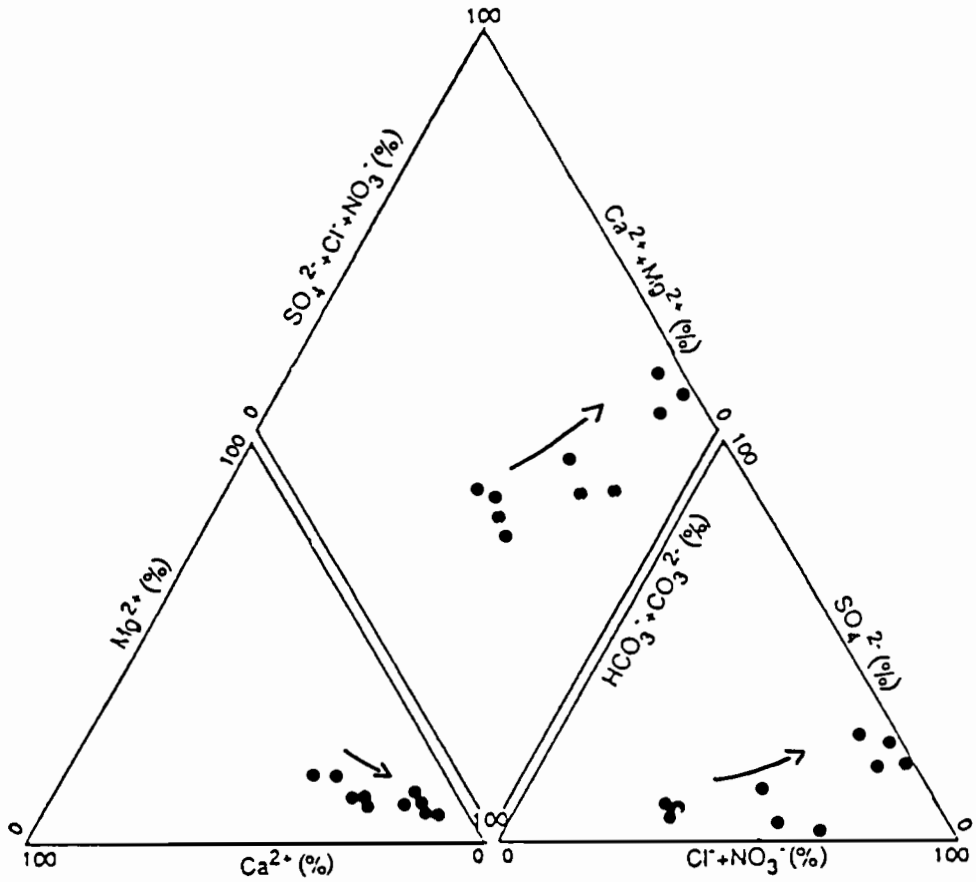


Figure 58 :faciés et évolution chimique des eaux des mares (année 1991)

Evolution des teneurs isotopiques des eaux des mares

Les teneurs en oxygène 18 et deutérium suivies au cours des deux années 1991 et 1992 sur un ensemble de trois mares en 1991 et de deux mares en 1992 sont données en annexe 5 dans les tableaux A52 et A53 (suivi 1991) et les tableaux A55 et A56 (suivi 1992). Dans le diagramme $\delta^{18}O$ δ^2H présenté en figure 59, les teneurs de l'eau des deux mares s'alignent sur une droite d'évaporation de pente égale à 4,53.

$$\delta^2H = 4.53\delta^{18}O - 11.53 \quad r^2 = 0.984 \text{ nb} = 28 \qquad (53)$$

Cette pente est caractéristique de l'évaporation d'un plan d'eau (Fontes, 1976). Le point d'intersection avec la droite météorique régionale (54), DMR, (droite calculée à partir des teneurs isotopiques des pluies non évaporées de l'année 1991 et 1992 sur deux stations proches des sites des mares),

$$\delta^2H = 8.11\delta^{18}O + 5.82 \quad r^2 = 0.931 \text{ nb} = 70 \qquad (54)$$

donne la composition isotopique du stock d'eau initial avant sa reprise par évaporation. Les coordonnées de ce point sont -3,76 ‰ en oxygène18 et -24 ‰ en deutérium.

Régime de la mare au cours de la période d'étude

Au cours de la période allant du dernier remplissage de la mare à son assèchement, le régime est monotone et tend à se stabiliser à une intensité de vidange à peu prés constante. A Bazanga, cette constante vaut 10 mm/j environ. Lorsque le volume de la mare se rapproche de zéro, le flux de vidange augmente (figure 60). Cette augmentation finale de l'intensité de vidange correspond à l'action conjuguée de la ponction du bétail qui devient importante comparativement au volume résidant et à l'amplification du phénomène d'évaporation sur les faibles volumes (faible inertie thermique). Par contre, à la mare de

Wankama, l'intensité de vidange est supérieure à 10 mm/j et tend vers une stabilisation lorsque la vidange s'effectue uniquement dans la zone colmatée (figure 60).

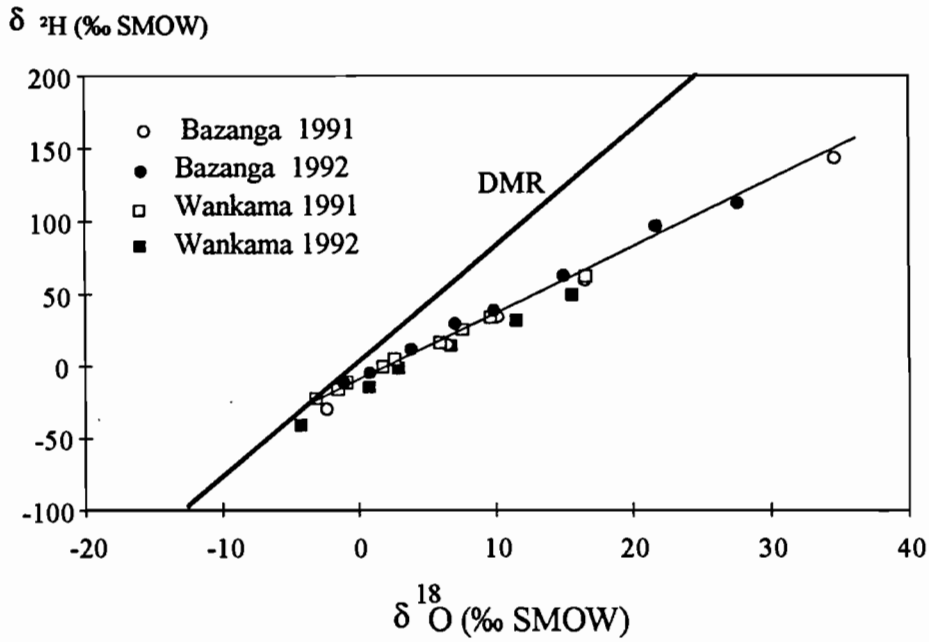


Figure 59 : diagramme oxygène 18-deutérium des eaux des mares lors de l'assèchement

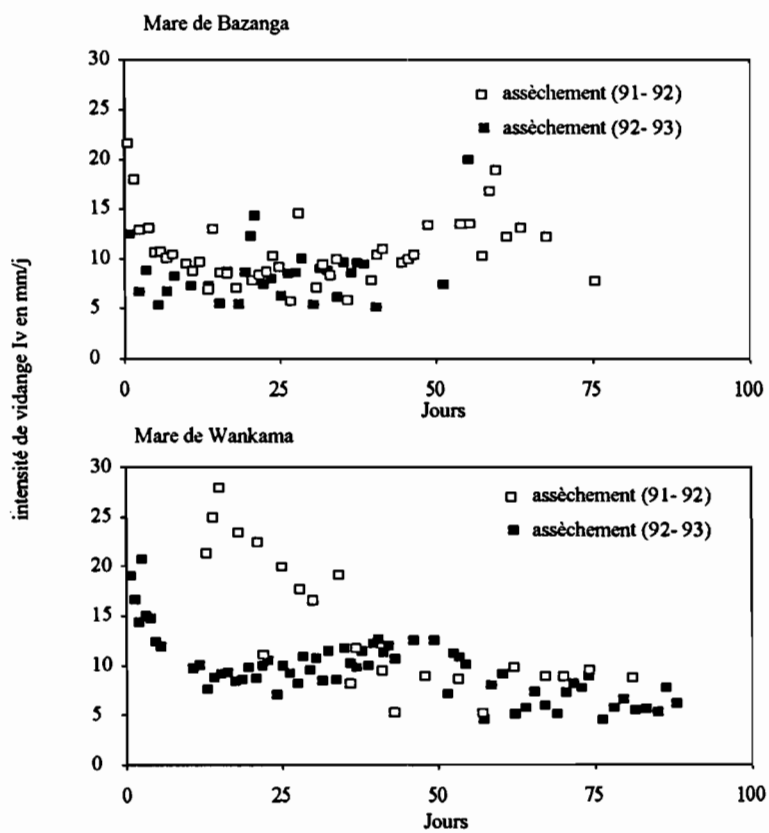


Figure 60 : évolution de l'intensité de la vidange au cours de la période d'assèchement saison 1991 et 1992

2.2 Comparaison des lames évaporées sur les bacs à évaporation (classe A, classe A corrigée et bac enterré in situ)

Suite à une étude réalisée sur le lac de BAM (BURKINA FASO), Pouyaud (1986) propose deux relations empiriques reliant l'évaporation d'un lac et d'un bac de classe A *in situ*.

$$Elac = 1,6\ Ebac^{0,6} \text{ en mm/j } (r^2 = 0,93) \qquad (55)$$

$$Elac = 0,37\ Ebac + 3,0 \text{ en mm/j } (r^2 = 0,93) \qquad (56)$$

avec

Elac : évaporation du lac en mm/j

Ebac : évaporation du bac en mm/j

Ces modèles sont établis sur 21 couples de valeurs moyennes mensuelles du bac de classe A et du lac (figure 61). Ils fournissent une référence extérieure à notre étude, permettant notamment de situer nos mesures in situ par rapport à des mesures similaires, concernant un climat identique, mais une surface évaporante très différente des nôtres (surface du lac de Bam >100 km²). Nous utilisons le modèle puissance (meilleur coefficient de détermination).

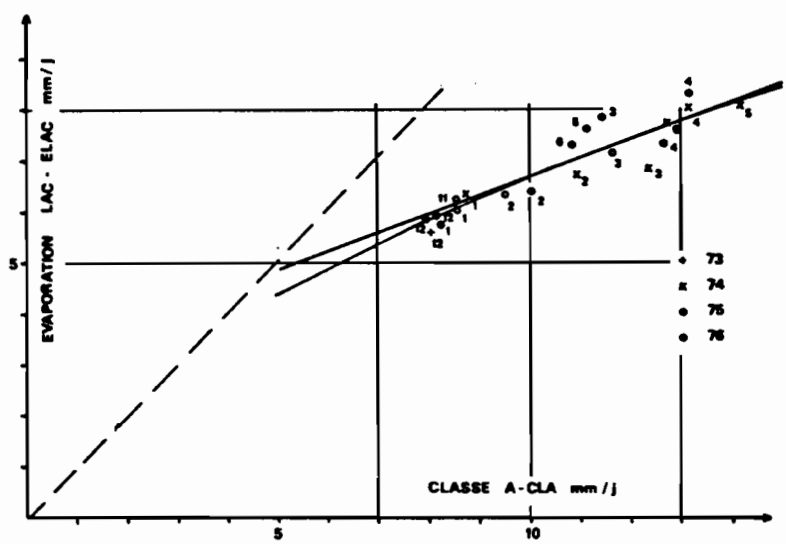


Figure 61 : Relations empiriques Ebac Elac établies pour le lac de Bam (Pouyaud, 1986)

Nous comparons dans la figure 62 les lames moyennes journalières obtenues à partir des valeurs de chaque type de bac pour les deux sites étudiés. L'évaporation journalière moyenne du bac enterré à la mare de plateau (Bazanga) est supérieure de 1,5 mm/j à celle de la mare de bas-fond (Wankama). La lame journalière moyenne du bac de classe A est nettement supérieure aux valeurs des deux bacs : 9,8 mm/j. La correction des valeurs du bac de classe A par la relation empirique (55) permet de ramener les valeurs journalières moyennes à des valeurs pratiquement identiques à celles du bac enterré de Wankama : 6,5 mm/j valeurs bac classe A corrigé et 6,1 mm/j pour le bac enterré avec des écarts types de 0,5 et 0,6 mm/j.

Par contre, les valeurs corrigées du bac de classe A sont légèrement inférieures (1 mm/j) à celle du bac enterré de Bazanga. Cette différence d'évaporation peut trouver son explication dans la position de la mare de plateau qui est soumise à un régime de vent beaucoup plus soutenu.

Le calcul issu des valeurs du bac de classe A surestime l'évaporation par rapport aux calculs issus des autres bacs pour au moins deux raisons :

- grandes variations thermiques de l'eau du bac de classe A
- un albédo de l'eau plus bas que dans la mare (0,05 pour l'eau claire et de 0,15 pour l'eau chargée, le bac *in situ* est rempli avec l'eau de la mare).

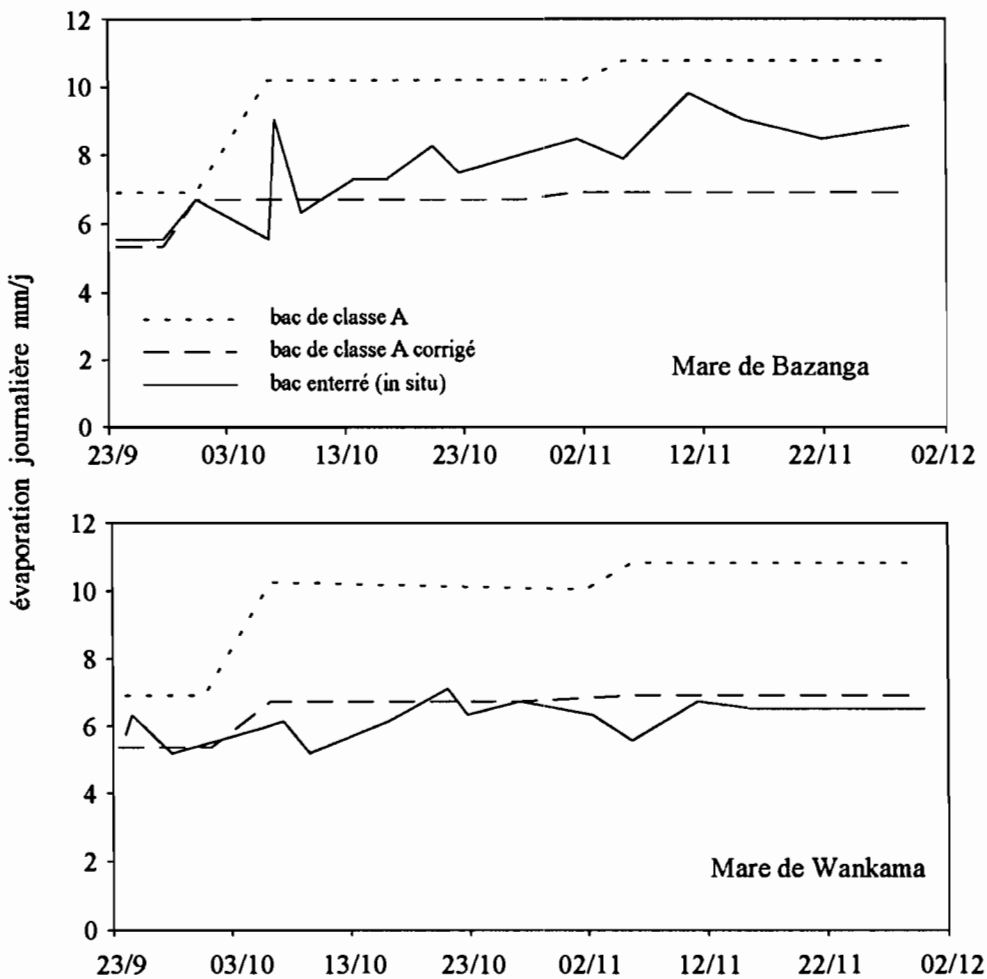


Figure 62 : comparaison des lames évaporées journalières du bac de classe A, du bac de classe A corrigée et du bac enterré in situ

La figure 63 présente les lames évaporées cumulées sur la période du suivi pour les trois méthodes de calcul de l'évaporation et pour les deux mares. Au vu de ces graphes, les estimations de l'évaporation faites avec les valeurs de bac classe A corrigées et les valeurs du bac enterré tendent vers des variations de stock sensiblement égales. Si l'on considère le bac enterré comme la valeur la plus proche de l'évaporation de la mare, les variations de stock calculées par correction du bac de classe A (55) sous-estiment légèrement l'évaporation sur la mare de plateau (vents fréquents et forts) et surestiment légèrement l'évaporation de la

mare de bas-fond. Les lames évaporées calculées (en % de la lame totale vidangée) avec les différents bacs sont données dans les tableaux 30 et 31.

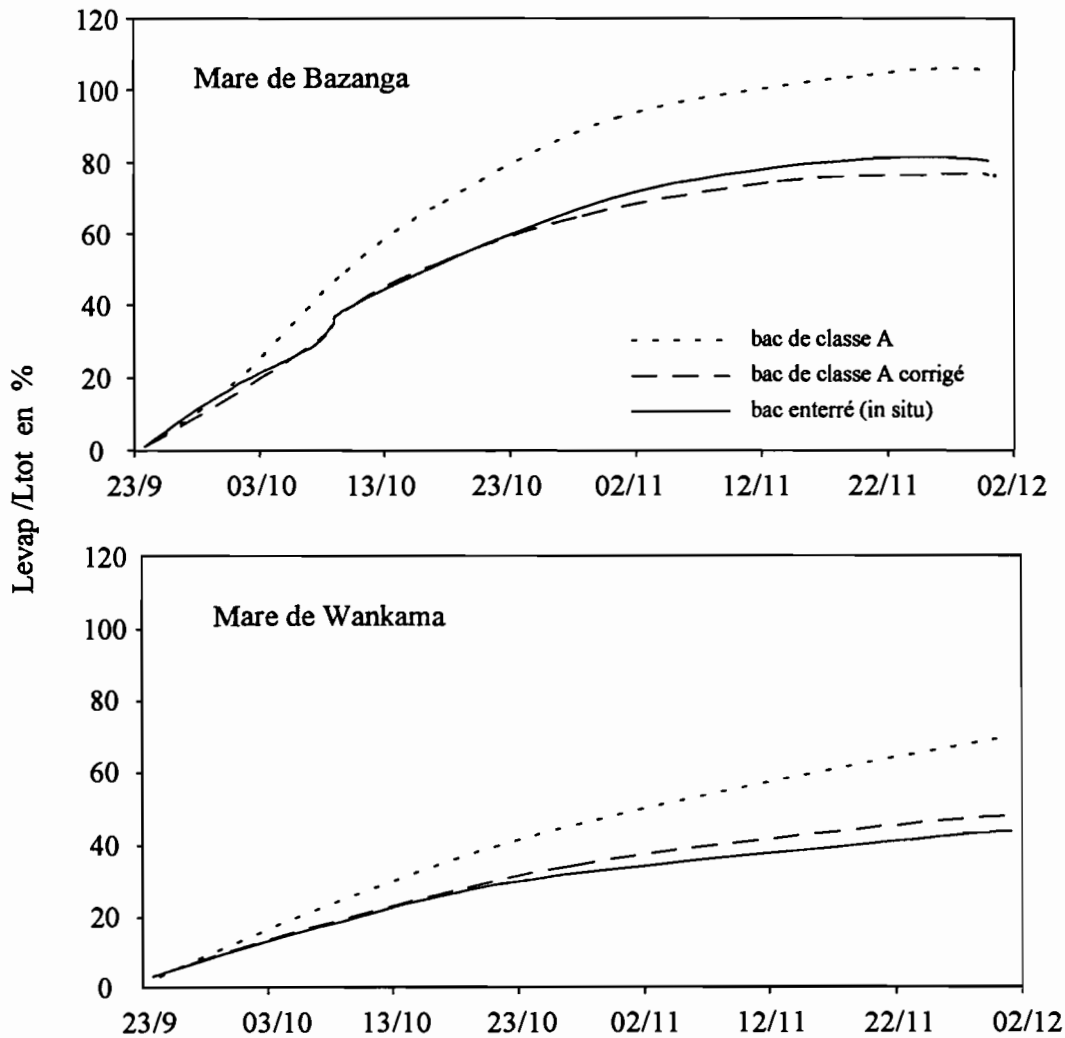


Figure 63 : évaporation cumulée au cours de l'assèchement pour les trois méthodes

Tableaux 30 et 31 : comparaison des lames évaporées selon les différents estimateurs bacs.

Mare de Bazanga

	Lame évaporée			Lame infiltrée		
	bac classe A	bac classe A corrigée *(55)*	bac enterré in situ	bac classe A	bac classe A corrigée *(55)*	bac enterré in situ
en %	104,8	76,2	80,7	-4,8	23,8	19,3
lame moyenne journalière (mm)	9,8	6,6	7,7	0,0	0,4	0,3
écart type (mm)	1,4	0,5	1,3	0,3	0,3	0,3

Mare de Wankama

	Lame évaporée			Lame infiltrée		
	bac classe A	bac classe A corrigée *(55)*	bac enterré in situ	bac classe A	bac classe A corrigée *(55)*	bac enterré in situ
en % de la lame totale	77,8	43,8	41,6	22,2	56,2	58,4
lame moyenne journalière (mm)	9,6	6,5	6,4	7,9	4,7	8,2
écart type (mm)	1,6	0,7	0,5	7,6	8,4	7,4

En pourcentage de la lame totale, les variations de stock par évaporation varient de 76, 2 % (valeurs bac de classe A corrigées) à 104,8 % (valeurs bac classe A) pour la mare de plateau et de 41,6 % (valeurs bac enterré) à 77, 8 % (valeurs bac classe A) pour la mare de bas-fond. Ces chiffres démontrent, d'une part, la différence de régime d'évaporation entre les deux mares et, d'autre part, mettent en évidence la similitude des variations de stock par évaporation estimées sur le bac enterré et les valeurs corrigées du bac de classe A.

2.3 Estimation de l'évaporation par la méthode chimique

Les éléments conservatifs retenus *a priori*, dont les seuls apports sont d'origine météorique, sont l'ion chlorure et l'ion sulfate. Il est apparu, en fait, que seul l'ion sulfate pouvait être utilisé. Les mares servant de point d'eau au bétail, les déjections animales, dont la teneur en chlorures est non négligeable, augmentaient artificiellement les teneurs en chlorures et faussaient la mesure. On a comparé les teneurs en sulfates observées lors de l'assèchement de la mare avec les teneurs en sulfates que l'on devrait avoir si la diminution de l'eau n'était due qu'à l'évaporation (figure 64). On constate que pour la mare de plateau les deux courbes se confondent alors que les valeurs observées sont beaucoup plus faibles pour la mare de vallée. Les données chimiques confirment donc l'analyse hydrologique menée au chapitre précèdent. Néanmoins, l'erreur de précision sur la mesure des teneurs en sulfates, qui, pour la mare de bas-fond sont très faibles, ne permet pas véritablement d'estimer la part infiltrée de la part évaporée.

2.4 Estimation de l'évaporation par la méthode isotopique

La différence de comportement vis à vis de l'infiltration entre les deux systèmes de mares peut être mis en évidence en comparant la fraction restante de liquide avec, d'une part, l'évolution de la conductivité et, d'autre part, l'évolution de sa teneur isotopique (figure 65). On voit ainsi que la mare de bas fond a un enrichissement isotopique et une conductivité plus faibles pour une fraction restante de liquide comparable à la mare de plateau, ce qui implique, a priori, une infiltration plus importante pour la mare de bas fond.

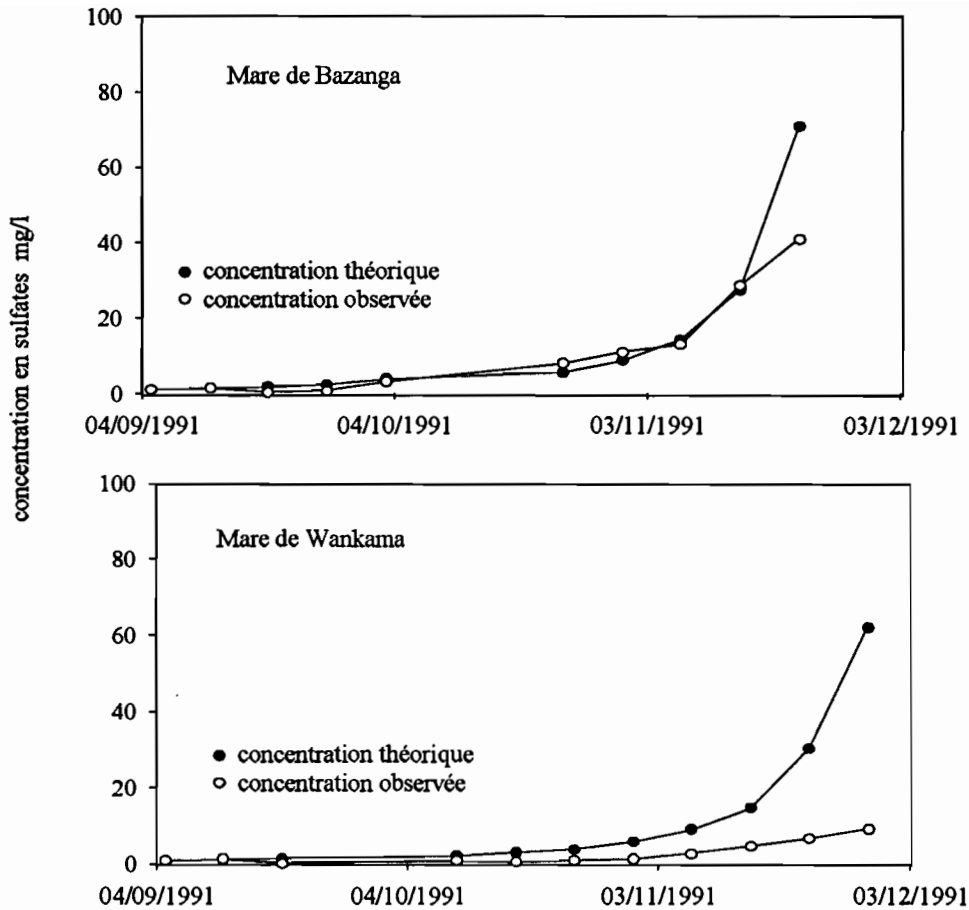


Figure 64 : évolution des teneurs en sulfates lors de la phase d'assèchement de la mare

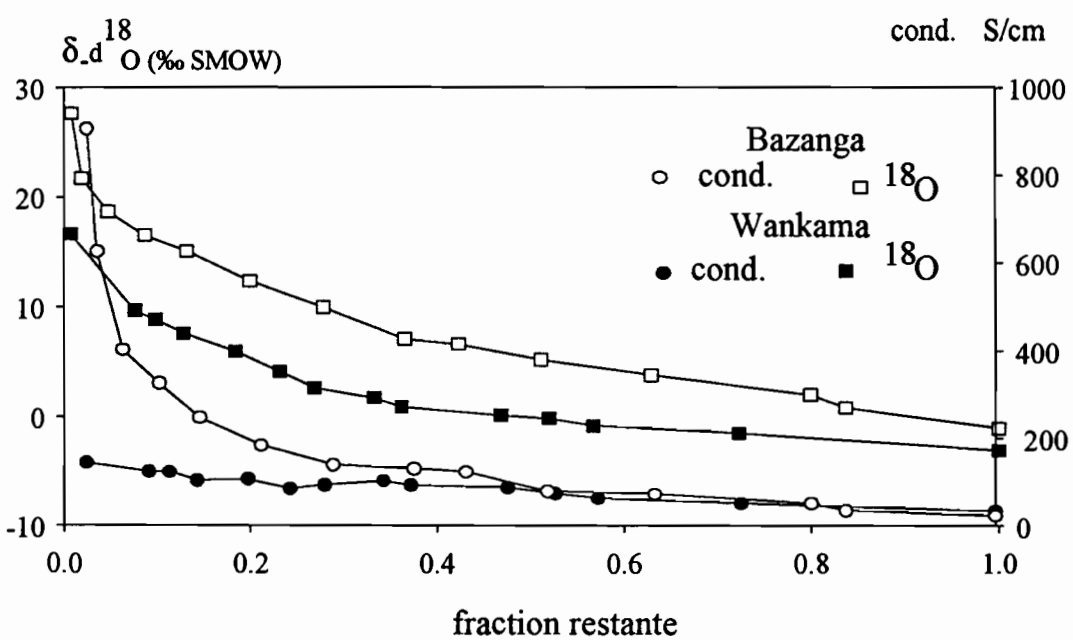


Figure 65 : évolution de la conductivité et de la teneur en oxygène 18 en fonction de la fraction restante au cours de la phase d'assèchement

Calcul des volumes évaporés

La modélisation de l'évolution de la composition isotopique lors de l'évaporation d'un réservoir d'eau peut être décrit simplement par une équation de distillation de Raleigh.

$$\delta - \delta_0 = -\varepsilon \ln f \qquad (57)$$

avec

δ, δ_0 :composition isotopique : de la mare à l'instant t, de la mare à l'instant t=0,

ε : enrichissement isotopique à l'équilibre fonction de la température,

f : fraction restante du liquide.

L'utilisation de ce modèle est possible en admettant qu'il n'y a pas d'échange entre l'interface eau-air et l'atmosphère (cas peu réaliste). Alors, le fractionnement isotopique ne dépend que de la température. Ce modèle très simple avait été utilisé pour l'année 1991 (Desconnets et Taupin, 1993) où il semblait y avoir une bonne adéquation avec l'évolution de la composition en oxygène 18 de la mare de Bazanga.

Le protocole adopté en 1992, a consisté en un échantillonnage temporel plus serré. Il a aussi recouvert la totalité de la période allant de la dernière crue à l'assèchement. Ce protocole a ainsi mis en évidence que la modélisation de l'évolution des teneurs en oxygène 18 par l'équation de Raleigh était peu satisfaisante, pour les deux années, à partir des faibles fractions restantes (figure 66). La divergence d'estimation observée est, en effet, systématique pour les deux années (figure 66).

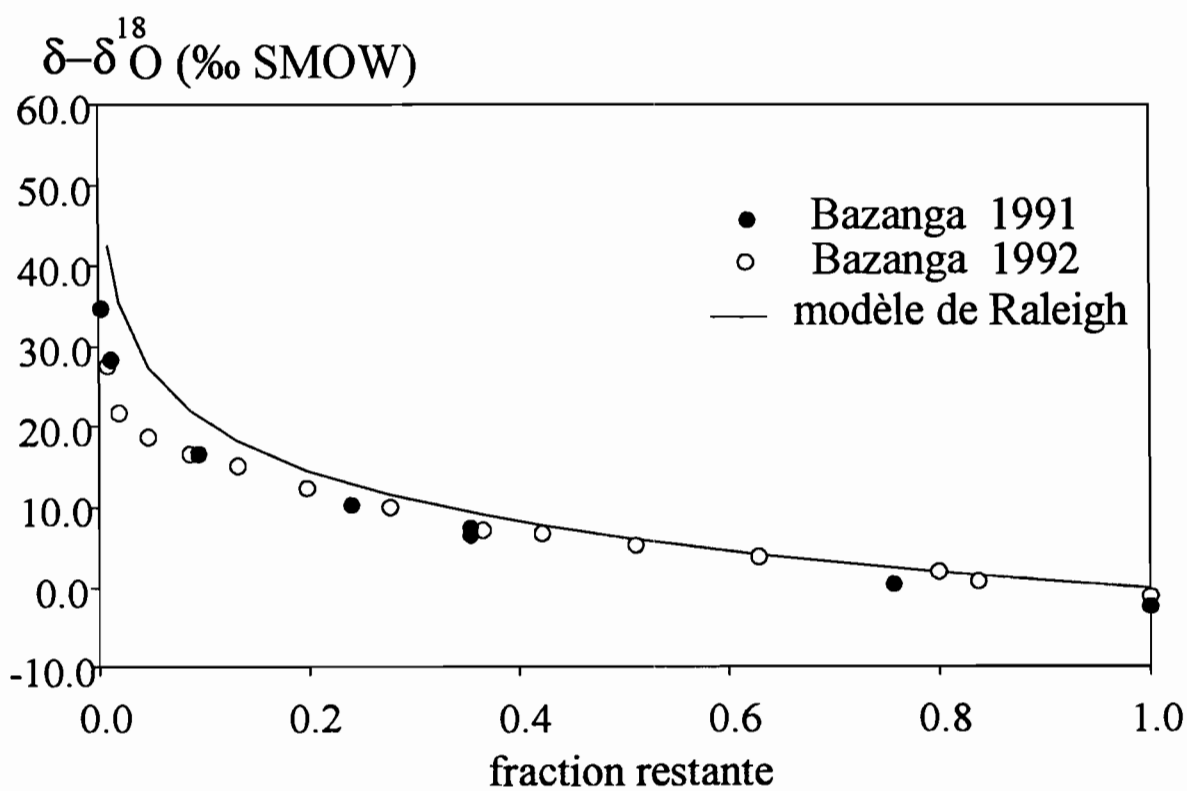


Figure 66 : comparaison du modèle de Raleigh et des teneurs en oxygène 18 observées à Bazanga (1991 et 1992)

Une modélisation plus complexe de l'évaporation qui prend en compte les paramètres du milieu est donnée par l'équation suivante (Craig and Gordon, 1965)

$$\frac{d\delta}{d\ln f} = \frac{h(\delta - \delta a) - (\delta + 1) + (\Delta\varepsilon + \varepsilon / a)}{(1 - h + \Delta\varepsilon)} \qquad (58)$$

en considérant que les paramètres h, δ_a, ε, $\Delta\varepsilon$, a sont constants, on obtient l'équation suivante (59) par intégration:

$$\delta = (\delta_0 - \frac{A}{B}) f^B + \frac{A}{B} \qquad (59)$$

avec

$$A = \frac{h\delta_a + \Delta\varepsilon + \varepsilon/a}{1 - h + \Delta\varepsilon}$$

$$B = \frac{h - \Delta\varepsilon + \varepsilon/a}{1 - h + \Delta\varepsilon}$$

h = humidité relative moyenne de l'atmosphère,

δ, δ_0, δ_a = composition isotopique : de la mare à l'instant t, de la mare à l'instant t=0, de l'atmosphère,

a = facteur de fractionnement isotopique entre le liquide et la vapeur (fonction de la température),

ε = 1-a = enrichissement isotopique à l'équilibre,

$\Delta\varepsilon$ = enrichissement isotopique cinétique

Dans le cas où il y a diminution du volume de la mare par évaporation et infiltration, l'équation peut s'écrire (Gonfiantini, 1986) :

$$\delta = (\delta_0 - \frac{A}{B}) f^{Bz} + \frac{A}{B} \qquad (60)$$

$$z = \frac{\text{volume évaporé}}{\text{volume évaporé + volume infiltré}}$$

f : fraction restante du liquide

Valeurs des paramètres utilisés

Les paramètres utilisés pour la modélisation de la teneur isotopique par le modèle de Craig et Gordon sont de deux types.

Concernant les paramètres climatiques, l'humidité relative de l'air et la température, ne possédant pas de station météorologique sur les sites mêmes, nous utilisons les valeurs moyennes mensuelles obtenues à la station bioclimatologique de Banizoumbou qui se situe à moins de 10 km des sites étudiés. En ce qui concerne les valeurs de l'humidité relative, nous utilisons les moyennes mensuelles. Par contre, c'est la moyenne sur la période de mesure (septembre à octobre) qui est utilisée pour la température de l'air, sa variation étant faible au cours des mois de septembre à novembre. Les valeurs des paramètres météorologiques sont donnés dans le tableau 32

Tableau 32 : humidité relative de l'air et température à la station bioclimatologique de Banizoumbou (SSCE). Les valeurs mensuelles représentent la moyenne des valeurs journalières mesurées sous abri (station bioclimatologique de Banizoumbou).

	humidité relative en %	
	1991	1992
septembre	63	73
octobre	52	53
novembre	33	35
moyenne	49	54
	température de l'air en °C	
	1991	1992
septembre	31	29
octobre	31	30
novembre	26	*
moyenne	29	29

* non mesurée

Les paramètres isotopiques nécessaires à la modélisation sont la teneur isotopique en oxygène 18 δ_a, le fractionnement isotopique a entre le liquide et la vapeur d'eau, l'enrichissement isotopique ε et l'enrichissement isotopique cinétique $\Delta\varepsilon$. Les valeurs de ces paramètres n'ont pas été calculées dans le cadre de cette étude. Nous avons pris δ_a égale à -17 ‰ qui est une valeur mesurée dans cette région (Taupin, 1991). Les trois autres paramètres sont empruntés à la littérature et ont pour valeur :

- le fractionnement isotopique : α : 1,00890,
- l'enrichissement isotopique à l'équilibre : $\varepsilon = 1-\alpha = 0{,}00890$
- l'enrichissement isotopique cinétique : $\Delta\varepsilon = 14{,}2\ (1-h)$ d'après Gonfiantini (1986).

Calage du paramètre z

La reconstitution de l'évolution des teneurs en oxygène 18 par le modèle de Craig et Gordon a été effectuée sur les teneurs du suivi de 1992 pour les deux mares. Le calage consiste à trouver une valeur du paramètre z de l'équation (59) telle que l'évolution des teneurs en oxygène 18 calculées en fonction de la fraction restante du liquide converge vers celle des valeurs observées. Le critère de calage est l'écart relatif moyen E ,

$$E = \frac{\sum_{i=1}^{n} \left| \frac{(^{18}Ocalc - ^{18}Oobs)}{^{18}Oobs} \right|}{N} \qquad (61)$$

avec

E :écart relatif moyen en %

^{18}O obs : la teneur en oxygène 18 mesurée

^{18}O calc : la teneur en oxygène 18 calculée par le modèle de Craig et Gordon

N : nombre de mesures

L'écart relatif moyen est un critère pertinent en ce qui concerne le calage du modèle sur la série de Wankama. Il permet de déterminer sans ambiguïté une valeur de z égale à 0,3 (voir figure 67). Le choix

d'une valeur de z pour le calage sur la série de Bazanga est plus délicat. La plage des valeurs allant de 0.65 à 0,7 présente un écart relatif moyen identique (figure 67). La meilleure fidélité d'ensemble de l'évolution des teneurs en oxygène 18 est obtenue pour un paramètre z égal à 0,7.

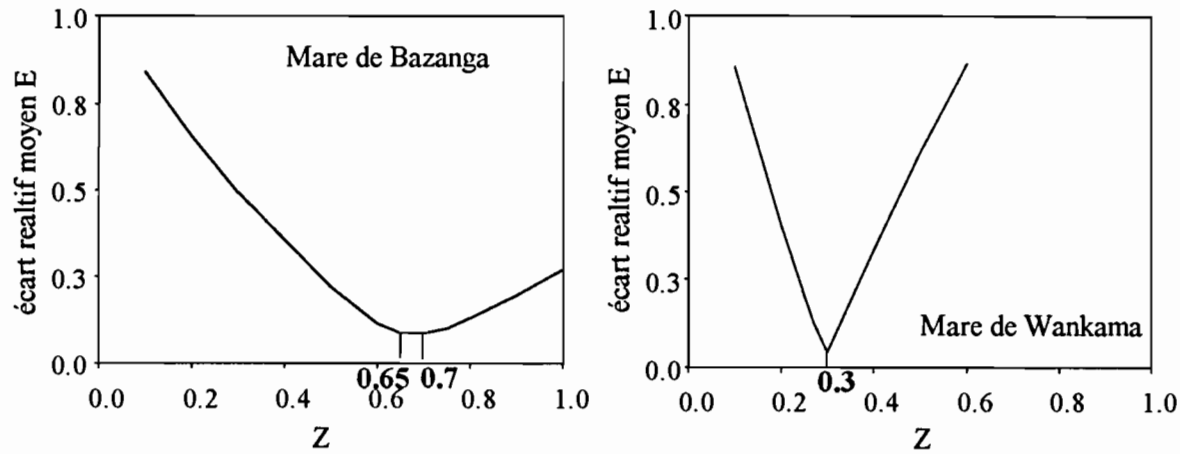


Figure 67 : calage du modèle de Craig et Gordon avec le paramètre z en fonction du critère E (écart relatif moyen)

<u>*Résultats*</u>

Entreprise dans un premier temps avec des paramètres climatiques approchés (Desconnets et Taupin, 1993), la modélisation des teneurs en oxygène 18 avec l'utilisation des moyennes mensuelles de l'humidité relative dans un deuxième temps a permis d'obtenir, pour les deux mares, une reconstitution plus fidèle sur l'ensemble de l'assèchement. Pour la mare de Wankama (figure 68), l'écart à la valeur observée reste stable et inférieur à 1 delta mis à part pour la valeur du 06/11/1992. La reconstitution des teneurs en oxygène 18 de la mare de Bazanga est aussi assez satisfaisante (figure 68). Quelques valeurs sont mal reproduites par le modèle et principalement en fin d'assèchement où l'écart à la valeur observée est maximal et égal à 6,0 delta. En terme de volume, cette divergence finale reste négligeable car elle ne concerne qu'une part infime de la fraction restante. Malgré tout, deux raisons peuvent être avancées pour expliquer ces écarts notables :

- l'imprécision de la fraction restante aux faibles volumes,
- la perturbation des processus naturels par les ponctions du bétail en fin d'assèchement.

Les paramètres météorologiques mesurés à la station de Banizoumbou et l'utilisation d'une moyenne mensuelle (effet de lissage des conditions locales) peuvent être, pour une moindre part, à l'origine des divergences ponctuelles de la reconstitution. En effet, la localisation en bas-fond de vallée, de la station de Banizoumbou s'apparente plus aux conditions d'exposition du site de Wankama que celles du site de Bazanga (position haute fortement balayée par les vents).

La part évaporée retenue après calage, qui est de 0,3 pour la mare de Wankama, et de 0,7 pour la mare de Bazanga, est globalement satisfaisante pour la période testée. Même si la fidélité du modèle est douteuse en fin d'assèchement, ces valeurs montrent un comportement hydrologique très différent des deux mares. Nettement inférieures aux valeurs de l'évaporation estimées par les autres méthodes, elles

confortent, néanmoins leurs résultats. Une comparaison plus précise des trois méthodes employées dans cette étude est proposée dans le paragraphe suivant.

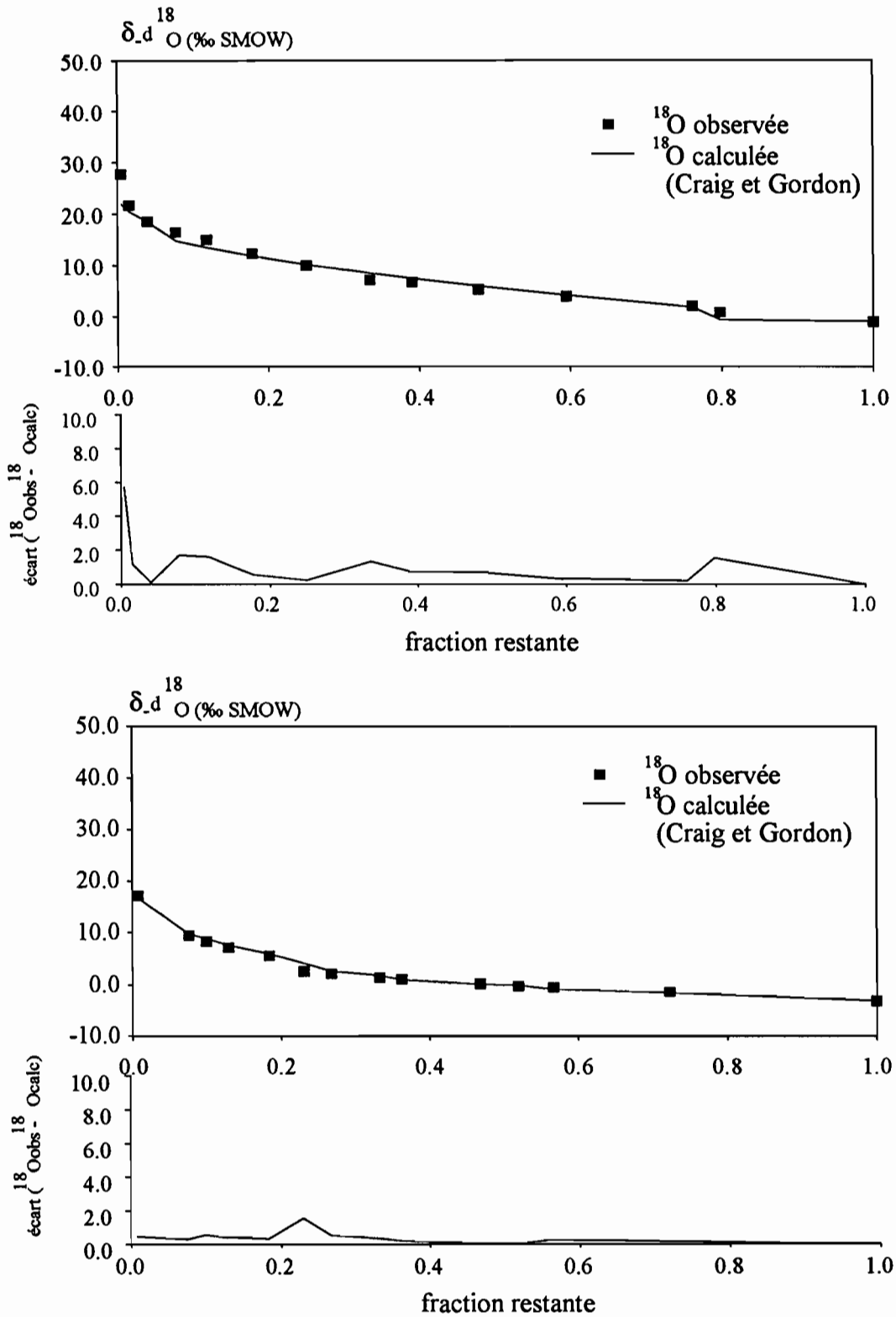


Figure 68 : comparaison des teneurs en oxygène 18 observées et des teneurs calculées par le modèle de Craig et Gordon de la mare de Bazanga (haut) et de celle de Wankama (bas)

2.5 Comparaison de la méthode classique (bac classe A corrigé et bac *in situ*) et de la méthode isotopique

Le tableau récapitulatif 33 donne les valeurs estimées des variations de stock par évaporation pour toutes les méthodes testées. Les résultats des trois méthodes vont dans le même sens :

- un régime d'évaporation en saison sèche contrasté entre la mare de plateau (variations de stock par évaporation comprises entre 70 et 80,7%) et la mare de bas-fond (entre 30 et 43,6%).

- une estimation convergente de l'évaporation, l'écart maximal d'estimation étant de 13.6% sur le bilan annuel de la mare de Wankama alors que cet écart est réduit à 10,7% pour la mare de plateau. La surestimation par le bac enterré *in situ* est logique. Elle met en évidence l'amplification de l'effet oasis d'une surface élémentaire par rapport à la surface évaporante supérieure (mare). Par contre, l'estimation par la correction (55) est étrangement proche des mesures *in situ*. En effet sa comparaison à nos valeurs aurait logiquement due se solder par une sous-estimation de la lame évaporée, le contexte hydrologique dans lequel cette correction a été établie (grande surface évaporante, peu infiltrante) étant loin de celui des mares étudiées ici.

En terme de bilan hydrologique, ces résultats sont satisfaisants et permettent d'obtenir une précision minimale de 14% des lames évaporées. En effet, la faible importance de l'évaporation journalière en saison des pluies et un régime de la mare en constante vidange rapide (Desconnets et *al.*, 1993), minimisent le terme évaporatoire dans le bilan durant cette période et donc l'imprécision de son estimation en volume total annuel.

Tableau 33 : estimation des variations de stock par évaporation en saison sèche (1992) par les différentes méthodes.

	bac enterré in situ	bac classe A (valeurs corrigées)	isotopique	écart maximum entre les méthodes (%)
		Bazanga (mare de plateau)		
en % du la lame totale	80,7	76,2	70	10,7
		Wankama (mare de bas-fond)		
en % de la lame totale	41,6	43,8	30	13,8

Dans ce contexte hydrologique la méthode isotopique paraît la plus fiable car :

- les variations de stock par évaporation et par infiltration sont de grandeur comparable,

- il n'y a pas de pollution possible par les apports extérieurs.

Par ailleurs, l'obligation de connaître la correspondance hauteur volume nécessaire pour le calcul des lames évaporées par la modélisation isotopique n'est pas pénalisante puisque les relations hauteur volume ont été calculées avec une bonne précision pour chacune des mares (section 3.3 chapître 5)

2.6 Calcul d'un coefficient de transposition mare - bac de classe A

Afin d'étendre le bilan hydrologique à l'ensemble des mares étudiées et à celles présentant les mêmes situations géomorphologiques, nous envisageons l'utilisation d'une relation de transposition bac - mare par la comparaison entre les lames évaporées mesurées à Niamey - Aéroport sur bac de classe A et celles évaporées à la mare de bas -fond et à la mare de plateau.

Obtenue auparavant pour la totalité de la période suivie, la fraction évaporée est recalculée avec le même modèle (Gonfiantini, 1986) pour chaque intervalle de temps compris entre deux prélèvements.

Ce calcul effectué sur l'ensemble des périodes de suivi de 1991 et 1992, apporte une série de 18 valeurs de lames moyennes journalières que nous comparons avec les lames moyennes journalières du bac de classe A de Niamey. Nous choisissons une transposition de la lame bac pour obtenir la lame mare (11) par le coefficient de transposition moyen obtenu sur les séries présentées dans les tableaux A57 et A58 en annexe 5.

$$E_{mare} = K.E_{bac} \text{ en mm/j} \qquad (62)$$

$\mathbf{E_{mare}}$: lame évaporée calculée par la méthode isotopique en mm/j

$\mathbf{E_{bac}}$: lame évaporée mesurée sur un bac de classe A (Niamey - Aéroport) en mm/j

K : coefficient de transposition moyen

La faible plage des valeurs observées de 8,9 mm/j à 11,8 mm/j et la faible corrélation des valeurs journalières de la mare avec celles du bac rendent délicate l'utilisation d'une transposition linéaire de type Emare = KEbac + B.

Commentaires

Le contraste de fonctionnement hydrologique se traduit ici par un coefficient de transposition K moyen de 0,56 (écart type 0,08) pour la mare de plateau pour laquelle les conditions d'évaporation sont maximales. La valeur de K moyen est égal à 0,37 (écart type 0,18) pour la mare de vallée qui est en situation protégée avec un contexte pédologique plus favorable à l'infiltration. A première vue, le choix d'un coefficient de transposition moyen pour la mare de bas fond apparaît comme une solution approximative (coefficient de variation 48%). La dispersion des coefficients K peut être expliquée, d'une part, par les erreurs d'estimation de la modélisation isotopique, d'autre part et surtout, par le changement de régime hydrologique entre les épisodes étudiés. Une étude de l'évaporation étendue sur un plus grand ensemble d'épisodes (incluant un plus grand éventail de régime de vidange) aurait sans doute mis à jour une corrélation du coefficient K avec la hauteur initiale de l'épisode.

2.7 Discussion

Les résultats obtenus sur les sites d'HAPEX-Sahel vont quelque peu à l'encontre des considérations énoncées à propos de la forte sensibilité du coefficient de transposition Bac-Lac à la superficie de la surface évaporante. En effet, les diverses relations expérimentales (Molle, 1991) montrent que ce coefficient devrait être proche de 1,0 pour une superficie du plan d'eau égale à l'hectare.

En fait, dans les études précédentes, on admet qu'au cours d'une période de déstockage strict, la variation de niveau résulte uniquement de l'évaporation. La comparaison des lames évaporées sur bac à celles d'un lac ne prend alors pas en compte les éventuelles variations de stock par infiltration (révélées dans le cas de notre étude d'abord par l'analyse limnimétrique à l'échelle de l'épisode, puis mesurée par la méthode isotopique). Cette comparaison concourt donc à une sur estimation des lames évaporées. En effet, égal à 0,56 (70 % d'évaporation) pour la mare de Bazanga et à 0,37 (30 % d'évaporation) pour la mare de Wankama, le coefficient K serait égal à 0,8 et à 1,21 dans le cas où le terme infiltration serait négligé.

CHAPITRE 6

ESTIMATION DE L'EVAPORATION

SYNTHESE

L'estimation de l'évaporation directe à partir des miroirs d'eau s'est révélée indispensable dans le cas des mares de cours d'eau et des mares de plateau où la vidange dans la zone colmatée fait apparaître une évaporation significative (voir chapitre précédent).

Réalisée sur les mares de Bazanga (mare de plateau) et de Wankama (mare installée dans le lit d'un cours d'eau), trois méthodes d'estimation indirecte de l'évaporation ont été comparées au cours de deux périodes sèches (1991-92 et 1992-93), il s'agit de :

- l'estimation par bac enterré (*in situ*) et bac de classe A (référence régionale) installé à Niamey,
- l'estimation par la méthode chimique par le choix d'un élément conservatif,
- l'estimation par la méthode isotopique avec l'oxygène 18 et le deutérium comme traceurs naturels de l'évaporation.

En concordance avec la méthode classique "bac", la méthode isotopique permet d'estimer une évaporation de 70 % des variations totales de volume pour la mare de plateau (Bazanga) et seulement de 30 % pour la mare de vallée (Wankama).

Ces résultats mettent en évidence le contraste de régime existant entre les deux mares qui sont soumises pour l'une (Wankama) à un régime à forte composante d'infiltration et pour l'autre (Bazanga) à un régime à forte composante d'évaporation.

L'extrapolation de ces estimations aux mares appartenant au même domaine géomorphologique est réalisée par le calcul d'un coefficient de transposition moyen. Il est égal à 0,56 (écart type de 0.08) pour les mares de plateau et à 0,37 (écart type de 0.18) pour les mares de vallée.

La comparaison des coefficients obtenus par la méthode isotopique avec ceux calculés dans des contextes hydrologiques similaires (même superficie du plan d'eau sous le même climat) montre que la prise en compte du terme infiltration est primordiale dans l'estimation du bilan hydrologique d'une mare.

CHAPITRE 7

REDISTRIBUTION DE L'EAU SOUS LA MARE ET VERS L'AQUIFERE

CHAPITRE 7

REDISTRIBUTION DE L'EAU SOUS LA MARE ET VERS L'AQUIFERE

Dans le prolongement de l'étude de la vidange des mares de référence, ce chapitre aborde les relations hydrologiques entre les mares et l'aquifère en s'appuyant sur les connaissances du milieu physique, les mesures humidimétriques et piézométriques sur quatre sites dont un, le site de Wankama, qui a été suivi avec une attention particulière.

Par le suivi de l'humidité, nous apportons une validation au schéma de fonctionnement établi à partir de l'analyse des chroniques limnimétriques (chapitre 5) et nous estimons le transfert de l'eau vers la nappe au cours de la phase d'humectation (début de saison des pluies).

Concernant la liaison mare-nappe dans les systèmes de cours d'eau, un premier schéma de transfert est proposé. Dans les autres systèmes endoréiques, ne disposant pas actuellement d'informations suffisantes, seules quelques hypothèses de fonctionnement sont émises.

INTRODUCTION

Le schéma de fonctionnement hydrologique de la mare obtenu à partir de l'analyse des chroniques limnimétriques a mis en évidence deux cinétiques de vidange liées à la présence d'une zone colmatée centrale et d'une zone perméable périphérique (chapitre 4). Les intensités de vidange observées au cours des épisodes ayant débordé de la zone colmatée montrent que les intensités de vidange (I_{vi}) ou les flux globaux sortant de la mare sont très élevés, entre 5 et 100 cm/j et restent non négligeables pour des épisodes ayant faiblement débordé de la zone colmatée, entre 2 et 5 cm/j. Le suivi de l'humidité à l'aplomb de la zone colmatée et de la zone perméable s'est avéré indispensable pour deux raisons :

- comparer la redistribution de l'eau des deux compartiments pédologiques et valider ainsi le schéma de fonctionnement établi, c'est à dire trouver une cinétique de redistribution propre à chacun des compartiments,
- estimer le transfert de l'eau vers le sous-sol à partir de l'infiltration sous la mare et recouper les estimations de flux calculés à partir des chroniques limnimétriques.

C'est par un dispositif neutronique de mesure de l'humidité, installé à la mare de Wankama et sur une partie du versant attenant à la mare, qu'un suivi de la redistribution de l'eau dans le sol a commencé en 1991 et a été complété en 1993. Il a été poursuivi en 1994.

Cette caractérisation sommaire de la redistribution de l'eau dans l'ensemble des compartiments pédologiques sous la mare servira d'introduction et d'appui pour aborder ensuite les transferts d'eau de la mare vers l'aquifère.

1 REDISTRIBUTION DE L'EAU SOUS LA MARE

1.1 Quelques rappels

Le contexte pédologique de la mare de Wankama se distingue :

- en surface, par un milieu sédimentaire fin et peu perméable (zone colmatée) réduit à la zone centrale de la mare et de faible superficie faisant place en périphérie à un milieu sableux (milieu autochtone), nettement plus perméable (appelée zone perméable périphérique),
- en profondeur, par un milieu sableux assez homogène (voir chapitre 4 section 2.1 et 2.2) composé de plusieurs compartiments sableux puis argilo-sableux en alternance avec des phases indurées de type alluviale, milieu perméable dans son ensemble.

Le régime de la mare au cours de la période de mesure de l'humidité est décrit dans la figure 71 pour l'année 1993. Les variations de niveaux sont seulement représentées à partir de 2 mètres, cote correspondant à l'altitude de la base du tube 2 dans la mare. Ainsi, il est aisé de distinguer les débordements de la mare dans la zone perméable sableuse. Nous retiendrons quelques dates :

- mise en eau de la mare le 13/06/1993,
- 2 ème crue débordante, le 16/06/1993, suivie d'une période d'assèchement de plus de 30 jours,
- 3 ème crue débordante, le 21/07/1993, suivie de 15 jours d'assèchement,
- 4 ème crue débordante, le 05/08/1993 puis une 5 ème, le 13/08/1993 qui marque la permanence de l'eau dans la zone perméable jusqu'à la fin de la saison des pluies.

1.2 Dispositif et protocole de mesures

Les mesures humidimétriques à la mare de Wankama ont été initiées en 1991 par l'implantation d'un dispositif de 4 tubes d'accès de sonde à neutrons placés dans la zone colmatée de la mare, la zone perméable et le versant attenant à la mare (deux tubes).

Ce dispositif a été complété en 1993 par l'installation de deux autres tubes. Les mesures utilisées dans cette section proviennent d'une partie du dispositif initial (tube n°3) et des deux tubes (tube n°1 et 2) du dispositf installé en 1993. Il est présenté en figure 69. Ils ont été placés respectivement dans la zone colmatée (tube n°1 ;coté échelle : 1,38 m), dans la zone perméable proche de la zone colmatée (tube n°2 ; cote échelle : 1,75 m) et sur le versant sableux jamais inondé par les débordements de la mare (tube n°3). Les deux premiers tubes, d'une longueur totale de 8 mètres environ ont été enfoncés jusqu'à 6 mètres de profondeur. Ils sont munis d'un dispositif de fermeture étanche. L'accès aux tubes en présence d'eau, a été facilité par une passerelle.

Connaissant la cinétique rapide de la vidange dans la zone perméable, le protocole de mesure se devait de suivre, durant les premières 24 heures de la vidange, la redistribution de l'eau avec une fréquence de

mesure élevée. Pour diverses raisons, essentiellement liées à la disponibilité d'observateurs et de matériel, le protocole de mesure a été malheureusement réduit à un suivi de fréquence journalière sur une profondeur de 3,4 mètres. Par conséquent, la redistribution de l'eau dans la zone perméable n'a pu être suivie que de manière partielle.

Les mesures présentées dans les paragraphes suivant concernent la période allant du 26/05/1993 (début de la saison des pluies) au 18/8/1993 ("pleine saison des pluies").

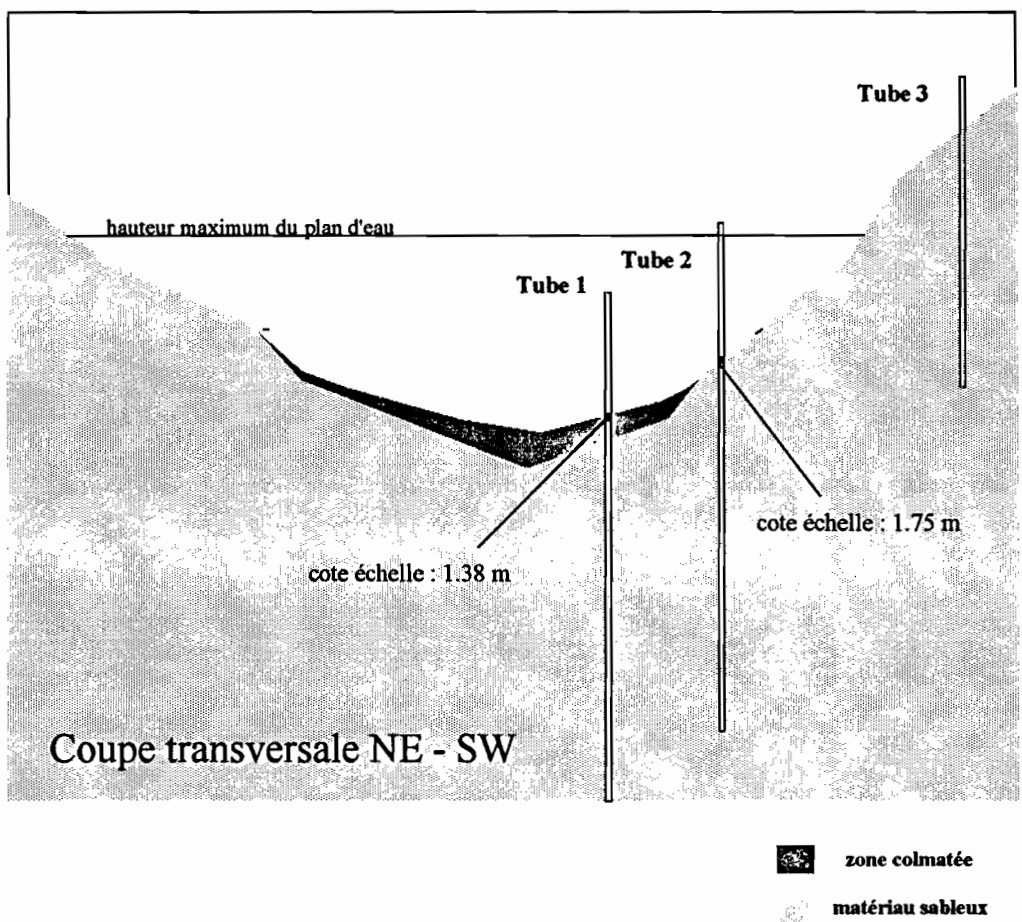


Figure 69: schéma du dispositif neutronique à la mare de Wankama

1.3 Comparaison des profils d'humidité le long d'un transect mare-versant sableux

Sont présentés en figure 70 l'ensemble des profils d'humidité des trois tubes suivis du 26/05/1993 au 18/08/1993. Nous commentons séparemment le régime hydrique en chacun des tubes auquels correspondent les différents compartiments pédologiques de la mare (tube 1 et 2) et du versant hors de la zone d'inondation de la mare (tube 3).

Tube n°1 : la zone colmatée

Concernant la redistribution dans la zone colmatée lors du premier remplissage de la mare, le protocole adopté a permis de suivre l'avancée du front d'humectation (profil 2, 3, 4, 5 et 6) jusqu'à 3 mètres. A la

suite de ce premier remplissage le profil d'humidité se stabilise pour le reste de la saison à des humidités légèrement variables selon la profondeur et qui avoisinent la saturation entre 10 et 250 cm. Sur ces profils stabilisés, la présence du biseau argileux en surface et jusqu'à 30 cm de profondeur (présenté dans les figures 30 et 32 chapitre 5) est mise en évidence par une humidité nettement supérieure au reste du profil. Les variations de l'humidité vers les profondeurs 180 et 250 cm peuvent être mises en parallèle avec les discontinuités verticales observées et décrites dans la section 1.3 chapitre 5.

Tube n°2 : la zone perméable

Dans la zone perméable, les mesures réalisées montrent que l'évolution du profil d'humidité au cours de l'année suit le rythme des inondations-exondations. Six profils remarquables du régime hydrique du sol sont présentés dans la figure 70. Le profil noté I_n correspond au profil initial (26/05/1993), les profils notés 1', 2' (traits pleins gras) correspondent à la redistribution de l'eau suite aux crues du 13/06, 21/07 ayant significativement débordées de la zone colmatée, et le profil 3' à la crue du 13/08 à partir de laquelle l'inondation fut permanente jusqu'à la fin de la saison des pluies. Les profils 1, 2 et 3 (traits gras) correspondent à la fin de la période d'assèchement (respectivement 40 jours, 16 et 8 jours) ayant succédé aux crues du 13/06, 21/07 et du 05/08. Ils permettent de mettre en évidence une rapide et forte variation de l'humidité dans l'ensemble des profondeurs entre les périodes d'inondation et d'exondation. Pour les périodes d'inondation, les humidités varient de 30 et 40 % en surface et de 25-30% entre les profondeurs 110 et 340 cm. Pour les périodes d'exondation, le profil final est fonction de l'intervalle de temps écoulé après l'inondation. Cet assèchement du profil a pu atteindre des humidités inférieures à 15% en surface et inférieures à 10 % en profondeur. Enfin, on remarquera la faible variabilité verticale des profils de l'humidité entre les profondeurs 120 et 340 cm.

Tube n°3 : le versant hors de la zone d'inondation de la mare

Ce tube peut être pris comme le tube de référence du régime hydrique d'un versant sableux sous la simple influence des précipitations. La figure 70 suffit pour donner l'échelle de contraste avec les profils précédents. On retiendra que le profil initial, à peu près identique aux deux précédents (légèrement plus sec), évolue lentement et de manière progressive vers un profil verticalement homogène avec une humidité moyenne, loin de la saturation et, proche de 15 %. En fin de période d'observation (profil noté 1, 2, 3, 4, 5 et 6-tube 3), l'évolution du profil s'accélère, en raison de l'augmentation de la fréquence des pluies (milieu du mois d'août).

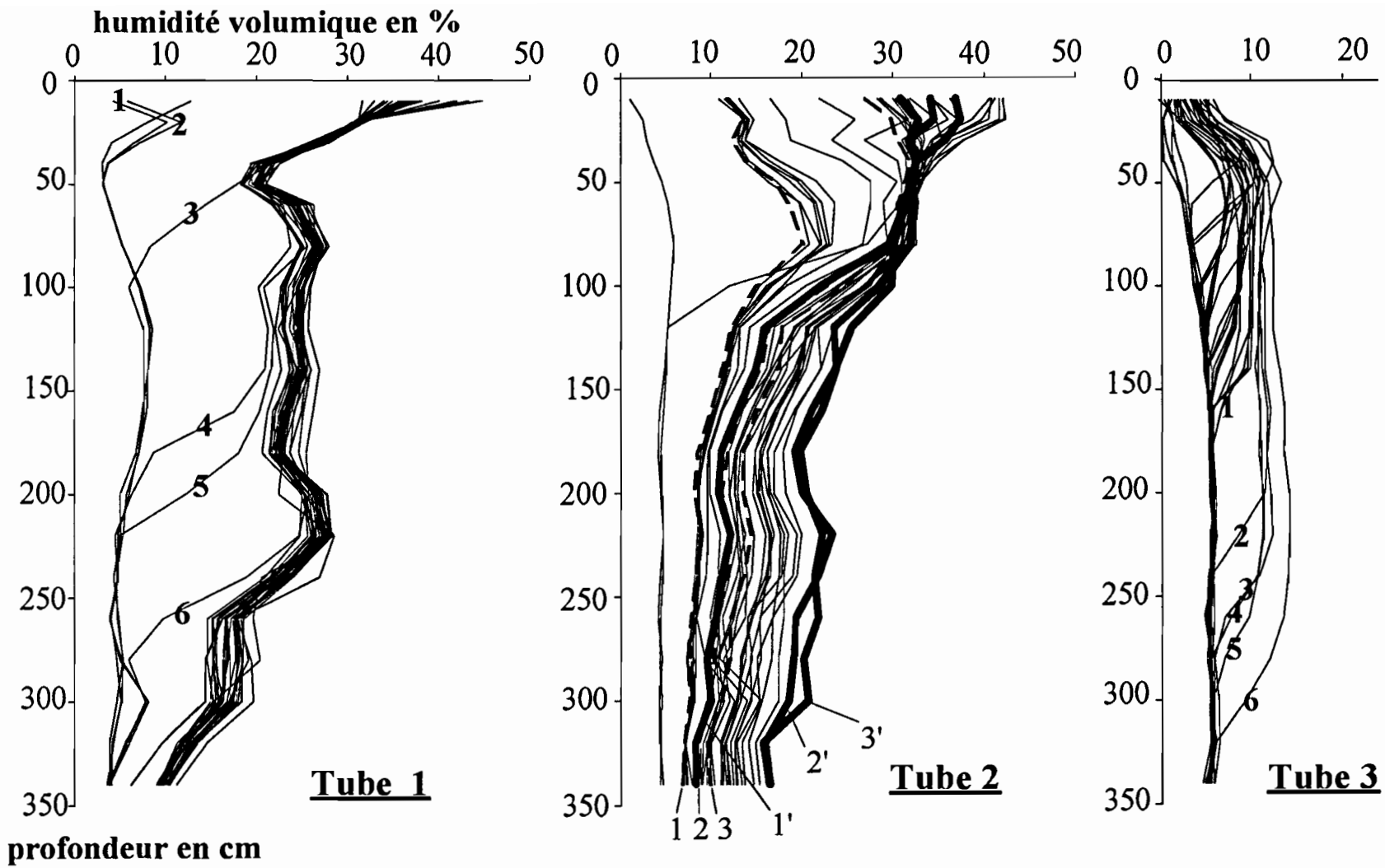


Figure 70 : Profils d'humidité le long d'un transect comprenant la zone colmatée (tube 1), la zone perméable temporairement inondable (tube 2), le versant hors influence de la mare (tube 3)Les profils numérotés correspondent aux dates suivantes : tube 1 (1 à 6 : période de remplissage de la mare du 13 au 16 juin) ; tube 2 (1 à 3 : 20/7, 4/8 et 12/8 ; 1' à 3' : 13/6, 21/7 et 13/8) ; tube 3 (1 à 6 : 12, 15, 18, 19, 20 et 23/8)

1.4 Evolution des stocks hydriques le long d'un transect mare-versant sableux

L'évolution des stocks des trois tubes et pour quatre tranches de sol (0-40, 0-80, 0-160 et 0-340 cm) est présentée dans la figure 71. Ces graphes sont mis en parallèle avec celui présentant l'évolution des niveaux de la mare au delà de 2 mètres.

Deux phases sont remarquables dans l'évolution des stocks hydriques :

- une phase de remplissage en eau de la colonne de sol,
- une phase de stabilisation dans l'ensemble de la colonne de sol.

L'évolution des stocks d'eau en chacun des tubes est commentée.

Tube n°1 : la zone colmatée

La première phase correspond à la mise en eau de la mare, l'humidité dans l'ensemble du profil est proche de la saturation et est à l'état de saturation dans la partie supérieure (biseau argilo-limoneux).

Mise à part la fin de la période observée où la mare atteint un niveau maximum (charge hydraulique maximale), les variations de stock observées après la phase de remplissage sont très faibles. En fin de période et pour la tranche de sol 0-340 cm, le stock hydrique est proche de 800 mm , soit une variation totale ΔS de 600 mm (26/05 au 18/08), représentant deux fois la hauteur des précipitations de cette période.

Tube n°2 : la zone perméable

Trois débordements significatifs ont été observés au cours de la période de mesure. Ils se traduisent par de fortes et brusques variations du stock (figure 71) dans l'ensemble de la colonne de sol (0-340 cm) qui sont suivies d'une diminution rapide du stock hydrique lorsque le niveau de la mare s'établit en dessous de la zone perméable. L'augmentation de la fréquence d'inondation de cette zone, puis la permanence du plan d'eau en fin de saison stabilise le stock hydrique à une lame de 800 mm (stock 0-340 cm). Dans la tranche de sol 0-340 cm, la variation totale du stock ΔS est égale à une lame de 700 mm avec des apports égaux à 1230 mm, soit 4 fois la lame précipitée cumulée, et 2 fois les apports mesurés dans la zone colmatée (tube 1). Les sorties correspondent à une lame de 690 mm.

Tube n°3 : le versant hors de la zone d'inondation de la mare

L'évolution du stock hydrique du sol de versant sableux (tube 3) est caractérisée par un stockage lent et progressif s'effectuant au rythme des averses. A partir du début du mois d'août, le stockage s'accélère pour atteindre environ 400 mm (0-340 cm) au 18/08/1993, dont 182 mm correspondant aux apports par les précipitations (320 mm au cours de la période). Comme le montre la figure 70, ce stock est réparti de manière homogène dans le sol, et, au vu de ces profils hydriques, le drainage au delà de 340 cm est resté très faible, voire inexistant (profil "bouclé" à 320 cm) jusqu'au 18/08/1993.

Interprétations des informations disponibles : malgré l'absence de mesures tensiométriques, il est possible d'interpréter les profils d'humidité en tenant compte de nos connaissances du milieu pédologique et hydrologique de surface : horizon sableux perméable-ouvert et présence d'une charge hydraulique permanente dans le cas du tube 1, séquences d'inondation-éxondation dans le cas du tube 2.

La stabilité des stocks hydriques mesurée au tube 1 à partir de juin correspond à l'installation d'un drainage permanent dont le régime varie légérement en fonction de la charge.

Le régime du tube 2, très sensible aux phases d'inondation-exondation associe une importante infiltration de surface et un drainage rapide dont la principale composante est verticale.

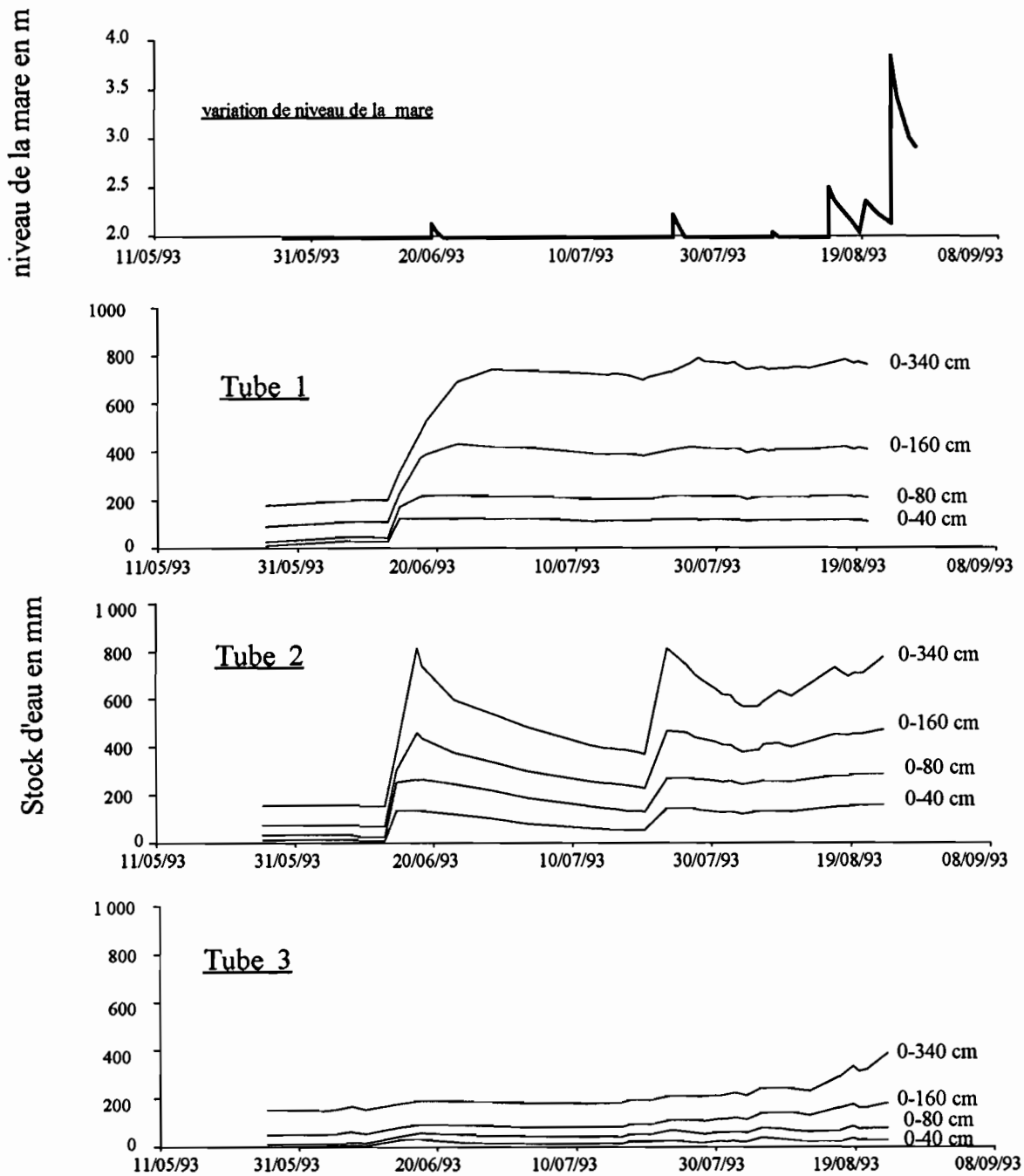


Figure 71 : évolution saisonnière (26.05.1993 au 18.8.1993) des stocks d'eau (aux profondeurs 40, 80, 160 et 340 cm) dans le sol le long d'un transect comprenant la zone colmatée (tube 1), la zone perméable temporairement inondable (tube 2), la versant hors influence de la mare (tube 3). Comparaison avec le régime de la mare seuillé à 2 mètres.

Tableau 34 : récapitulatif des variations de stock d'eau pour les trois tubes suivis (du 26/05/1993 au 18/08/1993) en fonction du régime de la mare dans la zone perméable temporairement inondée.

régime de la mare dans la zone perméable	remplissage et 1er débordement	période de décrue	période de décrue	2eme débordement	période de décrue	3 eme débordement	débordement permanent
période de calcul de ΔS hydrique en mm	ΔS 26 mai-17 juin	ΔS 17-23 juin	ΔS 23 juin -19 juillet	ΔS 19 - 23 juillet	ΔS 23 juil - 03 août	ΔS 03 - 05 août	ΔS 05 -18 août
			tube zone colmatée				
0-40 cm	116	-3	-7	3	-8	7	-4
0-340 cm	300	210	8	33	10	11	17
			tube zone perméable				
0-40 cm	123	-14	-66	90	-24	9	23
0-340 cm	663	-220	-223	441	-246	0	127
			tube hors influence de la mare				
0-40 cm	32	-13	5	3	-6	16	-1
0-340 cm	37	-2	7	16	1	30	91

1.5 Bilan hydrique sous la zone colmatée et sous la zone perméable périphérique

L'établissement d'un bilan hydrique, simplifié au calcul des entrées et sorties (évaporation et succion capillaire négligée) sur la tranche de sol 0-340 cm, paraît intéressant pour, d'une part, confronter les valeurs de la lame infiltrée calculable à partir du bilan hydrique de la mare à celles des variations de stocks des tubes, et, d'autre part, estimer les sorties, c'est à dire le drainage vertical, au delà de 340 cm dans chacun des compartiments pédologiques.

L'équation du bilan hydrique dans la tranche 0-340 cm sous-jacente au plan d'eau est simplifiée à :

$$\Delta S = \text{entrée} - \text{sortie}$$

avec entrée = lame infiltrée à partir du plan d'eau

sortie = drainage vertical au delà de la profondeur 340 cm.

Les termes non pris en compte sont négligeables dans ce contexte :

- l'évaporation est inexistante au tube 1 (inondation permanente), inexistante au tube 2 pour les phases d'inondations et limitée à la surface au cours des périodes d'assèchement (présence d'une fine pellicule argilo-limoneuse en surface),

- la diffusion latérale et verticale est négligeable pour les sols sableux et pour les conditions d'humidités des profils observés (toujours proches de la saturation).

Le tableau 35 présente les valeurs des deux termes du bilan pour la période du 26/05/1993 au 18/08/1993. Le calcul s'éffectue en considérant que, pour chacune des périodes données dans le tableau 34 :

1) les entrées sont négligeables en période de décrue, d'où ΔS = sorties par drainage vertical ;

2) à l'inverse, les sorties sont négligeables en période de débordement, car ces périodes sont courtes en comparaison avec les périodes de décrue, et les profils sont secs à la cote 340 cm (figure 70-profils 1 à 3 du tube 2). La variation de stock ΔS est égale aux entrées. Ainsi pour la période du 26 mai au 18 août 1993, le drainage au tube 2 est de l'ordre de 690 mm pour des entrées qui sont d'environ 1231 mm (tableau 35). Ce raisonnement ne peut être appliqué au tube 1 submergé en permanence à partir du mois de juin. Pour ce tube, les variations de stock positives observées au cours des périodes de décrue sont la somme algébrique du drainage vers le bas et des entrées vers le haut. Ainsi le bilan pour le tube 1 en période de décrue s'écrit :

$$\Delta S = \Delta S_{sol} + L_{inf} \qquad (63)$$

avec

ΔS_{sol} : variation du stock d'eau mesurée dans le tube

L_{inf} : lame infiltrée à partir du plan d'eau

Peu variable dans la zone colmatée (de 10 à 20 mm/j entre 1,3 et 1,6 m de hauteur d'eau), l'intensité de vidange journalière moyenne (de l'ordre de 10 mm/j) à laquelle on soustrait l'évaporation moyenne journalière donne une lame infiltrée journalière de l'ordre de 5 mm/j[1]. Ainsi, aux variations de stock mesurées dans le tube 1 se rajoute la lame infiltrée cumulée à partir de la zone colmatée qui est de l'ordre de 320 mm pour la période d'inondation de la zone colmatée (14 juin - 18 août).

La somme des entrées mesurées dans les tubes 1 et 2 correspond à une lame d'eau égale à 2,1, mètres qui est égale à la lame infiltrée estimée par le bilan hydrologique du plan d'eau dans la même période. D'autre part, il est intéressant de remarquer que la somme des entrées dans la zone perméable est d'un tiers supérieure aux entrées de la zone colmatée.

Tableau 35 : bilan simplifié des stocks hydriques des trois tubes suivis (du 26/05/1993 au 18/8/1993).

	bilan simplifié	
	somme entrée en mm	somme sortie en mm
	tube zone colmatée	
0-40 cm	446*	-342**
0-340 cm	909*	-320**
	tube zone perméable	
0-40 cm	245	-104
0-340 cm	1 231	-689
	tube zone hors influence de la mare	
0-40 cm	56	-20
0-340 cm	182	-2

* *entrées* = ΔS_{sol} + *Linf* dans la zone colmatée

** *sorties* = ΔS_{sol} + *Dr* dans la zone colmatée

[1]On s'appuie sur les valeurs présentées au tableau 31-chapitre 6 de la lame infiltrée pour une vidange s'éffectuant principalement dans la zone colmatée.

1.6 Estimation du drainage vertical à l'aide des profils d'humidités

Klaij et Vachaud (1992) proposent une méthode de détermination du bilan hydrique d'une colonne de sol (uni-dimensionnel) pour deux conditions particulières de redistribution de l'eau à partir des profils d'humidité neutronique:

- sur un profil très sec (début de saison des pluies), la diffusion par capillarité étant négligeable, le bilan peut s'écrire :

$$R-(E+D)=\Delta S \qquad (64)$$

avec :

ΔS : variation de stock

R : précipitations

E : évaporation

D : drainage vertical

Le drainage vertical D_r est égal à :

$$D_r = S_{rm(t)} - S_{rm(t+\Delta t)} \qquad (65)$$

avec

$S_{rm(t)}$: stock d'eau entre la profondeur Z_r et la profondeur Z_m au temps t

$S_{rm(t+\Delta t)}$: stock d'eau entre la profondeur Z_r et la profondeur Z_m au temps $t + \Delta t$

Le flux vertical q_r, à la profondeur r est alors égal à : $q_r = \frac{D_r}{\Delta t}$

$$q_r = \frac{D_r}{\Delta t}$$

- lorsque le drainage s'effectue au delà de la profondeur maximale le drainage vertical D_r s'écrit :

$$D_r = q_r \Delta t = -K(\theta) gradH \Delta t \qquad (66)$$

avec

$K(\theta)$: conductivité hydraulique fonction de l'humidité

$grad\,H$: gradient hydraulique total par hypothèse égal à -1 (signifie implicitement $\frac{d(\theta)}{dZ} = 0$)

Cette méthode est utilisée dans des sols sableux du Niger occidental et dans les profondeurs où, a priori, les flux ascendants (évaporation) sont inexistants ou négligeables.

N'ayant pas établi la relation K(θ) sur le transect observé, le suivi réalisé sur les deux tubes inclus dans le lit de la mare nous permet seulement de calculer un flux vertical de drainage D_r au cours de la phase d'humectation des sols correspondant à la mise en eau de la mare. De manière plus restrictive pour le tube placé dans la zone perméable, ce calcul est seulement permis pour le début de la phase d'humectation. Dans notre cas, les profondeurs Z_r sont prises égales à 40 cm et la profondeur Z_m est égale à 340 cm.

Calculés sur la période d'humectation allant du 13/06 au 23/06/vv93, les flux q_r, au delà du plan Z_r, moyens sont de :

- 40 mm/j pour le tube 1 (zone colmatée),
- 60 mm/j pour le tube 2 (zone perméable périphérique),
- 1,5 mm/j pour le tube 3 (versant hors influence mare).

Cette période inclut deux épisodes de vidange pour lesquels l'intensité moyenne de vidange I_{vm} est de 90 mm/j. Les flux q_r estimés respectent l'ordre de grandeur de l'intensité du processus de vidange mesuré à partir du plan d'eau, le flux de la zone perméable est encore fortement sous-estimé (pas de suivi du début de la redistribution). Ces flux s'avèrent être 20 à 30 fois supérieurs au drainage d'un sol de versant alimenté par les précipitations (tube 3) pour les mêmes conditions pluviométriques.

1.7 Première synthèse

Les informations apportées par le suivi d'humidité neutronique ainsi que la quantification sommaire des entrées et sorties dans les deux compartiments caractéristiques d'une mare de cours d'eau corroborent le schéma de fonctionnement de déstockage de la mare établi précédemment.

Nous sommes, effectivement, en présence de deux régimes hydriques qui correspondent à une infiltration sous un plan d'eau, contrôlée superficiellement par une zone peu perméable. Suite à l'installation du plan d'eau, cette infiltration aboutit à une régime de drainage quasi-permanent vers les horizons profonds. Dans le cas de la zone perméable temporairement inondée, la forte infiltration au sommet des matériaux sableux se traduit par une redistribution de l'eau rapide et essentiellement verticale vers les horizons profonds.

Les ordres de grandeur du drainage vertical Dr apportés par un bilan hydrique simplifié, ainsi que l'estimation du flux vertical qr, sont en parfaite cohérence avec les lames déstockées et les intensités de vidange calculées. Ces estimations montrent ainsi que, même lors de faibles débordements, le déstockage de la mare dans les matériaux sableux va avoir un rôle prépondérant dans le transfert des eaux de surface vers les eaux souterraines.

2 TRANSFERT DES EAUX DE SURFACE VERS LE DOMAINE SOUTERRAIN

Dans sa première phase, l'essentiel de l'étude des transferts des eaux de surface vers le souterrain, à partir des mares, a été focalisé sur les relations existant entre les mares de cours d'eau et l'aquifère généralement situé à moins de 20 mètres. Aussi, les connaissances acquises portent essentiellement sur un site de cours d'eau : la mare de Wankama. D'autres sites, comme Banizoumbou, Maourey Kouara Zéno pour les mares de cours d'eau et Sama Dey village pour les mares de vallée fermée, ont bénéficié d'un suivi piézométrique restreint à un seul point de mesure ou à une période limitée.

Fondées principalement sur le suivi de la piézométrie effectué aux environs de la mare de Wankama et complété par les suivis de deux sites de la même unité géomorphologique (Kori de Dantiandou), quelques caractéristiques concernant le transfert des eaux de la mare vers le souterrain ont été établies, ainsi que leur

variabilité spatiale et temporelle. Sur cette base de connaissance, un premier schéma de fonctionnement est proposé et un essai de validation tenté par l'application d'un modèle de diffusion.

L'information piézométrique à la mare de Sama Dey village est réduite à un seul piézomètre qui est installé dans un puits domestique. Pour cela, ces mesures sont utilisées avec prudence.

Du fait de la hauteur des plateaux au dessus du plafond moyen de l'aquifère, et des mauvaises conditions de drainage, la mare de Bazanga n'a pas fait l'objet d'une étude concernant le transfert de ces eaux vers le souterrain. Seules quelques informations extérieures au site ont été utilisées.

2.1 Transferts à partir des mares de plateaux

L'ensemble géomorphologique des plateaux à cuirasse ferrugineuse recèle des indices morphologiques et pédologiques qui amènent à penser que la redistribution de l'eau est limitée au seul terme évapo-transpiratoire du bilan hydrologique. Par ailleurs, des études du bilan hydrologique menées au cours de l'expérience HAPEX-Sahel et précédemment dans le cadre d'étude de la brousse tigrée (Ambouta, 1988) montrent qu'il est difficile de concevoir une redistribution significative de l'eau vers l'aquifère. La caractérisation du fonctionnement de la mare de Bazanga donne les ordres de grandeur du transfert potentiel vers l'aquifère.

2.1.1 Rappels sur le milieu

Le contexte géomorphologique et pédologique évoqué à deux reprises (chapitre 1, section 1.2 et chapitre 3, section 1.2) se distingue par :

- un relief inexistant mais un micro relief important,
- une couverture pédologique de surface qui est souvent limitée à une profondeur inférieure à 1 mètre et recouverte d'une pellicule de surface imperméable,
- la présence d'une cuirasse ferrugineuse proche de la surface, souvent compacte et de quelques dizaines de centimètres d'épaisseur.

Localement imperméable, cette cuirasse ferrugineuse présente des discontinuités marquées, notamment aux alentours de la mare de Bazanga (Desconnets et *al.*, 1995).

Le contexte hydrologique de la mare de Bazanga, contrairement aux mares de vallée, se distingue par une redistribution de l'eau également partagée entre l'atmosphère et le sol. L'étude de son déstockage (chapitre 5) a mis en évidence une vidange à deux vitesses avec des intensités d'infiltration nettement moins élevées que dans les mares de vallée, entre 2 et 15 cm/j dans la zone perméable et entre 0,5 et 2 cm/j dans la zone colmatée. Outre la faible superficie drainée par les mares de plateau (en pourcentage de la surface totale des plateaux), les volumes déstockés au cours des phases de vidange rapide (infiltration essentiellement) sont faibles (quelques centaines à un millier de m^3).

2.1.2 Connaissance du contexte hydrogéologique sous les plateaux

Pour des raisons humaines plus que matérielles (difficultés de forage), peu d'ouvrages d'exhaure ont été réalisés sur les plateaux à cuirasse ferrugineuse. Aussi, les informations concernant les niveaux

piézométriques sous ces ensembles sont rares. Mais les faibles gradients existants dans notre zone d'étude ainsi que l'homogénéité hydraulique de la nappe laissent présager une continuité piézométrique sous les plateaux. Si l'on tient compte des profondeurs moyennes de l'aquifère et de son gradient, on peut estimer la profondeur de la nappe à environ 70 mètres sous le plateau de la mare de Bazanga. Leduc et Lenoir (1995) ont suivi le puits de Habaka (coordonnées : 2°40,57 E-13°42,80 N) situé sur un plateau à cuirasse ferrugineuse dont le niveau moyen est de 75 mètres. La seule fluctuation notée est une hausse interannuelle, comme on l'a constaté partout ailleurs dans l'aquifère. Les puits de Kampa Zarma (coordonnées : 2°38,80 E-13°26,74 N), situé à proximité d'une mare témoin, et de Kobéri (coordonnées : 2°28,13 E-13°35,09 N) ainsi que les puits de Tongom 1 et 2 et de Tondi Kanguié Zourmania sont localisés en bordure ou à l'intérieur d'un ensemble géomorphologique semblable à celui des plateaux à cuirasse ferrugineuse. En ces divers points, le niveau statique de la nappe se situe aux environs de 60 et 65 mètres avec des variations annuelles assez faibles et inférieures au mètre (figure 72). La hausse interannuelle observée sur trois années est d'environ 0,5 mètre sans fluctuations annuelles visibles, les variations de niveaux enregistrées étant dues aux pompages.

Bromley et *al.* (1995) grâce à un traceur isotopique naturel, en l'occurrence le chlorure, a mesuré la vitesse de drainage à partir de la surface jusqu'à 77 mètres d'un plateau à cuirasse ferrugineuse du Super Site Sud. Il trouve une vitesse moyenne de drainage très faible de l'ordre de 17 mm/an.

Galle et Peugeot (communication orale), par leur dispositif neutronique implanté à 6 mètres de profondeur dans un bande de végétation de brousse tigrée, mettent en évidence une redistribution de l'eau de surface au delà de 6 mètres avec des humidités de l'ordre de 20 à 30 %. Toutefois, le contexte dans lequel est implanté le tube neutronique reste particulier car il concerne une colonne de sol largement colonisée par les racines d'arbres et d'arbustes et par une microfaune liée à ce contexte organique.

2.1.3 Synthèse des informations

L'étude détaillée de l'organisation pédologique sous la mare de Bazanga (Desconnets et *al.*, à paraître) a permis de montrer la discontinuité de la cuirasse à proximité de la mare, et, ainsi, la connexion potentielle de la surface et du sous-sol par l'intermédiaire de ce type de discontinuité localisée. Toutefois comme le montrent, d'une part, les profils d'humidité réalisés aux abords de la mare durant la période la plus humide de la saison (fin août figure 73) et, d'autre part, l'importance relative des flux globaux sortant de la mare, les transferts d'eau à partir de tels systèmes vers le souterrain doivent être très limités en termes de flux.

Par ailleurs, l'existence, même discontinue, de la cuirasse associée à une épaisseur de plus de 60 mètres des sédiments tertiaires, à l'intérieur desquels les flux descendants sont très lents, limitent les transferts de manière considérable, soit à des profondeurs proches de la surface, soit à de longues périodes de transfert pour atteindre et recharger l'aquifère. Les faibles variations piézométriques enregistrées sur quelques puits situés sur les plateaux en témoignent.

Enfin, les volumes infiltrés, inférieurs à 20 000 m^3/an, d'après le bilan de la mare de Bazanga calculés au chapitre 9 mettent en évidence la faible contribution de la mare à une recharge éventuelle de la nappe.

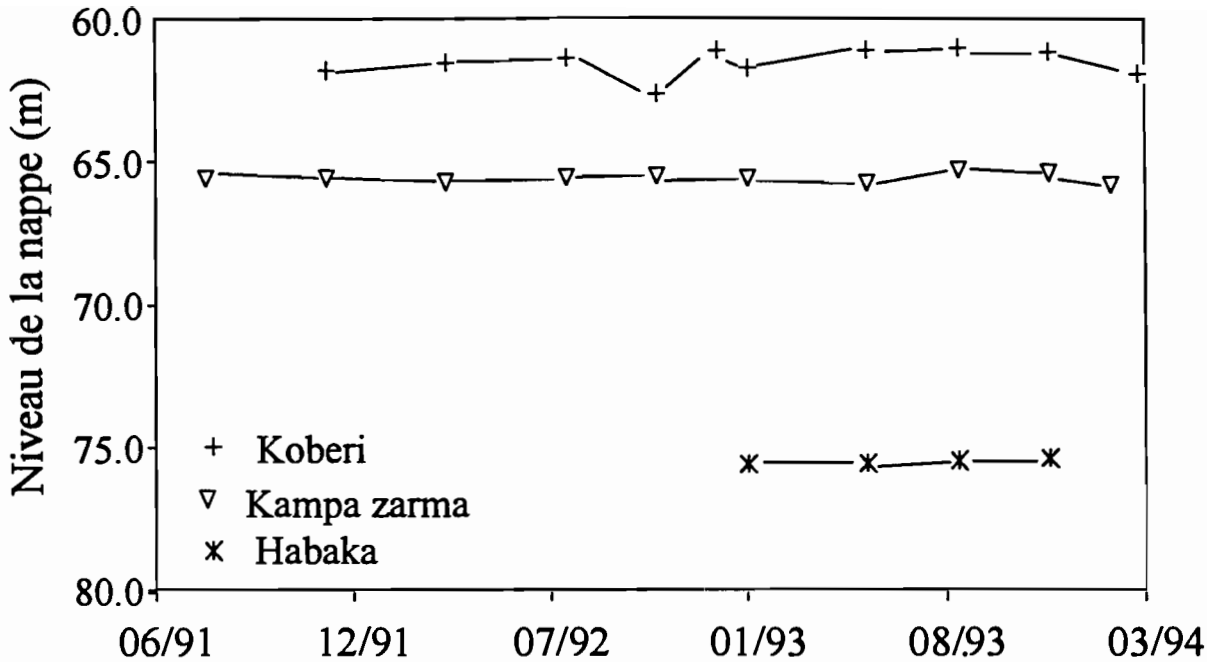


Figure 72 : évolution du niveau piézométrique de la nappe à partir de trois puits situés au bords des plateaux à cuirasse ferrugineuse

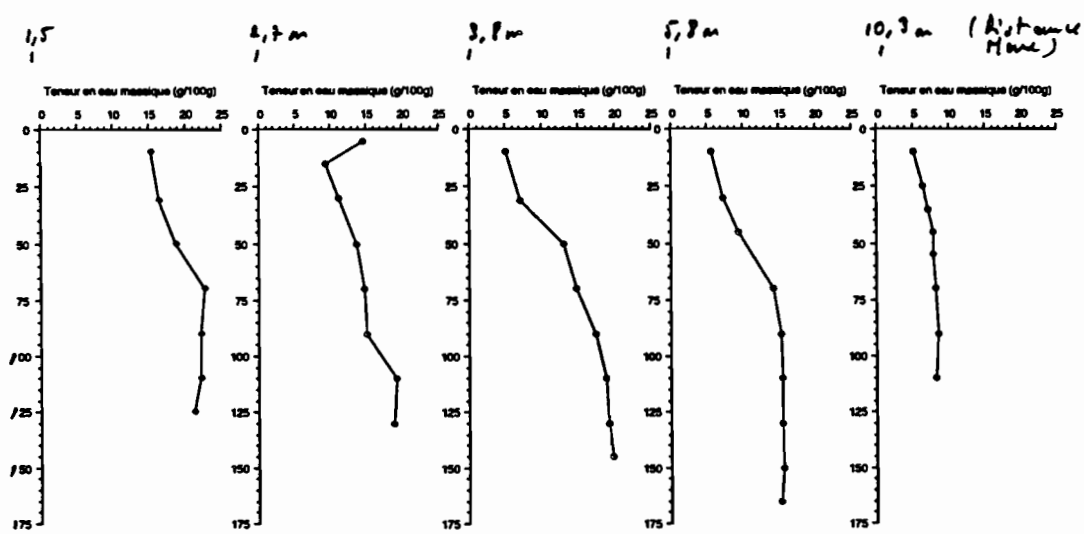


Figure 73 : profils d'humidité à la mare de Bazanga le long d'un transect à partir du plan d'eau (31/8/1993)

2.2 Transferts à partir des mares de cours d'eau

Les premiers résultats concernant le rôle des mares dans le bilan hydrologique régional (Desconnets et *al.*, 1993) ont montré que les mares de vallée, de par le contexte pédologique de surface et de profondeur et leur régime hydrologique, étaient un lieu privilégié d'infiltration et de recharge de l'aquifère (Leduc et Desconnets, 1994b).

A l'aide des informations piézométriques acquises au cours de l'année 1993 à la mare de Wankama, nous nous proposons de caractériser et quantifier les transferts entre mare et aquifère. L'utilisation de chroniques piézométriques issues du réseau d'observation du degré carré nous apporte un complément d'informations nécessaire pour souligner la variabilité spatiale des transferts à partir des mares d'une même unité géomorphologique (le kori de Dantiandou).

2.2.1 Dispositif et protocole de mesure

A la mare de Wankama, le dispositif de mesure est composé de trois piézomètres situés à 30, 80 et 180 mètres de la mare, disposés le long d'un transect perpendiculaire à l'axe longitudinal de la mare (figure 73). Il est complété par le suivi de deux puits villageois situés à 5 et 500 mètres de la mare attenante à celle de Wankama. Alors que les deux piézomètres proches de la mare sont suivis en continu, les deux puits et le troisième piézomètre ont été suivis hebdomadairement en 1993.

A la mare de Banizoumbou, le dispositif piézométrique est composé de deux puits du village (à 550 et 750 mètres de la mare) et deux piézomètres proches de la mare (50 et 120 mètres).

Le suivi du niveau piézométrique dans le voisinage de Maourey Kouara Zeno a été réalisé en continu par une station automatique depuis 1993. Le capteur piézométrique est installé dans un puits de village sur un des versants du kori de Dantiandou et à une centaine de mètres d'une mare temporaire.

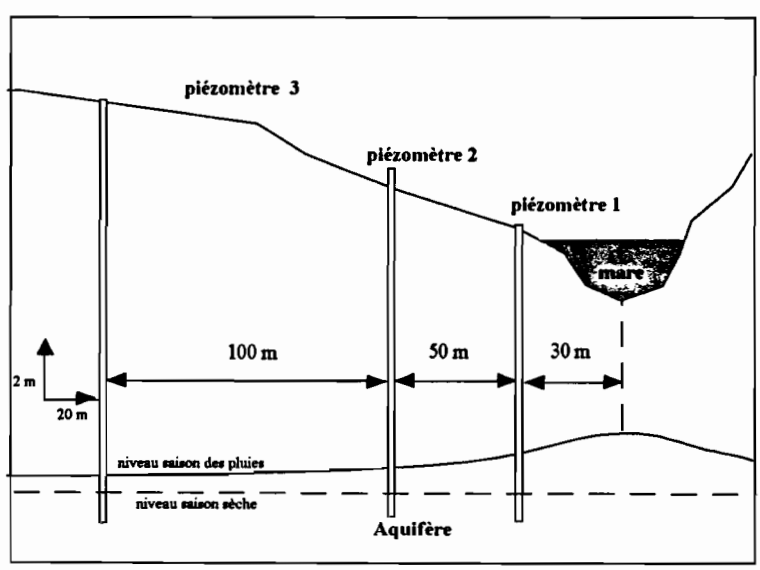


figure 74 : schéma du dispositif piézomètrique à la mare de Wankama

2.2.2 Evolution des niveaux piézométriques à la mare Wankama (année 1993)

En 1993, le niveau de l'aquifère mesuré par les trois piézomètres et les deux puits est resté inchangé jusqu'au 21 juillet (figure 75). Les premières crues du 13 et 16 juin n'ont pas affecté la nappe (figure 75). Cependant, les crues suivantes ont été perceptibles (moins de 10 cm de montée par crue) jusqu'au 13 août, date à partir de laquelle le niveau de l'aquifère est monté significativement (45 cm le 14/8, 3,2 m le 22/8 et 2,5 m le 3/9). Ces variations de forte amplitude correspondent aux deux plus fortes crues de l'année : 35000 m^3 le 22 août et 40000 m^3 le 3 septembre qui, en surface, ont provoqué d'importantes infiltrations dans les matériaux sableux.

Le retard entre le début de la crue et la réaction de l'aquifère est court : de 4 à 6 heures pour le premier piézomètre avant le 13 août, 1 à 2 heures à partir du 13 août et à peu près le double pour le second. L'avancée moyenne du front d'humectation dans la zone non saturée juste sous la mare calculée à partir du suivi neutronique (0-340 cm), a été estimée à 20 cm par jour pour les premières crues (Galle S., communication personnelle). Cette valeur, comparée à la profondeur de la zone non saturée juste sous la mare (15 mètres) est cohérente avec la période de deux mois nécessaire pour avoir une réaction rapide de l'aquifère en cette saison.

Ce type de processus de recharge a déjà été observé en 1992 avec une réponse significative de l'aquifère à partir de la fin juillet. L'occurrence élevée de quatre crues entre le 18 et 30 juillet a été à l'origine de ces fortes variations piézométriques. La réaction de l'aquifère semble être directement liée au cumul des volumes infiltrés à la mare depuis le début de la saison (figure 75).

2.2.3 Schéma de fonctionnement

Les observations piézométriques, conjugées au suivi de la zone non saturée présenté précedemment et à notre connaissance du milieu pédologique (section 2, chapitre 4) conduisent à distinguer deux phases dans le transfert des eaux de surface vers l'aquifère, schématisée dans la figure 76 :

- une phase de remplissage du réservoir intermédiaire (zone non saturée) dont la durée dépend à la fois des conditions d'humidité initiale, puis des volumes s'infiltrant à partir de la mare et principalement à partir de la zone perméable. Au cours de cette phase, le transfert se fait donc par drainage vertical et la réaction de l'aquifère est minimale et très retardée ;
- une phase de réaction rapide où l'infiltration en surface est répercutée avec un retard inférieur au temps de drainage nécessaire pour traverser le réservoir intermédiaire qui est alors saturé en permanence.

Le transfert de l'eau de surface se fait alors par "effet piston". Au cours de cette phase, la variation de niveau piézométrique est forte et brusque. La recharge locale de la nappe se fera principalement au cours de cette phase.

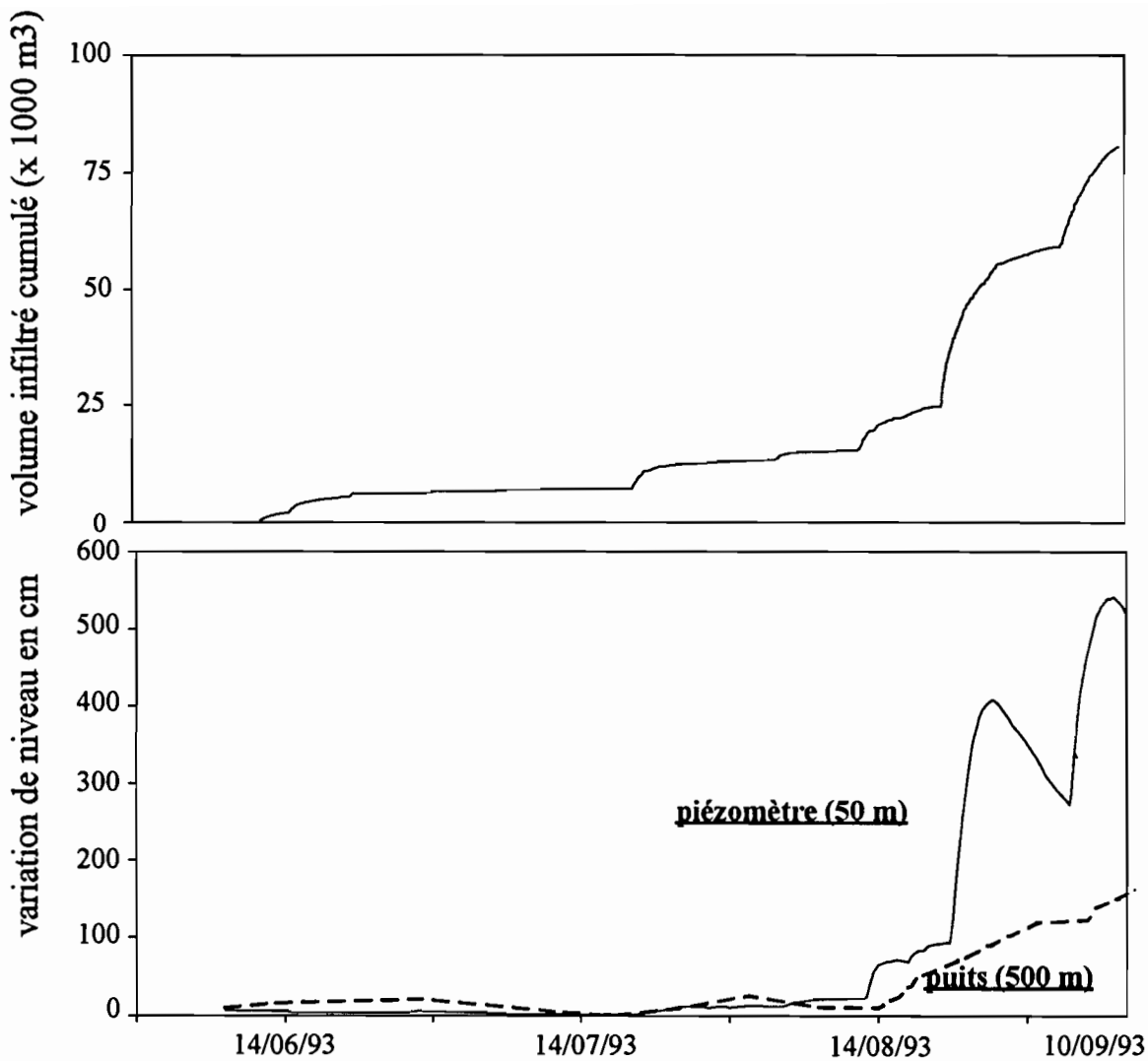


Figure 75 : évolution des niveaux de la mare et de la nappe à Wankama (piézomètre 1 et puits) - période du 1/06/1993 au 10/9/1993.

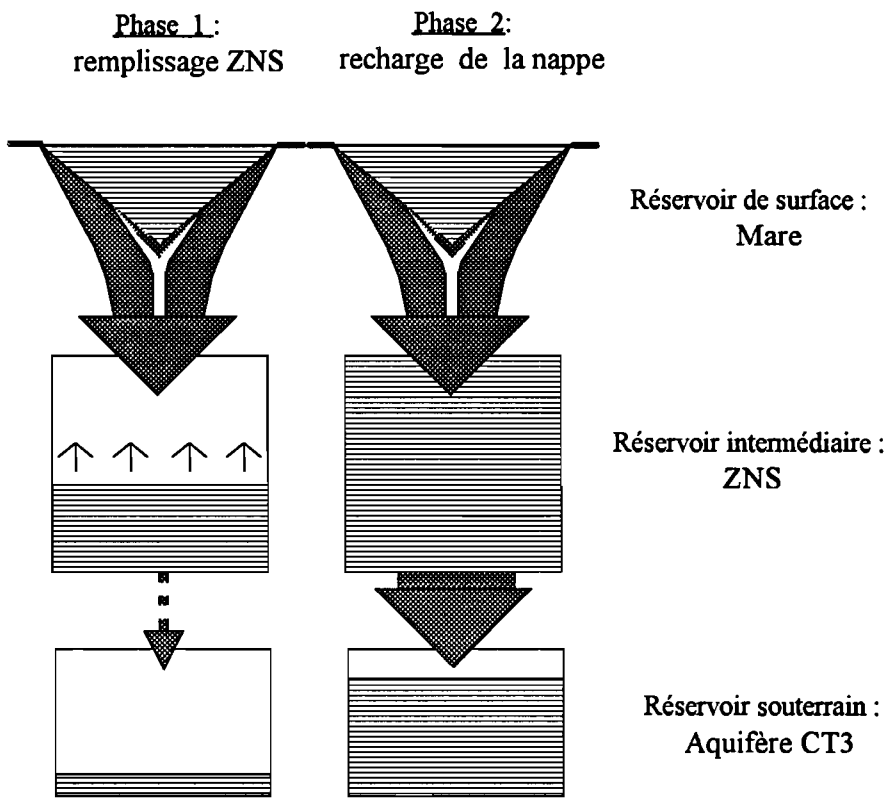


Figure 76 : schéma des modalités de transfert de la mare vers la nappe, cas de la mare de Wankama.

2.2.4 Diversité des transferts mare-aquifère dans un ancien cours d'eau

Les sites de Maourey Kouara Zéno (2°39,04' E 13°35,44' N) et de Banizoumbou (2°39,64' E 13°31,96' N) suivis de manière plus sommaire font partie du même ensemble géomorphologique, l'ancien cours d'eau appelé "kori de Dantiandou". Ils sont situés respectivement à 5 km et 10 km au sud de Wankama. Ces deux sites, par leur configuration pédologique de surface et le régime des précipitations auxquels ils ont été soumis, sont très comparables à celui de Wankama.

Comme les variations piézomètriques sont insignifiantes sur les deux puits éloignés, nous comparons, dans la figure 77, le régime de la mare de Banizoumbou avec les réactions du piézomètre le plus proche. En 1992, avant la mi-juillet, le niveau de l'aquifère diminue régulièrement, les premières crues de juin n'ont aucun impact sur l'aquifère. Les crues de la fin juillet et début août ont un impact très limité. La réaction de l'aquifère est significative à partir de la crue du 30 août 1992 qui induit une variation brusque de 40 cm du niveau piézométrique. Cette crue correspond au plus fort événement de la saison et, en terme d'infiltration, à une forte augmentation des cumuls à partir du 30 août (figure 77).

En 1991 et 1993, une forte augmentation du niveau de l'aquifère a été observée à la fin juin. Comme à la mare de Wankama, la réaction significative de l'aquifère est retardée par rapport aux premières crues et ne semble apparaître qu'à la faveur d'événements exceptionnels. Les figures 75 et 77 montrent que la réponse de l'aquifère est directement liée aux volumes cumulés infiltrés dont la variabilité interannuelle est très forte (voir chapitre 9). Le schéma général de fonctionnement établi à Wankama se vérifie.

Cependant, comparée à Wankama la réponse de l'aquifère est faible (pas de réaction des autres points d'observations). Ces différences de comportement peuvent s'expliquer, à la fois par des volumes infiltrés nettement plus élevés à Wankama, et par des caractéristiques hydrodynamiques différentes (transmissivité et diffusivité) de la zone non saturée et du magasin aquifère.

Le site de Maourey Kouara Zéno, suivi seulement depuis 1993, vient compléter la connaissance des réactions entre la mare et l'aquifère dans le Kori de Dantiandou. Malheureusement, sans connaître les variations de niveau de la mare proche du puits, l'interprétation des variations piézométriques est plus délicate. Malgré tout, l'évolution annuelle présentée en figure 78 et comparée aux variations piézométriques des deux autres sites pour 1993, correspond au même schéma que celui observé à Wankama c'est à dire : faible réaction jusqu'au 13/08/1993, puis forte réaction, qui reste toutefois très inférieure en amplitude (20 fois) aux variations observées à Wankama. Elles sont du même ordre de grandeur que celles observées à Banizoumbou.

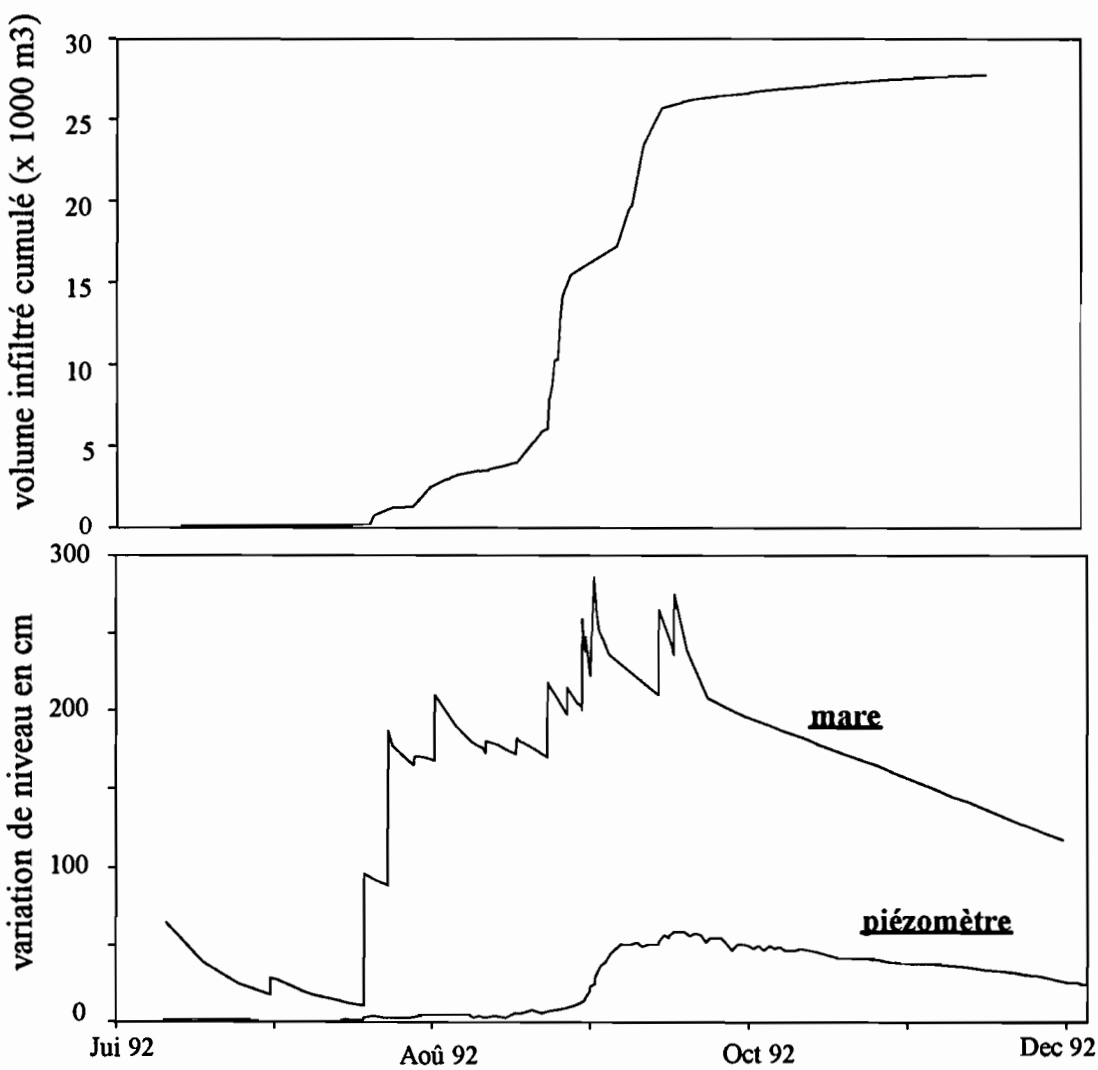


Figure 77 : évolution des niveaux de la mare et de la nappe à Banizoumbou (piézomètre proche de la mare) au cours de l'année 1992.

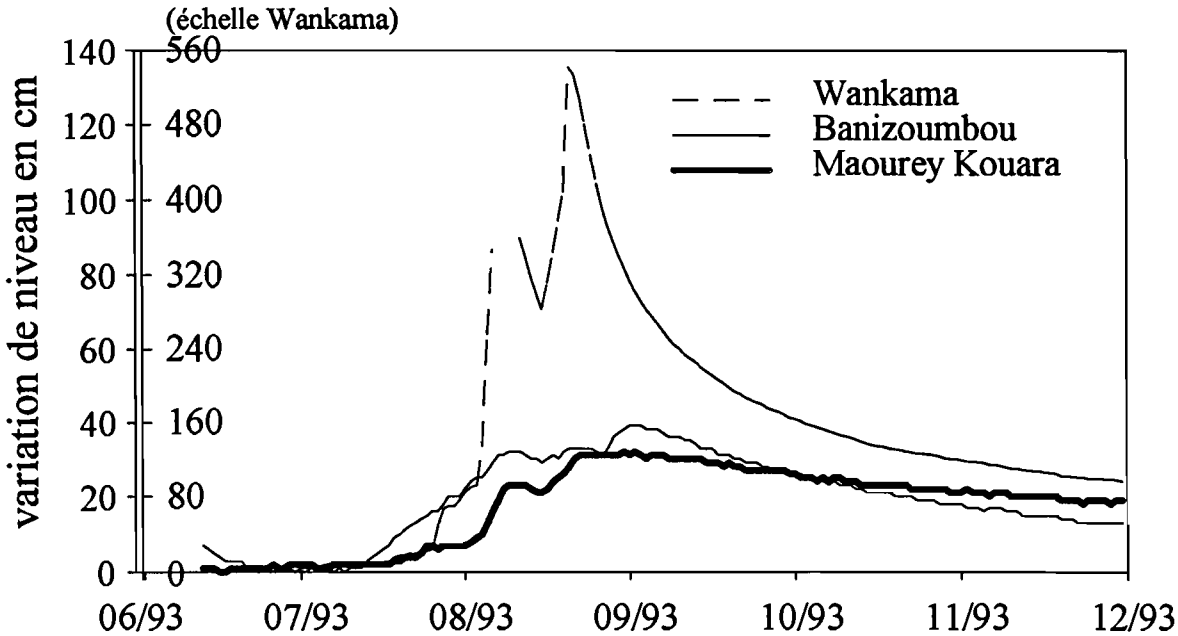


Figure 78 : évolution du niveau piézométrique de la nappe à trois mares du kori de Dantiandou : mare de Wankama, de Maourey Kouara zéno et de Banizoumbou-saison 1993. Pour permettre la comparaison graphique des trois sites, les variations piézométriques à Wankama ont été divisé par 4.

2.2.5 Calcul des diffusivités à partir des chroniques piézométriques : cas de Wankama

Leduc (communication personnelle) a exploité les enregistrements piézométriques (1993) de la mare de Wankama afin de calculer la diffusivité du milieu souterrain à l'aide d'un modèle à deux dimensions.

En première approche, il admet le contexte suivant:

Si l'on considère un aquifère captif semi-infini limité par une zone rectiligne à potentiel imposé sans autre possibilité d'échanges que cette zone, une brusque variation de niveau de cette limite se traduit dans l'aquifère par une réaction amortie dans le temps et l'espace. Cette variation obéit à la l'équation suivante :

$$H(x,t) = H_o.erfc(x\sqrt{\frac{S}{4Tt}}) \qquad (67)$$

avec :

H : variation de la nappe à x et t donnés

H_O : variation brusque de la ligne de potentiel imposé

erfc : fonction erreur complémentaire

x : distance entre le point d'observation et le point de variation brusque imposée

S : emmagasinement

T : transmissivité

t : temps écoulé depuis la variation brusque

Dans le cas de Wankama, on ne peut appliquer cette formule en utilisant la mare comme élément source. En revanche, on peut utiliser la variation observée dans un piézomètre comme signal source et un piézomètre plus éloigné comme point d'observation. La principale limite d'application de cette formule au site de Wankama est l'hypothèse de captivité de la nappe qui implique une transmissivité constante. Cette hypothèse n'est pas respectée dans le cas où la variation de niveau de la nappe est trop forte par rapport à son épaisseur mouillée totale.

Seuls trois épisodes de recharge de la nappe peuvent être utilisables avec les hypothèses énoncées ci-dessus. Ce sont les crues du 13, 22 août et 3 septembre. Les deux piézomètres suivis en continu sont utilisés comme signal source (piézomètre 1, 30 m de la mare) et comme point observé (piézomètre 2, 80 mètres de la mare).

D'une manière générale, les calages de la diffusivité sur les variations observées ne sont pas très satisfaisants excepté pour la crue du 13/8/1993 (figure 79). Pour les autres événements, concernant des réactions de plus forte amplitude, les ajustements sont médiocres (exemple du 22/8/1993 en figure 79). Ceci suggère que les processus de diffusion dans le souterrain sont plus complexes que la schématisation adoptée, ou que les hypothèses admises avec l'utilisation de la formule ne sont pas pleinement respectées (zone d'alimentation assimilable à un point plutôt qu'à une droite, par exemple).

La simulation de l'événement du 13/8/1993 donne une diffusivité de 1 m^2/s. Dans les autres cas la valeur est comprise entre 0,05 et 0,1 m^2/s soit 10 à 20 fois moins.

En complément, ont été utilisés le piézomètre 3 (180 m de la mare) et le puits nord (500 m de la deuxième mare) mais la simulation avec une diffusivité de 0,05 m^2/s est de moins bonne qualité.

Il semblerait donc que seul un modèle à trois dimensions prenant en compte des transferts dans la zone non saturée et la zone saturée permettrait de décrire et simuler les transferts mare-nappe dans le contexte particulier du site de Wankama.

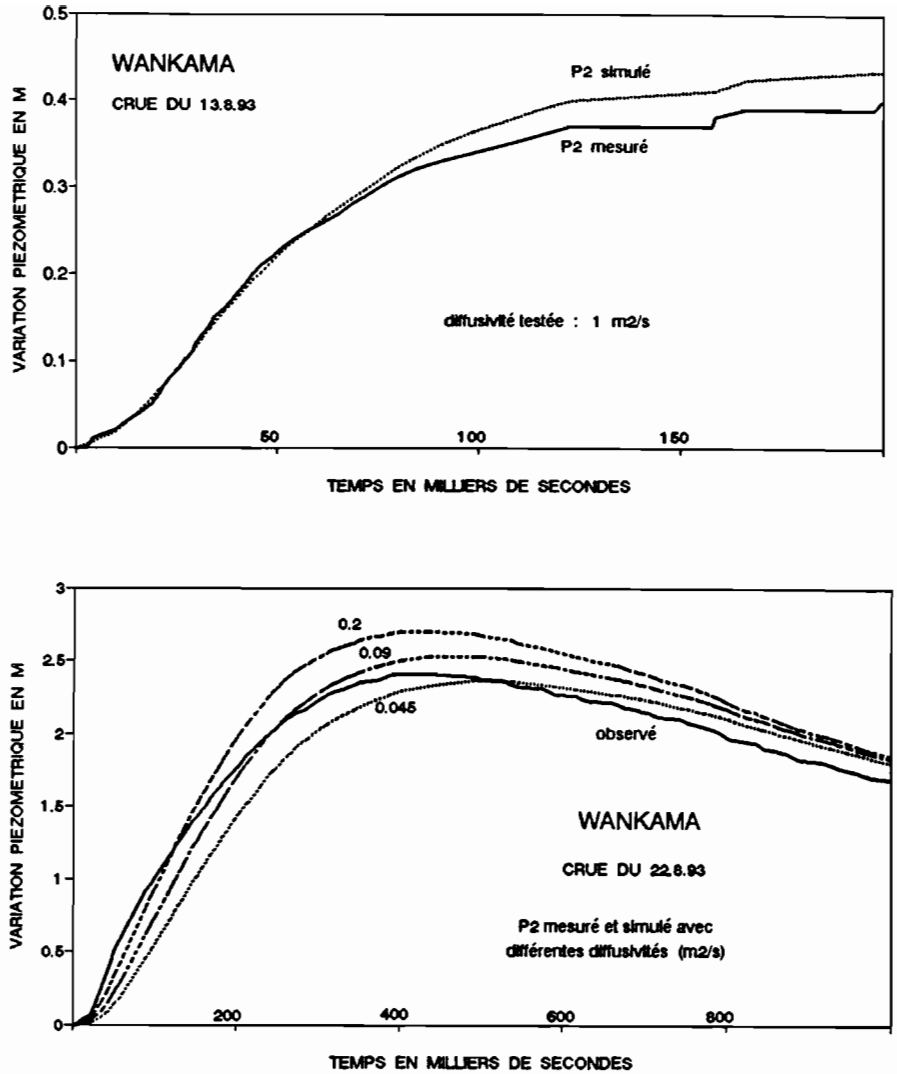


Figure 79 : simulation des variations piézométriques à Wankama pour les événements du 13/8/1993 et du 22/8/1993.(piézomètre 1 = source ; piézomètre 2 = point d'observation).

2.2.6 Synthèse

L'étude de la mare de Wankama a fortement contribué à la caractérisation des transferts de l'eau collectée par les mares vers le souterrain et a montré leur importance en tant que processus de recharge de la nappe. L'exemple analysé, concernant une partie de l'année 1993, montre de quelle manière le régime de la mare et sa variabilité influencent les réactions de la nappe au cours de l'année. Le schéma de transfert développé grâce à cet exemple et à la connaissance du contexte pédologique souffre bien entendu d'un échantillonnage temporel limité. C'est pourquoi des mesures ont été poursuivis en 1994 sur ce site.

La comparaison du système mare-aquifère de Wankama avec ceux de Banizoumbou et de Maourey Kouara Zeno a permis de constater que, si au sein d'un ensemble géomorphologique les modalités de transfert semblent identiques, l'impact de la recharge peut être fortement variable selon, d'une part, le régime et la taille de la mare, et, d'autre part, les propriétes hydrodynamiques de la zone non saturée et du magasin aquifère.

2.3 Transferts à partir des mares de vallée fermée

C'est l'observation des processus de vidange remarquablement rapide qui a amené à étudier les réactions de l'aquifère sous la mare de Sama Dey village. A priori très différents de ceux des mares de cours d'eau, les transferts mare souterrain observés apparaissent originaux. L'événement du 19 juillet 1993 est pris comme exemple.

2.3.1 Rappels sur le milieu

Contrairement aux deux mares précédentes, le substrat de la mare de Sama Dey village ne se distingue pas par la présence d'une zone colmatée mais par une perméabilité globale très élevée à l'interface mare-sol.

Le régime de la mare induit de ce fait une vidange très rapide où les intensités peuvent atteindre plus de 1 mètre par jour. Le déstockage rapide des eaux peut être accompagné d'un dégazage du sol sous le plan d'eau, perceptible par l'apparition de bulles à sa surface.

Quel que soit le niveau, l'eau disparaît très rapidement (une dizaine d'heures à quelques jours). Ainsi, la mare est souvent sèche en saison des pluies.

Le niveau de l'aquifère est à 45 mètres de profondeur. Le seul point d'observation est un vieux puits utilisé par les villageois. L'apparente homogénéité pédologique et géologique observée sur les parois du puits n'a pas été confirmée par d'autres observations aux alentours de la mare.

2.3.2 Dispositif et protocole de mesure

Le dispositif piézométrique installé à la mare de Sama Dey concerne un seul point de mesure qui est situé à une centaine de mètres du point bas de la mare. L'enregistreur automatique utilisé pour ce suivi a été installé dans un ancien puits villageois servant à l'alimentation du bétail et des hommes. C'est depuis le début de l'année 1992 que les mesures sont effectuées avec un arrêt du 31 juillet 1992 à la fin de l'année, suite à l'inondation du puits par la mare. Ce suivi a recommencé à partir de l'année 1993. Des "aberrations" de mesures sont survenues dont les causes restent inexpliquées.

2.3.3 Evolution du niveau piézométrique

Lors de la crue du 19 juillet 1993, le niveau de la mare est monté de 45 cm en 80 minutes pour revenir à zéro 30 heures plus tard (figure 80). La réaction de l'aquifère commence trois heures après le début de la crue pour atteindre son maximum 24 heures plus tard avec une montée de 27 cm de son niveau piézométrique. Il est évident qu'une réaction de cette rapidité avec une colonne de transfert de 45 mètres de zone non saturée implique des chemins préférentiels de circulation de l'eau. L'observation de dégazage à la surface du plan d'eau lors de la vidange va dans ce sens.

Différentes explications peuvent être envisagées telles que la présence de galeries de termites ou de racines, ou bien encore celle de tubulures fossiles que l'on peut voir partout dans le Continental Terminal.

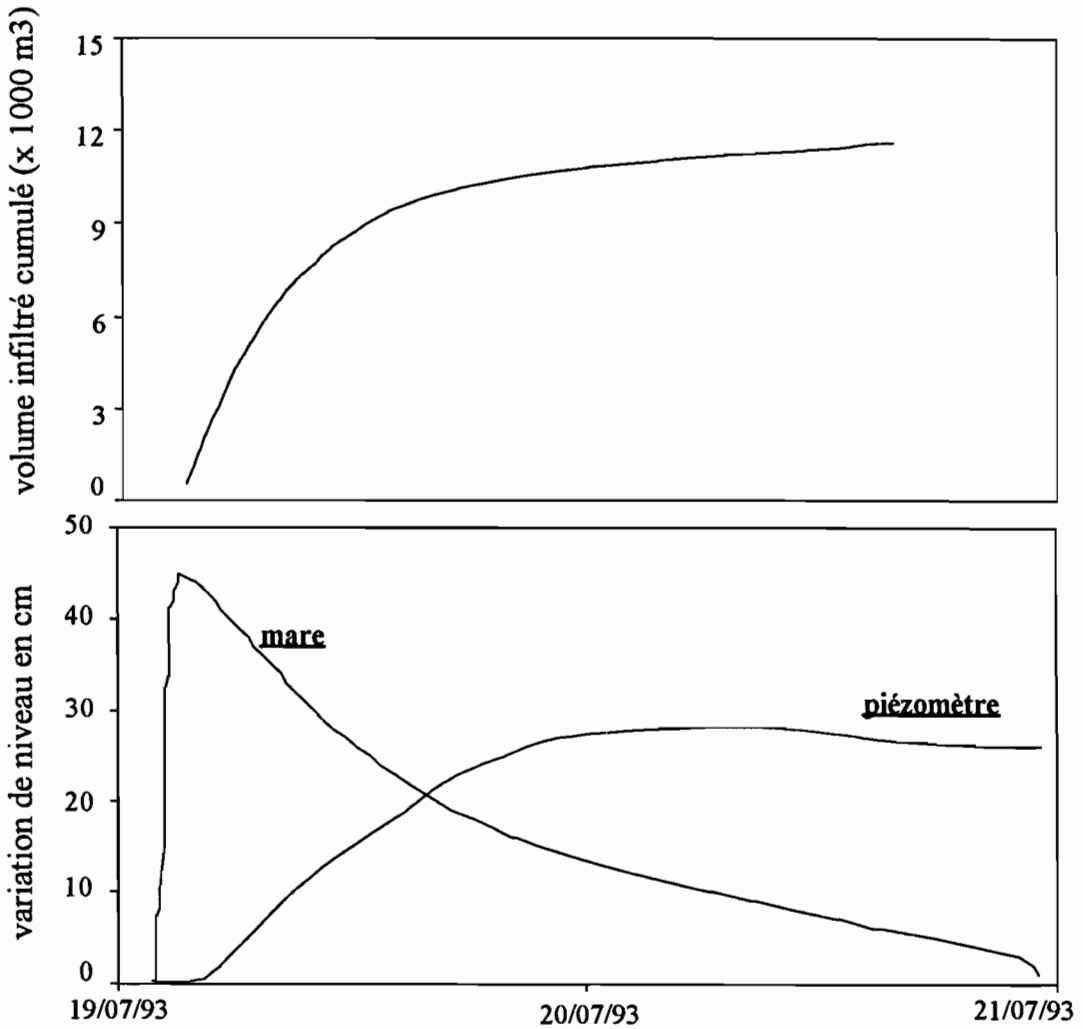


Figure 80 : variations du niveau de la mare et de la nappe à Sama Dey village - événement du 19/7/1993

Des réactions similaires par leur rapidité sont observées toute l'année. Comparativement à l'ensemble des crues observées, celle du 19 juillet représente un faible volume infiltré de 11600 m^3 soit une lame infiltrée de 1.8 mm ou 8 % de la lame précipitée sur le bassin versant.

Les deux évenements présentés en figure 81, respectivement la crue du 6-10 juillet et celle du 3/9/1993 montrent globalement des réactions de l'aquifère similaires à celle du 18 juillet avec toutefois des anomalies métrologiques (montée rapide et descente immédiate suite à la crue du 6/7/1993) ou/et fonctionnelles (impact de la crue antérieur au début de la crue du 10/7/1993). La dernière crue de la saison 1993, du 3/9/1993, correspond au même schéma de transfert que l'ensemble des crues observées. Dans tous les cas, les variations piézométriques sont sensiblement égales, soit une montée de 30 à 50 cm avec une durée de transfert (par rapport au début de la crue) variant de 3 à 8 heures.

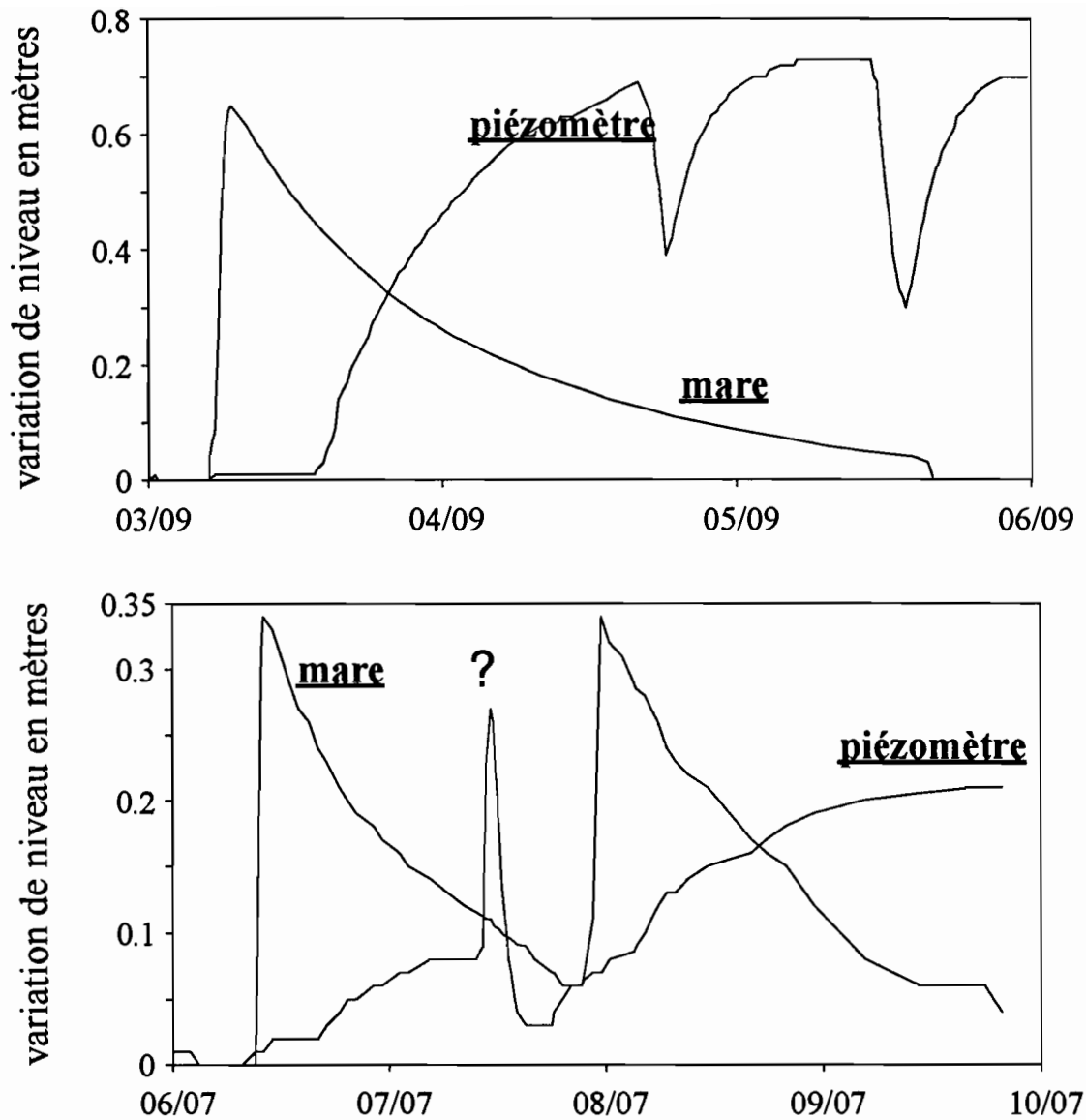


Figure 81 : variations du niveau piézométrique de la mare et de la nappe à Sama Dey village pour les crues du 6 au 8/07/93 et du 03/09/93

2.3.4 Hypothèses de fonctionnement

Si l'on admet la représentativité du point d'observation pour l'ensemble de l'aquifère du bas-fond de Sama Dey, le transfert de la surface au souterrain peut être schématisé simplement.

Comme on le voit sur la figure 80, les variations de niveau de l'aquifère sont de forme identique au signal d'entrée en surface (volume infiltré) avec un retard qui est de l'ordre de l'heure. Le décalage doit correspondre au temps de cheminement dans la structure macroporeuse du sous-sol. Ce transfert peut être alors comparé, de manière simpliste, au cheminement d'un volume d'eau dans des canalisations fermées

avec peu de pertes durant le parcours. L'impact de ce type de transfert sur la recharge est loin d'être négligeable car il permet le transfert total des eaux de surface vers la nappe.

Malheureusement, l'absence d'un autre point d'observation sur ce site empêche de valider les observations faites sur le puits villageois. Il est vrai, qu'associée à des aberrations de mesures qui se sont succédées au cours des deux années de mesures, il est délicat de conclure sur la particularité des transferts observés sur ce puits.

Enfin, il faudra considérer comme révélateur d'une structure souterraine particulière, les dégazages généralisés à la surface du plan d'eau au cours du déstockage de la mare.Un étude détaillée de la structure de la colonne de sol située entre la mare et la nappe éclaircirait, sans doute, les modalités du cheminement de l'eau vers la nappe.

CHAPITRE 7

REDISTRIBUTION DE L'EAU SOUS LA MARE ET VERS L'AQUIFERE

SYNTHESE

Sur la base des connaissances acquises lors des études pédologique et hydrologique (chapitre 4 et 5) de la mare de Bazanga et des informations piézométriques disponibles concernant la recharge de l'aquifère à partir des plateaux (Leduc et Lenoir, 1995), il apparaît que la participation des mares de plateau à la recharge de l'aquifère est très faible. En effet, Browmley et *al.* (1995) estime la recharge verticale de la nappe à partir de la surface des plateaux à environ 17 mm/an. Le suivi de quelques piézomètres situés aux bords des ensembles tabulaires (Leduc et Karbo, 1994) confirme cette faible valeur.

Par contre, le constat réalisé à partir du suivi piézométrique à proximité de plusieurs mares de vallée installées dans les cours d'eau, et de la mare de Wankama en particulier, montre que ces mares sont le siège d'une importante redistribution de l'eau de surface vers l'aquifère. C'est à partir de l'infiltration des eaux d'écoulement dans la zone sableuse perméable, et pour une moindre part dans la zone colmatée, que la recharge locale de l'aquifère est effectuée.

Cela concerne plus de 90 % des volumes transitant dans la mare soit à peu prés 140 000 m^3 en 1992 et 90 000 m^3 en 1993 à la mare de Wankama. Le suivi neutronique mis en place a permis d'estimer des flux verticaux de la mare vers l'aquifère variant de 40 à 60 mm/j.

Liés à d'importants débordements lors de deux crues, on constate qu'après le remplissage de la zone saturée sous-jacente à la mare (état de saturation), les transferts sont rapides et la recharge peut alors dépasser localement une amplitude de plusieurs mètres (crue du 22/8 et du 3/9/1993 à la mare de Wankama). Les suivis piézométriques réalisés à proximité d'autres mares installées dans les cours d'eau font apparaître une forte variabilité de la recharge dans ce contexte géomorphologique. Elle se traduit par des transferts retardés et des recharges locales de plus faible amplitude selon les sites.

Etudiée à partir de la mare de Sama Dey village, la recharge de l'aquifère par les mares installées dans les vallées fermée se fait de manière très rapide. L'exemple de quelques crues de la saison 1993 montre que la totalité des eaux stockées dans la mare transitent en quelques heures vers l'aquifère dont le plafond est situé à environ 40 mètres sous la mare. Il semblerait que c'est à la faveur de systèmes macro-poreux que l'eau infiltrée sous la mare recharge l'aquifère. Il reste à démontrer la représentativité de tels transferts dans ce contexte géomorphologique.

3ème PARTIE

BILAN HYDROLOGIQUE A PARTIR DES MARES

- **Chapitre 8 : estimation des écoulements à la mare et comportement hydrologique des bassins versants**
- **Chapitre 9 : L'infiltration dans de la mare et sa variabilité temporelle**
- **Chapitre 10 : participation des mares à la recharge de l'aquifère**

CHAPITRE 8

ESTIMATION DES ECOULEMENTS VERS LA MARE ET COMPORTEMENT DES BASSINS VERSANTS

CHAPITRE 8

ESTIMATION DES ECOULEMENTS VERS LA MARE ET COMPORTEMENT HYDROLOGIQUE DES BASSINS VERSANTS

L'analyse du régime pluviométrique et des caractéristiques des événements soulignent la variabilité intra saisonnière des pluies et leur violence. L'irrégularité temporelle et spatiale apparaît aussi comme un des principaux caractères du régime pluviométrique particulièrement pour les saisons 1992 et 1993. L'estimation des volumes écoulés vers la mare est critiquée en fonction des lois de vidange établies précédemment (chapitre 4).

Le régime des écoulements est étudié à l'échelle de l'année puis de la crue. La comparaison avec d'autres systèmes hydrologiques met en évidence la faible aptitude de ces bassins au ruissellement, lié principalement à la nature des matériaux , aux états de surface mais aussi à la dégradation du réseau de drainage dans les systèmes endoréiques de vallée.

Un modèle global pluie-lame écoulée est proposé pour déterminer la lame écoulée à la mare.

1 LES PRECIPITATIONS

L'ensemble des informations pluviométriques données dans les paragraphes qui suivent est tiré de Lebel et *al.* (à paraître) ainsi que des rapports intermédiaires d'EPSAT-Niger (1990-1993). Nous présentons quelques unes des principales caractéristiques des événements pluvieux observés sur le dispositif EPSAT-Niger au cours des années 1990 à 1993, période encadrant l'étude des mares.

1.1 Caractéristiques des événements pluvieux

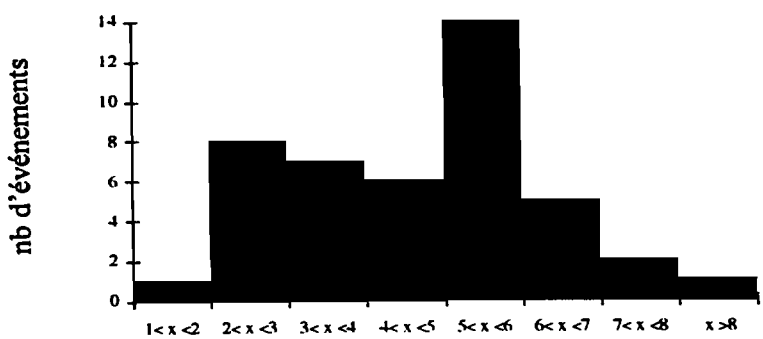
Evalué selon des critères d'extension spatiale et de continuité temporelle[1], le nombre d'événements pluvieux enregistrés sur le degré carré varie de 37 à 48 selon les années.

[1]a) au moins 30% des stations en fonctionnment touchées lors du passage de l'évenement pluvieux sur le degré carré ; b) 2.5 mm de pluie au moins enregistrés à une station ; c) pas d'interruption de plus d'une demi heure sur au moins une station (Lebel et al, 1990)

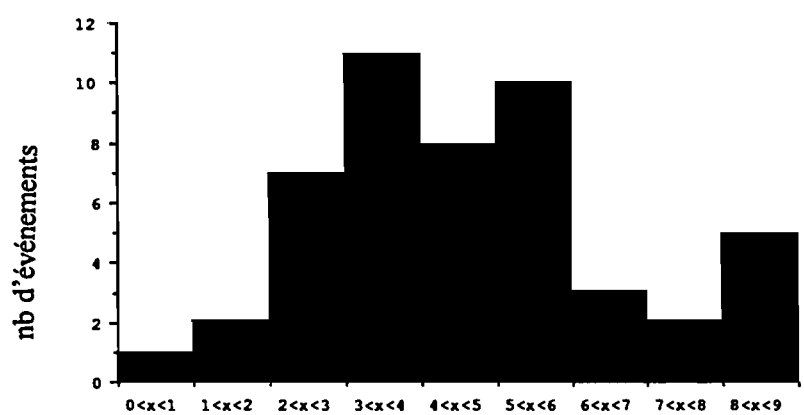
Quelques uns des paramètres statistiques des 4 séries annuelles sont donnés dans le tableau 36. Ils permettent d'apprécier la constance annuelle de la hauteur moyenne (entre 10,5 et 11,2 mm) à laquelle on ne peut attacher qu'une faible signification (coefficient de variation proche de 1). Les valeurs minimales et maximales des hauteurs d'eau confirment la variabilité interévénements avec des valeurs minimales entre 0,2 et 0,9 mm et des valeurs maximales entre 27,2 (1990) et 43,4 mm (1992). La durée d'un événement a été en moyenne de quelques heures et n'a jamais excédé 17 heures. Comme le montrent les histogrammes des durées des averses de 1991 et 1992 en figure 82, la majorité des événements ont des durées comprises entre 2 et 6 heures avec une distribution similaire entre les années.

Tableau 36 : statistiques des événements pluvieux (pluie en mm ; durée en heures-minutes). Les valeurs des moyennes et des écarts types obtenus par krigeage (d'après Lebel et al., à paraître) sont celles des séries d'événements mesurés sur le degré carré.

	nombre d'événements	lame moyenne et écart type	lame minimale	lame maximale	maximum (valeur ponctuelle)	durée minimale	durée maximale
1990	39	10,5 ± 8,1	0,9	27,2	103	2:50	11:10
1991	47	11,2 ± 8,9	0,5	36,4	162	2:10	16:40
1992	48	10,5 ± 9,9	0,5	43,4	92	1:35	11:45
1993	38	11,1 ± 9,0	0,2	37,3	96	0:30	9:05



Année 1991



Année 1992

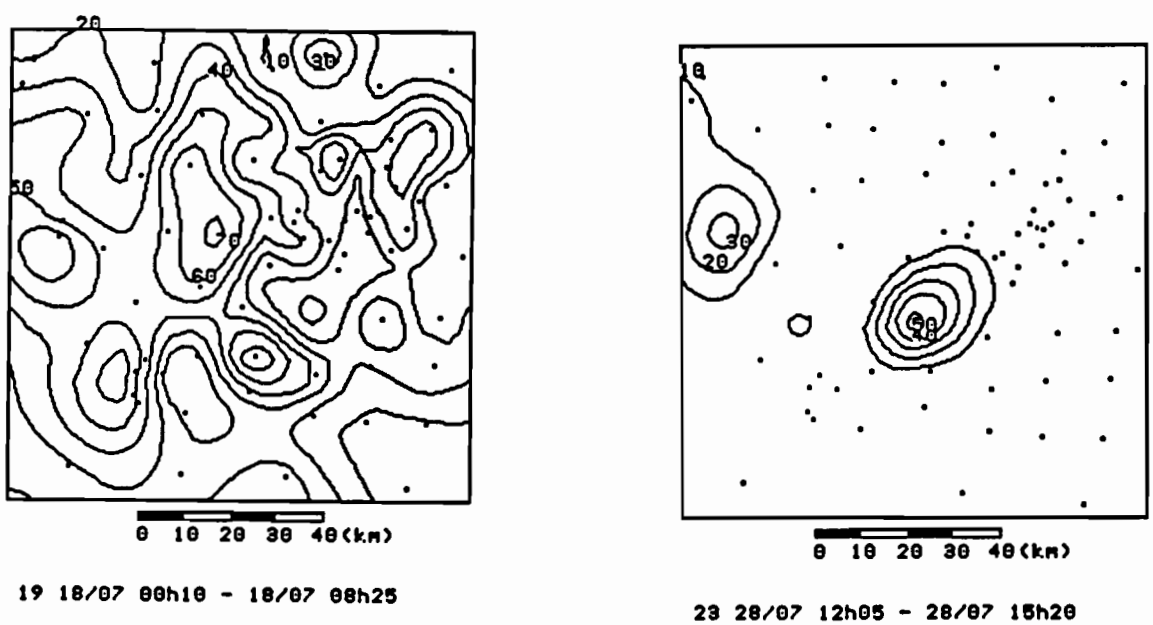
Figure 82 : histogrammes de la durée des averses sur le degré carré-année 1991 et 1992 (Taupin et al, 1993). La variable x (en abcisse) représente la durée de l'événement en heures

1.2 Caractéristiques spatio-temporelles

L'extension spatiale d'un événement est fortement liée à la dynamique du système précipitant qui le provoque. Ce fait est bien illustré par la figure 83 qui présente les cartes d'isohyètes du degré carré pour l'événement du 18/07/1992, provoqué par le passage d'une ligne de grains, et celui du 28/07/1992, lié à une convection locale.

De manière plus synthétique sur la période 1990-1993, 80 à 85% du total annuel précipité est produit par des averses affectant plus de 70% du degré carré alors qu'ils ne représentent que 60% du nombre d'événements.

Si les cumuls annuels tout au long de ces quatre années sont proches de la normale (excepté 1990), la distribution intra-saisonnière des cumuls l'est beaucoup moins et plus particulièrement pour l'année 1992. La figure 84 où sont portés les cumuls journaliers de l'année 1991, 1992 et 1993 pour une des stations du SCSE (station de Darey, 13°38'.20 N 02°44'.53 E) montre remarquablement la variabilité intra-saisonnière de ces trois années. Elle est bien marquée en début de saison entre l'année 1991 et 1992. On remarquera en particulier, la concentration de forts événements entre le 18 et le 31/07/1992.



Equidistance des isohyètes = 10 mm

Figure 83 : isohyètes des événements du 18.07.1992 entre 00h10 et 08h25 (convection de méso-échelle- graphe de gauche) et du 28.07.1992 entre 12h05 et 15h20 (convection locale- graphe de droite) sur le degré carré (Taupin et al, 1993).

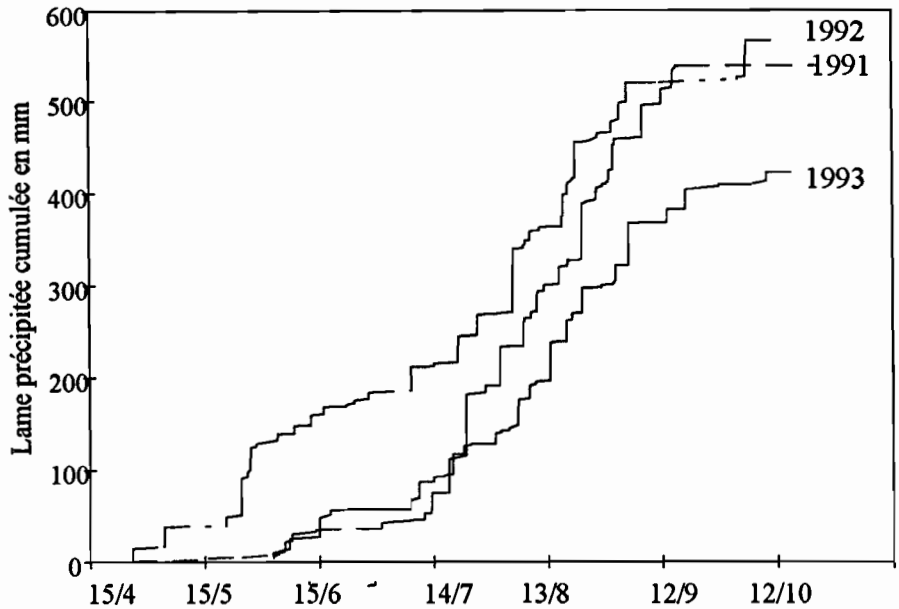


Figure 84 : cumul des lames journalières à la station de Darey (SSCE) pour les années 1991, 1992 et 1993 (période du 15/04 au 15/10)

1.3 Caractéristiques des événements ayant ruisselés

Comme nous l'avons évoqué dans le chapitre de présentation du milieu, les conditions pluviométriques et morpho-pédologiques du milieu étudié sont à l'origine d'un régime d'écoulement n'affectant que quelques mois de l'année et limité à quelques événements pluvieux au sein même de cette période pluvieuse. Nous donnons dans le tableau 37 le nombre de crues observées à la mare par rapport au nombre d'événements pluvieux sur les bassins d'alimentation. Les crues correspondent environ à 50 % des pluies observées avec des différences peu significatives (tableau 37) si l'on considère les caractéristiques bien distinctes des bassins.

Tableau 37 : importance des crues observées à la mare en rapport avec le régime des précipitations (nombre de pluie) pour l'ensemble de la période d'étude. Le nombre d'événements pluvieux donnés dans ce tableau concerne la période d'observation limnimétrique précisée en chapitre 3 tableau 9.

	Nb d'événements pluvieux > 2,5 mm	nb de crues à la mare	% crues/averses
Bazanga	75	38	51
Wankama	83	37	45
Sama Dey village	48	28	58

Il est intéressant de noter que les pluies minimales sont comprises entre 3 et 7,5 mm, et sont d'autant plus élevées que la superficie du bassin augmente. 50 % des événements pluvieux sont compris entre 11 et 40 mm avec une lame moyenne sensiblement la même pour les trois bassins, entre 23,7 et 26,9 mm. On s'aperçoit que la pluie moyenne ayant provoqué un écoulement à l'exutoire est au moins supérieure de 10 mm à la lame moyenne précipitée sur le degré carré sur les périodes observées (comparaison entre les tableaux 36 et 38).

Tableau 38 : statistiques des événements pluvieux ayant provoqué une crue aux mares de référence

	Bazanga		Wankama		Sama Dey village	
	hauteur d'eau mm	intensité maximum * mm/h	hauteur d'eau mm	intensité maximum mm/h *	hauteur d'eau mm	intensité maximum mm/h *
nb	38	38	37	37	28	28
moyenne	23.7	60.5	26.9	68	23.6	64.2
écart type	2.0	6.9	2.9	6	2.0	5.3
Minimum	3.0	9.6	3.5	12	7.0	12.0
Maximum	66.5	157.2	69.0	156	55.0	140.4
quartile inférieur	13.5	36.0	11.5	44	16.3	39.0
quartile supérieur	31.0	72.0	40.0	92	28.5	88.2
Médiane	24.5	45.6	23.0	59	21.0	58.8

* intensité maximale en 5 minutes

Par simplification, on peut considérer que les faibles intensités correspondent à des pluies de type convectif local et les fortes intensités à des pluies de type convectif de méso-échelle.

2 ESTIMATION DE LA LAME ECOULEE A LA MARE

2.1 Nature de l'apport

Les volumes des apports par ruisellement sous un régime intermittent sont facilement appréhendables et calculables. En effet, le ruissellement de surface concentrés par les drains du bassin d'alimentation de la mare n'est pas continu et intervient à l'issue d'une précipitation. La crue est contenue dans un intervalle de temps court, inférieur à une journée. Ainsi, une variation positive d'amplitude supérieure à 1cm au moins, correspondant à un apport, est facilement repérable sur le limnigramme. Parallèlement aux événements pluviométriques enregistrés sur un appareil situé sur le bassin d'alimentation, les variations positives peuvent être aisément repérées sur le limnigramme.

2.2 Calcul du volume ruisselé concentré par la mare

La période de remplissage est une période de variation positive continue du niveau. Elle est caractérisée par la variation ΔHr du niveau au cours d'un intervalle de temps T. Ces deux variables sont établies graphiquement à partir du limnigramme. Cette détermination graphique est précisée dans la figure 15, chapitre 2. Ainsi, au cours d'un période de remplissage, le volume ruisselé stocké est donné par la relation (12) suivante :

$$\Delta Hr = Hr_{max} - Hr_{min} \text{ et}$$
$$\Delta Vr = V(Hr_{max}) - V(Hr_{min}) \qquad (12)$$

avec

ΔHr variation totale de niveau de l'épisode de remplissage en mètres

Hr_{min} niveau initial de l'épisode de remplissage en mètres

Hr_{max} niveau final de l'épisode de remplissage en mètres

ΔVr variation totale de volume de l'épisode de remplissage en m^3

$V(Hr_{min})$ volume initial de l'épisode de remplissage en m^3

$V(Hr_{max})$ volume final de l'épisode de remplissage en m^3

2.3 Estimation de la lame infiltrée au cours du remplissage de la mare

L'étude de la vidange des mares de référence (chapitre 5) a mis en évidence un déstockage par infiltration croissant avec la hauteur d'eau dans la mare. De l'ordre de 5 cm/j (mare de plateau) à 100 cm/j, la potentialité de vidange par infiltration peut être un processus non négligeable au cours du remplissage de la mare. Dans le cas où l'on considère le processus de déstockage par infiltration comme un processus permanent, au cours d'un épisode de remplissage, on peut écrire que :

$$\frac{d(\Delta Hr)}{dt} = \frac{d(Lr)}{dt} - \frac{d[L\inf(h)]}{dt} \qquad (68)$$

$$\text{ou } \frac{d(Lr)}{dt} = \frac{d(\Delta Hr)}{dt} + \frac{d[L\inf(h)]}{dt}$$

avec

Lr : lame ruisselée arrivant à la mare

ΔH_r : variation totale de niveau de l'épisode de remplissage

Linf (h) : lame infiltrée en fonction de la cote à l'échelle

Ainsi, sur un intervalle de temps Δt relativement bref, la lame infiltrée peut être estimée par :

$$L\inf(\Delta t) = \frac{[(aH(t)+b)+(aH(t+\Delta t)+b)]}{2}.\Delta t \qquad (69)$$

et on déduit la lame ruisselée réelle :

$$Lr(\Delta t) = \Delta Hr + L\inf(\Delta t) \qquad (70)$$

H(t) et H(Δt +t) sont respectivement la hauteur d'eau initiale et la hauteur finale dans l'intervalle Δt,

a et b les coefficients de l'ajustement linéaire donnant l'intensité de vidange en fonction de la hauteur d'eau pour une mare donnée (tableaux 23, 24 et 25 au chapitre 5).

En utilisant cette approximation, nous calculons la lame infiltrée en fonction de la hauteur d'eau pour un débit constant de remplissage ce qui permet d'évaluer l'importance du phénomène d'infiltration au cours du

remplissage. Nous présentons en figure 85 la variation de la lame infiltrée (en % de la variation de niveau enregistrée) en fonction de la hauteur d'eau pour la gamme des débits observés.

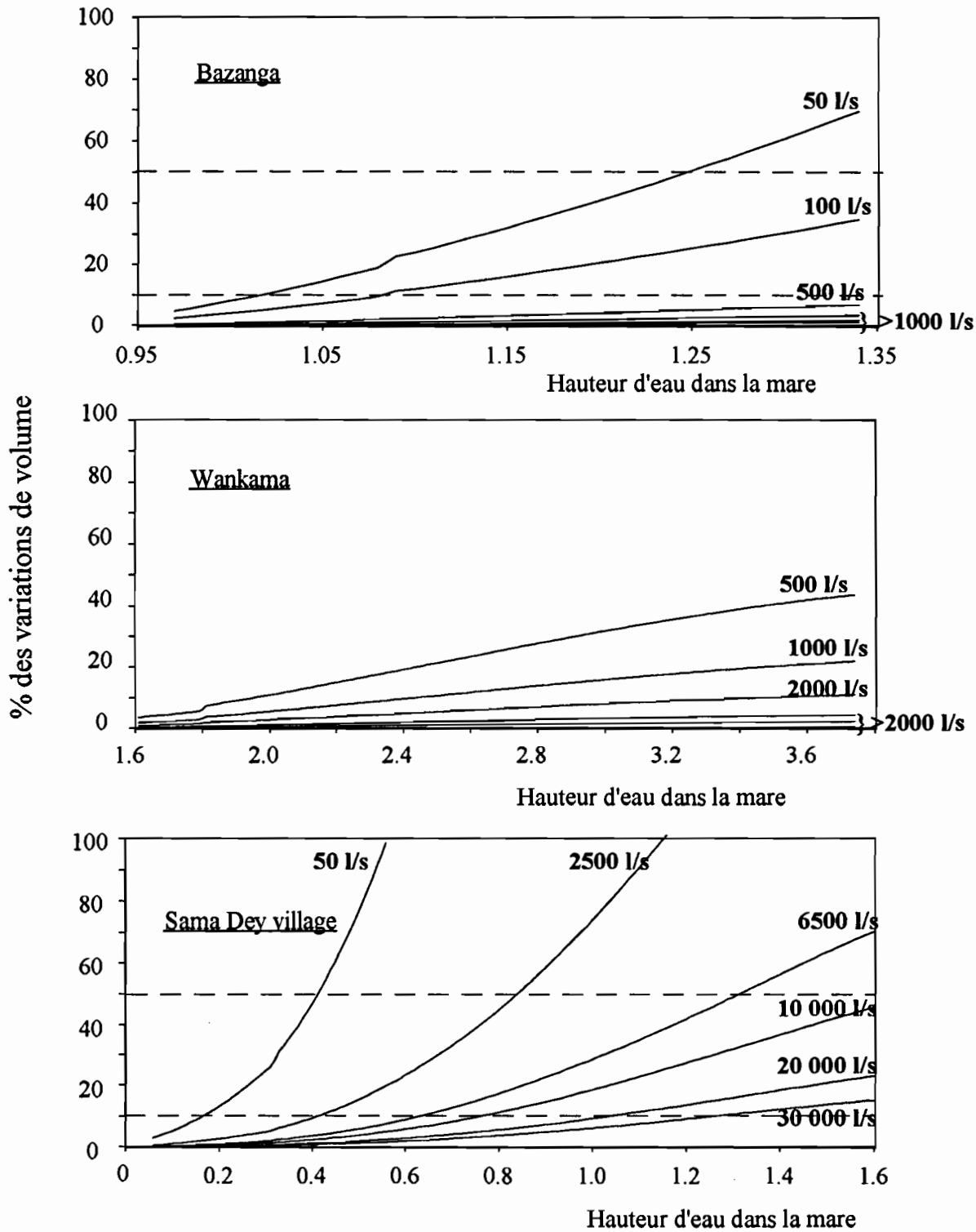


Figure 85 : la lame infiltrée dans la mare au cours du remplissage en fonction de la hauteur d'eau et du débit d'entrée (constant).

Ces relations permettent de constater :

- pour la mare de plateau (Bazanga) : la part infiltrée est négligeable pour les débits supérieurs à 500 l/s et dépasse 50% au débit minimal.

- pour la mare de cours d'eau (Wankama) : elle reste inférieure à 10% pour des débits supérieurs à 2000 l/s et inférieure à 50% de la variation totale enregistrée pour les faibles débits,

- pour la mare de vallée fermée (Sama Dey) : elle est inférieure à 10% pour des hauteurs d'eau inférieures à 1 mètres et pour des débits > 20 000 l/s. Par contre, pour les faibles débits, la part infiltrée compenserait et annulerait le volume d'apport à partir des hauteurs égales à 0,5 m (débit constant de 50 l/s) et à 1,1 m (débit constant de 2500 l/s).

Ces estimations mettent en évidence la possibilité d'une mauvaise appréciation de la lame ruisselée pour des cas extrêmes de débit d'entrée à des hauteurs d'eau où l'intensité de vidange est maximale. C'est particulièrement sensible dans le cas de la mare de vallée fermée (Sama Dey village).

En appliquant une correction des apports par l'estimation d'une lame infiltrée d'après l'expression (69), il apparaît qu'au cours des épisodes de remplissage observés sur les trois mares de référence, la lame ruisselée a été sous-estimée de moins de 10% (cumul des lames ruisselées) sur toute la période d'étude. Malgré tout, on notera que pour quelques épisodes présentant des hydrogrammes de faibles débits et étalés dans le temps, la sous-estimation de la lame ruisselée peut atteindre de 20 à 50%. Ce sont toujours des crues ayant de très faibles volumes. De l'ordre de grandeur de l'erreur d'estimation des volumes (voir chapitre 4 section 3.2 relation hauteur-volume), cette correction n'est pas prise en compte pour l'estimation des volumes écoulés à la mare

3 ETUDE DES ECOULEMENTS

Lors des trois années observées, les premiers écoulements ont été enregistrés entre le mois d'avril (1991) et le mois de juin (1992 et 1993). Les dernières crues ont été enregistrées au plus tard au début du mois d'octobre. L'apparition des écoulements et leur distribution sont entièrement dépendants de la distribution intra-saisonnière des précipitations.

3.1 Les écoulements annuels

Nous donnons dans le tableau 39, les caractéristiques des écoulements annuels arrivant à la mare. En 1991 ,les événements mesurés ne représentent qu'une faible part des écoulements qui se sont réellement produits. La mise en place tardive (fin juillet) du dispositif de mesure a seulement permis d'observer entre 30 et 60 % des crues. Pour les autres années, la grande majorité des écoulements ont pu être mesurés. En 1993, année pour laquelle les observations ont été à peu près complètes, la comparaison des coefficients de ruissellement des trois bassins révèle un écoulement plus faible pour les bassins sur substratum sableux, entre 7,1 et 9,6 % (Sama Dey village et Wankama). Le coefficient de ruissellement est presque trois fois supérieur, soit 21,1 %, sur le bassin à substratum latéritique (Bazanga).

Tableau 39 : écoulements annuels sur les trois bassins des mares de référence.

	Lame précipitée mm	volume écoulé 10^3m^3	lame écoulée mm	coefficient d'écoulement %	crues mesurées/crues produites %
			Bazanga (0,35 km²)		
1991	150,5	12,2	34,8	23,1	30
1992	504,2	34	97,4	19,3	100
1993	345	25,5	72,9	21,1	80
total période d'étude	**999,7**	**71,7**	**205,1**	**20,5**	
			Wankama (2,15 km²)		
1991	351,5	22,3	10,4	3	65
1992	463,8	144,5	67,2	14,5	82
1993	463	96	44,7	9,6	100
total période d'étude	**1278,3**	**262,8**	**122,2**	**9,6**	
			Sama Dey village (6,3 km²)		
1992	314,7	451	71,6	22,7	63
1993	404,5	181,7	28,8	7,1	100
total période d'étude	**719,2**	**632,45**	**100,4**	**13,9**	

Le fort coefficient de ruissellement enregistré à la mare de Sama Dey village pour la année 1992, 22,7%, est dû à une crue exceptionnelle (31/07/1992) qui a apporté près de 50 % du total écoulé pour cette année avec un coefficient de ruissellement exceptionnellement élevé de 60 %.

Outre la faible importance de la lame écoulée, sa variabilité interannuelle est remarquablement forte pour les deux bassins sur substratum sableux. Comme le remarquent Rodier (1975), Chevallier (1985), Albergel (1986), Claude et Chevallier (1991), auteurs de travaux hydrologiques effectués à l'intérieur de la même bande sahélienne, cette variabilité interannuelle est une des caractéristiques du régime hydrologique sahélien et ceci est plus marqué pour les bassins à substratum perméable. Cette particularité du régime sahélien est accentuée ici par la forte oblitération du réseau de drainage des bassins endoréiques (bassins sur subtratum sableux) et la présence de micro-relief (bassin sur substratum latéritique).

En effet, Rodier (1975) donne pour des bassins versants compris entre 2 et 10 km² et pour des pluviométries proches de 500 mm des coefficients de ruissellement variant de 10 à 30 %. Les plus faibles coefficients de ruissellement sont observés sur des bassins sur matériaux latéritiques et sableux (bassin expérimental Niamey VI et VII d'après Rodier (1975)). Ils sont inférieurs ou égaux à ceux observés en 1991 à Wankama. Pour des conditions hydrographiques moins dégradées, Chaperon (1967) donne des coefficients d'écoulements saisonniers de deux bassins versants représentatifs de la vallée de la Maggia (coordonnées 14°06'N-5°40'E ; 3,3 et 5,3 km² de superficie) variant de 11 à 26,7 % pour des cumuls pluviométriques annuels entre 332 et 564 mm.

A la mare d'Oursi (Burkina-Faso) dans un paysage façonné par des contraintes climatiques similaires et pour une pluviométrie plus faible (entre les isohyètes 300 et 400 mm), Claude et Chevallier (1991)

observent des coefficients de ruissellement variant de 30 à 45 % pour des petits bassins imperméables à faible dénivelée (bassin de Jalanfanka 0,8 km²), de 9 à 36 % pour des bassins de 9 km² à forte dénivelée (bassin de Polaka et de Tchalol). On s'aperçoit ainsi que les bassins endoréiques des trois mares étudiées, sous une pluviométrie annuelle normale de 500 mm, ont des écoulement annuels inférieurs aux références données par Rodier et, de manière générale, à l'ensemble des bassins versants pour un régime pluviométrique équivalent.

3.2 Caractéristiques des crues

3.2.1 Caractéristiques générales

Durée de la crue

La durée de la phase de remplissage qui peut être assimilée à la durée de la crue à l'exutoire est très variable selon l'événement (coefficient de variation de 46 à 98 %). On retiendra qu'à la mare de Bazanga, plus de 50 % des événements de crue ont une durée comprise entre 0 et 60 minutes, alors qu'elle est comprise entre 60 et 120 minutes à la mare de Sama Dey et entre 30 et 150 minutes à la mare de Wankama.

Débit maximal de la crue

Le débit maximum moyen est respectivement de 955 l/s à Bazanga, de 2160 l/s à Wankama et de 10160 l/s à Sama Dey village. Il est intéressant de signaler que le débit maximal exceptionnel observé à Sama Dey village a dépassé 80 m^3/s, ou encore 13,3 $m^3/s/km^2$, lors de la crue du 31/07/1992 soit 8 fois son débit maximal moyen et presque 100 fois celui de Bazanga.

Forme et type des hydrogrammes de crue

En général, on remarque une analogie de forme entre les hyétogrammes et hydrogrammes, et en particulier pour le bassin de Bazanga pour des événements de un et plusieurs pics d'intensité. En ce qui concerne les deux systèmes endoréiques de vallée, et Wankama en particulier, deux classes d'hydrogrammes se dégagent:

- la première correspond à une crue de débit maximal inférieur à 1000 l/s et un temps de concentration très faible (50 % des événements observés). Les événements pluvieux ayant provoqué ces crues sont pour 80 % inférieurs à 15 mm avec des conditions de surface sèche (indice des pluies antérieures $IK_{0,15} < 30$).

- la deuxième correspond à des crues de débit maximal supérieur à 1000 l/s avec des temps de concentration nettement plus élevés.

On peut accompagner ces remarques en examinant les débits spécifiques des deux classes d'hydrogrammes. Deux valeurs médianes bien distinctes se dégagent : 0,6 l/s/ha (débit maximal < 1000 l/s) et 7,1 l/s/ha (débit maximum > 1000 l/s). Cette classification peut être mise en relation avec la séparation du bassin versant topographique de la mare en plusieurs sous-bassins.

La carte du réseau hydrographique du bassin, présentée en annexe 7 montre le sectionnement du réseau hydrographique par les zones d'épandage situées à l'aval des drains. On distinguera tout particulièrement la zone d'épandage située en milieu de bassin versant.

Le rôle de cette zone d'épandage n'apparaît pas dans la classification. Un nombre plus élevé d'événements nous permettrait sans doute de distinguer au moins une troisième classe d'hydrogramme, dépendant de la liaison hydraulique faite par la zone d'épandage entre l'amont et l'aval du grand bassin. Cette distinction est nettement moins facile à identifier dans l'ensemble des crues observées à Sama Dey village.

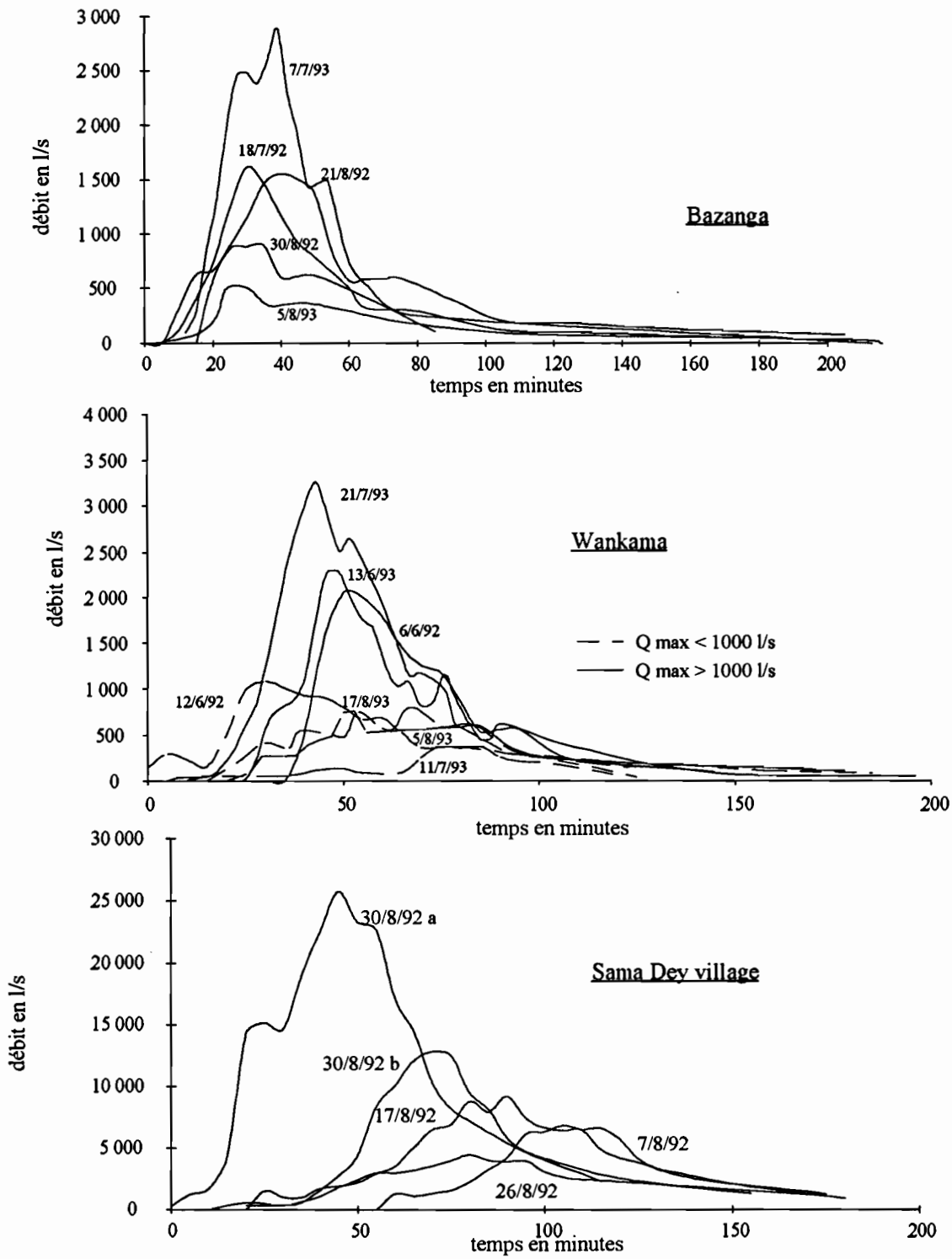


Figure 86 : exemples d'hydrogrammes à l'éxutoire (mare) des trois bassins endoréiques

Caractéristiques de l'hydrogramme médian

Nous donnons les caractéristiques de l'hydrogramme médian dans le tableau 40 où nous distinguons les deux classes d'hydrogrammes identifiées à Wankama.

Tableau 40 : caractéristiques de l'hydrogramme médian

	durée médiane (ΔT)	Lame précipitée médiane (Lp)	Volume médian de la crue (Vr)	Lame écoulée médiane (Lr)	débit maximum médian	débit spécifique médian
	minutes	mm	10^3m^3	mm	l/s	l/s/km²
Bazanga	52,5	24,5	1,3	4,3	640	1365
Wankama classe 1	87,5	21,5	0,86	0,4	370,5	76
Wankama classe 2	91,5	34,0	8,3	3,9	3020,5	710
Sama Dey village	69	21,0	9,25	1,3	5165	314

3.2.2 Variabilité intra-saisonnière des écoulements

On va chercher à expliquer la variation de la lame écoulée à l'échelle de la crue par d'autres variables telles que la hauteur d'eau précipitée, les valeurs des pluies utiles[1] calculées pour des différents seuils d'intensité de 5, 10 et 15 mm/h. De plus, nous disposons de 2 variables descriptives de l'état du bassin versant (stock d'eau entre 0 et 40 cm, indice des pluies antérieures IK-voir chapitre 5 paragraphe 3.1.4) et de 2 variables descriptives des événements pluvieux (intensité maximale, intensité). C'est par les méthodes de régressions simple et multiple ascendantes que nous sélectionnons la ou les variables les plus explicatives. La forme générale du modèle statistique est :

$$Lr = C + AX + BX_1 + CX_2 + DX_3 \ldots \qquad (71)$$

avec

Lr : lame écoulée de la crue en mm

C : constante

A,B, C, D etc... : coefficients

X, X_1, X_2... X_n : variables explicatives qui sont : Pt, cumul de la pluie sur l'événement en mm ; Pu5, Pu10, Pu15 pluie utile à 5, 10 et 15 mm/h en mm ; In max, intensité maximale de la pluie (calculée sur le cumul à 5 minutes) en mm/h ; In intensité moyenne de la pluie en mm/h ; IK indice de pluie antérieure avec α=0,15.

L'analyse est effectuée pour les crues dont les pluies ont pu être mesurées dans le bassin versant, c'est à dire pour les années 1992 et 1993. Les principaux résultats sont donnés ci-après.

---

[1]la pluie utile à 5, 10 et 15 mm/h correspond au cumul de la hauteur d'eau précipitée pour des intensités supérieures à 5, 10 et 15 mm/h pour un évenement donné. Cette notion de pluie utile s'appuie sur les considérations énoncées dans Dubreuil (1974) où l'on considère qu'au dessous d'une certaine intensité de pluie, la lame d'eau précipitée est perdue pour le ruissellement.

mare de Bazanga (0,35 km²) :

- ensembles des données de 1992 et 1993 (nb=32) :

$Lr = -1,84\ [0,73] + 0,31\ [0,02]\ Pt$ ($\varepsilon=1,98$; $R^2=0,8$)

$Lr = -2,75\ [0,58] + 0,237\ [0,025]\ Pt + 0,04\ [0,01]\ In$ ($\varepsilon=1,49$; $R^2=0,89$)

$Lr = -2,91\ [0,75] + 0,36\ [0,03]\ Pt$ (nb=31 ; $\varepsilon=1,78$; $R^2=0,82$)

$Lr = -3,34\ [0,6] + 0,28\ [0,03]\ Pt + 0,036\ [0,01]\ In$ (nb=31 ; $\varepsilon=1,39$; $R^2=0,89$)

- retraits de quelques événements (nb=29) :

$Lr = -1,75\ [0,52] + 0,37\ [0,02]\ Pt$ ($\varepsilon=1,49$; $R^2=0,89$)

$Lr = -1,96\ [0,53] + 0,336\ [0,035]\ Pt + 0,015\ [0,01]\ In$ ($\varepsilon=1,47$; $R^2=0,89$)

$Lr = -2,14\ [0,41] + 0,4\ [0,02]\ Pu10$ ($\varepsilon=1,08$; $R^2=0,95$)

[ ] écart type

mare de Wankama (2,15 km²)

- ensemble des données de 1992 et 1993 (nb=24) :

$Lr = -2,55\ [0,94] + 0,24\ [0,03]\ Pt$ ($\varepsilon=2,39$; $R^2=0,77$)

$Lr = -2,29\ [0,84] + 0,26\ [0,03]\ Pu10$ ($\varepsilon=2,24$; $R^2=0,8$)

$Lr = -3,66\ [1,05] + 0,24\ [0,03]\ Pt + 0,037\ [0,02]\ IK$ ($\varepsilon=2,25$; $R^2=0,8$)

$Lr = -3,15\ [0,97] + 0,255\ [0,03]\ Pu10 + 0,031\ [0,02]\ IK$ ($\varepsilon=2,15$; $R^2=0,81$)

- événements avec des conditions d'humidité moyenne à forte, IK moyen égal à 39 mm (nb=14) :

$Lr = -0,59\ [0,77] + 0,24\ [0,02]\ Pt$ ($\varepsilon=1,62$; $R^2=0,9$)

$Lr = -0,28\ [0,74] + 0,25\ [0,02]\ Pu10$ ($\varepsilon=1,61$; $R^2=0,91$)

$Lr = 0,63\ [0,84] + 0,28\ [0,03]\ Pt - 0,032\ [0,01]\ In$ ($\varepsilon=1,38$; $R^2=0,94$)

$Lr = 0,62\ [0,58] + 0,32\ [0,02]\ Pu10 - 0,033\ [0,01]\ In$ ($\varepsilon=0,96$; $R^2=0,97$)

- événements avec des conditions d'humidité faible à moyenne, IK moyen égal à 12 mm (nb=10) :

$Lr = -1,08\ [0,35] + 0,11\ [0,01]\ Pt$ ($\varepsilon=0,53$; $R^2=0,88$)

$Lr = -1,13\ [0,36] + 0,12\ [0,02]\ Pu10$ ($\varepsilon=0,53$; $R^2=0,88$)

$Lr = -1,56\ [0,37] + 0,11\ [0,01]\ Pt + 0,035\ [0,02]\ IK$ ($\varepsilon=0,44$; $R^2=0,92$)

$Lr = -1,7\ [0,38] + 0,12\ [0,01]\ Pu10 + 0,037\ [0,02]\ IK$ ($\varepsilon=0,43$; $R^2=0,92$)

[ ] écart type

mare de Sama Dey village (6,3 km²)

- ensemble des données de 1992 et 1993 (nb=27) :

$Lr = -1,36\ [1,23] + 0,17\ [0,05]\ Pt$ ($\varepsilon=2,41$; $R^2=0,29$)

$Lr = -1,51\ [1,02] + 0,21\ [0,05]\ Pu10$ ($\varepsilon=2,21$; $R^2=0,4$)

$Lr = -1,38\ [0,92] + 0,22\ [0,04]\ Pu15$ ($\varepsilon=2,13$; $R^2=0,44$)

$Lr = -4,91\ [0,84] + 0,28\ [0,03]\ Pu15 + 0,01\ [0,02]\ IK$ ($\varepsilon=1,38$; $R^2=0,76$)

- événements avec des conditions d'humidité moyenne à forte, IK moyen égal à 36,5 mm (nb=13) :

$$Lr = -2,36\ [1,27] + 0,39\ [0,07]\ Pu15 \qquad (\varepsilon=2,03\ ;\ R^2=0,66)$$

$$Lr = -5,32\ [1,27] + 0,39\ [0,05]\ Pu15 - 0,08\ [0,03]\ IK \qquad (\varepsilon=1,5\ ;\ R^2=0,81)$$

- événements avec des conditions d'humidité faible à moyenne, IK moyen égal à 17 mm (nb=14) :

$$Lr = -3,49\ [0,98] + 0,27\ [0,04]\ Pu15 \qquad (\varepsilon=1,13\ ;\ R^2=0,74)$$

$$Lr = -4,21\ [0,95] + 0,26\ [0,04]\ Pu15 + 0,055\ [0,03]\ IK \qquad (\varepsilon=1\ ;\ R^2=0,79)$$

[ ] écart type

Résultats et commentaires

Sur l'ensemble des 6 variables analysées, la pluie brute (Bazanga), la pluie utile à 10 mm/h (Wankama) et à 15 mm/h (Sama Dey village) permet d'expliquer respectivement à 80 %, 79 % et 44 % la variance pour l'ensemble des événements. Pour le bassin de Bazanga, le retrait de quatre événements caractérisés par la conjonction de conditions d'humidité extrêmes (début de saison ou décade la plus arrosée) et d'événements pluviométriques complexes donne une variance expliquée de 95 % par la pluie utile à 10 mm/h .

Concernant les bassins Bazanga et Sama Dey village, l'intensité maximale de la pluie et l'indice des précipitations antérieures $IK_{0,15}$ comme deuxième variable augmente significativement la variance expliquée de 9 % à 33 %. Concernant le bassin de Wankama, la distinction d'un ensemble d'événements observés sous des conditions sèches à moyennes ($IK_{0,15}$ moyen égal 12 mm) et d'un ensemble d'événements observés sous des conditions moyennes à humides ($IK_{0,15}$ moyen égal 39 mm) permet de distinguer deux variables explicatives supplémentaires. Il s'agit de l'intensité maximale de la pluie pour les conditions humides (Pu10 +In : 97 % de variance expliquée) ; le stock d'eau du sol pour les conditions sèches (92 % de variance expliquée). Le résultat de la même opération pour les événements observés à Sama Dey est moins concluant.

La prise en compte d'une pluie utile au ruissellement (seuillage à 10 mm/h et à 15 mm/h) s'avère intéressante et nécessaire pour analyser la réponse des bassins sous ce régime de pluies. En effet, un grand nombre d'événements finissent souvent par de très faibles intensités (partie de l'événement appelée traîne de la pluie) dont le cumul d'eau peut être non négligeable par rapport au cumul total.

L'analyse statistique révèle des sensibilités hydrologiques bien distinctes entre les trois bassins. On retiendra en particulier l'importance des conditions antérieures d'humidité dans l'explication de la variabilité de comportements pour ce qui concerne les bassins sur substrat sableux (Wankama et Sama Dey village). Le bassin sur substrat ferrugineux imperméabilisé par les croûtes d'érosion (Bazanga) semble plus sensible à l'intensité maximale de la pluie.

4 COMPORTEMENT MOYEN ET DETERMINATION DES LAMES ECOULEES

4.1 Comportement moyen

Le comportement moyen d'un bassin versant peut être décrit par la relation pluie - lame écoulée qui caractérise l'aptitude au ruissellement du bassin versant pour des conditions moyennes de pluviométrie. Permettant d'abord une prédétermination de la lame écoulée en fonction de la lame précipitée, cette relation apporte aussi des éléments de comparaison entre les différents bassins. Nous avons établi ces relations pour un échantillon réduit d'observations mais réunissant des conditions de pluviométrie et d'état des bassins assez contrastées au cours des deux années d'observations. Cet échantillon a été épuré de quelques événements considérés comme exceptionnels ou complexes donnant ainsi un échantillon de 31 observations à Bazanga, 24 à Wankama et 27 à Sama Dey.

Plusieurs approches ont été proposées pour la détermination de la lame écoulée en fonction de la pluie observée dans le cadre d'étude de bassins sahéliens. Nous citerons pour mémoire, Dubreuil (1974) qui propose la méthode graphique résiduelle ou encore l'ajustement à une fonction puissance (Chevallier, 1985), ou bien encore la méthode des courbes-enveloppes de Lamachère (1984). Nous avons choisi de tester et utiliser des modèles de détermination élaborés dans un cadre moins restrictif que celui d'une étude ponctuelle. Il s'agit :

- d'un modèle statistique multi-variable utilisant les variables les plus explicatives déterminées au paragraphe précèdent. Il est de la forme :

$$Lr = C + AX + BX_1 \qquad (72)$$

avec

Lr : lame écoulée de la crue en mm

A,B, C : coefficients ajustés

X, X_1 : variables explicatives qui sont Pt, cumul de la pluie sur l'événement en mm et In max, intensité maximale de la pluie (calculée sur le cumul à 5 minutes) en mm/h pour Bazanga;

Pu10, Pu15 pluie utile à 10 et 15 mm/h en mm et IK indice de pluie antérieure avec α= 0,15 pour Wankama et Sama Dey.

- une fonction de production de Lr=F(P) développée par le Soil Conservation Service (SCS) (Mockus, 1969 ; U.S.D.A, 1972), qui a été élaborée à partir d'observations sur un grand nombre de bassins des Etats-Unis. C'est une fonction très utilisée dans la régionalisation des crues sous différents climats.

Elle est de la forme :

$$Lr = \frac{(P - Ia)^2}{P - Ia + S} \qquad (73)$$

avec

Lr : lame écoulée en mm

P : hauteur d'eau de la pluie en mm

Ia : paramètre tendant à rendre compte de la pluie d'imbibition moyenne sur le bassin.

S : rétention potentielle maximale en mm, constante pour un bassin. Ce paramètre rend compte du transfert du ruissellement à l'éxutoire.

Cette fonction est de forme asymptotique oblique. Ainsi pour une pluie de hauteur d'eau infinie P, la lame écoulée $Lr \xrightarrow{+\infty} P - 2Ia$

- Seguis (1986) a ajustée une fonction Lr=F(P) à partir de l'étude des graphes "pluie-lame écoulée" de 21 petits bassins sahéliens. Il s'agit aussi d'une fonction à concavité vers le haut d'asymptote oblique.

Ce modèle s'écrit :

$$Lr = \sqrt{\beta P^2 - a^2} - a \text{ avec } a \geq 0 \qquad 0 \leq \beta \leq 1 \qquad (74)$$

avec

Lr : lame écoulée en mm

P : hauteur de la pluie en mm

a : paramètre qui rend compte de la quantité d'eau perdue pour le ruissellement pour une pluie infiniment grande : $P = 0 \;\; Lr = 0$; P $\rightarrow$ $+\infty$ $Lr \rightarrow P - a$

C'est une caractéristique du bassin.

β : constante fixée à 1

La forme des fonctions de production empirique proposées par le SCS (1972) et Seguis (1986) trouve sa justification dans Dubreuil (1974) où l'on admet que lorsque la pluie P tend vers des fortes valeurs la lame écoulée Lr tend vers P-a.

Validité de la détermination

Les données observées sont ajustées soit par le choix du plus fort coefficient de détermination (ajustement multi-variable), soit par une méthode d'optimisation des paramètres (Solveur Excel avec l'algorithme de Marquardt (1963)) dans le cas des fonctions du SCS et celle de Seguis. De forme identique, les deux fonctions empiriques testées (Seguis et SCS) extrapolent de manière équivalente les lames écoulées (figure 87). Néanmoins, par son caractère moins empirique (basé sur une théorie de la production du ruissellement) et son utilisation déjà très étendue à nombreux bassins et milieux, la fonction proposée par le Soil Conservation Service a été retenue. La figure 88 présente les relations pluie lame écoulée ajustées par la fonction du SCS. Nous donnons les lames écoulées moyennes pour des pluies de 10, 20, 40 et 80 mm dans le tableau 42.

Tableau 42 : lames écoulées moyennes pour des pluies de 10, 20, 40 et 80 mm

	pluie de10 mm	pluie de 20 mm	pluie de 40 mm	pluie de 80 mm
Bazanga	0,8	3,6	13,4	41,5
Wankama	0,2	1,4	6,7	25,2
Sama Dey village	0,3	1,6	6,8	24,3

Cette fonction décrit de manière satisfaisante la relation pour le bassin de Bazanga. En revanche, ne prenant pas en compte les conditions d'humectation particulières à chaque événement, la relation moyenne présentée en figure 88 pour Wankama et Sama Dey est peu satisfaisante.

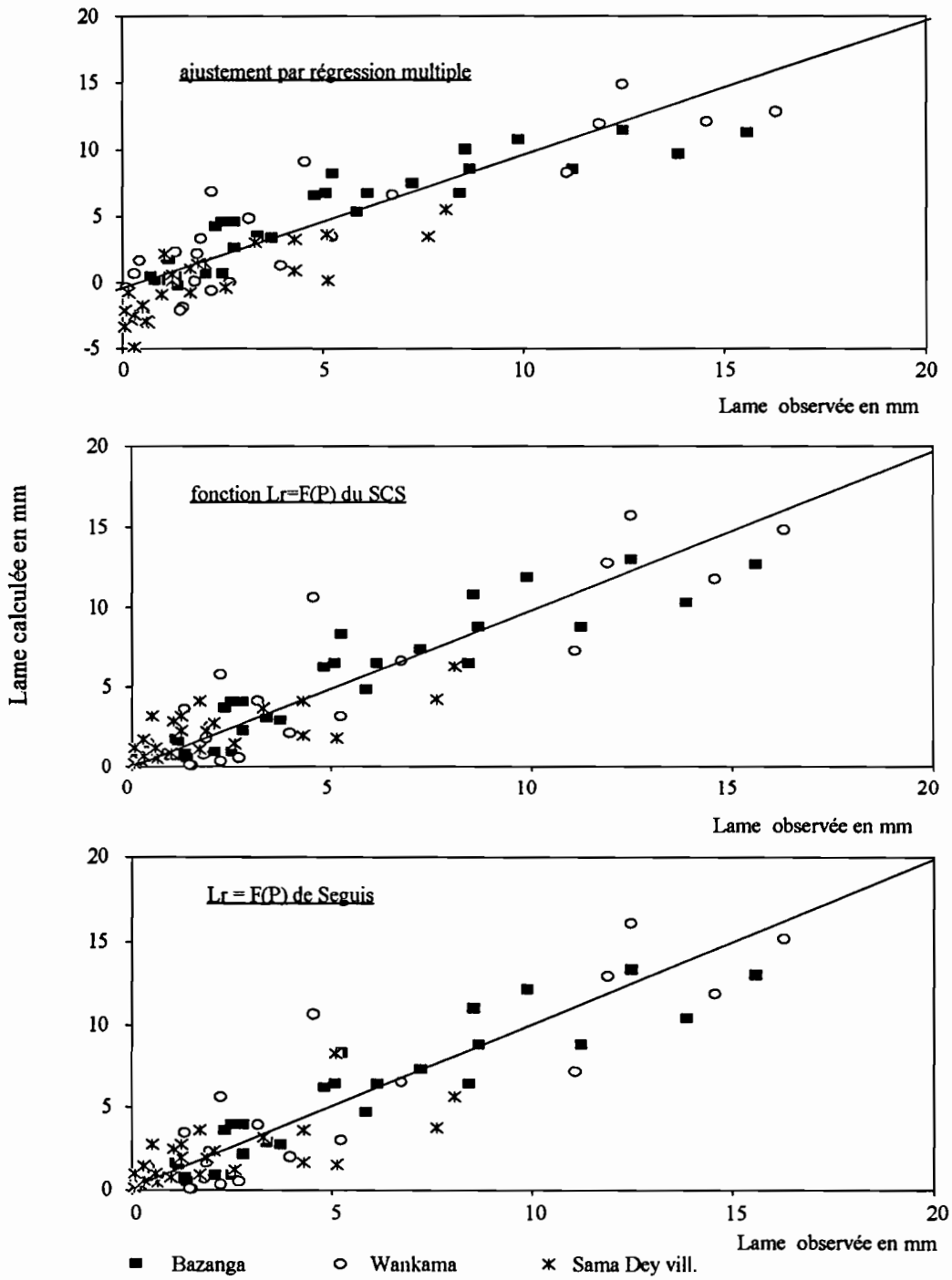


Figure 87 : comparaison des lames écoulées observées-lames calculées pour les différents ajustements testés

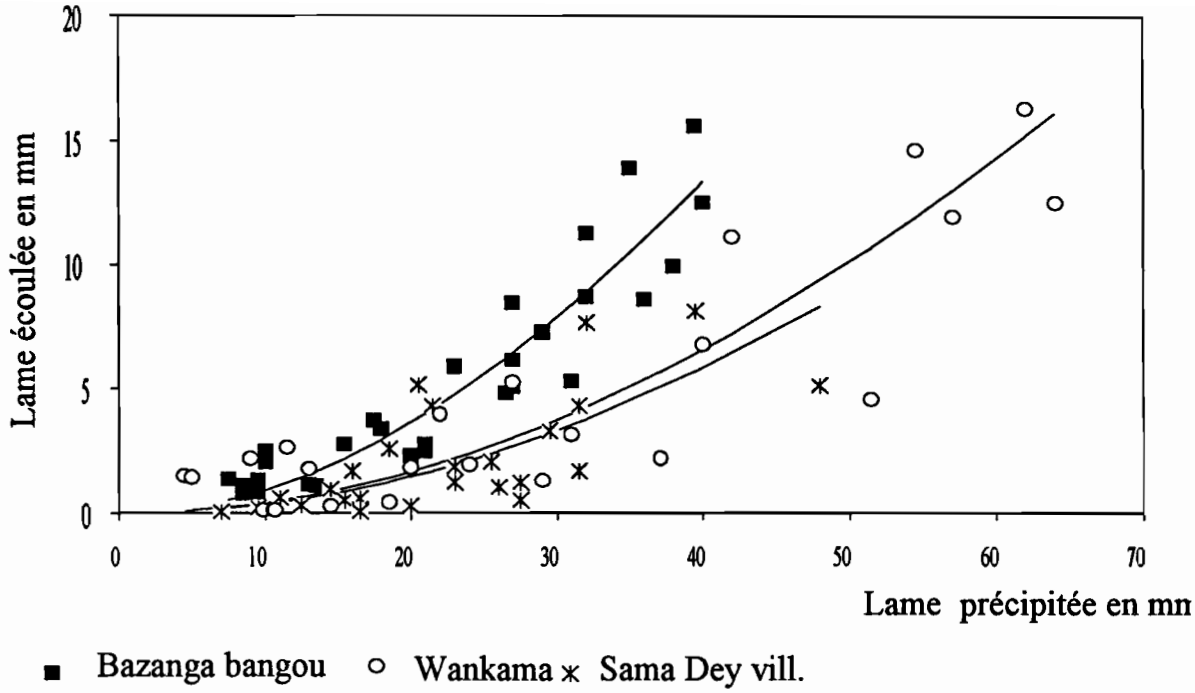


Figure 88 : relation moyenne pluie-lame écoulée par la fonction de SCS (1969)

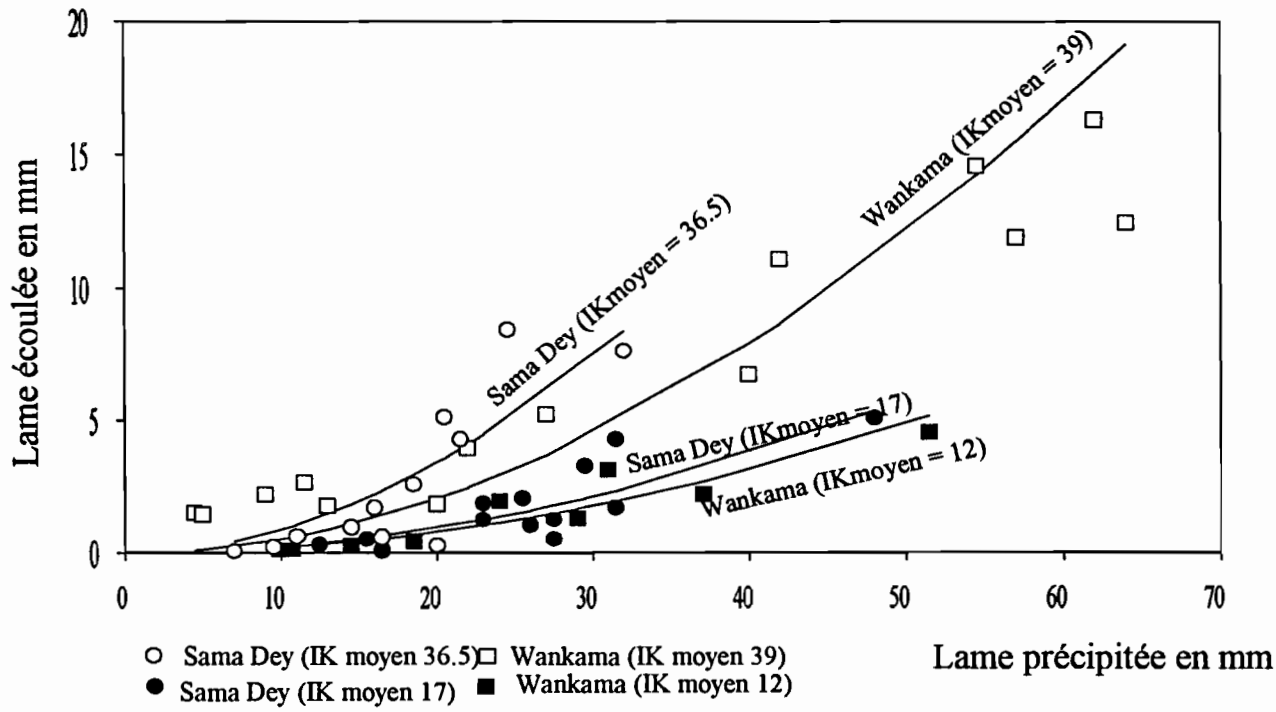


Figure 89 : relation pluie-lame écoulée par la fonction de SCS pour des conditions d'humidité sèches à moyennes et moyennes à humides (bassin de Wankama et de Sama Dey)

Ce sont aux faibles lames écoulées que la détermination s'avère inopérante. La prise en compte de l'état antérieur d'humectation par $IK_{0,15}$ dans le comportement du bassin (partage des observations selon des conditions sèches à moyennes et moyennes à humides) permet une meilleure prédétermination des faibles lames ruisselées (figure 89). Enfin, il est à remarquer qu'aux conditions moyennes, l'aptitude au ruissellement des deux bassins sableux est semblable. En revanche, aux conditions humides, le bassin de Sama Dey à une aptitude nettement plus forte au ruissellement. A état de surface et relief équivalents, ceci est révélateur des conditions médiocres de transfert sur le bassin versant de Wankama où la dégradation des drains et l'existence de zones d'épandage diminuent la concentration des eaux de ruissellement vers la mare. La limite de cette description du comportement des bassins versants sur matériaux sableux réside bien sûr dans le faible échantillon sur lequel elle est réalisée.

D'une manière générale, la faible densité du réseau hydrographique, existant sur l'ensemble des systèmes endoréiques de vallée, associée à des surfaces sableuses très perméables donnent une très faible aptitude au ruissellement pour des pluies faibles à moyennes. Pour des pluies moyennes à fortes, la réponse va dépendre essentiellement des conditions antérieures d'humidité (bassins sur subtratum sableux).

Nous donnons en figure 90 l'évolution des paramètres α et S en fonction de la superficie des bassins, auxquels nous ajoutons ceux calés sur les bassins de Banizoumbou Amont et Banizoumbou Exutoire (d'après Peugeot et *al.*, à paraître). Le paramètre S (rétention potentielle maximale qui traduit les pertes par transfert vers l'exutoire) augmente rapidement avec la superficie du bassin et inversement pour le coefficient α qui tend rapidement vers zéro. Même si leur signification physique reste assez floue, ces valeurs traduisent la forte perméabilité et la dégradation hydrographique existante sur ces bassins du SSCE et la disparition des écoulements à l'exutoire pour des bassins légèrement supérieurs à 15 km². Effectivement, d'après la figure 90, l'écoulement tendrait à disparaître pour des bassins dépassant 15 km². Ainsi, pour des hauteurs de pluie élevées (P < 40 mm) pour le bassin de Banizoumbou (15,4 km²), l'écoulement à l'exutoire des bassins reste très faible, voire négligeable.

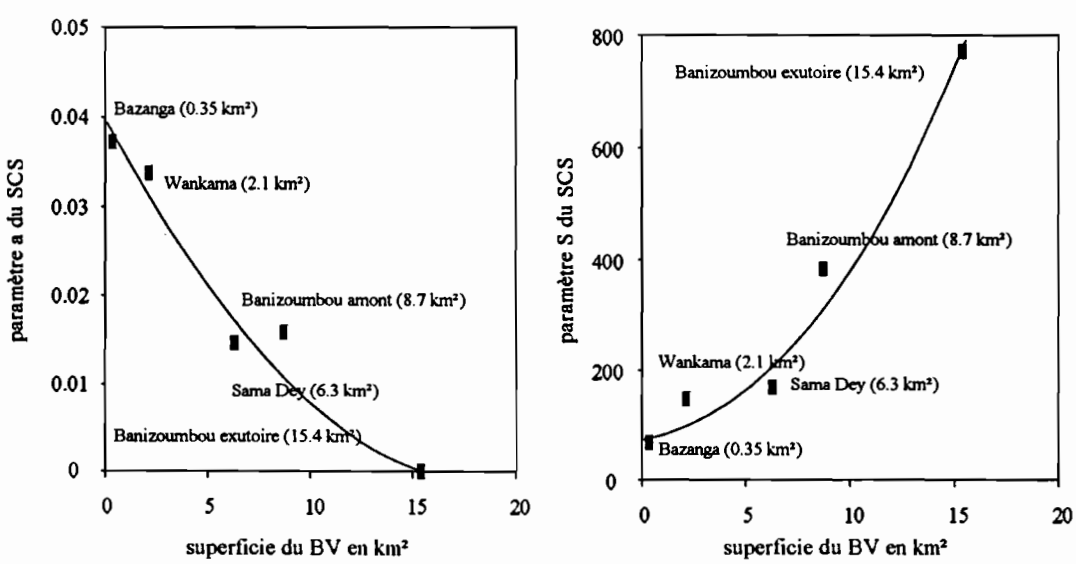


Figure 90 :valeurs des paramètres α et S de la fonction de production selon la superficie du bassin versant

4.2 Particularités de comportement

Comme le montrent les graphes pluie-lame écoulée (figures 89 et 90), cette relation ne permet pas d'extrapoler convenablement l'ensemble des lames écoulées observées. Ceci se vérifie, en particulier, pour quelques événements sur les bassins de Wankama et de Sama Dey. L'analyse de ces événements apporte d'une part, une explication à la mauvaise prédétermination d'une relation moyenne et d'autre part, révèle les particularités de fonctionnement hydrologique des bassins sur matériaux sableux caractérisés par un mauvais drainage. Nous appuyons notre analyse sur quelques événements observés à Wankama qui paraissent très démonstratifs des discontinuités de fonctionnement possibles sur ces bassins.

C'est essentiellement pour des conditions d'humidité très sèches ou très humides associés à des pluies de longue durée et caractérisées par de faibles intensités moyennes (longue traîne et lames précipitées totales peu importantes) que ces particularités de fonctionnement apparaissent. Nous avons choisi de comparer quatre événements pluie-crue pour des conditions sèches et quatre autres pour des conditions humides. Ils sont décrits dans le tableau 43.

Tableau 43 : caractéristiques de quelques événements hydrologiques observés à Wankama.

	lame précipitée mm	intensité maximale* mm/h	intensité moyenne mm/h	IK (α=0,15)	Lr mm	Kru %
			conditions humides			
20/07/92	13,0	33,6	17	45,5	1,8	13,8
27/07/92	11,5	54	15	40,2	2,7	23,2
30/08/92	22,0	69,6	9	52,2	4	18
30/08/92	5,0	44,4	15	68,3	1,4	28,9
moyenne	12,9	50,4	14,1	51,6	2,5	21,0
écart type	7,0	15,3	3,7	12,2	1,2	6,5
			conditions sèches			
11/07/92	18,5	30	14	2,1	0,4	2,3
07/07/93	9,9	58,8	30	9,2	0,1	1,3
19/07/93	10,7	58,8	16	14,4	0,1	1
30/07/93	14,5	62,4	16	8,8	0,3	2
moyenne	13,4	52,5	18,9	8,6	0,2	1,7
écart type	3,9	15,1	7,3	5,1	0,2	0,6

* intensité sur un cumul de 5 minutes

Ces événements hydrologiques sont issus de précipitations dont la hauteur d'eau totale est inférieure à 20 mm avec des intensités maximales moyennes de l'ordre de 50 mm/h et des intensités moyennes très faibles pour ce régime de précipitation, entre 9 et 30 mm/h. Ces pluies ont des formes très comparables et peuvent être décrites, d'une part, par un pic d'intensité maximale en début de pluie suivi d'une longue traîne à très faible intensité (< 10 mm/h) et, d'autre part, par un palier d'intensité faible à moyenne entre 20 et 40 minutes après le début de la pluie. Les indices $IK_{0,15}$, donnés dans le tableau 43, traduisent le fort contraste de conditions antérieures d'humidité, soit un $IK_{0,15}$ moyen de 51,6 mm (conditions humides) et de 8,6 mm (conditions sèches). Les caractéristiques des écoulements à la mare, données par la hauteur de la

lame écoulée et le coefficient de ruissellement, mettent en évidence une très forte sensibilité de la réponse en fonction des conditions d'humidité. Le coefficient de ruissellement moyen est respectivement de 1,7 % (conditions sèches) et 21 % (conditions humides).

L'examen des hydrogrammes des deux ensembles montre qu'à un faible coefficient de ruissellement correspond des hydrogrammes caractérisés par un débit inférieur à 500 l/s et un temps de concentration tc inférieur à 20 minutes. En revanche, à un fort coefficient de ruissellement correspondent des hydrogrammes caractéristiques d'une superficie nettement plus étendue (Q > 500 l/s avec tc >20 min). Pour illustrer cela, nous donnons dans la figure 91 l'hydrogramme de la crue du 7/7/993 et de la crue du 27/07/1992 pour lesquelles les caractéristiques des pluies sont très semblables (hauteur d'eau de 9,8 et 11,1mm ; intensité maximale 58 et 54 mm/h). Les indices IK (α=0,15) calculés sont respectivement de 9,2 mm et 40,2 mm et sont caractéristiques des conditions d'humidité de chacun des deux ensembles analysés. De manière plus générale, cette double réponse hydrologique du bassin versant a été mis en évidence dans l'analyse des caractéristiques de la crue (section 3.2 du même chapitre) où l'on a remarqué deux grandes classes d'hydrogrammes. Considérant les ruptures de pente, la présence de zone d'épandage intermédiaire ou terminale dans l'ensemble du réseau de drainage, cette double réponse pourrait correspondre à la contribution de différents petits sous-bassins (conditions sèches à moyennement humides) pour la classe des débits supérieurs à1000 l/s et, à la contribution totale du bassin versant, hydrogrammes ayant un débit maximal supérieur à 1000 l/s. Ainsi selon le cas, les superficies qui contribuent aux écoulements à l'exutoire sont très différentes.

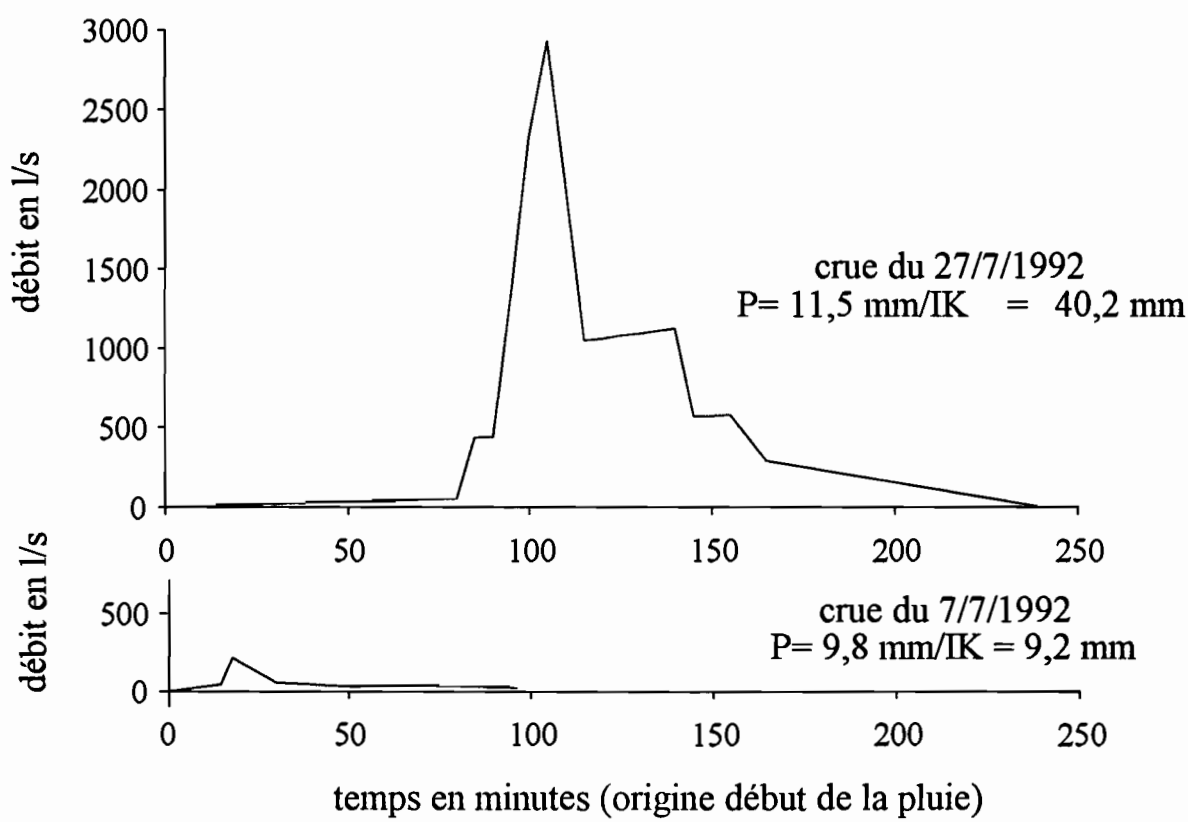


Figure 91 : hydrogrammes des crues du 27/7/1992 et du 7/7/1993 sur le bassin de Wankama

L'interprétation de ces particularités de fonctionnement qui sont très nettes aux faibles hauteurs de pluie, reste difficile. On peut attribuer la participation ou la non participation de l'ensemble du bassin versant lors d'une pluie à la conjonction ou non de plusieurs conditions :

- des conditions d'état de surface et d'humidité favorables à un fort ruissellement sur l'ensemble du bassin,
- des conditions d'humidité favorables à une faible infiltration dans les zones d'épandage sableuses et dans les drains,
- un volume de transfert important permettant une bonne liaison hydraulique entre l'amont et l'aval des zones d'épandage.

Ces conditions nécessaires à un drainage total du bassin versant vers la mare se traduisent, *a priori*, par une hauteur d'eau précipitée minimale associée à un stock d'eau minimal en surface en dessous desquels les écoulements à la mare sont faibles et seulement issus d'une petite partie du bassin correspondant sans doute aux versants dégradés proche de la mare.

CHAPITRE 8

ESTIMATION DES ECOULEMENTS A LA MARE ET COMPORTEMENT HYDROLOGIQUE DES BASSINS VERSANTS

SYNTHESE

Pour les années d'études (1991-1993) la lame d'eau précipitée sur la région de Niamey a été proche de la médiane, aux alentours de 500 mm. Cependant, l'année 1991 a été caractérisée par une distribution temporelle normale alors qu'en 1992 et 1993, la pluie est tombée de manière très groupée, avec un fort déficit en début de saison.

A cause de la nature sporadique du régime des apports à la mare, l'estimation des volumes des crues est facilitée et est réalisée par une méthode graphique. Elle est critiquée par les lois de vidange établies au chapitre 5. Estimée à moins de 10 % du volume écoulé annuel, l'infiltration au cours du remplissage de la mare n'est pas prise en compte dans l'évaluation annuelle des volumes.

Pour les trois sites de référence et pour l'ensemble de la période d'observation, la lame écoulée à la mare représente respectivement 20,5, 9,6 et 13,9 % des précipitations pour les bassins de Bazanga (0.35 km²), de Wankama (2.15 km²) et de Sama Dey village (6.3 km²). Les volumes annuels correspondant sont respectivement de 24 500 m^3 (système de plateau), 90 000 m^3 (système de cours d'eau) et de 320 000 m^3 (système de vallée fermée).

Comparativement à la plupart des bassins sahéliens de même superficie, les coefficients de ruissellement sont inférieurs et traduisent la forte perméabilité des surfaces et du substrat sableux mais aussi la forte dégradation du système de drainage qui caractérise notamment le bassin versant de Wankama et d'une manière générale les systèmes endoréiques de vallée de la région.

Dans tous les cas, 30% des événements sont compris entre 0 et 2 mm. Pour les systèmes endoréiques de vallée, 50 % des événements sont inférieurs à 2 mm avec des crues exceptionnelles dépassant 10 mm (33,3 mm le 31/07/1992 à Sama Dey village, 16,3 mm le 22/08/1993 à Wankama et 15,6 mm le 7/7/1993 à Bazanga).

Etudié par une analyse statistique multi-variée, le comportement hydrologique du bassin de plateau (Bazanga) peut être expliqué à 90 % par la lame précipitée et l'intensité maximale de la précipitation. Le comportement des bassins sur substratum sableux des systèmes endoréiques de vallée apparaît plus complexe. Les systèmes endoréiques de vallée semblent très sensibles aux conditions d'humidité de surface en général. La prise en compte d'un indice des précipitations antérieures $IK_{0,15}$ permet d'expliquer, en partie, la forte variabilité des lames écoulées.

Pour le bassin de Wankama, l'examen détaillé de quelques crues révèle des discontinuités de fonctionnement pour de faibles pluies (< 20 mm, faible intensité) avec des conditions extrêmes d'humidité. Ces crues semblent correspondre à la réponse d'une petite partie du bassin versant pour des conditions de surface sèches ($IK_{0,15}$ moyen de 8,6 mm) et à l'ensemble du bassin versant pour des conditions humides

($IK_{0,15}$ moyen de 51,6 mm). Cet exemple illustre la dégradation de fonctionnement du bassin versant dûe en grande partie à l'existence de zones d'épandage dans le réseau hydrographique. Il semblerait que ce soient les conditions de surface et le volume de la crue qui déterminent la connexion hydraulique entre les différentes parties du bassin versant. Loin d'être une particularité de ce bassin, ces discontinuités au sein des réseaux hydrographiques sont très caractéristiques des systèmes endoréiques de vallée.

Le choix d'un modèle global pluie-lame écoulée (Mockus, 1969) utilisé pour prédire l'écoulement des bassins versants, est assez satisfaisant pour le bassin sur substrat latéritique. Il l'est nettement moins en ce qui concerne les systèmes endoréiques de vallée. En effet, il est nécessaire de distinguer les événements observés sous conditions sèches et sous conditions humides pour améliorer la prédétermination. Le calage des coefficients S du modèle pluie -lame écoulée du Soil Conservation Service (SCS) sur des bassins versants ayant des superficies de 0,35 à 15,7 km² montre qu'au delà de 15,7 km², l'écoulement à l'exutoire devient négligeable comparativement à la hauteur des précipitations.

CHAPITRE 9

L'INFILTRATION DANS LA MARE ET SA VARIABILITE TEMPORELLE

CHAPITRE 9

L'INFILTRATION DANS LA MARE ET SA VARIABILITE TEMPORELLE

Les bilans hydrologiques des systèmes endoréiques de référence et témoin sont établis à partir des volumes concentrés dans les mares. S'appuyant sur l'étude de la vidange des mares (chapitre 5), de l'estimation de l'évaporation (chapitre 6) et de la connaissance des bassins versants, la partition des lames écoulées est analysée à l'échelle de l'année puis de l'épisode de vidange.

Elle permet de mettre en évidence une concentration maximale des eaux d'écoulement par les mares de plateau et de comprendre la forte variabilité interannuelle des infiltrations annuelles qui caractérise les systèmes de vallée.

La prédétermination des lames infiltrées des systèmes endoréiques est envisagée à partir d'un modèle linéaire lame écoulée-lame infiltrée/évaporée.

Enfin, la validité des méthodes servant à calculer le bilan hydrologique est critiquée par des tests de sensibilité du bilan en fonction de différents estimateurs de l'évaporation, des écarts d'estimation à la superficie du bassin versant et en évaluant la consommation du bétail en fin de saison des pluies.

INTRODUCTION

La quantification de l'infiltration à partir de la mare que nous proposons est basée sur la partition des volumes d'écoulement transitant vers la mare. D'après les chapitres 2, 5 et 6 qui nous ont permis de reconnaître puis d'évaluer les principales composantes du bilan des mares temporaires, nous dressons un bilan simplifié des variations de stock de la mare qui se résument aux termes évaporation directe et infiltration.

Les autres composantes du bilan données dans les expressions (9), (10) et (11) sont negligées. Toutefois, on s'attardera sur la ponction du bétail qui s'avère être forte en fin de saison des pluies et début de saison sèche, tout particulièrement pour les mares de plateau.

L'analyse de l'infiltration à l'échelle annuelle puis à celle de l'épisode devrait nous permettre d'une part, d'évaluer l'importance des lames d'eau transitant vers la mare dans le bilan global des systèmes endoréiques, et d'autre part, de comprendre la variabilité interannuelle des infiltrations.

1 CALCUL DU BILAN HYDROLOGIQUE DE LA MARE

1.1 Au cours de la période d'apport

La variation de niveau enregistrée au cours de la période d'apport correspond au volume du ruissellement qui est pris égale à ΔV. Dans tous les cas, l'évaporation EV_d est négligée au cours du remplissage.

1.2 Au cours de la période de déstockage

Dans un intervalle de temps dt, la variation du niveau mesurée est définie par C1, la cote initiale ou cote au temps t_1 et la cote C2, cote finale ou cote au temps t_2. La relation hauteur-volume établie pour chacune des mares, nous permet de lier à une cote quelconque C_i, un volume stocké V_{ci}.

Durant l'intervalle de temps dt

$$V_{C1} - V_{C2} = \Delta V = VEV_d + VInf$$

$$avec\ VEVd = V_{ci} - V[C1 - L_{ev}]\ et\ Lev = dt\ .\ Lev_m \qquad (75)$$

ΔV : la variation de volume de la mare en m^3,

VInf : volume infiltré en m^3,

VEV_d : le volume évaporé en m^3,

L_{ev} : la lame évaporée en m,

$L_{ev\,m}$: la lame évaporée moyenne journalière en m,

V_{C1} et V_{C2} : volume à la cote C1 et C2 en m^3

et dt exprimé en fraction de jour.

Dans la mesure où Vevd est estimé à l'aide de (75), le volume infiltré se calcule par :

$$Vinf = \Delta V - Vevd \qquad (76)$$

1.3 Pas de calcul du bilan

1.3.1 Variations de niveau mesurées par limnigraphe

En décrue, ce calcul est appliqué à chaque variation de niveau qui est égale à 1 cm. Cela correspond à des intervalles dt allant de quelques dizaines de minutes à quelques jours pour le déstockage dans la zone colmatée.

1.3.2 Variations de niveau mesurées par échelle limnimétrique

Les intervalles dt correspondent à la fréquence de visite des observateurs. Elle était théoriquement de trois visites par semaine avec deux visites supplémentaires durant les décades pluvieuses des mois de juillet

et août. Selon le régime de la mare, les variations de niveau correspondantes peuvent être de un à plusieurs dizaines de centimètres.

1.4 Bilan de la mare rapporté au bassin versant

De manière à évaluer l'importance des volumes concentrés et perdus dans la mare par rapport aux précipitations et pour rendre comparables les bilans des différents systèmes endoréiques, les termes du bilan hydrologique calculés en volume ci-dessus sont transformés en lame d'eau (rapport du volume de l'écoulement Lr; de l'évaporation Lev ou de l'infiltration Li à la superficie du bassin S). A partir de cette transformation, nous calculons trois coefficients :

- **le coefficient de ruissellement** qui correspond au **rapport de la lame écoulée vers la mare à la lame totale précipitée Lr/Lp**, noté Kru (en % de Lp)
- **le coefficient d'infiltration** qui correspond au **rapport de la lame infiltrée dans la mare à la lame totale précipitée sur le bassin versant Li/Lp**, noté Kri (en % de Lp),
- **le coefficient d'évaporation** qui correspond au **rapport de la lame évaporée de la mare à la lame totale précipitée sur le bassin versant Lev/Lp**, noté Kre (en % deLp),

Tableau 44 : récapitulatif du bilan hydrologique à partir de l'ensemble des mares étudiées. Les valeurs volumiques des différents termes sont rapportés à une lame d'eau sur le bassin versant. PL : plateau latéritique ; CE : cours d'eau ; VF : vallée fermée.

nom de la mare	superficie BV	situation	lame précipitée * Lp	apports Lr	variation de stock ΔS	évaporation Lev	infiltration Li	coefficient de ruissellement Kru	coefficient d'infiltration Kri
	km²		mm	mm	mm	mm	mm	% de la lame précipitée	
						ANNEE 1991			
Bazanga	0,35	PL	(150,5)	34,8	37,2	11,6	25,6	23,1	17,0
Wankama	2,15	CE	(351,5)	10,4	10,6	1,1	9,5	3,0	2,7
Yélouma	27,6	VF	(385,5)	0,2	0,2	0,1	0,1	0,01	0,01
						ANNEE 1992			
Bazanga	0,35	PL	5042	97,4	98,7	18,3	80,4	19,3	15,9
Kampa Zarma	0,24	PL	443,2	86,9	86,9	36,8	50,1	19,6	11,3
Poura	0,15	PL	590,6	134,8	134,3	41,1	93,3	22,8	15,8
Sama Dev plateau	0,25	PL	489,2	168,3	168,3	33,1	135,2	34,4	27,6
Sulfev	0,1	PL	446,3	125,9	125,9	26,8	99,1	28,2	22,2
Wankama	2,15	CE	463,8	67,2	67,0	3,3	63,6	14,5	13,7
Banizoumbou	0,54	CE	397,5	59,2	57,7	6,6	51,0	14,9	12,8
Maourev Kouara	2,7	CE	5340	53,	53,3	4,6	48,6	10,0	9,1
Sama Dev village	6,3	VF	(314,7)	71,5	71,5	0,8	70,7	22,7	22,5
Karbanga	0,7	VF	506,6	96,8	95,3	8,5	86,8	19,1	17,1
Massi Koubou	1,1	VF	467,6	155,9	155,9	7,2	148,6	33,3	31,8
Yélouma	27,6	VF	414,7	0,5	0,5	0,1	0,4	0,1	0,1
						ANNEE 1993			
Bazanga	0,35	PL	(345,0)	72,9	66,2	9,4	56,7	21,1	16,4
Kampa Zarma	0,24	PL	522,5	104,3	105,5	36,7	688	20,0	13,2
Poura	0,15	PL	516,0	112,2	111,8	27,1	84,7	21,7	16,4
Sama Dev plateau	0,25	PL	395,0	138,4	141,0	27,4	113,6	35,0	28,8
Sulfev	0,1	PL	455,1	116,1	147,9	34,4	113,5	25,5	24,9
Wankama	2,15	CE	463,0	44,7	39,6	2,1	37,5	9,6	8,1
Maourev Kouara	0,54	CE	481,0	55,4	55,1	4,7	50,4	11,5	10,5
Banizoumbou	2,7	CE	397,0	78,9	78,2	8,5	69,7	19,9	17,6
Sama Dev village	6,3	VF	404,5	28,8	28,8	0,4	28,4	7,1	7,0
Karbanga	0,7	VF	374,0	46,1	45,7	8,8	36,9	12,3	9,9
Massi Koubou	1,1	VF	363,0	86,2	86,2	4,,6	81,6	23,7	22,5

* concernent le total pluviométrique des événements hydrologiques observés. Ce total est donc égal au cumul annuel moins le total des périodes en lacunes.

() année avec d'importantes lacunes (voir chapitre 3 section 2)

2 LAME INFILTREE ANNUELLE

Le bilan hydrologique de l'ensemble des mares étudiées est présenté dans le tableau 44. Il est accompagné des coefficients de ruissellement et d'infiltration.

Ce bilan concerne 6 systèmes endoréiques de plateau ayant des superficies faibles allant de 0,1 à 0,35 km², 3 systèmes endoréiques de vallée compris entre 0,5 à 27 km² et 4 systèmes de vallée fermée d'une superficie comprise entre 0,7 à 27,6 km².

Les lames précipitées totales annuelles sont très comparables d'un bassin versant à un autre et d'une année sur l'autre. Mise à part l'année 1991 au cours de laquelle le bilan a été établi sur une faible partie de l'année (Bazanga entre autre), les bilans établis sur les années 1992 et 1993 concernent la presque totalité de la lame précipitée annuelle, exception faite pour les mares où sont survenus des incidents techniques (Sama Dey village et Wankama en 1992 et Bazanga en 1993).

2.1 Importance du transit vers la mare

A cause des états de surface de leur bassin versant et des faibles superficies qu'elles drainent, les mares de plateau concentrent un pourcentage plus important de la lame précipitée annuelle que les mares de vallée. Les coefficients de ruissellement des systèmes de plateau sont compris entre 19,3 et 25 % avec une faible variabilité d'un système à un autre et d'une année à l'autre. La moyenne des coefficients de ruissellement est de 24,6 % avec un coefficient de variation de 0,23.

Concernant des bassins versants plus étendus et de superficies variables (de 0,5 à 27,6 km²) installés sur des matériaux très perméables, les mares des systèmes endoréiques de vallée (dans les anciens cours d'eau et les vallées vérouillées) concentrent un pourcentage très variable des précipitations selon l'année, la superficie du bassin et les états de surface. Ainsi, les coefficients de ruissellement annuels sont compris entre 0,1 (système de Yélouma : 27,6 km²) et 33,3 % (Massi Koubou). Le coefficient de variation de Kri est de 0,7 sur l'ensemble des observations des systèmes de vallée, bien supérieur à celui des mares de plateau.

2.2 Relation entre le coefficient d'infiltration et le coefficient de ruissellement

Le coefficient d'infiltration annuel à la mare est directement lié au coefficient de ruissellement annuel (figure 92). Cette relation peut être décrite de manière satisfaisante par une relation linéaire, de pente équivalente pour les deux types de systèmes endoréiques, mais éloignée de la bissectrice en ce qui concerne les systèmes de plateau. En effet, le coefficient d'infiltration correspond en moyenne à 92 % du coefficient de ruissellement pour les systèmes de vallée et à seulement 76 % pour les systèmes de plateau. Le rapport moyen entre les deux coefficients est en relation avec la dynamique de vidange des mares.

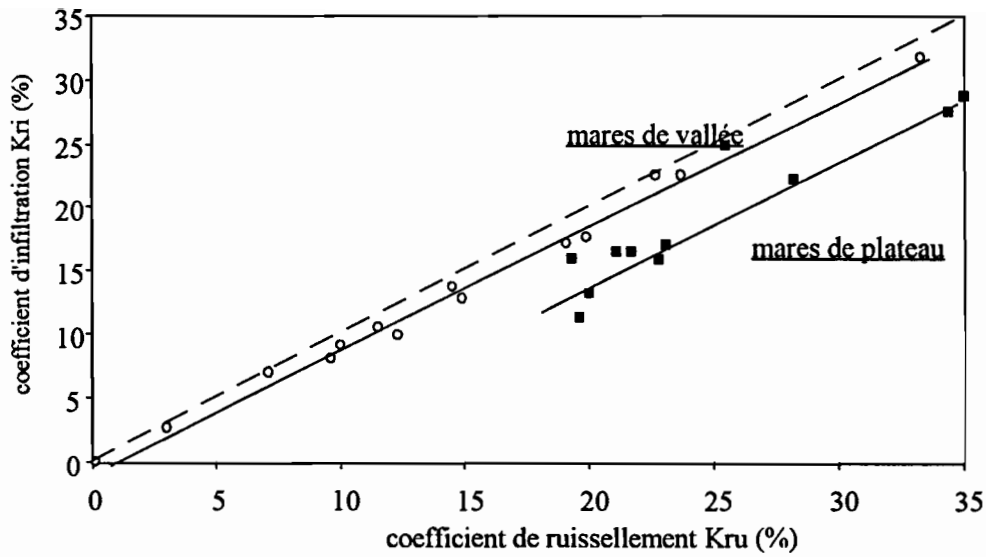


Figure 92: relation entre les coefficients de ruissellement Kru et les coefficients d'infiltration Kri pour l'ensemble des mares étudiées

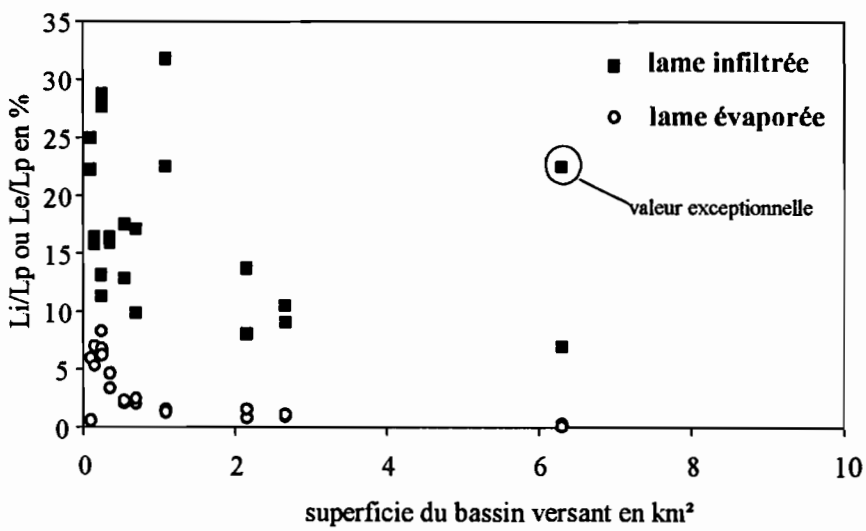


Figure 93 : coefficient d'infiltration et d'évaporation des mares en fonction de la superficie du système endoréique

2.3 Variation du coefficient d'infiltration et d'évaporation en fonction de la superficie

Comme il a été montré dans le chapitre 8, le coefficient de ruissellement varie de manière inversement proportionnelle à la superficie. La figure 93 illustre la relation existant entre la superficie des systèmes étudiés et les valeurs des coefficients d'infiltration et d'évaporation. On remarque que la valeur des coefficients d'infiltration atteint 30 à 35 % pour les faibles superficies et tend rapidement vers des valeurs inférieures à 10 % (Sama Dey village : 6,3 km²) pour devenir proche de zéro pour des systèmes de vallée

comme Yélouma (27,6 km² non représentée dans la figure 93). Les deux points en dehors de la relation (figure 93) correspondent aux valeurs de Sama Dey village et de Massi Koubou de l'année 1992 où furent enregistrées des crues exceptionnelles. L'évolution du coefficient d'infiltration en fonction de la superficie suit la même relation que l'on peut attendre pour les coefficients de ruissellement.

En revanche, l'évolution des coefficients d'évaporation semble plus difficilement interprétable. Les variations du coefficient d'évaporation avec la superficie ne sont sensibles que dans les systèmes de plateaux (superficie entre 0,1 et 1 km²). Elles sont indécelables pour les superficies supérieures à 1 km².

3 VARIABILITE INTERANNUELLE DE LA LAME INFILTREE

Les bilans établis sur les années 1991 à 1993 permettent de souligner la forte variabilité de la lame infiltrée. Comme le montre le diagramme sur la figure 94, la variabilité interannuelle est en général nettement plus grande pour les systèmes de vallée, comme Wankama ou Sama Dey village, où l'écart sur les trois années est respectivement de 11 % et de 20 %. Comparativement aux faibles valeurs des coefficients d'infiltration observés dans les systèmes vallées, ces variations représentent plus de 100% d'écart par rapport aux minima observés.

Les variations interannuelles observées dans les systèmes de plateau sont inférieures à 5 % pour des valeurs moyennes proches de 20 %, soit une variabilité relative inférieure à 25 %.

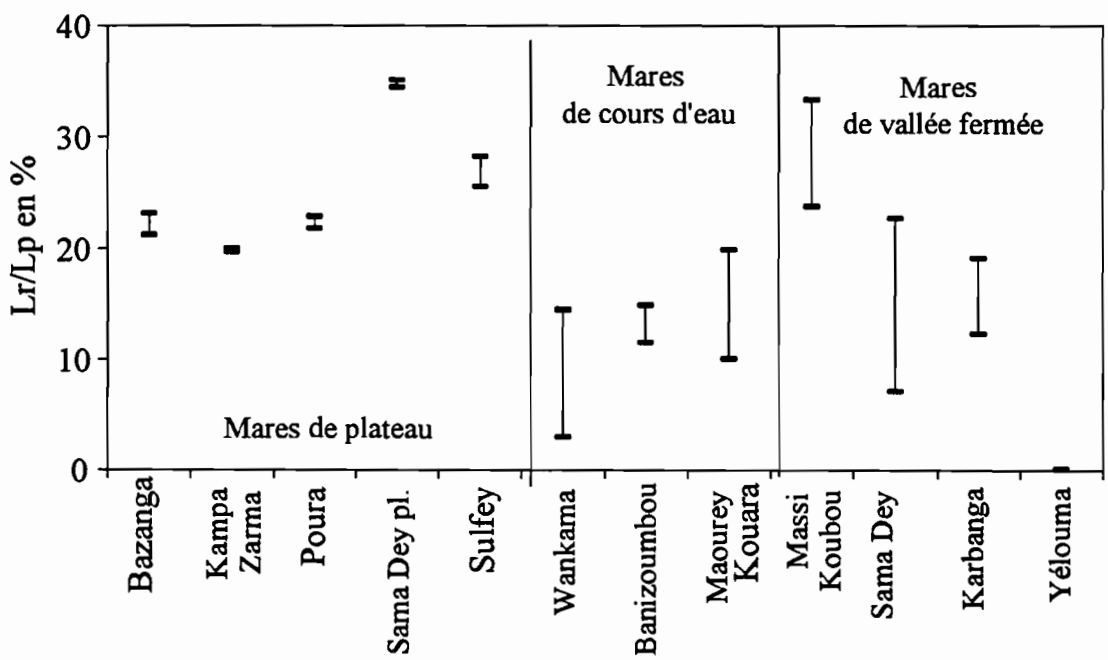


Figure 94 : écarts maximaux observés des coefficients de ruissellement Kru et d'infiltration Kri des systèmes endoréiques de référence et témoin

3.1 Evolution des lames infiltrées au cours de l'année

Les systèmes de plateau

Comme le montre la figure 95, l'infiltration se réalise de manière régulière tout au long de l'année avec une influence minimale de la distribution des précipitations. En effet, son évolution est semblable à celle des précipitations. Par un comportement hydrodynamique du bassin versant qui est principalement lié à la hauteur de la pluie et une infiltration dans la mare peu variable quel que soit le niveau de remplisage, le système endoréique de Bazanga offre une faible variabilité interannuelle de l'infiltration.

Le comportement des systèmes de vallée, comme celui de Wankama ou Sama Dey village, se révèle fortement sensible à la distribution intra saisonnière des événements pluvieux. Un exemple est pris en comparant la réponse du système endoréique de Wankama. Cet exemple est illustré par les diagrammes des cumuls des lames précipitées-lames infiltrées des années 1992 et 1993 (figure 96) où le coefficient d'infiltration était de 13,7 % en 1992 et de 8,1 % en 1993 soit près de 50 % de variation entre les deux années.

L'année 1992 a été essentiellement marquée par un fort déficit pluviométrique en début de saison puis un période exceptionnellement pluvieuse entre le 18 et le 31 juillet (32 % du cumul annuel). 62 % du cumul annuel des lames infiltrées a été concentré dans cet épisode.

Avec un cumul annuel de 507 mm en 1993 (568 mm en 1992) mais une distribution nettement plus régulière autant par la hauteur d'eau des événements que par leur répartition sur les mois de juin à octobre, le cumul annuel des lames infiltrées est nettement plus faible avec un coefficient de 8,1 %. Pour cette année, 70 % de la lame infiltrée annuelle a été apportée par deux événements (22 août et 3 septembre) qui représentent 25 % du cumul pluviométrique annuel. C'est donc à la faveur de pluies ou de courts épisodes pluvieux à fort total que le système de Wankama présente un coefficient d'infiltration annuel maximal.

L'exemple de la série d'événements du mois de juin à juillet 1993 est démonstrative. Pour un total de 193,5 mm de pluie réparti sur 8 pluies (38 % du total annuel), la lame infiltrée totale a été de seulement 5 mm soit 16 % du total annuel.

La variation du coefficient d'infiltration à la mare de Sama Dey village (année 1992) est tout autant significative de la variabilité du bilan des systèmes de vallée. En effet, les événements du 31 juillet 1992 (pluie journalière de 57 mm) et du 30 août 1992 (pluie journalière de 47 mm en 2 épisodes) sur le bassin versant de Sama Dey village ont provoqué une infiltration égale à 50 mm soit 70 % du cumul infiltré annuel.

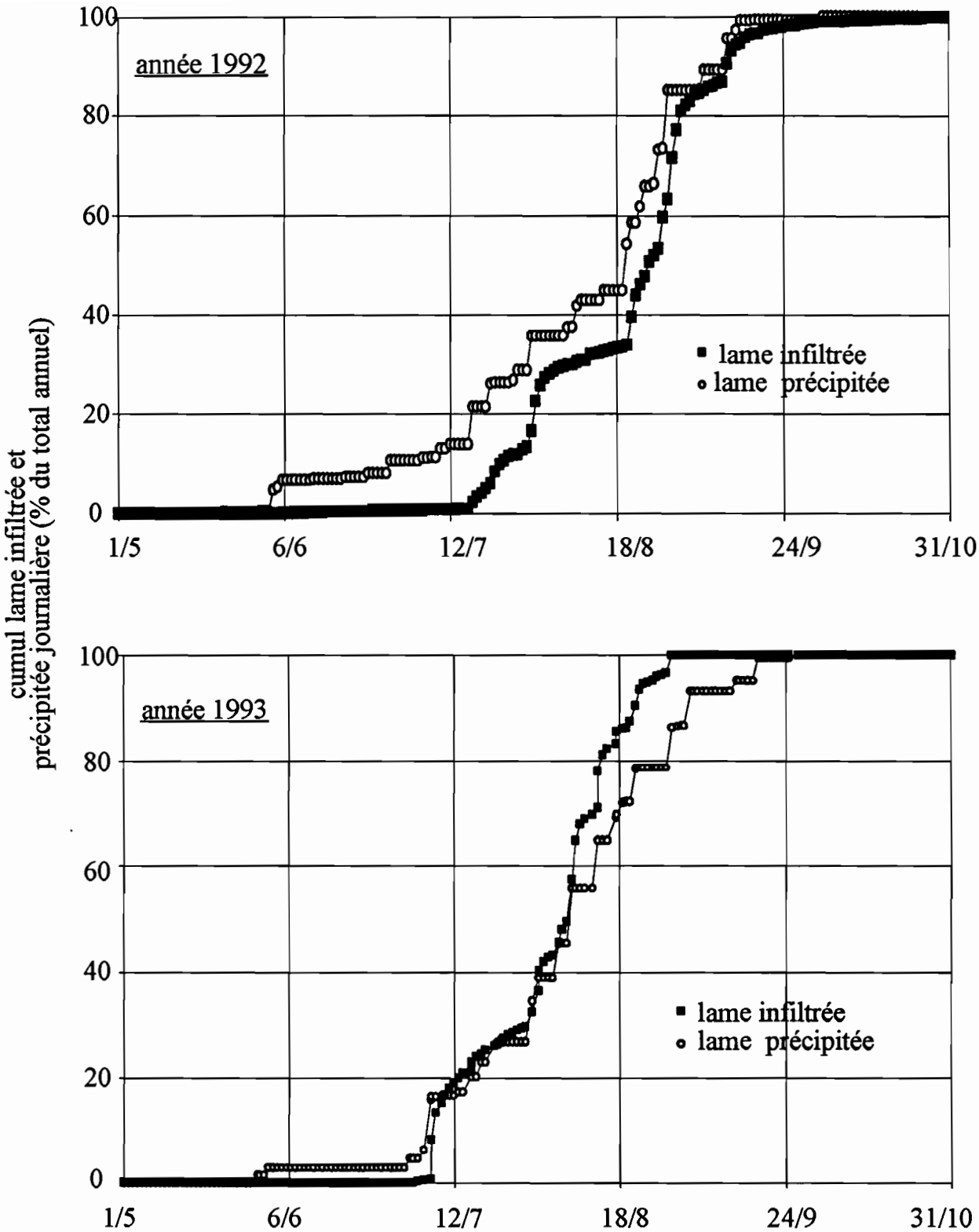


Figure 95 : évolution des lames journalières précipitées et infiltrées pour les années 1992 et 1993 pour le système endoréique de Bazanga

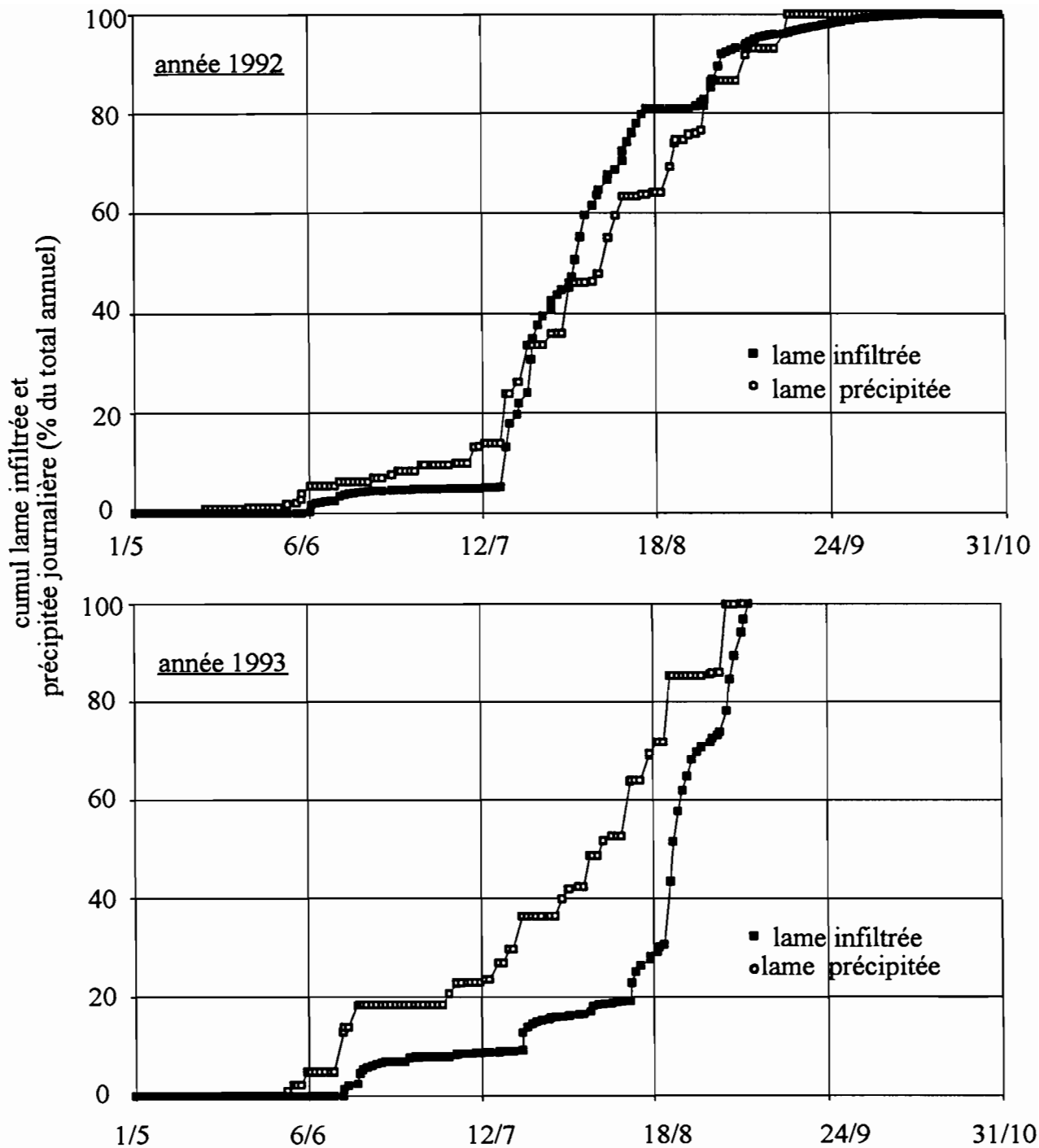


Figure 96 : évolution des lames journalières précipitées et infiltrées pour les années 1992 et 1993 pour le système endoréique de Wankama

3.2 bilan hydrologique de l'épisode de vidange : la relation hauteur d'eau initiale-variation de stock par infiltration et par évaporation

Les deux principaux termes sont calculés pour les épisodes de vidange (annexe 8 tableau A81, A82 et A83). Nous avons reportés en figure 97 (en pourcentage des variations de stock par épisode ΔS) les variations de stock par infiltration et par évaporation en fonction de la hauteur initiale des épisodes de vidange. Ces relations traduisent, de manière quantitative, les répercussions du contexte pédologique et morphologique du lit de la mare sur le bilan des stocks d'eau. D'après les relations de la figure 97, on constate que les variations de stock par infiltration sont peu dépendantes de la hauteur initiale de l'épisode pour les mares de vallée. La partition des stocks se réalise d'une tout autre manière dès lors que la hauteur initiale de l'épisode est proche du seuil de perméabilité (mare de Bazanga et Wankama).

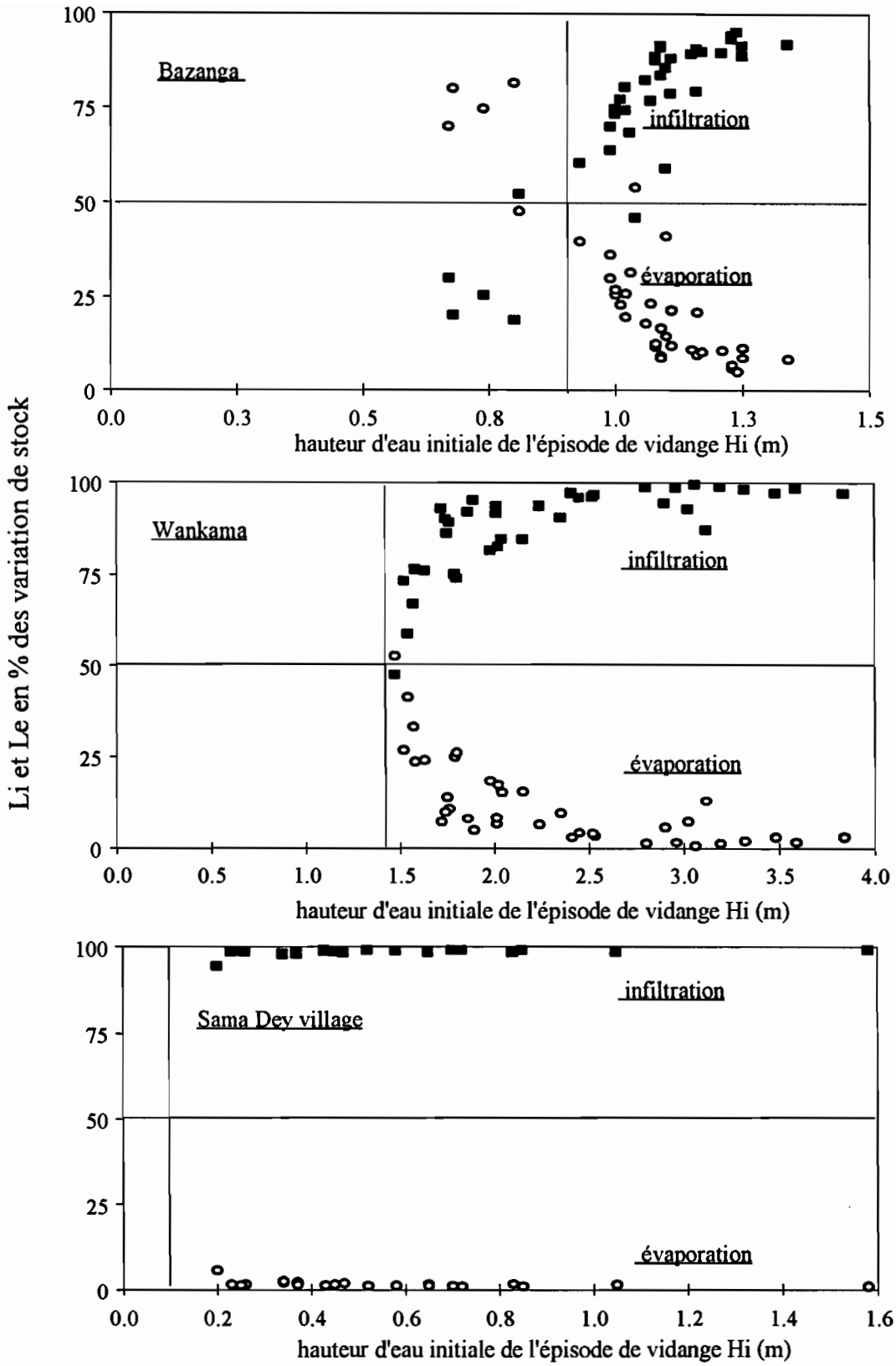


Figure 97 : relation hauteur initiale de l'épisode de vidange-variation de stock par infiltration et par évaporation de la mare de Bazanga, Wankama et Sama Dey village

4 PREDETERMINATION DES LAMES INFILTREES ET EVAPOREES

En complément de la prédétermination de la lame écoulée à la mare par un modéle pluie-lame écoulée, une relation linéaire lame écoulée - lame infiltrée/évaporée peut être établie. L'association de ces deux modèles permet d'évaluer la lame infiltrée à la mare en absence de mesures limnimétriques.

4.1 relation lame écoulée-lame infiltrée/évaporée des mares de référence

La détermination des lames infiltrée et évaporée à la mare par un modèle linéaire lame écoulée-lame infiltrée/évaporée est présentée en figure 98 pour les mares de référence. Les valeurs utilisées pour établir ces relations sont tirées de tous les épisodes de vidange de la saison des pluies. Les variations de stock de la mare sont rapportées à une lame d'eau sur le bassin versant.

La relation lame écoulée -lame infiltrée/évaporée est de la forme:

$$Li=A\ Lr \text{ et}$$

$$Lev = B\ Lr$$

avec

Li : lame infiltrée en mm

Lev : lame évaporée en mm

Lr : lame écoulée en mm

A : coefficient ajusté

B: 1-A

Les valeurs de A sont respectivement de 0,88, 0,97 et de 0,98 pour Bazanga, Wankama et Sama Dey village. Les coefficients de détermination obtenus pour ces ajustements statistiques sont supérieurs à 98 %.

<u>commentaires</u>

Les coefficients A laissent apparaître le pourcentage de la lame écoulée qui est vidangée par infiltration. Ainsi, on remarque que la mare de Bazanga a un coefficient de partition de la lame écoulée légèrement inférieur à ceux des mares en milieu sableux. Cela correspond effectivement aux conditions de déstockage qui sont moins favorables au processus d'infiltration et qui par l'exposition de la mare favorise une évaporation directe maximale (chapitre 5 et 6). D'autre part, il est intéressant de constater que les coefficients obtenus pour les deux mares de vallée sont très proches. En terme de comportement hydrologique du système endoréique, il semble que la zone colmatée de la mare de Wankama ne joue qu'un rôle négligeable car la partition des volumes écoulés dans la mare se réalise de la même manière qu'à la mare de Sama Dey village (absence de zone colmatée).

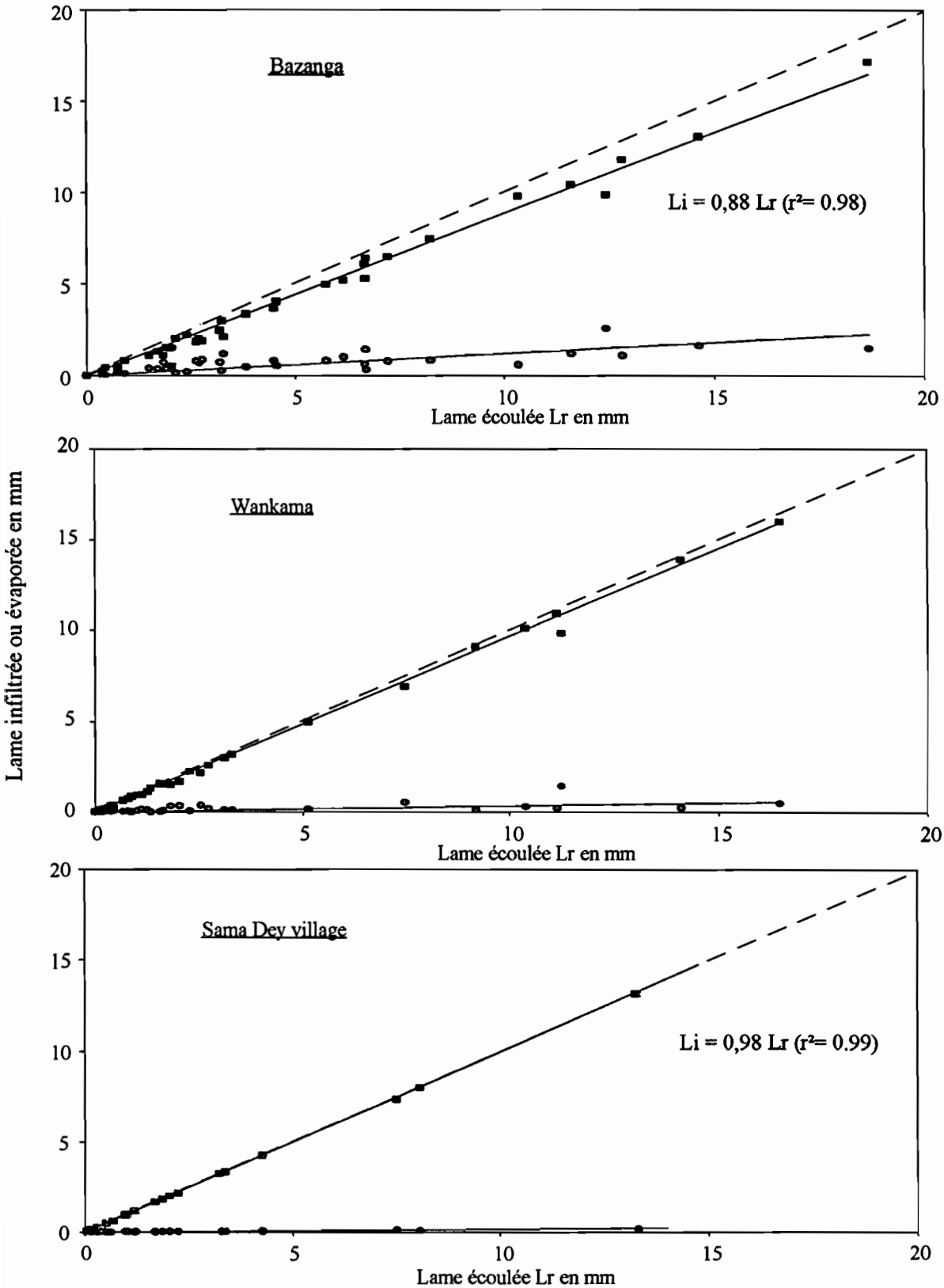


Figure 98 : relation lame écoulée -lame infiltrée/évaporée des mares de référence

4.2 relation lame écoulée-lame infiltrée/évaporée des mares témoins

D'une qualité légèrement altérée par le suivi limnimétrique qui n'a permis qu'une estimation approximative des volumes des apports (voir chapitre 3 section 2 et 3), ces relations permettent de juger à la fois de la disparité de comportement des mares témoins pour chacune des situations géomorphologiques identifiées et de juger de la représentativité des comportements des sites de référence. Les relations lame écoulée-lame infiltrée/évaporée des sites témoins pour les trois situations géomorphologiques sont présentées dans la figure 99. Le tableau 45 compare les coefficients des trois modèles ajustés avec ceux des sites de référence.

Tableau 45 : coefficients A ajustés pour les sites de référence et pour l'ensemble des sites témoins de chacune des situations géomorphologiques.

système endoréique de plateau	
site de référence	sites témoins (nb=4)
0,88	0,81 (r^2=0,967)
système endoréique de vallée (mare installée dans un lit de cours d'eau)	
site de référence	sites témoins (nb=2)
0,97	0,94 (r^2=0,998)
système endoréique de vallée fermée	
site de référence	sites témoins (nb=3)
0,98	0,95 (r^2=0,997)

Commentaires

Dans tous les cas les relations Lr/Li et Lr/Lev restent très étroites avec des coefficients de détermination supérieurs à 96 %. Pour les mares de plateau, le coefficient A de partition est légèrement plus faible que celui ajusté au site de référence de Bazanga. La valeur du coéfficient A est sensiblement plus faible. On peut trouver une explication dans la nature quelque peu différente du lit des mares de Sama Dey plateau, Poura ou Kampa Zarma. En effet, l'affleurement de la cuirasse sous le lit de ces mares ainsi que leur faible encaissement sont à la fois à l'origine d'une perméabilité moindre et d'une plus grande exposition à l'évaporation (faible lame d'eau sur une surface plus étendue).

En ce qui concerne les deux types de systèmes de vallée, les coefficients A sont légèrement inférieurs à ceux ajustés aux sites de référence mais restent très proches. La disparité de comportement semble plus faible entre les différents systèmes (coefficient de détermination de 99 %). S'il est vrai que l'échantillon est plus faible que celui choisi pour les systèmes de plateau, l'influence des contextes pédologiques et morphologiques des mares sur matériaux sableux est nécessairement atténuée par la forte prépondérance des processus d'infiltration au sein de ces matériaux.

Par souci de robustesse et au vu des valeurs des coefficients de partition A, il semble intéressant de caractériser le comportement des systèmes de vallée par une relation lame écoulée -lame infiltrée/évaporée

unique. Un nouvel ajustement de l'ensemble des valeurs permet de calculer un coefficient A égal à 0,94 (coefficient de détermination 99 %). Cependant, il faudra garder à l'esprit que la dynamique de vidange des deux types de mare de vallée est bien distincte (voir chapitre 5).

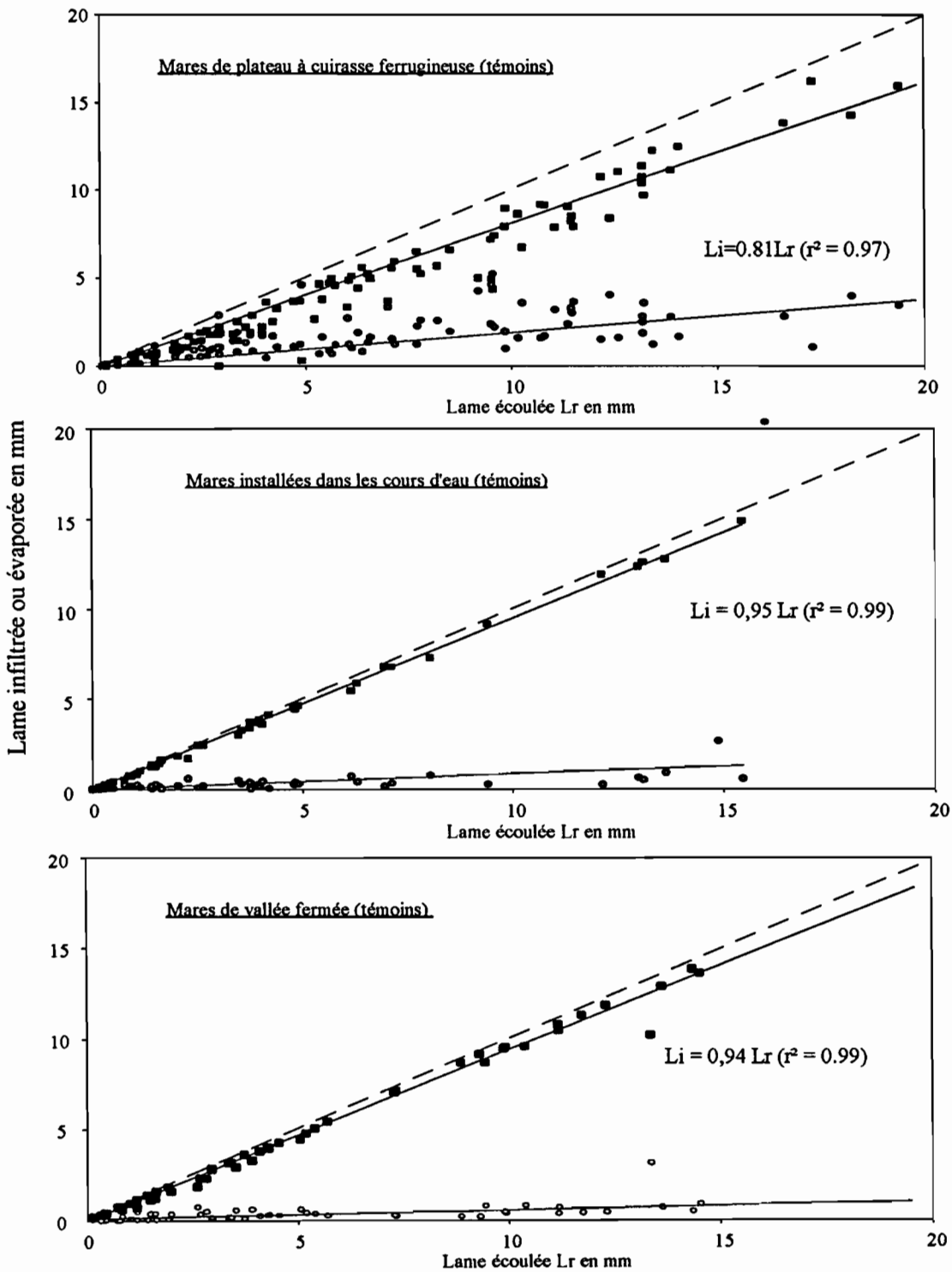


Figure 99 : relation lame écoulée -lame infiltrée/évaporée des mares de référence

5 SENSIBILITE DU BILAN HYDROLOGIQUE

5.1 pour différents estimateurs de l'évaporation

5.1.1 A l'échelle annuelle

Afin de tester la sensibilité du bilan hydrique à l'estimateur de l'évaporation choisi, nous avons procédé au calcul du bilan hydrologique des mares ayant servi à obtenir les relations empiriques d'évaporation (chapitre 6 section 2.6). Ce calcul a été réalisé en estimant d'une part, l'évaporation par la valeur journalière moyenne (moyenne mensuelle) du bac de classe A (station Niamey - Aéroport), et d'autre part, par la valeur journalière moyenne corrigée par la relation (62) dont les coefficients K ont été ajustés sur les mares de Bazanga et Wankama. Ce test concerne le bilan hydrologique de l'année 1992.

Rapportés à la lame totale écoulée sur chaque bassin versant, les volumes évaporés et infiltrés calculés sont donnés dans les tableaux 46 et 47. Pour la mare de vallée, Wankama, le terme évaporation reste inférieur à 10 %. Le volume d'eau évaporé reste tellement faible que même l'estimation la plus grossière de l'évaporation permet de calculer un bilan correct.

Dans le cas de la mare de plateau (Bazanga) le bilan hydrique est nettement plus sensible à l'estimateur de l'évaporation choisi. Pour 1992, le bilan calculé à partir de l'évaporation du bac de classe A non corrigé entraîne une surestimation de l'évaporation égale à 5,6 % des variations de stock de la mare.

Tableaux 46 et 47 : comparaison du bilan hydrique de 1992 pour différents estimateurs de l'évaporation

Mare de Bazanga - année 1992

	partition de la lame écoulée				
méthode d'estimation de l'évaporation	lame évaporée	lame infiltrée	% évaporation	% infiltration	écart à la méthode isotopique
	mm de lame ruissellée				% des ΔS
bac classe A corrigé / isotopes	18,3	80,4	18,5	81,5	-
bac classe A	24,0	75,9	24,1	75,9	5,6

Mare de Wankama - année 1992

	partition de la lame écoulée				
méthode d'estimation de l'évaporation	lame évaporée	lame infiltrée	% évaporation	% infiltration	écart à la méthode isotopique
	mm		%		% des ΔS
bac classe A corrigé / isotopes	3,3	63,6	5,0	95,0	-
bac classe A	3,8	63,2	5,7	94,3	0,7

5.1.2 A l'échelle de l'épisode

Le bilan hydrologique des deux mares est calculé pour chaque épisode de l'année 1992 avec deux estimateurs de l'évaporation moyenne journalière, utilisés précédemment :

- la lame journalière moyenne du bac de classe A corrigée par le coefficient moyen K calé par la méthode isotopique (bilan R de référence)
- la lame journalière moyenne du bac de classe A (bilan A)

La comparaison des résultats des deux bilans est réalisée à partir d'un indice égal à :

$$I_b = \frac{Vevap_{(bilan\,A)} - Vevap_{(bilan\,R)}}{Vevap_{(bilanR)} + V\inf_{(bilanR)}} \times 100 \text{ pour un épisode de vidange donné}$$

avec

I_b : indice de sensibilité en % de la variation de stock pour un épisode de vidange

$V_{evap(bilanR)}$: volume évaporé en m^3 calculé à partir de la lame moyenne journalière du bac A corrigée

$V_{evap(bilan\ A)}$: volume évaporé en m^3 calculé à partir de la lame moyenne journalière du bac A non corrigée

$V_{inf(bilanR)}$: volume infiltré calculé par différence de la variation de stock par évaporation Vevap (bilanR).

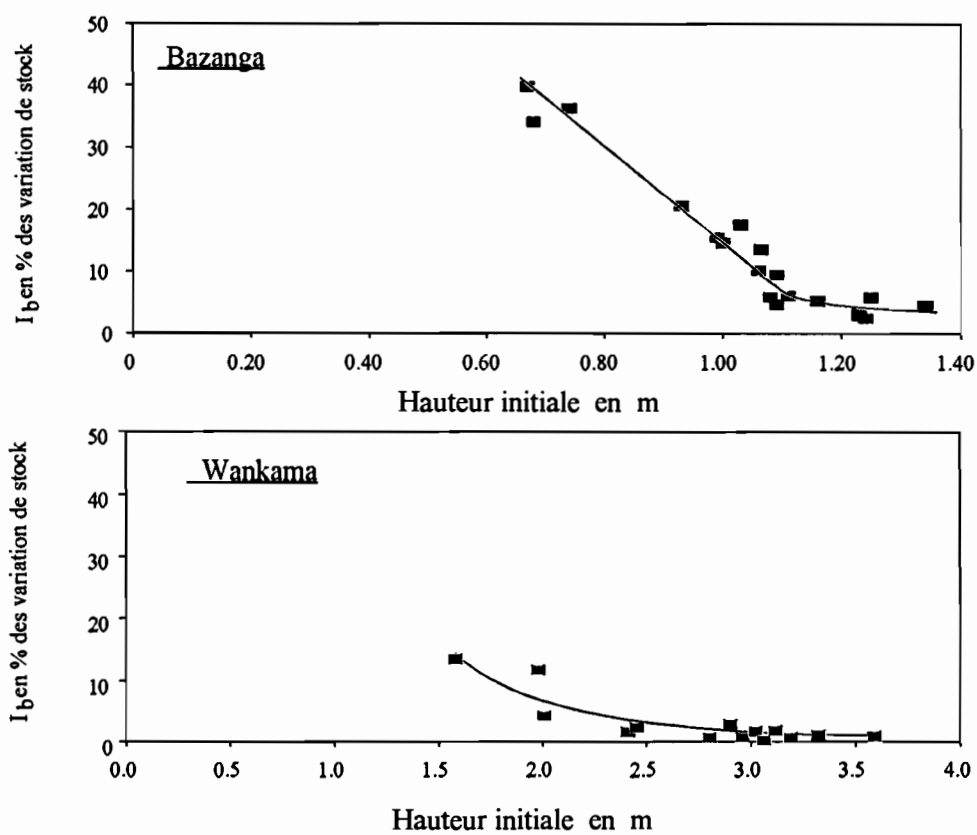


Figure 100 : évolution du coefficient I_b d'erreur d'estimation de l'évaporation en fonction de la hauteur d'eau initiale de l'épisode de vidange

Comme cela a été précisé dans la caractérisation du fonctionnement hydrologique de la mare, l'importance du processus d'évaporation est fortement liée à la hauteur d'eau dans la mare. Nous analysons la variation de l'indice i_b en fonction de la hauteur initiale de l'épisode à partir de la figure 100.

Pour la mare de Plateau (Bazanga), on constate que les écarts à la méthode isotopique s'amplifient pour atteindre 40 % pour les faibles hauteurs d'eau (< 0,6 m). Néanmoins, ces écarts restent inférieurs ou proches de 10% dans la gamme de hauteurs d'eau qui correspond à la majorité des épisodes de la saison des pluies : 1,0 à 1,35 m . Ces niveaux correspondent à une vidange en régime rapide (évaporation < 15%).

Pour la mare de vallée (Wankama), les écarts à la méthode isotopique (figure 100) sont sensiblement égaux et inférieurs à 5% entre les hauteurs initiales allant de 2,0 à 3,3 m (majorité des épisodes). A ces niveaux, l'évaporation représente à peine 10% du bilan, la vidange se fait par un régime rapide.

On peut conclure qu'en ce qui concerne les mares de bas-fonds, les conséquences de l'imprécision de l'évaluation de l'évaporation sur le calcul du bilan hydrique annuel sont minimes. A l'échelle de l'épisode, elles sont à peine plus significatives. Par contre, pour les mares de plateau, il apparaît que le choix de l'estimateur peut entraîner des évaluations de l'évaporation fortement surestimées et modifier notablement le bilan hydrologique à l'échelle de l'épisode dans le cas d'une vidange lente (hauteurs d'eau sous le seuil de

perméabilité)

5.2 A l'estimation de la superficie du bassin versant

Comme on l'a évoqué à plusieurs reprises dans ce mémoire, le contexte géomorphologique et climatique sont à l'origine d'un paysage au relief peu élevé où le modelé de surface se caractérise souvent par un fort micro relief. Les pentes générales des impluviums des mares avoisinent souvent 1 % pour les systèmes endoréiques de plateau et sont légèrement supérieures pour les systèmes endoréiques de vallée. D'autre part, les exutoires peuvent se déplacer à l'occasion de crues exceptionnelles et les lignes de crêtes, au demeurant difficiles à percevoir, peuvent également évoluer lors de pluies exceptionnellement devastrices. Dans ce contexte naturel particulièrement évolutif, la délimitation d'un bassin versant peut être sujette à critique et son évaluation relève souvent de l'exploit et de l'intuition.

Si l'utilisation de différents outils d'appréhension du relief tels que les levés topographiques, les vues aériennes et les parcours pédestres répétés des bassins pendant les averses nous ont permis de localiser les limites des bassins versants des mares actuelles, il a paru intéressant de remettre en cause ces limites et d'apprécier l'importance d'une erreur d'évaluation des surfaces dans les bilans hydrologiques dressés.

Pour cela, nous avons choisis de calculer les écarts aux coefficients d'infiltration calculés pour l'année 1992 en fonction d'une erreur relative croissante de la superficie du bassin versant

Ce calcul réalisé pour les trois bassins de référence est présenté sur la figure 101. On constate qu'une erreur d'estimation de la surface du bassin versant entraîne une erreur d'estimation du coefficient d'infiltration à peu près équivalente. Elle devient légérement inférieure à l'écart à la superficie estimée à partir de 25 %. En se basant sur les mesures de 1992, les bassins de vallée apparaissent plus sensibles aux écarts d'estimation de la superficie du bassin versant.

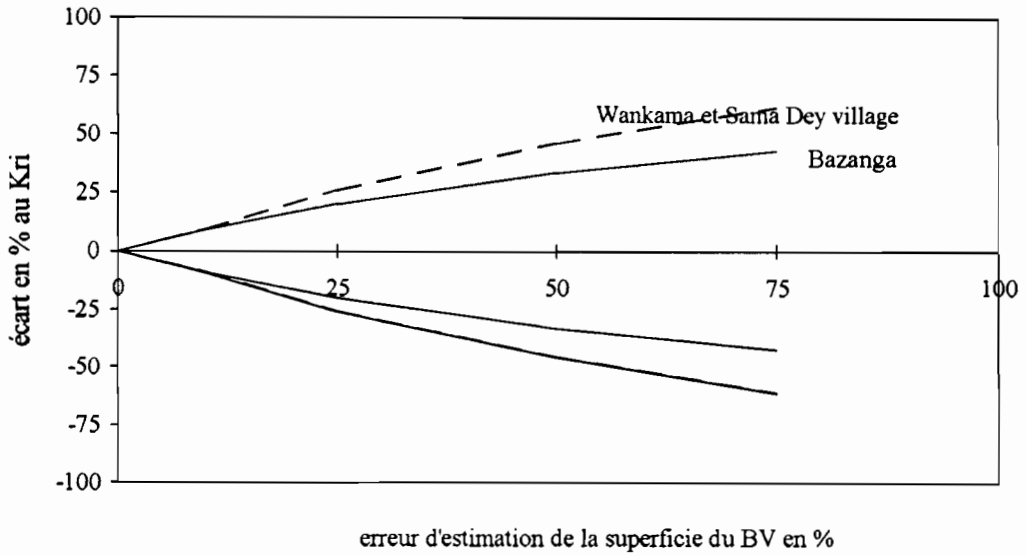


Figure 101 : écart au coefficient d'infiltration Kri calculé en fonction d'une erreur d'estimation de la superficie du bassin versant.

5.3 La consommation du bétail

A la fin de la saison des pluies (septembre ou octobre), la zone d'étude est le lieu de passage d'un grand nombre de troupeaux de bovins, caprins, ovins et camelidés qui transhument du Nigeria vers le Mali. Les mares constituent les uniques points d'eau facilement accessibles à ces troupeaux. Ils viennent s'associer aux troupeaux locaux qui s'alimentent en permanence dans les mares en saison des pluies. Si la charge en bétail par mare est assez faible au cours de la saison des pluies (le niveau des mares est proche du maximum et le nombre de mares à cette époque élevé) le début de la saison sèche voit disparaître un grand nombre de petites mares pour n'en laisser que quelques unes proches de l'assèchement. Durant cette période, la consommation du bétail peut devenir une des principales sources de tarissement de la mare à une époque où le niveau est souvent en dessous du seuil de perméabilité et où le processus d'évaporation est prépondérant.

Afin d'estimer la charge du bétail sur les mares de la zone d'étude et évaluer l'impact de la consommation en eau au cours de l'année, une enquête a été menée sur 12 mares incluant les mares de référence et les mares témoins (Soumana, 1992). Effectuée en octobre et novembre 1992, cette enquête a consisté en une permanence d'une journée sur chaque mare. Le comptage du bétail venant s'abreuver était complété par un questionnaire posé au berger.

Cela a permis, d'une part, de contrôler l'origine des troupeaux venant s'alimenter et leur fréquence de venue, et d'autre part, de vérifier qu'une grande partie des mares de vallée était délaissée par les bergers. Ce fait semble fortement lié à la présence de trous dans le lit des mares (carrière d'exploitation du matériau argileux en saison sèche) ou encore à la faible durée de résidence des eaux comme c'est le cas à la mare de Sama Dey village.

A partir de ces comptages et enquêtes, nous avons établi une estimation de la consommation journalière en eau du bétail pour la période concernant la fin de la saison des pluies et le début de la saison sèche. Cette estimation journalière s'appuie sur diverses études des besoins en eau du bétail en région tropicale dont celles de Gadelle (1989) et D'At de Saint Foulc (1986). Nous donnons et comparons dans le tableau 48, les trois projections des ponctions journalières du bétail à chacune des mares. selon la référence prise, la ponction journalière à une mare varie d'un facteur 1 à 2,5. Si l'on garde comme référence l'estimation proposée par Gadelle (1989) qui semble la plus réaliste dans des conditions de restriction de la ressource en eau, la ponction journalière selon la mare varie de 0,2 m^3/j (mare de Wankama) à 15,3 m3/j (mare de Banizoumbou). D'une manière générale, les mares de plateau sont très sollicitées par le bétail du fait de leur situation écartée des champs et des villages. Même si la moyenne calculée sur cet ensemble de 12 mares est loin d'être significative entre 4,8 et 11,6 m^3/j (coefficient de variation >50%), elle permet d'avoir une estimation de la ponction journalière du bétail et de la comparer ainsi aux baisses journalières moyennes des mares concernées au cours de la saison sèche.

Pour la mare de Bazanga, on peut estimer que sur l'ensemble de l'année la ponction en eau par le bétail est environ égale à 5% de la variation totale de stock. Elle est minimale en saison des pluies, environ de 2,5 %, et maximale en saison sèche moins de 25 % des variations de stock. Les valeurs de la saison sèche représentent certainement une surestimation de la consommation pour cette époque car elle a été réalisée alors que toutes les mares autour de Bazanga étaient sèches (mi-novembre). Ce qui n'est pas vrai en début de saison sèche. Pour les mares de plateau comme Sulfey ou Kampa Zarma ou encore Poura, elle représente seulement de 2 à 10 % des variations de stock moyennes journalières.

Pour les mares de vallée comme Wankama, la consommation journalière en eau du bétail est négligeable et représente moins de 1 % des variations de stock moyennes journalières.

Tableau 48 : estimation de la consommation en eau du bétail sur différentes mares de la zone d'étude et selon diverses projections.

	Selon projections D'At de Saint Foulc (1986)	selon projections de Gadelle (1989)	selon projections de ING
		m^3	
Banizoumbou	26,9	15,3	11,3
Karbanga	25,8	14,2	9,6
Poura	1,6	0,9	0,7
Maourey Kouara Zéno	0,4	0,2	0,2
Wankama	0,4	0,2	0,3
Wankama 2	4,5	2,5	1,8
Wankama (forage)	6,8	3,9	3,0
Bazanga	21,7	12,3	8,9
Kampa Zarma	11,3	6,4	4,7
Sulfey	5,5	3,2	2,4
Sama Dey plateau	18,1	9,6	5,6
Korto	20,1	11,6	8,8
total	143,2	80,3	57,4
moyenne	11,9	6,7	4,8
écart type	10,1	5,6	4,0

CHAPITRE 9

L'INFILTRATION DANS LA MARE ET SA VARIABILITE TEMPORELLE

SYNTHESE

Calculé à partir des volumes d'écoulement transitant par les mares et établis pour cinq systèmes endoréiques de plateau, sept systèmes de vallée (trois avec des mares installées dans le lit de cours d'eau et quatre de vallée fermée), le bilan hydrologique met en évidence un transit des eaux d'écoulement vers les mares de 0,1 à 34 % des précipitations annuelles. En moyenne, le coefficient d'infiltration (rapport de la lame infiltrée dans la mare à la lame précipitée sur le bassin versant) des eaux concentrées dans la mare correspond à 76 % du coefficient de ruissellement pour les systèmes de plateau, et à 92 % pour les systèmes de vallée.

A l'analyse du bilan hydrologique annuel, il apparaît :

- pour les systèmes de plateau, 20 % environ de la lame précipitée sur le bassin s'infiltre à partir des mares. Le coefficient est assez stable, variant de 25 % environ d'une année sur l'autre.

- en revanche, les systèmes de vallée sont caractérisés par un faible transit des eaux d'écoulement qui est très variable d'un système à un autre : de 0,01 à 22,7 % des précipitations. Il en résulte des coefficients d'infiltration faibles : 0,01 à 22,5 %. La variabilité interannuelle observée au cours des trois années d'étude est forte et dans les cas extrêmes supérieure à 100% des coefficients minimaux d'infiltration observés (cas de la mare de Wankama et Sama Dey village).

L'analyse comparée des lames journalières précipitées et infiltrées à la mare de Wankama montre que cette variabilité est principalement liée à la distribution intra saisonnière des précipitations. Ainsi, il apparaît que c'est à la faveur de précipitations cumulées sur une courte période et présentant un fort volume total que l'essentiel du cumul infiltré annuel se réalise. L'exemple de l'année 1992 à Wankama est probant : 62 % du cumul infiltré a été enregistré au cours d'une période de 5 pluies (du 18 au 31 juillet 1992) représentant seulement 32 % du cumul pluviométrique annuel.

Les relations hauteur d'eau initiale- variation de stock par infiltration et par évaporation établies pour les mares de référence permettent de comprendre les modalités de partition des stocks d'eau en fonction du niveau du plan d'eau. Elles montrent qu'à une hauteur d'eau initiale d'un épisode de vidange correspond une partition donnée des volumes écoulés. Les contextes morphologiques et pédologiques des mares de vallée favorisent pour la majorité des épisodes de vidange d'importantes variations de stock par infiltration. Elles sont largement supérieures à 90 % des variations de stock pour les hauteurs atteintes en saison des pluies.

La détermination de la lame infiltrée en fonction de la lame écoulée peut être obtenue par un modèle linéaire (Li=A Lr) dont les coefficients de partition A ajustés sont proches d'un système à un autre et révèlent un bilan hydrologique globalement orienté vers la redistribution des eaux d'écoulement par infiltration. Ils sont égaux à 0,81 pour les mares de plateau et à 0,94 pour l'ensemble des mares de vallée. La comparaison des comportements à l'infiltration des sites de référence et des sites témoins met en évidence une faible disparité de comportement entre ces derniers et une faible surestimation des coefficients de partition par les sites de référence.

Les tests de sensibilité du bilan hydrologique en fonction de l'estimateur de l'évaporation montrent que globalement les résultats du bilan annuel sont faiblement affectés par le choix de l'estimateur d'évaporation.

Enfin, il est intéressant de signaler que la ponction en eau par le bétail en fin de saison des pluies et en début de saison sèche peut représenter au plus 25 % des variations de stock journalières (mare de Bazanga) mais elle est généralement nettement inférieure à 10 % dans les mares de plateau et négligeable dans les mares de vallée, moins de 1 % à la mare de Wankama.

CHAPITRE 10

LA PARTICIPATION DES MARES A LA RECHARGE DE L'AQUIFERE

CHAPITRE 10

LA PARTICIPATION DES MARES A LA RECHARGE DE L'AQUIFERE

Les informations piézométriques obtenues par le suivi des puits dans l'ensemble du degré carré ,et en particulier dans la zone des mares (une trentaine de puits), sont utilisées pour valider et élargir les bilans annuels établis sur les mares de référence et mares témoin.

Par une analyse des variations piézométriques intrasaisonnières, sont mises en évidence les principales zones de recharge de la nappe en constituant une classification des comportements piézométriques.

La recharge annuelle de la nappe phréatique en 1992 et 1993 est évaluée à partir des variations piézométriques annuelles. Elle est ensuite comparée aux parts infiltrées dans cinq mares de vallée. La cohérence des deux estimations tend à prouver que les mares de vallée ont actuellement un rôle majeur dans la recharge de la nappe phréatique.

1 INTRODUCTION

L'estimation de la recharge de la nappe phréatique répond à un objectif général qui est d'intégrer le bilan hydrologique à l'ensemble de la zone d'étude. Pour cela, le traitement et l'interprétation de l'information piézométrique doivent permettre ici :

- de caractériser les processus de recharge dans la zone d'étude et leur variabilité spatiale et temporelle,
- de valider le fonctionnement et le rôle des mares de vallée dans le bilan hydrologique régional.

C'est à partir d'une trentaine de points d'observations piézométriques sélectionnés sur la zone d'étude des mares que nous proposons d'établir un parallèle entre les caractéristiques spatio-temporelles des variations piézométriques de l'aquifère CT3 et le fonctionnement hydrologique des mares de vallée puis d'estimer les variations piézométriques annuelles.

1.1 Evolution récente des niveaux piézométriques de la nappe phréatique

L'examen des trois années de suivi piézométrique de la nappe du CT3 sur plus de 300 points (Leduc et Desconnets, 1994b ; Leduc et Lenoir, à paraître) a actualisé la connaissance de la nappe du CT3 dans les limites du degré carré d'HAPEX-Sahel.

D'après les informations fournies par l'étude de Boeckh (1965), la comparaison des niveaux mesurés en 1965 et entre 1991 et 1993 montre qu'il y a pas eu d'évolution spectaculaire de la piézométrie régionale entre ces deux dates.

Les informations fournies par le suivi mensuel de 30 puits (la zone centrale du degré carré) durant sept années 1987-1993 (Schroeter, 1993) nous permettent de constater que depuis 1987 le niveau de la nappe a monté régulièrement (figure 102) reconstituant ainsi les ressources souterraines qui avaient souffert de la sécheresse des années 70 et 80.

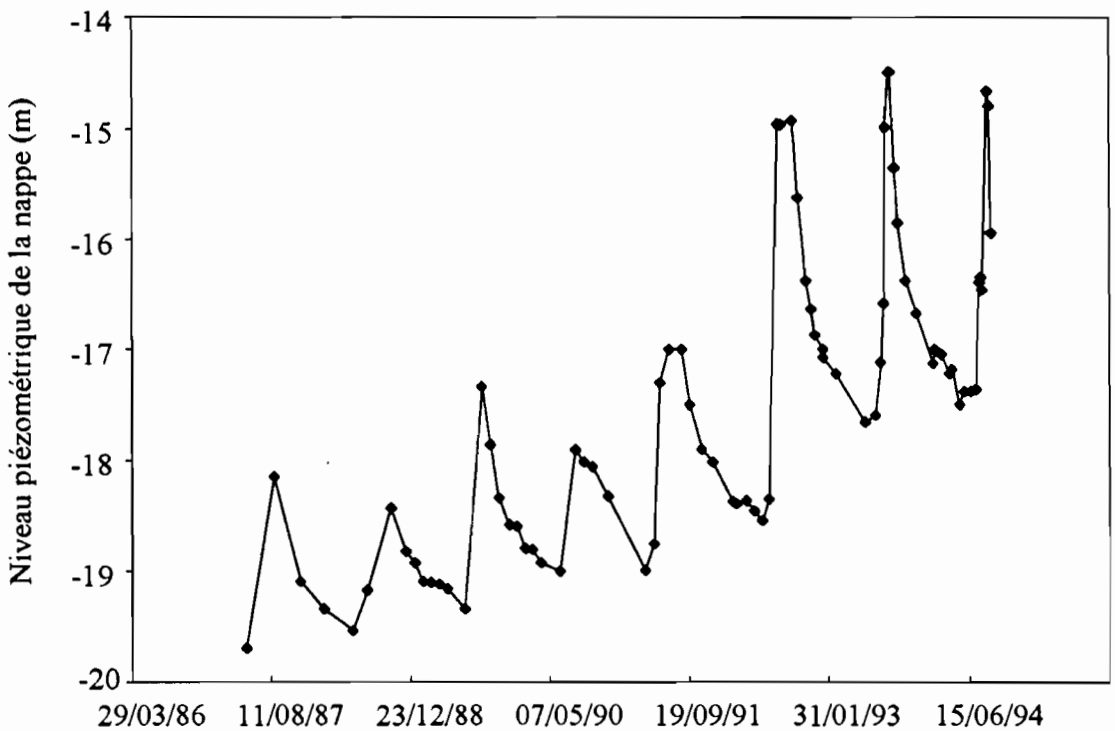


Figure 102 : évolution des niveaux piézométriques de 1987 à 1994 au puits du village de Wankama (nord de la zone d'étude des mares) d'après Leduc et Desconnets, 1994b et complétée

La remontée piézométrique moyenne de la nappe au cours de ces sept dernières années a été de 1,4 m, soit en moyenne 0,2 m/an avec des extrêmes de 5 cm/an (année 1990) et de 45 cm/an (année 1992) (d'après Leduc, communication personnelle).

1.2 Premiers acquis sur la connaissance des processus de recharge de la nappe phréatique (degré carré de Niamey)

Les premières études concernant les caractéristiques piézométriques de la nappe (Leduc et Desconnets, 1994b ; Leduc et *al.*, à paraître), et notamment la variabilité spatiale des fluctuations annuelles, ont amené plusieurs constatations.

La plupart des puits dans le degré carré ont une faible fluctuation annuelle dont la médiane était de 0,6 m en 1992. Seulement cinq puits avaient une fluctuation entre 5 et 9 mètres ; 17 autres avaient des fluctuations comprises entre 2 et 5 mètres (Leduc et Lenoir, à paraître).

La majorité des puits ayant de fortes fluctuations annuelles sont situés dans deux zones. La première est au nord ouest du degré carré et se caractérise par une forte hétérogénéité spatiale des niveaux piézométriques. Elle correspond à l'amenuisement de l'épaisseur de la nappe au dessus du socle cristallin. La deuxième est la région centrale du degré carré, à environ 30 km de Niamey, où l'on rencontre un grand nombre de puits ayant les plus fortes fluctuations.

En fait, ces fortes fluctuations sont systématiquement observées pour des puits situés à proximité de mare. Comme il a été confirmé dans Leduc et Desconnets, (1994a) et au chapitre 7, ces fortes fluctuations piézométriques sont liées à l'infiltration des eaux d'écoulement à partir des mares de vallée.

2 LE SUIVI PIEZOMETRIQUE SUR LA ZONE D'ETUDE DES MARES

Les points d'observation de la nappe font partie de l'ensemble des 300 puits et piézomètres suivis sur le degré carré au cours de l'expérience HAPEX-Sahel. De manière à garder une information homogène, seuls les relevés piézométriques instantanés ont été utilisés. Ce choix tient bien évidemment compte de l'importance des relevés piézométriques instantanés par rapport à ceux réalisés en continu (entre 1992 et 1993, ils étaient seulement au nombre de 8 sur l'ensemble du degré carré).

Echantillonnage spatial

Les points d'observation piézométrique sélectionnés sur la zone d'étude sont au nombre de 37. Ils sont compris dans une aire débordant légèrement la zone de 600 km². La majorité des points de mesures sont situés dans les bas-fonds, à proximité des talwegs principaux ou secondaires (figure 103). On remarquera le fort échantillonnage spatial au nord de la zone d'étude qui correspond au dispositif particulièrement important autour des mares du village de Wankamà (mis en place à partir de 1993, ce dispositif est détaillé au chapitre 7). Cette répartition spatiale est en relation avec la situation des villages et la faible profondeur de la nappe dans les bas-fonds. Ainsi, il existe seulement trois points d'observation sur les plateaux. La liste des puits suivis sur la zone d'étude des mares ainsi que leur position géographique est donnée en annexe 9 (tableau A91).

Echantillonnage temporel

Au nombre de deux en 1991 (août et décembre), les campagnes systématiques de relevés piezométriques ont été plus fréquentes les années suivantes, trois en 1992 (avril, été et novembre) puis quatre en 1993 (février, mai-juin, septembre et décembre). Elles ont été largement complétées par de très nombreux relevés intermédiaires, parfois hebdomadaires ou bimestriels et souvent mensuels.

Ces relevés ont été en moyenne au nombre de cinq par an pour les puits utilisés dans cette étude.

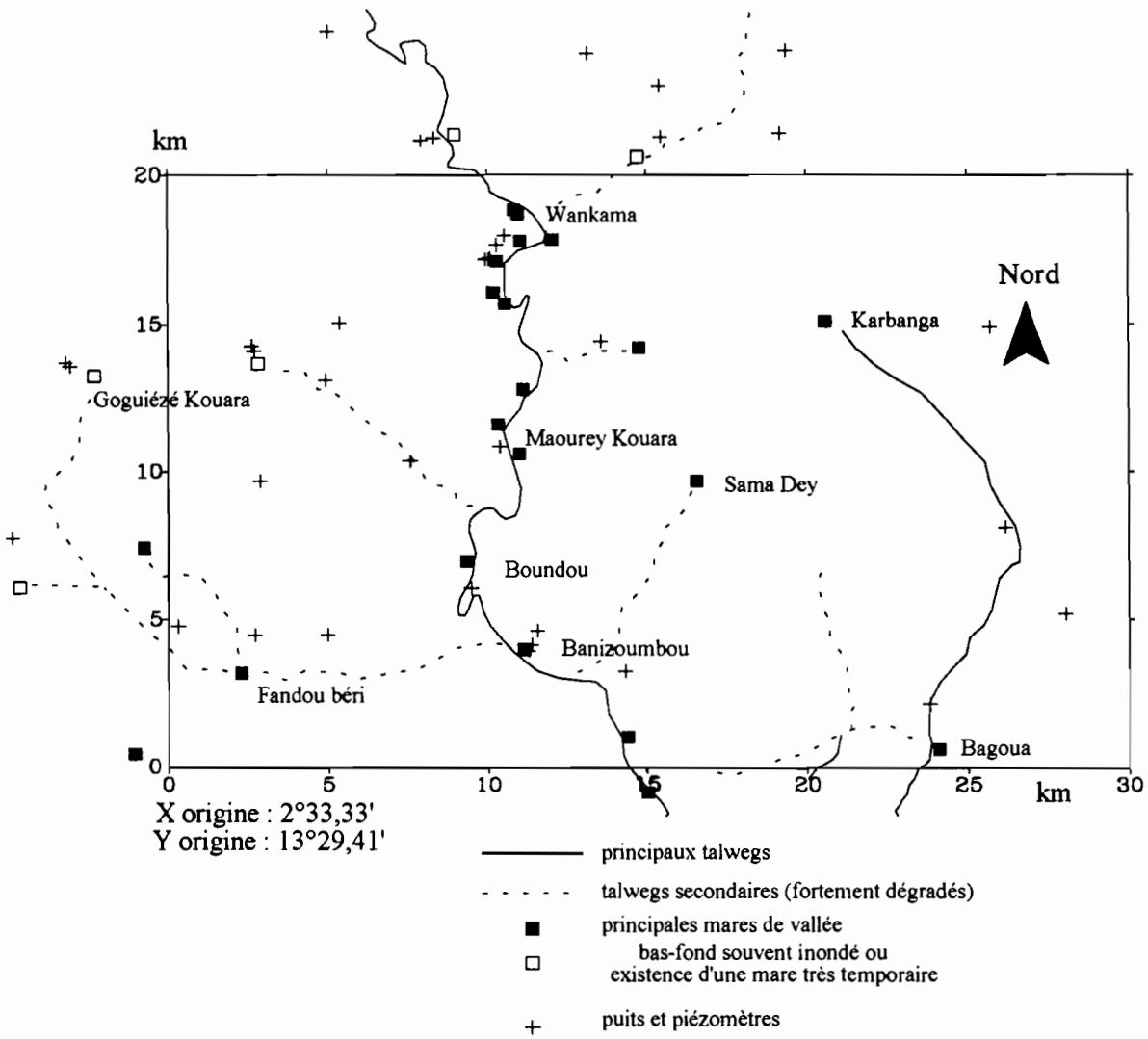


Figure 103 : dispositif piézométrique sur la zone d'étude des mares et localisation des principales mares de vallée (d'après l'inventaire de 1992 en annexe 1)

Nature des points d'observations et signification des mesures

La majorité des puits est exploitée à des fins domestiques et agricoles (alimentation humaine et alimentation du bétail) tout au long de l'année avec un maximum en fin de saison sèche (février-avril) provoqué par l'alimentation du bétail. Les niveaux mesurés sont donc plus souvent dynamiques que statiques. Aussi, on ne peut donner à la mesure instantanée qu'une valeur limitée.

En effet, la représentativité temporelle et la signification d'une mesure dépendent de plusieurs paramètres difficilement mesurables tels que la fréquence d'utilisation du puits et les pompages effectués juste avant l'observation, les caractéristiques hydrodynamiques locales de l'aquifère, la bonne pénétration de l'ouvrage dans l'aquifère etc.

Les valeurs instantanées ont pu être critiquées grâce à la connaissance des pompages postérieurs à l'observation. Les points de la nappe connus ou présumés être le lieu de fortes fluctuations ont été l'objet d'un suivi plus fréquent avec des dispositions instrumentales plus strictes et systématiques (dispositif instrumental sur le kori de Dantiandou, par exemple).

3 LES PROCESSUS DE RECHARGE DANS LA ZONE D'ETUDE DES MARES

3.1 Analyses des piézogrammes et classification

Deux critères sont utilisés pour discerner les réactions piézométriques de l'aquifère :

- l'amplitude maximale annuelle (maximum-minimum),
- et dans le cas où les variations annuelles sont suffisamment marquées, la date du niveau maximum piézométrique annuel, concordant ou non avec la saison des pluies.

De l'examen des 33 piézogrammes incluant, pour la majorité, la période pluvieuse de 1992 et 1993, se dégage deux grandes classes de réactions piézométriques et une classe intermédiaire.

La première (classe n°1) est caractérisée par des variations annuelles peu marquées (nettement inférieures à 1 mètre) avec de faibles amplitudes annuelles. Quelques piézogrammes sont donnés en figure 104. Ils présentent une évolution piézométrique annuelle et interannuelle régulière où il est difficile de distinguer un maximum annuel. Cette classe compte 55 % des puits de la zone (20 puits).

D'une manière générale, ils sont éloignés à très éloignés des principaux talwegs ou fond de vallée fermée. Néanmoins, des puits comme Banizoumbou école ou Banizoumbou mosquée situé à moins de 1 kilomètre d'une mare sont regroupés dans cette classe. Il en est de même pour des puits, tel que celui du village de Fandou Béri ou de Tondi Kiboro, situés dans des parties de talwegs fortement dégradés (ils ne sont pas un lieu privilégié d'installation de mare comme le nord du kori de Dantiandou). Les puits situés sur les plateaux tel qu'Habaka (figure 104) sont les plus significatifs de cette classe.

La seconde (classe n°2) ,plus délicate à déterminer, (intermédiaire avec les deux autres est essentiellement caractérisée par un niveau maximum annuel légèrement décalé par rapport à la saison des pluies. Les variations annuelles ont des amplitudes proches de 1 m. Les piézogrammes les plus caractéristiques sont ceux des puits de Bani Kossey, Maourey Tokobinkani et Kodjiri Bani Kouara (figure 105). Cet ensemble de puits est situé dans un rayon de moins d'un kilomètre d'une mare. Elle compte 15 % des puits de la zone (6 puits).

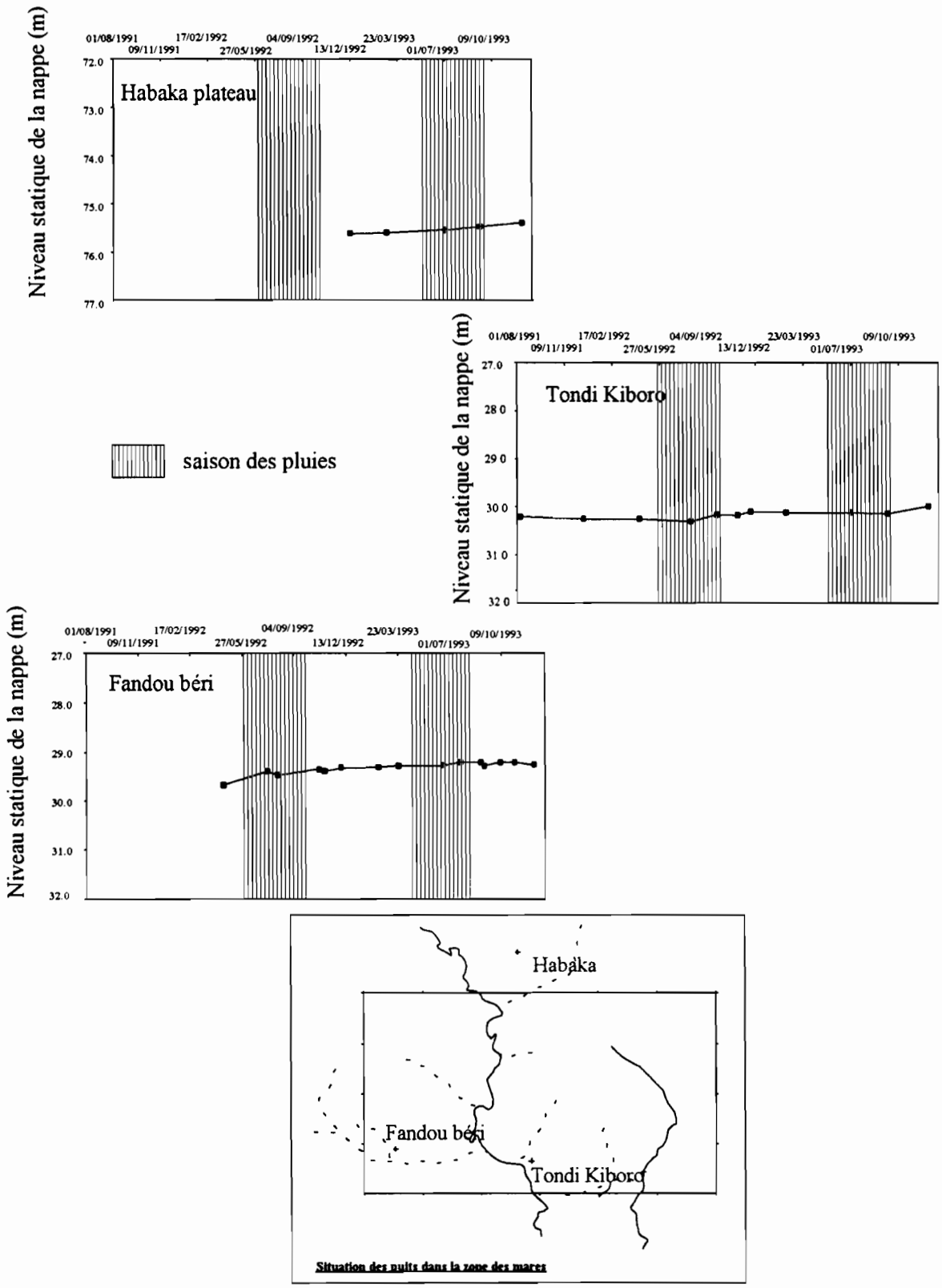


Figure 104 : quelques piézogrammes des puits ayant des variations annuelles peu marquées et une amplitude maximale inférieure à 1 mètre (classe 1) - puits d'Habaka, Tondi Kiboro et Fandou béri.

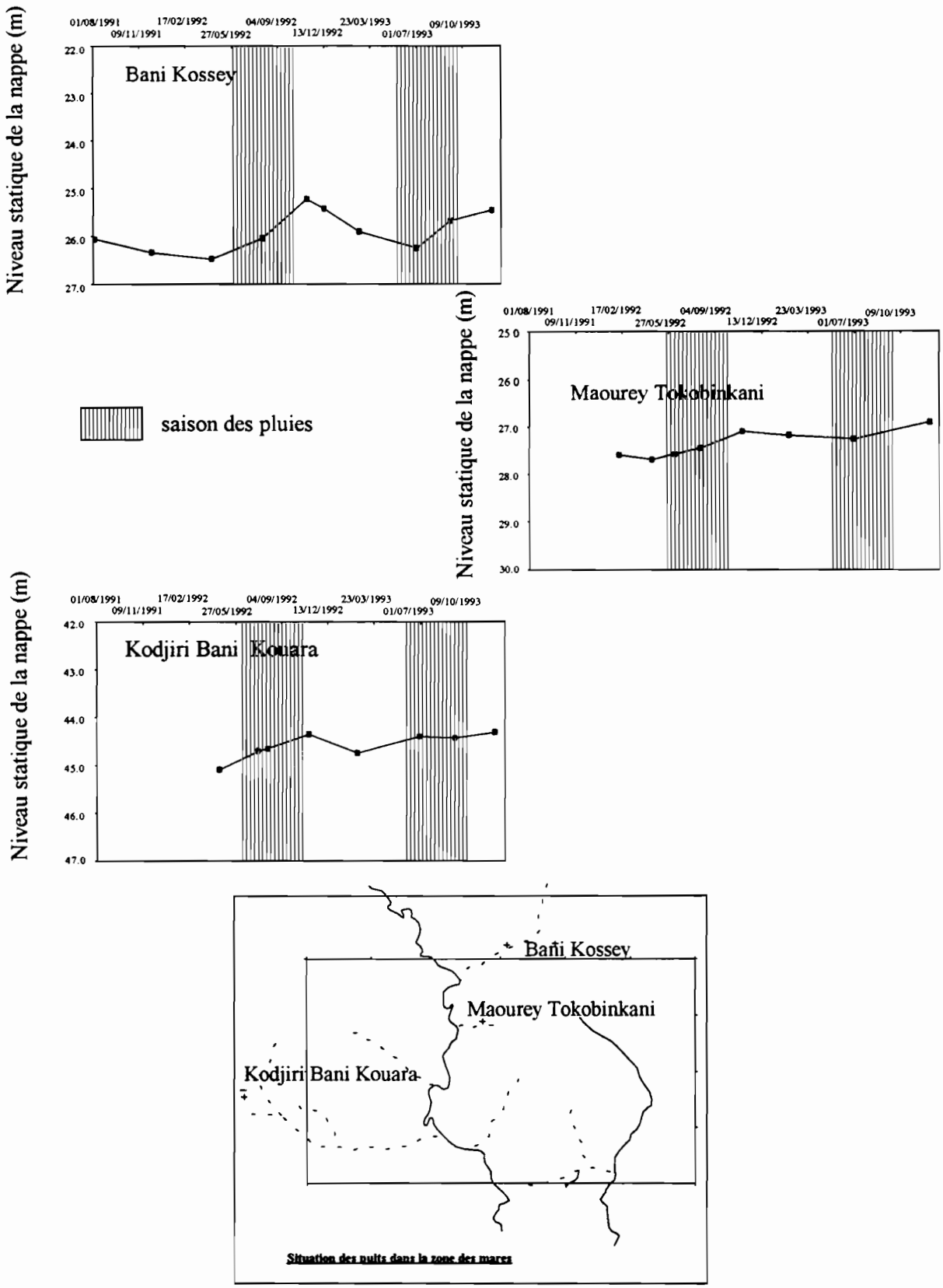


Figure 105 : quelques piézogrammes des puits ayant des variations annuelles plus ou moins marquées (amplitude annuelle maximale proche de 1 m) avec un maximum annuel hors de la saison des pluies (classe 2) - puits de Bani Kossey, Maourey Tokobinkani et Kodjiri Bani Kouara

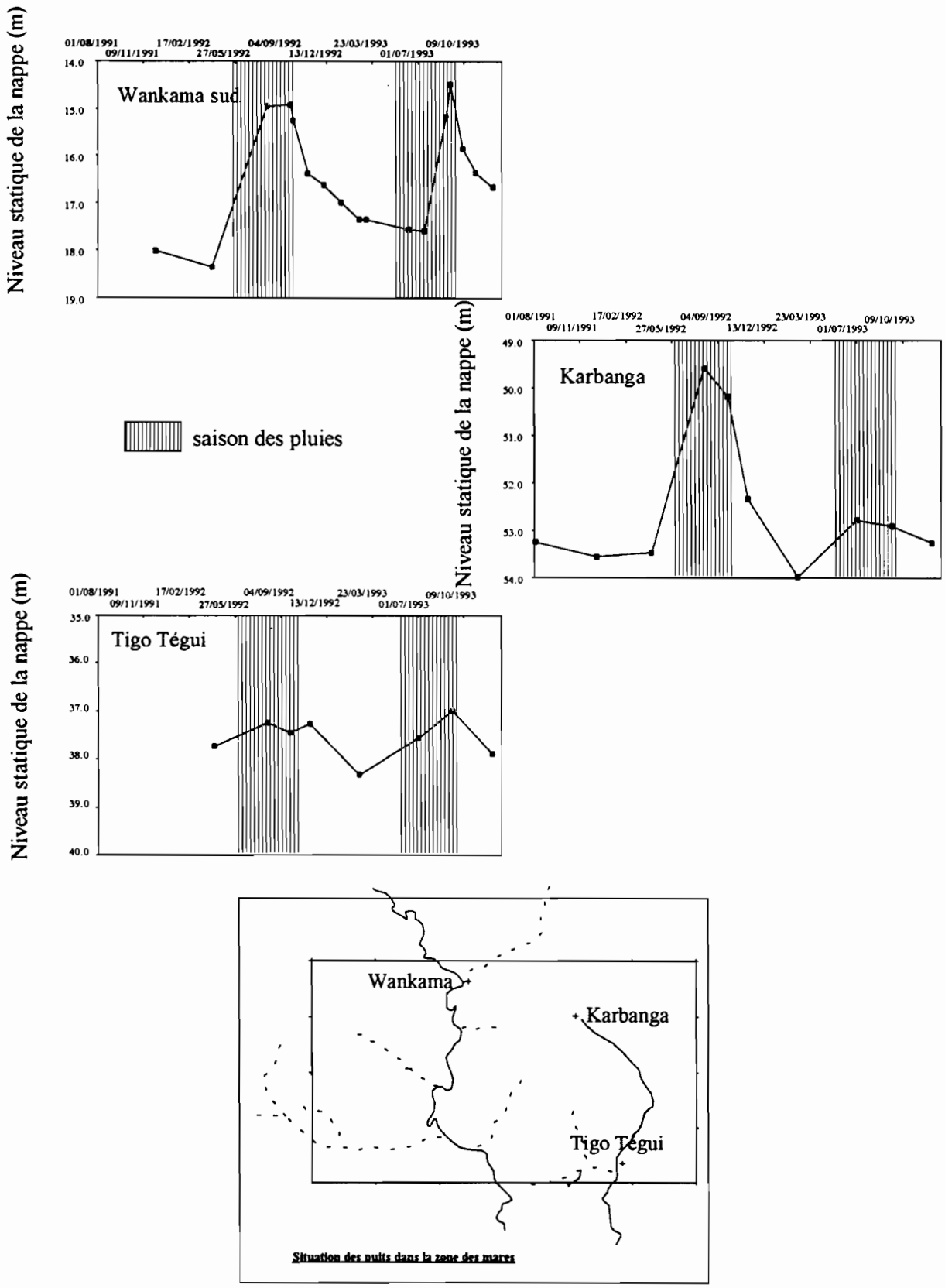


Figure 106 : quelques piézogrammes des puits ayant de fortes variations annuelles (amplitude annuelle maximale supérieure à 1 m) avec un maximum annuel au cours de la saison des pluies (classe 3) - puits de Wankama, Karbanga et Tigo Tégui

La troisième (classe n°3) est caractérisée par des variations annuelles fortement marquées dont le maximum se situe à l'intérieur de la saison des pluies. Les amplitudes maximales annuelles sont très variables. Elles sont comprises dans une gamme allant de 1 à 5 mètres. Les piézogrammes les plus significatifs sont donnés en figure 106. Ils concernent systématiquement des puits localisés à proximité d'une mare ou de plusieurs (puits de Wankama). Pour une grande partie, ils sont situés dans le kori de Dantiandou (puits de Wankama, Banizoumbou, Maourey Kouara Zéno et Boundou non présentés en figure 106) ou encore dans le fond de vallée fermée (Karbanga figure 106 ; Sabou Dey, Kida Bazagiézé et Goguiézé Kouara non présentés en figure 106). Cette classe compte 30 % des puits de la zone (11 puits).

En affectant à chaque puits le numéro de sa classe, la figure 107 nous donne un aperçu des réactions piézométriques en liaison avec la position des mares. Elle nous permet de distinguer les principales zones de recharge de la nappe.

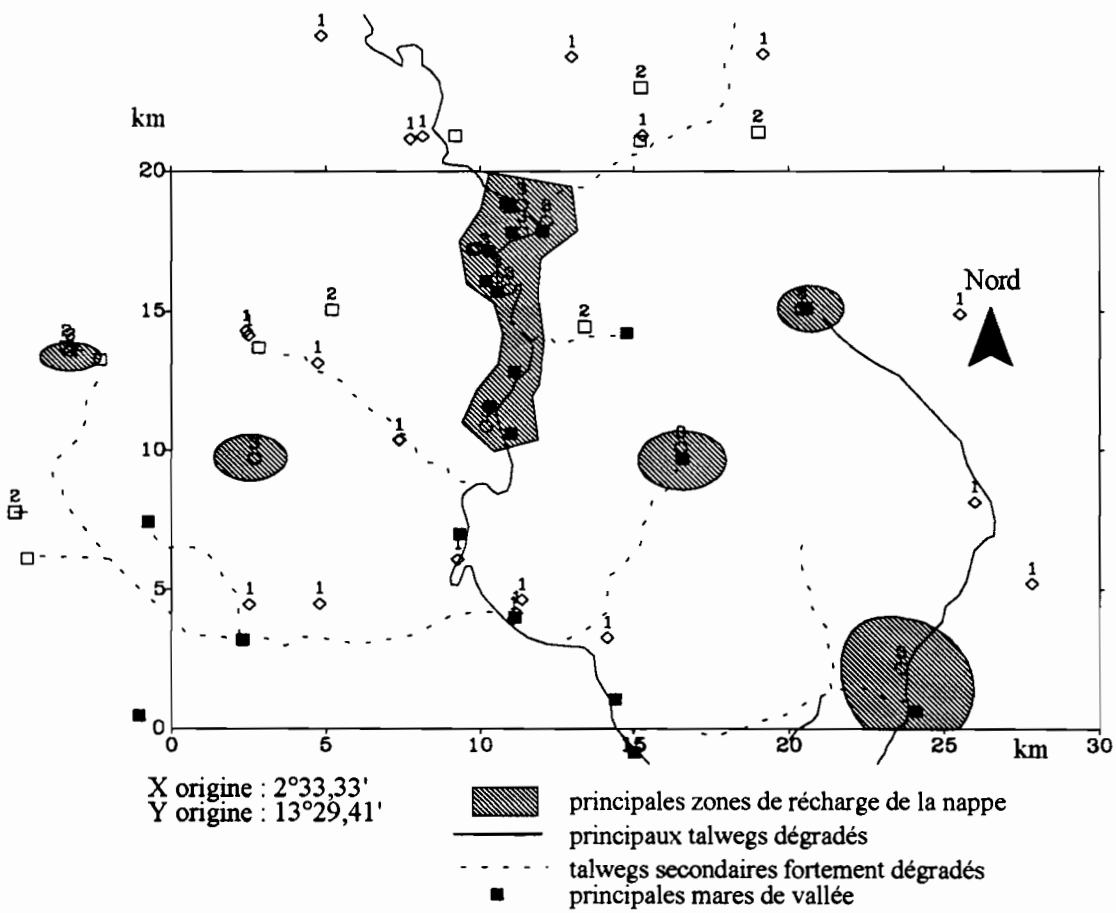


Figure 107 : liaison entre les réactions piézométriques des puits et la position des mares. La classe n°1 correspond aux puits ayant des variations annuelles peu marquées (< 1m). La classe n°2 correspond aux puits ayant des variations annuelles marquées (proche de 1 m) avec un maximum annuel hors de la saison des pluies et la classe n°3 correspond aux puits ayant de fortes variations annuelles (> 1m) avec le maximum annuel au cours de la saison des pluies

3.2 Relation entre la classification des réactions et les processus de recharge

Les fortes variations piézométriques (classe 3) survennant uniquement au cours de la saison des pluies sont une réaction localisée de l'aquifère. L'aquifère réagit à la percolation des eaux des mares de manière presque instantanée selon les conditions de transfert (caractéristiques hydrodynamiques et son état initial d'humectation). Ce processus est généralisé à l'ensemble des mares connues avec une intensité variable.

En effet, les études de détail (chapitre 7) montrent que les volumes d'infiltration sont très variables selon la mare et l'année. Et comme on le constate sur la majorité des mares installées à l'aval du kori de Dantiandou (Boundou, Banizoumbou - figure 108; Tondi Kiboro - figure 104), les écoulements qui y sont concentrés, et l'infiltration qui en est issue, ne permettent pas des transferts aussi importants que dans la zone de Wankama. Cette disparité du bilan hydrologique est notamment liée au contexte géomorphologique local, (dégradation du réseau hydrographique de degré variable selon les systèmes endoréiques) et à la forte variabilité du régime des précipitations d'une année sur l'autre.

Les autres réactions piézométriques (classe 1 et 2) semblent être davantage liées à un processus de recharge latérale dont la principale composante est la propagation des infiltrations à partir des puits de la classe 3. Ce schéma de fonctionnement de l'aquifère peut être justifié par l'étude réalisée à Wankama sur 3 piézomètres et 2 puits où l'on a montré (chapitre 7 section 2.2) que selon la distance au point d'infiltration, la réaction piézométrique dûe à une infiltration verticale est atténuée et décalée dans le temps. Les réactions piézométriques des plateaux qui sont carctéristiques d'une infiltration faible et diffuse (Bromley et *al.*,à paraître) permettent de constater que l'atténuation du signal émis par les mares de vallée est totale.

Ainsi, selon la distance au point d'infiltration et les caractéristiques hydrodynamiques locales, on observe des réactions qui sont ,d'une part, décalées dans le temps (réactions proches des points d'infiltration comme par exemple le puits de bas-fond de Bani Kossey figure 105), et d'autre part, dont l'amplitude est lissée (Fandou Béri en figure 104) puis complètement atténuée (puits de plateau : Habaka - figure 104).

3.3 Commentaires

La classification des réactions piézométriques de la nappe élargit et généralise ainsi les constats établis sur les mares de Wankama, Banizoumbou et Sama Dey village (chapitre 7).

Les nombreux sites sur lesquels s'appuient la comparaison des évolutions piézométriques intrasaisonnières ont fait l'objet d'un échantillonnage temporel relativement disparate. Pour cela, l'interprétation qui a été proposée, doit être considérée comme un premier pas vers une étude des processus de recharge *in extenso*.

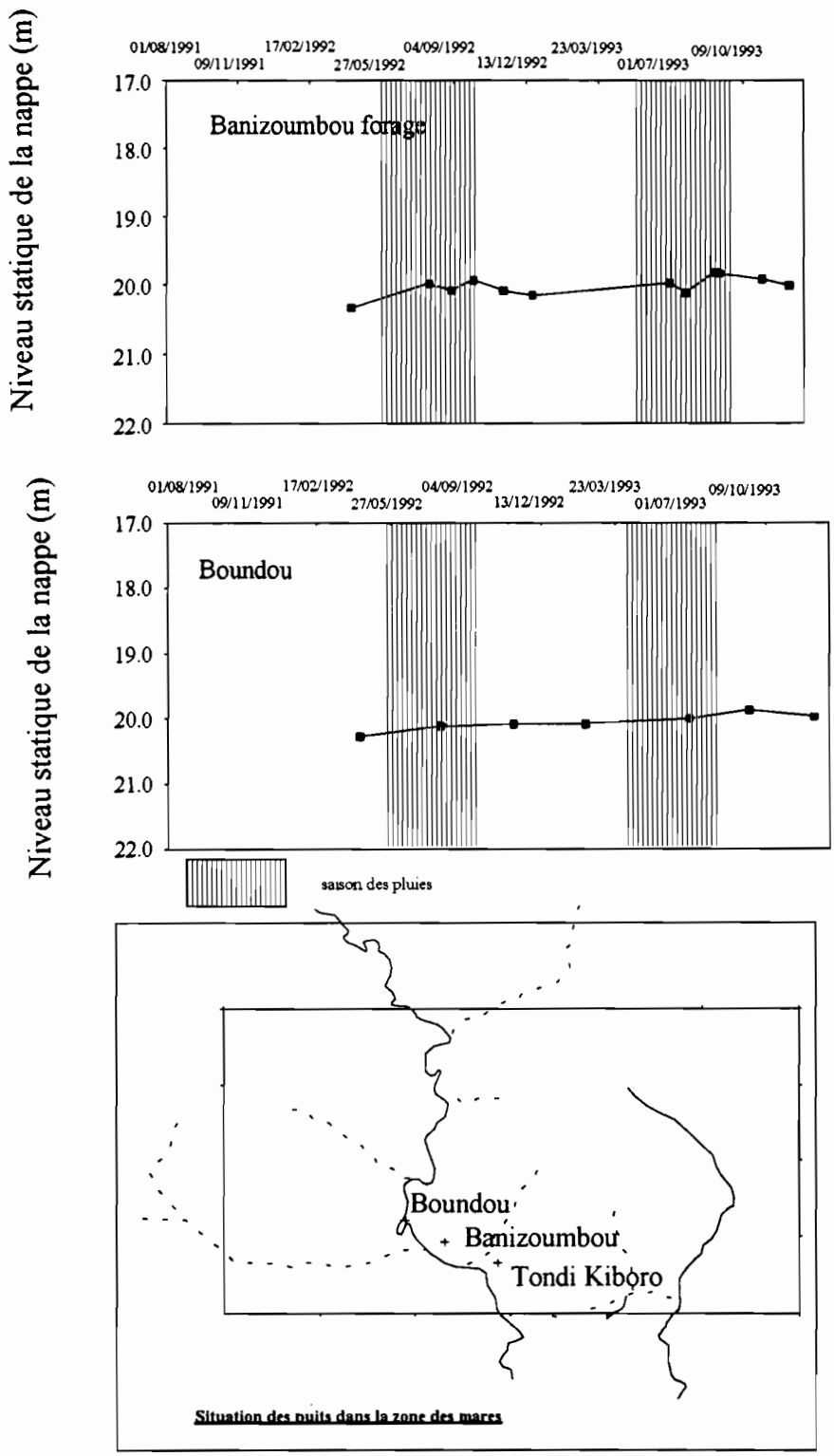


Figure 108 : piézogrammes des puits stués dans la partie sud du kori de Dantiandou (en dessous de Maourey Kouara) - puits des villages de Boundou, Banizoumbou (le puit de Tondi Kiboro est présenté en figure 105)

4 ESTIMATION DE LA RECHARGE DE LA NAPPE PHREATIQUE DANS LA ZONE DES MARES

4.1 Méthode d'estimation de l'impact annuel des pluies sur la recharge de la nappe

L'étude des processus de recharge réalisée à l'échelle locale et régionale nous permet d'apporter quelques simplifications au fonctionnement de la recharge.

On considère, d'une part, que la participation des plateaux est négligeable au pas de temps annuel, et d'autre part, que les circulations régionales sont inexistantes à cette échelle de temps et d'espace. Ainsi, les entrées et sorties aux limites de la zone d'étude des mares sont négligées.

La comparaison des niveaux piézométriques est effectuée en fin d'année. Cette période est intéressante car elle se situe en dehors de la saison des pluies (une dizaine de semaines) et correspond au minimum des perturbations par prélèvements (transhumance du bétail entre septembre et octobre).

Les données disponibles nous permettent de calculer la variation piézométrique moyenne pour les années 1992 et 1993. Pour évaluer la recharge de la nappe consécutive à la saison des pluies 1992, le calcul est établi entre les niveaux enregistrés en décembre 1991 et novembre 1992. Pour l'année 1993, l'évaluation de la recharge est établie à partir des mesures de novembre 1992 et décembre 1993.

4.2 Variation piézométrique annuelle : cas des années 1992 et 1993

La variation piézométrique annuelle est estimée à partir de 27 points d'observation en 1992 et de 29 en 1993, soit une densité moyenne de un puits/20 km².

4.2.1 Impact de la saison des pluies 1992 sur la nappe phréatique

L'impact de la saison des pluies 1992 sur la nappe est une hausse moyenne de 0,53 m alors que l'on a constaté une baisse moyenne de -0,02 m des niveaux piézométriques (tableau 49) avec une hausse médiane de 0,42 m en 1992 et de 0,13 m en 1993.

Tableau 49 : évolution piézométrique annuelle sur la zone d'étude des mares

	déc 91- nov 92	nov 92- dec 93	déc 91- déc 93
nb	27	30	30
moyenne	0,53	-0,02	0,46
médiane	0,42	0,13	0,34
écart type	0,49	0,40	0,45
min	0,01	-0,92	-0,56
max	1,63	0,53	1,45

Pour l'année 1992, on enregistre une hausse supérieure à 0,2 m dans 50 % des puits dont 20 % présentent une hausse supérieure à 1 m. Les plus fortes valeurs, entre 1,3 et 1,6 m, sont enregistrées aux deux puits situés dans le village de Wankama où sont localisées cinq mares.

Comme le montre la figure 109, présentant les courbes d'égale variation du niveau piézométrique, la variabilité spatiale est assez prononcée. On découvre ainsi que les plus fortes variations piézométriques sont localisées dans la partie nord et plus particulièrement centrées sur le kori de Dantiandou qui présente une forte densité de mares en saison des pluies. D'autres points de forte variation piézométrique sont disséminés dans la zone. Ils correspondent, entre autres, à des zones de forte concentration des eaux de surface connues telles que le bas fond de Karbanga (nord est), de Gogiezé Kouara (extrême ouest) ou de Bagoua (sud est). Il est intéressant de remarquer que les points de forte variation ne sont pas généralisés à toutes les mares temporaires. La figure 109 montre que la partie sud du kori de Dantiandou n'est pas le lieu de fortes variations comme aurait pu le laisser présager la présence de mares (Boundou, Banizoumbou, Tondi Kiboro).

Tableaux 50 a et b : Détails de l'évolution piézométrique entre décembre 91 et novembre 92

- sur la zone des mares

(chiffres bruts des puits < 3 m)

	stabilisation < -0,1 m et < 0,1 m	hausses > 0,1 m	total
nb puits	7	20	27
moyenne	0,06	0,69	0,53
min	0,01	0,14	0,01
max	0,09	1,63	1,63

- sur le degré carré de Niamey (d'après Leduc et Lenoir, à paraître)

(chiffres bruts des puits < 3 m)

	baisse < 0,1 m	stabilisation < -0,1 m et < 0,1 m	hausses > 0,1 m	total
nb puits	12 puits	26 puits	139 puits	177 puits
moyenne	-0,62	0,0	0,62	0,44

*5 puits avec une hausse >3m

Une comparaison des valeurs moyennes estimées dans la zone des mares et sur l'ensemble du degré carré est établie dans les tableaux 50 a et b. Les valeurs moyennes de la variation piézométrique annuelle de l'ensemble et du sous-ensemble sont cohérentes, respectivement 0,44 m et 0,53 m, avec une médiane plus élevée sur l'ensemble du degré carré, égale à 0,6 m (0,42 m pour la zone d'étude des mares). Cela correspond au plus fort impact enregistré depuis 1987. Il se révèle donc de même ampleur et de même nature sur l'ensemble du degré carré. Leduc et Lenoir (à paraître) montrent en effet que la majorité des fortes variations piézométriques correspondent à des puits situés à proximité des mares, ceci pour la

majeure partie du degré carré (zone centrale et nord ouest). La recharge de la nappe en 1992 semble s'être essentiellement effectuée à partir d'infiltration localisée des eaux de surface via les mares temporaires.

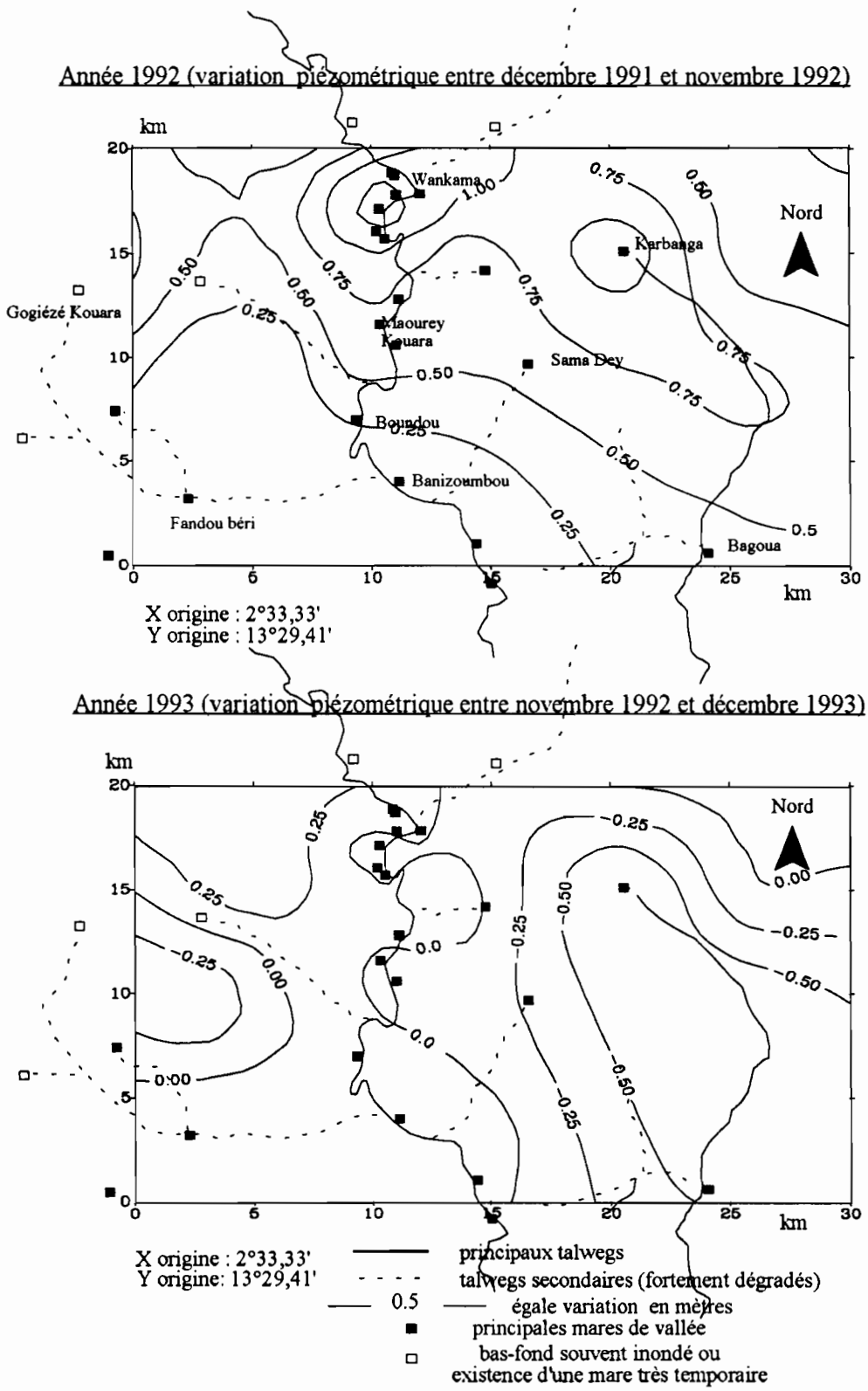


Figure 109 : carte d'égale variation du niveau piezométrique annuel pour les années 1992 et 1993 sur la zone d'étude des mares (600 km²)

4.2.2 Impact de la saison des pluies 1993 sur la nappe phréatique

Le déroulement de la saison des pluies 1993 a été moins propice à la production d'écoulement de surface et par voie de conséquence à leur concentration dans les mares et zones de bas-fond. Ce fait est bien illustré par la comparaison des bilans hydrologiques des mares de référence établie entre l'année 1992 et 1993 dans le tableau 44 du chapitre précédent.

La variation piézométrique annuelle enregistrée entre novembre 1992 et décembre 1993 est significativement différente de celle de 1992. Pour cette période, on constate une stabilisation des niveaux de la nappe si l'on se réfère à la moyenne des valeurs (tableau 51) ou bien à une hausse nettement plus faible qu'en 1992, 0,13 m, si l'on se réfère à la médiane. On constate que moins de 20 % des puits enregistrent une hausse et que plus de 50 % ont enregistré une baisse supérieure à 0,25 m parmi lesquels 20 % présentent une baisse supérieure à 0,5 m. Ces chiffres sont à nuancer. En effet, les baisses enregistrées sur des puits très proches de mares (Karbanga : -0,92 m ; Tigo Tégui : -0,65 m ; Goguiézé Kouara :-0,51 m ; Wankama nord : -0,28 m) souffrent d'une forte sous-estimation inhérente aux dates prises pour le calcul (entre novembre 1992 et décembre 1993 soit 13 mois). Malgré la signification limitée de ces valeurs, il est intéressant de comparer les cartes des courbes d'égale variation des années 1992 et 1993.

Contrairement à l'année précédente, la carte des courbes d'égale variation piézométrique de 1993 (figure 109) est spatialement plus homogène. Même si leurs valeurs sont sous-estimées, les zones de forte variation piézométrique de 1992 comme le nord du kori de Dantiandou n'ont contribué que dans une très faible part à la recharge de la nappe (situé entre les courbes -0,25 et 0,25 m sur la carte de la figure 109). Il en est de même pour les différentes mares de vallée disséminées à travers la zone.

Tableau 51 a et b : Détails de l'évolution piézométrique entre novembre 92 et décembre 93

- sur la zone des mares

(chiffres bruts des puits < 3 m)

	baisses < 0,1 m	stabilisation < -0,1 m et < 0,1 m	hausses > 0,1 m	total
	9 puits	5 puits	16 puits	30
moyenne	-0,59	0,02	0,24	-0,02
min	-0,92	-0,09	0,11	-0,92
max	-0,24	0,09	0,53	0,53

- sur le degré carré de Niamey (d'après Leduc et Lenoir, à paraître)

(chiffres bruts des puits < 3 m)

	baisses < 0,1 m	stabilisation < -0,1 m et < 0,1 m	hausses > 0,1 m	total
	89 puits	61 puits	80 puits	230 puits
moyenne	-0,67	0,0	0,47	-0,09

*moins le puits de Gardana Kouara

La valeur moyenne de la variation piézométrique annuelle de -0,09 m (médiane de 0.02 m), calculée pour l'ensemble du degré carré, est concordante avec l'estimation établie dans la zone des mares.

Il semble donc que les mares de vallée n'ont pas joué un rôle aussi déterminant dans le transfert des eaux de pluie vers le souterrain en 1993 qu'en 1992. La comparaison de ces deux années donne ainsi l'occasion d'apprécier le rôle déterminant de l'infiltration à partir des mares de bas-fond dans le bilan régional annuel.

4.2.3 Les amplitudes piézométriques maximales

Les cartes des amplitudes piézométriques maximales de 1992 et 1993 (figure 110) permettent d'apporter un deuxième élément de comparaison concernant l'importance relative de l'infiltration à partir des mares dans les processus de recharge.

Ces cartes mettent en évidence le lien existant entre l'infiltration à partir des mares de vallée et la variation spatiale de la recharge de l'aquifère. Ainsi, on peut noter que ce sont les mêmes lieux d'infiltration (fortes amplitudes maximales) qui permettent la recharge quelle que soit l'année, le nord du kori de Dantiandou et plusieurs mares de vallée fermée disséminées dans la zone.

Supérieures à 1,5 m et allant jusqu'à 4 m en 1992, les amplitudes maximales observées en 1993 sont nettement inférieures et plus proches de 1 m. Elles révèlent ainsi un transfert par infiltration verticale moins important à partir des mares. Cela concorde avec la tendance observée d'une année sur l'autre.

4.2.4 Discussion

Deux critiques peuvent être apportées à l'estimation de la variation piézométrique annuelle.

La première tient à la période de calcul utilisée. En ne prenant pas un intervalle d'exactement 12 mois (11 mois en 1992), la comparaison donne une surestimation de la recharge (niveau toujours supérieur en novembre qu'en décembre) pour l'année 1992 et une sous-estimation pour l'année 1993 (intervalle de 13 mois : novembre à décembre).

La deuxième est d'ordre méthodologique et tient, d'une part, au suréchantillonnage spatial dans les zones de vallée, et d'autre part, au sous-échantillonnage dans les zones de plateau. Ainsi dans la partie sud ouest de la zone, la connaissance des niveaux de la nappe est limitée à 2 ou 3 puits. La connaissance actuelle des processus de recharge de la nappe (Leduc et Bromley, à paraître; Bromley, à paraître; Leduc et Desconnets, 1994b) semble indiquer que les problèmes d'échantillonnage spatial et de mesures ne sont pas préjudiciables à l'estimation de la recharge annuelle.

Afin de s'affranchir de la variabilité spatiale des niveaux de la nappe et des biais introduits par la répartition des points de mesures, l'impact piézométrique annuel médian paraît beaucoup plus adapté pour évaluer la recharge annuelle.

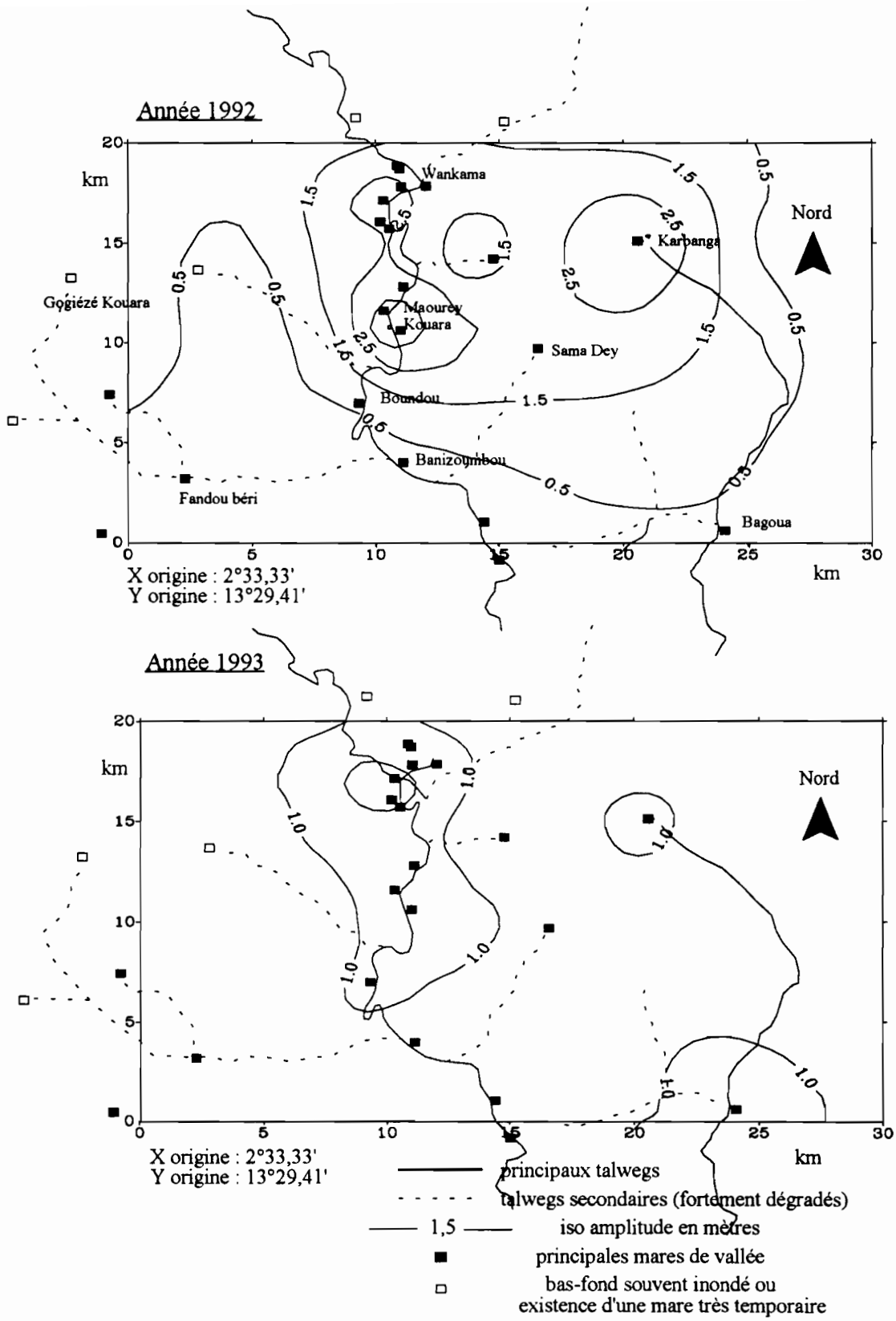


Figure 110 : carte des amplitudes maximales du niveau piezométrique pour les années 1992 et 1993 sur la zone d'étude des mares (600 km²)

4.3 Evaluation de la recharge annuelle de la nappe sur la zone d'étude des mares

Les données disponibles sur la zone des mares nous donnent la possibilité de faire une évaluation croisée de la recharge de la nappe avec l'impact piézométrique médian, d'une part, estimé pour les années 1992 et 1993 et les bilans annuels de quelques mares de la zone, d'autre part, pour les mêmes périodes.

Il ne s'agit pas ici de déterminer avec précision la recharge annuelle de la nappe. On s'attachera davantage à établir une comparaison quantitative entre la recharge annuelle et l'infiltration calculée à partir des mares.

4.3.1 Comparaison de la recharge annuelle de la nappe et des bilans des mares

Cette comparaison nécessite quelques approximations.

La porosité efficace du réservoir aquifère a été estimée à 15 %, valeur généralement admise pour des sables limoneux (Castany, 1966).

Une approximation est faite en ce qui concerne l'occupation des deux grandes unités paysagères. Nous avons pris pour chacune d'entre elles l'occupation suivante : 80 % de vallée et 20 % de plateau, considérant que l'ensemble des écoulements de vallée sont concentrés vers les mares. Elle correspond aux estimations moyennes faites sur l'ensemble du degré carré (D'Herbes et *al*, 1992).

Les tableaux 52 et 53 présentent les estimations de la recharge médiane annuelle de la nappe consécutive à l'année 1992 et 1993. Afin de juger de la sensibilité des deux paramètres de calcul (porosité du réservoir aquifère et "proportion des vallées dans la zone"), cette estimation est réalisée sur des valeurs allant de 10 à 20 % pour la porosité moyenne et de 60 à 80 % pour l'occupation des systèmes endoréiques de vallée (mares installées dans les lits d'anciens cours d'eau et mares de vallée fermée confondues).

La recharge annuelle médiane est calculée par la relation suivante :

$$R_m = \frac{V_m * P_e}{P_v} \qquad (77)$$

avec

R_m : recharge médiane annuelle en mm,

V_m : la variation piézométrique médiane annuelle en mm,

P_e : la porosité efficace de l'aquifère en %,

P_v : la proportion de systèmes endoréiques de vallée dans la zone d'étude.

Pour les paramètres moyens, 15 % de porosité et 80 % de vallée, la recharge médiane annuelle en 1992 est égale à une lame d'eau de 50 mm soit 10 % de la lame précipitée annuelle (pluie moyenne de l'année 1992 de 500 mm d'après Lebel et *al*, à paraître). Pour les valeurs extrêmes des paramètres, l'estimation médiane annuelle se situe dans une gamme de valeurs peu étendue, entre 25 et 68 mm soit entre 5 et 13,5 % de la pluie moyenne annuelle. La recharge médiane consécutive à l'année 1993 représente seulement une lame d'eau de 16 mm (calculée avec les paramètres moyens, tableau 53) soit moins de 4 % de la lame précipitée moyenne (pluie moyenne de l'année 1993 est de 470 mm d'après Lebel et *al*, à paraître). Cette valeur médiane se situe dans une gamme de valeurs allant de 1,5 à 4,5 % des précipitations.

C'est à partir du bilan hydrologique établi sur 5 mares de vallée (Wankama, Maourey Kouara Zéno, Sama Dey village, Banizoumbou et Karbanga voir tableau 44 au chapitre 9) que nous estimons la lame infiltrée médiane sur la zone d'étude des mares (tableau 54). Le bilan hydrologique de l'année 1992 donne une lame infiltrée variant de 49 à 87 mm dans cet échantillon de 5 mares et de 28 à 70 mm pour l'année 1993. La lame infiltrée médiane est égale à 51 mm en 1992 soit 10 % des précipitations et à 30 mm en 1993 soit à peine 6 % des précipitations (tableau 54).

Tableau 52 : estimation de la recharge médiane (année 1992) dans la zone des mares pour une porosité efficace de 10 à 20 % et une occupation de 60 à 80% par les systèmes endoréiques de vallée. La lame moyenne précipitée est de 470 mm d'après Lebel et al., à paraître.

porosité efficace du réservoir aquifère	10	15	20
surface des vallées (% de la surface totale)	recharge annuelle médiane en mm		
80	33,6	50,4	67,2
70	29,4	44,1	58,8
60	25,2	37,8	50,4
	recharge annuelle médiane en % des précipitations		
80	6,7	10,1	13,5
70	5,9	8,8	11,8
60	5	7,6	10,1

Tableau 53 : estimation de la recharge médiane annuelle (année 1993) dans la zone des mares pour une porosité efficace de 10 à 20 % et une occupation de 60 à 80% par les systèmes endoréiques de vallée. La lame moyenne précipitée est de 470 mm d'après Lebel et al., à paraître.

porosité efficace du réservoir aquifère (%)	10	15	20
surface des vallées (% de la surface totale)	recharge annuelle médiane en mm		
80	10,4	15,6	20,8
70	9,1	13,7	18,2
60	7,8	11,7	15,6
	recharge annuelle médiane en % des précipitations		
80	2,2	3,3	4,4
70	1,9	2,9	3,9
60	1,7	2,5	3,3

Tableau 54 : estimation de la lame infiltrée médiane à partir des mares de vallée sur l'ensemble de la zone des mares

surface des vallées (% de la surface totale)	année 1992	année 1993
	lame d'eau infiltrée médiane (mm)	
80	50,9	30,0
70	44,5	26,3
60	38,2	22,5
	lame d'eau infiltrée médiane (en % des précipitations)	
80	10%	6%
70	9%	6%
60	8%	5%

On observe les mêmes tendances entre les bilans annuels établis à partir des mares et la recharge de la nappe estimée d'après les variations piézométriques annuelles. Effectivement, la différence de régime pluviométrique entre les deux années est bien retranscrit. Il faut se rappeler que la distribution des pluies très irrégulière en 1992, principalement caractérisée par quelques forts et courts épisodes pluviométriques (18 au 31 juillet, fin du mois d'août), a été propice à de forts écoulements de surface. Pour l'ensemble des mares de vallée, cela s'est traduit par un coefficient d'infiltration élevé (rapport du volume total infiltré à la mare au volume précipité sur le système endoréique), entre 15 et 25 % des précipitations. Il était nettement plus faible en 1993, entre 5 et 10 %.

Cette cohérence entre l'estimation de la recharge annuelle et les bilans annuels des mares de vallée à l'échelle d'une région de 600 km² est aussi observable à l'échelle du degré carré. Cela confirme que les mares de vallée ont aussi un rôle prépondérant dans la recharge sur l'ensemble du degré carré.

4.3.2 Commentaires

Aboutissant à des valeurs très voisines et offrant la même tendance entre les deux années, ces premières estimations comparées, démontrent le rôle majeur des mares dans la recharge de la nappe. En cela, on trouve la validation du schéma de fonctionnement hydrologique énoncé à partir de l'étude de quelques mares de vallée. Effectivement pour une première estimation, les bilans hydrologiques des mares donnent la possibilité de connaître le terme souterrain du bilan hydrologique régional.

Un terme secondaire du bilan hydrologique des mares, la reprise évapo-transpiratoire dans les sols adjacents à la mare, et l'approximation de l'occupation des différents systèmes endoréiques par exemple, devront être précisées pour améliorer l'estimation de la recharge annuelle.

Si cette étude permet de distinguer l'infiltration à partir des mares comme le principal processus de la recharge, il ne donne pas la possibilité de caractériser les autres processus de la recharge (plus lent) comme par exemple la redistribution à partir des zones de plateau ou encore l'infiltration dans les zones d'épandages des réseaux de drainage des petits bassins (souligné dans différentes études : Peugeot et *al.*, 1994 ; Peugeot, à paraître) même si elle ne concerne qu'une très faible part de la recharge annuelle. Enfin, il apparaît que la recharge médiane est faiblement corrélée avec le cumul pluviométrique annuel. En effet, la comparaison des années 1992 et 1993 montre que pour un cumul annuel équivalent (celui de 1993 est inférieur de 6 % à celui de 1992), la recharge annuelle varie de presque 50 %. La comparaison avec d'autres années est tout autant significative. Par exemple en 1992, année pour laquelle les précipitations étaient légèrement inférieures à la normale, la recharge médiane de 0,44 m représente la plus forte recharge annuelle si l'on en croit les estimations apportées par Schroeter (1993) pour la période 1987-1992. La distribution intra saisonnière des précipitations apparaît donc comme un critère plus déterminant dans la variabilité interannuelle de la recharge que le cumul annuel des précipitations.

CHAPITRE 10

PARTICIPATION DES MARES A LA RECHARGE DE LA NAPPE PHREATIQUE

SYNTHESE

Comme l'indiquent les premières études piézométriques de la nappe phréatique (Leduc et Desconnets, 1994b ; Leduc et Lenoir, à paraître) dans l'ensemble du dégré carré, les fortes fluctuations piézométriques sont enregistrées à proximité des mares.

Utilisant le suivi piézométrique comprenant une trentaine de points de mesures dans la zone d'étude des mares (600 km²), une classification des réactions piézométriques intrasaisonnières met en évidence trois grands types de comportement de l'aquifère.

30 % des puits observés, se situant à proximité d'une ou de plusieurs mares, enregistrent les plus fortes variations piézométriques au cours de la saison des pluies, entre 1 à 5 mètres d'amplitude selon l'année et la mare. Ils constituent les points de recharge privilégiés de l'aquifère mais ne sont pas généralisés à l'ensemble des mares de vallée.

Des 70 % restants, 55 % des puits observés révèlent des comportements piézométriques sensibles à une recharge latérale issue de la redistribution des eaux localement infiltrées. Ils sont préférentiellement situés en dehors des bas-fonds ou sont éloignés des mares.

Les valeurs médianes des variations piézométriques annuelles, 0,44 m en 1992 et 0,13 m en 1993 coincident avec les tendances observées à partir des bilans annuels des mares de vallée. Spatialement plus hétérogène en 1992 qu'en 1993, les cartes d'égale variation piézométrique montrent que les mares n'ont pas apporté la même contribution à la recharge entre 1992 et 1993. Les amplitudes maximales observées entre ces deux années corroborent ces conclusions.

Considérant la variation piézométrique annuelle médiane, une porosité moyenne du réservoir aquifère de 15 % et une occupation de 80 % de la zone d'étude des mares par les systèmes de vallée (tous systèmes confondus), la recharge de la nappe est estimée à 10 % des préciptations en 1992 et à 3,5 % seulement en 1993. Les lames infiltrées calculées à partir de cinq mares de vallée réprésentatives (2 % de la surface de la zone d'étude) sont proches des estimations de la recharge établies par les variations piézométriques et donnent les mêmes tendances d'une année sur l'autre. Elargies au degré carré (environ 300 puits), les variations piézométriques médianes annuelles de la nappe sont du même ordre de grandeur, de 0,6 m en 1992 et de 0,02 m en 1993, que dans la zone d'étude et prouvent le rôle majeur des mares dans les processus de recharge à l'échelle régionale.

Plus particulièrement mise en oeuvre pour évaluer le rôle des mares à l'échelle régionale, cette étude constitue une première approche dans la régionalisation du bilan hydrologique. Elle devra être précisée par des études plus complètes des processus de recharge, participation des plateaux et des zones de mi-versants (ravines et zones d'épandages des écoulements de surface), et la connaissance des paramètres indispensables pour évaluer la recharge à l'échelle régionale, notamment la variabilité des caractéristiques hydrodynamiques de l'aquifère et l'occupation réelle des systèmes endoréiques de vallée.

CONCLUSION
PERSPECTIVES

CONCLUSION PERSPECTIVES

Développée dans le cadre de l'expérience (hydrologique) HAPEX-Sahel sur le degré carré de Niamey (2-3°E ; 13-14°N), cette étude a été mise en place pour étudier les processus de redistribution des eaux de surface et contribuer à l'établissement du bilan hydrologique du degré carré.

Elle est réalisée au sein d'une région où la dégradation des réseaux hydrographiques rend inopérantes des approches hydrologiques classiques (intégration du bilan régional à partir des écoulements en rivière). Aussi, la démarche a consisté à étudier ces processus à partir des nombreuses mares temporaires qui drainent une grande partie des eaux de surface soit par ruissellement direct soit comme exutoires des ravines où sont concentrés les écoulements.

Ceci a impliqué une stratégie expérimentale à deux niveaux:

- l'étude des processus à l'échelle de la mare
- l'intégration du bilan sur un sous-ensemble homogène de 600 km² (niveau - 13°29.21' - 13°40.0' N en latitude et 2°33.33' - 2°50.0 E en longitude).

SYNTHESE DES PRINCIPAUX RESULTATS

L'inventaire réalisé en 1991 et complété en 1992 a permis d'identifier plus d'une soixantaine de mares temporaires dans la zone d'étude. Elles sont réparties préférentiellement sur les plateaux à cuirasse ferrugineuse (39), les lits des anciens cours d'eau actuellement non fonctionnels (11) et les bas-fonds de vallée « verrouillée » par les sables (6).

Les trois types d'endoréismes correspondant à ces trois situations géomorphologiques présentent des caractéristiques pédologiques, morphologiques et géologiques bien distinctes dont les principales sont les suivantes :

- endoréisme de plateau : un bassin versant de faible dénivelée (< 3 m) et n'excédant pas 1 km², assis sur une cuirasse ferrugineuse compacte à faible profondeur ; une mare tapissée par une couche de sédiments sablo-argileux colmatants (plus de 50 % de la superficie de la cuvette), d'une capacité volumique d'une dizaine de milliers de m^3,
- endoréisme de vallée (mare installée dans les lits de cours d'eau) : un bassin versant de superficie variable, 0.5 à 3 km², avec une dénivelée supérieure à 20 m, assis sur quelques mètres de sédiments sableux ; une mare d'une capacité volumique de plusieurs dizaines de milliers de m^3 tapissée par une couche de sédiments argilo-sableux colmatants (moins de 10 % de la superficie de la cuvette);
- endoréisme de cuvette : un bassin versant aux caractéristiques identiques au précédent mais drainant des surfaces nettement plus étendues (de l'ordre de 10 km²) ; une mare d'une capacité volumique d'une dizaine à une centaine de milliers de m^3 plate et ayant une couche colmatante nettement inférieure à 10 % de la superficie du lit.

Les processus de déstockage

L'analyse des chroniques limnimétriques au cours d'une séquence de vidange montre qu'en saison des pluies la vidange des mares est essentiellement induite par un processus d'infiltration. Son intensité est variable. En effet, la dynamique de vidange dépend, d'une part, du volume de la crue et, d'autre part, de l'extension latérale et verticale des sédiments argileux qui tapissent le lit de la mare.

Le régime des mares de plateau est caractérisé par des vitesses de vidanges instantanées allant de 1 à 15 cm/j. En revanche, les mares de vallée installées sur des matériaux plus perméables ont des vitesses de vidangenettement plus élevées pouvant atteindre jusqu'à 100 cm/j.

La dynamique de vidange est reconstituée par un modèle qui prend en compte l'évolution de la perméabilité du lit de la mare. Deux phases sont identifiées :

- une phase à cinétique rapide, où l'infiltration est le terme principal, correspondant au déstockage dans les zones perméables,
- une phase à cinétique lente, où l'évaporation est le terme principal, correspondant au déstockage dans les zones colmatées.

Effectuée durant la saison sèche, l'estimation de la reprise évaporatoire directe a été entreprise par la comparaison de trois méthodes : l'estimation sur bac (in situ et bac de classe A), la méthode chimique et la méthode isotopique. Mieux adaptée, la méthode isotopique a été prise pour référence. Elle permet d'estimer une évaporation égale à 30 % du bilan saisonnier des mares de vallée et à 70 % de celui des mares de plateau. La modélisation de l'évolution isotopique saisonnière offre la possibilité de calculer le rapport moyen entre l'évaporation de la mare et celle mesurée sur bac de classe A (Niamey-Aéroport) dont les valeurs sont de 0,4 à 0.5 (mare de vallée) et de 0,6 à 0.7 (mare de plateau). Ils permettent l'extension du bilan hydrologique à l'ensemble des mares de la région.

Les processus de redistribution

La présence d'une induration ferrugineuse au sommet des plateaux apparaît comme le facteur limitant de la redistribution des eaux d'infiltration vers les niveaux inférieurs. Le stockage des eaux dans les niveaux superficiels alimente essentiellement le cordon de végétation lié à la mare. La densité et le développement exceptionnels de certaines espèces arborées atteste de l'importance de la reprise évapotranspiratoire.

Le suivi de la redistribution des eaux à partir des mares de vallée (suivi piézométrique et/ou neutronique) montre que la majeure partie des volumes (souvent plus de 90 %) transitant dans les mares percolent à travers les sédiments sableux et vont réalimenter la nappe phréatique.

La rapidité des transferts et leur impact sur la recharge de la nappe sont spatialement variables :

- dans les mares installées dans les lits des cours d'eau, c'est essentiellement les volumes infiltrés dans les zones perméables qui contribuent à la recharge de la nappe. Le drainage rapide dans plusieurs mètres de sédiments sableux est estimé à 80 mm/j pour une des mares. Les suivis piézométriques à proximité de plusieurs mares montrent que les réactions locales de l'aquifère sont d'amplitudes variables d'une mare à l'autre, d'une dizaine de cm à plusieurs mètres, et se manifestent tout au long de la saison des pluies.

- dans les mares de cuvette, on constate que la totalité des eaux concentrées dans la mare percolent à travers une grande épaisseur de sédiments sableux par des chemins d'écoulement préférentiels. *A priori*, indépendants des conditions d'humidité, ces transferts existent à chaque crue. Observé sur un seul site, il reste à démontrer la représentativité d'un tel phénomène.

Les volumes transitant vers les mares et leur variabilité interannuelle

Etablie pour 5 systèmes endoréiques de plateau et 7 systèmes de vallée, l'estimation des lames écoulées met en évidence un transit des eaux pluviales vers la mare variant de 0,1 à 34 % selon le bassin et la saison.

Les mares de plateau concentrent en moyenne plus de 20 % des précipitations. De superficie peu étendue et sur substrat imperméable, ces systèmes ont un comportement hydrodynamique de surface qui est essentiellement lié à la hauteur des événements pluvieux et à leur intensité maximale. De ce fait, la variabilité interannuelle du coefficient de ruissellement est faible (coefficient de variation inférieure à 25%).

Les bassins d'alimentation des mares de vallée, de superficie très variable allant de 0,5 à 30 km², sont caractérisés par des comportements hydrodynamiques de surface à forte variabilité annuelle et interannuelle. S'ajoutant à la dégradation du réseau de drainage, le caractère perméable des sédiments sableux donne un régime des écoulements fortement dépendant des conditions initiales d'humidité. Cela se traduit par des coefficients de ruissellement annuel généralement inférieurs à 10 % et un coefficient de variation interannuel élevé (souvent supérieur à 50 %).

La lame infiltrée annuelle représente, en moyenne, 76 % des écoulements des endoréismes de plateau dont la redistribution est limitée aux niveaux superficiels et plus de 95 % des écoulements de vallée qui vont transités vers la nappe phréatique.

Les relations pluie/lame écoulée/lame infiltrée sont établies par deux modèles empiriques (le modèle du Soil Conservation Service et un modèle linéaire). La prédétermination des lames écoulées par cette approche apparaît peu satisfaisante pour les bassins versant sur substrat sableux. En effet, l'analyse des crues pour des conditions d'humidité extrêmes et des pluies de faible hauteur révèlent des discontinuités de comportement. Elles semblent liées au découpage du réseau de drainage par les zones d'épandage et au fort micro relief qui segmente le bassin.

La recharge annuelle de la nappe phréatique dans la zone d'étude des mares

En considérant comme négligeable la contribution des zones de plateaux (zones endoréiques et zones non drainées par les mares) à la recharge de la nappe, la régionalisation du bilan annuel nous permet de quantifier de manière très correcte la réalimentation de la nappe par les pluies. Par la comparaison de l'impact piézométrique (en 1992 et 1993) au bilan hydrologique de surface, le rôle majeur des mares dans la recharge régionale de la nappe apparaît clairement. L'observation de la nappe sur l'ensemble du degré carré (plus de 300 puits) apportent les mêmes conclusions.

D'environ 10 % des précipitations (500 mm) en 1992 et inférieure à 5 % (470 mm) en 1993, la réalimentation annuelle de la nappe s'avère beaucoup plus dépendante de la distribution intra-saisonnière des précipitations que de sa hauteur annuelle. Effectivement, la remontée piézométrique observée ces huit

dernières années montre que c'est à la faveur d'un régime de précipitations très irrégulier (1992 par exemple), et caractérisé par un fort cumul pluviométrique concentré sur un faible période, que l'on enregistre une recharge maximale.

Limites de cette étude

- dans l'espace : représentant environ deux tiers du degré carré de Niamey, la région dans laquelle a été réalisée cette étude correspond à un ensemble géomorphologique, la séquence des « vallées sèches » identifiée par Gavaud (1966), avec un mode de fonctionnement hydrologique qui résulte en grande partie du modelé de terrain et de la désorganisation partielle des réseaux hydrographiques. L'endoréisme de petite échelle (de l'ordre du km²) en fait sa spécificité. Il serait hasardeux d'extrapoler le mode de redistribution des eaux à d'autres régions. Pour cela, il suffira d'évoquer l'affleurement de la nappe phréatique en saison des pluies dans le Dallol Bosso (grande vallée fossile à l'est du degré carré), ou encore les grands recouvrements sableux qui sont associés à des systèmes dunaires orientés NE/SW (frange nord du degré carré) pour comprendre les implications de tel caractère hydrogéologique ou morphologique dans le cycle de l'eau de ces ensembles.

- dans le temps : la violence des précipitations et l'aridité du climat donne au milieu physique une fragilité qui a été mise à rude épreuve ces dernières années (1992 et 1994). Nous avons pu ainsi assister à des transformations aussi extraordinaires qu'instantanées de l'organisation des écoulements de surface (réseau de drainage et mare). Elles se sont souvent soldées par la création de nouveaux réseaux de drainage ou le déplacement d'une mare (en aval) ou la création d'une autre (en amont). Loin d'être rattaché au caractère exceptionnel de ces années d'observations, ces transformations majeures, à l'échelle du bassin versant, exprime la fragilité de l'organisation hydrologique de surface telle qu'on l'a caractérisée et paramétrisée. C'est avec quelques précautions que les relations établies sur des observations échelonnées sur trois ans pourront être utilisées dans un cadre extérieur à celui de l'étude.

Des grands traits de l'hydrologie régionale de surface, on retiendra que les écoulements de surface sont faibles et limités à leur bassin de production à la fois par le relief modéré et la couverture du Continental Terminal par les sables éoliens du paysage actuel. La mare est le principal exutoire des petits bassins endoréiques autour desquels s'organise la structure hydrographique régionale. Les eaux concentrées vers les mares varient de 5 à 20% des précipitations en fonction de la distribution temporelle des pluies. Dans les endoréismes de vallée sableuse, ce mode de redistribution favorise l'infiltration et le transfert des eaux de surface jusqu'à la nappe et constitue la principale recharge de l'aquifère.

PERSPECTIVES

Ce travail constitue une étape intermédiaire dans la modélisation des principaux processus hydrologiques de surface. Les relations empiriques établies entre les précipitations, l'écoulement de surface et l'infiltration dans la mare permettent déjà d'évaluer la partition des eaux de surface aux échelles de temps et d'espace pertinentes (échelle de l'événement et du système endoréique).

Toutefois, il serait intéressant de préciser les transferts entre les mares et la nappe et les comportements hydrodynamiques de surface des bassins endoréiques sur substrat sableux. Il faudrait, d'autre part, mettre en place une méthode d'extension du bilan hydrologique afin d'aboutir à une quantification plus précise de la contribution des mares à la recharge de la nappe.

A l'échelle locale (étude des processus)

En premier lieu, l'accent doit être mis sur l'étude des modes de transfert surface-souterrain et leur modélisation.

En ce qui concerne les mares de plateau, cela implique une connaissance approfondie de la nature et la distribution spatiale des horizons indurés et compacts. Un bilan hydrique dans les compartiments pédologiques adjacents au plan d'eau permettrait d'apprécier et quantifier l'évapotranspiration.

Pour les mares de vallée, la connaissance des propriétés hydrodynamiques des niveaux inférieurs semble nécessaire pour préciser et modéliser les transferts verticaux à travers les matériaux sableux. Dans le cas du système endoréique de Sama Dey, elle pourrait être accompagnée d'une prospection pédologique indispensable pour révéler le chemin des écoulements vers la nappe.

En second lieu, la prédétermination des crues par une approche globale (modèle pluie-lame écoulée) a montré ces limites dans les endoréismes de vallée. L'utilisation des informations topographiques (modèle numérique de terrain), pédologiques (carte des états de surface) et hydrographiques, déjà disponibles, permettront d'entrevoir plus précisément le rôle des zones d'épandage dans l'infiltration des écoulements, les surfaces réellement drainées par la mare en fonction des conditions d'humidité et de pluviométrie.

A l'échelle régionale (spatialisation du bilan hydrologique)

Plusieurs étapes sont indispensables pour réaliser une extension spatiale plus réaliste des modes de fonctionnement et du bilan hydrologique de surface. Nous citerons, notamment :

- la validation du fonctionnement hydrologique en dehors de la zone d'étude des mares,
- la formalisation de la typologie des systèmes endoréiques par la définition de critères et le choix de paramètres décrivant les principaux objets et processus tels que la forme des cuvettes des mares, leurs caractéristiques hydrodynamiques de surface, la densité de drainage des systèmes endoréiques,.
- la détermination des surfaces occupées par les systèmes de plateau et de vallée,
- l'importance des zones non drainées par les mares.

Elles devront confirmer la typologie des fonctionnements des systèmes endoréiques et permettre d'établir leur cartographie.

Les données acquises lors de l'expérience HAPEX-Sahel tant à l'échelle locale (topographie, pluviométrie, limnimétrie, humidimétrie et piézométrie) que régionale (photographies aériennes, scènes SPOT à différentes dates, cartographie des états de surface et de la végétation) offrent la possibilité de mener à bien cette phase de spatialisation.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Albergel J., 1987: Génése et détermination des crues au Burkina Faso. Du m² au km², étude des paramètres hydrologiques et de leur évolution. Thèse de doctorat de l'université de Paris 6. 341 p.

Ambouta K., 1984 : contribution à lédaphologie de la brousse tigrée de l'Ouest Nigérien. Thèse de doctorat de l'université de Nancy 1. 116 p.

Araujo de Moura G., 1992 : Modelizaçao da evaporaçao de açudes considerando o fenomeno de adcecçao localizada. Relatorio para pos graduaçao em engenheria mecanica, Universidade federal da Paraïba (Joa pessao).82 p.

Aubreville A., 1949: Climats,forêts et désertification de l'afrique tropicale. Soc. Edit. Géogr. Marit. Colon., Paris, 351p.

Bangré M. A., 1992 : Indicateurs biologiques du fonctionnement hydrologyque de quelques mares sahéliennes (Banizoumbou, Niger). Mémoire de fin d'étude, Ingénieurs des techniques agricoles - Université des Sciences de Niamey. 51p.

Ben- asher J., Humborg G., 1992 : A partial contributing Area model for linking rainfall simulatio data with hydrographs of a small arid watershed. Water Resources Research, Vol 28, n°8, 2041 - 2047.

Boeckh E., 1965 : Contribution à l'étude hydrogéologique de la zone sédentaire de la République du Niger. Rapport BRGM DAK65-A20, Dakar.

Boemare A, 1992 : Bilan hydrologique du bassin versant de Wankama. Rapport de stage 2ème année ISIM. Niamey. 18 p.

Boulet G., 1993 : Rapport de stage école Normale Supérieure de Lyon, Niamey. 29 p.

Boulet R., Nascimento N.S, 1991 : Rapport de mission au Niger. Rapport multigraphié, ORSTOM, 13 p.

Bromley J., Brouwer J., Gaze S. (à paraître). : The semi-arid groundwater recharge study (SAGRE). In : Hydrologie et météorologie de méso-échelle dans Hapex-Sahel : dispositif de mesures au sol et premiers résultats. Ed ORSTOM, Paris *(sous presse).*

Bromley J., Edmunds M., Fellman E. And Sudlow J (à paraître) : Rainfall inputs and solute profile to the deep unsatured zone of the Sahel. *(Soumis au Journal of Hydrology)* .

Brunel J.P. Bouron B., 1994 : Evaporation des nappes d'eau libre en Afrique sahélienne et tropicale. rapport CIEH /ORSTOM.342 p.

Brutsaert W, 1982 : Evaporation into atmosphere. Kluwer Academic Publishers. 299 p.

Cadier E, 1981 : Bacia representativa do Riacho do Navio. relatorio final. ORSTOM/SUDENE. Recife.

Carmouze J.P., 1976 : La régulation hydrogéochimique du lac Tchad. Coll. Travaux et Documents de l'ORSTOM n°58. 418 p.

Chaperon P., 1970 : Projet de mise en valeur du Dallol maouri. Etude hydrologique, campagne 1969.Rapport terminal ORSTOM.55 p.

Chevallier P., Claude J., Pouyaud B., Bernard A., 1985 : Pluies et Crues au Sahel, hydrologie de la mare d'Oursi (Burkina Faso) 1976 - 1981. Ed. ORSTOM, Paris.

Chevallier P., Lointier M., Lortic B., 1986 : Water levels of a sahelian lake (mare d'Oursi Burkina Faso). Hydrologic applications of space technology (proceedings of the Cocoa beach workshop, Florida) AIHS Publ. n°160 : pp 99- 107.

Chevallier P., 1990: Complexité hydrologique du petit bassin versant. Exemple de Booro-Borotou (Côte d'Ivoire). Thèse de doctorat de l'université de Montpellier 2. Coll. Etudes et Thèses, ORSTOM. 331 p.

Cogels F.X., Gac J.Y., 1986 : Etude chimique des eaux du lac de Guiers et leur évolution annuelle (Sénégal). Approche des mécanismes de la régulation hydrogéochimique. Géodynamique, Ed. ORSTOM : Vol 1 n°2, pp 121 - 134

Cogels F.X., 1984 : Etude limnologique d'un lac sahélien : le lac de Guiers (Sénégal). Thèse de Doctorat, fondation Universitaire Luxembourgeoise, Arlon (Belgique), 329 p.

Cogels F.X., Dacruz evora N., Gac J.Y., 1991 : L'évaporation du lac de Guiers (Sénégal) de 1976 à 1989. Bilan et essai d'interprétation.Rapport multigraphié, 40 p.

Colin-Kaczala C., 1986 : Profils istopiques (oxygène 18 et deuterium) de fluides (au liquide, vapeur et CO_2) de la zone non satutrée en cliamt desertique : Application à l'évaluation des nappes libres au Sahara Nord occidental. Thèse de Doctorat en sciences, Un. de Paris-sud. 171 p.

Courel M.F., 1984 : Etude de l'évolution récente des milieux sahéliens à partir des mesures fournies par les satellites. Thèse de doctorat d'état ès lettres et sciences humaines. Université de Paris I. 407 p.

Courrault D., D'Herbès J.M., Valentin C., 1990 : Le bassin versant de Sama Dey. Premières observations pédologiques et phyto écologiques. Rapport multigraphié, ORSTOM. 37p.

Craig H., Gordon L.I., 1965 : ^{2}H and oxygen ^{18}O variations in the Ocean and marine atmosphere. In Stables isotopes in Oceanographics studies and paleotemperatures, CNR, laboratorio di geologia nucleare, Pisa. pp 9-130.

D'Herbès J.M., Courrault D. Timouk F. Valentin C., 1992 : Spatiocarte des états de surface du dégré carré (Hapex Sahel). ORSTOM, programmes HAPEX/SALT.

Davies B., Gasse F., 1988 : African wetlands and shallow water bodies. zones humides et lacs peu profonds d'Afrique : Bibliographie. Ed. ORSTOM, Collection Travaux et Documents. 500 p.

Desconnets J.C., Taupin J.D, 1992 : Etude des zones endoréiques en zone sahélienne : rapport de la campagne 1991 et premiers résultats. Rapport ORSTOM/DRE. 25 p

Desconnets J.C, Taupin J.D., Lebel T., 1993 : Le rôle des mares dans le bilan hydrologique d'une région sahélienne, in Bolle H-J., Feddes, R.A. and Kalma J. (éditors). Exchange processes at the land surface for a range of space and time scales (proceedings of the Yokohama symposium, july 1993). AIHS Pybl. n°212, pp 299-311.

Desconnets J.C, Taupin J.D, 1993 : Comparison of various methods for estimating pools evaporation in the Sahel during the rainy season. In Becker A., Sevruk B. and M. Lapin (editors). Evaporation, Water balance and deposition (proceedings of the international symposium on précipitation and evaporation. Bratislava, september 1993, Vol 3, pp 62-67). printed by Slovak Hydrometeorological Institute.

Desconnets J.C, Lebel T., Taupin J.D, (à paraître) : Bilan hydrologique régional à partir du suivi des mares temporaires sur une zone test de 600 km². Objectifs et résultats préliminaires. HAPEX SAHEL 1992 expérimentations et résultats sur le degré carré d'HAPEX-Sahel Lebel T. (editeur), Hydrologie et météorologie de méso-échelle dans HAPEX-Sahel : Dispositif de mesures au sol et premiers résultats, Ed. ORSTOM *(sous presse)*

Desconnets J.C., Taupin j.D., Lebel T., Leduc C., (à paraître) : Hydrology of HAPEX-Sahel Super-Site : Surface water drainage and aquifer recharge through the pools systems. *Soumis au Journal of Hydrology.*

Estèves M., 1994 : Cartographie d'unités hydrologiques homogènes et modélisation hydrologique, exemple de l'expérience HAPEX-Sahel. Annales des Xèmes journées hydrologiques de l'ORSTOM, 13-14 septembre 1994. Montpellier. *(Sous presse)*

Estèves M., Lenoir F., 1994 : Un exemple de fonctionnement hydrologique dans la région de Niamey : le bassin de Sama Dey. Annales des Xèmes journées hydrologiques de l'ORSTOM, 13-14 septembre 1994. Montpellier. *(Sous presse)*

Fontes J.CH., 1976 : Isotopes du milieu et cycles des eaux naturelles: quelques aspects. Thèse de Doctorat d'état ès sciences naturelles, université de Paris 6, 208 p.

Gadelle F., 1989 : Hydraulique pastorale et rurale. Le surcreusement des mares. Coll. Maitrise de l'eau. 122 p., 11 graph., 13 tabl.

Galle S., (à paraître) : Distribution spatiale du stock hydrique sur le bassin versant de Banizoumbou : premiers résultats de la campagne 1992. Objectifs et résultats préliminaires. HAPEX SAHEL 1992 expérimentations et résultats sur le degré carré d'HAPEX-Sahel Lebel T. (editeur), Hydrologie et météorologie de méso-échelle dans HAPEX-Sahel : Dispositif de mesures au sol et premiers résultats, Ed. ORSTOM *(sous presse)*

Gautier M., 1988 : Bilan de fonctionnement du capteur SPI II sur une période de 11 mois en zone tropicale. Rapport ORSTOM, 12 p

Gavaud M, 1966 : Etude pédologique du Niger Occidental. Rapport général. Monographie des sols. Carte des sols au 1/500 000. ORSTOM.

Gavaud M, 1975 : Les grands traits de la pédogénèse au Niger Méridional. Ed. Travaux et Documents de L'ORSTOM.101 p.

Géo regards :. cahiers de l'institut de géographie, n°18. Université de Neuchatel. Suisse.

Gilard O., 1985 : Petits barrages en terre au Burkina Faso. Rapport de stage ENGREF. 134 p.

Girard G., 1966 : L'évaporation d'une nappe d'eau libre dans le bassin du Jaguaribe. Paris, ORSTOM, 45 p.

Gonfiantini R. 1986: Environnemental isotopes in lake studies., Fritz et Fontes (éditeurs). Handbook of Radio isotopes, vol. 2, pp 113-165.

Goutorbe J.P., Lebel T., Tinga A., Bessemoulin P., Brouwer J., Dolman H., Engman E.T., Gash J.H.C., Hoepffner M., Kabat P., Kerr Y.H., Monteny B., Prince S., Saïd F., Sellers P., Wallace J., 1994 : A large scale study of land atmosphere interactions in the semi arid tropics. Annales Geophysicae, 12, pp 53-64.

Goutorbe J.P., Lebel T., Tinga A., Bessemoulin P., Brouwer J., Dolman A.J., Engman E.T., Gash J.H.C., Hoepffner M., Kabat P., Kerr Y.H., Monteny B., Prince S., Said F., Sellers P. and Wallace J.S., 1994 : Hapex-Sahel, a large scale study of land-atmosphere interactions in the semi-arid tropics. Ann. Geophysicae 12, pp 53-64.

Green W.H., Ampt C.A., 1911 : Studies on soil physics, 1. Flow of air and water through soils. Journal of Agriculture Sciences 4: pp 1- 24.

Greigert J., 1966 : Description des formations crétacées et tertiaires du bassin des Iullemeden (Afrique Occidentale), Mémoire BRGM. 208 p.

Greigert J., Bernert G., 1979 : Atlas des eaux souterraines du Niger, état des connaissances (mai 1978). Tome 1, fascicule 5 : les nappes du Continental Terminal du synclinal de Dogondoutchi. Rapport BRGM 79/AGE/001, 22 p.Orléans.

Griffiths J.F., 1972 : Climates of Africa. World survey of climatology, Vol 10. Elsevier Publisher Comp., Amsterdam. 599 p.

Guiero Y., 1989 : Les sols de la vallée du Moyen Niger : Organisation - Tendance évolutive actuelle. SOLTROP 1989, Ed. Colloques et Seminaires, ORSTOM. p. 193 - 211.

Harbeck G.E. jr, 1962 : A pratical field technique for measuring reservoir evaporation utilizing mass-transfer theory. U.S. geology Surv. Prof. Paper. 227-E. pp 101-105.

Hillel, 1974 : L'eau et le sol : Principes et processus physiques Ed. Vander. 288 p

Ibiza D., 1972 : Mesure de l'évaporation d'un lac en milieu sahélien. lac de Bam. Cahiers Hydrologie de L'ORSTOM. Vol IX n°3. pp 47-64

Kolher M., Linsley R.K., 1951 : Predicting the runoff from storm rainfall. Weather Bureau, U.S. Dept. of commerce, Washington, Research Pap. n°34, p.

Lacrouts F., 1992 : Etude de la composition isotopique des pluies dans la région de Niamey.Essai de caractérisation de la variabilité spatiale à petite échelle. estimation de l'évaporation/infiltration par la méthode isotopique. Mémoire de DEA, Laboratoire d'Hydrologie et de Géochimie isotopique, Université deParis XI. 31 p

Lamotte M.,1992 : Etude pédologique en vue d'un suivi hydrique sur le bassin versant de Sama Dey (Niger). Rapport de Mission multigraphié, ORSTOM. 8 p

Laraque A., 1991 : Comportements hydrochimiques des açudes du Nordeste Brésilien semi-aride, évolutions et prévisions pour un usage en irrigation. Thèse de doctorat 3ème cycle, Univ. de Montpellier II. 324 p.

Le Barbé L. Lebel T., 1993 : Réflexions pour un programme ORSTOM sur le cycle de l'eau à la méso-échelle. Multigraphié ORSTOM Niamey. 32 p

Le Gal La Salle C., 1990 : Etude des précipitations nigériennes. mémoire de D.E.A, université de Paris XI, LHGI. 52 p.

Lebel T., 1990a : H comme HAPEX. Hydrologie hors bassin versant. Annales du SEMINFOR IV : . Brest. pp 493-506.

Lebel T., 1990b : Le transfert d'échelle en hydrologie : Concept ou confusion ?. Annales du SEMINFOR IV: . Brest . pp 147-156.

Lebel T. Sauvageot H., Hoepffner M., Desbois M., Guillot B., Hubert P., 1992 : Rainfall estimation in the Sahel : the EPSAT NIGER experiment. Hydrol. Sc. J. 37(3), pp 201-215.

Lebel T. Taupin J.D. Gréard M., (à paraître) : Rainfall monitoring : The EPSAT NIGER set up and its use for HAPEX Sahel in Hydrologie et Météorologie de Méso échelle dans HAPEX Sahel : Dispositif de mesure au sol et Premiers résultats Ed. ORSTOM *(sous presse)*.

Leduc C., Desconnets J.C (1994 a) : Pools and recharge of the Continental Terminal phreatic aquifer near Niamey, Niger. In : Groundwater monitoring and recharge in semi-arid areas, Proc. International workshop Hyderabad, UNESCO-IAH, pp SV13-SV22.

Leduc C., Desconnets J.C (1994 b) : Variability of groundwater recharge in sahelian climate : piezometric survey of the Continental Terminal aquifer near Niamey (Niger). In : Future Groundwater Resource at Risk (Soveri & Suokko ed.), Proc. Helsinki conference, IAHS publ. n° 222, pp 505-511.

Leduc C., Karbo A. (1994) : Variabilité spatio-temporelle de l'impact de l'infiltration sur la nappe phréatique du Continental Terminal (HAPEX-Sahel, Niger). Annales des Xèmes journées hydrologiques de l'ORSTOM, 13-14 septembre 1994. Montpellier. *(Sous presse)*

Leduc C., Bromley J., Schroeter P., (à paraître) : Groundwater recharge in tne semi-arid climate : somes results of the HAPEX-Sahel hydrodynamic survey (Niger) *soumis au journal of Hydrology*.

Leduc C., Lenoir F. (à paraître) : Etude de la recharge de la nappe du Continental Terminal 3 en rive gauche du Niger dans Hydrologie et météorologie de méso-échelle dans Hapex-Sahel : dispositif de mesures au sol et premiers résultats. Ed ORSTOM, Paris *(sous presse)*.

Leroux, 1983 : Le climat de l'Afrique tropicale. Ed. Champion, Paris. 633 p.

Majoube M., 1971 : Fractionnement isotopique, oxygène 18 et en deutéium entre l'eau et sa vapeur. J Ch. Phys. tome 68, pp 1425 - 1435.

Makkink G.F., 1956 : The application of research on evaporation in hydrology in Symposia Darcy (Dijon, 20-26 september 1956). Tome I Evaporation. AIHS Publ. n°40.

Molle F., 1991 : Caractéristiques et potentialités des açudes du Nordeste Brésilien. Thèse de Doctorat. Université de Montpellier II. 380 p.

Monier T., 1991 : Méthodes d'utilisation des images satéllitaires SPOT pour le suivi et la gestion des plan d'eau au Sahel. Mémoire de fin d'étude. Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne. 73 p.

Morton F.I, 1983 : Operationnal estimates of lake evaporation. Journal of Hydrology, 66. pp. 1-76.

Nagumo F., 1992 : Pédological environment and agro-ecological system of the Sudano- Sahelian zone, in West Africa. Mémoire de fin d'étude, Graduate School of environment sciences, Hokkaido University, Japan. 75 p.

Philip J.R, 1969 : Theory of infiltration. In advances in Hydroscience, vol. 5 edited by Academic Press, New York. pp 215 - 296.

Philip J.R, 1992a : Falling head ponded infiltration. Water Resouces Research, vol. 28 n°8 : pp 2147 - 48.

Philip J.R, 1992b : Falling head ponded infiltration with evaporation. Journal of Hydrology, 138 (1992) : pp 591 - 598.

Plummer L.N, Jones B.F,. Truuesdel A.H., 1976 : WATEQF, a fortran 4 version of wateq, a computer programm for calculing chemical equilibrian of natural water. U.S. geol. Survey. Water Resources invest. pp 76 -113.

PNUD/DTCD, 1990 : Atlas ressources en eaux souterraines du Continental Terminal NER 86001. Niamey, Niger. 42 p

Pouyaud B., 1986 : Contribution à l'évaluation de l'évaporation de nappes d'eau libre en climat tropical sec. Exemples du lac de Bam et de la mare D'oursi (BURKINA-FASO), du lac Tchad et d'açudes du Nordeste brésilien. Thèse de doctorat d'état ès sciences naturelles.Université Paris-sud. Collection Etudes et Thèses, Ed. ORSTOM, Paris. 254 p.

Radji G., 1991 : Etude des régimes pluviométriques du Niger : caractéristiques des distributions mensuelles et variations observées au cours des 40 dernières années. Mémoire de fin d'études d'ingénieur d'application en hydrologie. Centre Agrhymet Niamey. 53 p.

Ralws W.J, Brakensiek D.L., Miller N., 1983 : Green -Ampt parameters from soil data. Am. Soc. Civ. Eng., Vol 109 n°1, pp 62 - 70.

Riou C., Dubois G.J., 1966 : L'utilisation des bacs à évaporation sous climat sahélien. Cah. ORSTOM, serv. Hydro., n°5. pp 45-65

Riou C., 1975 : la détermination pratique de l'évaporation. Application à l'Afrique Centrale. Edit. Mémoires ORSTOM. Paris, 231p.

Riou G, 1989 : L'eau et les sols dans les géosystèmes tropicaux. Ed Masson, Paris. 211 p.

Roche M., 1958 : Etat actuel des études d'évaporation en Afrique noire Française. Ed. ORSTOM, Paris. 21 p

Rodier J.A., 1975 : Evaluation de l'écoulement annuel dans le Sahel tropical africain. Coll. Travaux et Documents de l'ORSTOM. Ed. ORSTOM. 121 p.

Clapp R.B., Hornberger G.M., 1978 : Empirical equations for some soils hydraulic properties. Water Resources Research, Vol 14 n°4 : pp 601 - 604.

Roux C., 1990: EPSAT NIGER, campagne 1989. Rapport ORSTOM/DMN. 38 p.

Roux F., 1987 : Les lignes de grains de COPT81 : environnement, précipitations, cinématique et Thermodynamique. Thèse de doctorat d'état, Université de Paris 7. 368 p.

Roux F., 1988 : The West Africa squall line observed on 23 june 1981 during COPT81 : kinematics and thermodynamics of the convective region. J. Atmos. Sc. N°45, pp. 2949-2972.

Salati E. Leal J. de M Campos M.M., 1979 : Isotopos ambientais aplicados a um estudo hidrologico do Nordeste brasiliero. Recife. SUDENE DRN, 55 p.

Schroeter P., 1993 : Les fluctuations des niveaux d'eau dans les nappes du Continental Terminal et de la formation du Tchad. Niamey, Niger. 17 p.

Singh V.P., 1989 : Hydrologics systems, Watershed modeling. Volume II. ed. PRINTACE HALL international, London. 320 p.

Stewart R.B., Rouse W.R., 1976 : a simple method for determining evaporation from shallow lake and ponds. Water Ressour. Res., 12. pp. 623-628.

Taupin J.D., 1990 : Evaluation isotopique de l'évaporation en zone non saturée sous climat sahélien, et évolution géochimique des solutions du sol (vallée du Moyen Niger). Thèse de Doctorat. Université de Paris Orsay XI. 172 p.

Taupin J.D., Lebel T., Casenave F., Chiron F., Gathelier R., Gréard M., Gualde R., KONG J,. VALERO T., 1992 : EPSAT NIGER, campagne 1991. Rapport ORSTOM DMN, 86 p.

Taupin J.D., Amani A, Lebel T., 1993 : Small scale spatial variability of the annual rainfall in the Sahel, in BOLLE H.J. FEDDES R.A. KALMA J. (editors), Exchange processes at the land surface for a

range of space and times scales (proceedings of the Ykohama Symposium, July 1993), AIHS Publ. N°212, pp 593-602.

Taupin J.D., Lebel T., Casenave F., Gréard M., Kong J,. Lecocq J. Adamson M. D'amato N. BEN Mohammed A., 1993 : EPSAT NIGER, campagne 1992. Rapport ORSTOM DMN, 98 p.

Taupin J.D., Amani A., Lebel T., 1993 : Small scale spatial variability of the annual rainfall in the Sahel. In : Exchange processes at the land surface for a range of space and time scales (H.J. Bolle, R.A. Feddes & J. Kalma ed.), Proc. Yokohama Symp., IAHS publ. n° 212, pp 593-602.

Taupin J.D. Lebel T., 1994 : Comparison of rainfall measurements between 1.5 m and ground level raingauges in the sahelian zone. rapport ORSTOM, Niamey. 12 p.

Thauvin V., 1992 : Etude de la répartition spatiale des précipitations en milieu sahélien à l'aide du réseau dense de pluviographes de l'expérience EPSAT NIGER. Application à la détermination de la précision des moyennes surfaciques au pas de temps de l'événement pluvieux. Thèse de doctorat de l'Université de Montpellier II. 229 p.

Toucheboeuf de Lussigny P., Billon B., Bouchardeau A., Cheverry C. Dupont B., Lamagat J.P., Maglione G., Riou C., Servant M., Roche M.A., Schneider J.L., 1969 : Monographie hydrologique du lac Tchad. ORSTOM, Paris. 370 p.

Vuillaume G., 1981 : Bilan hydrologique mensuel et modélisation sommaire du régime hydrologique du lac Tchad. Cahiers de l'ORSTOM. série Hydrologie, Vol XVIII n°1. pp 23-72

Webb E.K., 1966 : A pan lake relationship. J. of Hydrology, 4. pp. 1-11.

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : localisation du degré carré avec la position des trois Super Sites (SSCE, SSW et SSS) et de la zone d'étude des mares 2

Figure 2 : extrait de la spatio-carte des états de surface du degré carré de Niamey -(D'Herbès et al., 1992) 5

Figure 3 : pluie moyenne annuelle (1951-1989) sur la région sahélienne avec la position du degré carré (carré en trait plein) 14

Figure 4 : variations saisonnières des principaux paramètres climatiques à la station de Niamey 16

Figure 5 : déficit climatique et l'indice P/Etp à la station de Niamey 18

Figure 6 :distribution mensuelle des pluies à Niamey-ville pour la période 1950-1989 19

Figure 7 : pluies annuelles à Niamey-ville de 1905 à 1990 21

Figure 8 : réseau EPSAT-Niger pour l'année 1992 (extension maximale) avec la position du SSCE (carré en trait plein) et de la zone d'étude des mares (traits pointillés) (Taupin et al., 1993) 21

Figure 9 : isohyétes des cumuls saisonniers sur le degré carré pour les années 1990 à 1993 (d'après Lebel et al., à paraître) 23

Figure 10 : toposéquence caractéristique du bassin versant de Sama Dey (Courrault et al., 1990) 27

Figure 11 : carte des unités hydrologiques du Super Site Central Est (d'après M.Estèves, 1994) 30

Figure 12 : carte piézométrique du degré carré (Leduc et Lenoir, à paraître) 33

Figure 13 : limnigramme partiel d'une mare. 39

Figure 14 : le système Mare-Sol-Atmosphère et ses principales composantes hydrologiques 41

Figure 15 : les variables liées à l'épisode de remplissage et à l'épisode de vidange 45

Photo1 : Panorama d'une partie de la zone d'étude juste après une pluie 51

Photo 2 : vue aérienne d'un système endoréique situé sur un plateau à cuirasse ferrugineuse 51

Photo 3 : vue aérienne d'un système endoréique de vallée sableuse "verrouillée" ou type 1 51

Photo 4 : vue aérienne de deux collecteurs dégradés présentant une succession de mare (Kori de Ouallam vue de gauche, Kori de Dantiandou vue de droite) 52

Photo 5 et 6 : vue aérienne d'un système endoréique de vallée sableuse (type 2) issu de la dégradation des collecteurs régionaux ou type 2 (photo 5) avec un zoom sur les comblements sableux (photo 6) 52

Photo 7 : vue partielle de la vallée fossile du Dallol Bosso 53

Photo 8 : vue partielle d'un système endoréique au nord de la zone d'étude. 53

Figure 16 : localisation des mares suivies en limnimétrie dans la zone d'étude 59

Figure 17 : schéma du dispositif de suivi des niveaux en continu et du dispositif de suivi des niveaux par lecture directe de l'échelle limnimétrique 63

Figure 18 :schéma d'instrumentation du suivi d'humidité à la mare de Wankama 70

Figure 19 : localisation des points de la nappe suivis dans le degré carré (Leduc et Lenoir, à paraître) 71

Figure 20 : erreur relative de la mesure de niveau avec la gamme des hauteurs concernées 73

Figure 21 : test de suivi des niveaux de la sonde piézo-résistive SPI III. Cas de deux régimes de vidange ... 74

Figure 22 : méthode de calcul des volumes (SURFER 4.0, 1989) 76

Figure 23 :erreur volumique relative induite par la modélisation des relations Hauteur-Volume pour l'ensemble des mares. 77
Figure 24 : corrélation entre la pluie au poste Wankama-mare et la moyenne des autres appareils 78
Figure 25 : carte gémorphologique du SSCE (2°36.77'-2°47.88' E ; 13°29.21'-13°40.0'N) avec la localisation des mares suivies 88
Figure 26 : localisation des mares de référence dans leur bassin versant 91
Figure 27 : comparaison des capacités de stockage maximal des mares étudiées 93
Figure 28 : comparaison des indices de compacité Volume/Surface des mares étudiées 94
Figure 29 : profil pédologique dans le point bas (profil 1), dans la zone de transition (profil 2) et dans la zone d'inondation temporaire (profil 3) de la mare de Bazanga 96
Figure 30 : vue transversale et longitudinale schématique de la mare de Bazanga 98
Figure 31 : profil pédologique dans le point bas (profil 1) et dans la zone temporairement inondée (profil 2) de la mare de Wankama 100
Figure 32 : vue transversale et longitudinale schématique de la mare de Wankama 103
Figure 33 : distributons granulométriques de la surface du lit des mares 105
Figure 34 : discontinuité verticale de la distribution granulométrique du lit des mares 106
Figure 35 : coupe transversale et longitudinale du lit des mares de référence 109
Figure 36 : diagramme des pentes du lit des mares de référence 110
Figure 37 : relation cote à l'échelle-volume des mares de référence 114
Figure 38 : erreur relative d'estimation volumique 114
Figure 39 :comparaison de la vidange des mares avec deux vidanges types 121
Figure 40 : la succion capillaire en fonction de la conductivité hydraulique pour quelques sols 123
Figure 41 : la conductivité hydraulique relative en fonction de l'humidité d'un sol 123
Figure 42 :succion capillaire en fonction de l'humidité (dans Singh, 1989) 124
Figure 43 : pourcentage de la surface colmatée (% de la surface à la hauteur d'eau maximale observée) . 127
Figure 44 : perméabilité équivalente théorique en fonction de la surface inondée et de la hauteur d'eau . 129
Figure 45 : évolution des profils d'humidité au cours de la saison (mare de Wankama) 134
Figure 46 :évolution du taux de vidange instantané I_v en fonction du temps et de la hauteur d'eau dans la mare de Bazanga 136
Figure 47 :évolution du taux de vidange instantané I_v en fonction du temps et de la hauteur d'eau dans la mare de Wankama 137
Figure 48 : évolution du taux de vidange instantané I_v en fonction du temps et de la hauteur d'eau dans la mare de Sama Dey 139
..... 145
Figure 49: ajustements des lois de vidange à différents modèles 145
Figure 50 : comparaison des lames cumulées vidangées pour les différents modèles de vidange sur la mare de Bazanga 151

Figure 51 : comparaison des lames cumulées vidangées pour les différents modèles de vidange sur la mare de Wankama 152

Figure 52 : comparaison des lames cumulées vidangées pour les différents modèles de vidanges sur la mare de Sama Dey 153

Figure 53 : relation hauteur d'eau - taux d'évaporation t_{epi} des mares de référence 155

Figure 55 : diagrammes des épisodes de vidange - saison 1991, 1992 et 1993 158

Figure 56 : variation du coefficient de transposition K 166

Figure 57 : variation de l'évaporation journalière du bac de classe A (station Niamey - Aéroport) pour la période avril 1991 - septembre 1993 170

Figure 58 :faciés et évolution chimique des eaux des mares (année 1991) 171

Figure 59 : diagramme oxygène 18-deutérium des eaux des mares lors de l'assèchement 172

Figure 60 : évolution de l'intensité de la vidange au cours de la période d'assèchement 172

Figure 61 : Relations empiriques Ebac Elac établies pour le lac de Bam (Pouyaud, 1986) 173

Figure 62 : comparaison des lames évaporées journalières du bac de classe A, du bac de classe A corrigée et du bac enterré in situ 174

Figure 63 : évaporation cumulée au cours de l'assèchement pour les trois méthodes 175

Figure 64 : évolution des teneurs en sulfates lors de la phase d'assèchement de la mare 177

Figure 65 : évolution de la conductivité et de la teneur en oxygène 18 en fonction de la fraction restante au cours de la phase d'assèchement 177

Figure 66 : comparaison du modèle de Raleigh et des teneurs en oxygène 18 observées à Bazanga (1991 et 1992) 178

Figure 67 : calage du modèle de Craig et Gordon avec le paramètre z en fonction du critère E 181

Figure 68 : comparaison des teneurs en oxygène 18 observées et des teneurs calculées par le modèle de Craig et Gordon de la mare de Bazanga (haut) et de celle de Wankama (bas) 182

Figure 69: schéma du dispositif neutronique à la mare de Wankama 191

Figure 70 : profils d'humidités sous la cuvette de la mare de Wankama 193

Figure 71 : évolution saisonnière (26.05.1993 au 18.8.1993) des stocks d'eau sous la mare de Wankama. 195

Figure 72 : évolution du niveau piézométrique de la nappe à partir de trois puits situés au bords des plateaux à cuirasse ferrugineuse 202

Figure 73 : profils d'humidité à la mare de Bazanga 202

figure 74 : schéma du dispositif piézomètrique à la mare de Wankama 203

Figure 75 : évolution des niveaux de la mare et de la nappe à. 205

Figure 76 : schéma des modalités de transfert de la mare vers la nappe, cas de la mare de Wankama. 206

Figure 77 : évolution des niveaux de la mare et de la nappe à Banizoumbou au cours de l'année 1992. ... 207

Figure 78 : évolution du niveau piézométrique de la nappe à trois mares du kori de Dantiandou 208

Figure 79 : simulation des variations piézométriques à Wankama pour les événements du 13/8/1993 et du 22/8/1993.(piézomètre 1 = source ; piézomètre 2 = point d'observation). 210

Figure 80 : variations du niveau de la mare et de la nappe à Sama Dey village - événement du 19/7/93 ... 212

.....213

Figure 81 : variations du niveau piézométrique de la mare et de la nappe à Sama Dey village pour les crues du 6 au 8/07/93 et du 03/09/93 213

Figure 82 : histogrammes de la durée des averses sur le degré carré-année 1991 et 1992.....222

Figure 83 : isohyètes des événements du 18.07.1992 entre 00h10 et 08h25 223

Figure 84 : cumul des lames journalières à la station de Darey (SSCE) 224

Figure 85 : la lame infiltrée dans la mare au cours du remplissage en fonction de la hauteur d'eau et du débit d'entrée (constant). 227

Figure 86 : exemples d'hydrogrammes à l'éxutoire (mare) des trois bassins endoréiques.....231

.....237

Figure 87 : comparaison des lames écoulées observées-lames calculées pour les différents ajustements testés 237

Figure 90 :valeurs des paramètres α et S de la fonction de production selon la superficie du BV.....239

Figure 91 : hydrogrammes des crues du 27/7/1992 et du 7/7/1993 sur le bassin de Wankama.....241

Figure 92: relation entre les coefficients Kru et les coefficients Kri pour l'ensemble des mares étudiées..252

Figure 93 : coefficient d'infiltration et d'évaporation des mares en fonction de la superficie du système endoréique.....252

Figure 94 : écarts maximaux observés des coefficients de ruissellement Kru et d'infiltration Kri des systèmes endoréiques de référence et témoin.....253

Figure 95 : évolution des lames journalières précipitées et infiltrées pour les années 1992 et 1993 pour le système endoréique de Bazanga.....255

.....256

Figure 96 : évolution des lames journalières précipitées et infiltrées pour les années 1992 et 1993 pour le système endoréique de Wankama.....256

.....258

Figure 97 : relation hauteur initiale de l'épisode de vidange-variation de stock par infiltration et par évaporation de la mare de Bazanga, Wankama et Sama Dey village.....258

Figure 98 : relation lame écoulée -lame infiltrée/évaporée des mares de référence.....260

.....262

Figure 99 : relation lame écoulée -lame infiltrée/évaporée des mares de référence.....262

Figure 100 : évolution du coefficient I_b d'erreur d'estimation de l'évaporation en fonction de la hauteur d'eau initiale de l'épisode de vidange 264

Figure 101 : écart au coefficient d'infiltration Kri calculé en fonction d'une erreur d'estimation de la superficie du bassin versant.....266

Figure 102 : évolution des niveaux piézométriques de 1987 à 1994 au puits du village de Wankama 274

Figure 103 : dispositif piézométrique sur la zone d'étude des mares.....276

Figure 104 : quelques piézogrammes des puits ayant des variations annuelles peu marquées et une amplitude maximale inférieure à 1 mètre (classe 1) - puits d'Habaka, Tondi Kiboro et Fandou béri.....278

Figure 105 : quelques piézogrammes des puits ayant des variations annuelles plus ou moins marquées (amplitude annuelle maximale proche de 1 m) avec un maximum annuel hors de la saison des pluies (classe 2) - puits de Bani Kossey, Maourey Tokobinkani et Kodjiri Bani Kouara 279

Figure 106 : quelques piézogrammes des puits ayant de fortes variations annuelles (amplitude annuelle maximale supérieure à 1 m) avec un maximum annuel au cours de la saison des pluies (classe 3) - puits de Wankama, Karbanga et Tigo Tégui 280

Figure 107 : liaison entre les réactions piézométriques des puits et la position des mares 281

Figure 108 : piézogrammes des puits stués dans la partie sud du kori de Dantiandou 283

Figure 109 : carte d'égale variation du niveau piezométrique annuel pour les années 1992 et 1993 sur la zone d'étude des mares 286

Figure 110 : carte des amplitudes maximales du niveau piezométrique pour les années 1992 et 1993 sur la zone d'étude des mares (600 km²) 289

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 :comparaison des caractéristiques statistiques des pluies ponctuelles enregistrées sur le degré carré sur la période 1990-1993 et à la station de Niamey Aéroport (N.A.). . 24

Tableau 2 : moyenne spatiale des cumuls saisonniers (15.04 au 15.10) sur le degré carré et le SSCE calculée par krigeage des valeurs ponctuelles. 24

Tableau 3 : caractéristiques générales des mares de la région d'étude 40

Tableau 4 : degré d'importance des composantes du bilan hydrologique de la mare. 42

Tableau 5 : nature, variabilité et appréhension des processus d'apports et de pertes. 42

Tableau 6 : quelques caractéristiques générales des trois grands types de bassins endoréiques 49

Tableau 7 : contexte général des trois types d'endoréismes 50

Tableau 8 : nom et localisation des sites instrumentés. Ce tableau est illustré par la figure16 où sont portés les sites suivis. 61

Tableau 9 : période de fonctionnement des stations limnimétriques 64

Tableau 10 : période de suivi des niveaux des mares équipées d'échelle limnimétrique 64

Tableau 11 : postes pluviographiques associés aux sites d'études des mares 66

Tableau 12 : caractéristiques techniques de la sonde piézo-résistive SPI III 72

Tableau 13 : nature et période de suivi sur les mares de plateau 80

Tableau 14 : nature et période de suivi sur les mares de cours d'eau. 81

Tableau 15 : nature et période de suivi sur les mares de vallée fermée. 81

Tableau 16 : surface de la zone colmatée dans les cuvettes des mares témoins 112

Tableau 17 : Relation cote à l'échelle-Volume-Surface des mares de référence : Bazanga (plateau), Wankama (lit de cours d'eau) et Sama Dey village (vallée fermée). 115

Tableau 18 : valeurs saisonnières des caractéristiques des épisodes de vidange (1991 - 1993). 130

Tableau 19 : les caractéristiques des épisodes étudiés 133

Tableau 20 : coefficients du modèle simple Iv(H) 140

Tableau 21 : coefficients du modèle multi-variables Iv(H, Hi, IK) 141

Tableau 22 : qualité de l'estimation des Iv(H) et Iv(H, Hi, IK) modèles testés 141

Tableau 23 : valeurs des coefficients ajustés de la loi de vidange (mare de Bazanga) 143

Tableau 24 : valeurs des coefficients ajustés de la loi de vidange (mare de Wankama) 144

Tableau 25 : valeurs des coefficients ajustés de la loi de vidange (mare de Sama Dey) 144

Tableau 26 : valeurs des paramètres choisis (Ralws et al, 1983 ; Clapp et Hornberger, 1978) 148

Tableau 27 : valeurs des écarts types des épisodes reconstitués 150

Tableau 28 : occurrence saisonnière de la phase à vidange rapide et de la phase à vidange lente. 159

Tableau 29 : récapitulatif des suivis pour l'estimation de l'évaporation par année et par site 169

Tableaux 30 et 31 : comparaison des lames évaporées selon les différents estimateurs bacs. 175

Tableau 32 : humidité relative de l'air et température à la station bioclimatologique de Banizoumbou 180

Tableau 33 : estimation des variations de stock par évaporation en saison sèche (1992) 183

Tableau 34 : récapitulatif des variations de stock d'eau pour les trois tubes suivis (du 26/05/1993 au 18/08/1993) en fonction du régime de la mare dans la zone perméable temporairement inondée. *196*

Tableau 35 : bilan simplifié des stocks hydriques des trois tubes suivis (du 26/05/1993 au 18/8/1993). *197*

Tableau 36 : statistiques des événements pluvieux (pluie en mm ; durée en heures-minutes). Les valeurs des moyennes et des écarts types obtenues par krigeage (d'après Lebel et al., à paraître) sont celles des séries d'événements mesurés sur le degré carré *222*

Tableau 37 : importance des crues observées à la mare en rapport avec le régime des précipitations (nombre de pluie) pour l'ensemble de la période d'étude. Le nombre d'événements pluvieux donnés dans ce tableau concerne la période d'observation limnimétrique précisée en chapitre 3 tableau 9. ..... *224*

Tableau 38 : statistiques des événements pluvieux ayant provoqué une crue aux mares de référence *225*

Tableau 39 : écoulements annuels sur les trois bassins des mares de référence. *229*

Tableau 40 : caractéristiques de l'hydrogramme médian *232*

Tableau 42 : lames écoulées moyennes pour des pluies de 10, 20, 40 et 80 mm *236*

moyennes et moyennes à humides (bassin de Wankama et de Sama Dey) *238*

Tableau 43 : caractéristiques de quelques événements hydrologiques observés à Wankama *240*

Tableau 45 : coefficients A ajustés pour les sites de référence et pour l'ensemble des sites témoins de chacune des situations géomorphologiques. *261*

Tableaux 46 et 47 : comparaison du bilan hydrique de 1992 pour différents estimateurs de l'évaporation *263*

Tableau 48 : estimation de la consommation en eau du bétail sur différentes mares. *268*

Tableau 49 : évolution piézométrique annuelle sur la zone d'étude des mares *284*

Tableaux 50 a et b : Détails de l'évolution piézométrique entre décembre 91 et novembre 92 ..... *285*

Tableau 51 a et b : Détails de l'évolution piézométrique entre novembre 92 et décembre 93 ..... *287*

Tableau 52 : estimation de la recharge médiane (année 1992) dans la zone des mares. *291*

Tableau 53 : estimation de la recharge médiane annuelle (année 1993) dans la zone des mares *291*

Tableau 54 : estimation de la lame infiltrée médiane à partir des mares de vallée *292*

TABLE DES MATIERES

INTRODUCTION **1**

1 CADRE EXPERIMENTAL 1

2 L'HYDROLOGIE DANS HAPEX-SAHEL **3**

3 LE PROGRAMME "BILAN HYDROLOGIQUE REGIONAL A PARTIR DU SUIVI DES MARES TEMPORAIRES" **4**

CHAPITRE 1 ..... **13**

INTRODUCTION : LE DOMAINE SAHELIEN **13**

1 CONTEXTE CLIMATIQUE GENERAL **15**

2 LE REGIME PLUVIOMETRIQUE ET SES CARACTERISTIQUES SPATIO-TEMPORELLES **19**

2.1 CONSIDERATIONS GENERALES SUR LE REGIME PLUVIOMETRIQUE REGIONAL 19

2.1.1 - Structure des systèmes précipitants régionaux *20*

2.1.2 Evolution du régime pluviométrique annuel (1905-1989) *20*

2.2 CARACTERISTIQUES DU REGIME PLUVIOMETRIQUE SUR LE DEGRE CARRE DE NIAMEY 20

2.2.1 Le cumul saisonnier (saison 1990-1993) *22*

2.2.2 Sa variabilité spatiale et temporelle *22*

3 LE PAYSAGE **25**

3.1 ORIGINE DU PAYSAGE ACTUEL ET GEODYNAMIQUE ACTUELLE 25

3.2 CONTEXTE GEOMORPHOLOGIQUE ET PEDOLOGIQUE REGIONAL 25

3.3 CONTEXTE GEOMORPHOLOGIQUE ET PEDOLOGIQUE LOCAL : LE SUPER SITE CENTRAL EST 26

3.4 LA VEGETATION 28

3.4.1 Caractéristiques générales de la région d'étude *28*

3.4.2 Structure et dynamique de la végétation liée aux mares temporaires *28*

4 CONTEXTE HYDROLOGIQUE (DE SURFACE) **29**

4.1 STRUCTURE HYDROLOGIQUE : DEGRADATION DU RESEAU HYDROGRAPHIQUE 29

4.2 CARTE DES UNITES HYDROLOGIQUE DU SSCE (FIGURE 11) 29

4.3 REGIME ANNUEL 31

4.4 LA PRODUCTION DU RUISSELLEMENT 31

4.5 LES COEFFICIENTS DE RUISSELLEMENT 32

5 CONTEXTE HYDROGEOLOGIQUE **32**

5.1 CONTEXTE REGIONAL : LA NAPPE DU CONTINENTAL TERMINAL 32
5.2 CONTEXTE HYDROGEOLOGIQUE DU DEGRE CARRE : LA NAPPE PHREATIQUE (CT3) 32

CHAPITRE 2 37

1 LA MARE 38

1.1 DEFINITION DE LA NOTION DE MARE DANS NOTRE ETUDE 38
1.2 CARACTERISTIQUES GENERALES DES MARES ETUDIEES 39
1.3 RELATION DU RESERVOIR AVEC SON ENVIRONNEMENT NATUREL 40
1.3.1 Nature des processus d'apports et de pertes 40
1.3.2 Equation du bilan hydrologique dans le système Mare-Sol-Atmosphère 42
1.3.3 Quelques définitions 44

2 LE BASSIN ENDOREIQUE 47

2.1 LA STRUCTURE HYDROLOGIQUE ACTUELLE DE LA ZONE D'ETUDE 48
2.2 CARACTERISTIQUES GENERALES DES BASSINS ENDOREIQUES 49
2.3 LES SYSTEMES RENCONTRES AU NORD ET A L'OUEST DE LA ZONE D'ETUDE 50

CHAPITRE 3 57

1 APPROCHE METHODOLOGIQUE 57

1.1 ZONE D'ETUDE 57
1.2 PERIODE DE L'ETUDE 58
1.3 MARE DE REFERENCE ET MARE TEMOIN 58

2 DISPOSITIF EXPERIMENTAL 60

2.1 HYDROMETRIE 62
2.1.1 Suivi des niveaux par limnigraphie 62
2.1.2 Suivi des niveaux par lecture directe de l'échelle limnimétrique 62
2.2 GEOCHIMIE 65
2.3 GEOCHIMIE ISOTOPIQUE 65
2.4 MESURE DE L'EVAPORATION SUR BAC 65
2.5 PLUVIOGRAPHIE 66
2.6 PHOTOGRAPHIE AERIENNE 67
2.7 MESURES ANNEXES 67
2.7.1 Relevés écologiques 68
2.7.2 Inventaire du bétail pour l'estimation de la consommation en eau dans les mares 68
2.7.3 Observations pédologiques 68
2.7.4 Cubature des mares 68
2.7.5 Superficie des bassins endoréiques 69

2.7.6 Mesures réalisées en collaboration avec d'autres équipes HAPEX Sahel *69*
2.7.6.1 Mesures d'humidité *69*
2.7.6.2 Piézométrie et hydrochimie de la nappe du Continental Terminal 3 ..... *71*
2.7.6.3 Piézométrie locale à la mare de Wankama *71*

3 PRECISION DES MESURES 72

3.1 HYDROMETRIE 72
3.1.1 Mesure par limnigraphie (le capteur piézo-résistif SPI III) *72*
3.1.2 Mesure par lecture directe de la cote du plan d'eau *74*
3.2 RELATION HAUTEUR-VOLUME 75
3.2.1 Appréhension du relief par un levé topographique *75*
3.2.2 Calcul des volumes par la méthode "cuts & fills" (Surfer 4.0, 1989) *75*
3.2.3 Modélisation de la relation Hauteur-Volume par régression *75*
3.3 PLUVIOGRAPHIE 77
3.3.1 Erreur instrumentale *77*
3.3.2 Représentativité d'un poste pluviographique pour l'ensemble d'un bassin versant *78*
3.4 CHIMIE ET GEOCHIMIE 79
3.4.1 Chimie *79*
3.4.2 Géochimie isotopique *79*

CHAPITRE 4 87

1 CARACTERISTIQUES GENERALES ET REPRESENTATIVITE 87

1.1 LOCALISATION GEOGRAPHIQUE ET GEOMORPHOLOGIQUE 87
1.2 LOCALISATION DE LA MARE DANS LE BASSIN VERSANT 89
1.3 CARACTERISTIQUE DE L'ALIMENTATION EN EAU DE LA MARE 91
1.4 VEGETATION, UTILISATION HUMAINE ET AGRICOLE 92
1.5 CAPACITE DE STOCKAGE 92
1.6 INDICE DE FORME 93
1.7 LA PERENNITE 94

2 CONTEXTE PEDOLOGIQUE 94

2.1 CONTEXTE PEDOLOGIQUE DE LA MARE DE BAZANGA 95
2.2 CONTEXTE PEDOLOGIQUE DE LA MARE DE WANKAMA 99
2.3 CONTEXTE PEDOLOGIQUE A LA MARE DE SAMA DEY 104
2.4 CARACTERISTIQUES PHYSIQUES ET HYDRIQUES DES PRINCIPALES ORGANISATIONS PEDOLOGIQUES 104
2.4.1 Distribution granulométrique comparée de la zone sédimentaire et du versant des mares (horizon de surface) *104*
2.4.2 Discontinuité de texture en profondeur : les profils granulométriques *105*
2.4.3 Apport du suivi chimique des eaux des mares à la connaissance des dépôts sédimentaires fins *106*

2.4.4 Nature et propriétés des sédiments fins *107*

2.4.5 Notion de zone colmatée et de zone non colmatée *107*

3 CONTEXTE MORPHOLOGIQUE 108

3.1 MORPHOLOGIE DE LA CUVETTE RECEPTRICE 108

3.1.1 Vue bidimensionnelle du relief de la cuvette réceptrice *108*

3.1.2 Diagramme des pentes *109*

3.2 INFLUENCE DE LA MORPHOLOGIE DE LA CUVETTE SUR L'EXTENSION SPATIALE DU DOMAINE SEDIMENTAIRE ... 110

3.3 RELATION COTE A L'ECHELLE-VOLUME-SURFACE 113

3.3.1 Limites et précision *113*

3.3.2 Modèle d'interpolation *113*

CHAPITRE 5 119

1 CONSIDERATIONS GENERALES 119

1.1 INTRODUCTION : COMPARAISON DE LA VIDANGE DES MARES A DEUX VIDANGES TYPE 119

1.2 LES FACTEURS DE L'INFILTRATION AU COURS DE LA VIDANGE 122

1.2.1 Généralités *122*

1.2.2 L'infiltration comme processus physique : le mouvement de l'eau dans le sol *122*

1.2.3 Prise en compte d'une lame d'eau submergeante dans l'expression de l'infiltrabilité (cas d'un sol homogène) *122*

1.3 DISCONTINUITE HYDRODYNAMIQUE DU SUBSTRAT DES MARES 126

1.3.1 Notion de seuil de perméabilité *126*

1.3.2 Calcul d'une perméabilité équivalente théorique en fonction de la surface inondée ou de la hauteur d'eau dans la mare *128*

2 CARACTERISTIQUES DE LA VIDANGE A L'ECHELLE DE LA SAISON 130

3 CARACTERISTIQUES DE LA VIDANGE A L'ECHELLE DE L'EPISODE 132

3.1 CHOIX DE PLUSIEURS EPISODES 132

3.2 VARIABLES CARACTERISTIQUES DE L'EPISODE 132

3.3 APERÇU SUR L'EVOLUTION DE L'HUMIDITE SOUS LA MARE 133

3.4 VARIATION DE L'INTENSITE INSTANTANEE DE VIDANGE AU COURS DU TEMPS ET EN FONCTION DE LA HAUTEUR D'EAU 135

4 RECONSTITUTION DES LAMES VIDANGEES 142

4.1 AJUSTEMENT D'UNE LOI DE VIDANGE EMPIRIQUE 142

4.2 PRESENTATION DES MODELES DE VIDANGE UTILISES 146

4.2.1 Les modèles empiriques : utilisation des lois de vidange ajustées *146*

4.3 LES MODELES D'INFILTRATION DE PHILIP ET GREEN-AMPT 147

4.4 CALCUL DES LAMES VIDANGEES 149

5 CARACTERISATION DU FONCTIONNEMENT HYDROLOGIQUE **154**

5.1 ANALYSE DES RELATIONS HAUTEUR D'EAU - TAUX D'EVAPORATION 154

5.2 OCCURRENCE DU REGIME A VIDANGE RAPIDE ET A VIDANGE LENTE 156

CHAPITRE 6 ..... **163**

1 L'EVAPORATION D'UNE NAPPE D'EAU LIBRE **163**

1.1 GENERALITES 163

1.2 LES DIFFERENTES METHODES D'ESTIMATION DE L'EVAPORATION D'UNE SURFACE D'EAU LIBRE 165

1.2.1 La méthode directe *165*

1.2.2 Les méthodes indirectes *166*

2 COMPARAISON DE DIFFERENTES METHODES D'ESTIMATION DE L'EVAPORATION **168**

2.1 METHODOLOGIE 168

2.1.1 Choix des méthodes *168*

2.1.2 Instrumentation et mesures *168*

2.1.2.1 période de mesures *168*

2.1.2.2 Instrumentation *168*

2.1.2.3 Présentation des données utilisées *169*

2.2 COMPARAISON DES LAMES EVAPOREES SUR LES BACS A EVAPORATION (CLASSE A, CLASSE A CORRIGEE ET BAC ENTERRE IN SITU) 173

2.3 ESTIMATION DE L'EVAPORATION PAR LA METHODE CHIMIQUE 176

2.4 ESTIMATION DE L'EVAPORATION PAR LA METHODE ISOTOPIQUE 176

2.5 COMPARAISON DE LA METHODE CLASSIQUE (BAC CLASSE A CORRIGE ET BAC *IN SITU*) ET DE LA METHODE ISOTOPIQUE 183

2.6 CALCUL D'UN COEFFICIENT DE TRANSPOSITION MARE - BAC DE CLASSE A 184

2.7 DISCUSSION 184

CHAPITRE 7 ..... **189**

1 REDISTRIBUTION DE L'EAU SOUS LA MARE **190**

1.1 QUELQUES RAPPELS 190

1.2 DISPOSITIF ET PROTOCOLE DE MESURES 190

1.3 COMPARAISON DES PROFILS D'HUMIDITE LE LONG D'UN TRANSECT MARE-VERSANT SABLEUX 191

1.4 EVOLUTION DES STOCKS HYDRIQUES LE LONG D'UN TRANSECT MARE-VERSANT SABLEUX 194

1.5 BILAN HYDRIQUE SOUS LA ZONE COLMATEE ET SOUS LA ZONE PERMEABLE PERIPHERIQUE 196

1.6 ESTIMATION DU DRAINAGE VERTICAL A L'AIDE DES PROFILS D'HUMIDITES 198

1.7 PREMIERE SYNTHESE 199

2 TRANSFERT DES EAUX DE SURFACE VERS LE DOMAINE SOUTERRAIN 199

2.1 TRANSFERTS A PARTIR DES MARES DE PLATEAUX 200

2.1.1 Rappels sur le milieu *200*

2.1.2 Connaissance du contexte hydrogéologique sous les plateaux *200*

2.1.3 Synthèse des informations *201*

2.2 TRANSFERTS A PARTIR DES MARES DE COURS D'EAU 203

2.2.1 Dispositif et protocole de mesure *203*

2.2.2 Evolution des niveaux piézométriques à la mare Wankama (année 1993) *203*

2.2.3 Schéma de fonctionnement *204*

2.2.4 Diversité des transferts mare-aquifère dans un ancien cours d'eau *206*

2.2.5 Calcul des diffusivités à partir des chroniques piézométriques : cas de Wankama *208*

2.2.6 Synthèse *210*

2.3 TRANSFERTS A PARTIR DES MARES DE VALLEE FERMEE 211

2.3.1 Rappels sur le milieu *211*

2.3.2 Dispositif et protocole de mesure *211*

2.3.3 Evolution du niveau piézométrique *211*

2.3.4 Hypothèses de fonctionnement *213*

CHAPITRE 8 ..... **221**

1 LES PRECIPITATIONS 221

1.1 CARACTERISTIQUES DES EVENEMENTS PLUVIEUX 221

1.2 CARACTERISTIQUES SPATIO-TEMPORELLES 223

1.3 CARACTERISTIQUES DES EVENEMENTS AYANT RUISSELES 224

2 ESTIMATION DE LA LAME ECOULEE A LA MARE 225

2.1 NATURE DE L'APPORT 225

2.2 CALCUL DU VOLUME RUISSELE CONCENTRE PAR LA MARE 225

2.3 ESTIMATION DE LA LAME INFILTREE AU COURS DU REMPLISSAGE DE LA MARE 226

3 ETUDE DES ECOULEMENTS 228

3.1 LES ECOULEMENTS ANNUELS 228

3.2 CARACTERISTIQUES DES CRUES 230

3.2.1 Caractéristiques générales *230*

3.2.2 Variabilité intra-saisonnière des écoulements *232*

4 COMPORTEMENT MOYEN ET DETERMINATION DES LAMES ECOULEES 235

4.1 COMPORTEMENT MOYEN 235

4.2 PARTICULARITES DE COMPORTEMENT 240

CHAPITRE 9 ..... **247**

1 CALCUL DU BILAN HYDROLOGIQUE DE LA MARE **248**

1.1 AU COURS DE LA PERIODE D'APPORT 248

1.2 AU COURS DE LA PERIODE DE DESTOCKAGE 248

1.3 PAS DE CALCUL DU BILAN 248

1.3.1 Variations de niveau mesurées par limnigraphe *248*

1.3.2 Variations de niveau mesurées par échelle limnimétrique *248*

1.4 BILAN DE LA MARE RAPPORTE AU BASSIN VERSANT 249

2 LAME INFILTREE ANNUELLE **251**

2.1 IMPORTANCE DU TRANSIT VERS LA MARE 251

2.2 RELATION ENTRE LE COEFFICIENT D'INFILTRATION ET LE COEFFICIENT DE RUISSELLEMENT 251

2.3 VARIATION DU COEFFICIENT D'INFILTRATION ET D'EVAPORATION EN FONCTION DE LA SUPERFICIE 252

3 VARIABILITE INTERANNUELLE DE LA LAME INFILTREE **253**

3.1 EVOLUTION DES LAMES INFILTREES AU COURS DE L'ANNEE 254

3.2 BILAN HYDROLOGIQUE DE L'EPISODE DE VIDANGE : LA RELATION HAUTEUR D'EAU INITIALE-VARIATION DE STOCK PAR INFILTRATION ET PAR EVAPORATION 257

4 PREDETERMINATION DES LAMES INFILTREES ET EVAPOREES **259**

4.1 RELATION LAME ECOULEE-LAME INFILTREE/EVAPOREE DES MARES DE REFERENCE 259

4.2 RELATION LAME ECOULEE-LAME INFILTREE/EVAPOREE DES MARES TEMOINS 261

5 SENSIBILITE DU BILAN HYDROLOGIQUE **263**

5.1 POUR DIFFERENTS ESTIMATEURS DE L'EVAPORATION 263

5.1.1 A l'échelle annuelle *263*

5.1.2 A l'échelle de l'épisode *264*

5.2 A L'ESTIMATION DE LA SUPERFICIE DU BASSIN VERSANT 265

5.3 LA CONSOMMATION DU BETAIL 266

CHAPITRE 10 ..... **273**

1.1 EVOLUTION RECENTE DES NIVEAUX PIEZOMETRIQUES DE LA NAPPE PHREATIQUE 273

1.2 PREMIERS ACQUIS SUR LA CONNAISSANCE DES PROCESSUS DE RECHARGE DE LA NAPPE PHREATIQUE (DEGRE CARRE DE NIAMEY) 274

2 LE SUIVI PIEZOMETRIQUE SUR LA ZONE D'ETUDE DES MARES **275**

3 LES PROCESSUS DE RECHARGE DANS LA ZONE D'ETUDE DES MARES **277**

3.1 ANALYSES DES PIEZOGRAMMES ET CLASSIFICATION 277

3.2 RELATION ENTRE LA CLASSIFICATION DES REACTIONS ET LES PROCESSUS DE RECHARGE 282

3.3 COMMENTAIRES 282

4 ESTIMATION DE LA RECHARGE DE LA NAPPE PHREATIQUE DANS LA ZONE DES MARES..... 284

4.1 METHODE D'ESTIMATION DE L'IMPACT ANNUEL DES PLUIES SUR LA RECHARGE DE LA NAPPE 284

4.2 VARIATION PIEZOMETRIQUE ANNUELLE : CAS DES ANNEES 1992 ET 1993 284

4.2.1 Impact de la saison des pluies 1992 sur la nappe phréatique 284

4.2.2 Impact de la saison des pluies 1993 sur la nappe phréatique 287

4.2.3 Les amplitudes piézométriques maximales 288

4.2.4 Discussion 288

4.3 EVALUATION DE LA RECHARGE ANNUELLE DE LA NAPPE SUR LA ZONE D'ETUDE DES MARES 290

4.3.1 Comparaison de la recharge annuelle de la nappe et des bilans des mares 290

4.3.2 Commentaires 292

CONCLUSION ET PERSPECTIVES 295

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES 300

LISTE DES FIGURES 311

LISTE DES TABLEAUX 317

ANNEXES

LISTE DES ANNEXES

Annexe 1 : inventaire des mares

Annexe 2 : relations hauteur-volume des mares

Annexe 3 : contexte pédologique des mares de référence

Annexe 4 : étude de la vidange

Annexe 5 : estimation de l'évaporation

Annexe 6 : pluviographie

Annexe 7 : estimation des écoulements vers la mare, caractéristiques des bassins versants

Annexe 8 : bilan hydrologique des mares de référence

Annexe 9 : inventaire des puits et piézomètres dans la zone d'étude

Annexe 10 : récapitulatif des missions aériennes

ANNEXE 1 : inventaire des mares

- liste des mares inventoriées dans la zone d'étude

Tableau A11 :liste des mares inventoriées dans la zone d'étude (13°29,21' - 13°40,0' N et 2°33,33' - 2°50,0 E) en juin 1991 actualisé en 1992.

Légende de la localisation des mares
cours d'eau : cours d'eau actuellement non fonctionnel
Pl, non B.T. : plateau à cuirasse ferrugineuse non organisé en brousse tigrée
Pl, de B.T. : plateau à cuirasse ferrugineuse organisé en brousse tigrée
vallée fermée : bas fond de vallée "vérouillée" par les sables

nom	latitude Nord*	longitude Est*	situation
Bagoua	13° 29,76'	2°46,04'	Cours d'eau
Balal segui 1	13° 28,80'	2° 34,64'	Pl. non BT
Balal segui 2	13° 28 80'	2° 34,64'	Pl. non BT
Banizoumbou	13° 32,00'	2° 39,73'	Cours d'eau
Bazanga	13°30,35'	2° 35,11'	Pl. de B.T.
Boundou	13° 33,32'	2°38,34'	Cours d'eau
Dahel 1	13°33,66'	2° 45,99'	Pl. de B.T.
Dahel 2	13°34,31'	2°45,73'	Pl. de B.T.
Dahel 3	13°34,22'	2°46,45'	Pl. de B.T.
Dantiandou	13° 36,73	2° 36,69	Pl. de B.T.
Darey	13°37,94	2°44,41'	Pl. de B.T.
Dolohi	13°27,32'	2°35,60'	Pl. non BT
Fandobong 1	13° 26,34'	2° 37,06'	Pl. non BT
Filin 1	13°39,51'	2° 41,61'	Pl. de B.T.
Filin 2	13° 39,20'	2° 42,68'	Pl. de B.T.
Filin 3	13° 39,37'	2° 43,29'	Pl. de B.T.
Filin 4	13°39,48'	2° 43,65'	Pl. de B.T.
Filin 5	13° 40,00	2° 43,02'	Pl. de B.T.
Gassan ouest	13° 29,84	2°30,14'	Pl. non BT
Gassan ouest 2	13°28,34	2°31,81'	Pl. non BT
Kalasi	13° 31,17'	2° 34,61'	vallée fermée
Kampa Zarma 1	13°26,09'	2° 38,33'	Pl. non BT
Kampa Zarma 2	13°26,10'	2° 38,33'	Pl. non BT
KarBanga	13° 34,94'	2° 46,73'	Pl. non BT
Komakoukou 1	13°29,79'	2° 36,83'	Pl. de B.T.
Komakoukou 2	13° 29,56'	2° 37,01'	Pl. de B.T.
Komakoukou 3	13° 29,60'	2° 37,23'	Pl. de B.T.
Korto	13° 29,95'	2° 41,53'	vallée fermée

** les coordonnées géographiques sont exprimées en degrés minutes et centième de minutes*

Tableau A1 (suite)

nom	latitude Nord*	longitude Est*	situation
Maourey 1	13° 38,32'	2° 38,96'	Cours d'eau
Maourey 2	13° 38,12'	2° 39,15'	Cours d'eau
Maourey 3	13° 36,56'	2° 39,27'	Cours d'eau
Maourey 4	13° 35,84'	2° 39,03'	Cours d'eau
Maourey 5	13° 35,55'	2° 39,73'	Cours d'eau
Poura	13°38,71'	2° 37,09'	Pl. de B.T.
Sama Dey 1	13° 35,99'	2° 41,34'	Pl. de B.T.
Sama Dey ech.	13° 36,09'	2° 41,42'	Pl. de B.T.
Sama Dey 3	13° 36,21'	2° 41,70'	Pl. de B.T.
Sama Dey 4	13° 36,20'	2° 41,11'	Pl. de B.T.
Sama Dey 5	13° 36,22'	2° 41,12'	Pl. de B.T.
Samsani 1	13° 34,23'	2° 33,96'	Pl. de B.T.
Samsani 2	13°33,94'	2° 34,31'	Pl. de B.T.
Samsani 3	13° 34,43'	2° 34,13'	Pl. de B.T.
Samsani 4	13° 36,12'	2°34,91'	Pl. de B.T.
Samsani 5	13°33,42	2° 35,86'	Pl. de B.T.
Sofi 1	13°38,71'	2°49,95'	Pl. de B.T.
Sofi 2	13°39,49'	2°49,97'	Pl. de B.T.
Sofi 3	13°39,78'	2° 49,59'	Pl. de B.T.
Sofia	13° 32,42	2° 42 62	Pl. de B.T.
Sulfey	13° 30,03	2° 39 12	Pl. de B.T.
Wankama vill,1	13° 39,29'	2° 39,42'	Cours d'eau
Wankama vill,2	13° 39,79'	2° 39,39'	Cours d'eau
Wankama vill,3	13° 39,87	2°39,32'	vallée fermée
Wankama vill,4	13°39,31'	2° 39,97'	vallée fermée
Wankama ech,	13° 39,00'	2° 38,91'	Cours d'eau
Yélouma	13° 26,97'	2° 30 80'	vallée fermée
Yelouma Est 1	13°27,46'	2° 32,72'	Pl. non BT
Yelouma Est 2	13°27,46'	2° 32 ,72'	Pl. non BT
Yelouma Est 3	13° 27,95'	2° 32,58'	Pl. non BT
Yelouma Est 4	13° 27,95'	2° 32,58'	Pl. non BT
Yerima Dey	13° 28,93'	2° 41,59'	vallée fermée

* les coordonnées géographiques sont exprimées en degrés minutes et centième de minutes

ANNEXE 2 : les relations hauteur-volume des mares

- coefficients ajustés et leur domaine de validité
- écarts absolus et maximum des modèles hauteur-volume ajustés
- carte topographique des cuvettes des mares de Bazanga, Wankama et Sama Dey

Tableau A21 : coefficients ajustés et leur domaine de validité des relations Hauteur-Volume de l'ensemble des mares étudiées

Toutes les relations Hauteur-Volume sont ajustés à des modèles statistiques de type polynomiale d'équation suivante :

$$V(h)=A+Bh+Ch^2+Dh^3+Eh^4+Fh^5$$

avec

V(h) le volume d'eau en m^3 pour la hauteur h

h la hauteur d'eau en mètres

A, B, C, D, E et F les coefficients ajustés.

*Le domaine de validité correspond à l'intervalle des hauteurs d'eau dans lequel les coefficients ajustés ont utilisés. Le point de référence (h=0) est donné par rapport à la cote 0 de l'échelle limnimétrique.

Les mares de plateau à cuirasse ferrugineuse

	Kampa Zarma			**Sulfey**	
*domaine de validité**	0,2 - 0,7 m	0,2 - 0,7 m		0,1 - 0,6 m	0,6 - 1,0 m
A	27,448	-439,38		5,62E-15	13410
B	-493,92	5631,5		56,711	-58224
C	2338,9	-20226		1313,2	80123
D	-1981,2	28151		9567,7	-30333
E	5379,3	-7437,4		-23119	-
F				29220	-
nb de valeurs	7	6		8	6
R^2	0,99	0,99		0,99	0,99
	Sama Dey plateau			**Poura**	
*domaine de validité**	0,1 - 0,4 m	0,4 - 0,6 m	0,6 - 1,2 m	0,1 - 0,7 m	0,7 - 1,3 m
A	6,67E-18	-181,11	26128	-0,044727	9071,2
B	12,688	1734,3	-93783	11,21	-26660
C	-317,25	-5698,1	96378	-149,03	22145
D	2023,8	7539,1	-15225	964,83	-2266
E	-	-	-6349,2	23,97	-
F	-	-	-	1117,8	-
nb de valeurs	5	5	7	8	7
R^2	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99

	Bazanga				
*domaine de validité**	0,2 - 0,34	0,35 - 0,69	0,70 - 0,88	0,89 - 1,04	1,05 - 1,4
A	-54,214	-276,64	3256,1	6254,4	-2594,5
B	-509,33	2213,4	-11825	-18611	-3580
C	1219,3	-6513,4	11670	15513	9184,7
D		7615,2			
nb de valeurs	4	9	7	14	16
R^2	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99

Tableau A21 (suite)

Les mares installées dans les lits des cours d'eau

	Banizoumbou		
*domaine de validité**	0 - 0,40	0,4 - 1,70	1,7 - 3,0
A	0	0,102	-70,74
B	2,326	8,918	693,03
C	-77,994	-235,5	-1155,4
D	580,13	1374,2	1121,8
E	344,32	234,44	-97,343
nb de valeurs	7	10	12
R^2	0,99	0,99	0,99

	Maoureu Kouara	
*domaine de validité**		
A	-1,8967	-4783,5
B	121,16	17565
C	-1470,3	-23987
D	8347	21963
E		-4260,7
nb de valeurs	11	13
R^2	0,99	0,99

	Wankama		
*domaine de validité**	0,5 - 1,29	1,29 - 1,79	1,79 - 3,3
A	-217,8	-508,31	22741
B	1120	2301,1	-35600
C	-1932	-3458,9	16229
D	1119	1750,6	-1474,9
E			
nb de valeurs	7	7	18
R^2	0,99	0,99	0,99

Les mares de vallée fermée

	massi koubou	
*Domaine de validité**	0,13 - 0,28 m	0,28 - 1,68 m
A	-280,04	-1651,2
B	11219	-9858,5
C	-118380	79994
D	378900	-4469
nb de valeurs	4	19
R^2	0,99	0,99

	Yélouma	
	0,2 - 0,6 m	0,6 - 2,0 m
A	102,94	13918
B	-442,36	-44782
C	386,61	50876
D	319,45	-2381
E		4194,5
nb de valeurs	12	14
R^2	0,99	0,99

	Sama Dey village	
	0,07 - 0,47 m	0,47 - 1,97 m
A	-7,4724	636,47
B	-1090	-17424
C	30552	70297
D	28099	9614,6
nb de valeurs	9	16
R^2	0,99	0,99

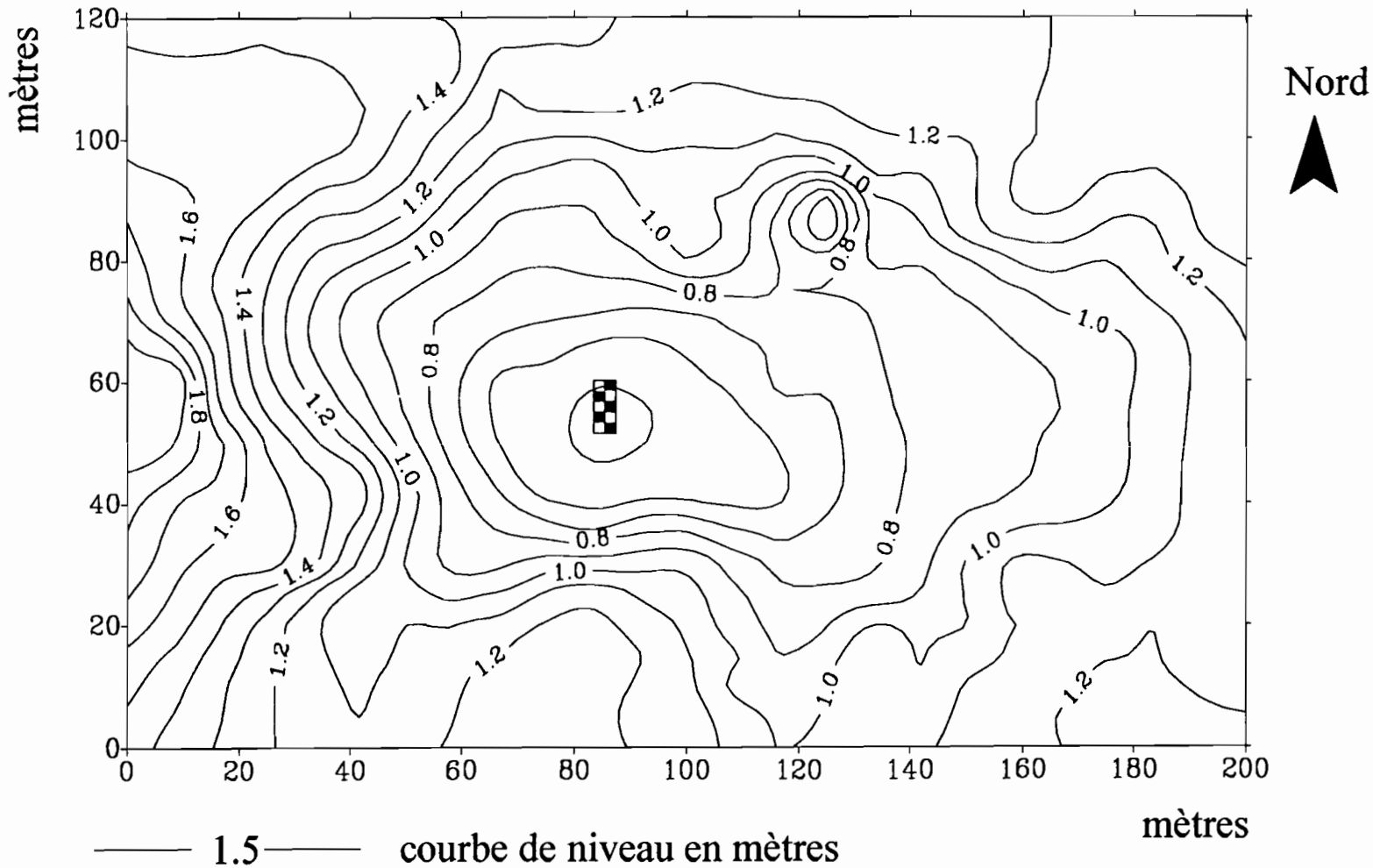
	Karbanga	
0,2 - 0,6 m	0,6 - 1,1 m	1,1 - 2,1 m
-0,000952	362,23	-108050
10,602	-1738	303900
-174,33	2133,2	-313750
652,22	508,61	141230
766,67		-22466
6	6	6
0,99	0,99	0,99

Tableau A22 : écart absolu moyen et maximum pour les modèles Hauteur-Volume

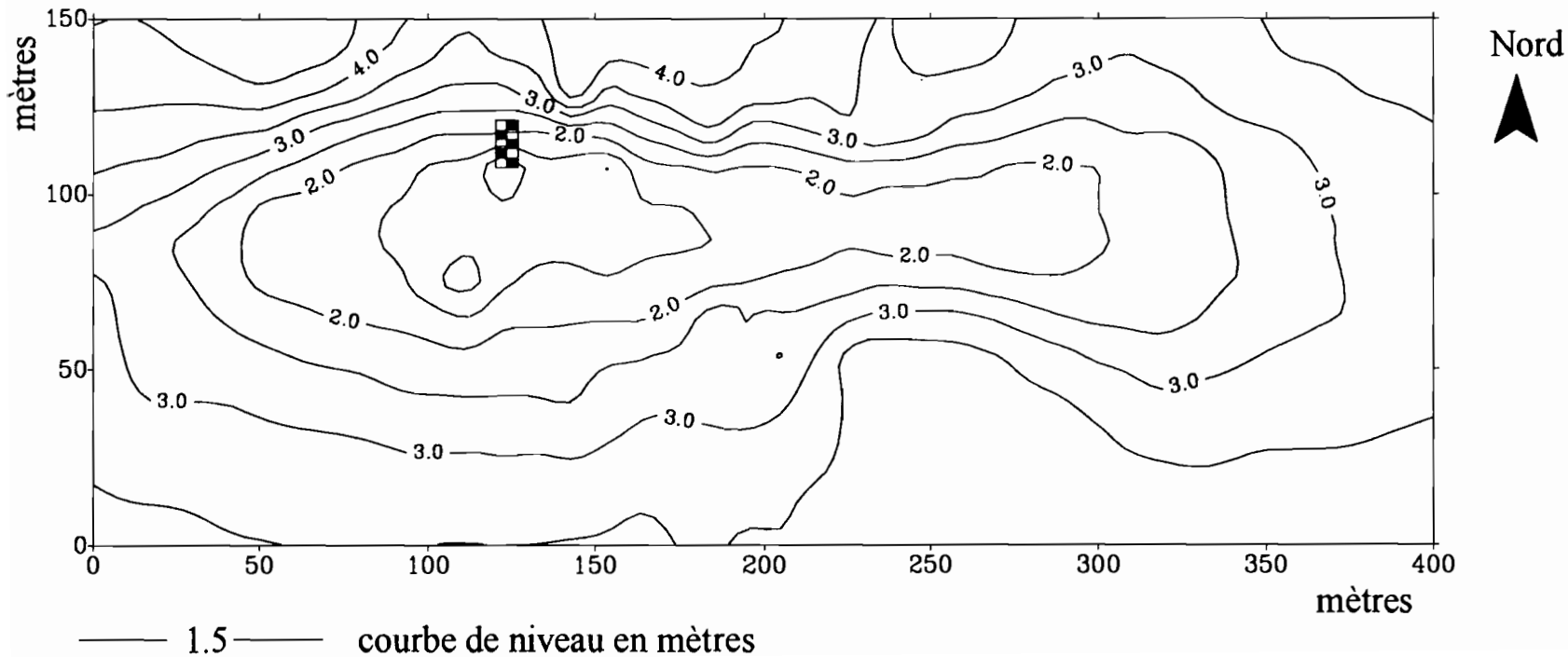
Mare	écart absolu moyen	écart absolu maximum
	%	
Massi koubou	0,4	1,5 (0,43)
Sama Dey	2,1	18,2 (0,07)
Banizoumbou	0,6	2,7 (1,80)
Bazanga	1,4	12,3
Kampa zarma	1,0	4,2 (0,8)
Karbanga	1,0	12,1 (0,1)
Poura	7,1	65,2 (0,1)
Sama Dey plateau	0,5	3,0 (0,7)
Sulfey	1,0	2,7 (0,1)
Wankama	0,9	2,7 (1,5)
Yélouma	0,5	1,4 (1,94)
Maourey Kouara	3,2	34,1 (0,1)

() hauteur en mètres de l'écart absolu maximum

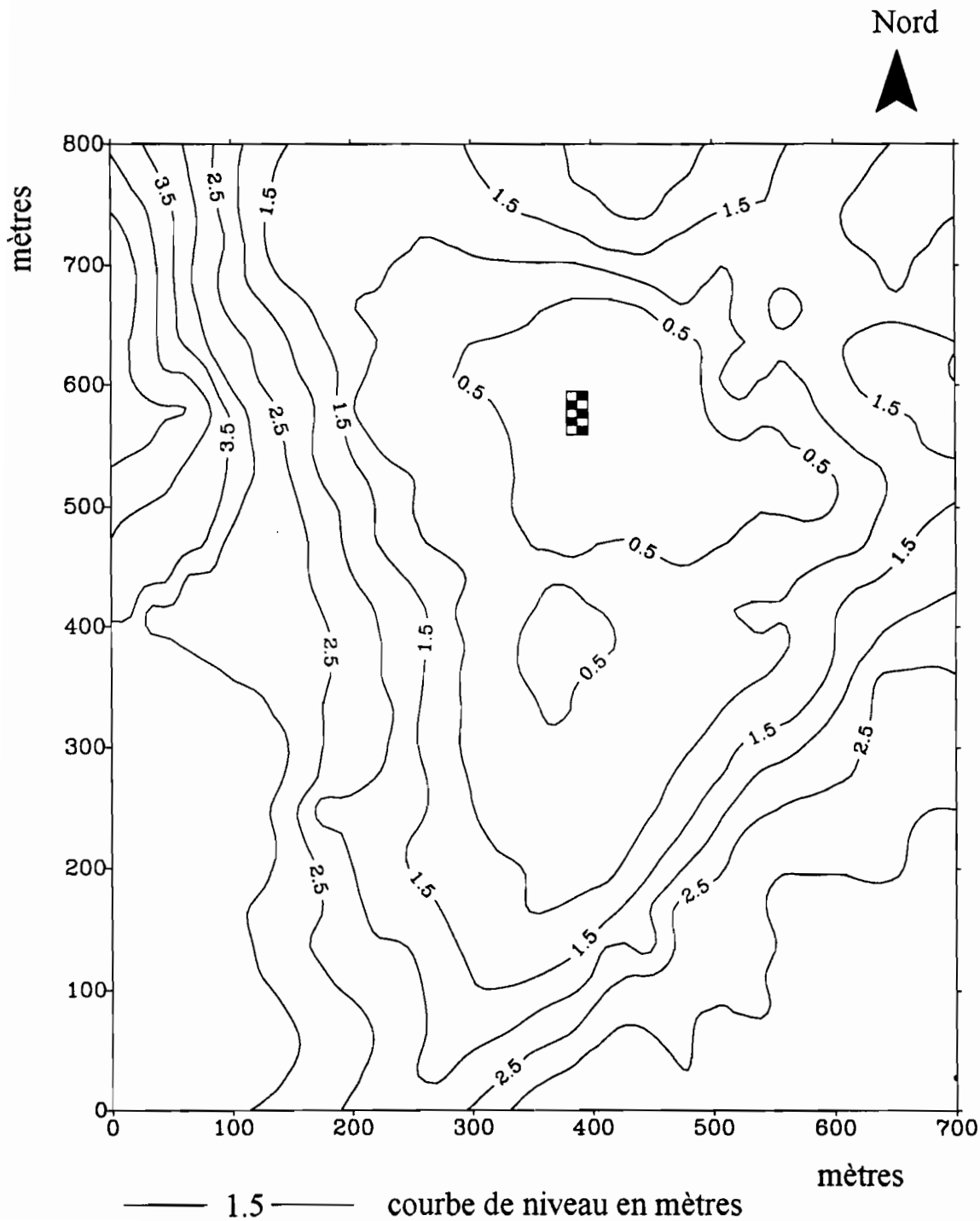
Carte topographique de la cuvette de la mare de Bazanga (levé au 1/500)



Carte topographique de la cuvette de la mare de Wankama (levé au 1/500)



Carte topographique de la cuvette de la mare de Sama Dey (levé au 1/1000)



ANNEXE 3 : contexte pédologique des mares de référence

- description des profils pédologiques à la mare de Bazanga et à la mare de Wankama
- caractéristiques morphologiques et physico-chimiques d'un profil type du bas-fond de Sama-Dey village (NAGUMO, 1992)
- description morphologique des parois du puit de Sama Dey village
- analyses ranulométriques des sols des mares de Bazanga , Wankama et Sama Dey village

Description des profils pédologiques à la mare de Bazanga

Profil 1

D'une profondeur de 18 cm, ce profil présente un matériau de couleur grisâtre limono - argileux à structure polyédrique à prismatique reposant abruptement sur la cuirasse ferrugineuse très dure et continue. On distinguera trois horizons:

En surface, on note la présence de prismes de 20 à 30 cm de coté séparés par des fentes de 1 à 2 cm d'épaisseur. cette organisation est généralisée à l'ensemble des matériaux de surface de couleur grisâtre. A la surface des prismes, une croûte de décantation d'une épaisseur d'environ 2 mm est caractérisé par une structure micro litée.

0 - 4 cm : Il est de couleur brun gris jaune? (10 YR 5/4) avec une texture limono - argileuse. L'ensemble a une structure de type polyédrique moyenne avec une fine structure litée à plusieurs couches sur les 2 premiers centimètres. La porosité de type tubulaire et d'origine biologique est abondante. Etat général d'humectation frais.

4 - 14 cm : De couleur et de texture identique à l'horizon supérieur, la structure est devenue polyédrique à débit prismatique avec des agrégats présentant une cohésion moyenne à forte. Les parois des pores tubulaires sont tapissées de matériaux oxydés. Enfin, on observe une importante porosité vacuolaire. La transition vers l'horizon inférieur est rapide.

14 - 18 cm : La matrice est de couleur jaune vif. Elle est incluse dans environ 80 % d'éléments grossiers de forme anguleuse et de couleur ocre et noire. La texture de la matrice est beaucoup plus grossière (sablo - argileuse). l'ensemble a une faible cohésion. La porosité interstitielle est peu abondante.

Cet horizon repose directement sur un matériau très dur et compact : **la cuirasse ferrugineuse**.

Profil 2

Ce profil peut se décomposer en deux horizons :

En surface, dépôts sablo - limoneux non structurés, peu cohérents avec une forte charge en cailloux. Etat sec.

0 - 7 cm : De couleur brune clair, cet horizon présente une texture fine (argilo sableuse) ayant une structure polyédrique fine. l'ensemble est peu cohérent. La charge en éléments grossiers est très importante, environ 80%, composée de cailloux de diamètres très variables (mm au cm) avec une couleur bariolée jaune rouge. Ils sont tous anguleux légèrement émoussés et fragiles. La porosité est de type vacuolaire. La transition vers l'horizon inférieur est progressive.

7 - 57 cm : La texture est devenue plus argileuse mais la structure reste identique (polyédrique fine). Les éléments grossiers qui constituent la majorité du volume de matériau de l'horizon, sont nettement moins émoussés mais présentent les mêmes caractéristiques que ceux de l'horizon 0 - 7 cm. Ils sont enrobés dans la matrice argileuse. La porosité est de type vacuolaire fine. La transition est abrupte. Cet horizon repose directement sur la cuirasse ferrugineuse.

Profil 3

Ce profil peut se décomposer en quatre horizons :

En surface, on distingue la présence d'une croûte à trois couches composée d'une à sables fins et de deux à sables grossiers. On remarquera des taches d'oxydo réduction abondantes. Racines abondantes

0 - 9 cm : De couleur brune, cet horizon est de texture sableuse fine et de structure massive à débit mamelonné. L'ensemble a une cohésion moyenne. Il y a une abondance de cailloux de faibles diamètres (millimètre); on notera une porosité interstitielle et tubulaire fine développée ainsi que la présence de racines. la transition est rapide (couleur).

9 - 30 cm : De couleur brun rouge, la texture est de type argilo - sableuse avec une structure polyédrique moyenne (agrégats de 5 cm). L'ensemble a une forte cohésion. La porosité est identique à l'horizon inférieur. On notera la présence de racines et d'éléments grossiers de diamètre allant jusqu'à 5 cm. la transition est progressive

30 - 110 cm : Toujours de couleur brun rouge mais une teinte rouge plus prononcée. La texture et la structure sont sensiblement du même type que l'horizon inférieur avec une cohésion plus forte. on notera la présence d'un bloc de cuirasse de plusieurs dizaines de centimètres de diamètre. Porosité tubulaire fine abondante et développée au sein des quelles on observe des taches de couleur grises et rouges. La transition est progressive.

110 - 150 cm : Couleur, porosité et structure identiques à l'horizon précèdent. La texture est légèrement plus argileuse. On notera une présence importante d'élément grossiers de type ferrugineux de taille variable et de fragments de cuirasse. La transition est abrupte. Cet horizon repose sur la cuirasse ferrugineuse ayant les mêmes caractéristiques morphologiques que précédemment.

Sur toute l'épaisseur du profil, le matériau présente une forte compacité

Description des profils pédologiques à la mare de Wankama

Profil 1

Au centre de la mare, le profil suivant peut se décomposer en six horizons :

En surface, l'assèchement de la mare fait apparaître une organisation en prismes de 10 à 30 cm de largeur qui est nettement plus développée qu'à la mare de Bazanga . Avec un matériau fin de couleur grisâtre, cette organisation est distincte sur une superficie de plus d'un hectare. La surface des primes a une structure litée horizontale.

0 - 30 cm : Horizon argilo limoneux à gley, de couleur gris (10 YR 6/3.5) à taches rouges (localisées autour des pores) et revêtement gris clair. Il présente une structure polyédrique à débit anguleux. La surstructure est prismatique à cubique (10 - 20 cm). La porosité qui s'y développe est faible et essentiellement tubulaire grossière (2 à 3 mm) d'origine biologique. Localement, porosité fissurale d'orientation verticale. La transition est rapide.

30 - 60 cm : horizon argilo - limoneux avec inclusion de volumes sableux beiges à litage irrégulier et à orientation variée allant de la verticale à l'horizontale. La structure est polyédrique anguleuse plus fine (2 à 4 cm). La porosité est plus importante que dans l'horizon supérieur et présente une densité plus forte de

taches rouges à l'intérieur des pores. Présence de sables clairs dans les pores. Localement, la porosité est fissurale à orientation verticale et horizontale. La limite inférieure est très nette et très sinueuse.

60 - 100 cm : fort contraste de couleur et de texture avec l'horizon précèdent. Cet horizon est de couleur brun rouge homogène 7.5 YR 5/4 avec taches rouges et grises le long des pores. La texture est plus grossière de type argilo - sableuse avec inclusion de volume identique à l'horizon sus jacent, localisée à la limite supérieure. La structure est de type polyédrique fine à tendance massive (macrostructure) avec une porosité tubulaire nettement plus importante. Quelques fissures fines qui sont le prolongement de celles des horizons précédents. Trous d'animaux. La transition est progressive.

100 - 150 cm : Horizon de couleur brun rouge, à texture sableuse et à structure massive à débit mamelonné. La porosité tubulaire moyenne associée à une porosité grossière plus importante, qui est comblée par un matériau micro agrégé. Présences de racines fines et grosses. La transition est nette.

150 - 200 cm : Contraste net de texture et de couleur. De couleur moins rouge, hétérogène, à volumes gris augmentant vers le bas. La texture est sableuse à sablo argileuse. La structure est de type polyédrique avec une agrégation à faible cohésion. Présence de racines de ligneux.

200 - >250 cm : Horizon de couleur brun rouge à taches grises abondantes autour des pores. La texture est de type argilo - sableuse et la structure est polyédrique. la porosité est légèrement plus faible par rapport à l'horizon sus jacent.

profil 2

Le second profil pédologique (figure 1.3e) est situé à la périphérie du lit principal. Légèrement enherbé, il présente, en surface, une alternance de croûtes sableuses et de sables déliés du en partie au piétinement du bétail. Ce profil peut se décomposer de la manière suivante :

0 - 30 cm : Horizon légèrement organique à texture sableuse de couleur brun beige foncée (7.5 YR 5/8). La structure est massive à tendance polyédrique. l'ensemble a une faible cohérence.

30 -50 cm : Léger contraste de couleur marquant le passage à une couleur brun jaune (7.5 YR 6/6). La texture est sableuse mais légèrement plus grossière. La structure est devenue massive. Porosité bien développée.

50 - 140 cm : De couleur plus jaune (10 YR 6/6), cet horizon est de texture sableuse à sables grossiers clairs arrondis nettement plus grossière que les précédentes. La structure est identique au niveau supérieur mais l'on observe une franche augmentation de l'état d'humidité et une augmentation de la compacité vers le niveau 120 cm.

140 - 160 cm : ce niveau se différencie par la présence importante de sables grossiers en mélange avec des sables fins. On notera la présence d'argile qui donne une légère agrégation. L'ensemble est toujours peu cohérent mais compact.

160 - 240 cm : fort contraste de couleur et de texture. Passage à une couleur brune rouge foncée. la texture est grossière faite d'un mélange de sables grossiers et de cailloux très anguleux à subanguleux de diamètre > 2 mm à la base de l'horizon (nodules ferrugineux). La base de l'horizon présente une phase indurée.

Morphologie des parois du puit proche de la mare de Sama Dey (description faite par J.L Rajot et C. Leduc au péril de leur vie)

A partir du niveau statique de la nappe (- 45 mètres environ de la surface du sol), on distingue :

- niveau de limono sableux à teinte grise avec des auréoles de couleur "rosé", quelques traces de tubulures;
- 6 mètres au dessus du niveau statique : niveau limono sableux (moins sableux) de teinte gris et ocre
- 9 mètres : idem avec des taches de couleur "rosé"
- 20 mètres : niveau dur d'une épaisseur d'environ 40 cm, fait d'oolithes ferrugineuses non massives
- 26 mètres : niveau limono sableux de teinte ocre, présence de cavités de diamètre d'environ 0.5 cm
- 30 mètres : idem avec les parois du puit humides, nombreuses cavités
- 33 mètres : niveau induré ferrugineux

de 30 mètres à la surface du sol, les niveaux limono sableux sont principalement de teinte beige à beige gris.

240 - >280 cm : de couleur identique à l'horizon sus jacent, la texture sableuse devient légèrement argileuse.

Caractéristiques morphologiques et physico-chimiques d'un profil type du bas-fond de Sama-Dey village (Nagumo, 1992)

No	pH (KCl)	EC (1:5)	Na	K	Ca	Mg	Active acidity	ECEC (me/100g)	V (%)	P2O5 (mg/kg)	T-C (%)	T-N (%)
1	4.8	46.4	0.00	0.17	0.31	0.13	0.00	0.61	100	9.9	0.30	0.03
2	3.8	27.4	0.00	0.07	0.06	0.02	0.60	0.75	20.0	6.2	0.17	0.03
3	3.9	25.1	0.00	0.05	0.03	0.02	0.97	1.07	9.3	1.9	0.11	0.01
4	4.0	30.0	0.00	0.06	0.05	0.02	0.65	0.78	16.7	8.1	0.06	0.02
5	4.0	26.9	0.00	0.06	0.05	0.01	0.71	0.83	14.5	8.7	0.06	0.02
6	4.1	30.4	0.00	0.06	0.12	0.03	0.62	0.83	25.3	10.0	0.06	0.02

No	Clay	f.Silt	c.Silt	f.Sand	c.Sand	Clay Sand ratio	fine-coarse Sand ratio
1	3.8	2.1	5.9	59.1	29.1	0.04	2.03
2	5.0	3.4	4.8	46.7	40.2	0.06	1.16
3	13.0	1.5	3.8	44.9	36.8	0.16	1.22
4	12.0	2.4	3.6	47.7	34.3	0.15	1.39
5	12.8	2.7	3.4	47.4	33.7	0.16	1.42
6	12.7	2.5	2.7	40.3	41.8	0.15	0.97

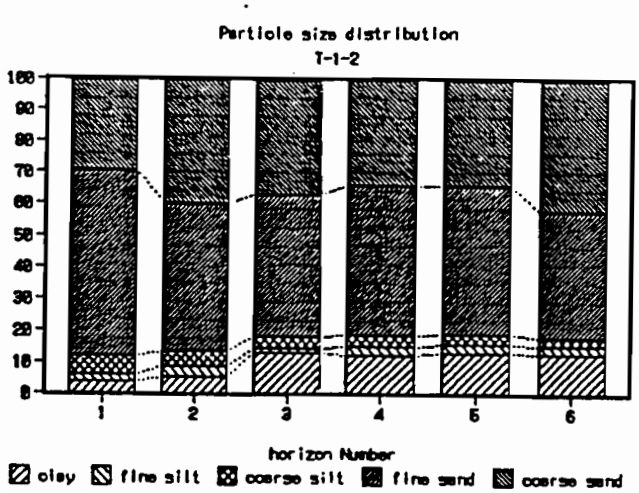


Tableau A31 : Granulométrie des sols du lit des mares de référence

Mare	Profondeur moyenne	Teneur en eau	Argile 0 - 2 µ	Limons fins 2 - 20µ	Limons grossiers 20 _ 50 µ	Sables très fins 50 - 100 µ	Sables fins 100 - 200 µ	Sables moyens 200 - 500 µ	Sables grossiers 500 - 1000 µ	Sables très grossiers 1 - 2 mm	Refus à 2 mm	Somme
	cm	cm^3/cm	% matrice								% poids total	% matrice
Bazanga	***sol dans la zone sédimentaire***											
	2.5	0.6	17.6	14.0	4.3	6.6	14.1	36.3	6.7	1.2		101.4
	sol dans la zone d'innondation temporaire											
	2.5	0.5	16.0	13.2	3.8	5.8	13.0	39.1	8.2	1.2	41.0	100.9
	7.50	0.4	11.9	3.6	4.0	7.8	15.0	39.4	12.4	7.0	83.2	101.6
	12.50	0.8	14.5	5.1	5.1	8.7	13.8	30.9	12.6	10.3		101.8
Wankama	***sol dans la zone sédimentaire***											
	5		29.8	17.4	1.7			22.1				98.4
	25		8.9	2.1	0.3			34.2				97.7
	45		5.5	2.7	1.1			34.0				98.8
	55		6.5	3.5	1.4			30.0				99.2
	sol dans la zone d'innondation temporaire											
	75	0.1	7.6	1.3	3.0	20.7	37.7	26.4	2.1	0.0		99.0
	95	0.2	9.1	3.3	2.8	21.7	34.5	27.4	2.1	0.0		101.0
	115	0.2	10.1	4.3	3.4	20.3	36.1	24.3	1.6	0.0		100.4
Sama Dey	***sol dans la zone sédimentaire***											
	25	0.6	20.6	25.7	10.6	12.9	16.0	13.4	2.0	0.0		101.8
	35	0.5	22.6	25.2	9.7	11.8	15.2	14.6	2.0	0.0		101.6
	55	0.6	30.0	19.6	8.0	14.1	14.6	12.9	2.0	0.0		101.7
	75	0.5	27.7	18.3	6.0	12.4	16.8	16.7	2.9	0.0		101.5
	95	0.6	30.8	12.7	5.2	14.1	15.9	18.6	3.4	0.0		101.3
	sol dans la zone temporairement inondée											
	5	0.16	3.6	2.4	2.05		41.8		49.1		0.1	99.2
	45	0.26	12.3	2.4	1.1		38.1		45.8		0.02	99.8
	85	0.22	9.15	2.9	1.6		32.1		53.7		0.03	99.8
	125	0.21	10.8	1.5	1.2		37.3		49.0		0	100.0
	165	0.29	13.0	2.2	1.3		34.7		47.5		0.05	99.1

ANNEXE 4 : étude de la vidange des mares de référence

- épisodes représentatifs à la mare de Wankama, Bazanga et Sama Dey et leurs paramètres de déstockage
- valeurs de I_{vi} utilisées pour l'ajustement des lois de vidange
- valeurs des taux d'évaporation intiaux et finals pour les mares de référence et les années 1991, 1992 et 1993

Tableau A41, 42 et 43 : épisodes représentatifs à la mare de Wankama, Bazanga et Sama Dey et leurs paramètres de déstockage

Bazanga

date	niveau initial	temps cumulé	niveau du plan d'eau	taux de vidange instantané	taux d'évaporation instantané	indice d'humidité IK
	cm	heures	cm	cm/j		mm
30/Aoû/92	134					88,6
		7,6	130	12	0,046	
		17,8	125	12	0,048	
		30,1	120	9	0,062	
		56,7	110	8	0,073	
		99,6	101	3	0,190	
		169,7	95	1	0,448	
31/Jul/92	125					20,1
		10,0	120	12	0,046	
		32,8	110	10	0,058	
		47,8	105	7	0,075	
		87,9	100	2	0,237	
		229,9	91	2	0,255	
13/Aoû/93	117					34,4
		10,5	113	9	0,061	
		18,9	110	9	0,065	
		36,7	105	6	0,093	
		60,4	101	3	0,197	
		93,5	98	3	0,217	
18/Jul/92	106					7,2
		3,3	105	7	0,075	
		13,2	103	5	0,102	
		29,6	101	3	0,191	
		75,0	96	2	0,249	
		105,8	93	2	0,276	
21/Jul/93	99					18,2
		46,6	96	2	0,284	
		94,4	93	2	0,319	
		143,5	90	2	0,331	
		181,9	88	1	0,493	
30/Jun/92	67					2,4
		25,7	67	1	0,795	
		117,9	64	1	0,795	
		151,6	63	1	0,795	
		198,5	62	1	0,795	
		231,6	61	1	0,795	
		259,3	60	1	0,795	
		267,8	59	1	0,794	

Wankama

date	niveau initial	temps cumulé	niveau du plan d'eau	taux de vidange instantané	taux d'évaporation instantané	indice d'humidité IK
	cm	heures	cm	cm/j		mm
22/Aoû/93	384					35,6
		3,7	370	96	0,01	
		17,5	341	48	0,01	
		42,2	311	36,9	0,02	
		114,8	260	20	0,03	
		246,2	220	4,4	0,13	
		286,0	214	2,3	0,24	
		152,2	240	5,9	0,09	
22/Jul/92	332					43,3
		4,3	326	57,6	0,01	
		7,3	320	48	0,01	
		17,6	300	41	0,01	
		30,9	280	36	0,02	
		67,2	240	20,6	0,03	
		116,4	207	12,5	0,04	
20/Aoû/91	253					41,3
		5,4	242	48	0,01	
		12,6	231	32	0,02	
		33,0	210	19,2	0,03	
		69,4	190	8,5	0,07	
		162,9	170	3	0,19	
		217,0	164	2,1	0,26	
13/Jun/92	198					15,1
		2,9	195	16,9	0,03	
		67,3	175	4,1	0,14	
		197,6	160	1,8	0,31	
		325,1	150	0,8	0,70	
		681,4	130	0,9	0,62	
10/Aoû/91	175					48,8
		23,3	170	4,4	0,13	
		58,4	165	2,8	0,20	
		105,4	160	2	0,28	
		150,8	157	1,1	0,51	
07/Jul/93	157					30,5
		16,7	154	4,1	0,14	
		58,3	152	1	0,56	
		121,0	148	1	0,56	
		200,7	144	0,9	0,62	

Sama Dey

date	niveau initial	temps cumulé	niveau du plan d'eau	taux de vidange instantané	taux d'évaporation instantané	indice d'humidité IK
	cm	heures	cm	cm/j		
31/Jul/92	158					18
		1,7	150	96	0,006	
		5,5	135	72	0,008	
		14,7	110	58	0,010	
		30,4	80	48	0,012	
		48,0	50	41	0,014	
		75,4	20	13	0,043	
		86,6	11	17	0,033	
30/Aoû/92	105					66,2
		2,2	100	58	0,010	
		8,6	86	48	0,012	
		24,3	60	41	0,014	
		41,8	37	26	0,021	
		60,6	20	29	0,019	
		77,8	10	14	0,040	
22/Aoû/93	85					31,3
		1,7	80	103	0,005	
		4,3	70	80	0,007	
		21,0	35	45	0,012	
		34,3	20	36	0,015	
		49,3	10	17	0,033	
		61,9	5	15	0,037	
		65,5	4	8	0,070	
03/Sep/93	65					13,1
		2,2	58	80	0,007	
		4,8	50	65	0,009	
		8,9	40	51	0,011	
		14,5	30	36	0,015	
		23,3	20	22	0,025	
		38,3	10	13	0,043	
		55,6	4	6	0,093	
19/Jul/93	45					9
		2,6	40	60	0,009	
		4,7	35	48	0,012	
		13,2	20	32	0,017	
		9,8	25	44	0,013	
		18,4	15	17	0,033	
		33,7	7	10	0,056	
13/Aoû/93	23					22
		0,9	22	27	0,021	
		2,7	18	48	0,012	
		6,8	12	26	0,021	
		11,9	8	15	0,037	
		15,6	6	10	0,056	
		17,8	5	11	0,051	

Tableau A44 : valeurs de I_{vi} utilisées pour l'ajustement des lois de vidange

Bazanga		Wankama		Sama Dey	
hauteur d'eau	taux de vidange I_{vi}	hauteur d'eau	taux de vidange I_{vi}	hauteur d'eau	taux de vidange I_{vi}
m	m/j	m	m/j	m	m/j
0,94	0,01	1,30	0,01	0,00	0,04
0,94	0,02	1,31	0,01	0,01	0,07
0,94	0,02	1,44	0,01	0,01	0,04
0,94	0,02	1,45	0,03	0,01	0,09
0,95	0,02	1,46	0,02	0,03	0,08
0,95	0,02	1,48	0,02	0,04	0,06
0,95	0,02	1,50	0,01	0,04	0,10
0,96	0,02	1,52	0,03	0,04	0,13
0,96	0,02	1,54	0,04	0,04	0,05
0,97	0,02	1,57	0,04	0,04	0,08
0,97	0,01	1,57	0,02	0,04	0,16
0,98	0,02	1,58	0,03	0,05	0,10
0,98	0,03	1,59	0,03	0,05	0,08
0,98	0,03	1,61	0,03	0,05	0,14
0,99	0,02	1,63	0,03	0,05	0,08
0,99	0,02	1,63	0,03	0,06	0,07
0,99	0,02	1,69	0,03	0,06	0,12
1,00	0,02	1,70	0,06	0,06	0,14
1,00	0,02	1,75	0,05	0,07	0,13
1,00	0,02	1,75	0,02	0,07	0,12
1,01	0,04	1,76	0,06	0,07	0,07
1,01	0,05	1,79	0,03	0,09	0,07
1,01	0,03	1,80	0,04	0,09	0,06
1,01	0,06	1,81	0,02	0,11	0,23
1,02	0,02	1,86	0,09	0,17	0,29
1,02	0,05	1,89	0,11	0,18	0,28
1,03	0,02	1,98	0,11	0,20	0,15
1,06	0,06	1,99	0,09	0,23	0,45
1,06	0,04	2,01	0,15	0,23	0,54
1,07	0,06	2,01	0,19	0,25	0,45
1,07	0,08	2,02	0,11	0,26	0,46
1,08	0,05	2,04	0,15	0,30	0,38
1,09	0,07	2,06	0,10	0,34	0,44
1,09	0,08	2,07	0,13	0,34	0,44
1,10	0,07	2,08	0,17	0,34	0,30
1,10	0,06	2,14	0,07	0,37	0,60
1,11	0,06	2,15	0,19	0,37	0,80
1,11	0,07	2,16	0,24	0,43	0,48
1,11	0,09	2,17	0,05	0,43	0,53
1,15	0,07	2,24	0,20	0,45	0,62
1,16	0,07	2,35	0,07	0,47	0,60
1,16	0,09	2,41	0,21	0,47	0,38
1,17	0,11	2,43	0,13	0,52	0,65
1,21	0,11	2,45	0,15	0,58	0,57
1,23	0,12	2,52	0,24	0,65	0,69
1,24	0,10	2,53	0,25	0,65	0,76
1,25	0,12	3,19	0,45	0,70	0,53
1,25	0,12	3,32	0,37	0,72	0,55
1,34	0,13	3,48	0,44	0,83	0,66
		3,84	0,88	0,85	1,00
				1,05	0,59
				1,58	1,28

Tableaux A45, 46 et 47 : Valeurs des taux d'évaporation intiaux et finals pour les mares de référence et les années 1991, 1992 et 1993

Bazanga

date début	durée	hauteur initiale	hauteur finale	taux d'évaporation initial	taux d'évaporation final
	jours	mètres			
14/07/1991	20,6	1,16	0,8	0,077	0,554
04/08/1991	4,3	1,15	0,98	0,077	0,291
08/08/1991	4,4	1,02	0,94	0,232	0,366
01/09/1991	32,9	1,1	0,69	0,076	0,632
05/06/1992	25,2	0,74	0,53	0,654	0,654
30/06/1992	11,2	0,67	0,59	0,806	0,806
18/07/1992	4,4	1,06	0,93	0,098	0,242
22/07/1992	5,6	1,09	0,92	0,085	0,327
28/07/1992	3,0	1	0,94	0,278	0,278
31/07/1992	9,6	1,25	0,91	0,048	0,371
10/08/1992	5,5	0,99	0,91	0,293	0,488
22/08/1992	2,7	1,23	1,01	0,048	0,113
24/08/1992	0,5	1,08	1,06	0,116	0,131
25/08/1992	2,8	1,11	1	0,100	0,234
28/08/1992	1,3	1,24	1,11	0,056	0,062
30/08/1992	7,1	1,34	0,95	0,043	0,264
07/09/1992	4,9	1,03	0,95	0,293	0,366
12/09/1992	2,8	1,16	1,01	0,062	0,174
07/07/1993	5,7	1,21	0,94	0,052	0,232
14/07/1993	2,2	1,01	0,96	0,154	0,293
16/07/1993	2,0	1,02	0,97	0,118	0,232
19/07/1993	2,3	1,00	0,96	0,348	0,327
21/07/1993	7,6	0,99	0,88	0,348	0,505
30/07/1993	1,3	1,09	1,01	0,070	0,101
31/07/1993	4,3	1,10	0,95	0,088	0,309
05/08/1993	2,4	1,07	0,98	0,099	0,199
08/08/1993	5,1	1,25	0,97	0,045	0,397
13/08/1993	3,9	1,17	0,98	0,052	0,214
18/08/1993	3,8	1,07	0,99	0,073	0,293
22/08/1993	7,8	1,11	0,94	0,081	0,505

Wankama

date début	durée	hauteur initiale	hauteur finale	taux d'évaporation initial	taux d'évaporation final
	jours	mètres			
20/07/1991	5,0	1,86	1,59	0,064	0,165
25/07/1991	9,2	1,63	1,46	0,190	0,366
04/08/1991	4,3	1,76	1,61	0,090	0,191
08/08/1991	2,3	1,89	1,70	0,052	0,094
10/08/1991	6,3	1,75	1,57	0,104	0,260
20/08/1991	9,4	2,53	1,63	0,022	0,194
29/08/1991	35,1	2,02	1,31	0,051	0,510
06/06/1992	6,1	2,01	1,54	0,038	0,159
13/06/1992	28,4	1,98	1,30	0,049	0,452
11/07/1992	6,5	1,58	1,45	0,206	0,210
18/07/1992	2,5	3,19	2,16	0,012	0,023
20/07/1992	1,8	2,41	2,08	0,027	0,032
22/07/1992	4,9	3,32	2,07	0,015	0,043
27/07/1992	3,8	2,45	1,99	0,037	0,062
14/06/1993	2,9	2,01	1,79	0,030	0,206
17/06/1993	20,9	2,15	1,50	0,029	0,428
08/07/1993	8,4	1,57	1,44	0,136	0,618
16/07/1993	2,0	1,52	1,48	0,185	0,309
21/07/1993	8,4	2,24	1,69	0,028	0,214
02/08/1993	2,8	1,80	1,75	0,136	0,293
05/08/1993	8,1	2,04	1,81	0,037	0,327
13/08/1993	4,0	2,52	2,06	0,023	0,054
18/08/1993	3,7	2,35	2,17	0,078	0,103
22/08/1993	12,0	3,84	2,14	0,006	0,082
03/09/1993	6,0	3,48	2,43	0,013	0,043

Sama Dey

date début	durée	hauteur initiale	hauteur finale	taux d'évaporation initial	taux d'évaporation final
	jours	mètres			
31/07/1992	4,1	1,58	0,06	0,004	0,048
06/08/1992	0,9	0,26	0,07	0,012	0,042
16/08/1992	1,8	0,58	0,05	0,010	0,041
22/08/1992	0,9	0,7	0,3	0,011	0,015
23/08/1992	1,5	0,34	0,04	0,019	0,035
25/08/1992	0,7	0,25	0,05	0,012	0,068
29/08/1992	0,9	0,52	0,175	0,009	0,020
30/08/1992	0,5	0,72	0,47	0,010	0,014
30/08/1992	3,6	1,05	0,07	0,009	0,046
07/09/1992	1,5	0,37	0,07	0,007	0,083
12/09/1992	2,7	0,83	0,09	0,008	0,083
15/09/1992	1,8	0,2	0,09	0,036	0,088
30/05/1993	1,2	0,11	0,01	0,025	0,076
02/06/1993	2,4	0,17	0,01	0,019	0,136
06/06/1993	1,7	0,23	0,00	0,012	0,129
13/06/1993	1,7	0,47	0,04	0,009	0,090
16/06/1993	2,5	0,65	0,01	0,008	0,061
06/07/1993	1,4	0,34	0,06	0,013	0,039
07/07/1993	2,0	0,34	0,06	0,013	0,081
19/07/1993	1,9	0,45	0,04	0,009	0,056
05/08/1993	1,4	0,43	0,05	0,012	0,058
08/08/1993	1,8	0,43	0,05	0,010	0,074
13/08/1993	0,9	0,23	0,04	0,010	0,043
18/08/1993	1,5	0,37	0,04	0,009	0,118
22/08/1993	2,9	0,85	0,04	0,006	0,070
03/09/1993	2,5	0,65	0,03	0,007	0,066

INTEGRATION DE L'EQUATION DIFFERENTIELLE

$$\frac{dH}{AH^2+BH+C}=-dt$$ pour l'application à la mare de Wankama

On pose tout abord $H'=H+\frac{B}{2A}$ d'où $\frac{dH}{AH^2+BH+C}=\frac{dH'}{AH'^2-\frac{B^2}{4A}+c}$

et $K=C-\frac{B^2}{4A}$. Sous l'application considérée (valeurs A, B et C du tableau 24 pour la mare de Wankama) K> 0 (= 0.011)

$$\text{donc } \frac{\alpha}{A}Arctg\alpha H'=-t+\beta$$

on sait que $\beta=\frac{\alpha}{A}Arctg(\alpha Hi+\frac{\alpha B}{2A})$ donc on peut ramener $\frac{dH'}{AH'^2+K}$ à la forme $\frac{\alpha}{1+\alpha^2x^2}$ en posant $\alpha^2=\frac{A}{K}$ et on obtient :

$$\frac{dH}{AH^2+BH+C}=\frac{\alpha dH'}{\alpha^2x^2+1}.\frac{\alpha}{A}$$

L'intégration donne alors :

$$\frac{\alpha}{A}Arctg\alpha H'=-t+\beta$$

$$\text{ou } H=\sqrt{\frac{A}{K}}tg\left[\sqrt{AK(-t+\beta)}\right]-\frac{B}{2A}$$

avec

$$\beta=\frac{\alpha}{A}Arctg(\alpha Hi+\frac{\alpha B}{2A})$$

ANNEXE 5 : estimation de l'évaporation

- valeurs mensuelles de l'évaporation du bac de classe A station de Niamey-Aéroport (Avr 91-Sept 93)
- analyses chimiques et isotopiques 1991 et 1992 des mares de Bazanga , Wankama et pluviomètre de Yélouma Est
- suivi de l'évaporation sur les mares de Bazanga et de Wankama, saison 1992
- valeurs des lames évaporées mare - bac de classe A , coefficient de transposition K pour les mares de Bazanga et Wankama (saison 1992)

Tableau A51 : valeur moyenne des lames évporées mesurées sur le bac de classe A (Niamey - Aéroport)

	total mensuel	moyenne journalière	écart type	minimum	maximum
	mm	mm/j			
Avr.91	429,2	14,3	2,9	3,9	18,3
Mai.91	297,8	9,6	3,8	3,1	17,4
Jun.91	270,7	9,0	1,6	5,6	12,3
Jul.91	200,8	6,6	1,8	2,8	10,5
Aoû.91	177,2	5,8	1,8	2,9	10,5
Sep.91	259,0	8,6	2,0	3,4	11,9
Oct.91	323,0	10,5	1,9	6,0	15,0
Nov.91	337,1	11,2	1,4	8,4	13,6
Déc.91	343,0	10,9	1,5	7,7	14,4
Jan.92	348,8	11,2	2,1	5,6	16,7
Fév.92	419,6	14,5	1,6	12,3	19,8
Mar.92	490,7	15,8	1,9	11,3	18,9
Avr.92	476,7	15,9	2,4	10,7	23,8
Mai.92	388,2	12,5	1,9	9,0	15,5
Jun.92	306,6	10,2	2,0	5,9	13,8
Jul.92	216,9	7,1	2,2	3,6	11,2
Aoû.92	176,7	5,7	2,0	1,2	9,4
Sep.92	204,6	6,8	1,7	3,6	10,4
Oct.92	316,1	10,2	1,3	7,8	13,1
Nov.92	324,5	10,8	1,0	8,4	12,4
Déc.92					
Jan.93	354,6	11,4	1,2	9,6	14,6
Fév.93	370,9	13,2	1,4	10,2	15,8
Mar.93	461,8	14,7	1,9	11,9	19,5
Avr.93	471,5	15,7	2,5	8,0	20,0
Mai.93	455,2	14,8	1,8	12,3	21,5
Jun.93	311,1	10,4	2,3	3,0	14,0
Jul.93	251,7	8,2	1,7	4,4	11,2
Aoû.93	207,8	6,8	1,9	2,4	10,7
Sep.93	233,8	7,8	1,7	3,6	10,1

Tableau A52 : évolution des teneurs chimiques, isotopiques de la mare de Bazanga saison 1991

date	18O ‰	²H ‰	Volume	Température de l'eau	conductivité	pH	Tac	Cl	Ca	Mg	K	Na	NO3	SO4	SIO2	Al2O3	Fe2O3
			m3	°C	µS		mg/l										
04/07/1991	2	2			52,1	6,3	9,8	1,4	1,8	0,6	7,4	2,1	10,5	3,4	10,8	6,2	1,3
11/07/1991	-	-	1586		61,1	7,2	15,3	2,6	2,1	0,9	9,0	1,3	7,4	1,1			
18/07/1991	-	-	2814		32,4	7,1	9,2	0,9	1,3	0,4	4,5	1,3	3,2	1,2			
25/07/1991	0	-7	1914	25,3	39,6	7,1	13,4	1,5	2,5	0,6	5,4	0,9	3,9	1,5			
01/08/1991	-	-	1511	27,2	48,0	7,0	13,4	2,0	2,1	0,7	8,4	1,1	6,0	2,0			
08/08/1991	-	-	3495	26,0	27,6	7,1	8,5	1,2	1,1	0,4	3,8	0,8	2,7	1,2			
15/08/1991	-2	-18	3169	27,8	40,8	7,1	12,8	1,9	1,4	0,5	5,0	1,9	2,8	1,4			
22/08/1991	-6	-50	3047	26,7	31,2	7,1	10,7	1,4	1,7	0,6	4,2	1,0	3,0	1,1			
29/08/1991	-	-	2094	29,1	29,5	6,9	14,0	2,1	1,7	0,7	6,5	1,0	2,7	1,5	3,5	1,1	0,3
05/09/1991	-	-	2814	28,0	23,8	6,7	9,2	1,1	1,4	0,6	4,6	0,6	1,9	1,0	3,1	1,3	0,4
12/09/1991	-2	-30	2094	29,8	38,3	7,3	12,2	2,8	1,8	0,8	6,7	1,0	2,2	1,3	3,3	0,8	0,2
19/09/1991	-	-	1586	28,7	40,5	7,1	15,9	6,0	1,9	0,7	12,4	0,9	1,6	0,4	5,3	1,7	0,6
26/09/1991	-	-	1170	31,0	63,0	7,3	20,1	23,0	2,1	0,9	31,0	1,8	4,2	0,8	7,1	2,7	0,9
03/10/1991	6	15	742	28,2	142,3	7,4	5,5	23,2	1,7	0,7	24,7	1,8	0,0	3,2	7,2	2,2	0,9
10/10/1991	-	-	994	32,1	91,4	7,3	20,1	13,1	2,2	1,1	21,7	2,3	5,4	2,2	6,3	2,0	0,7
17/10/1991	-	-	742	30,3	118,0	7,0	15,3	13,4	2,3	1,0	25,9	2,6	14,5	3,9	10,2	3,7	1,3
24/10/1991	10	34	504	32,5	128,6	7,0	9,8	11,0	2,0	0,8	30,1	2,8	19,8	8,1	11,7	4,2	1,4
31/10/1991	-	-	326	25,5	133,2	6,8	4,3	15,6	2,3	1,0	32,5	3,6	23,4	11,1	11,7	1,8	0,8
07/11/1991	17	60	200	21,5	351,0	6,8	6,1	17,6	2,6	1,3	39,9	3,9	14,3	13,0	5,9	2,7	0,8
14/11/1991	-	-	104	21,3	436,0	6,1	2,4	21,6	3,0	1,6	54,7	4,6	19,3	13,1	2,0	0,8	0,2
21/11/1991	-	-	40	23,1	590,0	6,3	6,1	44,2	5,9	2,6	62,1	8,4	30,7	28,6	21,9	1,8	5,8
28/11/1991	28	-	20	18,8	730,0	6,2	7,9	55,0	8,7	4,6	84,8	11,1	29,1	41,1	22,3	0,9	4,9
05/12/1991	-	-	10	23,3	1 110,0	6,6	24,4	79,0	9,6	5,8	109,8	15,1	46,0	68,5	19,3	0,9	5,1
12/12/1991	35	143	5	17,4	1 806,0	7,4	167,8	125,4	23,5	14,5	192,8	23,5	0,0	85,0	12,3	0,3	3,4
19/12/1991	ass,																

Tableau A53 : évolution des teneurs chimiques, isotopiques de la mare de Wankama saison 1991

date	18O ‰	²H ‰	Volume	Température de l'eau	conductivité	pH	Tac	Cl	Ca	Mg	K	Na	NO3	SO4	SIO2	Al2O3	Fe2O3
			m3	°C	µS		mg/l										
11/07/1991	-	-			42,0	6,8	9,2	1,8	1,0	1,4	1,9						
18/07/1991	-	-			44,4	7,0	9,2	1,8	1,4	1,4	2,4						
25/07/1991	-0,15	-5,90	1377,2	22,4	25,2	7,0	7,3	1,3	0,6	0,7	1,9						
01/08/1991	-	-	976,5	26,6	37,2	7,0	10,4	1,7	1,0	1,4	1,4						
08/08/1991	-	-	3456,5	25,4	30,0	7,0	10,4	1,3	0,5	1,1	1,0						
15/08/1991	-3,43	-24,40	1377,2	26,3	44,4	7,1	14,0	1,8	0,6	1,4	1,0						
22/08/1991	-10,10	-72,40	4565,8	23,3	18,0	7,1	4,3	0,6	1,0	1,1	1,0						
29/08/1991	-	-	1647,8	30,2		6,8	14,0	1,3	1,0	2,0	0,9						
05/09/1991	-	-	1893,0	28,8	35,4	6,6	15,3	1,5	0,6	1,2	0,8						
12/09/1991	-4,22	-40,80	1204,4	30,0	105,0	6,9	18,3	1,3	0,3	4,9	1,2						
19/09/1991	-	-	941,9	28,9	83,0	6,8	1,2	1,5	0,4	16,5	0,2						
26/09/1991	-	-	644,2	31,3	131,0	7,1		1,5	0,7	19,5	0,4						
03/10/1991	0,72	-14,70	482,2	30,5	168,4	7,1		1,8	1,0	25,2	0,8						
10/10/1991	-	-	644,2	31,0	183,2	7,2	6,1	1,8	1,7	25,2	0,8						
17/10/1991	-	-	482,2	28,7	210,0	7,1		2,7	1,9	33,0	0,5						
24/10/1991	2,96	-1,40	369,3		200,0	7,2		2,7	2,1	29,1	1,0						
31/10/1991	-	-	250,6		197,2	7,3		2,5	0,2	27,3	1,3						
07/11/1991	-	-	162,5		463,0	7,4		2,1	1,9	7,3	2,8						
14/11/1991	6,76	14,30	99,5		438,0	6,7		2,0	1,8	7,7	4,8						
21/11/1991	-	-	48,0					0,8	2,6	9,9	6,7						
28/11/1991	-	-	23,4	20,7	331,0	6,8		0,6	2,5	8,9	9,2						
05/12/1991	-	-	13,7	20,8	330,0	6,8		0,4	3,7	11,0	9,1						
12/12/1991	-	-	7,2	23,6	285,0	6,7		0,4	2,8	10,3	8,6						
19/12/1991	11,55	31,50	3,2					1,2	3,0	11,0	10,1						
26/12/1991			1,4														
02/01/1992			0.4	16.2	240.0	6.8		0.9	3.7	11.0	12.0						
09/01/1992			0.0														
16/01/1992	15.62	49.60		19.5	290.0	6.2		2.7	6.7	16.3	14.4						

Tableau A54 : composition chimique des cumuls hebdomadaires pluviométriques à la station de Yélouma Est

Echantillonnage			Ca	Mg	K	Na	Tac	Cl	NO3	SO4	SiO2	Al2O3	Fe2O3
			mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l
période du 20/6/91	au	27/06/91	1,323	0,243	0,469	0,253	1,220	0,355	1,550	0,480	0,30	0,46	0,00
période du 27/6/91	au	04/07/91	0,621	0,438	5,318	1,334	2,563	2,128	2,604	3,362	16,65	9,83	2,24
période du 04/07/91	au	11/07/91	0,681	0,085	0,156	0,414		1,418	1,240	1,921			
période du 11/07/91	au	18/07/91	0,381	0,061	0,313	0,483		1,418		1,441			
période du 18/07/91	au	25/07/91	0,060	0,012	0,235	0,253		1,418		0,961			
période du 25/07/91	au	01/08/91	1,323	0,085	0,156	0,345		1,064	0,620	1,441			
période du 01/08/91	au	08/08/91	0,401	0,024	0,078	0,230		0,709		0,865			
période du 08/08/91	au	15/08/91	0,782	0,049	0,196	0,506		2,128	0,620	1,441			
période du 15/08/91	au	22/08/91	0,100	0,024		0,069		0,355		0,480			
période du 22/08/91	au	22/08/91	0,621	0,158	0,039	0,184		1,808	0,248	0,672	0,00	0,21	0,00
période du 29/08/91	au	05/09/91	0,200	0,073				0,426		0,192	0,00	0,13	0,00
période du 26/9/91	au	03/10/91	0,962	0,255	0,469			0,674	1,488	2,353	0,00	0,32	0,00
période du 03/10/91	au	10/10/94	0,240	0,085				0,426		0,336	0,00	0,15	0,00

Tableau A55 : suivis à la mare de Bazanga pour l'estimation de l'évaporation.(saison 1992)

date	cote échelle	volume	lame évaporée du bac enterré	conductivité	^{18}O	^{2}H
	m	m3	mm	µS	‰	‰
23/09/1992	0,93	2384,8	8	23	-1,1	-11,7
24/09/1992	0,92	2284,9	5	21		
28/09/1992	0,88	1913,8	22	36	0,8	-5,1
01/10/1992	0,87	1827,9	18	52	2,0	
07/10/1992	0,82	1437,9	33	74	3,9	11,7
08/10/1992	0,79	1233,7	10	80		
10/10/1992	0,78	1170,4	13	94	5,2	
14/10/1992	0,75	966,5	32	123	6,7	
17/10/1992	0,72	836,9	19	132	7,1	29,3
21/10/1992	0,69	698,1	34	140		
23/10/1992	0,68	635,2	15	154	9,9	38,5
28/10/1992	0,63	454,4	40	185	12,3	
02/11/1992	0,57	301,9	44	248	15,0	62,9
06/11/1992	0,52	199,5	30	327	16,5	
11/11/1992	0,46	109,0	50	403	18,6	
16/11/1992	0,37	44,5	44	626	21,7	96,7
23/11/1992	0,30	20,1	60	906	27,6	112,3

Tableau A56 : suivis à la mare de Wankama pour l'estimation de l'évaporation.(saison 1992)

date	cote échelle	volume	lame évaporée du bac enterré	conductivité	18O ‰	^{2}H ‰
	cm	m3	mm	µS		
23/09/1992	2,12	6045,5	0	35	-3,1	-22,5
24/09/1992	2,09	5731,0	6	-		
25/09/1992	2,06	5306,2	8	-		
28/09/1992	1,98	4457,5	16	48		
01/10/1992	1,92	3839,0	16	53	-1,5	-16,2
06/10/1992	1,83	3011,5	30	64	-0,8	-11,5
08/10/1992	1,80	2762,1	10	74	-0,2	
10/10/1992	1,77	2487,5	11	89	0,1	
14/10/1992	1,69	1925,2	25	94	0,9	
17/10/1992	1,66	1767,7	17	103	1,8	-0,6
21/10/1992	1,62	1533,2	30	95	2,7	4,5
23/10/1992	1,61	1423,2	12	97		
28/10/1992	1,57	1225,1	34	86	4,2	
02/11/1992	1,52	1048,5	33	80		
06/11/1992	1,50	976,5	22	108	5,9	16,1
11/11/1992	1,45	812,7	34	105		
16/11/1992	1,41	683,6	33	124	7,6	25,4
23/11/1992	1,34	525,0	46	125	8,8	
30/11/1992	1,28	404,5	45	145	9,6	34,1
19/01/1993	0,87				16,6	62,4

Tableau A57 : lame évaporées mare - bac de classe A, coefficient de transposition K (mare de Bazanga)

période			lame évaporée calculée	lame évaporée bac de classe A	coefficient de transposition K
			mm/j		
12/09/1991 12:10	au	19/09/1991 11:10	4,8	9,5	0,50
19/09/1991 11:10	au	03/10/1991 10:32	5,0	9,6	0,52
17/10/1991 11:54	au	24/10/1991 12:36	5,2	10,7	0,48
24/10/1991 12:36	au	07/11/1991 10:05	6,7	11,8	0,57
07/11/1991 10:05	au	28/11/1991 10:00	6,7	11,2	0,60
23/09/1992 18:30	au	28/09/1992 17:00	4,9	8,9	0,55
28/09/1992 17:00	au	01/10/1992 09:00	3,8	8,9	0,42
01/10/1992 09:00	au	07/10/1992 07:45	4,1	9,4	0,43
07/10/1992 07:45	au	10/10/1992 11:00	5,7	9,7	0,59
10/10/1992 11:00	au	14/10/1992 18:10	4,3	9,1	0,48
14/10/1992 18:10	au	17/10/1992 09:10	4,8	10,3	0,46
17/10/1992 09:10	au	23/10/1992 12:00	6,1	10,8	0,56
23/10/1992 12:00	au	28/10/1992 11:00	7,1	11,2	0,63
28/10/1992 11:00	au	02/11/1992 15:50	8,1	11,0	0,74
02/11/1992 15:50	au	06/11/1992 12:00	6,3	10,0	0,63
06/11/1992 12:00	au	11/11/1992 16:40	7,1	10,8	0,66
11/11/1992 16:40	au	16/11/1992 16:15	6,4	10,6	0,61
16/11/1992 16:15	au	23/11/1992 16:15	7,0	11,1	0,63
				moyenne	**0,56**
				écart type	**0,08**

Tableau A58 : lame évaporées mare - bac de classe A, coefficient de transposition K (mare de Wankama)

période			Lame évaporée calculée	lame évaporée bac de classe A	coefficient de transposition K
			mm/j		
12/09/1991 09:50	au	19/09/1991 11:50	3,0	9,5	0,31
19/09/1991 11:50	au	03/10/1991 12:10	3,7	9,6	0,38
10/10/1991 10:00	au	17/10/1991 09:35	1,9	10,4	0,18
17/10/1991 09:35	au	24/10/1991 09:50	1,7	11,0	0,15
24/10/1991 09:50	au	14/11/1991 09:30	2,5	11,8	0,21
25/09/1992 11:00	au	01/10/1992 15:00	5,7	9,4	0,60
01/10/1992 15:00	au	06/10/1992 18:15	2,6	9,4	0,28
06/10/1992 18:15	au	08/10/1992 08:46	7,8	9,3	0,84
08/10/1992 08:46	au	10/10/1992 11:30	2,9	9,6	0,30
10/10/1992 11:30	au	14/10/1992 16:00	4,1	9,1	0,46
14/10/1992 16:00	au	17/10/1992 08:25	6,4	10,3	0,62
17/10/1992 08:25	au	23/10/1992 11:00	3,1	10,8	0,29
23/10/1992 11:00	au	28/10/1992 11:45	6,4	11,2	0,57
28/10/1992 11:45	au	06/11/1992 13:30	4,2	10,5	0,40
06/11/1992 13:30	au	16/11/1992 17:00	3,4	10,7	0,32
16/11/1992 17:00	au	23/11/1992 16:45	3,6	11,1	0,33
23/11/1992 16:45	au	30/11/1992 13:20	1,7	11,1	0,15
30/11/1992 13:20	au	20/01/1993 12:00	2,6	11,3	0,23
				moyenne	**0,37**
				écart type	**0,18**

ANNEXE 6 : pluviographie

- période de fonctionnement des pluviographes installés sur les bassins versants des mares étudiées

Tableau A61 : périodes de fonctionnement des pluviographes (réseau EPSAT Niger) et cumuls saisonniers sur les périodes de suivis limnimétriques

Mare	nom pluviographe EPSAT	période fonctionnement	cumul pluviométrique sur la période de fonctionnement	période de lacunes limnigraphique	cumul pluviométrique des périodes en lacunes à la mare	cumul pluviomériques sur la période de suivi des niveau
			mm		mm	mm
Saison 1991						
Bazanga	Gassanamari NE	29/04 - 22/10	582,5	début saison au 14/07 - 12 au 31/08	432	150,5
Wankama	Darey	23/04 - 10/10	567	début saison au 20/07	215,5	351,5
Yélouma	Yélouma- Est	16/04 - 22/10	600,5	début saison au 18/06	215	385,5
Saison 1992						
Banizoumbou	Banizoumbou	permanent	409,7	06/09/1992	12,2	397,5
Bazanga	Bazanga	17/04 - 23/10	504,2	-	-	504,2
Kampa zarma	Kampa zarma	07/05 - 23/10	443,2	-	-	443,2
Karbanga	Darey	12/05 - 23/10	506,6	-	-	506,6
Maourey Kouara	Wankama	20/02 - 27/10	590,6	début saison au 11/07 - 08/08	56,6	534
Massi koubou	Massi koubou	09/04 - 20/10	467,6	-	-	467,6
Poura	Wankama	20/02 - 27/10	590,6	-	-	590,6
Sama Dey plateau	Sama Dey village	permanent	489,2	-	-	489,2
Sama Dey village	Sama Dey village	permanent	489,2	début saison au 31/07	174,5	314,7
Sulfey	Koma koukou	permanent	446,3	-	-	446,3
Wankama	Wankama	20/02 - 27/10	590,6	21 et 22/08 - 06, 14 et 15/09	126,8	463,8
Yélouma	Yélouma - village	16/04- 23/10	414,7	-	-	414,7

Tableau A61 (suite) : périodes de fonctionnement des pluviographes (réseau EPSAT Niger) et cumuls saisonniers sur les périodes de suivis limnimétriques

Mare	nom pluviographe EPSAT	période fonctionnement	cumul pluviométrique sur la période de fonctionnement	période de lacunes limnigraphique	cumul pluviométrique des périodes en lacunes à la mare	cumul pluviomériques sur la période de suivi des niveau
			mm		mm	mm
Saison 1993						
Banizoumbou	Banizoumbou	01/01 au 22/10	446	début saison au 08/06	49	397
Bazanga	Bazanga	18/02 au 22/10	414	début saison au 29/06/ - 31/08 au 09/10	69	345
Kampa zarma	Koma koukou	16/2 au 22/10	592,5	début saison au 02/06 - 3, 6 et 14/07	70	522,5
Karbanga	Darcy	17/2 au 15/10	422	début saison au 15/06	48	374
Maourey Kouara	Wankama mare	17/02 au 28/10	508	06/06 - 16/07	27	481
Massi koubou	Massi koubou	10/2 au 20/10	363	-	-	363
Poura	Wankama plateau	11/06 au 28/10	516	début saison au 08/06	0	516
Sama Dey plateau	Sama Dey village	16/2 au 20/10	443,5	début saison au 15/06	48,5	395
Sama Dey village	Sama Dey village	16/2 au 20/10	443,5	05/09 au 09/10/	39	404,5
Sulfey	Koma koukou	16/2 au 22/10	592,5	début saison au 08/06 - 6, 14, 16 et 30/07	137,4	455,1
Wankama	Wankama	17/02 au 28/10	508	09/09 au 09/10/	45	463

ANNEXE 7 : estimation des écoulements vers la mare caractéristiques des bassins versants

- lames écoulées et lames écoulées corrigées vers les mares de Bazanga, Wankama et Sama Dey ;
- caractéristiques de bassin versant de la mare de Bazanga, Wankama : profils en long, délimitation du bassin versant et réseau de drainage, carte des états de surfaces.

Tableau A71 : Lames écoulées et lames écoulées corrigées pour toutes les crues mesurées à la mare de Bazanga.

date de l'apport	lame ruisselée ΔH	lame infiltrée (Linf)	lame infiltrée (Linf)	Lame ruisselée corrigée LR=ΔH + Linf
	mm		% ΔH	mm
12/07/1991	12,2	0,1	0,7	12,3
03/08/1991	11,9	0,5	3,9	12,4
08/08/1991	1,4	0,1	5,9	1,5
31/08/1991	7,4	0,1	1,9	7,6
03/10/1991	1,8	0,0	0,0	1,8
04/06/1992	2,6	0,0	0,0	2,6
30/06/1992	1,1	0,0	0,0	1,1
11/07/1992	0,8	0,0	0,0	0,8
18/07/1992	9,9	0,1	1,4	10,0
22/07/1992	5,9	0,2	3,3	6,1
28/07/1992	2,5	0,0	1,5	2,5
31/07/1992	13,9	0,2	1,4	14,1
10/08/1992	2,5	0,1	2,7	2,6
16/08/1992	0,7	0,0	0,0	0,7
21/08/1992	14,8	0,8	5,6	15,7
24/08/1992	2,8	0,1	3,0	2,9
25/08/1992	1,4	0,1	5,4	1,5
25/08/1992	1,4	0,1	6,0	1,5
28/08/1992	11,3	1,5	13,0	12,7
30/08/1992	6,2	0,2	4,0	6,4
30/08/1992	8,4	1,3	15,6	9,8
07/09/1992	2,8	0,1	5,2	2,9
12/09/1992	8,7	1,0	11,0	9,6
15/09/1992	1,1	0,0	1,4	1,1
07/07/1993	15,6	0,1	0,9	15,7
14/07/1993	2,3	0,1	5,3	2,5
16/07/1993	2,1	0,1	3,4	2,1
18/07/1993	1,2	0,2	16,1	1,4
21/07/1993	1,2	0,3	27,2	1,5
30/07/1993	7,2	0,1	1,8	7,4
31/07/1993	3,7	0,2	5,1	3,9
05/08/1993	4,8	0,3	5,8	5,1
08/08/1993	12,5	0,2	1,7	12,7
13/08/1993	8,6	0,4	4,4	8,9
17/08/1993	3,4	0,1	3,8	3,5
22/08/1993	5,1	0,2	4,6	5,3
30/08/1993	5,3	0,1	2,3	5,4

Tableau A72 : Lames écoulées et lames écoulées corrigées pour toutes les crues mesurées à la mare de Wankama.

date de l'apport	lame ruisselée ΔH	lame infiltrée Linf	lame infiltrée Linf	Lame ruisselée corrigée LR=ΔH + Linf
	mm		%ΔH	mm
20/07/1991	1,3	0,1	4,5	1,3
25/07/1991	0,1	0,0	0,0	0,1
03/08/1991	0,7	0,1	8,3	0,7
08/08/1991	0,9	0,1	12,3	1,0
10/08/1991	0,1	0,1	43,4	0,2
17/08/1991	0,4	0,0	13,4	0,4
18/08/1991	0,2	0,1	32,3	0,2
20/08/1991	5,0	0,3	5,4	5,3
29/08/1991	1,5	0,1	8,4	1,7
04/10/1991	0,2	0,0	0,0	0,2
06/06/1992	2,2	0,1	3,8	2,3
13/06/1992	1,5	0,1	7,4	1,6
11/07/1992	0,4	0,0	0,0	0,4
18/07/1992	11,9	0,4	3,7	12,3
20/07/1992	1,8	0,8	44,3	2,6
22/07/1992	11,1	0,9	8,5	12,0
27/07/1992	2,7	0,2	7,7	2,9
31/07/1992	14,6	0,4	2,6	14,9
08/08/1992	6,7	0,4	6,6	7,2
10/08/1992	1,5	0,1	9,7	1,6
11/08/1992	2,2	0,4	19,1	2,6
29/08/1992	5,2	0,2	4,7	5,5
30/08/1992	4,0	0,6	14,7	4,5
30/08/1992	1,4	0,1	4,7	1,5
13/06/1993	2,2	0,2	9,5	2,4
16/06/1993	1,9	0,2	10,3	2,0
07/07/1993	0,1	0,0	0,0	0,1
16/07/1993	0,1	0,0	0,0	0,1
19/07/1993	0,1	0,0	0,0	0,1
21/07/1993	3,1	0,1	4,4	3,3
30/07/1993	0,3	0,1	47,4	0,4
02/08/1993	0,2	0,0	0,0	0,2
05/08/1993	1,3	0,5	41,1	1,9
13/08/1993	4,6	0,9	19,3	5,4
17/08/1993	1,9	1,8	91,8	3,7
22/08/1993	16,3	0,8	4,9	17,1
03/09/1993	12,5	1,6	13,1	14,1

Tableau A73 : Lames écoulées et lames écoulées corrigées pour toutes les crues mesurées à la mare de Sama Dey village.

date de l'apport	*lame ruisselée* ΔH	*lame infiltrée Linf*	*lame infiltrée Linf*	*Lame ruisselée corrigée LR= ΔH + Linf*
	mm		% ΔH	*mm*
31/07/1992	33,6	3,3	9,7	36,8
06/08/1992	0,6	0,1	12,2	0,7
16/08/1992	3,3	0,3	8,6	3,6
21/08/1992	5,1	0,5	9,2	5,6
22/08/1992	0,2	0,1	41,8	0,3
25/08/1992	0,6	0,0	5,6	0,6
29/08/1992	2,6	0,2	6,9	2,8
30/08/1992	5,1	0,5	9,8	5,6
30/08/1992	11,3	1,2	10,8	12,5
06/09/1992	1,2	0,1	9,2	1,4
12/09/1992	7,6	0,5	6,8	8,2
14/09/1992	0,3	0,1	23,6	0,4
30/05/1993	0,2	0,0	3,3	0,2
01/06/1993	0,3	0,0	5,7	0,3
06/06/1993	0,5	0,0	4,3	0,5
13/06/1993	2,1	0,1	7,3	2,2
16/06/1993	4,3	0,2	5,0	4,5
06/07/1993	1,0	0,0	4,3	1,1
07/07/1993	1,0	0,1	8,1	1,1
19/07/1993	1,9	0,1	5,9	2,0
30/07/1993	0,1	0,0	1,0	0,1
05/08/1993	1,7	0,1	8,0	1,8
08/08/1993	1,7	0,1	5,5	1,8
13/08/1993	0,5	0,0	6,0	0,5
17/08/1993	1,3	0,1	7,0	1,4
22/08/1993	8,1	0,5	6,2	8,6
03/09/1993	4,3	0,3	7,2	4,6

CARACTERISTIQUES DU BASSIN VERSANT DE LA MARE DE BAZANGA

LEGENDE

unité	croûtes	géomorphologie	occupation des sols	% de végétation	structure de la végétation
	0.2G + 0.4 ERO+ 0.3 ST + 0.1DEC	plateau	non cultivé	e	bandes nues de brousse tigrée
	0.6BIO+0.1DEC +0.3DES	plateau	non cultivé	95	fourré de brousse tigrée
	0.4ERO+0.3ST 3+0.15DES 0.05ALG+0.1G	recouvrement sableux de plateau	non cultivé	12	en taches (1 à 20 m) parfois anastomosées
	0.6DEC+0.4BIO	dépression de plateau	non cultivé	10	concentration sur petites buttes
	eau (1DEC en saison sèche)	mare	non cultivé	e	arbres ou arbustes diffus

classifications des croûtes d'après CASENAVE et VALENTIN (1989)

station d'acquisition limnimétrique et pluviométrique

échelle limnimétrique

transect d'observations pédologiques

limite du bassin versant

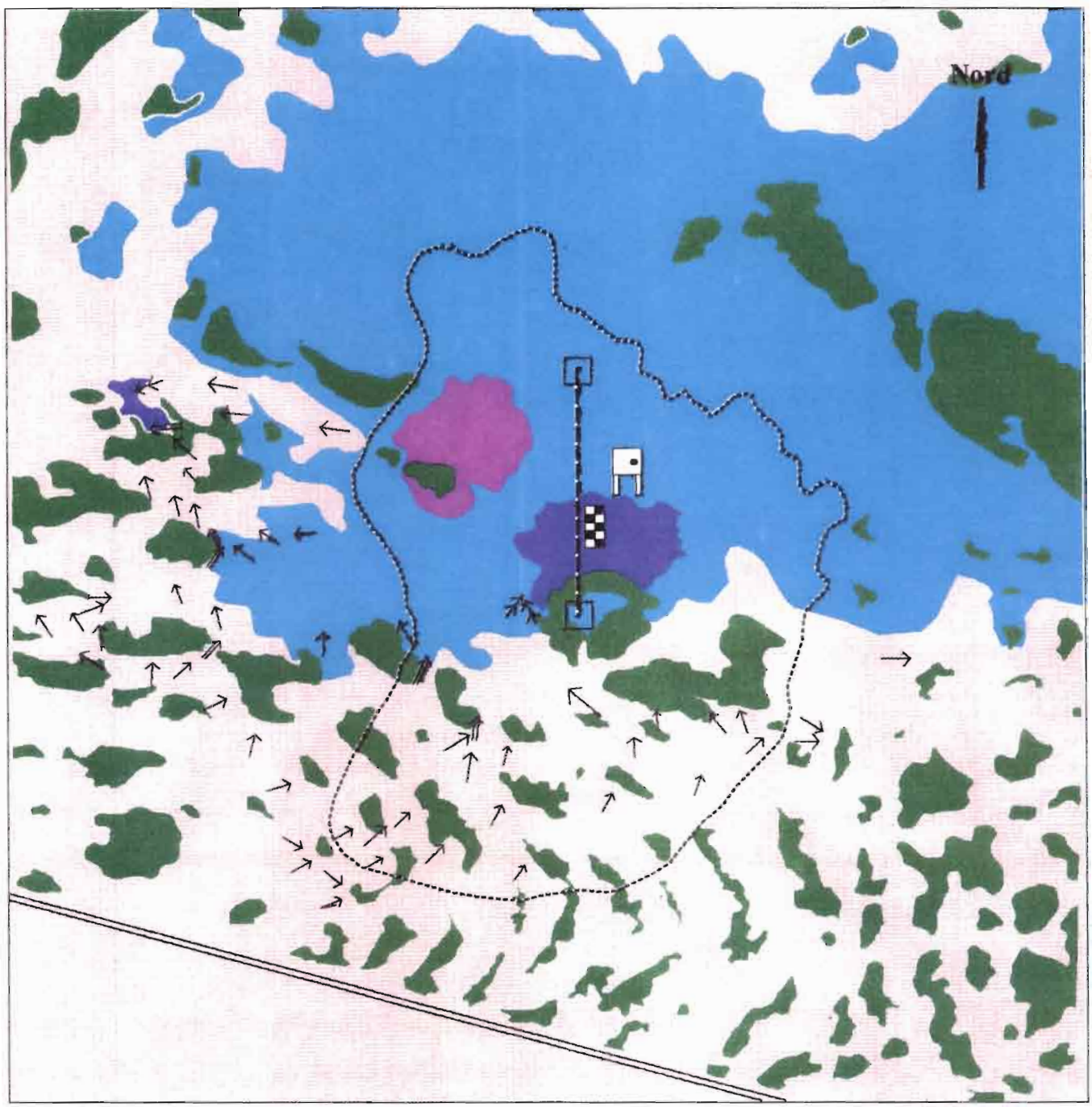
écoulement important

trace d'écoulement important

trace d'écoulement diffus

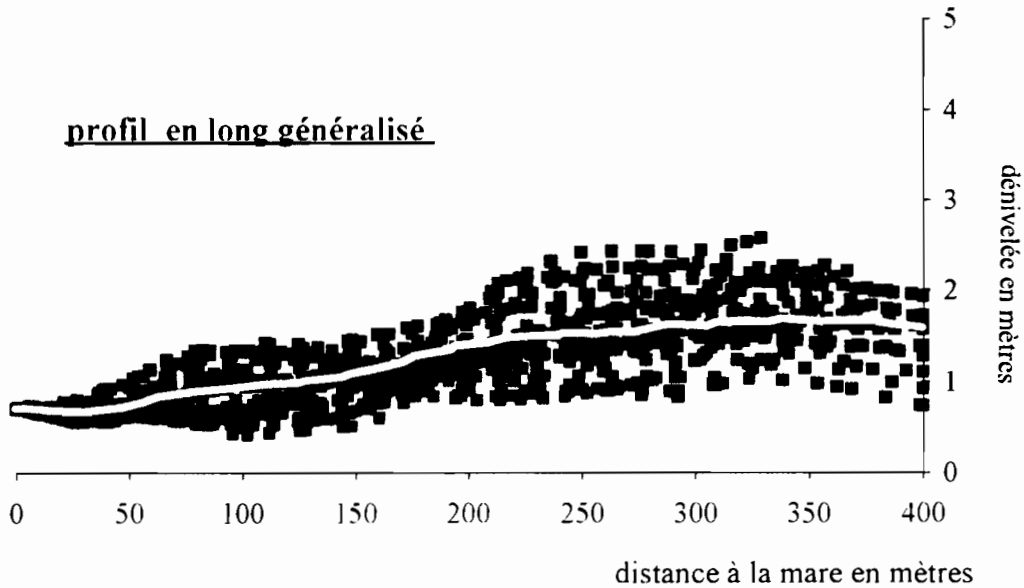
petit ravinement

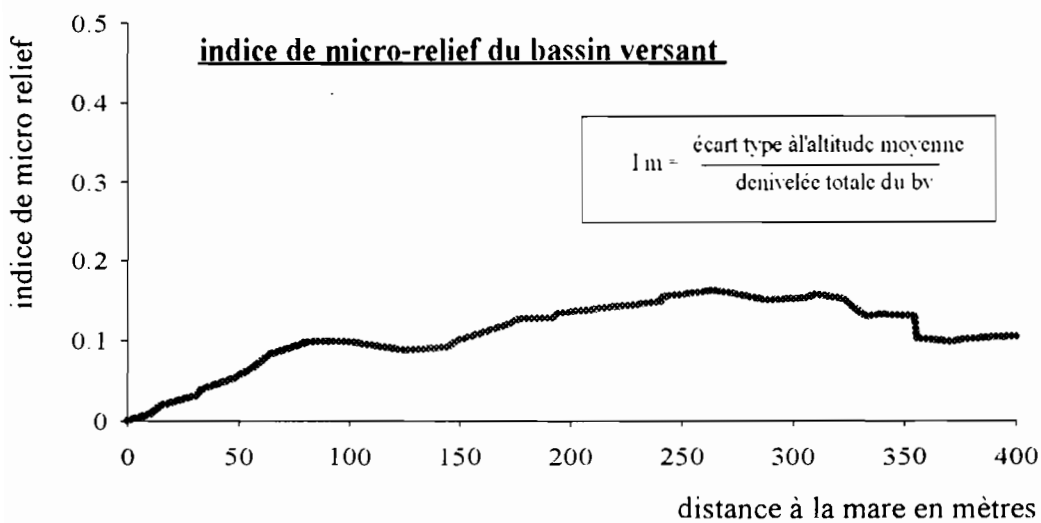
Carte des états de surface du bassin de Bazanga
et le dispositif de mesures

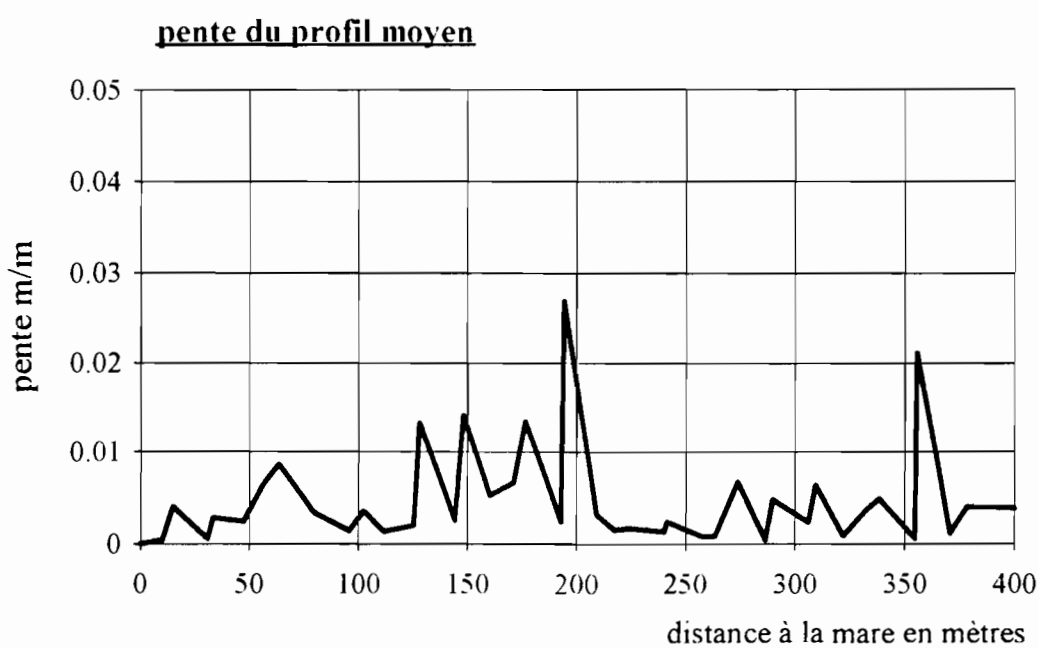


Echelle : 1/7000
carte dréssée par J.L. Rajot

Caractéristiques morphométriques du bassin versant de Bazanga







CARACTERISTIQUES DU BASSIN VERSANT DE LA MARE DE WANKAMA

LEGENDE

Unité	Croûtes	Géomorphologie	Occupations des sols	% de végétation	Structure de la végétation
	0.35G + 0.25ERO + 0.2ST3 + 0.1DEC+0.1BIO	plateau	non cultivé	10	brousse tigrée
	0.9G +0.1 Affleurement	talus de plateau	non cultivé	15	diffuse + concentration au bord des ravines
	0.45G + 0.5ERO + 0.05DES	piémont	non cultivé	1	petites taches (~1m) + concentration au bord des ravines
	0.2ERO + 0.4ST3 +0.3ALG + 0.1DES	versant amont	jachère ancienne	50	zones nues en taches (~10m) parfois anastomosées + concentratrion au bord des ravines
	.5ERO + 0.4ST3 0.05DE +0.05ALG	replat de mi-versan et versant aval	jachère ancienne	15	zones nues en grandes taches (>10 m)
	0.05ERO + 0.9ST3 + 0.05DES	versant	jachère	80	rares zones nues en petites taches non anastomosées
	0.2C3 + 0.7C2 +0.1C1	versant	champs de mil	15	rangée + diffuse
	0.05ERO + 0.45ST3 + 0.5DES	épandage sableux de ravines	jachères, champs de mil et jardin	25	concentration entre les zones d'apports récents
	1DEC	bas-fond	non cultivé et jardin	5	en bordure de l'unité
	0.6BIO + 0.3DEC + 0.1DES	divers	non cultivé	95	fourré de type ripicole
	0.9G + 0.1DES	replat cuirassé de mi-versant	non cultivé	1	petites taches ou bandes rappelant la brousse tigrée
	BITUME	-	route	0	-

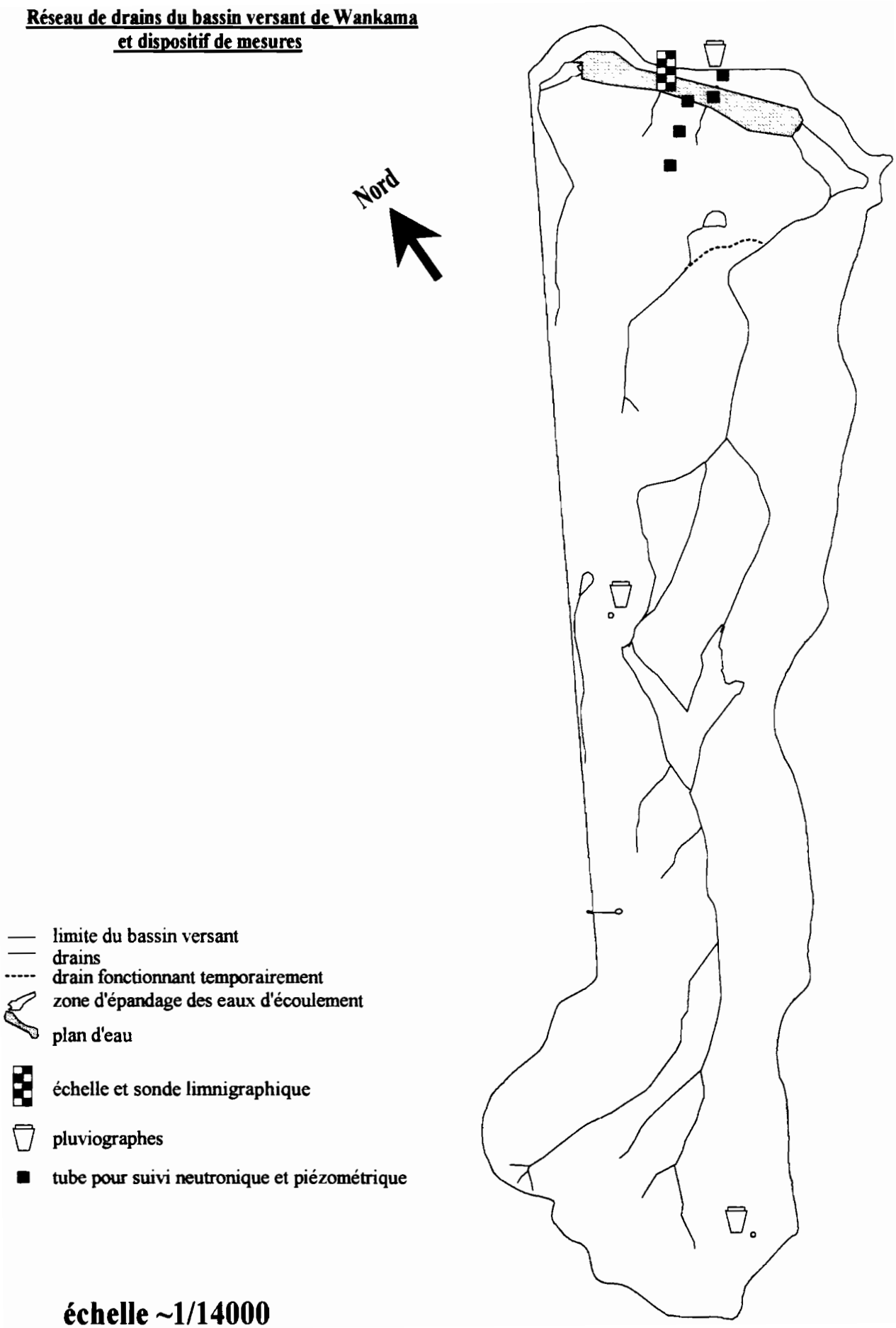
carte des états de surface du bassin versant de Wankama

limite du bassin versant

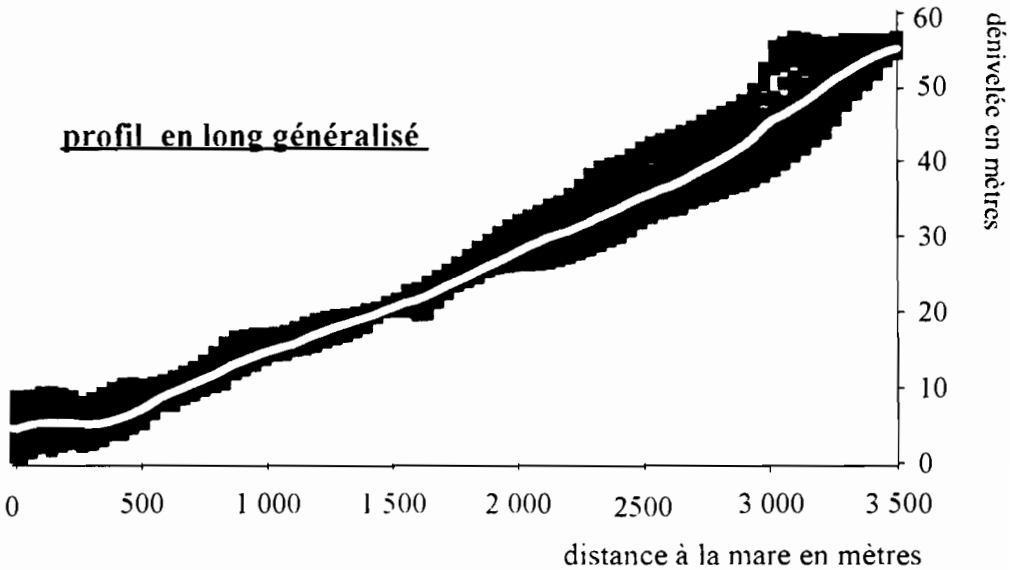
échelle ~1/14000

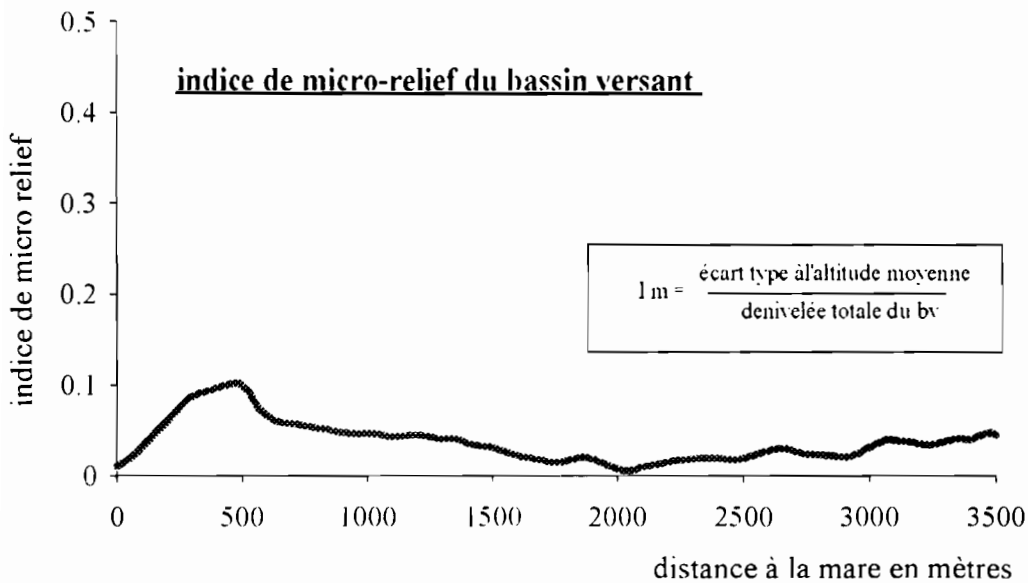
carte dressée par J.L Rajot

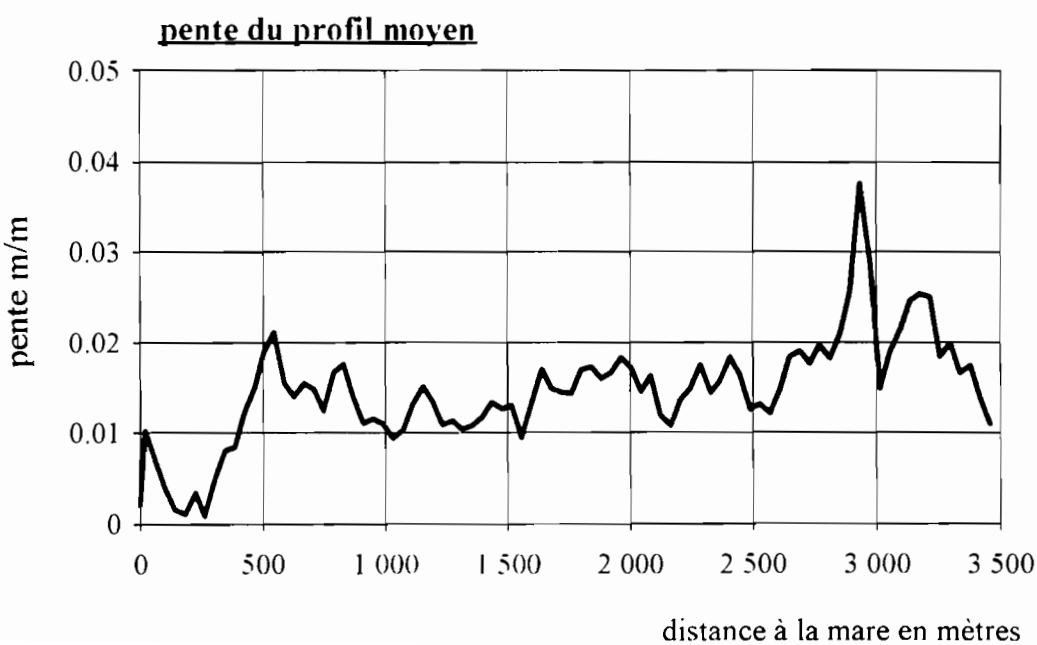
Réseau de drains du bassin versant de Wankama et dispositif de mesures



Caractéristiques morphométriques du bassin versant de Wankama







ANNEXE 8 : bilan hydrologique des mares de référence

- tableaux récapitulatifs des bilans hydrologiques par épisodes de vidange des mares de Bazanga, Wankama et Sama Dey.

Tableau A81 : bilan hydrologique de la mare de Bazanga pour les années 199, 1992 et 1993.

date début	date fin	durée	hauteur début	hauteur fin	stock début	stock fin	variation de stock ΔS	apports VR	volume évaporé Vev	volume infiltré Vinf
		jours	m		m^3					
année 1991										
14/07/91 09:00	03/08/91 15:40	20,3	1,16	0,80	5611,4	1264,9	4346,5	4276,9	902,7	3443,8
04/08/91 02:20	08/08/91 06:15	4,2	1,15	0,98	5435,0	2914,3	2520,7	4170,1	272,6	2248,1
08/08/91 11:10	12/08/91 21:40	4,4	1,02	0,94	3410,9	2467,3	943,6	496,6	243,0	700,6
arrêt des enregistrements										
01/09/91 00:15	03/10/91 23:00	32,9	1,10	0,69	4580,8	651,4	3929,3	2602,3	1613,6	2315,8
04/10/91 08:05	28/11/91 12:00	55,2	0,80	0,33	1264,9	18,9	1246,0	613,5	1013,5	232,5
année 1992										
05/06/92 00:30	30/06/92 05:05	25,2	0,74	0,53	920,1	200,7	719,4	920,1	536,5	183,0
30/06/92 08:15	11/07/92 12:05	11,2	0,67	0,59	585,0	326,0	259,1	384,4	181,5	77,5
11/07/92 13:15	18/07/92 01:15	6,5	0,68	0,64	605,1	468,3	136,8	279,2	109,4	27,4
18/07/92 04:10	22/07/92 14:00	4,4	1,06	0,93	3930,4	2363,4	1567,1	3462,1	279,0	1288,0
22/07/92 18:30	28/07/92 08:30	5,6	1,09	0,92	4415,4	2262,5	2152,9	2052,1	355,2	1797,8
28/07/92 14:50	31/07/92 14:15	3,0	1,00	0,94	3135,0	2429,3	705,7	872,6	179,8	525,9
31/07/92 15:25	10/08/92 05:20	9,6	1,25	0,91	7281,3	2164,7	5116,6	4852,0	572,3	4544,4
10/08/92 11:10	16/08/92 00:15	5,5	0,99	0,91	3033,8	2117,0	916,8	869,1	274,8	642,0
16/08/92 00:50	21/08/92 22:40	5,9	0,93	0,88	2363,4	1717,7	645,6	246,4	256,7	389,0
22/08/92 03:05	24/08/92 20:30	2,7	1,23	1,01	6897,4	3282,1	3615,3	5179,7	206,9	3408,4
24/08/92 22:10	25/08/92 09:40	0,5	1,08	1,06	4251,9	3930,4	321,5	969,8	36,7	284,8
25/08/92 10:25	25/08/92 17:15	0,3	1,09	1,00	4415,4	4251,9	163,5	485,0	14,9	148,6
26/08/92 00:35	28/08/92 13:05	2,5	1,11	1,08	4747,9	3156,4	1591,5	465,5	188,8	1402,8
28/08/92 19:25	30/08/92 03:20	1,3	1,24	1,11	7088,4	4747,9	2340,5	3932,0	114,4	2226,1
30/08/92 04:40	30/08/92 18:00	0,6	1,23	1,19	6897,4	6151,5	745,9	2149,4	49,5	696,3
30/08/92 22:50	07/09/92 00:30	7,1	1,34	0,95	9100,1	2574,4	6525,6	2948,6	530,5	5995,2
07/09/92 03:55	12/09/92 00:25	4,9	1,03	0,95	3542,8	2574,4	968,4	968,4	304,8	663,6
12/09/92 06:30	15/09/92 01:30	2,8	1,16	1,01	5611,4	3282,1	2329,3	3037,0	218,1	2111,2
15/09/92 02:55	30/11/92 12:00	76,4	1,04	0,24	3677,8	2,2	3675,6	395,7	1981,8	1693,8

Tableau A81 (suite)

date début	date fin	durée	hauteur début	hauteur fin	stock début	stock fin	variation de stock ΔS	apports **VR**	volume évaporé **Vev**	volume infiltré **Vinf**
		jours	m		m^3					
année 1993										
03/07/93 22:09	07/07/93 13:03	3,6	0,81	0,77	1334,5	1070,0	264,5		126,3	138,2
07/07/93 23:33	13/07/93 16:51	5,7	1,21	0,94	6520,8	2467,3	4053,4	5 450,8	419,7	3633,8
14/07/93 03:54	16/07/93 07:45	2,2	1,01	0,96	3282,1	2684,6	597,5	814,8	136,2	461,2
16/07/93 19:06	18/07/93 19:39	2,0	1,02	0,965	3410,9	2740,9	670,0	726,3	130,9	539,2
19/07/93 02:42	21/07/93 08:54	2,3	1	0,955	3156,4	2629,1	527,3	415,5	141,0	386,3
21/07/93 23:09	29/07/93 13:06	7,6	0,99	0,88	3033,8	1887,3	1146,5	404,7	415,0	731,5
30/07/93 09:03	31/07/93 15:15	1,3	1,09	1,01	4415,4	3282,1	1133,3	2 528,1	96,2	1037,1
31/07/93 18:06	05/08/93 02:18	4,3	1,1	0,95	4580,8	2574,4	2006,3	1 298,7	286,8	1719,6
05/08/93 10:03	07/08/93 19:33	2,4	1,08	0,98	4251,9	2914,3	1337,6	1 677,5	165,3	1172,3
08/08/93 05:00	13/08/93 07:03	5,1	1,25	0,97	7281,3	2797,9	4483,4	4 367,0	381,2	4102,2
13/08/93 19:27	17/08/93 16:57	3,9	1,17	0,98	5789,6	2914,3	2875,3	2 991,7	289,6	2585,7
18/08/93 00:12	21/08/93 19:25	3,8	1,07	0,985	4090,2	2973,7	1116,6	1 175,9	258,1	858,5
22/08/93 07:10	30/08/93 02:10	7,8	1,11	0,935	4747,9	2415,0	2333,0	1 774,3	499,0	1834,0
30/08/93 4:00	03/09/93 4:05	4,0	1,08	0,95	4251,9	2525,2	1726,7	1837,0	252,2	1474,5
03/09/93 5:50	18/09/93 2:15	14,9	1,08	0,90	4248,9	2103,0	2145,8	1674,7	575,1	1570,7
18/09/93 2:55	04/12/932:35	77,0	0,96	0,25	2684,6	2,8	2681,8	635,4	1632,8	1049,1

Tableau A82 : bilan hydrologique à la mare de Wankama pour les années 1991, 1992 et 1993.

date début	date fin	durée	hauteur début	hauteur fin	stock début	stock fin	variation de stock **ΔS**	apports **VR**	volume évaporé **Vev**	olume infilt **Vinf**
		jours	m		m^3					
année 1991										
	20/07/91 13:00		1,30		483,6					
20/07/91 16:15	25/07/91 15:05	5,0	1,86	1,59	3 180,1	1 442,8	1 737,2	2 696,4	138,9	1 598,3
25/07/91 17:25	03/08/91 22:35	9,2	1,63	1,46	1 633,9	926,4	707,5	191,1	169,8	537,8
04/08/91 00:55	08/08/91 08:55	4,3	1,76	1,61	2 371,2	1 536,4	834,8	1 444,8	89,7	745,1
08/08/91 11:05	10/08/91 17:15	2,3	1,89	1,70	3 471,2	2 008,0	1 463,1	1 934,8	72,1	1 391,1
10/08/91 20:25	17/08/91 03:15	6,3	1,75	1,57	2 307,9	1 353,2	954,6	299,8	131,5	823,2
17/08/91 05:40	18/08/91 07:20	1,1	1,72	1,67	2 124,6	1 841,4	283,3	771,4	20,2	263,1
18/08/91 09:10	20/08/91 03:15	1,8	1,74	1,67	2 245,6	1 841,4	404,3	404,3	39,8	364,5
20/08/91 09:45	29/08/91 20:05	9,4	2,53	1,63	12 668,3	1 609,2	11 059,1	10 826,9	374,4	10 684,7
29/08/91 22:05	04/10/91 00:25	35,1	2,02	1,31	4 893,1	505,8	4 387,3	3 283,9	759,0	3 628,3
04/10/91 03:45	04/10/91 03:50	0,0	1,44	1,43	860,2	828,3	31,9	354,3	1,3	30,6
04/10/91 08:25	19/12/91 14:20	76,2	1,47	0,69	960,8	3,4	957,4	132,5	503,5	453,9
année 1992										
06/06/92 21:15	12/06/92 23:25	6,1	2,01	1,54	4 774,7	1 225,9	3 548,8	4 774,7	231,2	3 317,6
13/06/92 02:20	11/07/92 11:45	28,4	1,98	1,30	4 428,4	483,6	3 944,8	3 202,5	723,5	3 221,3
11/07/92 13:40	18/07/92 00:50	6,5	1,58	1,45	1 397,5	892,9	504,7	913,9	119,1	385,6
18/07/92 02:55	20/07/92 14:00	2,5	3,19	2,16	26 447,1	6 699,4	19 747,6	25 554,2	239,9	19 507,7
20/07/92 20:20	22/07/92 14:40	1,8	2,41	2,08	10 559,7	5 633,7	4 926,1	3 860,3	141,4	4 784,7
22/07/92 19:15	27/07/92 15:40	4,9	3,32	2,07	29 458,5	5 506,7	23 951,8	23 824,8	464,0	23 487,8
27/07/92 18:25	31/07/92 12:40	3,8	2,45	1,99	11 245,5	4 542,4	6 703,1	5 738,9	280,6	6 422,5
31/07/92 16:00	08/08/92 16:20	8,0	3,59	2,07	35 856,9	5 506,7	30 350,2	31 314,5	494,7	29 855,5
08/08/92 18:55	10/08/92 04:50	1,4	2,90	2,81	20 015,6	18 125,7	1 889,9	14 508,9	106,3	1 783,5
10/08/92 05:25	11/08/92 22:10	1,7	2,96	2,80	21 306,5	17 919,4	3 387,1	3 180,8	50,8	3 336,3
11/08/92 23:50	29/08/92 02:40	17,1	3,02	2,15	22 619,9	6 561,4	16 058,5	4 700,5	1 167,9	14 890,6
29/08/92 04:05	30/08/92 03:00	1,0	2,80	2,65	17 816,5	14 921,8	2 894,7	11 255,0	38,7	2 855,9
30/08/92 05:25	30/08/92 18:45	0,6	3,06	2,97	23 418,0	21 523,8	1 894,2	8 496,2	10,8	1 883,4
30/08/92 19:00	30/11/92 13:20	91,8	3,12	1,28	24 628,2	441,3	24 186,9	3 104,3	3 098,6	21 088,3

Tableau A82 (suite)

date début	date fin	durée	hauteur début	hauteur fin	stock début	stock fin	variation de stock ΔS	apports **VR**	volume évaporé **Vev**	volume infiltré **Vinf**
		jours	m		m3					
année 1993										
14/06/93 00:51	16/06/93 22:12	2,9	2,01	1,79	4 774,7	2 568,3	2 206,4	4 774,7	180,2	2 026,2
17/06/93 00:09	07/07/93 22:09	20,9	2,15	1,50	6 561,4	1 069,1	5 492,4	3 993,2	848,2	4 644,2
08/07/93 08:45	16/07/93 17:27	8,4	1,57	1,44	1 353,2	860,2	493,0	284,1	163,1	329,9
16/07/93 23:24	19/07/93 00:09	2,0	1,52	1,48	1 145,7	996,0	149,7	285,5	40,0	109,7
19/07/93 02:48	21/07/93 20:33	2,7	1,54	1,51	1 225,9	1 087,9	138,0	229,9	56,9	81,1
21/07/93 22:36	30/07/93 07:21	8,4	2,24	1,69	7 850,6	1 951,4	5 899,2	6 762,7	377,8	5 521,4
30/07/93 10:39	02/08/93 10:42	3,0	1,79	1,73	2 568,3	2 184,6	383,7	616,9	95,5	288,3
02/08/93 11:33	05/08/93 06:45	2,8	1,80	1,75	2 641,3	2 307,9	333,5	456,8	86,9	246,5
05/08/93 12:54	13/08/93 16:03	8,1	2,04	1,81	5 134,2	2 684,0	2 450,2	2 826,3	374,4	2 075,9
13/08/93 21:48	17/08/93 22:30	4,0	2,52	2,06	12 486,8	5 381,1	7 105,7	9 802,8	283,4	6 822,3
18/08/93 11:15	22/08/93 03:15	3,7	2,35	2,17	9 564,6	6 838,7	2 725,8	4 183,5	261,3	2 464,5
22/08/93 06:21	03/09/93 04:21	11,9	3,84	2,14	41 829,9	6 424,8	35 405,1	34 991,2	1 046,1	34 359,0
03/09/1993 0:24	09/01/1994	128,0	3,5	1,3	33 234,2	471,3	32 762,9	26 809,4	4732,5	28030,4

Tableau A83 : bilan hydrologique de la mare de Sama Dey village pour les années 1992 et 1993

date début	date fin	durée	hauteur début	hauteur fin	stock début	stock fin	variation de stock ΔS	apports VR	volume évaporé Vev	volume infiltré Vinf
		jours	m		m^3					
année 1992										
31/07/92 16:05	04/08/92 19:00	4,12	1,58	0	211499,6	0,0	211499,6	211499,6	1856,7	209642,9
06/08/92 20:00	07/08/92 18:10	0,92	0,26	0	4007,5	0,0	4007,5	4007,5	60,1	3947,3
16/08/92 01:50	17/08/92 20:10	1,76	0,58	0	20769,3	0,0	20769,3	20769,3	241,4	20527,9
22/08/92 00:45	22/08/92 23:05	0,93	0,7	0,3	32145,6	5 173,5	26972,1	32145,6	288,2	26683,9
23/08/92 00:50	24/08/92 13:00	1,51	0,34	0	6564,8	0,0	6564,8	1391,3	135,0	6429,8
25/08/92 22:05	26/08/92 16:00	0,75	0,25	0	3739,4	0,0	3739,4	3739,4	49,6	3689,8
29/08/92 05:05	30/08/92 02:40	0,90	0,52	0,18	16211,1	2027,9	14183,1	16211,1	154,3	14028,8
30/08/92 05:00	30/08/92 18:10	0,55	0,72	0,47	34347,6	12 951,6	21396,0	32319,7	215,8	21180,2
30/08/92 20:05	03/09/92 11:30	3,64	1,05	0	83918,7	0,0	83918,7	70967,2	1176,1	82742,7
07/09/92 01:25	08/09/92 12:20	1,45	0,37	0	7789,6	0,0	7789,6	7789,6	168,3	7621,2
12/09/92 01:35	14/09/92 18:20	2,70	0,83	0,09	48078,8	723,6	47355,2	48078,8	779,2	46576,0
15/09/92 02:25	16/09/92 20:50	1,77	0,2	0	2539,9	0,0	2539,9	1816,3	143,9	2396,0
année 1993										
30/05/93 17:20	31/05/93 22:50	1,2	0,1	0,0	969,9	0,0	969,9	969,9	49,4	920,5
02/06/93 01:00	04/06/93 11:32	2,4	0,2	0,0	1 932,5	0,0	1 932,5	1 932,5	113,4	1 819,2
06/06/93 05:52	07/06/93 22:36	1,7	0,2	0,0	3 231,5	0,0	3 231,5	3 231,5	102,8	3 128,8
13/06/93 23:27	15/06/93 17:12	1,7	0,5	0,0	12 951,6	0,0	12 951,6	12 951,6	238,0	12 713,5
16/06/93 23:03	19/06/93 12:06	2,5	0,7	0,0	27 028,1	0,0	27 028,1	27 028,1	435,4	26 592,7
06/07/93 10:00	07/07/93 19:12	1,4	0,3	0,1	6 564,8	423,9	6 140,9	6 564,8	144,6	5 996,3
07/07/93 23:33	09/07/93 22:45	2,0	0,3	0,0	6 564,8	0,0	6 564,8	6 140,9	159,9	6 404,9
19/07/93 03:09	21/07/93 01:33	1,9	0,5	0,0	11 778,8	0,0	11 778,8	11 778,8	185,2	11 593,6
30/07/93 09:00	30/07/93 12:57	0,2	0,1	0,0	423,9	0,0	423,9	423,9	3,2	420,7
05/08/93 08:12	06/08/93 18:18	1,4	0,4	0,0	10 678,2	0,0	10 678,2	10 678,2	116,4	10 561,7
08/08/93 05:00	10/08/93 00:30	1,8	0,4	0,0	10 678,2	0,0	10 678,2	10 678,2	143,2	10 535,0
13/08/93 17:56	14/08/93 16:06	0,9	0,2	0,0	3 231,5	0,0	3 231,5	3 231,5	49,5	3 182,0
18/08/93 00:02	19/08/93 11:46	1,5	0,4	0,0	7 789,6	270,5	7 519,1	7 789,6	108,0	7 411,0
19/08/93 13:10	20/08/93 07:56	0,8	0,1	0,0	614,4	0,0	614,4	343,9	22,4	592,0
22/08/93 05:56	25/08/93 03:56	2,9	0,9	0,0	50 874,0	0,0	50 874,0	50 874,0	484,3	50 389,7
03/09/93 06:46	05/09/93 17:58	2,5	0,7	0,0	27 028,1	0,0	27 028,1	27 028,1	320,1	26 708,0

ANNEXE 9 : inventaire des puits et piézomètres dans la zone d'étude

- inventaires des puits suivis en piézométrie et caractéristiques statistiques des variations piézométriques annuelles

- variations piézométriques annuelles, entre le 12/91 - 11/92 et le 11/92 - 12/93

Tableau A91 : inventaires des puits suivis en piézométrie et caractéristiques statistiques des variations piézométriques annuelles

village	longitude est	latitude nord	coordonnées en X*	coordonnées en Y*	amplitude maximale 1991	1992	1993	niveau piézométrique entre 1991 et 1993 mininum	maximum
	dégré , minutes	dégré , inutes	km		mètres			mètres	
BANI KOSSEY	2°41,8'	13°42,19'	15,4	23,0			0,31	41,60	41,91
BANI KOSSEY	2°41,83'	13°41,23'	15,5	21,3	0,28	1,25	0,79	25,23	26,48
BANIKANE DOMEST	2°37,49'	13°35,17'	7,6	10,4		0,75	0,11	27,46	28,38
BANIKANE PASTOR	2°37,51	13°35,17'	7,6	10,4		0,09	0,16	25,74	26,55
BANIZOUMBOU ECOLE	2°39,53'	13°31,6'	11,3	3,9	0,01	0,42	0,16	23,29	23,83
BANIZOUMBOU MOSQUE	2°39,58'	13°31,72'	11,4	4,2		0,24	0,18	21,14	21,49
BANIZOUMBOU PZ ORS	2°39,68'	13°31,98'	11,6	4,6			0,36	18,30	18,91
BANKA DEY	2°36,07'	13°31,9'	5,0	4,5		0,28	0,11	29,23	29,55
BOULA DAREY	2°47,45'	13°37,68'	25,7	14,9	0,45	0,14	0,38	67,27	67,99
BOUNDOU	2°38,54'	13°32,78'	9,5	6,1		0,20	1,33	19,67	28,00
BOUNDOU WAROU	2°47,71'	13°33,92'	26,2	8,1	0,24	0,70	0,29	39,40	44,00
DANTIANDOU TEGUI	2°36,04'	13°36,7'	4,9	13,1		0,10	0,65	39,32	39,97
FANDOUBERI	2°33,5'	13°32,06'	0,3	4,8	0,01	0,36	0,10	29,18	29,68
GARBEY TOMBO PASTO	2°37,7'	13°41,16'	8,0	21,2			0,30	23,82	24,18
GARBEY TOMBO PTC	2°37,92'	13°41,21'	8,4	21,2		0,24	0,78	19,62	20,59
GOGUIEZE KOUARA DO	2°31,57'	13°37,03'	-3,2	13,7		1,56	1,44	45,80	48,00
GOGUIEZE KOUARA PA	2°31,64'	13°36,95'	-3,1	13,6		1,85	1,33	46,25	48,10
HABAKA PLATEAU	2°40,57'	13°42,8'	13,2	24,1			0,20	75,40	75,62
KAFINA	2°43,98'	13°42,85'	19,4	24,2	0,03	0,22	0,26	50,56	53,00
KALASSI	2°34,82'	13°31,89'	2,7	4,5		0,37	0,18	26,61	27,13
KARBANGA	2°44,66'	13°37,79'	20,6	15,1	0,31	3,90	1,20	49,58	53,99
KATANGA PASTORAL	2°48,73'	13°32,3'	28,0	5,2	0,61	0,14	0,68	53,63	55,29
KIDA TAFA KOUARA	2°36,29'	13°37,77'	5,4	15,0		0,48	0,68	52,57	53,52
KIDABAZAGAIZE GOUD	2°34,77'	13°37,34'	2,6	14,3		0,43	0,55	46,96	47,51
KIDABAZAGAIZE LATE	2°34,81'	13°37,25'	2,7	14,1		0,35	0,23	48,70	49,50

Tableau A91 (suite)

village	longitude est	latitude nord	coordonnées en X*	coordonnées en Y*	amplitude maximale 1991	1992	1993	niveau piézométrique entre 1991 et 1993 mininum	maximum
	dégré , minutes		km		mètres			mètres	
KODJIRI BANI KOUAR	2°30,65'	13°33,72'	-4,9	7,8		0,74	0,43	44,31	45,09
KOLO DIOGONO	2°36,1'	13°43,22'	5,0	24,9		0,15	0,39	27,92	28,43
MAOUREY KOUARA ZEN	2°39,04'	13°35,44'	10,4	10,9	0,18	4,72	1,86	19,28	24,00
MAOUREY TOKOBINKAN	2°40,79'	13°37,43'	13,6	14,4	0,18	0,59	0,36	26,90	27,73
NINE FOUNO BELLA	2°43,88'	13°41,3'	19,2	21,4	0,07	0,80	0,49	33,42	34,51
SABOU DEY	2°34,91'	13°34,79'	2,9	9,7		0,43	0,62	51,20	51,82
TIGO TEGUI	2°46,41'	13°30,62'	23,8	2,2		0,50	1,33	37,00	38,33
TONDI KIBORO	2°41,2'	13°31,23'	14,3	3,3	0,05	0,20	0,15	30,00	30,31
WANKAMA NORD	2°39,13'	13°39,41'	10,6	18,0		2,71	1,49	19,41	22,12
WANKAMA SUD	2°38,99'	13°39,23'	10,3	17,7		3,43	3,11	14,49	18,36

Tableau A92 :variations piézométriques annuelles, entre le 12/91 - 11/92 et le 11/92 - 12/93

nom du village	variation piézométrique (12/91-11/92)	nom du village	variation piézométrique (11/92-12/93)
	mètres		mètres
BANI KOSSEY	1,12	BANI KOSSEY	-0,24
BANIKANE DOMEST	0,09	BANIKANE DOMEST	0,16
BANIKANE PASTOR	0,61	BANIKANE PASTOR	0,16
BANIZOUMBOU ECOLE	0,07	BANIZOUMBOU ECOLE	0,14
BANIZOUMBOU MOSQUE	0,03	BANIZOUMBOU MOSQUE	0,15
BANKA DEY	0,14	BANKA DEY	0,17
BOULA DAREY	0,32	BOULA DAREY	0,02
BOUNDOU WAROU	0,84	BOUNDOU WAROU	-0,89
FANDOUBERI	0,07	DANTIANDOU TEGUI	0,09
GARBEY TOMBO PTC	0,18	FANDOUBERI	0,13
GOGUIEZE KOUARA DO	1,28	GARBEY TOMBO PTC	0,42
GOGUIEZE KOUARA PA	1,30	GOGUIEZE KOUARA DO	0,02
KAFINA	0,25	GOGUIEZE KOUARA PA	-0,51
KALASSI	0,15	HABAKA PLATEAU	0,49
KARBANGA	1,21	KAFINA	0,19
KATANGA PASTORAL	0,65	KALASSI	-0,92
KIDA TAFA KOUARA	0,42	KARABANGA	-0,65
KODJIRI BANI KOUAR	0,35	KIDA TAFA KOUARA	0,53
KOLO DIOGONO	0,06	KIDABAZAGAIZE GOUD	0,2
MAOUREY KOUARA ZEN	0,71	KODJIRI BANI KOUAR	0,04
MAOUREY TOKOBINKAN	0,45	KOLO DIOGONO	0,45
NINE FOUNO BELLA	0,42	MAOUREY KOUARA ZEN	-0,09
SABOU DEY	0,01	MAOUREY TOKOBINKAN	0,2
TIGO TEGUI	0,44	NINE FOUNO BELLA	0,21
TONDI KIBORO	0,08	SABOU DEY	-0,57
WANKAMA NORD	1,34	TIGO TEGUI	-0,62
WANKAMA SUD	1,63	TONDI KIBORO	0,18
		WANKAMA NORD	0,11
		WANKAMA SUD	-0,28

ANNEXE 10 : récapitulatif des missions aériennes

- missions aériennes de couverture des bassins versants des mares étudiées
- récapitulatif des missions aériennes pour la surveillance des niveaux des mares en 1992
- liste des mares suivies par photo aériennes pour l'évaluation des variations de stock dans le secteur d'étude

Tableau A101 : missions aériennes de couverture des bassins versants des mares

Les missions photographiques ont été réalisées avec un aéronef CESSNA 185 et une caméra HASSELBLAD 553 ELX monté avec un objectif Distagon 50 mm.

Date de la mission	Objet	Coordonnées du site	Altitude de prise de vue (en pieds)
11/6/92	couverture photographique du **bassin versant de Sama dey**	13°31,63 - 13°35,95 N 02°38,77 - 02°47,77 E	7500
23/7/92	couverture des bassins des mares de **kampa Zarma** **Banizoumbou** **Sama dey** **Maourey Kouara** **Wankama** **Karbanga** **Poura**	13°26,10 N - 2°38,38 E 13°32,00 N - 2°39,63 E 13°36,19 N - 2°42,17 E 13°36,59 N - 2°39,27 E 13°39,00 N - 2°38,91 E 13°37,95 N - 2°44,40 E 13°38,60 N - 2°37,03 E	3000
24/8/92	couverture du bassin versant des mares de **Bazanga** **Sulfey** **Maourey Kouara** **Sama Dey village** **Massi Koubou**	13°30,35 N - 2°35,11 E 13°30,04 N - 2°39,15 E 13°38,12 N - 2°39,15 E 13°50,00 N - 2°24,00 E	3300
18/9/92	couverture du bassin de la mare de **Wankama**	13°39,00 N - 2°38,91 E	3300
5/11/92	couverture du bassin versant de la mare de **Yélouma**	13°26,97 N - 2°30,80 E	6500

Tableau A102 : récapitulatif des missions aériennes pour la surveillance des niveaux des mares en 1992

Ces missions photographiques ont été réalisées avec une caméra HASSELBLAD 553 ELX monté avec un objectif Distagon 50 mm. L'émulsion utilisée est un film panchromatique de 125 ASA ILFORD.

mission	jour	avion	observations
1	21/9/92	ulm mustang	RAS
2	8/10/92	ulm weedhopper	RAS
3	16/10/92	ulm weedhopper	RAS
4	23/10/92	ulm weedhopper	panne moteur- route 1 et plus 3 mares de route 2
5	4/11/92	ulm weedhopper	vent
6	13/11/92	ulm weedhopper	route 1 puis arrêt cause trop de vent
7	18/11/92	Cessna185 F	RAS

Tableau A103 : liste des mares suivies par photo aériennes pour l'évaluation des variations de stock dans le secteur d'étude. Les coordonnées géographiques de ces mares sont données dans le tableau A1 de cette annexe.

route n°1	route n°2	route n°3
sulfey	darey	banizoumbou
koma koukou 1	sofi 1	kalasi
koma koukou 2	sofi 2	samsani 5
koma koukou 3	karbanga	samsani 2
bazanga	wankama 1	samsani 1
yélouma	wankama 2	samsani 3
dolohi 1	wankama 3	samsani 4
dolohi 2	wankama ech.	poura
kampa zarma 1	maourey 3	
kampa zarma 2	maourey 2	
yérima dey	maourey 1	
bagoua	sama dey 1	
	sama dey ech.	
	sama dey 3	
	sama dey 4	
	sama dey 5	

TYPOLOGIE ET CARACTERISTATION HYDROLOGIQUE DES SYSTEMES ENDOREIQUES EN MILIEU SAHELIEN (NIGER-DEGRE CARRE DE NIAMEY)

Résumé : l'hydrologie du Sahel est caractérisé par la dégradation des réseaux hydrographiques qui empêche une intégration spatiale des processus hydrologiques à l'échelle régionale. Les principales unités hydrologiques sont des petits bassins endoréiques, de superficie allant de quelques hectares à quelques km², dont les écoulements de surface vont se concentrer dans les mares. Une étude du rôle de ces mares dans l'hydrologie d'un degré carré (2-3°E ; 12-13°N) et en particulier sur un secteur de 600 km² (zone d'étude des mares) a été menée de 1991 à 1993. Une typologie des systèmes endoréiques en trois classes (endoréisme de plateau, de vallée avec la mare installée dans les anciens cours d'eau, de vallée « verrouillée » par les sables) est proposée. Le comportement d'une mare représentative par classe est analysée, montrant que la partition entre l'évaporation et l'infiltration profonde dépend du niveau de remplissage de la mare. Le lit de la mare est tapissé par des sédiments colmatants qui limitent l'infiltration. Au dessus de la zone colmatée, la majorité des écoulements de surface stockés dans la mare est infiltrée, contribuant à la recharge de la nappe. A l'échelle de la saison, l'infiltration dans les niveaux superficiels sont inférieurs à 70 % de l'eau écoulée vers les mares de plateau et sont supérieurs à 80 % dans les mares de vallée. Plus de 95 % de l'eau écoulée vers les mares de vallée « verrouillée » s'infiltre rapidement jusqu'à la nappe. Les mares de vallée apparaissent comme le principal contributeur dans la recharge de la nappe phréatique. La partie des précipitations qui s'infiltrent dans les mares vers la nappe varie principalement avec la distribution temporelle des précipitations. Avec une lame précipitée similaire entre 1992 et 1993, la recharge a été d'environ 5% en 1993 tandis qu'elle a été supérieure à 10 % en 1992. Cette différence s'explique par une distribution temporelle très irrégulière en 1992 où les plus forts événements ont été observé pendant une courte période.

Mots clés : Sahel, Niger, dégradation hydrographique, endoréisme, mares temporaires, évaporation, infiltration profonde, recharge de l'aquifère, bilan hydrologique, variabilité spatio-temporelle, précipitations

Abstract : the hydrology of the Sahel is characterised by the degradation of the drainage network, resulting in the lack of large watersheds over which the spatial intégration of the hydrological processes could be studied. The main hydrological units are small endoréic areas, measuring a few ha to a few km² and the surface runoff is collected into pools. A detailed invesgation of the role of these pools in the hydrology over a Pool Monitorring Area of 600 km² was carried out from 1991 to 1993. A typology in three classes of the endoréic systems (plateaux, valley bottom and sinks) is proposed. The behaviour of one representative pool in each class is analysed, showing that the partition between evaporation and deep infiltration depend on the level of filling of the pools. The bottom of the pool is clogged by clays deposits, which prevent infiltration. Above the clogged zone, most of the water stored in the pool after runoff infiltrates, contributing to the recharge of the aquifers. On a seasonal basis, infiltration in superficials layers accounts for less than 70 % of the water collected by plateau pool and more than 80 % for the valley bottom pools. Almost all the water running off to the sinks pools infiltrates rapidly and deeply into the ground. The valleys pools (both valleys bottom and sink) appear to be major contributors to the recharge of the upper aquifer. The proportion of the Pool Monitoring Area water balance that is taken by the deep infiltration varies greatly depending on the temporal distribution of rainfall. Whereas similar seasonal were recorded in 1992 and 1993, it is estimated that 5% of the water precipitated over the valley pool watershed infiltrated towards the aquifer in 1993 and more than 10 % in 1992. This difference is explained by a very irregular time distribution of precipitation in 1992, most of major rainfall events being observed over a short period.

Keywords : Sahel, Niger, degradation of drainage network, endoreic system, temporary pools, evaporation, deep infiltration, aquifer recharge, water balance, variability in space and time, rainfall